



**ZRÍNYI MIKLÓS NEMZETVÉDELMI EGYETEM
BOLYAI JÁNOS KATONAI MŰSZAKI KAR
Katonai Műszaki Doktori Iskola**

Alapítva: 2002 évben

**ZRÍNYI MIKLÓS NEMZETVÉDELMI EGYETEM
BOLYAI JÁNOS KATONAI MŰSZAKI KAR
KATONAI MŰSZAKI DOKTORI ISKOLA**

Szabó József Zoltán

**Rezgésdiagnosztikai vizsgálatok és
haditechnikai alkalmazhatóságuk kutatása**

PhD Értekezés

**Témavezető:
Dr. Sipos Jenő
okl. mk. ezredes, PhD**

2010. BUDAPEST

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS	5
I. FEJEZET ÜZEMFENNTARTÁS, MŰSZAKI ÁLLAPOT KARBANTARTÁSI STRATÉGIÁK ÉS A MŰSZAKI DIAGNOSZTIKA	10
I. 1. Az üzemfenntartás fogalma, feladata, helye a katonai logisztika rendszerében	10
I.1.1. Az üzemfenntartás fogalma, feladata	10
I.1.2. Az üzemfenntartás helye a katonai logisztika rendszerében	10
I. 2. A gépészeti rendszerek műszaki állapota, állapotváltozása	13
I.2.1. Gépészeti rendszerek jellemzői	13
I.2.2. A műszaki állapot változása, az elhasználódási tartalék fogalma	14
I.2.3. A gépek megbízhatósága, a tönkremenetel valószínűsége, a kádgörbe fogalma	16
I.2.4. A gépek élettartamát csökkentő, károsító hatások	18
I.2.5. A karbantartás, mint a fenntartási tevékenység része	19
I. 3. Karbantartási rendszerek és stratégiák	19
I.3.1. Hagyományos karbantartási stratégiák	20
I. 4. Korszerű karbantartási filozófiák	23
I. 5. A műszaki diagnosztika jellemzői, a diagnosztikai módszerek csoportosítása	27
I.5.1. A műszaki diagnosztikai információhordozók	28
I.5.2. A diagnosztikai módszerek rendszerezése, felosztása	28
I.6. Következtetések	29
II. FEJEZET MECHANIKAI REZGÉSEK JELLEMZŐI, REZGÉSMÉRÉSI, KIÉRTÉKELÉSI MÓDSZEREK	30
II. 1. Rezgéstani alapfogalmak	30
II.1.1. A periodikus rezgések jellemző mennyiségei	30
II.1.2. Csillapítatlan és csillapított rezgések	32
II. 2. Forgógépek legfontosabb rezgésjellemzői	35
II.2.1. A rezgés frekvenciája	36
II.2.2. A rezgés amplitúdója	38
II.2.3. A rezgés fázisszöge	40
II.3. A rezgésmérés műszerlánc	41
II.3.1. A rezgések átalakítása villamos jellé, a rezgésérzékelők jellemzői	41
II.4. Rezgésjelek feldolgozása	44
II.5. Gyakorlati rezgésmérési, kiértékelési módszerek	48
II.5.1. Rezgésmérés az ISO 10816 szabvány szerint	48
II.5.2. Az „ENVELOP - burkoló görbe detektálási” eljárás	51
II.5.3. HFD és „Csapágyjellemző” mérési technológia	53
II.5.4. SEE (akusztikus emissziós jelek) mérési technológia	54
II.6. Következtetések	57
III. FEJEZET A REZGÉSDIAGNOSZTIKAI MÓDSZEREK ALKALMAZÁSA, A WIBROSHOW REZGÉSDIAGNOSZTIKAI PRÓBAPAD FEJLESZTÉSE	58
III. 1. A rezgésdiagnosztikai módszerek alkalmazása	58
III.1.1. A méréshez szükséges adatok	58
III.1.2. A mérőpontok kiépítési szabályai	60
III. 2. A gyakorlatban gyakran előforduló géphibák kimutatása a rezgésspektrumban	62
III.2.1. Kiegyensúlyozatlanság	63

III.2.2. Tengely-beállítási hibák	68
III.2.3. Elgörbült tengely	69
III.2.4. Excentrikus forgórész	70
III.2.5. Tengely rezonanciák	71
III.2.6. Mechanikus lazaságok	72
III.2.7. A géplábbal kapcsolatos hibák	73
III.2.8. Gördülőcsapágyak tönkremenetelének folyamata	74
III.2.8.1. Gördülőcsapágyak tönkremenetele	76
III.2.8.2. Gördülőcsapágyak hibafrekvenciáinak számítása és értelmezése	77
III.2.8.3. Esettanulmány csapágy hibák gyakorlatban történő kimutatására	79
III.2.9. Fogaskerék meghibásodások jellemző spektrumképei	81
III.2.10. Hidraulikus és aerodinamikusan erőkből adódó problémák	83
III.2.11. Szíjhajtásból eredő rezgések	85
III.2.12. Váltakozó áramú villamos motorok rezgései	87
III.3. WIBROSHOW rezgésdiagnosztikai próbapad fejlesztése	89
III.3.1. A WibroShow rezgésdiagnosztikai próbapad létrejöttének előzményei	90
III.3.2. A WibroShow rezgésdiagnosztikai próbapad tervezési szempontjai	92
III.3.3. A WibroShow rezgésdiagnosztikai próbapad bemutatása	93
III.3.3.1. A WibroShow rezgésdiagnosztikai próbapad felépítése, kialakítása	93
III.3.3.2. A WibroShow próbapad főbb műszaki adatai felépítése, kialakítása	94
III.3.3.3. A próbapad kiépítésének részei, ezek jellemzői, feladatai	94
III.3.4. A WibroShow próbapad átalakítási variációs lehetőségei	100
III.3.5. A WibroShow próbapad előnyei, felhasználási lehetőségei	102
III.3.6. A WibroShow rezgésdiagnosztikai próbapad fejlesztésének összegzése	103
III.4. Következtetések	104

IV. FEJEZET

A MOZGÁSANIMÁCIÓS REZGÉSDIAGNOSZTIKAI MÓDSZER ÉS GYAKORLATI ALKALMAZÁSA **105**

IV.1. A mozgás-animáció elméleti alapja	105
IV.2. A mozgás-animációs vizsgálati folyamat bemutatása a WibroShow próbapadon	108
IV.2.1. A vizsgálat végrehajtásának menete, a szoftver és műszer használata	108
IV.2.2. Modellalkotás és méréstervezés I	109
IV.2.3. A mozgás-animációs vizsgálatához szükséges rezgésmérés elvégzése	110
IV.2.4. A mérési eredmények bemutatása és kiértékelése	113
IV.3. Esettanulmány a mozgás-animáció gyakorlati alkalmazásának bemutatására	117
IV.3.1. A vizsgálat tárgyát képező légfúvó berendezés felépítése, főbb műszaki adatai	118
IV.3.2. A légfúvó „életútja”, vizsgálatának fontossága	119
IV.3.3. A légfúvó elvégzett rezgésdiagnosztikai vizsgálatok bemutatása	120
IV.3.4. Mozcás-animációs vizsgálatok végrehajtása és mérési eredményei	122
IV.4. Következtetések	125

V. FEJEZET

A MOZGÁS-ANIMÁCIÓS REZGÉSDIAGNOSZTIKAI VIZSGÁLAT KIDOLGOZÁSA VADÁSZREPÜLŐGÉP ÁLLAPOTFÜGGŐ KARBANTARTÁSÁHOZ **126**

V.1. A JAS-39 Gripen típusú vadászipülögép főbb jellemzői	126
V.2. A JAS-39 Gripen karbantartási rendszerének legfontosabb jellemzői	130
V.3. A JAS-39 Gripen vadászipülögépen jelenleg alkalmazott rezgésvizsgálata	132

V.4. Esettanulmány a MiG-29 B típusú vadászrepülő RD-33 típusú hajtóművének rezgésvizsgálatáról	136
V.4.1. A mérési körülmények ismertetése	136
V.4.2. Mérési eredmények és kiértékelésük	139
V.5. Mozgás-animációs módszer kidolgozása a Volvo RM 12B hajtómű diagnosztikai vizsgálatára	142
V.6. Következtetések	144
ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK	145
A kutatási tevékenység összefoglalása	
Összefoglaló következtetések	
Új tudományos eredmények, tézisek	
A kutatómunka eredményeinek gyakorlati hasznosítása, ajánlások	
JELÖLÉSJEGYZÉK	150
HIVATKOZOTT IRODALOM	152
TUDOMÁNYOS ÉS PUBLIKÁCIÓS TEVÉKENYSÉG JEGYZÉKE	157

BEVEZETÉS

A TUDOMÁNYOS PROBLÉMA MEGFOGALMAZÁSA, A TÉMA AKTUALITÁSA

Az üzemfenntartás, karbantartás jelentősége napjainkban az élet minden területén folyamatosan növekszik. A korszerű iparvállalatoktól a haditechnikai eszközökig felfedezhetjük azt a tudatos vállalati stratégiai gondolkodásmódot, amely a termelés folyamatosságának biztosítására, vagy egy nagy értékű berendezés hasznos élettartamának megőrzésére irányul.

A karbantartás gyakorlatilag egy idős az emberiséggel, hiszen már az egyszerű eszközöket készítő elődeink is figyelmet fordítottak kezdetleges szerszámaik, fegyvereik „hadra foghatóságának” megőrzésére. Nem véletlen tehát, hogy az ipari forradalmakat megélt, globális termelési kultúrát megvalósító emberiség egyre korszerűbb módszereket dolgoz ki az egyre bonyolultabb berendezéseinek megbízható üzemeltetéséhez. A rendszerszemléletű gyártás az üzemvitel szempontjából is olyan stratégiai gondolkodásmódot kényszerített ki, amely a rendszerbe állítástól kezdve a gép teljes élettartamán keresztül megfelelő információval szolgál a berendezés mindenkor műszaki állapotáról.

Magyarország NATO tagságából, az Európai Unióhoz való csatlakozásával több haditechnikai eszköz tekintetében fejlesztésre, új típusú fegyverek, fegyver-rendszerek beszerzésére volt szükség. Ennek eredményeként 2006-ban kerültek rendszerbe állításba JAS-39 Gripen EBS HU típusú vadászpilóta nélküli repülőgépek¹ a Magyar Légierőben [1]². Az átfegyverzésnek köszönhető korszerű, világszínvonalú berendezések rendszerben tartásához elengedhetetlen követelmény a fenntartási módszerek fejlesztése. Értekezésemben az üzemfenntartás és a karbantartás leghatékonyabb módszerével a rezgésdiagnosztika alkalmazási kérdéseivel foglalkozom. A téma aktualitását az egyre bonyolultabbá váló haditechnikai eszközök és az ezekhez tartozó magas fenntartási költségek adják, mivel az üzemeltetési költségek csökkentése csak korszerű diagnosztikai módszerek alkalmazásával érhető el.

A rezgésdiagnosztikával való első találkozásom óta életem meghatározó részévé vált ez a tudományterület. Az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Karán és annak jogelődjeiben két évtizede foglalkozom az állapotfüggő karbantartás és a műszaki diagnosztika oktatásával. A rezgésdiagnosztika komoly gazdasági előnyöket jelent a gépek üzemeltetésében. A rezgésméréssel olyan gépészeti problémákat, károsító hatásokat

¹ A Svéd Védelmi Beszerzési Hivatal és a Magyar Köztársaság Honvédelmi Minisztérium Beszerzési és Biztonsági Beruházási Hivatala 2003-ban írták alá a Gripen bérleti megállapodást módosító dokumentumot, mely szerint Magyarország tíz évre 12 db JAS-39 Gripen EBS HU és 2 db JAS-39 D típusú vadászpilóta nélküli repülőgépet bérel

² Az értekezésben a hivatkozott irodalom azonosítására az irodalmi hivatkozás [...] sorszámát használom.

tanulmányozhatunk, amelyek a gép teljes üzemideje alatt hatnak az alkatrészekre. Felismerésükkel, megszüntetésükkel a gépek élettartama jelentősen meghosszabbítható, a hibák előrejelzésével a termelés folyamatossága biztosítható.

Oktatói munkám mellett gyakorlatilag tizenöt éve dolgozom rezgésdiagnosztikai szakértőként a hazai ipar szinte minden területén. Több száz megmért gép, több mint ezer szakértői jelentés, több tízezer rezgésspektrum elemzése által szerzett elméleti és gyakorlati tapasztalatomat szeretném a Magyar Honvédség szolgálatába állítani. Remélem, hogy értekezésem eredményei mind a Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem Bolyai János Katonai Műszaki Karon, valamint az Óbudai Egyetemen folyó diagnosztika oktatásban, mind pedig a Gripen vadászpilóta üzemeltetésében hasznosíthatók.

KUTATÁSI CÉLKITŰZÉSEK:

1. Azon rezgésdiagnosztikai eljárások tanulmányozása, összehasonlítása és elemzése, amelyek sikeresen alkalmazhatók az iparban a forgó gépszerkezetek meghibásodásainak üzem közbeni kimutatásában. Az elemzés alapján összefoglalom és saját mérési eredményeimen keresztül bemutatom a gépészetben leggyakrabban előforduló meghibásodások sajátosságait, jellegzetes spektrumképeit, az alkalmazható rezgésdiagnosztikai mérési és kiértékelési módszereket.

2. Az oktatásban és az iparban szerzett gyakorlati tapasztalatai alapján egy olyan univerzális demonstrációs eszköz kifejlesztése, amely alkalmas a rezgésdiagnosztikai módszerek tesztelésére, elemzésére. A demonstrációs berendezés az Óbudai Egyetem a Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem mellett, az összes hazai műszaki felsőoktatási intézményben, valamint az ipari tréningek esetében is széles körben alkalmazható a rezgésdiagnosztika oktatására. A próbapad demonstrációs eszköz, amellyel megjeleníthetők a forgógépek hibái, és vizsgálati modell, amelyen bizonyítható a mozgás animációs vizsgálat hatékonysága.

3. Esettanulmányok a rezgésmérés és mozgás animációs szimuláció gyakorlati alkalmazására valós műszaki problémák rezgésvizsgálata alapján. A mozgás animációs vizsgálatot olyan berendezéseken keresztül elemzem, amelyek multinacionális cégek termelésében kulcsfontosságú szerepet játszanak, működésképtelenség esetén komoly termelésekiesést, több tízmillió forintos kárt okozhatnak. Kutatásaim során állapotfelmérő rezgésvizsgálatot végeztem egy MiG-29 B típusú vadászpilóta gép jobb és baloldali, jó és rossz műszaki állapotú hajtóművén. A valós berendezéseken végzett diagnosztikai vizsgálatokon keresztül azt kívánom bizonyítani, hogy a rezgésmérés alkalmas a jó és a

meghibásodott műszaki állapot közötti különbség megjelenítésére a hibás alkatrész beazonosítására.

4. A rezgésdiagnosztika speciális szimulációs módszerének a mozgás-animációs vizsgálat felhasználásával egy repülőgép sugárhajtómű szimulációs modelljének elkészítése és a szimulációs módszer ellenőrzése a rezgésdiagnosztikai próbapadon. Ilyen eljárást tudomásom szerint még nem alkalmaznak haditechnikai eszközök karbantartásában. A kidolgozott eljárás a JAS 39 EBS HU Gripen típusú vadászrepülőgép RM 12B hajtóművének diagnosztikai vizsgálatánál alkalmazható a hajtómű és a segédberendezés hajtómű üzem közbeni rezgéseinek megjelenítésére. A mozgás-animáció alapján megfigyelhetők és beazonosíthatók a magas rezgésű nem megfelelő műszaki állapotú hajtóműrészek. A módszer egyszerűsége révén lehetőség van a meghibásodások kifejlődésének nyomon követésére, a hiba eredetének feltérképezésére. A hibás hajtóműrészek időben elvégzett cseréjével megelőzhető a hajtómű jól működő részeinek károsodása, amely karbantartási költség csökkenést, valamint a repülőgép rendelkezésre állásának növekedését eredményezi.

KUTATÁSI HIPOTÉZISEK:

1. A forgógépek állapotvizsgálatában használt rezgésdiagnosztikai eszközök bemutatására és a vizsgálati módszerek elemzésére létrehozható egy olyan többcélú, modul rendszerű próbapad, amely hatékonyan alkalmazható a műszaki diagnosztika oktatásában, valamint mozgás animációs kísérletek kidolgozásában.

2. Mozcás animációs módszerekkel megjeleníthetők az egyszerű és a bonyolult forgógépek rezgései, valóságos mozgásai, ezáltal alkalmas módszer a gépészeti és haditechnikai berendezések műszaki állapotának jellemzésére, a nem megfelelő műszaki állapot okának kimutatására.

3. Rezgésdiagnosztikai vizsgálat segítségével beazonosíthatók a vadászrepülőgépek hajtóműveiben, közlőműveiben meghibásodott részegységek, alkatrészek, a rezgésspektrumban kimutathatók a hibás egységre utaló amplitúdók.

4. A mozgás animációs rezgésmérési módszer alkalmazásával, a mozgás animációs modellen a JAS-39 Gripen vadászrepülő hajtóművének műszaki állapotára utaló mozgások és hibára utaló rezgések megjeleníthetők. A módszer a jelenlegi mérési módszernél több információt ad a hajtómű rezgés és műszaki állapotáról.

KUTATÁSI MÓDSZEREK:

Az értekezés kutatási célkitűzéseinek megvalósítása érdekében az alábbi módszereket alkalmaztam:

- tanulmányoztam, elemeztem az ipari és haditechnikai berendezések üzemeltetésével, karbantartásával, a műszaki diagnosztikával, valamint a rezgésdiagnosztikával kapcsolatban fellelhető hazai és nemzetközi szakirodalmat, konferencia anyagokat, értekezéseket,
- a megszerzett információkat feldolgoztam, rendszereztem, majd következtetéseket vontam le a téma kidolgozásával kapcsolatban.
- személyes rezgésmérést végeztem több száz valós ipari berendezésen, kutatási munkám során felhasználtam tizenöt éves rezgésszakértői tapasztalatomat,
- személyes helyszíni kiegyensúlyozási, lézeres tengely-beállítási és lézeres szíjbeállítási műveleteket hajtottam végre kb. 30-40 gépen multinacionális cégek megbízásából
- személyes mozgás-animációs vizsgálatokat és kísérleteket végeztem ipari berendezéseken valós problémák megszüntetése érdekében
- nemzetközi és országos szakmai konferenciákon vettem részt, rezgésdiagnosztikai témájú előadásokat tartottam, cikkeket publikáltam és tapasztalatokat szereztem;
- ipari szakemberekkel folytattam konzultációkat a forgógépek karbantartásával és diagnosztikai vizsgálatával kapcsolatban
- felkerestem vadászrepülőgépek üzemeltetésében jártas szakembereket is, akikkel a repülőgépek karbantartásával kapcsolatos kérdésekről konzultáltam
- az MH Repülőműszaki Szolgálatfőnök engedélye alapján felkerestem az MH 59. Kecskemét Szentgyörgyi Dezső Repülőbázist, ahol tapasztalatot szereztem a vadászrepülőgépek karbantartási, üzemeltetési sajátosságairól és megismerkedtem a diagnosztikai módszerekkel
- szintén az MH Repülőműszaki Szolgálatfőnök engedélye alapján sikeresen személyesen végrehajtott rezgésmérést végeztem egy MiG-29 B típusú vadászrepülőgép jobb és bal oldali hajtóművén többféle terhelési állapotban. A magas vibrációt okozó nem megfelelő műszaki állapotban lévő hidraulika szivattyú hibájára utaló rezgésjeleket sikeresen beazonosítottuk a rezgésvizsgálat alapján.
- kifejlesztettem és az Óbudai Egyetemen elkészítettem a WibroShoW névre keresztelt modul rendszerű rezgésdiagnosztikai próbapadot és kísérleti modellt, amely jelenleg egyedülálló a diagnosztikai bemutatóeszközök körében

- a próbapadon elkészítettem egy repülőgép hajtómű egyszerűsített modelljét, majd mozgás-animációs szimulációs kísérleteket hajtottam végre, melynek eredményeit értékelem
- a mozgás animációs szoftverben elkészítettem egy valós vadászrepülő hajtóművének szimulációs modelljét és kidolgoztam a vizsgálat elvégzéséhez szükséges mérési tervet

VÁRHATÓ EREDMÉNYEK, AZOK FELHASZNÁLHATÓSÁGA

1. A disszertáció célkitűzésével összhangban egy olyan demonstrációs eszközt fejlesztettem ki, amelynek eredetisége a modul rendszerű felépítésében, hordozhatóságában, könnyű átszerelhetőségében nyilvánul meg. A megtervezett és kivitelezett berendezés a műszaki felsőoktatásban, illetve ipari és haditechnikai karbantartók részére tartott tréningeken is jól használható a rezgésmérés, kiértékelés, mérési gyakorlat megszerzésének, valamint az állapotfüggő karbantartás mérési gyakorlati oktatásában. Előnye még, hogy a demonstrációk mellett különféle mechatronikai hajtásláncok, gépalkatrészek rezgéseinek modellezésére, diagnosztikai kísérletek végrehajtására is alkalmas. Lehetőséget teremt a mozgás-animációs módszer oktatására, a rezgésmérést végző szakemberek betanítására. A rezgésdiagnosztikai mérések mellett zajmérésre és termográfiai vizsgálatok oktatására is használható.

2. A harci repülőgép hajtóművének diagnosztikai vizsgálatára kidolgozott mozgás animációs módszer lehetőséget teremt arra, hogy a karbantartást végző szakemberek a jelenlegi ciklikus rezgésmérési adatokon felül, megbontás és leállítás nélkül több információhoz jussanak a hajtómű egyes részeinek rezgésállapotáról. Ezek információk animációs formában azonnal rá tudnak mutatni a hajtómű vizsgált részeinek nem megfelelő üzemállapotára, így megkönnyítik a döntést a megelőző intézkedések tekintetében.

