

A HIBADIAGNOSZTIKAI BERENDEZÉSEK FEJLŐDÉSE

A Magyar Honvédségnél üzemeltetett, gázturbinás hajtóművel rendelkező légi járművek üzemeltetési módszere kötött ciklusidejű. Ez azt jelenti, hogy minden egyes alkatrész meghatározott ideig üzemelhet, függetlenül attól, hogy még nem hibásodott meg. Ennek hátránya egyrészt az, hogy a hibátlan alkatrész sem használható a ciklusidő vége után, másrészt a keletkező — ciklusidőn belüli — meghibásodás nem mutatható ki korai szakaszban. Célszerű olyan módszert alkalmazni, amely preventív módon a repülésbiztonságot növeli és a gazdaságosságot is javítja. Erre adhat megoldást az állapot szerinti üzemeltetés bevezetése, amelynek egyik eszköze lehet a hajtómű rezgésdiagnosztikai vizsgálata. A módszer lényege az, hogy az üzemelő hajtómű egyedi, a gép állapotára jellemző rezgésképet mutat. Az üzemelés során a rezgéskép esetleges megváltozása egyértelműen utal az állapotban bekövetkező változásra, az esetleges meghibásodások kezdetére, helyére és jellegére. Így szakszerű beavatkozással a légi jármű kevesebb időre esik ki az üzemből, a repülésbiztonság is nő, és jelentős gazdasági megtakarítás is elérhető.

Az állapot szerinti karbantartás, a bevezetőben említett repülésbiztonsági és gazdasági okok miatt már régóta foglalkoztatja a tervezőket és az üzemeltetőket. Célszerű áttekinteni az ilyen jellegű rendszerek fejlődését, a kezdeti megoldásokat és a jelenleg alkalmazott, illetve tervezett rendszereket. A publikált megoldások közül néhányat kiragadva a fejlődés a következőkben szemléltethető.

John F. Moran és Harrys P. Shay 1971-ben ismertette a GE Company-nál kifejlesztett „Go-No Go” típusú „engedélyező” ellenőrző rendszert [1].

Az általuk ismertetett rendszer kis költségigényű és egyszerűen üzemeltethető. Az üzemeltető számára elsődlegesen csak arra ad információt, hogy a vizsgált hajtómű biztonsági szempontból üzemeltethető-e.

Az önálló, hordozható egység csatlakoztatva a hajtóműbe beépített érzékelőhöz, automatikusan biztosítja a hajtómű kritikus görbéit, és összehasonlítja a tárolt üzemi határgörbékkel. A karakterisztikák összehasonlításra kerülnek a korábbi mérési értékekkel, amely lehetőséget teremt veszélyes károsodási folyamatok felismerésére. A karakterisztikák pillanatnyi értékei megjeleníthetők és adathordozóra elmenthetők, amelyek későbbi mérésekhez referenciául szolgálhatnak.

Az ismertetett rendszert úgy fejlesztették ki, hogy alkalmas legyen egyszerű és gyors tesztek elvégzésére, a normálistól eltérő hajtómű üzemállapot vagy folyamat észlelésére. Ez a fejlesztés jelentős eredményeket hozott, a légi jármű repülési alkal-

massága és biztonságának növelése terén, valamint a repült órákhoz viszonyított, szükséges üzemeltetési idő csökkenésében. Az állapot szerinti üzemeltetési módszer előnye hamar megmutatkozott az üzemidő szerinti üzemeltetéssel szemben.

A berendezés kialakításánál a következő követelmények kielégítését tekintették elsődlegesnek:

- a rendszer rögzítse a következő hajtómű paramétereit: rotorok fordulatszámjai, üzemanyag fogyasztás, a hajtómű több keresztmetszetében mért nyomás és hőmérsékleti értékek;
- mért paraméterek alapján különböző hajtómű jelleggörbék meghatározása, amik utalhatnak a hajtómű üzemi állapotára;
- a hajtómű karakterisztikák számításához szükséges külső légnyomás és hőmérsékleti értékeket érzékelése és a megfelelő korrekciók elvégzése;
- a kiszámított hajtómű karakterisztikák kétféle vizsgálata az üzemeltethetőség megállapítására. Az első vizsgálatnál a karakterisztikát egy definiált határgörbével hasonlítják össze (korrekcióval ellátott hajtómű fordulatszám funkció), míg a másikonál a korábbi mérési eredményekkel vetik össze az aktuálisat, s a változás jellegéből „trendjéből” következtetnek a rendellenességre utaló folyamatokra;
- az adatok kijelzőn és/vagy adathordozón legyenek elérhetők. Dátum, gyártási szám, hajtómű üzemidő elmentése szintén szükséges;
- a rendszer kezelése szakképzetlen földi személyzet (pl.: sorkatona) számára is egyszerű legyen;
- teljekörű öntesztelő képességgel rendelkezzen;
- a rendszer nagyfokú rugalmasságot és programozhatóságot tegyen lehetővé, a további fejlesztésekhez és típusváltáshoz.

A következőkben ismertették a megfogalmazott követelmények alapján kifejlesztett rendszert, és bemutatták a kezdeti alkalmazást, a General Electric J-85-ös hajtómű tesztelése során. (A J-85-ös 1960-ban rendszeresített, axiális átömlésű, 1-forgórészes sugárhajtómű).

A hajtómű érzékelőihez csatlakoztatott teszter blokkvázlatát a 2. ábra szemlélteti. A hajtómű kiválasztott pontjain elhelyezett analóg érzékelők adatait a hajtómű 100%-os fizikai fordulatszámánál rögzíti.

A rögzített adatok a következők: hőmérsékletek, nyomások, üzemanyag fogyasztás, áramlási keresztmetszet, a forgórész fordulatszám.

Ezen belül a mért nyomásadatok a következők:

- külső légnyomás (p_o);
- kompresszor belépő össznyomás (p_{T2});
- kompresszor belépő statikus nyomás (p_{S2});
- kompresszor kilépő össznyomás (p_{T3});
- kompresszor kilépő statikus nyomás (p_{S3});

— turbina kilépő össznyomás (p_{T5}).

A mért hőmérsékleti adatok a következők:

- környezeti hőmérséklet (T_0);
- kompresszor kilépő hőmérséklet (T_3);
- kiáramló gáz hőmérséklet (T_5).

Egyéb mért adatok:

- üzemanyag fogyasztás;
- áramlási keresztmetszet;
- fordulatszám.

A mért értékek a teszteren megjeleníthetők és adathordozón rögzíthetők. Az érzékelők adatai közel 200 csatorna/másodperc multiplexer sebességgel kérdezhetők le. A vonali, vagy zaj okozta véletlen hibalehetőségek elkerülése és elnyomása érdekében, az adatokat átlagolják (18-as átlagszám).