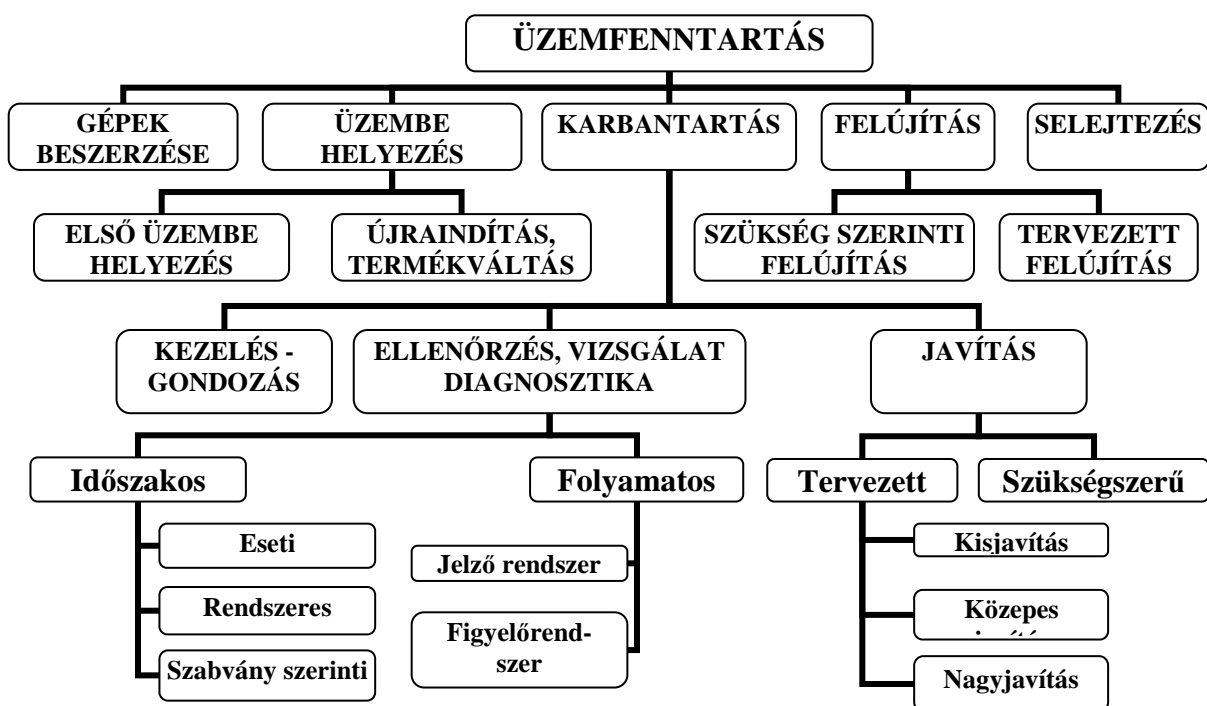
3. Rendszeres vizsgálatokkal, megfelelő mennyiségű mérés és hibára utaló adatok gyűjtése útján kialakítható egy olyan szimptóma, vagy meghibásodási profil rendszer, amely segítségével a hibás hajtóműrész még azelőtt kicserélhető, mielőtt komolyabb károsodást szenved, vagy a vele összekapcsolt részegységekben is károsodást okozna. Az időben elvégzett karbantartási intézkedések által növekszik a berendezés rendelkezésre állása, csökken az üzemfenntartás költsége.

I. FEJEZET Üzemfenntartás, műszaki állapot, karbantartási stratégiák és a műszaki diagnosztika

I.1. Az üzemfenntartás fogalma, feladata, helye a katonai logisztika rendszerében

I.1.1. Az üzemfenntartás fogalma, feladata

A haditechnikai eszközök rendelkezésre állása, a termelőeszközök kihasználása, az általuk végzett munka minősége jelentős mértékben függ üzemképességüktől. A magas minőségi követelményeket igénylő technológiák betartásához nélkülözhetetlen a jó állapotú, megbízhatóan működő berendezés.



1.1. ábra Az üzemfenntartási tevékenységek összefoglalása [2], [3]

Az üzemfenntartás azon műszaki tevékenységek összessége, amely segítségével iparban működő gépek és a haditechnikai eszközök állandó, rendeltetésszerű használatát biztosítják. [2] Magában foglalja az összes olyan tevékenységet amely révén megőrizhető, helyreállítható az előírt állapot, továbbá megítélhető és minősíthető a tényleges műszaki állapot. Az üzemfenntartási tevékenységek az 1.1. ábrán kísérhetők figyelemmel. [3], [4], [5]

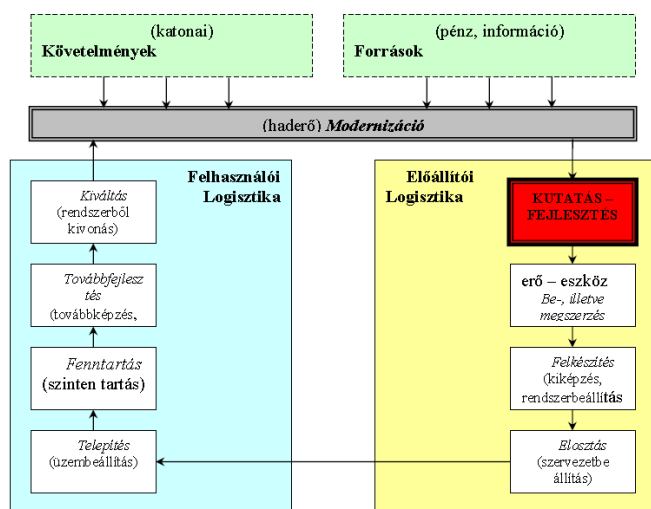
I.1.2. Az üzemfenntartás helye a katonai logisztika rendszerében

Haditechnikai eszköznek nevezzük a fegyveres erők állományában rendszeresített a nemzetgazdaságból honvédelmi célokra bevont, a katonai szervezetek feladatainak megoldásához, vagy közvetve azok végrehajtásához a háborús és a békeállapot időszakában szükséges harc- eszközök, biztosító- és kiszolgálóeszközök összessége [6]. A haditechnikai eszközök a had-

felszerelésnek azt a körét alkotják, amelyre a huzamosabb ideig tartó használat, a hosszú távú alkalmazás, folyamatos üzemfenntartás a jellemző.

Az üzemfenntartási munkákat, az eszközöket üzemeltetők és a haditechnikai szakalegységek és a szakcsapatok, javító szervezeti egységek végzik meghatározott rendszerben és mélységben, tervszerű megelőző jelleggel különböző normákhoz illetve feladatokhoz kötöten, illetve szükség szerint.

A katonai logisztika feladata anyagok információk, rendszeren belüli és rendszerek közötti



1.2.ábra A katonai logisztika rendszere [6]

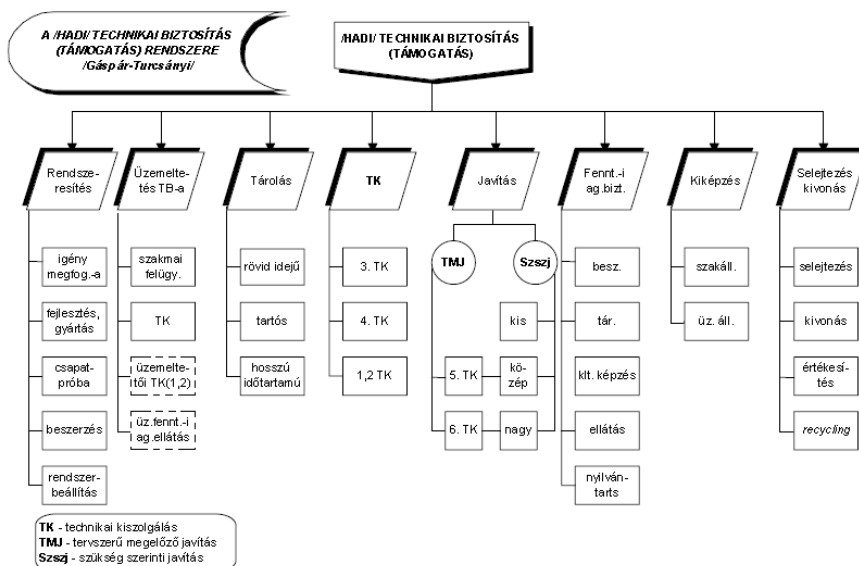
áramlásának tervezése, szervezése, ellenőrzése, valamint az összes ezzel kapcsolatos tárgyi feltétel megteremtése. Általánosan a logisztika elsődleges célja, hogy a megfelelő anyag, a megfelelő időpontban, a megfelelő mennyiségben, a megfelelő helyre, a megfelelő minőségben, a megfelelő (minimális) költséggel eljuttatható legyen.

A katonai logisztika rendszerét, két részre tagolják előállítói (termelési), -

és felhasználói (fogyasztói) logisztikára, míg a polgári logisztika két fő szegmense a fenntartási, illetve fejlesztési logisztika [6]. A katonai logisztika (Janza Károly, illetve [6] szerint) a harctevékenységhez, illetve arra való felkészüléshez szükséges erőforrások (élő erő, hadfelszerelés, infrastruktúra, speciális erőforrás, információ, pénz) megszerzése, majd felhasználhatóságának folyamatos biztosítása. A katonai logisztikának a teljes élettartam modell szerint a humán erőforrásokat és reál folyamatokat (anyagok és eszközök) kell biztosítani a haderő számára. A katonai logisztika legfontosabb feladatai közé a haderő folyamatos fejlesztése, a szükséges és stratégiaileg fontos területeken új korszerű haditechnikai eszközök beszerzése, valamint a meglévő eszközök műszaki állapotának megfelelő műszaki színvonalon való fenntartása tartozik, amint azt az 1.2. ábrán is láthatjuk [6]. Anyagnem-felelősség szempontjából a haditechnikai eszközök fegyverzeti páncélos- és gépjármű, repülőműszaki, elektronikai, műszaki és vegyvédelmi-technikai, valamint általános mérő-, hadtáp (élelmezés-, ruházat- és üzemanyag-) technikai, egészségügyi, közlekedési, felderítő-technikai és rádiótechnikai, geodéziai stb. eszközcsoportokra oszlanak fel [7].

Mivel az üzemfenntartást valóságos gépeken, harci és támogató eszközökön kell végrehajtani, ebből a szempontból számunkra a haditechnikai biztosítási folyamatok a legfontosabbak.

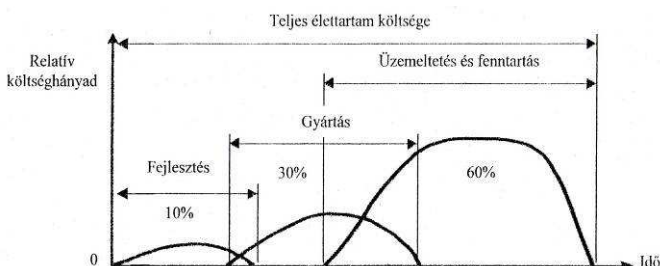
Amint azt az 1.3. ábrán is láthatjuk a haderő a rendelkezésére álló eszközöket műszaki szempontból anyagokkal, technológiákkal biztosítja. A harci eszközök alaprendeltetését szakszerű üzemeltetéssel az adott haditechnikai eszköz műszaki színvonalának megfelelő üzemben tartási folyamatok szervezésével, alkalmazásával, valamint a meghibásodott eszközök helyreállításával tudják biztosítani. Megfigyelhetjük azt is, hogy a haditechnikai biztosítás működéséhez a humán erőforrásokra, a korszerű technológiák bevezetésére és biztosítást végző szakági



1.3.ábra A haditechnikai biztosítás összetevői

katonai üzemeltetés, a katonai üzemfenntartás és a fegyverzettechnikai biztosítás stb. fogalmával, ezeket a fogalmakat azonban a [9] [10] [11] szakirodalmak részletesen kifejtik, ezért ismertetésüktől a disszertáció terjedelmi korlátai miatt eltekintek.

Meg kell még említenünk, hogy egy haditechnikai berendezés rendszerbe állítása jelentős ráfordítást igényel. A katonai logisztikában végzett beruházások esetében megvizsgálva a teljes élettartam során felmerülő költségeket



1.4.ábra Fegyverrendszerek teljes élettartam költsége

1.4 ábra szerinti költségmegoszlást figyelhetünk meg [10]. Az ábrán jól látható, hogy a haditechnikai eszközök esetében a fegyverrendszerek teljes élettartam költségeiből a legmagasabb hányadot az üzemeltetési és fenntartási költségek jelentik, mivel az összköltség mintegy 60%-át teszik ki. Ennek ismeretében kijelenthetjük, hogy a fenntartásra, üzemeltetésre fokozott figyelmet kell fordítani, mivel a fenntartási költségek csökkentésével jelentős megtakarítás érhető el.

dolgozók szaktudásának fejlesztésére is szükség van. [8]

Ahhoz, hogy a katonai üzemfenntartás jelentőségét megismerjük feltétlenül foglalkoznunk kellene még több katonai terminológiában használt fogalommal, úgymint a rendszerben tartás, a

I.2. A gépészeti rendszerek műszaki állapota, állapotváltozása

I.2.1. Gépészeti rendszerek jellemzői

Az iparban és a haditechnikában üzemelő berendezések egymással együttműködő meghatározott kapcsolatban álló rendszereket alkotnak. A rendszer, egy meghatározott, jellegzetes környezetben, kölcsönhatásban lévő elemeknek, dolgoknak, valamilyen szerves, vagy szervezett, teljesítő képes elhatárolt együttese, amit határvonal, működési egység és bizonyos önirányítási képesség jellemez. A rendszer tehát az alkotó elemek egymással és a rendszer környezetével kölcsönhatásban álló rendezett halmaza. A rendszerek sokféle szempont szerint csoportosíthatók, a leggyakoribb felosztási lehetőségeket az 1.5. ábrán tekinthetjük meg. Az általunk vizsgált gépészeti, vagy műszaki rendszerek a bennük létrejövő mozgás szerint az első négy (statikus, dinamikus, irányított és adaptív) kategóriákba sorolhatók be. [S4_A]³

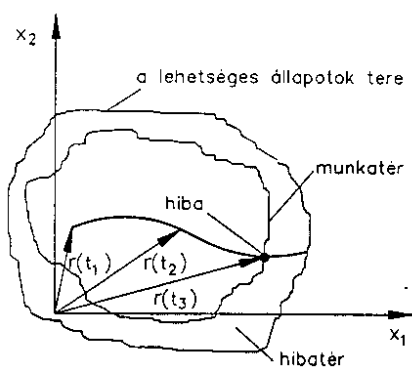


1.5. ábra A technikai, gépészeti és diagnosztikai rendszerek csoportosítása [S04]

Egy technikai rendszer műszaki állapota a rendszer viselkedését meghatározó kimenő változók pillanatnyi értékével jellemezhető. Ezek segítségével a különböző rendszerek különféle állapotai jól összehasonlíthatók, de meghatározható ugyanannak a rendszernek más-más időpontokhoz tartozó várható állapota is. Amikor egy rendszer állapota változik az időben, akkor kimenő változói időfüggvények $X_1(t)$, és $X_2(t) \dots X_n(t)$. A rendszer üzemeltetése tulajdonképpen azt jelenti, hogy a rendszer egyik állapotból a másikba jut, ezek az állapotok egyben a működőképesség valamely fokát jelentik. Ha egy rendszer két kimenő változóval rendelkezik, akkor a rendszer állapotát síkban lehet szemléltetni egy „ r ” állapotvektorral, melynek komponensei X_1 és X_2 lásd. 1.6. ábra. Ez egy kétdimenziós állapottérként fogható fel, ha a rend-

³ Az értekezésben a SAJÁT hivatkozott irodalom azonosítására a „S” betűből, valamint max. két számjegyből álló karaktersort használok. Az S4 irodalomban A,B,C,D,E,F jelöléssel különböztetem meg a hivatkozásokat

szer "n" változójú, akkor $n > 3$ esetén nincs lehetőség ábrázolásra. Azt az n-dimenziós teret,



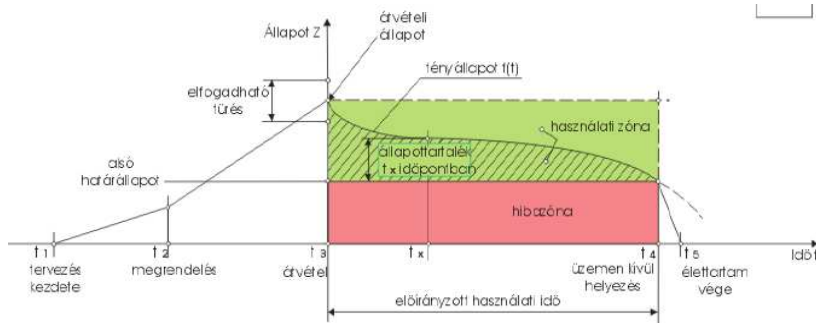
1.6. ábra Rendszer állapotter és hibatér

amelyben a rendszer minden állapotának meghatározott pont felel meg, a rendszer állapotterének nevezzük. A kimenő változók feszítik ki az n-dimenziós koordináta rendszert és egyben megadják a rendszer szabadságfokát is (n). Általános esetben egy gépi berendezés kimenő változóinak összessége az „r” vektor komponenseinek fogható fel az n-dimenziós térben. Az „r” vektor végpontja a rendszer bármely időponthoz tartozó állapotának megfelelően különböző helyzeteket foglalhat el az állapotterben.

Ezek alkotják a rendszer lehetséges állapotainak terét. Az a tér, amelyben az „r” vektor a rendszer megengedett állapotainak megfelelően mozog a munkatér, ha az „r” vektor a munkatérből kilép, akkor a hibatérbe kerül. A gépek műszaki állapotát általában kisszámú változóval lehet jellemezni, melyek közül egy-kettő játszik meghatározó szerepet. Ilyen paraméter pl. egy csapágnál a hőmérséklet, futási pontosság, motoroknál a leadott nyomaték, fordulatszám. [S4_A]

I.2.2. A műszaki állapot változása, az elhasználódási tartalék fogalma:

Összetett berendezéseink bonyolult, irányított, sok esetben nemlineáris rendszerként fogha-



1.7. ábra A gépek műszaki állapotváltozása a tervezéstől a selejtezésig

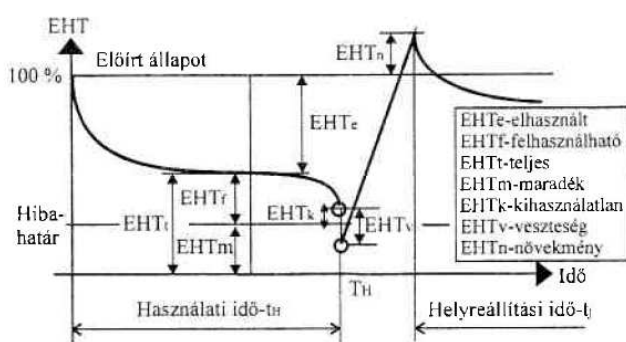
tók fel. A gépek műszaki állapotváltozásának meghatározása az üzemfenntartás egyik legfontosabb feladata.

A gépek műszaki állapotát egy időben nagyon sokféle állapotjellemző határozhatja meg, ezért az álla-

potjellemzők nagy száma és összetettsége miatt kénytelenek vagyunk ezeket az állapotokat az **előíráshoz műszaki állapotra** szűkíteni, amelyeket a konkrét gépre szabványokban, műszaki előírásokban, gépkönyvben, stb. rögzítünk [12]. A gépek műszaki állapota összefügg az adott folyamatban betöltött **funkciójukkal** [13], amely a felhasználás célnak megfelelő feladat teljesülését jelenti. Ezért az ipari gyakorlatban az előíráshoz állapot helyett a funkcióképesség, mégpedig a kívánt funkciók ellátására vonatkozó képességet vesszük figyelembe és ezzel de-

finiálhatjuk a hibás állapot fogalmát is. Hibaállapotba egy rendszer akkor jut, ha elveszíti az elvárt funkciók teljesítésére vonatkozó képességét.

A funkcióteljesítés az üzemelés során valósul meg, miközben a gép szükségszerűen elhasználódik. Az **elhasználódás** jellege igen változatos: általában hosszabb ideig tartó, időben nem feltétlenül egyenletes lefutású, de bekövetkezhet hirtelen, nagyon rövid idő alatt is. Annak érdekében, hogy berendezéseink teljes élettartamuk alatt képesek legyenek az elvárt funkciókat teljesíteni, a tervezés során megfelelő tűrések alkalmazásával, előre kiszámított tartalékkal látják el őket, amelyet az 1.7. ábrán kísérhetünk figyelemmel.



1.8. ábra Az elhasználódási tartalék változása [13]

zökkel, stb. határozhatjuk meg, általános esetben, azonban a funkcióképesség nagyon sok tényezőtől függ, így elterjedt az EHT százalékos megadása, amikor a gép új Z_0 állapotához mérten %-ban fejezzük ki az elhasználódás mértékét. Sajnos a gép állapotát tökéletesen jellemző EHT görbét csak kísérleti úton lehet meghatározni, azonban a görbéhez jó közelítést lehet adni a műszaki állapotot minősítő diagnosztikai vizsgálatokkal, így elmondható, hogy az elhasználódási tartalék azért az üzemfenntartás egyik legfontosabb jellemzője, mert általa a gép teljes életútja végig kísérhető. A karbantartás számára a legfontosabb jellemzőket a hibahatár, a teljes EHT, a még felhasználható, illetve a maradék EHT mértéke, amelyet szintén mérések, diagnosztikai vizsgálatok segítségével tudunk meghatározni, illetve dokumentálni. Ezen fogalmak megfigyelhetők az 1.8. ábrán, amelyből az is kitűnik, hogy bár a mérésekkel nem vagyunk hatással a görbe alakulására, de meg tudjuk határozni azt, hogy megközelítettük-e a hibahatárt és ennek alapján becsülni tudjuk a még hátra lévő élettartamot. Arról is tájékoztat az ábra, hogy abban az esetben, ha a hibahatárt meghaladja az elhasználódás mértéke, akkor más karbantartási intézkedéssel pl. javítással, beállítással növelhető a tartalék, vagy teljes felújítással visszaállítható a gép funkcionálisan új állapota. A műszaki vizsgálatoknak éppen ez a célja, hogy az elhasználódást minél korábban felismerve a legolcsóbb beavatkozásokkal a gép teljes élettartamában az előírt állapotban lehessen tartani.

Az **EHT**⁴ [12] [13] fogalmán tehát azt a funkcióteljesítést biztosító készletet (tartaléket) értjük, amely az üzemeltető számára a gép használati értékét jelenti. Az EHT értékét szerencsés esetben egy géprészre egyetlen jellemzővel például a kopás mértékével, vagy a rezgésjellem-

⁴ EHT – elhasználódási tartalék, a funkcióteljesítést biztosító készlet (tartalék)

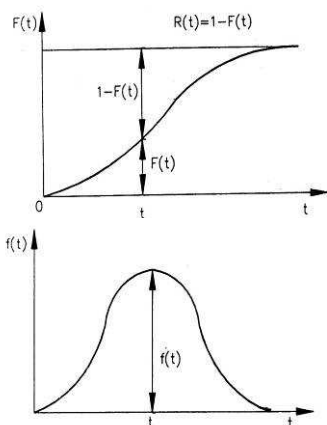
A hibahatár ismerete nagyon fontos a maradék élettartam becslése szempontjából, mivel az üzemeltetőnek és a karbantartónak tudnia kell a hátralévő üzemidő, termékmennyiség, rendelkezésre állás időtartamának mértékét.

I.2.3. A gépek megbízhatósága, a tönkremenetel valószínűsége, a kádgörbe fogalma

A megbízhatóság elmélet az a tudományág, amely a berendezésekben fellépő meghibásodások keletkezésének törvényszerűségeivel, a hibák előrejelzésének módjával, ennek tervezésével foglalkozik. Megbízhatóságon az [14] [15] szerint „olyan gyűjtőfogalmat értünk, amelyet a használhatóság és az azt befolyásoló tényezők, a hibamentesség, a karbantarthatóság és a karbantartás ellátás leírására használnak”. Egyszerűbben fogalmazva a megbízhatóság egy termék, vagy berendezés azon képességét jelenti, hogy a meghatározott funkcióját meghatározott időtartam alatt hibamentesen teljesíti. Ezzel összhangban a karbantarthatóság a berendezésnek az a képessége, hogy adott feltételek között olyan műszaki állapotban tartható, illetve olyan állapotba állítható vissza, hogy az előírt funkcióit teljesíteni tudja. [15]

A megbízhatóságot, a gépek tönkremenetelének várható bekövetkezését matematikai valószínűségi függvények segítségével lehet leírni. Egy valószínűségi változó eloszlásának törvényszerűségeit az eloszlás, vagy sűrűségfüggvényekkel lehet matematikailag megfogalmazni. Gépészeti rendszerekben a leggyakrabban „Normális”, „Exponenciális”, „Weibull”, „Binomiális”, „Poisson” eloszlás típusok fordulnak elő, melyek jellemzőit a [15] [16] szakirodalmak részletesen tárgyalják.

A megbízhatóságot kifejező valószínűségi változó olyan mennyiség, amely értékeit véletlenszerűen veszi fel, meghatározott értékkészlettel és eloszlással jellemezhető. Egy gép, vagy



1.9. ábra „Normális” eloszlás és sűrűség függvény

gépalkatrész használati idejében tönkremenetelének valószínűsége 0-1 közötti értékeket vehet fel, azaz ebben az intervallumban változik a fent említett valószínűségi függvények valamelyike szerint. Az 1.9. ábrán látható normális eloszlású $F(t)$ függvény. Az $F(t)$ idő szerinti első deriváltja az alsó ábrán látható $f(t)$ valószínűség sűrűség függvényt adja. [S04_B]

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (1.1)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} \quad (1.2)$$

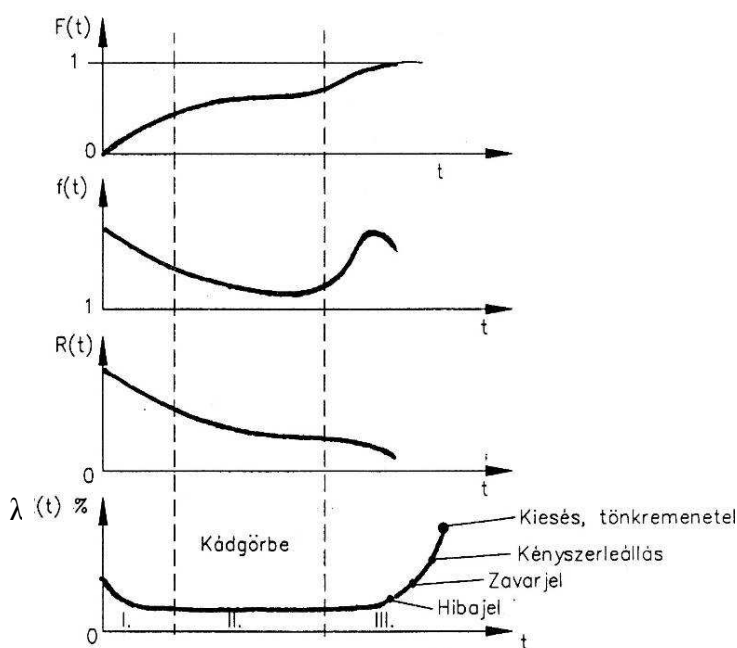
Az $f(t)$ függvény alapján számítható az ún. **meghibásodási ráta**, vagy „rizikó” $\lambda(t)$ függvény, amely az adott időintervallumban a meghibásodás valószínűségét fejezi ki. Abban az

esetben, ha a valószínűség függvényre exponenciális eloszlást tételezünk fel, akkor $\lambda(t) = 1/T$, azaz exponenciális eloszlás esetén a meghibásodási ráta azonos a várható élettartam reciprokával, mivel:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^t e^{-\frac{t}{T}} dt = 1 - e^{-\frac{t}{T}} \text{ ebből } f(t) = \frac{1}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad (1.3)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{\frac{1}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}}}{1 - (1 - e^{-\frac{t}{T}})} = \frac{1}{T} \quad (1.4)$$

Egy valóságos gép, vagy berendezés esetében ezek a görbék a gép különböző életciklusában más-más pl. exponenciális és normális eloszlás szerint váltakozva az 1.10. ábrának megfelelően alakulhatnak ki. Ennek megfelelően az $F(t)$ eloszlású függvénnyel leírható az $R(t)=1-F(t)$ megbízhatósági függvény, amelyből azután a teljes élettartamra vonatkozó $\lambda(t)$ függvény származtatható. Esetünkben a $\lambda(t)$ annak a valószínűségét mutatja, hogy a gép a következő időpillanatban tönkremegy. [S04_B]



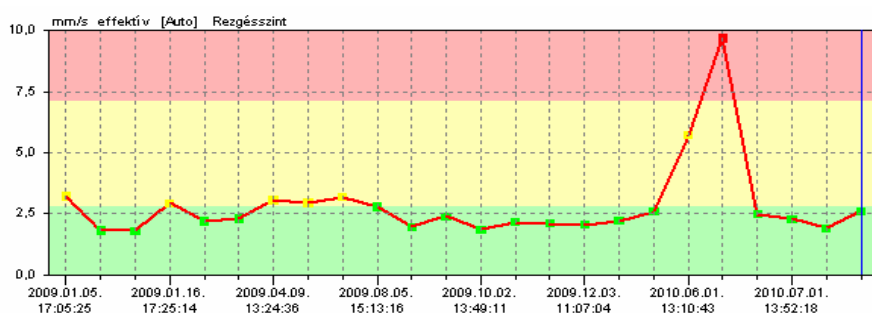
1.10. ábra A valóságos gépek tönkremenetelét kifejező matematikai függvények

$$\lambda(t) = \frac{dR(t)}{dt} = \frac{R'(t)}{R(t)} \quad (1.5)$$

A függvényt három különböző szakaszra bonthatjuk. Az I. szakasz a bejáratás, a korai gép-hibák szakasza, amely csökkenő jellegű, így jól kifejezi a beüzemelési problémákat. A II. szakaszt tartós üzem szakasza, gyakorlatilag ez a gép hasznos élettartama. Diagnosztikai szempontból a legfontosabb a III. szakasz, melyet a tönkremenetel szakaszának hívunk. A diagnosztikai mérések során tulajdonképpen

azt az időpillanatot keressük, amikor a görbe (a meghibásodás valószínűsége) lassan növekedni kezd és elvezet az első hibajelhez. Ez általában még csekély rendellenességben nyilvánul meg, ha erre az üzemeltető nem ügyel bekövetkezik az első zavarjel, majd a gépet tovább üzemeltetve az első kényszerleállítás. Ha ennek ellenére sem történik intézkedés a hiba kijavítását illetően, akkor az alkatrész tönkremegy maga után vonva a berendezés üzemképtelenségét és az ebből eredő veszteségeket. Könnyen belátható, hogyha a függőleges tengelyen nem a

meghibásodási rátát, hanem valamilyen műszeres mérés eredményét vesszük fel, például zaj,



rezgés, vagy hőmérséklet értékeket, akkor a mérési eredmények a gép műszaki állapotát fogják tükrözni.

1.11. ábra Cellulóz őrítő malom effektív rezgésebbesség trendje

Az ipari gyakorlatban a dokumentált műszeres mérések estén - lásd 1.11. ábra - a görbéről még a beavatkozások hatása is leolvasható. Az ábrán egy multinacionális cégnél⁵ végzett szakértői munkám során készített rezgésméréseim trendje látható. A gép egy folyamatosan üzemelő cellulóz őrítő malom, fordulatszáma 5500 1/p. A mérési eredmények a gép beüzemelésétől kezdve mutatják a havonta mért effektív rezgésebbességet 10-1000 Hz frekvencia tartományban. A mérési eredményekből kapott görbe szinte tökéletes kádgörbe, a veszélyes szint a rotor csapágyának tönkremenetele miatt következett be, melyet javaslatomra cseréltek ki. A csapágycsere után a rezgések láthatóan csökkentek, újra a jó műszaki állapotra utaló értékeket vették fel. A kádgörbe újrakezdődött, mielőtt a csapágyhiba teljesen tönkretette volna gépet.

Az ipari gyakorlatban

I.2.4. A gépek élettartamát csökkentő, károsító hatások

Abban az esetben, amikor elfogy az üzemelési tartalék a gép már láthatóan nem tudja teljesíteni a tőle elvárt funkciókat, átlépi a hibahatárt és működésképtelenné válik. Az üzemeltetők és karbantartók számára elméleti és gyakorlati szempontból is nagyon fontos ennek az időpontnak az ismerete, mert ekkor kell dönteniük a csere, a javítás, felújítás, selejtezés, vagy a teljes tönkremenetelig tartó (kényszer) továbbüzemeltetés tekintetében. [16]

Az MSZ IEC⁶ 50(191) szerint a meghibásodás olyan esemény, amely során a termék elveszti azt a képességét, hogy ellássa előírt funkcióját. Meghibásodáskor a gép, termék, vagy alkatrész a meghibásodás eseményének következtében a működő állapotból a hibaállapotba kerül, amely eseményként és folyamatként egyaránt értelmezhető. Folyamatként kezelve a tönkremenetelt figyelembe kell vennünk, hogy a gépet, vagy alkatrészt ért károsító hatások, csak ritkán okoznak azonnali funkcióvesztést. Használat közben a gép különböző részein, elemein kialakult apróbb elváltozások, elhasználódások, műszaki hibák együttes jelenléte okozza végül a teljes funkcióképesség elvesztését. A meghibásodás- és hibafogalmakat az

⁵ Procter&Gamble Hyginett Kft. Csömör. Naturella betét gyártó sor cellulóz őrítő malom, saját rezgésmérés

⁶ IEC - International Electrotechnical Commission

MSZ IEC 50(191) szabvány, a hibák kifejlődését, okait, valamint hatását, a hibák általános felderítési módjait a [16] [17] szakirodalmak tárgyalják kellő részletességgel. A gépeket üzem közben terhelő értékcsökkentő hatásokat, tönkremeneteli módokat pedig a [S04_C] publikációmban dolgoztam fel. Mivel ezek az általános gépészmérnöki ismeretek közé tartoznak, bemutatásuktól a disszertáció terjedelme miatt eltekintek.

I.2.5. A karbantartás, mint a fenntartási tevékenység része

A szakirodalom [16] [17] [18] [19] szerint, a **DIN⁷ 31051** [20] szabványra hivatkozva: a karbantartás azon intézkedések összessége, melyek a kívánt állapot megóvására, helyreállítására, illetve a meglévő állapot megítélésére irányulnak. A karbantartás három fő ága a felül-



1.12. ábra A karbantartási intézkedések [17] [18]

vizsgálat (ellenőrzés, mérés), a gondozás (kezelés) és a helyreállítás (javítás), melyek magukba foglalják a karbantartás céljának a vállalkozás céljával való egyeztetését, azaz a megfelelő karbantartási stratégia megállapítását és alkalmazását is. A karban-

tartás feladata tehát a fizikai elhasználódási folyamat késleltetése, a megbízható működés szinten tartása. Ez rendszerint a gazdaságos üzemeltetés feltételeit megteremtő kezelés, gondozás, felügyelet, vizsgálat, a szükséges beállítások, kisebb javítások összessége, melyet az 1.12. ábrán kísérhetünk figyelemmel.

I.3. Karbantartási rendszerek és stratégiák

A karbantartás önmagában is összetett tevékenység, de hatásait tekintve még inkább kiemelt fontosságúnak kell tekinteni. Alapvető funkciója a termelésben használt gépek, berendezések, járművek, valamint építmények, más létesítmények (pl. hálózatok) funkcióképességének folyamatos biztosítása. Ezt a feladatot jelentékeny erőforrás-felhasználással, az iparág jellegétől függően eltérő, de általában nagy költségekkel látja el. [5]

⁷ DIN - Deutsches Institut für Normung (Német Szabványügyi Intézet)

A karbantartás feladatainak, egy adott folyamat esetében kitűzött stratégiai célok megvalósításának eszköze a **karbantartási rendszer**. Ez egyfajta megközelítésben nem más, mint a karbantartáshoz szükséges erőforrások (eszközök, anyagok, munkaerő, információ, pénz, stb.), műszaki-szervezési dokumentációk, valamint az adott géppark funkcióképessége fenntartásához szükséges intézkedések jellegét és időpontját tartalmazó, a stratégiai elgondolások megvalósítását jelentő tervek összessége. [19] A karbantartási stratégia pedig olyan vezetői döntések láncolata, amely a fenntartási tevékenység céljának elérését biztosítja.

I.3.1. Hagyományos karbantartási stratégiák

Annak ellenére, hogy a karbantartás egyidős a szerszámkészítő emberrel az ipari termelés kezdetén a karbantartási feladatokra nem sok figyelmet fordítottak az üzemeltetők. A gépeket általában addig üzemeltették, amíg azok egyáltalán működőképesek voltak. A termelés és a karbantartás szétválása előtti időkben természetesnek hatott, ha a berendezés elromlott, akkor a rajta vagy vele éppen dolgozó személy azt megjavította. A viszonylag egyszerű berendezések mérsékelt termelékenységére nem tette égetően fontossá a gépkiesések elkerülését, az alkatrészek kihasználtsága is nagy volt, hiszen a beépített élettartamot az alkatrész teljesen kihasználta. A kétkezi munkaerő, ekkor még nem számított a legfőbb termelési költségek közé. [22]

A termelékenység fokozódása, a vezetési eszközökben rejlő lehetőségek csökkenése, a berendezések számának és bonyolultságának a növekedése azonban új megközelítéseket igényelt. A hibáig üzemelés rendszere az '50-es évek elejéig jellemezte az iparvállalatokat. A második világháborút követő időszak drámai változásokat hozott az iparvállalatok életében. Rohamosan nőtt a munkaerő ára, a berendezések bonyolultsági foka, a javítások költsége és a termelékenység. E tendenciák hatása és az ismeretek akkori állása vezetett odáig, hogy céllá vált a gépmeghibásodások tervszerű megelőzése. Minden fontosabb gépet tervszerűen kellett gondozni, javítani azért, hogy a működési zavarok ne jöhessenek váratlanul.

A '60-as évek elejére vált általánossá Magyarországon a TMK-nak⁸ nevezett rendszer, ami főleg abból állt, hogy a berendezéseket kötött intervallumonként nagy- (esetleg kis-és közép-) javításnak vetették alá. Az élet viszonylag hamar bebizonyította, hogy a merev ciklusidőn alapuló karbantartás nem csak nem ad elfogadható alkatrész-felhasználást, de sok esetben még biztonságot sem nyújt.

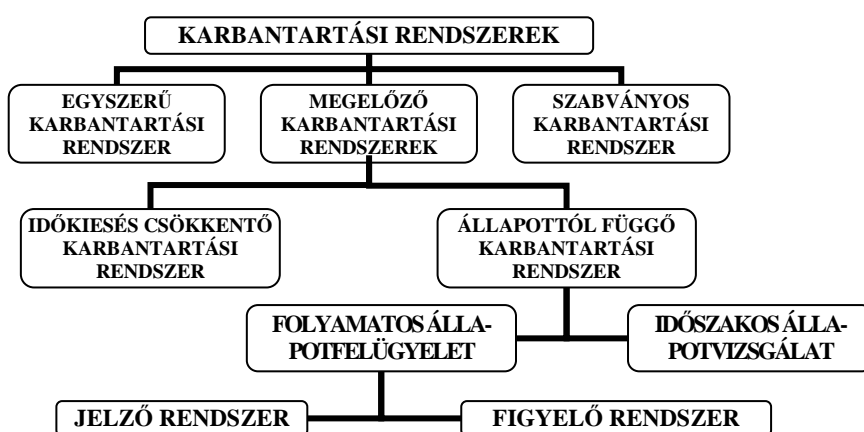
Az ipar érzékenysége a leállásokra tovább fokozódott, hiszen a vállalati költségcsökkentés egyre inkább előtérbe került. A cégek mindinkább elmozdultak a JIT⁹ rendszer irányába. Fo-

⁸ TMK - Tervszerű Megelőző Karbantartás

⁹ JIT - Just in Time (pontosan a megadott időben)

lyamatosan csökkentették a raktárkészleteket, a karcsúsítás azzal az eredménnyel járt, hogy a vállalatok érzékenyebbé váltak a váratlan gépleállásokra. A nehézséget tovább fokozta a gépek mind nagyobb teljesítménye, bonyolultsága, és az a tervezési koncepció, ami a korábban túlméretezett berendezések „lesoványodását” eredményezte. [22] [23]

Az ipar fokozott automatizálása a karbantartás felülvizsgálatának igényét váltotta ki. A stratégiai gondolkodásmód szellemében új fejlesztések születtek. Döntéstámogatási eszközök (kockázati tanulmányok), hibamód- és hatáselemzések, szakértő rendszerek, új karbantartási technikák (állapotvizsgálat) és a menedzsment elvek behozatala a karbantartásba (csapatmun-



1.13. ábra A hagyományos karbantartási rendszerek

karbantartási módszer. Az így kialakult rendszerek az 1.13.ábrán kísérhetők figyelemmel.

Egyszerű „károrientált, vagy tűzoltó jellegű” karbantartási rendszer

Az *egyszerű* karbantartási rendszer (hibajavítás) esetén a szükség szerinti javítást a meghibásodás bekövetkezése után végzik el. A hibás fődarabok alkatrészeit kicserélik, vagy megjavítják. Hátránya, hogy a javítás előre nem tervezhető, a váratlan hiba megszakítja a termelést. A javítások átfutási ideje hosszú a javítás műszaki előkészítésének hiánya és esetleg raktáron nem levő alkatrészek beszerzése miatt. Ha időben nem ismerik fel a váratlanul bekövetkező meghibásodást, további károsodásokat is okozhat. A hiba gyors kijavításához nagy javítókapacitás és tartalék alkatrészkészlet kell. Ezáltal a fenntartási költségek nagymértékben növekedhetnek. Előnye viszont, hogy a gépek, berendezések alkatrészei, fődarabjai, részegységei az elhasználódás határáig kihasználhatók. Olyan gépekhez alkalmazható, amelynek átmeneti üzemképtelensége nem okoz zavart a termelésben. Nem alkalmazható olyan folyamatokban, ahol a gép kiesése jelentős gazdasági kárt okoz, vagy emberi életet veszélyeztet.[21] [22] [23]

Szabványos karbantartási rendszer

A *szabványos* karbantartási rendszer esetén a gép, berendezés egyes alkatrészeinek élettartamára normatívák készülnek, pl. az üzemeltetési óra függvényében. Az előírt időpontban az

ka, flexibilitás, a logisztika, a termelés és karbantartás integrációja, stb.). Az új fejlesztések közül a diagnosztika emelkedett ki, gyorsuló tempóban teret hódított a műszaki diagnosztikán alapuló (állapotfüggő)

alkatrészt, részegységet az elhasználódás mértékétől függetlenül ki kell cserélni. Elsősorban olyan gépekhez alkalmazzák, amelyek meghibásodása nagymértékű anyagi kárral esetleg életveszéllyel jár. Ezt a karbantartási rendszert elsősorban a repülésben alkalmazzák. Előnye, hogy az abszolút üzembiztonságot jól megközelíti, hátránya, hogy igen költséges, nagyon gondos tervezőmunkát igényel. [18] [22]

Időkiesés csökkentő „TMK” karbantartási rendszer

Az időkiesés csökkentő (ciklikus) karbantartási rendszer, mint tervszerű megelőző karbantartási rendszer (TMK) egy előírt időközökben végzett felújítás a kiesési gyakoriság statisztikai kiértékelése alapján. A gépeket, berendezéseket meghatározott időközönként, tervszerűen az előre meghatározott időpontban megjavítják, vagy kicserélik az alkatrészeket, részegységeket, függetlenül attól, hogy milyen mértékben hibásodtak meg. A ciklusrend magába foglalja az elvégzendő munka módját, mértékét, sorrendjét. Ezáltal csökken annak valószínűsége, hogy a gépek a javítás előtt működésképtelenné válnak. A rendszer célja a szükséges biztonság mértékéig, a gazdaságosság határain belül az üzembiztonság állandó fenntartása. Előnye, hogy lehetővé teszi a pontos javítási terv és tartalékkészlet-igény összeállítását. Hátránya, hogy nagyok a javítás költségei, hiszen az előirányzott munkálatokat elhasználódás mértékétől függetlenül el kell végezni. [18] [21] [22] [24] [25]

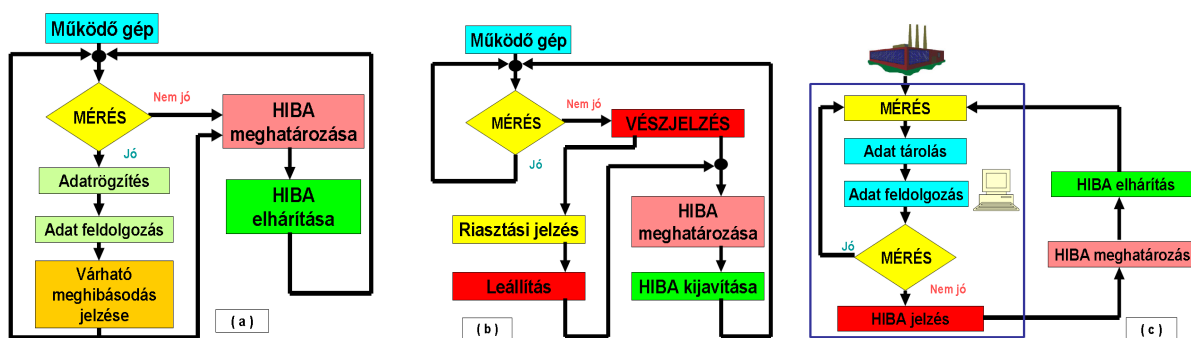
Az időkiesés csökkentő karbantartási rendszer egyik változata a felülvizsgálattal módosított ciklusrend. A rendszer lényege azonos az előzővel, de a két javítás között egy-két vizsgálatot végeznek. A felülvizsgálat eredménye alapján módosítják a következő javítás időpontját a tényleges elhasználódás, a várható meghibásodás figyelembe vételével.

Az állapottól függő karbantartási rendszer

Az állapottól függő karbantartási rendszer, vagy állapotfigyelésen alapuló karbantartási rendszer esetén, a gépen, berendezésen időszakosan vagy folyamatosan műszeres műszaki állapotvizsgálatot végeznek. Az így kapott információkat használják fel a javítási munkákhoz. A gép, berendezés műszaki állapotának rendszeres figyelése, dokumentálása, az elhasználódás törvényszerűségeinek feltárása alapján határozzák meg a javítás várható időpontját, várható mértékét. [21] [22] [23] [24]. Az állapotfigyelésen alapuló karbantartási rendszerrel, mindig egy, az adott gépre, berendezésre jellemző értéket, úgynevezett állapotjelző paramétert vizsgálunk. A gépek mindegyikéhez rendelhető legalább egy-két olyan jellemző mennyiség, amelynek mérése révén következtetéseket tudunk levonni arra vonatkozóan, hogy mi játszódik le a gép belsejében. Ezek közül a legfontosabbak a rezgés, ütésimpulzus, zaj, csapágyhőmérséklet, kenőolaj hőmérséklete, szivattyúk szívó- és nyomócsonkján mért nyomás, stb.

Az állapotfüggő karbantartási rendszert aszerint, hogy a vizsgálatokat meghatározott időszakonként, vagy folyamatosan végezzük felosztható időszakos, vagy folyamatos állapotfüggő karbantartásra, amint azt 1.13.ábrán már láthattuk.