A rendszer által végzett számítás menete magába foglalja a korrekciós faktorok külső hőmérséklet és nyomás szerinti számítását (Θ, σ), a módosított hajtómű fordulatszám számítását ($N, \sqrt{\Theta}$), amelyek a mért adatokból származnak és az engedélyező tesztekhez szükséges hajtómű paraméterek számítását. A General Electric J-85 típusú hajtóművénel – a rendszer kezdeti alkalmazásánál – a bemeneti jelekből következő hat paramétert számították ki:

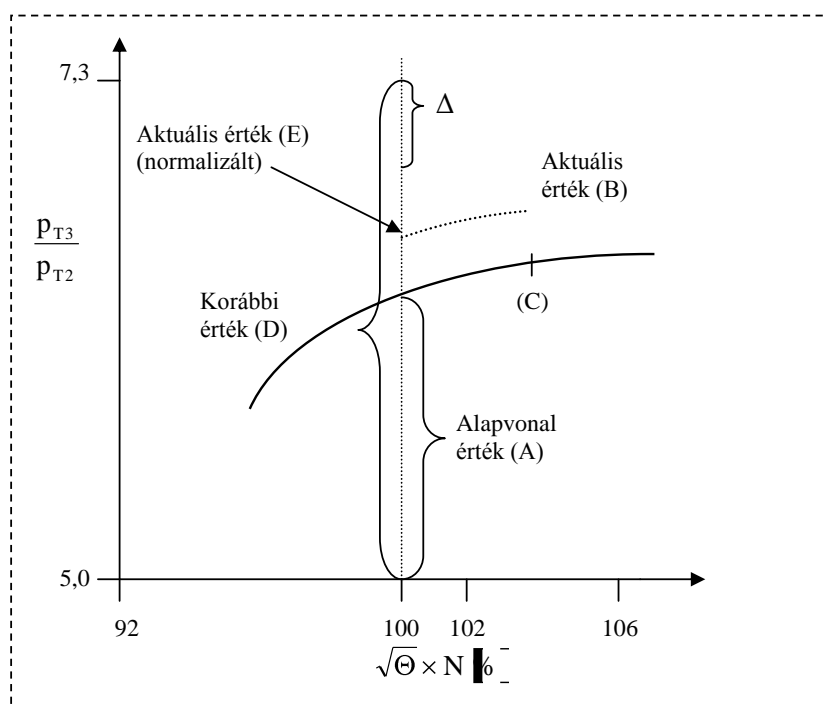
- kompresszor nyomásviszony $=f(p_{T3}, p_{T2})$;
- kompresszor nyomásviszony $=f(p_{T2}, p_{S2})$;
- kompresszor hatásfok $=f(p_{T3}, p_{T2}, T_3, \Theta, \sigma)$;
- helyesbített üzemanyag-fogyasztás $=f(W_f, \Theta, \sigma)$;
- hajtómű nyomásviszony $=f(p_{T5}, p_{T2})$;
- helyesbített kilépő gáz hőmérséklet $=f(W_f, \Theta, \sigma, T_2, T_5)$.

A számításokat a rendszerben hagyományos elektronikus számológép végzi. Ez egyszerű programozhatóságot és alacsony költségigényt biztosít.

Az 1. ábra példaként bemutatja a kompresszor nyomásviszonya alapján végzett, az üzemeltetés engedélyezésére vonatkozó ellenőrzést, a mért paraméterek segítségével.

Hasonló eljárással veszik figyelembe a többi mért paramétereket is, a hajtómű állapotának ellenőrzésére.

Az 1. ábrán a folytonos görbe az adott karakterisztikára vonatkozó referencia-, vagy határértékgörbét jelenti. A rendszerben ezt a görbét matematikai formában tárolják, amely vertikálisan eltolható egy adott referenciaérték beállításával. Ez a funkció természetesen az üzemeltető számára nem elérhető. A pillanatnyi kompresszor nyomásviszony a mért p_{T2} és p_{T3} paraméterek hányadosával határozható meg. A hajtómű fordulatszáma szintén egy mért adat, melyet a $\sqrt{\Theta}$ és σ paraméterekkel korrigálnak. Ez a két koordináta érték jelöli ki a grafikonon a D pontot.

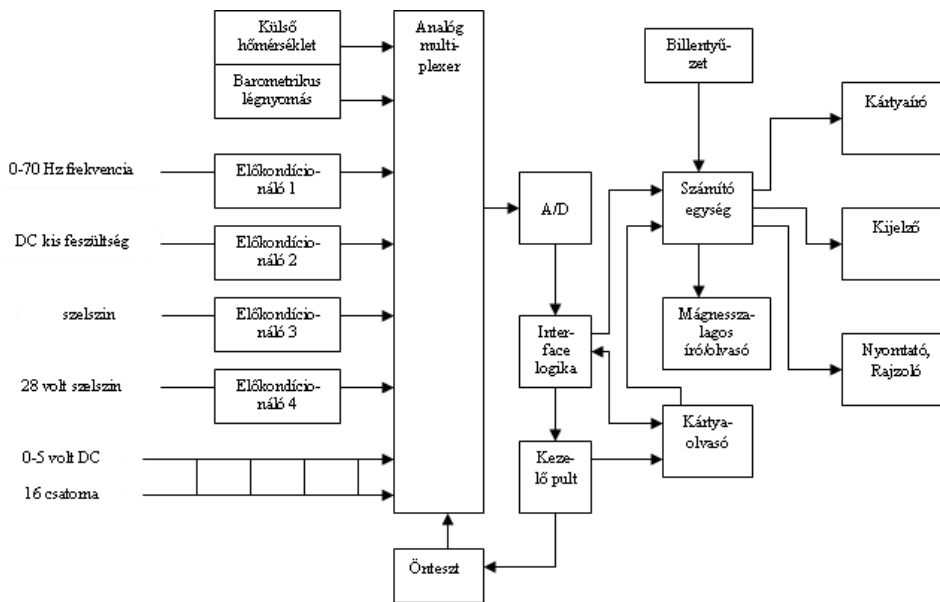


1. ábra. Az analízis módszere

A bemutatott példában a korrigált hajtómű sebesség 102%. Ezért a C pont kiszámításához a tárolt görbét kell felhasználni, és miután a mért pillanatnyi érték (B) eléri ezt az értéket, a hajtómű ezen kritérium szerint üzemeltethető.

Az üzemeltethetőség másik feltétele magába foglalja az utoljára és a korábban mért értékek trend jellegű összehasonlítását. Ez szükségessé teszi azt, hogy az adatokat ugyanannál a korrigált hajtómű sebességnél történjen. Ezért az adatokat 100%-os sebességre normalizálják. Az 1. ábrán a B és a C pont közötti különbséget adják hozzá az A ponthoz, mellyel az E pont szerinti pillanatnyi normalizált érték adódik.

Az 1. ábrán lévő Δ érték szemlélteti a szóban forgó karakterisztikára megengedett változást. A 2. ábrán az adatgyűjtő és kiértékelő rendszer blokkdiagramja látható.



2. ábra. A hajtómű ellenőrző rendszer blokkdiagramja

A fent bemutatott rendszert prototípusként a General Electric J-85-ös hajtómű tesztelésénél alkalmazták. A további fejlesztés a berendezés kompakt kialakítására, a méret csökkentésére és a memória bővítésére irányult. A rendszert földi tesztekre alkalmazták, de hasonló berendezéssel hajtóműveket légi üzemelés során is vizsgáltak.

Az állapot szerinti üzemeltetés és karbantartás igénye, az elektronika fejlődésével, pontosabb, több paraméteren alapuló rendszerek kiépítését szorgalmazta. Igényként merült fel, hogy az üzemeltetés engedélyezésén túlmenően pontos információk is szerezhetők legyenek a változások okaira és a szükséges beavatkozások megállapítására. Ez előtérbe hozta, az ún. szakértői rendszerek fejlesztésének kérdését. Szükségsszerűvé vált az üzemeltetés során szerzett tapasztalatok integrálása az ellenőrző rendszerekbe.

Az ilyen rendszerek korai típusainak egy tipikus példája a Suhayya Abu-Hakima, Philippe Davidson, Mike Halasz, Sieu Phan alkotta csoport által fejlesztett JETA (Jet Engine Technical Advisor) rendszer [2].

Munkájuk egy elfogadott ismeretbázisú diagnosztikai eszközt mutat be, amely elterjedten alkalmazható a sugárhajtóművek üzemeltetésénél. A rendszert a J-85-ös sugárhajtómű diagnosztika kutatási eredményeire támaszkodva alakították ki. A módszer szükséges alapjait a különböző diagnosztikai módszerek együttes eredményei szolgáltatták.

Maga a rendszer egy a különböző jelenségek összefüggéseire alapuló „fa”-struktúrára épül, melyben a jelenséghalmazok hajtómű-specifikusak. A „fa”-struktúrában levő ismeretanyagok ok-okozati összefüggést és ennek megfelelő döntési stratégiát jelölnek ki. Mint látható ennél a rendszernél már nem csak a paraméterek számának növelése volt a cél, hanem az, hogy megfelelő stratégiával azok értelmezhetővé váljanak és összefüggéseik egyértelműsíthetők legyenek.

A mért paramétereken túlmenően a rendszer részét képezik a jellemző „meghatározások”, írásos információk, vázlatok és az eredmény értelmezéséhez szükséges egyéb ismeretanyagok.

A laboratóriumi mintapéldány 1988 decemberében készült el. A prototípus a General Electric J-85-CAN-15 sugárhajtómű több gyorsítási problémáját kimutatta, majd sorozatos földi ellenőrző vizsgálatokba vonták bele, melynek eredményeit a leendő felhasználók értékelték.

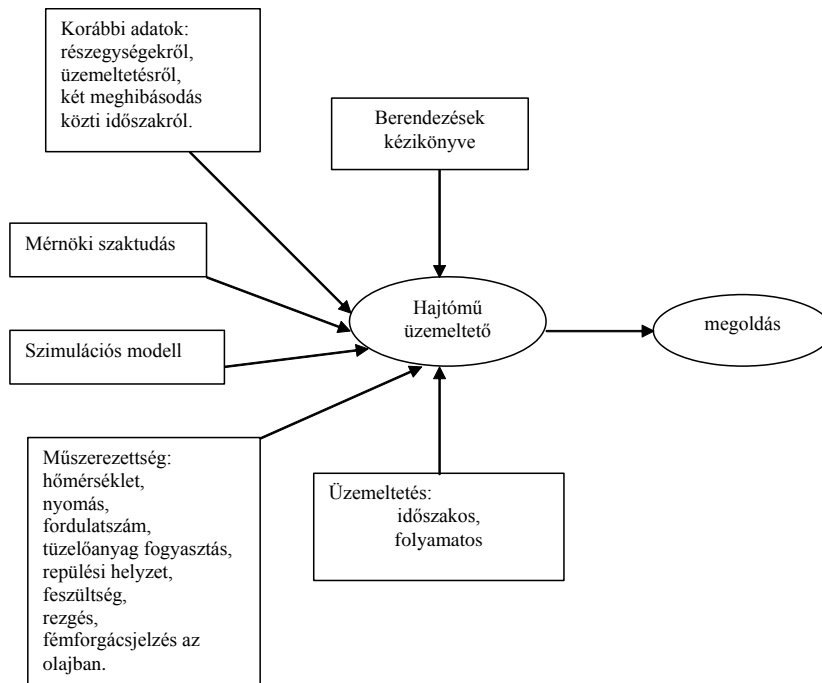
A rendszer fejlesztése során végzett elméleti munka rávilágított a hajtóművek állapotellenőrzésének és hibadiagnosztikájának összetett problémájára, amihez a már elterjedt mesterséges intelligencia (Artificial Intelligence – AI) módszereit hívták segítségül. A projekt egy gépészmérnök csapat által vezetett hajtómű laboratóriummal együttműködésben készült, és egy nagyszabású tanulmány része volt, amit a laboratórium hajtómű állapot ellenőrzéssel (Engine Health Monitoring – EHM) kapcsolatban készített.

Az EHM és a hiba diagnosztika általános törekvése az üzemeltetés szervezésének, a karbantartásnak, a tervezés minőségének a javítása és a hajtómű üzembiztonságának a növelése. Ezek a törekvések teret kapnak a hajtómű műszaki felülvizsgálatánál, határérték túllépéseknél, és a részegységek elhasználódásának nyomon követésénél.

Az AI módszer alkalmazása az EHM-nél számos előnnyel járt. Elkerülhetőek lettek a hajtómű alkatrészek hibás döntés miatt történő kiszerelese, a földi kiszolgáló személyzet téves döntései, elősegíthetővé vált a magas színvonalú üzemeltetés kis gyakorlattal rendelkező műszaki szakemberekkel, a hajtómű javítások színvonalának fejlesztése és gyorsítása, a hajtómű élettartam növelése, és a döntéshozatali mechanizmus központosítása, közben tartva a mind növekvő információ folyamat (lásd 3. ábra).

A sugárhajtóműveknél végzett diagnosztikai és a hibakeresési eljárások, előzetes adatgyűjtő és értékelő tevékenységként szolgáltak az AI számára, és leegyszerűsítették az EHM-et, valamint a hiba meghatározását. A jelenleg üzemeltetést végző szakember személyzet a hajtóműhöz kiadott terjedelmes hibakeresési útmutató alapján gyakran hosszadalmas módszereket kénytelen követni. Ezek a szakemberek idővel egyéni diagnosztikai módszereket és eljárásokat alakítanak ki, ahogy tapasztalataik összegyűlnek. Az így keletkező értékes észrevételek a rövidebb diagnosztikai eljárást szolgálják és a hibakereséshez szükséges időt, lecsökkentik. A hibakeresésnél az a cél, hogy behatároljuk és eltávolítsuk a hibás alkatrészt, illetve üzem közben cserél-

hető (modul rendszerű) berendezésnél a cserét amint lehet, elvégezzük. A tesztek első körben beépített hajtóműveken végzik, és ha az nem hoz kielégítő eredményt, második lépcsőben a kiépített hajtóműveket próbapadi tesztek alá vetik.