Az *időszakos* állapotfüggő karbantartási stratégia lényege, hogy a felülvizsgálatok időpontjait, időközzeit a gépek elhasználódási sajátosságainak figyelembevételével előre megállapítják és egy éves vizsgálati tervben rögzítik. *Folyamatos állapotfigyelésről* beszélünk, ha a működési- és állapotellenőrzést beépített érzékelők és műszerek folyamatosan, illetve mintavételelesen végzik. A *jelző rendszer* a gép kritikus pontjait folyamatos méréssel ellenőrzi. Ha az alsó riasztási szintnél nincs beavatkozás és a gép állapota tovább romlik, akkor a felső érték elérésekor megszólal a riasztási jelzés, és a rendszer le is állíthatja a berendezést. A *figyelő rendszer* egy számítógéppel vezérelt ellenőrző rendszer, amely tárolja és feldolgozza a mérési eredményeket, meghatározza a gép várható meghibásodását, akár beavatkozási algoritmus kidolgozására is alkalmazható. A fenti rendszerek folyamatábrái az 1.14. ábrán láthatók. [18]



1.14. ábra Az időszakosan (a) és a folyamatosan végzett állapotjelző (b), és figyelő (c) rendszerek [18] [24]

A műszaki diagnosztika az állapotfüggő karbantartás esetében az állapotjelző paraméterek felhasználásával lehetővé teszi a gépek belső szerkezetének vizsgálatát, azok leállítása és szerelése nélkül. Az állapotjelző paraméterek használata során az alábbi munkafázisokat lehet megkülönböztetni:

1. lépés: meg kell találni a gépre jellemző, ún. állapotjelző paramétert;
2. lépés: azonosítani kell az állapotjelző paraméter normális és abnormális értékeit;
3. lépés: meg kell találni az észlelt abnormális érték kiváltó okát;
4. lépés: föl kell mérni az abnormális értéket kiváltó okok lehetséges következményeit;
5. lépés: a körülmények és a várható következmények figyelembevételével dönteni kell az esetleges beavatkozás módjáról [25].

I.4. Korszerű karbantartási filozófiák

Elemezve a hagyományos karbantartási rendszerek gyakorlati tapasztalatait arra a következtetésre juthatunk, hogy mindhárom hagyományos rendszer rendelkezik néhány közös hibával [22]. Egyik sem foglalkozik a karbantartási információk áramlásával, egyik sem veszi figyelembe az emberi tényezőt, mindhárom rendszer tisztán a műszaki kérdésekre koncentrálnak.

Egyik rendszer sem foglalkozik azzal, hogy ki a felhasználó, és neki milyenek az igényei. Mindhárom rendszer csak a karbantartás szempontjait veszi figyelembe. Arról, hogy éppen milyen termelési vagy cégérdek dominál, és ez hogyan kapcsolódik a karbantartáshoz, egy szó sem esik. Az a fő probléma, hogy a hagyományos szakirodalom a gépjavítások esedékességét kizárólag a műszaki szempontok alapján elemzi és csak azokat veszi figyelembe [28]. Ezen hiányosságot szem előtt tartva fejlődtek tovább a karbantartási rendszerek, melyek fejlődése az 1.15. ábrán kísérhető figyelemmel.

Az RCM karbantartási filozófia

Az RCM¹⁰ karbantartási filozófia kialakulását két amerikai elemző 70-es években írt tanulmányának tulajdonítják, amelyben az amerikai polgári repülőgépiparban alkalmazott fenntartási, karbantartási módszereket vizsgálták meg. Rámutattak arra, hogy a tervszerű karbantartással (pl. a gázturbinák rendszeres szétszerelésével) nem lehet ezeknek az összetett rendszereknek a megbízhatóságát megfelelő szinten biztosítani. Az általuk először a Boeing747-nél bevezetett ún. MSG-1 rendszerben a figyelmet a megbízhatósági elemzésre és a költségek minimalizálására helyezték. A kipróbálás során kiderült, hogy e rendszer a repülési biztonság és rendelkezésre állás növekedését eredményezi. A módszer ráadásul kevésbé függ a világ különféle részein uralkodó gyártási és karbantartási kultúrák különbözőségétől, így a repülőgép ipar után a haditengerészet, majd egyre több multinacionális cég is bevezette. [18] [24]

Röviden az RCM kulcsa az elemzés. Az RCM elmélete szerint a megfelelő karbantartási módszer kiválasztásában a következő 7 kérdés megválaszolása adhat segítséget:

- Mi a gép feladata és mik elvárások a folyamatban elfoglalt helyzete szerint?
- Milyen meghibásodások akadályozhatják meg a gépet feladata ellátásában?
- Mi a meghibásodások oka?
- Mi történik a hibajelenségek beálltakor?
- Milyen következményei lehetnek a meghibásodásoknak?
- Milyen intézkedésekkel előzhető meg a hibák?
- Mit tehetünk, ha nem található alkalmazható megelőző tevékenység?

Az RCM tehát azokra a módszerekre fekteti a legnagyobb hangsúlyt, melyek segítségével az egyes berendezésekre leginkább alkalmazható karbantartási módszert vagy javítási intézkedést meghatározza. [24] [26] [27]

¹⁰ RCM - Reliability Centered Maintenance: megbízhatóságra összpontosító karbantartás

A TPM¹¹ karbantartási filozófia

A TPM hasonló megfontolások alapján keres új utat, mint az előbbi rendszer, azonban más oldalról közelít a problémákhoz. Alapgondolatait már az 1930-as években és a II világháború után kidolgozták az USA-ban, tökéletesítése a 70-es években a japán S. Nakajima nevéhez fűződik. Míg az RCM egyértelműen a berendezések oldaláról vizsgálódva építi fel rendszerét, addig a TPM esetében a központban a gépeket és a termelést kiszolgáló személyzet áll. [26]

Elméletének legfőbb céljai: [22] [26]

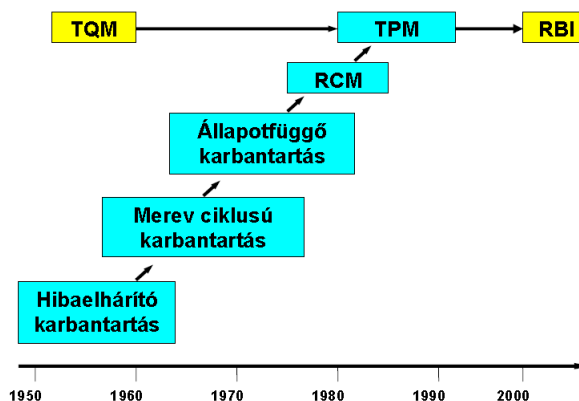
- az emberi erőforrások fejlesztése,
- tisztaság, rend és tudatosság,
- törekvés az állandó fejlesztésre,
- a vevő első helyre helyezése,
- siker elsőre, minden alkalommal.

Mindezeket keresztül kívánja elérni a ter-

melékenység növelését, mely központi jelentőségű. Ennek érdekében kell mozgósítani és egy csapatba gyűjteni mind az üzemviteli, mind a karbantartó személyzetet. Ez egyben – ahogy az RCM-nél is – a karbantartásnak a gyártással egyenrangú voltát hangsúlyozza. A várható eredmény a gyártási folyamat lehető legnagyobb hatékonyságú működtetése a kezdődő hibák kiszűrése és azonnali javítása által. Hogy a karbantartás a termelés szerves részévé váljék öt alaptételt, az 5s-t (szervezettség-sem, rendszeresség - seiton, takarítás-seiso, tisztaság-seiketsu, fegyelem-shitsuke) kell érvényesíteni.

Az elmélet szerint a rendszeres tisztogatás és kisebb karbantartási munkák végzése során a munkahely tisztább, rendezettebb lesz, továbbá a gépek üzemeltetői megismerik a gépeket és felfedezik gyenge pontjaikat, kezdődő hibáikat. [26] Ez egybevágh az egyik legfőbb célkitűzéssel, a munkások állandó képzésével és a sokoldalúan képzett dolgozók alkalmazásával. További remélt előny, hogy a személyzet tulajdonosi szemlélete erősödik és nagyobb fokú odafigyelés várható el tőlük a mindennapi munkavégzés során. A TPM terminológiája a fent felsoroltakat a Hat Nagy Veszteség névvel azonosítja és az ellenük való harcot tekinti céljának, mivel ezek tehetők felelőssé további problémákért is (pl. késői szállítások, a vállalat és vásárlóinak rossz megítélése, rugalmatlanság a problémák kezelésében, stb.).

A megoldás kulcsszava a csapatmunka, melynek keretében felvethetők az észlelt problémák, kidolgozható a megoldás terve.



1.15. ábra A korszerű karbantartási filozófiák

¹¹ TPM (Total Productive Maintenance: a termelékenység, minőség, gazdaságosság és biztonság szempontjait egyesítő, azaz teljes körű hatékony karbantartás)

A CMMS¹² (Computerised Maintenance Management System) rendszer

A CMMS mint a neve is mutatja elsősorban a karbantartási vezetők munkáját segíti a naprakész adatokon alapuló döntések meghozatalában. A szoftver csupán egy eszköz, amely hihetetlen mértékben segíti, de nem javítja meg a karbantartást. Bevezetése előtt át kell gondolni és rendbe kell tenni a karbantartási rendszert, mert ennek hiányában csak a rossz információkat áramoltatjuk - minden eddiginél nagyobb mértékben. [28] [29]

A CMMS története 15-20 évre nyúlik vissza. A kezdeti változatok célja a karbantartási munkák jobb szervezése és követése volt, napjainkra a CMMS feladata sokoldalúbbá vált. A CMMS végtelennek tűnő céljai közül a legfontosabbak a teljesség igénye nélkül; a karbantartási rendszer egységesítése, a folyamatok automatizálása a források optimalizálása a szerződések kezelése a kézzel írott anyagok gépesítése hatékonyságnövelés elérése a munka előkészítésével a berendezés élettartamának és megbízhatóságának növelése az energiafelhasználás csökkenése, stb. [26] [29]. A CMMS bevezetése során általában a fent megfogalmazott előnyöket kell megteremtenie a cégnek többek között azzal, hogy a karbantartási adatok tengerét könnyen átlátható és használható információvá alakítja. A CMMS olyan eszköz, amely kereket biztosít a legjobb gyakorlat karbantartási rendszerbe történő integrálásához. Ismét hangsúlyozni kell, hogy csak eszköz, amely hasznossága teljes mértékben a felhasználókon múlik, azaz hogy használják-e, vagy sem a rendszert, ha igen, akkor jól vagy rosszul alkalmazzák-e.

Az RBM¹³ (Risk Based Inspection and Maintenance) karbantartási filozófia

Az RBM rendszer a legfiatalabb az eddig áttekintett rendszerek közül, mindössze néhány éves múltra tekint vissza, az USA-ban alkalmazzák, európai elterjedése még nem számottevő. Kialakulásában fontos szerepet játszott az a tény, hogy az állapotfüggő karbantartási stratégia során jelentős időt és pénzt fordítanak olyan gépek és berendezések műszeres ellenőrzésére, illetve karbantartására, amelyek nem létfontosságú gépek, vagy nagyon hosszú ideig képesek tartani használhatósági paramétereiket. A módszer alapja a kockázat elemzés. Célja, hogy növelje a karbantartási és felülvizsgálati folyamatok hatékonyságát és elősegítse a karbantartási döntéshozatalt. [18]

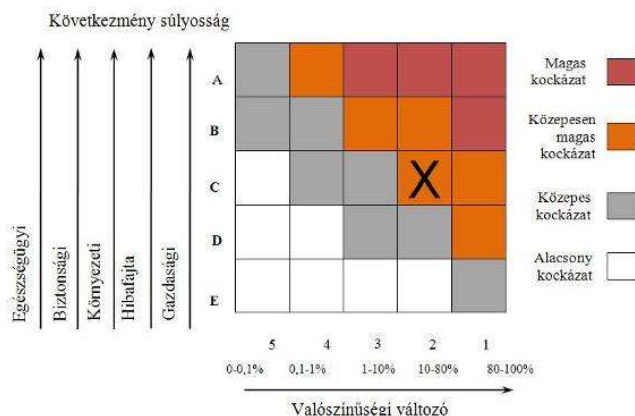
Az egyes szerkezeti elemek meghibásodásának valószínűségét több paraméter függvényében vizsgálja. A műszaki, a gazdasági, a biztonsági információkat, valamint a meghibásodás következményeinek súlyosságát együttesen veszi figyelembe. A karbantartási tevékenységeket a gép által képviselt kockázat függvényében végzik. A vizsgálati intervallumot szakértők és szakértő rendszerek alkalmazásával határozzák meg. [30][31]

¹² CMMS-Computerised Maintenance Management System- Számítógépes Karbantartás Menedzsment Rendszer

¹³ RBM - Risk Based Inspektion and Maintenance – Kockázat Alapú Vizsgálat és Karbantartás

A kockázat meghatározásának folyamata során megtörténik a veszély azonosítása, a gyakoriság becslése, a következmény becslése, a kockázat értékelése, majd ez alapján határozzák meg az ún. kockázati mátrixot, melyre példát az 1.16. ábrán láthatunk. A kockázati mátrix egyik oldalán az adott szempontrendszer szerinti következmény, a másik oldalán a valószínűségi változó áll. A következmény és a valószínűség eredményeként kapjuk a kockázat becslését, vagyis a kockázati besorolást. A kockázati mátrix egy táblázat, melynek segítségével egy fix értéket rendelünk az azonosított kockázathoz. A kockázati következmény besorolásánál

figyelembe vesszük a személyek biztonságára, egészségére, a környezetre, és a gazdaságra ható, valamint a vállalat megítélését érintő következményeket is. Mindegyik következmény öt kategóriára van osztva a következmény súlyosság alapján, az „A” kategória a súlyos, az „E” pedig az enyhe, elhanyagolható következményt jelöli. A kockázati mátrixot egy szakértő rendszer automatikusan készíti el többféle diagnosztikai vizsgálat (rezgésmérés, termográfia, szivárgásvizsgálat és olaj-mintavételezés) kiértékelése alapján, de elsősorban a rezgésmérés szakértői rendszerére támaszkodva. A szakértő rendszer a komplex mérések eredményeit felhasználva egy dinamikus kockázati mátrixban jeleníti meg a berendezés aktuális kockázati besorolását, amely minden mérés és beavatkozás után változhat. A karbantartási intézkedéseket, a szükséges beavatkozásokat a kockázati mátrix alapján automatikusan állítja össze a vállalatirányítási rendszer részére.



1.16. ábra A kockázati mátrix felépítése [30]

1.5. A műszaki diagnosztika jellemzői, a diagnosztikai módszerek csoportosítása

A diagnosztika kifejezés eredete a „diagnózis”¹⁴ szóból származik, a műszaki életben a diagnosztika a gépek állapotának meghatározását jelenti, amelyet a gép által szolgáltatott információk kiértékelése útján kaphatunk.

A műszaki diagnosztika olyan eljárás, amely műszerek és mérőeszközök alkalmazásával, a gép lényeges megbontása nélkül, üzem közben, akár teljes terhelés alatt a vizsgált berendezés által keltett hatásokból és a mérhető jelekből mutat rá a gép múltbeli, jelenlegi állapotára, illetve jövőbeli viselkedésére.

¹⁴ „diagnózis” - görög szó, felismerést, meghatározást jelent

I.5.1. A műszaki diagnosztikai információhordozók [S04_D]

Minden gép műszaki állapota leírható az 1.2.1. fejezetben tárgyalt rendszerelemek állapotvektorával, illetve kimenő változóinak összességével. A gépállapot tökéletes leírásához szükséges állapotváltozók között mindig van néhány olyan, amely önmagában is elegendő információval szolgál a berendezés műszaki állapotáról. A legfontosabb jellemzőket kiválasztva, ezek megfigyelésével, dokumentálható műszeres mérésével a műszaki gyakorlat számára jó képet kaphatunk arról, hogy az adott eszköz élettartamának melyik szakaszában üzemel.

Az állapotjellemzőknek azt a csoportját, amely segítségével a berendezés műszaki állapota, elhasználódásának mértéke megítélhető diagnosztikai információhordozóknak nevezzük. Osztályozásukat több szempont szerint végezhetjük, a legfontosabbak a komplexitás, a mérhetőség és a mért jel alapján történő osztályozások. **Komplexitás** szempontjából, megkülönböztethetünk *egyszerű* állapotjellemzőt (például hőmérséklet, nyomás), és *összetett* állapotjellemzőt (pl. rezgés, zaj). **Mérhetőség** alapján vannak a méréstechnikai szempontból *jól* és a *kevésbé jól mérhető* diagnosztikai jellemzők. **A mért jel jellege alapján** a *fizikai*, *kémiai* és *mechanikai* mennyiségeket különböztetünk meg, melyek közül a legfontosabb információ hordozók a:

Fizikai jellemzők :

- | | |
|------------------------------|--|
| • rezgés, rezgésszint | - rezgésdiagnosztika, |
| • zaj, zajszint, hangnyomás, | - zajdiagnosztika |
| • hullámhossz, | - rezgésdiagnosztika, zajdiagnosztika |
| • frekvencia | - rezgésdiagnosztika, zajdiagnosztika |
| • hőmérséklet | - általános diagnosztikai felhasználás |

Kémiai jellemzők: Gázösszetétel, savsűrűség, koromtartalom, stb.

Mechanikai jellemzők: erő, fordulatszám, teljesítmény, út, sebesség, gyorsulás

I.5.2. A diagnosztikai módszerek rendszerezése, felosztása [S04_D]

A diagnosztika eredete egészen az egyszerű, emberi, vagy állati erővel meghajtott gépek kialakulásának korszakáig nyúlik vissza. Ebben az időben természetesen még csak olyan spontán módon létrejött, véletlen megfigyeléseken, tapasztalatokon, alapuló eseményeket tekinthetünk a diagnosztika kezdeti eredményeinek, melyek az adott kor primitív gépeinél, emberi érzékszervekkel észlelhetők voltak. Ahogyan a technika fejlődött a gépek egyre bonyolultabbak lettek és a bennük lejátszódó folyamatokat sem lehet már érzékszerveinkkel követni. Ezért van szükség napjainkban olyan módszerek és műszerek alkalmazására, amelyekkel a kor színvonalán üzemelő gépek egzakt, dokumentálható módon vizsgálhatók, a hibákra utaló

jelek értelmezhetőek. Nem szabad elfelejteni azonban, hogy a korszerű módszerek nagy része az emberi érzékszerveken alapul. Az emberi érzékszervek és az őket kiváltó diagnosztikai

Érzékelés	Emberi érzékszerv	Dianosztikai eszköz
Hallás	Emberi fül	Mikrofon, zajanalizátor, stb.
Látás	Emberi szem	Holográfia, szinképelemző, fényérzékeny chipék, stb.
Szaglás	Orr	Gázelemző készülékek, analizátorok
Tapintás	Emberi kéz, bőrfelület	Erő-, rezgés-, hőmérséklet érzékelők, stb.
Izlelés	Izlelőbimbók	Kémiai analizátorok, pH-mérők, stb.

1.17. ábra Az emberi érzékszervek és diagnosztikai eszközök kapcsolata

rendezések ipari térhódításával együtt folyamatosan szélesedik. A műszaki diagnosztika rendszerezését az egyes elveknek megfelelő gépdgnosztikai módszereket, melyeket az 1.18. ábrán kísérhetünk figyelemmel már a [S04_D] publikációmban feldolgoztam, részletes bemutatásukat az értekezés terjedelme nem teszi lehetővé.

I.6. Következtetések

A fejezetben bemutatott üzemfenntartási és diagnosztikai szakirodalom feldolgozása alapján megállapítható, hogy a gépek üzemeltetése, az üzemeltetés stratégiája, valamint az ezen stratégiákhoz tartozó diagnosztikai vizsgálatok szoros kapcsolatban állnak egymással.

A diagnosztikai módszerek leghatékonyabban a megelőző karbantartási stratégiákban, ezen belül is az állapotfüggő karbantartásban alkalmazhatók. A korszerű karbantartási stratégiákat áttekintve láthatjuk, hogy a hagyományos stratégiáknál felsorolt hiányosságok közül az emberi tényezőt a TPM, az információáramlást a CMMS, a felhasználó igényeinek az figyelembe vételét pedig az RCM elégíti ki. Az RBM az állapotfüggő stratégia kiterjesztése, amely komplex diagnosztikán alapuló tanácsokkal látja el a vállalatvezetést.

Megállapíthatom, hogy a diagnosztika alkalmazásában nagy jelentősége van annak, hogy a diagnosztikai információhordozókat és a diagnosztikai módszereket megfelelően válasszuk meg az adott karbantartási, vagy üzemeltetési célfeladathoz.

eszközök kapcsolata az 1.17. ábrán látható.

A gépdgnosztikai módszerek, eljárások köre az egyre bonyolultabb és egyre nagyobb értékű be-

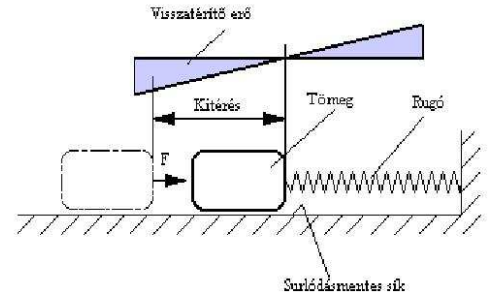
A MŰSZAKI DIAGNOSZTIKA RENDSZEREZÉSE	
RENDEZŐ EL VEK	ALAVETŐ MÓDSZEREK
A diagnosztika célja	- Funkcionális diagnosztika - Hibadiagnosztika
A diagnosztikai eljárás módja	- Közvetlen diagnosztika - Közvetett diagnosztika
A diagnosztika végrehajtója	- Hagyományos diagnosztika - Automatikus diagnosztika
A diagnosztika terjedelme	- Részdiagnosztika - Teljes diagnosztika
A diagnosztikai jel eredete	- Aktív diagnosztikai módszerek - Passzív diagnosztikai módszer
A diagnosztika végrehajtásának módja	- Szubjektív diagnosztika - Objektív diagnosztika
A diagnosztika időbeli alkalmazása	- Időszakos diagnosztika - Folyamatos diagnosztika
A diagnosztika eredménye	- Szimplex diagnosztika - Komplex diagnosztika

1.18. ábra A műszaki diagnosztika rendszerezés

II. FEJEZET Mechanikai rezgések jellemzői, rezgésmérési, kiértékelési módszerek

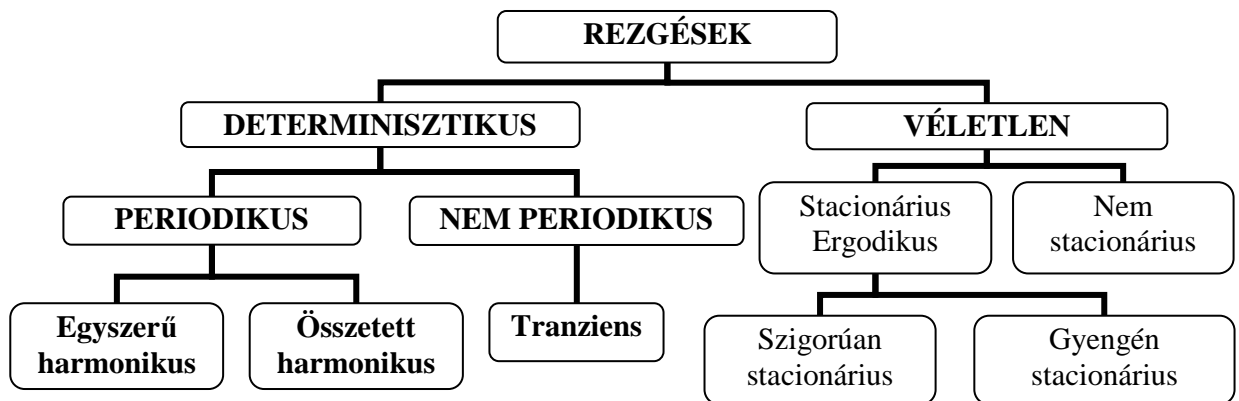
II.1. Rezgéstani alapfogalmak

Az MSZ ISO 2041-1995 [33] szerint a rezgés „Mechanikai rendszer helyzetének, vagy mozgásának leírására alkalmas mennyiség változása az idő függvényében; a változás felváltva hol kisebb, hol nagyobb egy bizonyos átlag-, vagy referenciaértéknél”. Egy általánosabb megfogalmazás szerint, „a rezgés valamely fizikai mennyiség változásának ismétlődően növekvő és csökkenő folyamata az idő függvényében”. Ezt láthatjuk 2.1. ábrán a legegyszerűbb egy szabadságfokú tömeg- rugó rendszernél, ahol a referencia hely (átlagérték, közép-helyzet) körül az út, a sebesség és a gyorsulás állandó rezgést végez, azaz periodikusan, harmonikusan változik.