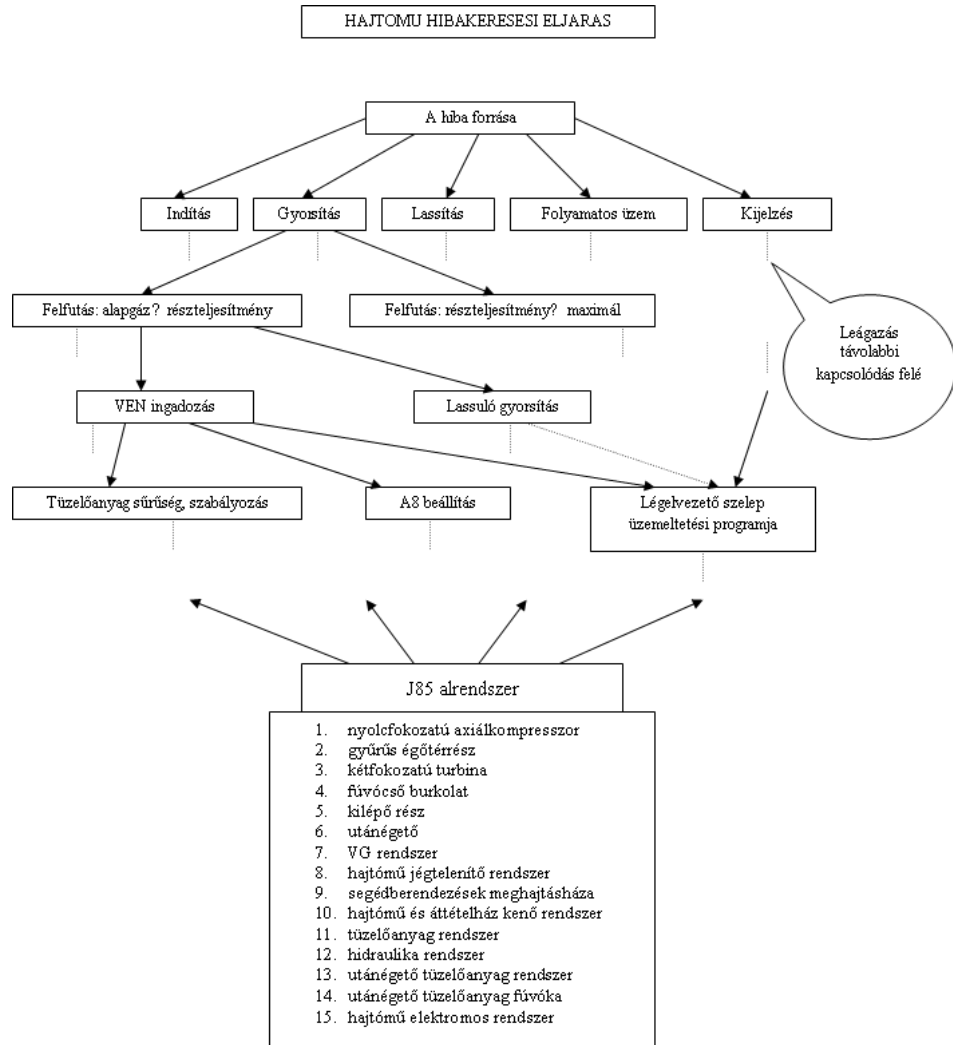


3. ábra: Egy hajtómű üzemeltető munkakörnyezete

A sugárhajtómű diagnosztika elősegítésére, általánosan alkalmazott diagnosztikai eszközzel, különböző sugárhajtóműveken hibakeresési eljárásokat végeztek. A JETA rendszer újszerűségét és különlegességét az ismeretek értelmezésének explicit volta és az összefüggések hasonló kifejtése jelentette. Az ismeretek értelmezése a rendszerben inkább explicit, mint implicit. Az explicit ismeret-ábrázolásban, az ismeret leírásának igazolása, vagy oka, alapvető eleme a szóban forgó ismeretnek. Ez nagyban eltér a klasszikus, szabály-alapú döntési rendszertől, mint pl. MYCIN (Buchanan B. G. és Shortliffe E. H. által kifejlesztett Szabályalapú tanácsadó rendszer, Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1984.). A MYCIN rendszerben az ismeret ha-akkor szabályok alapján van ábrázolva, melynek igazolása mögött implicit rendező és kódoló szabályok vannak. Így a döntéshozatal sorrendje kihat a diagnosztikai eredményre, és téves következtetéseket kaphatunk.

Az explicit ismeretek értelmezése konkrét eredményeket hoz. Így hidalható át a diagnosztikai hierarchia, ami a helyi ismeretektől függ, kifejezve minden szintet.

A 4. ábrán példaképpen bemutatjuk az összes előfordult hajtómű meghibásodás JETA következtetési rendszerét. A megfigyelések és a mérések alapján egy hibaág (paraméter-együttes) jelentősége megnőhet, illetve fel kell térképezni azt a leágazást, ami elvezethet a megoldáshoz. Így az explicit ismeretek értelmezése, a következtetési rendszer alkalmazása, nélkülözhetetlen része a JETA-nak.



4. ábra. A JETA következtetési rendszere

Az explicit érvelési stratégiát a 4. ábra szemlélteti. A stratégia elgondolása a diagnosztikai ismeretek áttekintésén és a meghibásodási lehetőségek hierarchiá-

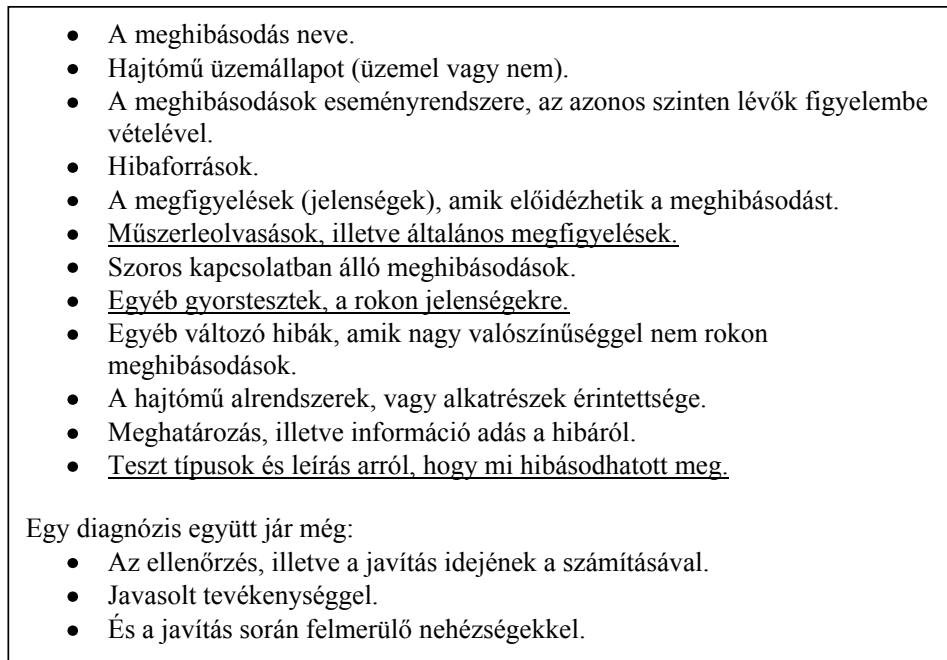
ján alapul. Minden csomópont az ismeretek körébe tartozó egyszerű meghibásodást, vagy problémakört ábrázol. A meghibásodások hierarchia-modellje magába foglalja a diagnosztikai ismereteket, a legáltalánosabbtól a legsajátosabb meghibásodásokig. Így a hajtóműről megalapozott ismereteket lehet kapni, ha általános meghibásodás következik be, például gyorsítási, vagy lassítási hiba. Ezek a meghibásodások mind a hierarchia egy ágához vezetnek, és egyre specifikusabbá válnak az egyes csomópontokon áthaladva. Végezetül eléri valamely alrendszer egy egyedi meghibásodását.

Az egyes új meghibásodási csomópontok bevitele a rendszerbe hatással van a döntéshozatali szabályrendszerre. A szabályrendszer, melynek alapja a korábbi eseményekből származó következtetések és megfigyelések, biztosítja az algoritmus eredményességét a meghibásodások kijelölésében. A szabályrendszer lehetőséget adhat a hierarchiában az ágak között történő ugrásokra, természetesen bizonyos feltételek mellett. Ez a műszaki szakemberek által üzemeltetés során használt egyik stratégia, ha a hibakeresési eljárást kombinálják a jelenségekkel. Ezek inkább közvetett szinteket képviselnek, mint közvetlen leágazásokat.

A JETA probléma megoldási mintáját, az explicit ismeretek értelmezését mutatja be az 5. ábra. Minden meghibásodás (vagy leágazási pont a diagnosztikai hierarchiában) egy egyedi meghibásodási nevet határoz meg. A hajtómű üzemi állapotot (üzemel/nem üzemel) magába foglalja a rendszer. A felhasználó meghatározhatja és behatárolhatja a lehetséges hibákat, ha a hajtómű üzemel, illetve egy másik fajta hibakeresési eljárást alkalmazva, ha a hajtómű nem üzemel. Így az üzemeltetőnek nem szükséges a hajtóművet ismételtén indítani.

Általában minden meghibásodási pont egy már bekövetkezett esemény által jött létre, és megtalálható annak ismerethalmaza, amely kapcsolatba hoz a hierarchiába más meghibásodásokat is. A rendszer megtörtént események tapasztalatait felhasználva tesz javaslatot az üzemeltetőnek, hogy milyen hibakeresési eljárást válasszon. A rendszer a gyakori meghibásodások elemzéséből indul ki, majd fokozatosan halad a ritkábban előforduló hibajelenségek lehetőségeinek vizsgálatára. Meg kell jegyezni, hogy az üzemeltetők gyakran figyelmen kívül hagyják ezt a javasolt hibakeresési stratégiát.

Minden egyes meghibásodást egy üzemi állapot és/vagy jelenség jellemez, ami valamilyen hibaforrás következtében jön létre. Vannak olyan speciális, a hierarchia alsó szintjén ábrázolt meghibásodások, melyeket a kialakult jelenségek jól jellemeznek. A jelek közvetlen megfigyelésekből, vagy gyorstesztekből származnak. A meghibásodások, amik a meghibásodási rendszerben változó meghibásodási ágak felé haladnak, lehetnek azonos, vagy eltérő hierarchikus szinten (lásd 4. ábra légelevelő szelep, üzemeltetési program).



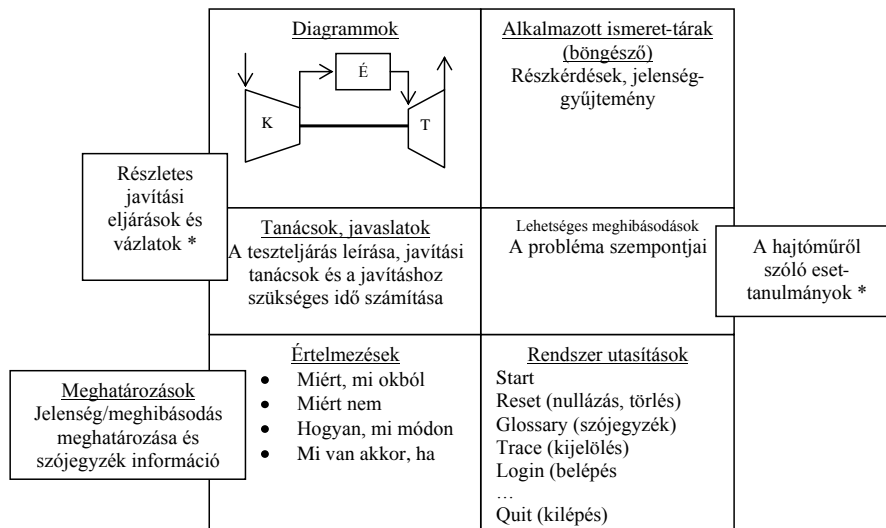
5. ábra. A JETA probléma sémája

A problémamenet következő lépése, a meghibásodást okozó alrendszerek illetve alkatrészek behatárolása, és az üzemeltető tanácsokkal való ellátása, a meghibásodás kijavítását illetően. A javaslat ismerteti a teszt típusát, amivel az üzemeltető behatárolhatja a hibát, és a rendszer, mint szöveges információ, leírja a problémát.

Végül minden meghibásodásnak van értékelése. A javasolt javítási eljárás mellett tájékoztatást kap a felhasználó a javítás közben felmerülő nehézségekről, és az ellenőrzéshez, valamint a javításhoz szükséges időről. Ezek az információk lehetőséget adnak a felhasználónak, hogy felfüggeszse a hibajavítást, és egy későbbi időben visszatérjen rá, ha az idő kötött és a nehézségek meghaladják az üzemeltető idejét, illetve a nehézségek erre rákényszerítik. Ezek az információk alkalmazhatók még a javítások sorrendiségének meghatározására, ha egyszerre több hiba is fellépett.

A JETA a hibakereső- és a szabályrendszer mellett még két másik fajta rendszerrel rendelkezik, ami hatékonyabbá teheti a problémamegoldást. Az egyik, a jelenségrendszer, amely az egyes jelenségek leírását tartalmazza és kombinálva használható a szabályrendszerrel. A másik, a JETA „SÚGÓ-HELP” rendszere, amely kereszthivatkozásokat is tartalmaz a problémákra, jelenségekre, vagy a szabályrendszerre, és az üzemeltető a szakkifejezések tisztázására használhatja. A szakkifejezések meghatározásánál saját szójegyzékrendszer is kialakítható illetve mozaikszó, rövidítésgyűjtemény, amit a felhasználó később is definiálhat, és amelyik eredetileg

meghibásodásoknál, jelenségeknél, illetve eljárás meghatározásoknál tünt fel. A szójegyzék képességei lehetővé teszik, hogy a felhasználó elmélyedjen a meghatározásokban, kereszthivatkozások által rákérdezve sok más meghatározásra, ami megtalálható. A rendszer kezelői felülete, menürendszere a 6. ábrán látható.



6. ábra. JETA felhasználói felülete

A felhasználó a bal felső sarokban egy sematikus hajtóművet talál. Ez a felület szemlélteti az üzemeltetőnek azt a hajtómű területet, amit diagnosztizálni akar. A tanácsadó ablak a képernyő bal oldalán, középen található. Az összes javaslat és javítási eljárás részlet megjelenik ezen a területen.

Az értelmezésnél kiválasztható a kérdés fajtája (a jelenség „miért”, „miért nem” és „hogyan”...) és a meghibásodás következtetése megjelenik a képernyő bal alsó sarkában. Ha a „mi van akkor, ha” jelenség- és hibakombinációkat alkalmazunk, az értelmezés szintén megjelenik az ablakban. Megjegyzendő, hogy ha az ismeretek értelmezése szabatos, az eredmény mechanizmus által az értelmezés nagymértékben leegyszerűsödik.

A felhasználó ha megnyitja a „böngésző” ablakot, belép a jelenségek tárába. A meghibásodások, vagy problémák listája a kijelző bal középső ablakánál látható. A jobb alsó kijelzőn a felhasználó a rendszer parancsokat érheti el. Azok a meghatározások, amiket a felhasználó a szójegyzékből tudni akar, az értelmezési felületen található, egy megnyitható ablakban. Ez az ablak a felhasználói felületen a többi ablak előtt elhúzható, mérete változtatható.

„A hajtóműről szóló esettanulmányok” ablak alkalmas a hajtómű különböző részeinél végzett korábbi hibakeresési folyamatok és eredményes javítások is-

mertetésére. Ez az ismeretanyag frissíthető. Végül itt részletes javítási útmutató és vázlatgyűjtemény is található.

A felkínált terjedelmes ismeretanyag bázis, ami hozzávetőlegesen 120 JETA probléma vázlatot tartalmazott, meggyorsította a J-85-ös sugárhajtómű hibakeresési eljárását. A JETA első ismeretanyag értelmezése és az érvelési algoritmus Sun és Symbolics típusú munkaállomáson futott, ART környezetben. A kivitelezés 1988 júniusában kezdődött és az első kész példányt 1988 decemberében mutatták be. Ezek után a rendszert egy gépészmérnökökből álló csapat földi próbáknak vetette alá.

A rendszer más sugárhajtóművekhez történő alkalmazásakor, az adott hajtóműre vonatkozó ismeretanyagot meg kell szerezni. 1989 kezdték meg a General Electric F-404-es hajtóműre a JETA adaptálását.

Később a sugárhajtómű teljesítmény-szimulációját kezdték el fejleszteni, mivel az ilyen modell alkalmazása jó esetben mélyebb szintű diagnosztikai ismereteket nyújtott a JETA számára. Ez második generációs rendszer az akkori tervek szerint valós idejű hajtómű ellenőrzést és diagnosztikát valósított meg. Ennek próbaüzemét a 90-es évek elején kezdték meg.

Ugyanebben az időben az ausztrál szakemberek is hasonló eredményekhez jutottak. Azonban ők is szembesültek egy jelentős problémával: a számítástechnika akkori fejlettsége, az információ tárolása és a processzor működési sebessége komoly akadályt gördített a fejlesztők elé.

Az Ausztrál Védelmi Tudomány és Technológiai Szervezet Repülési Kutató Laboratóriuma, a TF-30-as hajtóműhöz fejlesztett ki egy hibadiagnosztizáló és behatároló rendszert (1989) [3].