2.1. ábra Tömeg-rugó rendszer [32]

A mechanikai rezgések alapvető felosztását az MSZ ISO 2041 [33] szabvány alapján az 2.2. ábrán kísérhetjük figyelemmel. Mind a szabvány, mind az általam a témában készült saját publikációim [S4_E] részletesen bemutatják a rezgések felosztását, összetevését, ezért következőkben csupán a periodikus és harmonikus rezgéseknek a disszertáció célkitűzéseimhez szorosan kapcsolódó jellemzőit ismertetem.

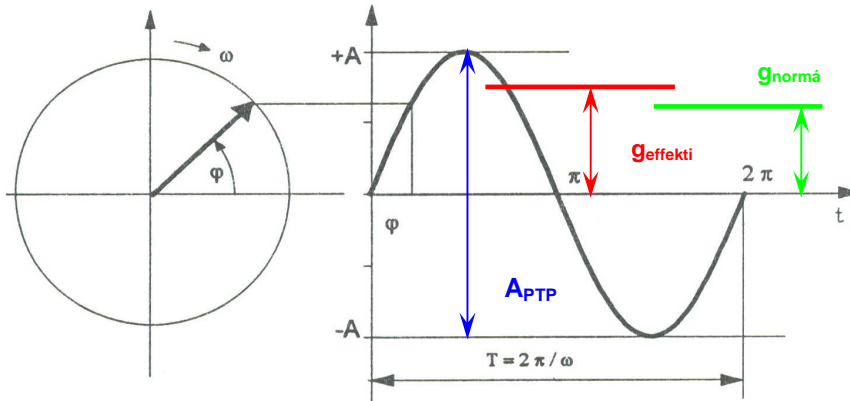


2.2. ábra A rezgések felosztása az MSZ ISO 2041-1995 szerint [33]

II.1.1. Periodikus rezgések jellemző mennyiségei [S4_E]

A műszaki diagnosztikai méréseknél a legnagyobb jelentőséggel a determinisztikus és periodikus rezgések bírnak. Ezen rezgések csoportján belül vizsgálódásaink szempontjából a legfontosabbak a harmonikus rezgések. **Harmonikusnak** nevezzük azt a rezgést, amelynek rezgésjelleme az idő függvényében a $g(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$ törvényszerűséggel változik, ahol az A – amplitúdó az ω - körfrekvencia (1/s) és a φ - kezdő fázisszög állandók. A harmoni-

kus rezgés a 2.3.ábrának megfelelően előállítható egy A hosszúságú ω szögsebességgel forgó



vektor vetületeként. A 2π középponti szöget a vektor ω szögsebességgel éppen T periódusidő alatt teszi meg.[34]

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2.1)$$

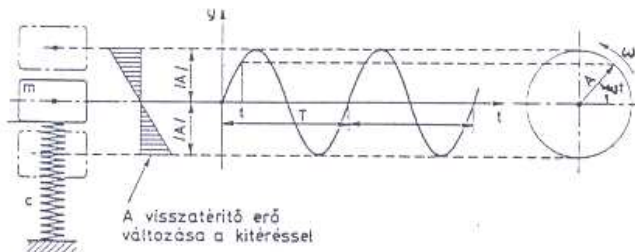
2.3. ábra Periodikus, harmonikus rezgés jellemző mennyiségei

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.2)$$

A frekvencia a periódusidő reciproka, az egy másodperc alatt megtett rezgések száma, mértékegysége [1/s], vagy [Hz]. [35]

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{ebből} \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (2.3)$$

A harmonikus rezgőmozgás a mechanikában többféle módon előállítható. Ilyen mozgást végez például a kulisszás hajtómű, vagy az egy szabadságfokú és a kiterítés után magára hagyott tömeg-rugó rendszer (lásd 2.4. ábra) csillapítás nélkül. A rendszerre felírható differenciálegyenlet az erők állandó egyensúlyát fejezi ki : [35]



$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{1}{c} \cdot x = 0 \quad \text{ahol} \quad (2.4)$$

m [kg] a rezgő test tömege,
 c [m/N] - a rugóállandó

2.4. ábra Csillapítatlan harmonikus szabad rezgés homogén, hiányos differenciál egyenlet, mely rendezés után az alábbi alakra hozható: [32] [34]

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -\omega_0 \cdot x \quad \text{ahol} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{m \cdot c}} \quad \text{a rendszer saját szögsebessége és} \quad (2.5)$$

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2 \cdot \pi} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{m \cdot c}} \quad [1/s] \quad \text{a rendszer sajátfrekvenciája} \quad (2.6)$$

Egy tetszőleges $g(t)$ periodikus (determinisztikus) rezgés számszerű jellemzéséhez függvény rajzából rögtön nyerhető a pozitív $\{+A\}$ és a $\{-A\}$ negatív amplitúdó és a $\{T\}$ rezgésidő. Szokásos még az A_{PTP} értéket is megadni, ez ún. Peak to Peak érték. Lásd 2.3.ábra. [35]

$$A_{PTP} = |+A| + |-A| \quad (2.7)$$

Jól jellemezhetik $g(t)$ függvényt az átlag értékei is, melyek a következők :

A **normál átlag** tulajdonképpen a $g(t)$ abszolút értékének integrál-közéértéke:

$$\bar{g}_{\text{normál}} = \frac{1}{T} \int_0^T |g(t)| dt \quad (2.8)$$

Az **effektív átlag** képzésére az alábbi összefüggést kell figyelembe venni:

$$\bar{g}_{\text{effektív}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T g(t)^2 dt} \quad (2.9)$$

Az effektív átlagot a gyakorlatban **RMS¹⁵ átlagnak** is nevezik. Az átlagok képzéséről elmondható, hogy mind az abszolút-érték képzés, mind a négyzetre emelés megoldja a negatív területek kezelésének problémáját.[44] A négyzetre emelés ugyan torzítja a függvényt a gyakorlatban mégis az RMS használata terjedt el, mert ez fejezi ki a rezgés energiáját.

Az effektív érték gyorsulás esetén a következőképpen számítható:

$$a_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad (2.10)$$

Az effektív és a csúcserték közötti kapcsolat szinuszosan változó rezgésnél:

$$a_{\text{eff}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot a_{pk} = 0,707 \cdot a_{pk} \quad (2.11)$$

További jellemző értékek még az :

$$F_f = \frac{\bar{g}_{\text{effektív}}}{\bar{g}_{\text{normál}}} \quad \text{formatényező és az} \quad (2.12)$$

$$F_c = \frac{A}{\bar{g}_{\text{effektív}}} \quad \text{sisaktényező, vagy csúcstényező.} \quad (2.13)$$

II.1.2. Csillapítatlan és csillapított rezgések [S4_F]

A csillapítás nélküli egy-szabadságfokú tömeg-rugó rendszer rezgéseivel ellentétben a valóságos rendszerekben mindig jelen van a csillapítás (súrlódás, légellenállás, stb.). A csillapítás tulajdonképpen a rezgő rendszer energiájának felemésztése. Egy valóságos rendszer csillapításait három csoportba sorolhatjuk. A rezgést csillapító erő állandó és mindig a mozgásiránnyal ellentétes irányban hat, amely tulajdonképpen a **Coulomb féle súrlódás**. Ha az ellenállás a mozgás sebességével arányos, akkor **Newtoni – viszkózus – súrlódással** állunk szemben. A turbulens áramlásos rendszerben az ellenállás a sebesség négyzetével (esetleg más tört kitevőjével) is arányos lehet. A gyakorlatban, mindhárom csillapítási változat előfordul, részletesebben a sebességarányos csillapítás esetével foglalkozom, mert ez a leggyakoribb. Ebben az esetben a differenciálegyenlet az alábbiak szerint alakul: [36]

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + k \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{1}{c} \cdot x = 0 \quad (2.14)$$

¹⁵ RMS – Root Mean Square – négyzetes középérték, amely azonos az effektív átlagértékkel

Ebben az egyenletben a k [Ns/m] a sebességarányos csillapítás tényezője. Ennek segítségével értelmezhető az ún. **csillapítási tényező**: $\xi = \frac{k}{2 \cdot m} [1/s]$ (2.15)

$$\text{A Lehr-féle un. abszolút csillapítás értéke dimenzió nélküli } D_L = \frac{2\xi}{\omega_0} = \frac{k}{2 \cdot m \cdot \omega_0}, \quad (2.16)$$

ahol ω_0 a csillapítatlan rendszer sajátfrekvenciája. Ezekkel a jelölésekkel a differenciál egyenlet a $D = d/dt$ differenciál operátor bevezetésével, rendezés után az alábbi alakra hozható:

$$m \cdot c \frac{d^2 x}{dt^2} + k \cdot c \cdot \frac{dx}{dt} + x = 0 \quad (2.17)$$

$$\text{majd az } \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{m \cdot c}} \text{ és } \xi = \frac{k}{2 \cdot m} \text{ helyettesítése után a} \quad (2.18)$$

$$\frac{1}{\omega_0^2} \cdot D^2 x + \frac{1}{\omega_0^2} \cdot D \cdot x + x = 0 \text{ egyenletet kapjuk.} \quad (2.19)$$

A $D = j \cdot \omega$ formális helyettesítéssel az un. frekvenciafüggvényt nyerhetjük, amely a gerjesztett rendszerek amplitúdó nagyításának, a nagyítási tényezőnek meghatározását teszi lehetővé. A gerjesztés hatására létrejövő frekvencia-függvény tehát az alábbiak szerint alakul:

$$Y(j\omega) = \frac{1}{-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + \frac{2\xi}{\omega_0} \cdot j \cdot \frac{\omega}{\omega_0} + 1} = \frac{A_2}{A_1} \cdot e^{j\varphi} \quad (2.20)$$

$$\text{és mivel } \frac{2\xi}{\omega_0} \cdot j \cdot \frac{\omega}{\omega_0} = 2 \cdot D_L \cdot j \cdot \frac{\omega}{\omega_0}, \text{ ezért} \quad (2.21)$$

$$Y(j\omega) = \frac{1}{-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 2 \cdot D_L \cdot j \cdot \frac{\omega}{\omega_0} + 1} = \frac{A_2}{A_1} \cdot e^{j\varphi} \quad (2.22)$$

Ahol $j = \sqrt{-1}$ - az imaginárius egység

A_1 - a gerjesztő amplitúdó

A_2 - a vizsgált rendszer amplitúdója

$\left| \frac{A_2}{A_1} \right| = \nu$ - a nagyítási tényező

$$\text{Rezgő rendszerek viselkedését legáttekinthetőbben a } \nu = \left| \frac{A_2}{A_1} \right| = f \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) \text{ un.} \quad (2.23)$$

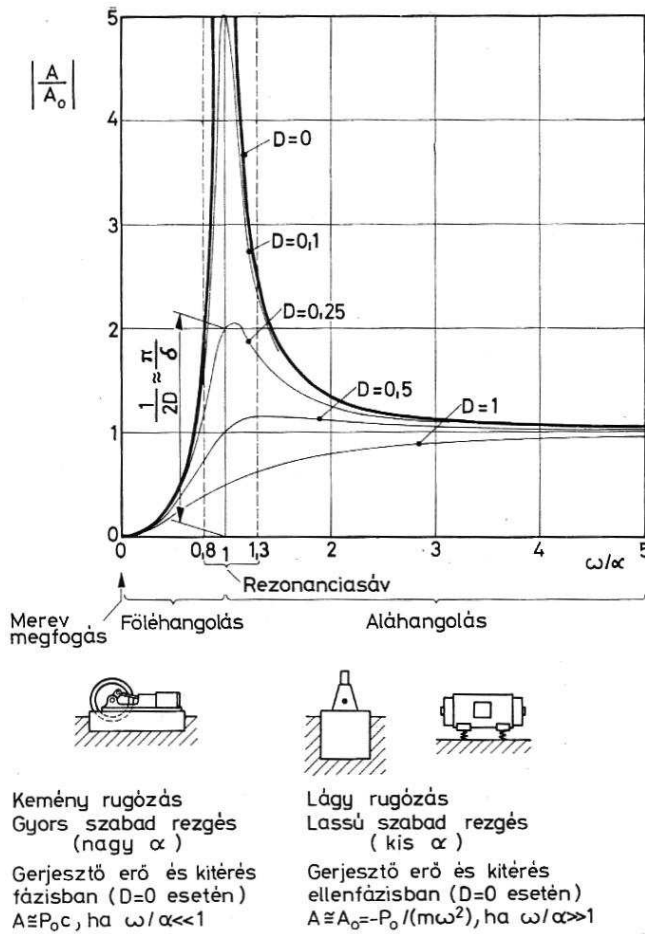
nagyítási függvény menete írja le. Ebben az ábrázolásban rendszerint D_L (a Lehr féle) abszolút csillapítás szerepel, amely a

$$D_L = \frac{2\xi}{\omega_0} = \frac{k}{2 \cdot m \cdot \omega_0} \quad (2.24)$$

képlettel számítható. Ez a csillapítási tényező, amely a 2.4. ábra görbéinek paramétere.

Az ábrán vastag vonal tünteti fel a csillapítás mentes rendszer nagyítási tényezőjét ($D_L = 0$), míg a $D_L \neq 0$ görbék futása a vékonyabb vonalak szerint alakul.

A frekvenciafüggvény tehát megmutatja, hogy egy csillapítatlan, egy szabadságfokú tömeg-rugó rendszer szinuszos tömeggerjesztés esetén $-F_G = F \sin \omega t$ - a rezonancia sávban igen nagy tágasságú lengésekre „hintáztatható” fel. Ha a gerjesztés az $\omega = \omega_0$ saját-



2.5. ábra Egy szabadságfokú, egytömegű rezgőrendszer gerjesztett rezgései [37]

mindig jelen van. Ha a sebességgel arányos csillapítást csatolunk egy rezgő rendszerhez, akkor a rezonanciasávban működtetett rendszer kimenő amplitúdója nem érhet el korlátlan értéket, az aláhangelés területén viszont nagyobb kimenő amplitúdó lép fel.

Az egy szabadságfokú rezgőrendszereknél a rezonanciasávon belül történő gerjesztés ellenőrizhetetlenül magas (veszélyes) amplitúdókat eredményez. A gyakorlatban a rezgő rendszert a kritikus szögsebesség (ω_{krit}) és kritikus fordulatszám (n_{krit}) megadásával jellemezzük:

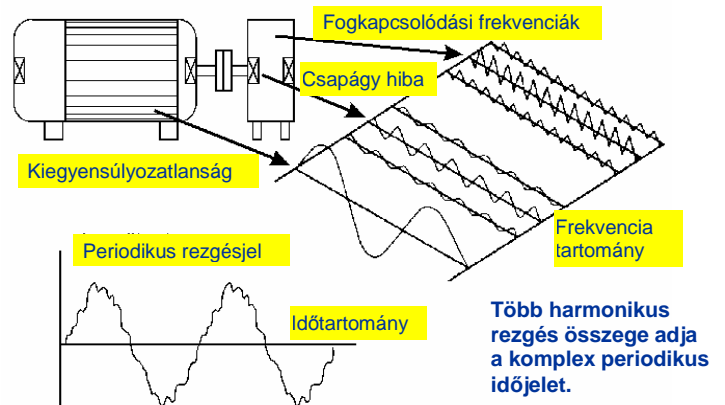
$$\omega_{krit} = (0,8 \div 1,25) \cdot \omega_0, \text{ illetve } n_{krit} = \frac{60 \cdot \omega_{krit}}{2\pi}, \text{ ahol } n[\text{f/min}] \quad (2.25)$$

Az $\omega < \omega_{krit}$ terület az un. **főléhangolás**, azaz amikor a rendszerben lévő rugó viszonylag lágy. A merev rugójú alapozással a rendszert az aláhangelés zónájába tolhatjuk. Itt a lengés amplitúdója mindig kisebb a gerjesztés amplitúdójánál, de a talajerők jelentősen nőhetnek a csillapítatlan rendszerhez képest.¹⁶ [38]

¹⁶ Ezen megfontolások alapján terveztem a WibroShoW próbapadhoz rugalmas és merev alapozást, hogy a rezonancia jelensége szemléletesebben kimutathatóvá váljon, lásd. III.3. fejezet. A kritikus fordulatszám kifutásvizsgálattal történt meghatározása után terveztem a mérési sorozatokat a 2. tézis bizonyításához. IV.2.1.2 fejezet.

II.2. Forgógépek legfontosabb rezgésjellemei

A haditechnikai eszközökben, vagy ipari termelésben üzembe állított forgógépek nem merev testek, hanem sokféle alkatrészből, részegységből épülnek fel, ezért különböző alkatrészeik különféle rezgéseket hoznak létre, amint azt a 2.6. ábra is szemlélteti. Az ábrán sematikusan ábrázolt alacsonyabb és magasabb



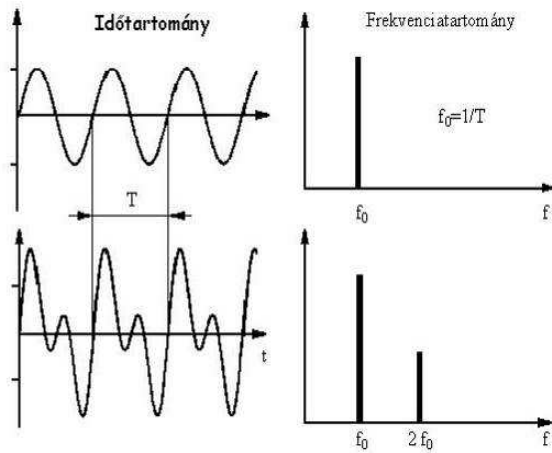
2.6. ábra. Forgógépek összetett rezgései [39]

harmonikus rezgésösszetevők láthatók. Ezek segítségével szeretném érzékeltetni, hogy a különféle fordulatszámú és energiájú géprészek működéséből származó harmonikus rezgések összessége adja a géptesten érzékelhető periodikus komplex időjelet. A motor „forgási frekvenciáján”¹⁷ alacsonyabb frekvenciájú, de magas amplitúdójú rezgések jöhetnek létre például a forgó tömegek kiegyensúlyozatlansága miatt. Egy gördülőcsapágyban 7-13 db gördülő elem van, ebből kifolyóan a golyók forgásából gerjesztett erők, tehát gördülőcsapágy működése a 7-13x-os frekvencia tartományban hozhat létre felharmonikusokat. A fogaskerekek még ennél is magasabb 17-200x-os felharmonikusokat is gerjeszhetnek, lásd. III.2.9. fejezet.

Egy géprendszer komplex periodikus időjele, minden esetben az alkatrészek működése, vagy hibája miatt kialakuló harmonikus rezgésekből tevődik össze. Minél több ilyen alkatrész található a berendezésben, annál több összetevőből jön létre a rezgésmérési eredmény, így természetesen a kiértékelés során is nehezebben lehet őket beazonosítani, nehezebben lehet az esetleges meghibásodás okára fényt deríteni. [39] Az időben lejátszódó folyamatok által keltett szinuszos rezgések a Fourier transzformáció segítségével a frekvencia tartományba transzformálhatók, az így kapott időjelre és amplitúdó spektrumra mutat példát a 2.7. ábra.

A Fourier transzformáció alkalmazására azért van szükség, mert a valóságban igen ritka az, hogy csak egyetlen szinuszos jellegű rezgés jelentkezzen a vizsgált gépen, vagy alkatrészen. Már két rezgés esetében is kitűnik, hogy az időtartományban a rezgések összegzése, szétbontása nehézkes, áttekinthetetlen. Ezért már a rezgések mérése után Fourier-transzformációt alkalmaznak az időfüggvények frekvencia függvényekké történő átranzformálásához. A transzformációs formula valamely $g(t)$ függvényre:

¹⁷ A motor „forgási frekvenciája” a motor aktuális fordulatszámát jelenti [1/min], vagy [Hz] mértékegységben



2.7. ábra A Fourier-transzformáció

$$g(t)=F\{g(t)\}=\int_{-\infty}^{+\infty}g(t)e^{-j2\pi f t} dt \quad (2.26)$$

Ez a viszonylag bonyolult formula egy $g(t)$ időfüggvényből egy $g(f)$ frekvenciafüggvényt állít elő, így a harmonikus rezgés Fourier-transzformáltja egy „A” nagyságú vonal, mely a rezgés frekvenciájánál áll elő, ez a harmonikus rezgésösszetevő. Ha $g(t)$ periodikus, de nem harmonikus, akkor a korábban tárgyalt felbonthatóság miatt a $g(f)$

$= F \{g(t)\}$ függvény a harmonikus összetevők transzformált vonalainak sorozata „spektruma” lesz. A **rezgésspektrum** a rezgési folyamat különböző frekvenciájú összetevőinek Fourier-transzformált (FFT)¹⁸ összessége. A spektrumban a derékszögű koordináarendszer abszcisszájára a frekvenciát (vagy a percnkénti ciklusszámot), ordinátájára pedig az összetevők amplitúdóját vagy effektív (RMS) értékét mérik. [S4_F][40] [44]

Láthatóan mind időjellel, mind spektrummal jellemezni tudjuk a rezgést. Számos probléma az időjeltől is kimutatható, de a gyakorlatban a rezgésdiagnosztika gyakrabban használja a frekvencia spektrumot, ennek elemzését vagy rezgésszakértő, vagy a korszerű számítástechnika által biztosított szakértő rendszer végzi el. A dinamikus mozgást végző gépek rezgéseinek kiértékeléséhez mind a szakértőknek, mind pedig a szoftvereknek szükségük van három rezgésdiagnosztikai alapinformációra, a rezgés frekvenciájára, az amplitúdójára és fázisszögére, melyek alapján a berendezés üzeme jellemezhető, műszaki állapota meghatározható.