Olyan ötletes koncepciót mutattak be, amely iránymutató lehet a rendszerben lévő repülőgépek gázturbinás sugárhajtóművein történő hibakereséseknél. Ez megerősítette azt, hogy a rendszerek fejlesztésére üzemi körülmények között is van lehetőség.

A diagnosztizáló-szakértői rendszerrel a fejlesztők ismét hivatkoztak a kifejlesztett rendszerrel szorosan együttműködő mesterséges intelligenciára. A 80-as évek elején kezdték alkalmazni a légierőnél használt gázturbinás sugárhajtóműveknél a mesterséges intelligenciát, hogy javítsák a hibakeresés hatékonyságát. A szakértői rendszereket általában már létező berendezéseknél alkalmazták, és az általuk nyert információkkal az ismeretanyagot bővítették. Javaslat született egy prototípus megépítésére az F-111-es repülőgép TF-30-as hajtóművéhez, a bemutatott koncepció alapján. A megépített prototípust kezdetben interaktív hibadiagnosztizáló és leválasztó rendszernek nevezték.

A prototípus bizonyítékul szolgált arra, hogy a korábbi erőfeszítések nem voltak hiábavalóak. A Repülési Kutató Laboratórium által kifejlesztett szakértői rendszer gázturbinák karbantartásánál történő diagnosztizálásra volt alkalmas. A szakértői rendszer a képesség fejlesztését úgy biztosította, hogy a legkisebb változtatásokkal alakította ki a rutinvizsgálatokat, a felelőségi köröket és azokat

összekapcsolta a meglévő eljárásokkal. A rendszer gondoskodott arról is, hogy az üzemelés során felmerülő problémák reprodukálhatók legyenek. Ez a képesség lehetőséget adott a műszaki szakemberek képzésére.

F-111C repülőgéphez rendszeresített TF-30-as hajtómű üzemeltetésének teljes története rendelkezésre állt. A hajtómű hibabehatárolási módszerei teljes mértékben kézi erővel történtek, ugyanis még nem volt számítógépes adatbázis a meghibásodásokról. Éppen ezért lehetett azt feltételezni, hogy a rendszer alkalmazásával, az üzemeltetési módszereken való legkisebb változtatás is nagy előnyökkel járhat, amit a hajtómű részletes üzemeltetési történetének megléte segített elő.

Az Ausztrál Védelmi Tudomány és Technológiai Szervezet szakértőiből jött létre a fejlesztést irányító csoport. A szakértők különböző laboratóriumokból, kutatóintézetekből jöttek, de a légierő képviselői is jelen voltak a csoportban. A fejlesztést vezető szakembereket tanácsokkal látták el a prototípus kifejlesztésénél, megvizsgálták a szerződéseket és megbecsülték a prototípus eredményességét.

Az irányító csoport nem szólt bele a hardver és a szoftver részletes fejlesztésébe, de kikötötték a sokoldalú alkalmazhatóságot és a teljesítményt.

Célul tűzték ki, hogy a rendszer legyen képes megfelelni a piac követelményeinek, legyen alkalmas az összes olyan diagnosztikai eljárás elvégzésére, ami a hiba meghatározáshoz szükséges és ne legyen túl költséges a rendszerbeállítása. A prototípus öt hétig próbaüzemen vett részt a légierő egyik bázisán.

Az Ausztrál Légierő F-111C típusú repülőgépeibe Pratt & Whitney TF-30-P3-as hajtómű lett beépítve. Ezeket a repülőgépeket a 60-as években tervezték és nem rendelkeztek ellenőrző rendszerrel. Emiatt a műszaki szakemberek a hajtóművön végzett hibakeresési eljárások során sok nehézségbe ütköztek, ugyanis nem állt rendelkezésükre megfelelő adat az egyes problémával kapcsolatban. Tapasztaltabb műszaki szakemberek felismerték, hogy milyen hiba valószínűsíthető az okok alapján, így a meghibásodások egy része tapasztalat alapján már behatárolható volt. Mivel az Ausztrál Légierő csak kis számban rendszeresített ebből a repülőgép típusból, a már ismert meghibásodások nem fordultak elő túl gyakran, ha egyáltalán a megfelelő műszaki szakemberek ehhez a hajtómű típushoz rendelkezésre álltak. Ezek az okok vezettek ahhoz az elhatározáshoz, hogy egy számítógép alapú szakértői rendszert hozzanak létre. A számítógép intelligens tanácsadó szerepét töltötte be, mivel rendelkezett a mintaként tárolt korábbi meghibásodások okaival. A rendszer interaktív hozzáférést tett lehetővé, viszont nem volt alkalmas az összes felmerülő meghibásodás kezelésére. A rendszert, adatkészletének köszönhetően kiterjedten lehetett alkalmazni, a célrendszer és a tudásalapú rendszer közötti közvetlen kapcsolat esetén, ami több automatikus hibajelzést és behatárolást biztosított.

Kísérleti célból egy repülőgépre telepített berendezéssel, a hajtóművön átfogó hibakeresési eljárást végeztek. Az egyes hajtómű rendszereken az üzemeltetés során

átfogó hibakeresés valósult meg, és a meghibásodott hajtómű rendszerek a hajtóműből kiépítésre kerültek (például a fő- és utánégetés tüzelőanyag szabályzó).

A berendezés alapjául az Intel 80386-os alapú személyi számítógép szolgált, amire Microsoft Windows/386 lett telepítve. A dokumentációk terén a fejlesztők három területen ütköztek nehézségekbe: a hajtómű alapfunkciói, a hajtómű rendszerek és az utánégető rendszer. A hajtómű üzemeltetési tapasztalatai során összegyűlt információkat feldolgozva több mint 300 eljárást alakítottak ki, ami a teljes ismert kör 25%-ára tehető. A valódi probléma csak ekkor adódott, ugyanis a számítógép memóriája nem tette lehetővé a teljes ismeretanyag együttes kezelését. Végül is 4 Megabyte memória elegendőnek bizonyult a rendszer számára (1989) és sikerült kialakítani úgy, hogy elég gyors legyen. Ennél kisebb memória, vagy lassabb processzor jelentősen lerontotta volna a rendszer teljesítőképességét.

A prototípus kifejlesztését, repülőgépbe épített hajtóművön végzett mérések, hibakeresések segítették elő, azonban a további fejlesztéseknél a műszaki szakemberek próbapadi méréseket is végeztek. A rendszer által feldolgozott információk hangár, vagy irodai munkakörnyezetben is felhasználhatók voltak.

A felhasználó, ablak rendszerű felhasználói felület segítségével, lehetőséget kapott az üzemeltetési tapasztalatok rendszerezett gyűjtésére, a már ismert problémákkal való összehasonlításra és ismereteinek bővítésére. A rendszer a körülmények ismeretében meghibásodási okokat kínált fel, mintegy konzultációt folytatva a műszaki szakemberrel. Az összegyűlt üzemeltetési tapasztalatok a későbbi fejlesztésekhez elengedhetetlenül szükségesnek bizonyultak.

A földi tesztek és az azt követő bemutatók rávilágítottak arra, hogy ez az egyszerűen használható felhasználói felület nagyon jó fogadtatásra talált, elsősorban a kezdő számítógép felhasználók körében. A könnyen értelmezhető rendszerkörnyezet, információkijelzés lehetővé tette, a kezelőszemélyzet rövididejű átképzését.