II.2.1. A rezgés frekvenciája

A rezgésméleti részben már ismertetett képletek alapján a rezgési frekvencia a periódus idő reciprokaként értelmezhető. Mivel a rezgés periódusideje a forgórész egy körülfordulása alatt eltelt idő, a frekvenciát a gyakorlatban egy adott időtartam alatt megvalósult periódusok számával fejezhetjük ki. Az időtartam lehet perc, vagy másodperc, ennek megfelelően az angolszász országokban CPM¹⁹-ben, az európai mértékegységet használó országokban CPS²⁰-ben azaz [Hz]-ben fejezik ki a frekvenciát. [41] [42]

¹⁸ FFT - Fast Fourier Transform – Gyors Fourier Transzformáció. Az a folyamat, mely során a rezgés-analizátor az időjelet frekvencia spektrummá transzformálja

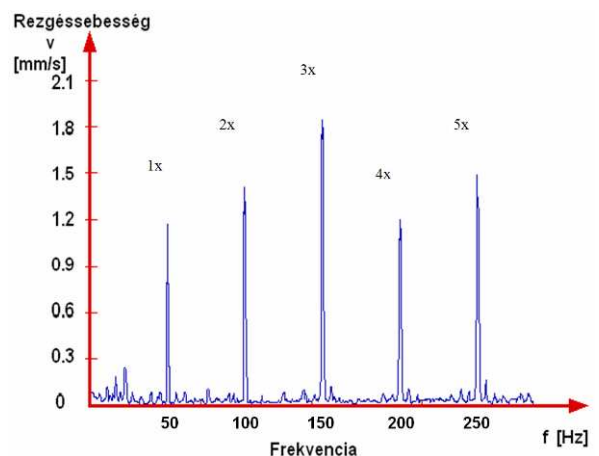
¹⁹ CPM - cycle per minute - fordulat/min

²⁰ CPS - cycle per second - fordulat/secundum, [1/s], vagy [Hz]

Mivel a valóságos gépekben akár több száz féle meghibásodási lehetőség is elképzelhető, a frekvencia jelentősége abban áll, hogy a különféle géphibák, különféle frekvenciákon jelentkeznek. Annak megállapításában, hogy egy berendezésről felvett spektrumképben melyik amplitúdó, milyen alkatrész működésére, vagy meghibásodására utal a gép üzemelési fordulatszám, illetve az ebből számított un. forgási-, vagy alapharmonikus frekvencia utal. A rezgésspektrum frekvenciáinak elemzését frekvencia analízisnek nevezzük, amely a gyakorlati gépdiaosztika talán legfontosabb eleme. A frekvencia analízis kiinduló alapja az, hogy a legerősebb rezgés-gerjesztés általában magán a forgásfrekvencián lép fel, az ezen a frekvencián forgó forgórész miatt, valamint a legtöbb gép tipikus (mechanikai eredetű) hibája a forgásfrekvenciához (vagy annak egészszámú többszöröseihez) kötődik, amint azt a 2.8. ábra mutatja. Az elterjedt jelölési rendszer szerint a fordulatszám többszörös (1x, 2x, stb.,) skálázását alkalmazzák, mert a fordulatszámokban megjelenített egységek a túl nagy számok miatt zavaróak lehetnek. Így például 3000 1/min-es fordulatszám többszörösei a következőképpen kerülnek megadásra:

Forgásfrekvencia (1x RPM) - alapharmonikus	50 Hz	fordulatszám 3000 1/min
Kétszeres forgásfrekvencia (2x) – 1. felharmonikus	100 Hz	fordulatszám 6000 1/min
Háromszoros forgásfrekvencia (3x) – 2. felharmonikus	150 Hz	fordulatszám 9000 1/min

Nagyon fontos figyelembe venni, hogy a legtöbb géphiba frekvenciája fordulatszámfüggő. Ne felejtjük el, hogy a rezgéseket a gép működéséből származó erők hozzák létre, amelyek általában a forgó motor alkatrészein keresztül hatnak a teljes berendezésre. Mivel üzemelés közben ezeknek az erőknek változik az irányuk, amplitúdójuk is a gép alkatrészeinek forgási sebességével (RPM²¹) párhuzamosan fog változni. Ebből az következik, hogy a legtöbb problémának frekvenciája szorosan kapcsolódni fog a forgási sebességhez. Ezen egyszerű információk ismeretével, több száz egyéb rezgést okozó probléma kiszűrhető. Tehát megállapíthatjuk, hogy a frekvenciaspektrumok egyértelmű analíziséhez elengedhetetlen a gép fordulatszámának ismerete. A gyakorlatban leginkább a stroboszkópos és optikai (fényvisszaverődésen alapuló) fordulatszám-mérők használata terjedt el, de alkalmaznak örvényáramú műszereket is.



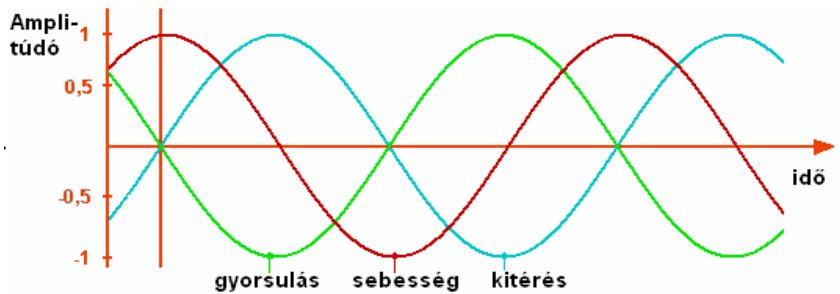
2.8. ábra A forgási frekvencia felharmonikusai

²¹ RPM - rotation per minute – a vizsgált gép fordulatszám

Gyakorlati tapasztalatom, hogy a frekvencia analízis csak akkor tud hatékony segítséget nyújtani, ha már a mérések tervezésének szakaszában figyelembe vesszük a gép fordulatszámát és várható meghibásodások alapján tervezzük meg a vizsgálandó frekvencia tartományt.

II.2.2. A rezgés amplitúdója

A frekvencia analízis és a bemutatott spektrumok alapján is belátható, hogy a második legfontosabb gyakorlati információt a rezgés amplitúdója hordozza. Kiértékelési szempontból általánosan elmondható, a rezgés frekvenciája a hiba forrására ad utalást rezgés-amplitúdó pedig a hiba súlyosságára utal. A rezgésamplitúdót meghatározhatjuk, mint a rezgés



2.9. ábra A rezgés kitérés sebesség és gyorsulás összefüggése

elmozdulását, sebességét, vagy gyorsulását. [42] [43] [44]

Összefüggés a rezgés kitérés, sebesség és gyorsulás között:

Az időtartományban harmonikus rezgőmozgást végző test egy képzeletbeli pontjának mozgását jellemezhetjük kitérésével, sebességével vagy a gyorsulásával (2.9. ábra). A sebesség a kitérés első, a gyorsulás pedig a második idő szerinti differenciálhányadosa. Látható, hogy a szinusz–koszinusz függvények idő szerinti deriválásának eredményeképpen mind a sebesség, mind a gyorsulás harmonikus jellegű marad. Az amplitúdó a deriválás során egy ω szorzót kap és a függvény $\pi/2$ értékű fáziseltolást szenved. A sebesség egy negyed, a gyorsulás pedig egy fél hullámhossznak megfelelő idővel előresiet a kitéréshez képest. A sebesség és gyorsulás függvény amplitúdója ω , illetve ω^2 –szeres értékre nő. [42] [43] [44]

$$\text{A kitérés:} \quad s(t) = A \cdot \sin \omega t \quad [\mu\text{m}] \quad (2.26)$$

$$\text{A sebesség:} \quad v(t) = \frac{ds}{dt} = A \omega \cdot \cos \omega t = A \omega \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad [\text{mm/s}] \quad (2.27)$$

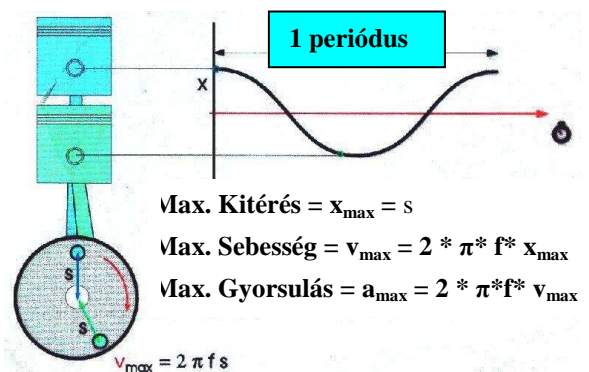
$$\text{A gyorsulás:} \quad a(t) = \frac{dv}{dt} = -A \omega^2 \cdot \sin \omega t = A \omega^2 \cdot \sin(\omega t + \pi) \quad [\text{mm/s}^2] \quad (2.28)$$

Rezgés elmozdulás, rezgés kitérés: Amíg az elektronikus mérőműszerek nem láttak napvilágot, az akkori egyszerű rezgésmérő műszerek csak a rezgés csúcstól-csúcsig elmozdulás értékét tudták mérni, ez az oka például annak, hogy a régi szabványok a rezgés erősség értékét rendre μm -ben adják meg. Belátható, hogy nagyon kis elmozdulások, illetve nagyon magas fordulatszám és sok felharmonikus esetén a kitérés mérésével nem lehet minden rezgésössze-

tevőt kimutatni. A magasabb frekvenciatartományban lévő jelek elvesznek, ilyen esetekben egyszerűen lehetetlen az elmozdulás amplitúdót használni a gép állapotának megítéléséhez.

A rezgés elmozdulás, melynek mértékegysége [μm] mégis tud a diagnosztika számára használható információkkal szolgálni, a lassú fordulatszámú gépek esetében jut érvényre.

Rezgéssebesség: Végiggondolva a harmonikus rezgőmozgás és a mechanika alaptörvényeit belátható, hogy egy rezgő pontnak a rezgése közben a két szélső helyzet között sebessége és gyorsulása is van. A végpontokban a sebesség nulla, a gyorsulás maximális, amint az a 2.10. ábra forgattyús mechanizmusának példáján is látható. Az egyensúlyi helyzetekben (az út felénél) a gyorsulás nulla a sebesség maximális. Végiggondolva a gépelemek tönkremeneteli módjait azt láthatjuk, hogy a gépek jelentős része kifáradás következtében megy tönkre. A kifáradás, fárasztás jelensége, például egy tengely hajlító igénybevételekor a hajlítgatás száma és kitérése mellett szoros összefüggésbe hozható azzal, hogy a hajlítás milyen sebességgel történik. Minél nagyobb sebességgel hajlítgatunk például egy drótot, annál hamarabb törik el. Mivel a sebesség az elmozdulás és a frekvencia egyik függvénye, így a rezgéssebességek mérése szolgáltathatja a kifáradás közvetlen mérését. A mozgó alkatrészek mozgási energiáját is jobban kifejezi a mozgás sebessége, mint a kitérés, érthető tehát, hogy a gyakorlatban igen elterjedten alkalmazzák a rezgéssebesség mérését, kiértékelését. A rezgéssebesség egy gépelem periodikus rezgése során a kitérés két szélső helyzete között mérhető sebesség, mértékegysége általában [mm/sec]. A rezgéssebesség mérés előnye az elmozdulás méréshez képest, hogy jobban kifejezi a gép által keltett erők nagyságát, ráadásul nem kell feltétlenül ismernünk a frekvenciát a rezgés erősség meghatározásához, hiszen a sebesség ezt már tartalmazza. A gépállapokra vonatkozó rezgésdiagnosztikai szabványok a rezgéssebességen alapuló mérési módszereket részesítik előnyben. [42] [43] [44] [S4_F]



2.10. ábra. Forgattyús mechanizmus mozgásviszonyai

A rezgés gyorsulás: A rezgőmozgás holtponthelyzeteinek utolsó fázisában a sebesség zérus lesz, mert a képzeletbeli mozgó pontnak meg kell állnia az irányváltáshoz. A rezgő test sebessége és gyorsulása állandóan változik, mivel minden alkalommal, amikor a tömeg megáll, fel kell gyorsulnia, hogy elérje azt a sebességet, amivel tovább megy a következő határértékig. Tehát a rezgés amplitúdó és „magnitúdó” kifejezéséhez a harmadik fontos jellemző a

rezgés gyorsulása, amely valójában a sebesség változását mutatja. A harmonikusan rezgő tömeg, vagy egy forgattyús mechanizmusra utalva (lásd 2.10. ábra), a gyorsulás akkor éri el a maximumát, amikor a sebesség 0, az elmozdulás felénél viszont, a gyorsulás értéke 0.

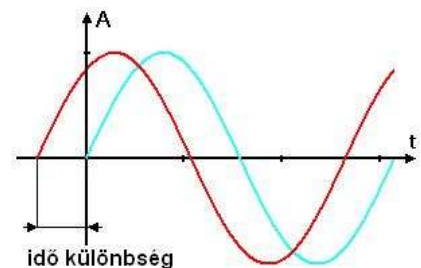
A rezgési gyorsulás a rezgésebbesség (mm/s) változásának mértéke, ezért a mértékegysége mm/sec^2 . Nemzetközi egyezmények alapján a rezgés gyorsulás mértékét g-ben adják meg, ahol g a tengerszinten adott gravitációs erő által keltett gyorsulást jelenti, így az 1-g mért gyorsulás hozzávetőleg $9,81 \text{ m/sec}^2$. [42]

Felmerül a kérdés, mikor használjunk rezgés elmozdulás, sebesség, vagy gyorsulás mérést? Elemelve az előforduló géphibákat, elmondható, hogy azokban az esetekben, amikor előre látható, hogy a gép, vagy egy részének a forgási frekvenciája 10 Hz alatti lesz, elmozdulás mérés ajánlott. Mivel a kifáradási hibák általában 10 Hz és 2000 Hz között jelentkeznek, ezért ebben a frekvencia tartományban a rezgésebbesség mérés, a 2000 Hz feletti tartományban pedig a magas frekvenciáknál előforduló rezgések és erőgerjesztések miatt a rezgés gyorsulás mérések tervezése javasolt. [43] Az ilyen magas frekvenciás hibaforrásokra a legtipikusabb példa a nagy sebességű fogaskerék hajtások fogkapcsolódási frekvenciája.

II.2.3. A rezgés fázisszöge:

A frekvencia és az amplitúdó mellett a harmadik jellemző, ami szükséges a gép rezgésének leírásához a rezgés fázisszöge.

A fázisszöget, tekintettel a többi rezgésjellemzőre, úgy definiálhatjuk, mint a rezgő mozgást végző pont pozícióját egy adott pillanatban, egy fix kezdőponthoz, vagy esetleg egy másik rezgőmozgást végző elemhez viszonyítva. Egy másik meghatározás szerint a fázisszög (φ_0) egy teljes for-



2.11. ábra A rezgés fázisszöge

gási ciklusra alkalmazott mennyiség (2.11. ábra), fokban vagy radiánban, ahol egy teljes rezgési kör 360° -kal egyenlő. Értékét mindig egy referencia ponttól számítjuk az eltelt idő függvényében. A legjobb példa erre egy kiegyensúlyozatlan forgó rész fázisszöge a kijelölt referencia ponthoz, vagy vonalhoz képest. [42] [45]

A fázisszög mérést a rezgésmérések speciális műveletei közé sorolhatjuk, mivel nem jellemző, hogy az útvonal mérések, napi rutin ellenőrzések, rendszeres vizsgálatok során fázisjel mérését tervezzük. A fázisszög ugyanis önmagában nem információ, csak a rezgésspektrumban lévő amplitúdókkal együtt értelmezhető, ezért olyan mérőműszerek szükségesek a detektálásukhoz, amelyek az amplitúdót és a fázisszöget egyszerre képesek mérni. A fázis-

szög mérés jelentősége abban áll, hogy olyan esetekben segíti a diagnosztikai szakember munkáját, amikor egy-egy meghibásodásra utaló frekvencián található magas amplitúdót több különféle hiba is okozhat. Példaként említhetem, hogy a kiegyensúlyozatlanságot és a mechanikai fellazulást, melyeket éppen a fázisszögek segítségével lehet megkülönböztetni, mivel a veszélyesen magas rezgésamplitúdó mindkét esetben az 1x-es forgási frekvencián fog jelentkezni. A különböző gépalkatrészek relatív mozgásának meghatározására irányuló mérési technikák, például a későbbiekben bemutatásra kerülő mozgás-animációs módszer is a fázisszög mérésen alapul, pontosabb diagnózist eredményez, sőt lehetővé teszi a gép valóságos mozgásának megjelenítését, amely a hibák okainak kiderítését nagymértékben elősegítheti.

A fázisszög mérést alkalmazzák még a rezonancia frekvenciák kifutás és felfutás vizsgálatoknál, valamint a helyszíni kiegyensúlyozás során is, mert ennek segítségével lehet meghatározni a kiegyensúlyozatlan tömeg helyét.[48]

A géprezgések fázisszögének vizsgálatára a napjainkban kapható rezgésdiagnosztikai műszerek, korszerű hordozható rezgés analízátorok fel vannak készítve, tehát alkalmasak a rezgés amplitúdó és a fázisszög egyidejű mérésére. Három fő fázismérési eljárás létezik, amit a hordozható analízátorok és adatgyűjtők alkalmazhatnak: a stroboszkóp lámpás, az optikai, fényvisszaverődésen alapuló digitális fázisszög mérés, valamint a két rezgésérzékelővel végrehajtható relatív fázisszög különbség módszer, melynél az egyik érzékelő alapjeléhez képest mérik a másik által mért amplitúdó időbeni eltolódását.

II.3. A rezgésmérés műszerlánc

Az elmúlt évtizedben a rezgésmérő műszerek az elektronika és a számítástechnika fejlődésével egyidejűleg jelentős fejlődésen mentek keresztül. A jelfeldolgozás digitális módon történik, a felhasználók igényeit követve rendkívül sokféle és jelentős tudásbeli különbségekkel rendelkező eszköz jelent meg a piacon, az egyszerű rezgésmérő ceruzáktól a 2 - 8 csatornás rezgés-analízátorokon keresztül az on-line mérőrendszerekig. Bár a műszerek működése eltérő, mégis elmondható, hogy minden műszerlánc rendelkezik rezgésérzékelővel, jelfeldolgozó és kijelző részegységgel. Mivel a rezgésmérés műszerlánc minden esetben az éppen aktuális feladattól függ, ezért ennek részletes ismertetésétől eltekintek.

II.3.1. A rezgések átalakítása villamos jellé, a rezgésérzékelők jellemzői

A gépek rezgésvizsgálatakor a legcélszerűbb a mechanikai rezgéseket villamos jellé átalakítani és ezt a villamos jelet elemezni. A korszerű rezgés-átalakító, ill. érzékelő berendezések

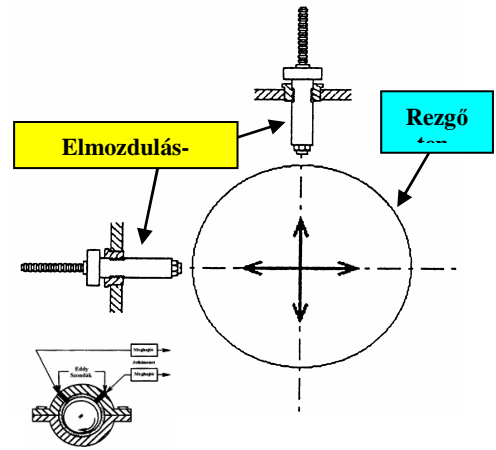
viszonylag kis tömegűek és tág frekvenciatartományban adnak a mechanikai rezgéseknek megfelelő villamos jelet. [48] [50] [51]

A rezgésérzékelőknek három fő típusát különböztethetjük meg, elmozdulás-érzékelőket, sebességérzékelőket és gyorsulásérzékelőket.

Elmozdulás-érzékelő „Eddy szonda”:

Az elmozdulás érzékelőt, a szakirodalomban un. „Eddy szondát”, sugár- és tengelyirányú tengely-

mozgás érzékelésére használjuk. Egy csapágyházon keresztül, vagy annak oldalára van felszerelve, és a tengely mozgását érzékeli a felszerelési helyzethez képest. Az elmozdulás-érzékelőket (lásd 2.12. ábra) a géptől függetlenül kell rögzíteni, mivel az elmozdulást a gép és az érzékelő közötti kapacitás változásából számítja, s ezt alakítja át villamos jellé. Az ilyen típusú rezgésmérést előnyben részesítik siklócsapágyak (turbinák és kompresszorok) esetében, mivel közvetlenül kapcsolódik a megengedett hézagokhoz. Az „Eddy szonda” méréskor a tengelyt érzékeli, gyakran felszerelnek egy további Eddy szondát is, az elsőtől 90° fokkal elforgatva, hogy növeljék a diagnosztikai képességet. [49] [50] [51] [52]



2.12. ábra. Elmozdulás érzékelő Eddy szonda

Sebességérzékelők:

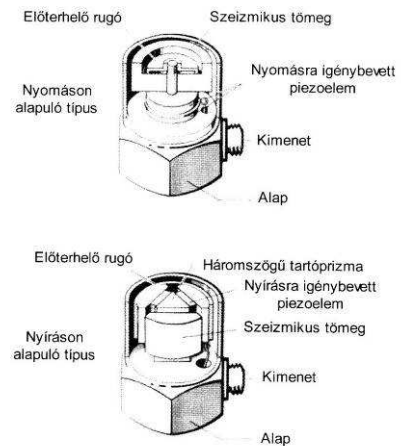
A sebességérzékelőkben egy tekercs és a lengő mágnes egymáshoz képest relatív elmozdulása a sebességgel arányos áramot indukál a tekercsben. Mivel a hőmérsékletre érzékeny, a gyorsulásérzékelőkhöz képest nagy tömegű és felszerelése nehézkes, ráadásul a mérési tartománya alacsony (10 – 1000 Hz), ezért a gyakorlati szakemberek igen ritkán alkalmazzák, így részletesebb ismertetésétől eltekintek. [49] [50] [51] [52]

Gyorsulásérzékelők:

Az ipari méréseknél legelterjedtebbek a gyorsulásérzékelők (lásd 2.13. ábra), mivel olcsó az előállításuk és mind a mechanikai, mind a külső környezeti hatásokat jól bírják. Mérés közben az érzékelőket valamilyen módon a mérendő testhez rögzítjük, annak érdekében, hogy a gép mozgását átvegyék, tehát a gyorsulással arányos villamos jelet adjanak. A gyorsulásérzékelő jelátalakítók piezoelektromos²² kristállyal működnek. A kristály az érzékelőfej burko-

²² Piezoelektromos hatás – a Curie testvérpár (Pierre és Jacques) által felfedezett irreverzibilis folyamat, mely szerint egy szilícium kristályra ható váltakozó erő, az erővel arányos feszültséget hoz létre a kristályon, illetve a kristályra bocsátott váltakozó feszültség a kristály geometriai méretváltozását eredményezi.

lata és az érzékelőbe helyezett tömeg között foglal helyet. A gyorsuláskor az ún. szeizmikus tömeg tehetetlensége következtében erőt fejt ki a kristályra és a kristály fegyverzetein megjelenő potenciálkülönbség arányos a mért gyorsulással. A piezoelektromos gyorsulásérzékelők jó közelítéssel a mozgás abszolút gyorsulását mérik széles frekvencia és dinamika tartományban, linearitásukat a teljes vizsgálati sávban meg tudják tartani. Előnyként lehet megemlíteni, hogy nem igényel táplálást, hiszen a feszültség jelet önmagában szolgáltat.



2.13. ábra. Rezgés gyorsulás érzékelő felépítése [52]

hogy a gyorsulással arányos villamos kimenetei függvényt egyszer integrálva a sebesség, kétszer integrálva a kitérés amplitúdót kapjuk, így a gyorsulásból a rezgése sebesség és a rezgés kitérés spektrum egyaránt előállítható. Mivel a gyakorlatban én is ilyen típusú érzékelőket használok, ezért a továbbiakban a gyorsulásérzékelők legfontosabb tulajdonságait foglalom röviden össze. [S4_F] [54] [55]

Érzékenység: Az érzékenység az egységnyi gyorsulás - 1 m/s^2 - hatására előálló feszültség [mV], vagy töltés [pC] értéke. Az érzékenység a szeizmikus tömeggel arányos, amelynek korlátlan növelése természetesen nem lehetséges, általánosan követendő az a szabály, hogy a gyorsulásérzékelő tömege legfeljebb tizedrésze lehet a mérendő test tömegének. [S4_F]

Irányérzékenység: Az irányérzékenység a főirányú érzékenység és a rá merőleges ún. keresztérzékenység hányadosa %-ban. Azt fejezi ki, hogy a főirányra merőleges rezgések mekkora hibát okozhatnak a mérésnél. Egy jó gyorsulásérzékelőnél ez az érték a 4 % -ot nem haladhatja meg. [S4_F]

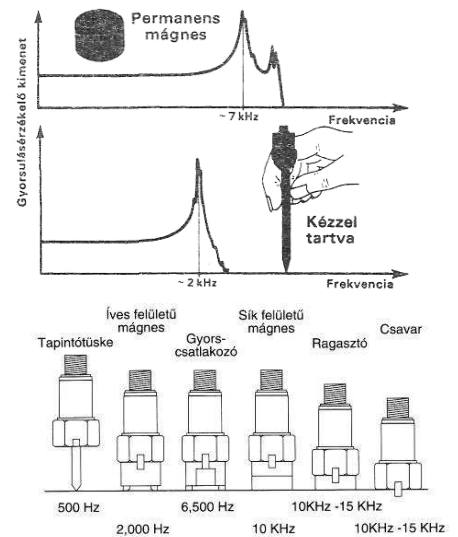
Frekvencia válasz: Egy piezoelektromos gyorsulásérzékelő egy olyan tömeg-rugó-csillapítás rendszernek fogható fel, ami útgerjesztés révén mindig az ún. föléhangolási tartományban dolgozik. Ez a tartomány meglehetősen nagy, hiszen a gyorsulásérzékelők saját frekvenciája 10 -100 kHz nagyságrendű. A gyorsulásérzékelők alkalmazásának egyik legfontosabb szabálya, hogy a legnagyobb még mérhető frekvencia nem lehet nagyobb, mint a rezonanciafrekvencia harmada. [S4_F]

Dinamika tartomány: A gyakorlatban a piezoelektromos érzékelőkkel mérhető gyorsulások $20 \mu\text{m/s}^2$ -től 5000 - 100 000 g-ig terjednek, melyet nem egyetlen gyorsulásérzékelővel, hanem egy 8 -10 darabból álló készlettel lehet átfogni. Minél nagyobb gyorsulások és frekvenciák méréséről van szó a gyorsulásmérő és ezáltal a szeizmikus tömeg is annál kisebb.

A gyorsulásérzékelő felerősítésének módja:

A rezgésmérés során az egyik legkényesebb és a végeredményeket jelentősen befolyásoló témakör, az érzékelő megfelelő rögzítése.

Az érzékelők érzékelési iránya szinte kivétel nélkül mindig a középtengelyükkel esik egybe. A helyes méréshez biztosítani kell, hogy az érzékelő minél jobban kövesse a mérési pont (tehát a gépelem felületének) mozgását ebben az irányban. A különféle lehetséges felerősítési módokat a 2.14. ábrán kísérhetjük figyelemmel.[51] Ha a gyorsulásérzékelőt kézzel szorítjuk a helyére a rezonancia-frekvencia 2000 Hz és a mérhető max. frekvencia 5-600 Hz körül lesz.

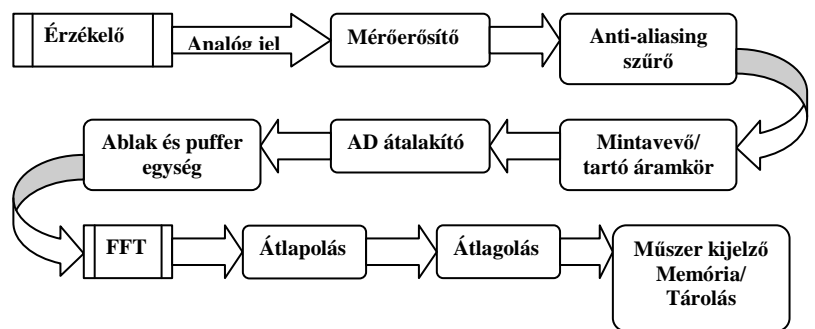


2.14. ábra Érzékelő felerősítési módok

Környezeti hatások: A gyorsulásérzékelőt a környezeti hatások erősen és néha károsan befolyásolják. Ilyen hatások a kémiai (nedvesség, lúgos-savas közeg, stb.), fizikai (mágneses tér, hőmérséklet, radioaktív közeg, zajok, stb.). Ezeket lehetőleg el kell kerülni, illetve speciális tokozású gyorsulásérzékelőket kell alkalmazni, abban az esetben, ha például több száz fokok felületi hőmérsékletű berendezéseken kell a mérést végrehajtani, mivel a magas hőmérséklet hatására az érzékelő a valóságosnál magasabb rezgésértékeket mér. Az eltérés mértéke 20 – 30 % is lehet, amely azt eredményezheti, hogy a mérésből hibás diagnózist állítunk fel.

II.4. Rezgésjelek feldolgozása [46] [51] [56]

Egy gép, vagy alkatrész rezgése közben létrejött valószínű mozgást a rezgésérzékelő segítségével villamos jellé, feszültséggé alakítjuk. Ezt az elektromos jelet továbbítjuk kábeleken keresztül

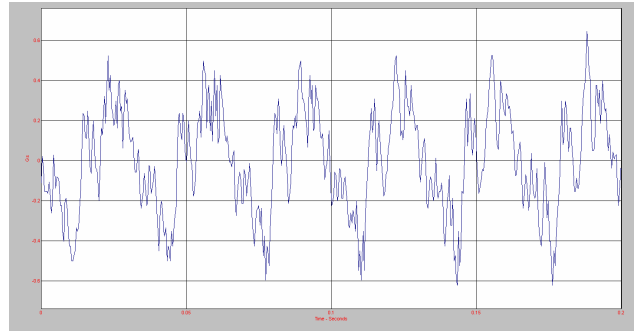


2.15. ábra A rezgésérzékelőből érkező jel útja

a rezgésmérő, vagy adatgyűjtő műszerbe, a rezgés analizátorba. A rezgésanalizátor a jelátalakítás után rendelkezésünkre bocsájtja az FFT (Gyors Fourier Transzformáció) eredményét, azokat a kiértékelés szempontjából nélkülözhetetlen rezgésjellemzőket, melyek biztosítják számunkra az állapotfigyeléshez szükséges információkat. Az érzékelőtől indulva egy korsze-

rú digitális rezgésanalizátor mérőláncát követve (lásd 2.15.ábra) az elektronikának az alábbi jelfeldolgozási részfeladatokat kell megoldania: [51] [53] [56]

- Analóg jel bemenet
- Anti-aliasing szűrés²³
- A/D átalakítás²⁴
- Átfedések (Overlap)²⁵
- „Ablakolás”²⁶
- FFT elvégzése
- Átlagolás
- Kijelzés/Tárolás



2.16. ábra Az érzékelőből érkező tipikus időjel

A nyers analóg időjelet, melyre például a 2.16. ábra mutat tipikusan egy hordozható, digitális műszerbe vezetik, ami számos felhasználói funkciót dolgoz fel. A felhasználói igényektől és a nyers jelek természetes egységeitől függően közvetlenül is feldolgozhatók, vagy matematikai integrátorokba irányíthatók a rezgésmérés más egységeibe történő átalakítás céljából. A digitális mérőlánc elemei között találjuk az analóg mérés technikából ismert DC/AC csatolást, az előerősítőt/mérőerősítőt és a mérési tartományokat definiáló osztókat, ezeket az elemeket az egyszerűség kedvéért a továbbiakban a mérőerősítő fogalmával foglalom össze. A legtöbb hordozható műszer FFT (Gyors Fourier Transzformáció) feldolgozást végez, amely az időben változó bemenő minták átlagolásának felvételét és saját frekvenciakomponensekre osztását végzi. A szóban forgó frekvenciától függően a vizsgálni kívánt jeleket felül-, illetve alulát-eresztő szűrők sorozatával lehet meghatározni.

Mivel az értekezéshez a digitális jelfeldolgozás nem kapcsolódik szorosan, ezért csak a rezgésmérés szempontjából fontos jellemzők rövid ismertetésére szorítkozom. [56] [57][58]

Mintavételezés, adatfelvételi idő:

A mérőláncban a mintavétel/tartó áramkör az első olyan elem, amely közvetlenül az analógjel digitalizálásában játszik szerepet. Ez az egység a folytonos analógjel "feldarabolását" végzi a mintavételezési frekvencia által adott ütemezésben lásd 2.17.ábra. Ennek a folyamatnak az eredménye egy diszkrét időjel, mely egyes elemeinek amplitúdója a folytonos jel pillanatértékeinek felel meg. A mintavételezés sűrűségét a rezgésdiagnosztikai mérnök a maximá-

²³ Az aliasing jelenség akkor fordulhat elő, ha a vizsgált frekvenciatartomány legmagasabb frekvenciája nagyobb mint a mérő átalakító mintavételi frekvenciája. Shannon első mintavételezési tétele alapján gyakorlati szabály, hogy a legnagyobb frekvenciatartalom 2,56-szoros értékénél nagyobb felbontást szükséges alkalmazni.

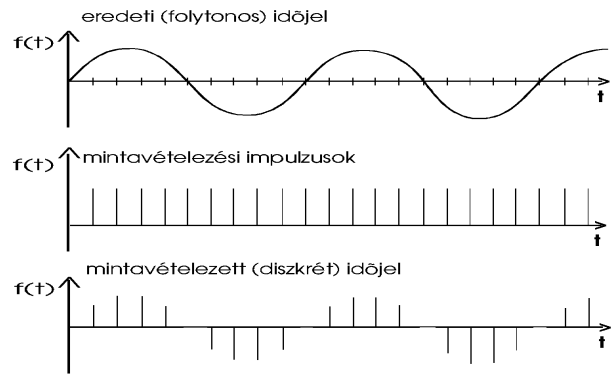
²⁴ Az A/D átalakító az amplitúdó felbontást határozza meg, feladata a mintavevő áramkör által szolgáltatott diszkrét jelsorozatot digitális információkká átalakítani

²⁵ Átlapolásos átlagképzés esetén ugyanazon idő alatt többszörös mintavétel történik, mivel az áramkör adott értékkel pl. 25-50-75%-kal egymásba csúsztatja a mintákat, majd ezekből képi az átlagot.

²⁶ A gyakorlatban az analizátorokban többféle ablak állítható be, Hanning, Flat-Top, Kaiser-Bessel, Hamming, Rectangularis. Az ezek közül a legelterjedtebb a Hanning-ablak alkalmazása.

lis frekvencia és a felbontás vonalszámának változtatásával tudja befolyásolni, illetve az adott mérési feladatnak megfelelően megadni. [46]

Egyszerűen fogalmazva a mintavételezés gyakoriságának meghatározásával a rezgésspektrum részletességét határozhatjuk meg. Például egy 400 vonalas FFT spektrum létrehozásához $2,56 \times 400 = 1024$ pont felvételére van szükség, ahhoz, hogy a szinuszos analóg rezgésjelet meg tudjuk jeleníteni. Ez alapján a maximális mérési frekvencia (f_{\max}) ismeretében egyszerű számítással meghatározható a sávzélesség (BandWith – BW), a minták száma (N), a vonalszám, az FFT felbontásban lévő összes vonalszám (V), a minta vételéhez szükséges idő (T). Példaként véve egy 400 vonalas 0-1000



2.17. ábra A mintavételezés folyamata [56]

Három mérési paraméterrel, azaz a jellemzőkkel a sávzélesség $BW = f_{\max} / V = 2,5$ Hz-re a mintavétel ideje $T = V / f_{\max} = 0,4$ sec-re adódik. [46]

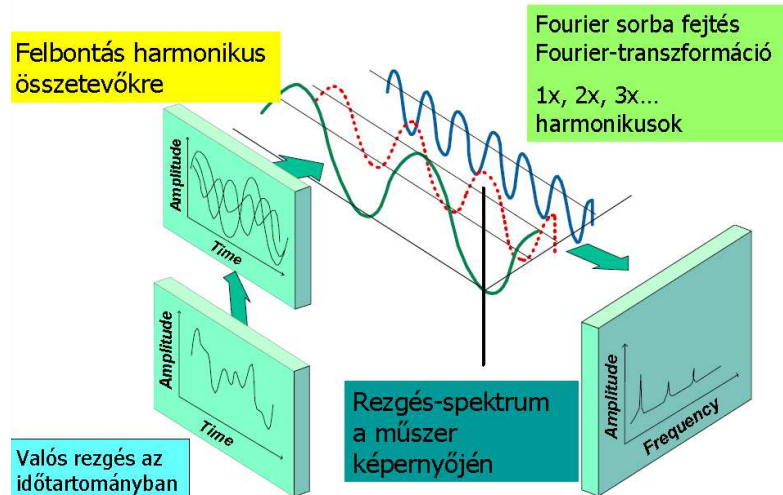
Ezekre az alapvető számításokra, beállításokra a gyakorlatban nagy szükség van, mert minden rezgésmérés esetében a szakértő által elsőként meghatározandó szempont a vonalszám és a max. frekvencia tervezése melyet a vizsgált berendezés fordulatszámának ismeretében dönt el. Ez a két jellemző a kihatással van a mérés időtartamára, valamint meghatározza a mérés eredményeként eltárolandó spektrumot tartalmazó file méretét is. Tudnunk kell, hogy az alacsonyabb frekvencia tartomány, vagy a vonalszám növelése pontosabb mérési eredményt ad, de ismerni kell a műszer memória kapacitását és a mérés elvégzésére fordítható időt is, mivel egy rezgésmérés során akár több száz spektrum tárolására is szükség lehet.

A frekvencia felbontás vonalszáma:

Ez a jellemző tulajdonképpen az FFT ábrán megjelenő frekvencia vonalak számát jelenti, tehát azt, hogy a frekvencia tartományt hány mintavételi részre osztjuk fel. A rezgésanalizátorokban általában 100, 200, 400, 800, 1600, 3200, 6400, 12.800 vonalas spektrumokat állíthatunk be, amely meghatározza két egymás melletti frekvencia vonal sávzélességét, melyet az előző számpéldában láttunk. Ez különösen akkor fontos, amikor a hibára utaló információt egy meghatározott frekvencia (pl. fogkapcsolódási frekvencia) körüli kis frekvencia távolságban jelen lévő oldalsávok jelentik. Ha túl kicsire választjuk a felbontást, a műszer nem tudja ezeket az oldalsávokat megjeleníteni és egy rossz gépet is jónak minősíthetünk. [46] [51] [57]

FFT²⁷ spektrum előállítás [59] [60][61]

A további jelfeldolgozás legáltalánosabban ismert formája az FFT spektrum előállítása lásd 2.18. ábra. Ez a módszer a valós, időben változó jeleket szétválasztja összetevőire: amplitúdóra, fázisra, frekvenciára. Mikor egy analizátoron be kell állítanunk, vagy egy szoftverben meg kell terveznünk a mérési beállításokat, meglehetősen sok paraméter beállítására van szükség annak érdekében, hogy a vizsgálandó gép működési jellegzetességeihez illeszkedő mérési beállításokkal jellemezhesük a gép műszaki állapotát. A tökéletes jelfeldolgozás és a mérési eredmény szempontjából azonban az alábbi jellemző-



2.18. ábra FFT spektrum előállítása az időjelből

ket tekinthetjük a legfontosabb beállítási adatoknak:

- Alsó frekvencia limit (Low Freq. Limit - a felül-áteresztő szűrő beállítás)
- f_{max} . (legnagyobb frekvencia)
- A vonalak száma (Lines)
- A rögzítendő jelalak (Detection – Peak, Peak-To-Peak, RMS)
- Ablak típus (Window)
- Az átlagolások típusa és száma (Averages)
- Az átlapolás százaléka (Overlap)

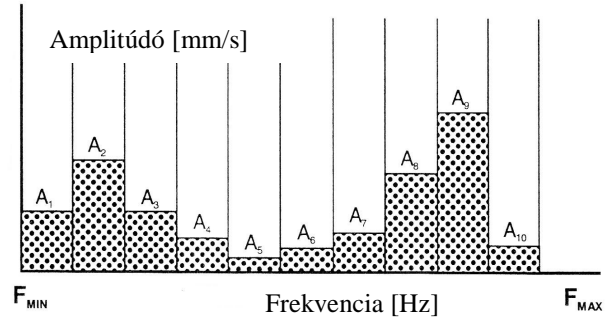
Átlagolás típusa és száma:

Az FFT spektrum készítése során a műszer digitális időjelből matematikai műveletekkel állítja elő a spektrumot, de az időjel egy területének vizsgálata kizárhat néhány csúcsot a sztochasztikus rezgések miatt. Ennek a hibalehetőségnek a kiküszöbölésére az időjel több részét vizsgáljuk, több FFT-t számolunk, majd ezek átlagát jelezzük ki. A gyakorlatban leggyakrabban négy átlagolást készítünk, de műszereken akár 99 átlag is beállítható. A legtöbb FFT analizátorba az adatok könnyebb értelmezhetősége miatt építik be az átlagolást, mivel így a rendszeres időszakos mérési eredmények jobban összehasonlíthatók, a trendek egyenletesebben mutatják a gépállapot változását, mert nem rontja el őket egy-egy véletlenszerű rezgésjel. Az átlagolás használatával csökkenhető az összetett jelek zajossága is. Az átlagolás típusai: lineáris, exponenciális, csúcstartó, és időszinkronizált. [42] [56] [62]

²⁷ FFT - Fast Fourier Transform – Gyors Fourier Transzformáció, az időjel frekvencia spektrumává alakítása

Spektrális rezgésösszeg, „Overall” érték számítás: [42][63][64]

A rezgésanalizátor által kiszámított overall érték nem képezi minden esetben a jelfeldolgozás szerves részét, azonban szinte mindegyik rezgésanalizátor készíti a vizsgált frekvencia tartományról un. rezgésösszeg, vagy „overall” érték számítását. A gyakorlatban széles körben alkalmazzuk, ezért mindenképp beszélni kell róla. Ez a jellemző tulajdonképpen a rezgésspektrum összes sávjában található amplitúdót figyelembe veszi és ezáltal a rezgések teljes spektrumra vonatkozó energiátartalmát fejezi ki. Az



2.19. ábra Az „Overall” rezgésösszeg számítás

OA_{RSS}²⁸-el jelölt overall értéket a rezgésanalizátorok általában az FFT spektrumból számítják ki. A képernyőről akár már a mérés közben is leolvasható spektrális energiátartalom, így azonnali tájékoztatást ad azoknak az amplitúdóknak az energiátartalmáról, amelyek esetleg a magasabb frekvencia tartományokban csapágyhibákat, vagy más nagy energiájú hibaforrásokat mutatnak meg. A digitális OA_{RSS} tehát a minimum és maximum frekvenciák közötti energiaösszeget fejezi ki, számítási elvét a 2.19. ábrán kísérelhetjük figyelemmel, kiszámítását pedig az alábbi képlet alapján végezzük: [63]

$$OA_{RSS} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2}}{\sqrt{N_{BW}}} = \frac{\sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_n^2}}{\sqrt{1,5}} \quad \text{ahol,} \quad (2.29)$$

n – az FFT spektrum felvételénél beállított vonalak száma,

A_i – az FFT vonalakon mérhető amplitúdó nagysága (lehet kitérés, sebesség, gyorsulás)

N_{BW} – a Hanning-ablak szomszédos sávokba történő átszivárgásának korrekciós tényezője

II.5. Gyakorlati rezgésmérési, kiértékelési módszerek

II.5.1. Rezgésmérés az ISO 10816²⁹ szabvány szerint [65]

A gépek által működés közben kibocsátott rezgéshullámok a rezgésmérés eredményein keresztül utalnak a gép, gépcsoport üzemi állapotára. Elmondhatjuk, hogy napjainkban géphibák beazonosítására az egyik legeredményesebben használható megbontás nélküli vizsgálati módszer a rezgésmérés. A gyakorlatban sokféle rezgésmérési módszer és lehetőség áll rendelkezé-

²⁸ OA_{RSS} - Root Sum Square – a teljes spektrumban található amplitúdók négyzetes rezgésösszege

²⁹ ISO 10816 - Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts

süinkre a pontos diagnózis elkészítéséhez. Hogy melyiket alkalmazzuk, azt minden esetben a berendezés jellege és a valószínűsíthető meghibásodás jellege határozza meg.

A gépek műszaki állapotának megítélésében az ISO 10816 1,2,3 rezgésdiagnosztikai szabvány nyújt segítséget. Ezt a szabványt tekinthetjük a rezgésmérés, valamint a forgógépek műszaki állapot meghatározásának egyik alapszabványaként, mivel számos magyar és európai (pl. IEC 60034-14) szabvány épül az itt megfogalmazott ajánlásokra. [64][65][66][67]

Bár a különféle termelő és munkagépek üzemviteli jellemzői jelentősen eltérhetnek, mégis azt mondhatjuk, hogy a gépészetben üzemelő berendezések nagy része az 1000 – 3000 1/min fordulatszám tartományban üzemel, illetve ezen a fordulatszám tartományban történik a legtöbb berendezés meghajtása. E fordulatszám tartományban a meghibásodásokat, a mechanikus hibákat, a keletkezett rezgések energiáját, a leghatékonyabban a rezgésebbesség mérésével tudjuk beazonosítani, így a szabvány is a rezgésebbesség mérésre alapozza javaslatait. [67]

A szabvány mind a rezgésmérés feltételeit, mind pedig a végrehajtását rögzíti, utal a mérési pontokra, valamint a kiértékelési szempontokra is. A berendezés mérésénél előírás, hogy minden csapágyhelyen, lehetőleg minden mérési irányból rezgésmérést kell végezni és az így mérhető legmagasabb rezgésszintet kell a kiértékeléskor figyelembe venni. A mérés és a kiértékelés alapja a rögzített frekvencia tartomány, illetve az ebben az előírás szerint 400 vonalas frekvencia tartományban mérhető összes rezgésamplitúdó RMS átlagának teljes spektrumra vonatkoztatott „overall (OARSS) értéke”. A frekvencia tartomány 600 1/min fordulatszám alatt 2 – 1000 Hz, e felett 10 – 1000 Hz. Ennek a szabványos mérésnek felel meg az összes kereskedelemben kapható egyszerű rezgésmérő ceruzától a nagyteljesítményű analizátorokig az összes műszer. Az analizátorok esetében a mérési jellemzők beállítását, illetve tervezését a diagnosztikát végző szakembernek kell beállítani, illetve a számítógépben megtervezni.

2.II 1. táblázat Az ISO 10816 nemzetközi szabvány ajánlásai gépek rezgésvizsgálatára [66] [67]

Géposztályok	A rezgésebbesség effektív értéke 10-1000 Hz frekvenciatartományban [mm/s]			
	Jó (A)	Elfogadható (B)	Nem kielégítő (C)	Veszélyes (D)
I. oszt. kis gépek 15 kW-ig	0 - 0,71	0,71 - 1,8	1,8 - 4,5	4,5 felett
II. oszt. közepes gépek 75 kW-ig	0 - 1,2	1,2 - 2,8	2,8 - 7,1	7,1 felett
III. oszt. nagy gépek 300 kW-ig merev alapozással	0 - 1,8	1,8 - 4,5	4,5 - 11,2	11,2 felett
III. oszt. nagy gépek 300 kW-ig rugalmas alapozással	0 - 2,8	2,8 - 7,1	7,1 - 18	18 felett

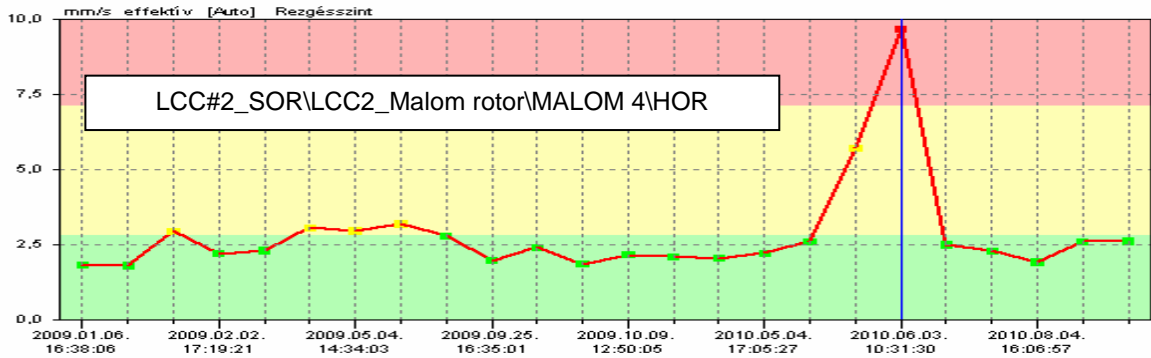
A szabvány kiértékelésre vonatkozó összesítő változatát a 2.1.táblázatban mutatom be. A rezgésszinteket 4 veszélyességi (A,B,C,D) csoportra bontja. Ez határozza meg tulajdonképpen a gép minősítését. A forgógépeket teljesítményüktől és alapozásuktól függően szintén 4 géposztályba sorolja be, mivel a nagyobb teljesítmény nagyobb energiájú rezgéseket hoz létre.