A hajtóműről szóló ismeretek két forrásból táplálkoznak: a hibakeresési útmutatóból, amit a hajtóműgyártók készítenek, és az idősebb műszaki szakemberek üzemeltetési tapasztalataiból. Mindkét helyről érkezhethet azonban hibás információ. A normál hibakeresési eljárás megenged kisebb egyszerűsítéseket és nem ad gyors megoldást a hiba megtalálására, kivéve egyértelmű meghibásodásnál. A személyes tapasztalat sokszor vezet közvetlenül a megoldáshoz, és csak akkor, ha a meghibásodás ebben a vonatkozásban már ismert. A Repülési Kutató Laboratórium korábbi tanulmányai már bemutatták azt, hogy a műszaki szakemberek egy problémát hogyan közelítenek meg. Egy szakember azokat az ismereteket alkalmazza, amelyeket a berendezés hibakeresési útmutatója közöl. A megközelítés legnagyobb problémája a leírt szerkezetnél, a szakmai ismeretek kötöttsége. Ennek az a gyengesége, hogy magába foglal valószínűtlen meghibásodásokat, elhagy lehetséges meghibásodásokat és sok kérdést hagy megválaszolatlanul.

A prototípus kezdeti változata számos meghibásodási okot ismertetett. A lehetséges okokból nyilvánvalóan kitűnt, hogy egymással nem összefüggő problémákról van szó.

Két olyan megközelítés került ismertetésre, ami megkísérelte feloldani a nehézségeket.

Az első megközelítésben a fejlesztők megállapodtak a hajtóműgyártóval (Pratt & Whitney), hogy adjon tanácsokat a probléma meghatározás fizikai alapjaira, kérdések születtek a hibakereséstől és okozati kapcsolatoktól a tényleges meghibásodásokig. Ez a lépés fontos ismeretekkel szolgált a fejlesztéshez. A fejlesztő csapat ellátogatott a hajtómű gyártóhoz a prototípussal, és a rendszer által készített vizsgálati eredményeket összehasonlították a gyártó mérnöki gárdája által végzett hasonló mérésekkel. Az eredmények feldolgozásával számos eljárást tisztáztak, és jó néhány hibát kiküszöböltek, ami gondok forrása lehetett. Az új eredmények alapján a prototípus egy javított változatát készítették el, amit a hajtómű gyártónál további tesztek alá vetettek.

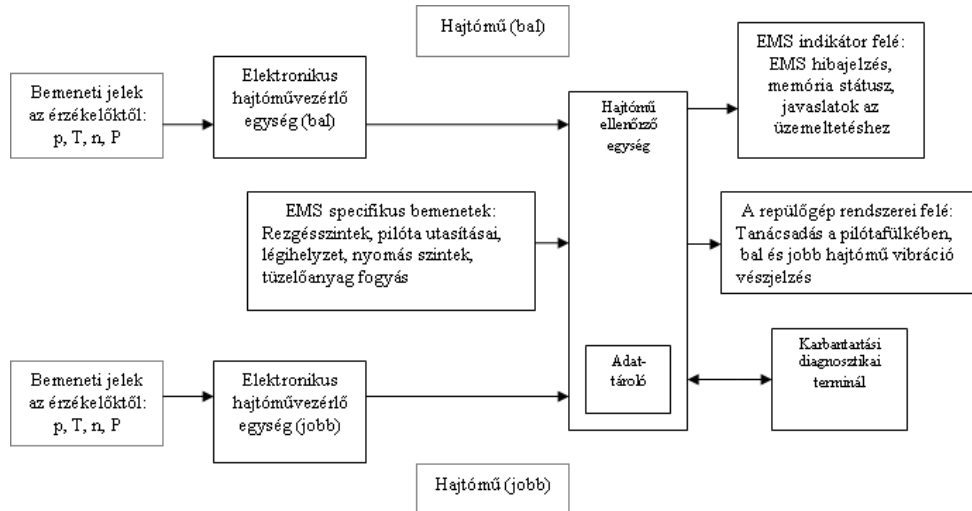
Olyan igény született, hogy a hajtóműgyártó a hibakeresési útmutató elkészítésénél valamennyi feltárt meghibásodási mintát hasznosítsa, vizsgálja felül a hajtómű megbízhatósági adatait, és a lehetséges módosításokat integrálja a fejlesztéseibe.

A második megközelítésben, a szakmai ismeretekben rejlő ellentétekre kerestek megoldást. Ez egy olyan mechanikai alapokon nyugvó minőségi modell létrehozását foglalta magába, amin a meghibásodási okok vizsgálhatók. A hibadiagnosztizáló és behatároló rendszer ismert okokra visszavezethető meghibásodások feldolgozásával lett tervezve. A rendszer ellenőrző procedúrája a hajtómű fizikai felépítéséből különböző sajátos meghibásodásokra és azok okaira tett következtetéseket. Ha a vizsgálat nem mutatta ki a hiba okát, akkor a hibadiagnosztizáló és behatároló rendszer által még lehetőség volt a hiba behatárolására. Az elméletet kipróbálva, sajátos meghibásodásra utaló jeleket figyeltek meg a vizsgált hajtómű üzemelésekor. A meghibásodásra utaló jeleket megvizsgálták a diagnosztikai rendszerrel, ami pontosan meghatározta a hiba eredetét. A kísérletekkel arra mutattak rá, hogy teljes körű ismeretanyagot kell összegyűjteni a lehetséges meghibásodásokról. A további munkák olyan eljárások kialakítását célozták, amelyek ez utóbbit valósítja meg. A végső fizikai modell segítségével minél jobban meg kell közelíteni a hibás (valós) modellt, és így nem szükséges a hajtómű üzemeltetőjének tapasztalatára hagyatkozni.

Ezzel a két megközelítéssel a szakemberek közelebb kerültek a meghibásodás valós okainak feltáráshoz, és nyilvánvalóvá váltak a meglévő dokumentációkban lévő eltérések.

Az állapotdiagnosztika fejlődése együtt járt, és ma is együtt jár a számítástechnika fejlődésével. A fejlesztés során ideális állapotnak tekinthető, ha a hajtóműről szóló elméleti ismeretek, a gyakorlati tapasztalatok és a megfelelő számítástechnikai háttér rendelkezésre áll.

Napjaink legkifinomultabb hajtómű ellenőrző rendszerei (Engine Monitoring Systems – EMS) teljesítenek szolgálatot számos katonai repülőgépen (lásd 7. ábra) [4]. A B–1B, az F–16C, az E–2C és a fejlesztés alatt álló P–7A típusú repülőgépekben összegyűjtik és elemzik a különböző hajtómű adatokat, veszjelzést adnak a légijármű személyzete számára a pilótafülke jelzőablóján különleges helyzet esetén, és esetenként a földi kiszolgáló személyzetet is értesítik.



7. ábra. Tipikus hajtómű ellenőrző rendszer

A hajtómű rezgésdiagnosztikai mérését kiegészítik a fordulatszám, hőmérséklet, nyomás, hajtómű üzemmód, életciklus és dátum adatokkal, amely minden hajtómű-nél része az üzemeltetési naplónak. Az adatok értelmezése, és a tapasztalatok is igazolják, hogy jelentősen csökkenthető a beavatkozás és nagyjavítások költsége.

Mielőtt a hajtómű ellenőrző rendszereket alkalmazták volna, a légijármű személyzete és a földi kiszolgáló személyzet a fedélzeti hajtómű ellenőrző műszerek szerint állapították meg a hajtómű állapotát. Kézzel írt üzemeltetési napló és a repülés utáni eligazítások során elmondott tapasztalatok alapján végezték a hajtómű földi üzemeltetését. Mivel a földi szakszemélyzet is érdekelt volt a repülés biztonságát illetően, érzékelőket helyeztek a kritikus pontokra, és földi hajtóműpróbán ellenőrizték a felmerült kérdéseket. Az üzemeltetés során több hajtómű ellenőrzést végeztek, és több ellenőrző repülést írtak elő a javítások alatt. Ez az eljárás, nemcsak hogy költségesebb volt, hanem a probléma megoldása előtt sokszor a repülőgépet feladatra is el kellett küldeni.

Az F–16-oson alkalmazott számítógépes hajtómű ellenőrző rendszer fedélzeti változatai feldolgozzák, kijelzik és tárolják az adatokat, ami letölthető a földi üzemeltetés során. Már több mint 1000 ilyen berendezés lett telepítve az F–16-osokon világszerte. A rendszer a hajtómű ellenőrzéseken túl feldolgozza az adatokat, és

elkülöníti a meghibásodásokat. Az adatgyűjtés támogatja a trend analízist és az életciklus követést. Biztosítja még a repülési adatrögzítést, az engedélyező állapotot és az összeköttetés lehetőségét a földi támogató szoftverrel. A hajtómű élettartam követéséhez az alábbi adatok szükségesek: hajtómű üzemidő és üzemciklus, amely magába foglalja a teljes hajtómű üzemidőt és a légi üzemidőt; üzemidő számláló, hajtómű indítási ciklus számláló adatai; nagynyomású turbinalapát hőmérséklet; alacsonyciklusú kifáradási szám; teljes termikus ciklus és közepes utazó ciklus.

A diagnosztikai célú hajtómű ellenőrzések egyszerűen kimutatnak olyan üzemi határérték túllépéseket, mint túlhevülés, túlnyomás és fordulatszámugrás, amit hajtómű üzemi ciklusok szerint jegyeznek és az üzemi állapotadatok után, mint rendellenességet jeleznek. A legújabb rendszerek által sokkal több adathoz juthatunk, mint korábban. Egy tanulmány szerint, amely átfogó hajtómű ellenőrző rendszerekkel felszerelt repülőgépekről szól, az amerikai haditengerészet 30 000 repült órát jegyzett két repülőszázadban úgy, hogy egy repülőgépet sem veszítettek.

Az EMS alapvetően rezgésmérésre épül. A sugárhajtómű részei úgy, mint forgórészek, turbinák, csapágyak, áttételházak, lapátok, frekvenciákat keltenek, egyedi amplitúdókkal. A részegységek jellemző rezgésképet hoznak létre, amit a hajtómű és a sárkányszerkezetet gyártó cég előzetesen kimért. A hajtóművek, amíg azokon normál frekvenciaspektrum észlelhető, rendkívüli igénybevétel alatt üzemelnek. Ha a spektrum egyes frekvenciasávjai azonosítva lettek, akkor azok változásai utalhatnak a hiba forrására.

Például az áttételház által gerjesztett rezgések 200 Hz körül találhatóak. Ha a frekvenciasáv határát meghaladja a mért jel, valószínű, hogy a fogaskerék fogakat veszített. Hasonlóképpen a kompresszorban, ami 250 Hz körüli frekvencián ad jelet, a vibráció egy szintje kezdődő lapátrepedést jelezhet. A lapátkoszorúknál mért változó szintű jelek kiegyensúlyozatlanságra utalhatnak. Ezek az információk megszerezhetőek a hajtómű szétbontása nélkül, és felbecsülhetetlen értéket képviselnek az üzemeltetés számára.

A rezgésanalízis előtt, egy egyszerűnek tűnő problémát kell megoldani. Kis amplitúdójú jeleket kell észlelni, magas zajszintű háttérből, keskeny sávokra összpontosítva. Az észlelt jelekből nagyszámú frekvenciakomponens elemzése történik. A nehézségek áthidalása érdekében, ún. követő szűrőket és jelkondicionálókat alkalmaznak az új rendszerek. Egy forradalmian új jelkövető, rögzített analóg összetevők mérése helyett digitális feldolgozás útján, nagy rugalmassággal határozza meg a frekvenciákat. Ahogy ezek a szűrők elfogadottak lettek, a valós alkalmazásuk is megindult, mivel egyszerűen illeszthetők frekvenciaelemező szoftverekhez.

A példaképpen ismertetett EMS, a mérőcsatornákról érkező rezgésjelek elemzésénél 32 bites lebegőpontos processzort használ. A véletlen zajokat a mintavételezés szinkronizálásán alapuló átlagolással szűri ki. Az algoritmus pontos rezgés amplitúdó adatokat közöl, amely megállapítja, ha meghibásodás jön létre és összeveti más paraméterekkel. Ez biztosítja a számítógép számára,

hogy az üzemelő hajtómű állapotáról döntést tudjon hozni. A rendszer képes kiválasztani a szignifikáns információ halmazokat. Nagymennyiségű mérési eredmény tárolása ugyanis kockázatos lehet. A korlátozott méretű memória számára csak a lényeges információk tartandók meg.

Ha probléma következik be, az adatok nem csak egyszerűen feljegyzésre kerülnek. Folyamatosan, különböző hosszúságú hajtóműjellemző együttes kerül tárolásra az esemény bekövetkezése előtt és után is. Ez lehetőséget teremt az állapotanalízis során a hibabehatárolásra.

Az automatikus adattárolás kiegészítéseként, a rendszer megkapja a pilóta által a pilótafülkében feljegyzett hajtómű állapotokat. Bármilyen esemény adatai azonnal rögzíthetők egy gombnyomással.

Miután az információ összeáll a fedélzeten, letölthető a földi kiszolgáló személyzet számára és kielemezhető. Minden egyes repülőgép részére megelőző üzemeltetési program dolgozható ki. A műszaki személyzet kitolhatja a hajtómű nagyjavítás időpontját, ha a hajtómű jól üzemel, és különös figyelmet fordíthat a hajtóműre, ha probléma merül fel.

Egy, az amerikai haditengerészet korai EMS-ről szóló tanulmánya szerint két repülőszázad jelentette, hogy az egy üzemóra eső hajtómű karbantartás 0,32 munkaórát vett igénybe, összehasonlítva olyan repülőszázaddal, ahol nem lett rendszeresítve a berendezés. Ott ez az érték 0,62 munkaóra volt, tehát a javulás közel 50%-os. Más tanulmányok szerint az idő előtti hajtómű kiépítés EMS-sel rendelkező századoknál 2,2/1000 óra, míg a flottaátlag EMS nélkül 3,4/1000 óra volt. A felszerelt repülőszázadok 3979 órát repültek a csapatpróbák alatt, míg a nem felszerelt századok csak 2656 órát, hasonló körülmények között. Kiegészítésként megjegyzendő, hogy EMS segítségével lehetőség van a hajtómű optimális beállítására forszírozott üzemmódok esetén, amely jelentős megtakarítást eredményezhet.

A rendszert egy szállító repülőgépen (légi harcállásponton) munkaállomásba integrálva, az adatok kiértékelhetők a repülés során, illetve megjeleníthetők kijelzőn. A rendszer alkalmazható helikopternél és nem sugárhajtóműves légi járműveknél is. A későbbi generációjú EMS-ek könnyebbek és kisebbek lesznek a nagyobb memória és gyorsabb processzor miatt. Ezen előnyök miatt elérkezett az idő, hogy a legtöbb repülőgép EMS támogatással üzemeljen, kihangsúlyozva a repülésbiztonságot és az üzemeltetés hatékonyságát.

FELHASZNÁLT IRODALOM

1. Instrumentation in the Aerospace Industry, Vol. 17. Aerospace Instrumentation Symposium, Las Vegas, 1971.
2. Jet Engine Technical Advisor (JETA), National Research Council of Canada, Ottawa, 1989.
3. Concept Demonstration of the Use of Interactive Fault Diagnosis and Isolation for TF-30 Engines, Australian Defence Science and Technology Organisation Aeronautical Research Laboratory, Australia, 1989.
4. AMTEK Aerospace Products, Wilmington, 1990.