Egy gép minősítése a berendezés rezgéseinek teljes spektrumra vonatkozó értéke és a géposztálynak megfelelő legmagasabb szint alapján történik. A jó és az elfogadható tartományba eső mérési eredmények esetén a rezgések az adott géphez viszonyítva alacsonyak, a berendezés műszaki állapota megfelelő. A „nem kielégítő” jelző arra utal, hogy a berendezésnek még vannak állapotartalékai, azonban egyes alkatrészek meghibásodhattak, így a teljes gép műszaki állapota nem megfelelő. Ilyen esetekben a szétszerelés még korai, de a gép felülvizsgálatát feltétlenül be kell tervezni. Ez tulajdonképpen a riasztási szint, amikor a gép a tönkremeneteli zónába érkezik. Attól az időponttól kezdve, amikor a gép eléri ezt a szintet fokozottan ellenőrizni kell a működését, esetleg más diagnosztikai módszerekkel együtt meg kell bizonyosodni a hiba okáról. A „veszélyesen magas” rezgések arra utalnak, hogy a gép, vagy egy alkatrésze elérte élettartama végét, amely mindenképp azonnali beavatkozást, javítást, vagy cserét tesz indokolttá. A rezgésmérési eredménytől függően esetleg azonnali leállítást is foganatosíthatunk, amely megvédi a gépet attól, hogy egy alkatrész tönkremenetele a berendezés hosszú távú működésképtelenségét okozza.

Saját tapasztalataim alapján elmondhatom, hogy az ISO 10816 szabvány ajánlásai az általános gépek, szivattyúk, ventilátorok, motorok, stb. vizsgálata során megfelelő eredmény ad, ezen gépek jó vagy nem megfelelő műszaki állapota a szabvány alapján megítélhető. Azonban az átlagostól eltérő tulajdonságokkal rendelkező gépek (pl. csavarelemekkel, dugattyúval működő, stb.) rezgései műszaki állapota nehezebben diagnosztizálható. Ilyen esetekben más szabványok alkalmazására, illetve a szakértő saját tapasztalataira hagyatkozva kell a riasztási és veszélyességi szinteket meghatározni.

A módszer jól alkalmazható azonban forgógépek rezgéseinek minősítésére és műszaki állapotuk nyomon követésére. A műszaki állapot nyomon követését trendelemzéssel tudjuk végrehajtani, amelyben a korszerű műszerekhez kifejlesztett adatbázis kezelő és feldolgozó szoftverek állnak rendelkezésünkre. Ezek segítségével az időszakosan, vagy folyamatosan végzett rezgéssebesség mérések eredményeit megtekinthetjük egy időskálán, amelyben rögzítve a riasztási szinteket, kimutatható és megítélhető a berendezés műszaki állapotában bekövetkezett változások.

Gyakorlati példaként figyeljük meg a P&G Hyginett Kft.-ben üzemelő egyik cellulóz őrlő malom rotor csapágyának ISO 10816 szerinti rezgéssebesség mérési trendjét. A trend a gép üzembe állításának időpontjától napjainkig mutatja a havonta rendszeresen elvégzett rezgéssebesség mérések eredményeit. Jó látható a 2010 nyarán bekövetkezett csapágy tönkremenetel kifejlődése, és a csapágycsere után a megfelelő műszaki állapotra utaló rezgéscsökkenés is.

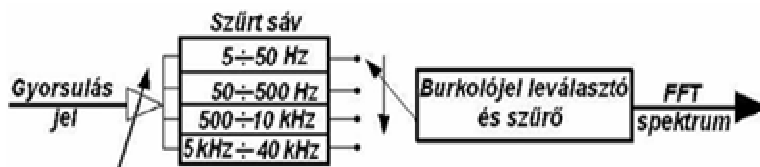


2.20. ábra Cellulóz őrle malom csapágy ISO 10816 szabvány szerinti mérési beállításokkal készített trendje

Az ISO 10816 szabvány tehát a gyakorlatban jól bevált és jól használható módszer, hátránya, hogy az 1000 Hz-es frekvencia tartomány túl alacsony, így a csapágyak olyan jellegű hibáit, melyek megszüntetésével a csapágy tönkremenetele elkerülhető (mint pl. a kenési elégtelenség), nem tudjuk elég korán kimutatni. A rezgéssebesség mérés a gép élettartamának végét jól jelzi, de kicsi az un. előrejelző képessége. Mivel spektrum analízist nem ír elő, így az „overall” érték alapján a módszer csak a gép egészére tudja megmutatni, hogy az jól működik-e vagy sem. A gépek tönkremenetele általában a csapágyak hibájával kezdődik, ezért a csapágyak üzemi állapotának korábbi meghatározásához más módszert kell alkalmazni.

II.5.2. Az „ENVELOP - burkoló görbe detektálási” eljárás [68][69]

Az „ENVELOP” azaz a gyorsulás burkológörbe eljárás lényege, hogy a rezgéssebesség



Frekvencia sáv	Fordulatszám tartomány min^{-1}	Frekvencia sáv tartomány [Hz]	Mérési tartomány [Hz]
I.	0 - 50	5 - 100	0 - 10
II.	25 - 500	50 - 1000	0 - 100
III.	250 - 5000	500 - 10000	0 - 1000
IV.	>2000	5000 - 40000	0 - 10000

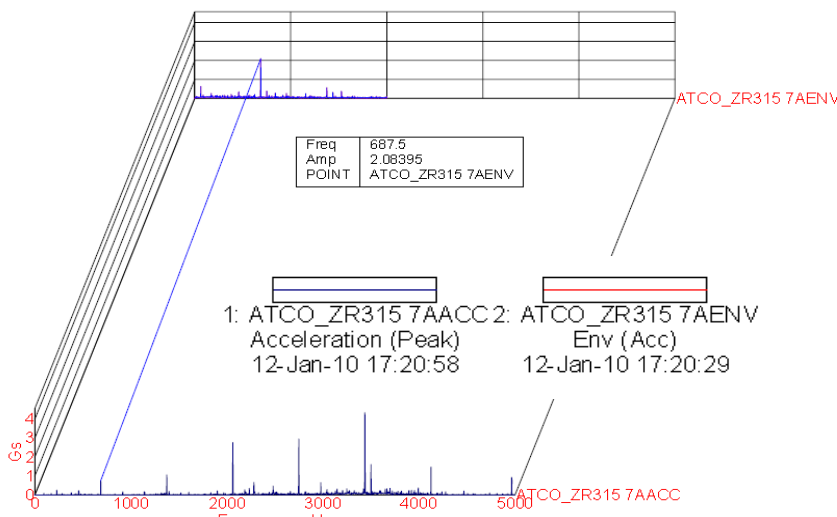
2.21. ábra. Az "Envelop- burkoló" eljárás szűrési módszerének és sávszűrési beállításainak bemutatása

módszerhez hasonlóan felvett magas frekvencia tartományban mért FFT spektrumból, szűrők segítségével az alsó zajsávban található gyakran ismétlődő frekvenciákhoz tartozó jeleket kiszűrik (pl. kiegyensúlyozatlanság, tengelykapcsolat hiba, fellazulás), így pontosabban azonosíthatók a jellemző csapágyfrekvenciából származó jelek.

A „Burkológörbe detektálás”, vagy „Envelop eljárás” tehát egy mérés technikai szűrést jelent, amely során a 2.21. ábrán látható. [68] [69] [70] A szűrők alkalmazásával egyrészt kiszűrjük az alacsony frekvenciás jeleket, más-részt a magas frekvencia tartományban, általában

a csapágy, vagy fogaskerék meghibásodásra utaló magas frekvencián megjelenő felharmonikusokat figyelembe véve felnagyítjuk az alacsony frekvenciás alapharmonikusokat. Így a csapágyhibára utaló hibafrekvenciák az alacsonyabb frekvencia tartományban „felnagyítva”, megerősítve jelennek meg, jelezvén azt, hogy ezeknek a frekvenciáknak magas energiaszintű nagyfrekvenciás összetevői vannak. A magas frekvenciatartományban megjelenő nagy energiájú rezgések a kifáradásra utalnak, ezért ezzel a módszerrel a csapágy pittingesedési folyamat kezdetén megjelenő ütközések, nagymértékű, de a rezgéssebesség spektrumában még kis amplitúdóval jelentkező frekvenciák is beazonosíthatók. A hiba súlyosságának fokozódásával a mérésben egyre több amplitúdó jelenik meg. A 2.21. ábra vázlatában látható, hogy a jelek egy helyesen megválasztott, frekvencia sávszűrőn átvezetve kerülnek a burkolójel leválasztó szűrőbe. Ennél a mérési eljárásnál fontos szempont a megfelelő műszerbeállítás, ezért a szűrőket célszerűen a fordulatszám és az Envelop spektrum maximális frekvencia tartományának ismeretében lehet kiválasztani, amelyre példát az 2.21. ábra táblázatában találunk.

Mivel a csapágy és fogaskerék hibák detektálásában fontos követelmény, hogy a hibára utaló jeleket minél hamarabb felismerjük minden műszergyártó ellátja a felső kategóriás műszereit ezzel a képességgel. Az SKF „Envelop”, a VMI³⁰ „burklógörbe”, az AzimaDLI³¹ „Cepstrum”³², stb. eljárásaként szabadalmaztatta ezeket az egyébként hasonló elméletre épülő módszereket. Mivel én elsősorban az SKF és a VMI (PIM Kft. által forgalmazott) [71] [72]



2.22. ábra ATLAS COPCO ZR 55 csavarkompresszor sűrítő csapágyának rezgésyorsulás és Envelop spektruma

műszereket használom, ezért saját mérési tapasztalatomból ezeknek a módszereknek a kiértékelésére vonatkozó információkat foglalom össze és erre mutatok gyakorlati példát is. A 2.22. ábra a módszer működését szemlélteti egy azonos időben ugyanazon csapágyról

³⁰ VMI – Vibration Measurement Instrument Ab, svéd rezgésmérő műszergyártó. www.vmiab.com

³¹ Azima DLI – Amerikai rezgésmérő műszergyártó, Woburn, MA 01801 USA. www.AzimaDLI.com

³² Cepstrum – a spektrum spektruma, az alacsony amplitúdót kiszűrő nagyfrekvenciás csapágyvizsgáló eljárás

készült rezgésyorsulás és rezgésyorsulás Envelop spektrum „waterfall” vízesis diagramja, amely egy ATLAS COPCO ZR 55 csavarkompresszor sűrítő egységének csapágyán lett rögzítve. Látható, hogy a rezgésyorsulást 0-5000 Hz, az Envelop-ot pedig 0-1000 Hz frekvenciatartományban mértem. Az ábrából kitűnik a bejelölt 687,5 Hz-es un. csavar áthaladási frekvencia felharmónikusai, melyek a magas frekvenciatartományban felerősödnek, mivel itt nagyobb a rezgések energiája. Mivel ezek a frekvenciák nagy energiaszinten jelennek meg, láthatóan a szűrés hatására az Envelop spektrumban ez lesz a domináns frekvencia. A csapágyak hibafrekvenciájának kimutatására is hatékonyan alkalmazható az Envelop módszer, melyet a IV.3.8 fejezetben egy esettanulmányon keresztül szemléltetek.

Az Envelop mérési eredmények kiértékelését a szakirodalom [68] a gép méretétől, a fordulatszámától, valamint a szűrési beállításoktól teszi függővé. Mivel ezekből a spektrumokból is képezhető (OA_{RSS}) „overall” érték, ezért az ajánlás az Envelop spektrum „overall” értékét adja meg a csapágyak, illetve a magas frekvenciás jelek kiértékeléséhez. Gyakorlati tapasztalatom, hogy a durva csapágyhibák így beazonosíthatók, a kezdődő tönkremenetel kimutatásához több mérési eredményre, a hibák nyomon követésére van szükség.

II.5.3. HFD³³ és „Csapágyjellemező”³⁴ mérési technológia [71][72]

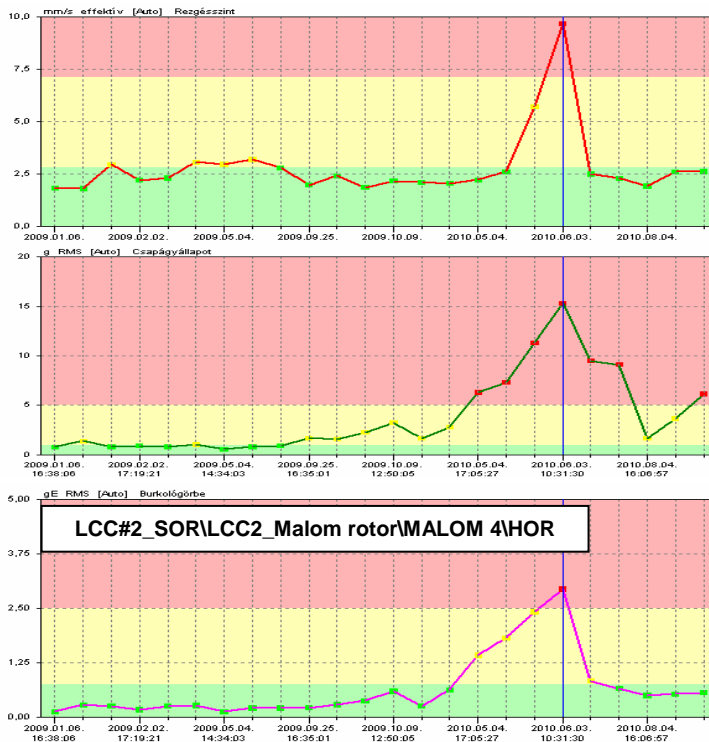
A HFD technológiát is a gördülőcsapágyak állapot meghatározására alkalmazzák. A méréseket 5000 Hz -40000 Hz-es tartományban végzik. A „Csapágyjellemező” értéket a VMI műszergyártó alkalmazza a magas frekvenciás csapágyhibák detektálására. Mind a HFD-nél, mind a csapágyjellemező a mérési eredmény egy számérték, amelynek nagysága a csapágy futófelületének kopásával van összefüggésben. Mindkét számérték a gördülőcsapágyak kopásának szakaszaiban kopáskor keletkező csapágy sajátfrekvenciát (lásd III.3.8. fejezet) fejezi ki. Ezek az egyszerűen és gyorsan mérhető, külön műszerbeállítás nem igénylő módszerek az Envelop és a „Burkoló eljárás” mellett erősíthetik a csapágyhibáról alkotott diagnózisunkat.

A veszélyességi szintek ezeknél a mérési eljárásoknál is a fordulatszám függvényében vannak megadva. [73]A HFD értékek mérése 0,01 gHFD és gyakorlatban előrehaladott csapágyhibák esetében akár 15 – 50 gHFD érték is mérhető. A HFD és csapágyjellemező mérést is a trendelemzés segítségével lehet a leghatékonyabban a csapágyállapot jellemzésére felhasználni. [73] A 2.23. ábrán a II.5.1. fejezetben ismertetett cellulóz őrlő malom rezgése sebesség, csapágyjellemező és „Burkológörbe” mérési eredményeit mutatom be. Az egymás alatt elhelyezett ábrák jól szemléltetik a hiba előrejelző képesség közötti különbséget.

³³ HFD - High Frequency Domain – az SKF által kidolgozott magas frekvenciás csapágy vizsgálati eljárás

³⁴ „Csapágyjellemező” – a VMI Ab által kidolgozott magas frekvenciás csapágy vizsgálati eljárás

Belátható, hogy a csapágy jellemző és „Burkológörbe” már hónapokkal hamarabb figyelmeztet a hiba kialakulására. Gyakorlatilag biztos voltam abban, hogy a csapágy tönkremeneteli folyamata elkezdődött, de a gép folyamatos üzeme miatt, cserére sem idő, sem elegendő indok nem volt. Ezért először a csapágykenés intenzitásának folyamatos növelésével igyekeztem a berendezés élettartamát meghosszabbítani, amelynek hatása szintén megfigyelhető a csapágyjellemező és burkológörbe értékek időleges csökkenésében. Javaslatom láthatóan bevált, hiszen minimális ráfordítással, időben elvégzett kenéssel jelentős élettartam növekedést értem el. A rezgéssebesség trendben mindeközben láthatóan semmilyen hibára utaló jel nem tapasztalható, ha csak ezt a módszert alkalmazom kb. fél évvel hamarabb csapágyat kellett volna cserélni. Érdekes még levonni azt a következtetést, hogy a rezgéssebesség láthatóan csak az élettartam végén kezd növekedni, tehát a másik két módszer hasznosabb a csapágyhibák korai felismerésében.

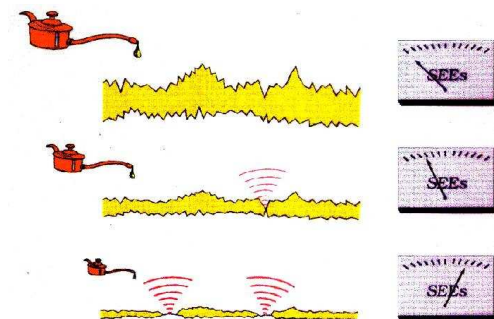


2.23. ábra A rezgéssebesség, csapágyjellemező és "Burkológörbe detektálás" összehasonlító trendje

teli folyamata elkezdődött, de a gép folyamatos üzeme miatt, cserére sem idő, sem elegendő indok nem volt. Ezért először a csapágykenés intenzitásának folyamatos növelésével igyekeztem a berendezés élettartamát meghosszabbítani, amelynek hatása szintén megfigyelhető a csapágyjellemező és burkológörbe értékek időleges csökkenésében. Javaslatom láthatóan bevált, hiszen minimális ráfordítással, időben elvégzett kenéssel jelentős élettartam növeke-

dést értem el. A rezgéssebesség trendben mindeközben láthatóan semmilyen hibára utaló jel nem tapasztalható, ha csak ezt a módszert alkalmazom kb. fél évvel hamarabb csapágyat kellett volna cserélni. Érdekes még levonni azt a következtetést, hogy a rezgéssebesség láthatóan csak az élettartam végén kezd növekedni, tehát a másik két módszer hasznosabb a csapágyhibák korai felismerésében.

II.5.4. SEE³⁵ mérési technológia [68] [69] [72]



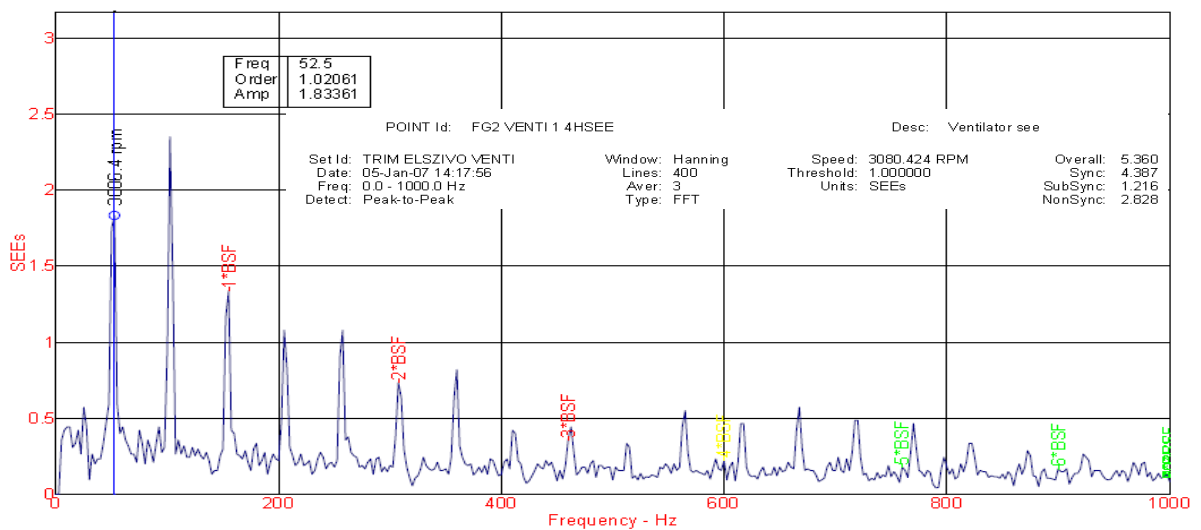
2.24. ábra A kenési állapot és a SEE érték összefüggése[74]

A csapágyaknál a legtöbb esetben - a szakirodalom szerint kb. 40%-ban - az okoz rendellenességet, hogy a kenés nem megfelelő. Pedig az előző részben bemutatott meghibásodás alapján belátható, hogy ezt a problémát lehet a leggyorsabban, legolcsóbban, leghatékonyabban kiküszöbölni.

A csapágyakban a nyomáshullámok nem mindig akkor keletkeznek, mikor a gördülőtestek átha-

³⁵ SEE - Spectral Emitted Energy - a kenési állapot meghatározása az akusztikus emissziós jelek mérése által

ladnak a sérülések felett, hanem akkor is, ha pillanatnyi fémes érintkezés (adhéziós kopás) következik be 2.24 ábra. A fémes érintkezés a kenőanyag hiánya, vagy nem megfelelő minősége miatt következik be, ekkor a felületi sérülésekből minden egyes átgördülés alatt leválik egy-egy parányi anyag, ami azután belekerül a kenőolajba. Ez a fémes hulladék növeli a sűrűlódást és az adhéziós kopást. A fém-fém érintkezés a felületi érdességi csúcsok között helyi túlhevüléssel jár együtt, emiatt egy rövid időre a két érintkező pont összeheged. Mindez csak pillanatszerűen történik meg, hiszen ahogy a csapágy elfordul, az ideiglenes varrat elszakad. Az összehegedt részecskék szétszakadása magas frekvenciájú jeleket gerjeszt lásd 2.25. ábra, melyek a 200 - 300 kHz közötti un. akusztikus emissziós tartományban figyelhetők meg. E tartomány megfigyelésére fejlesztette ki az SKF kutató központja a SEE mérési módszert.



2.25. ábra Ventilátor csapágy kenési problémájára és gördülő elem hibájára utaló SEE spektrum

A megfelelő időben észlelt hibával, kenőanyag cserével, feltöltéssel, vagy „után kenéssel” elérhető a SEE értékének csökkenése, így nagyobb valószínűsége annak, hogy a csapágy eléri a tervezett élettartamot. Általában a SEE érték viszonylag korán és csak fokozatosan emelkedik, gyakran azonosíthatók a SEE spektrumban a csapágy jellegzetes frekvenciái. A meghibásodás előrehaladtával, olyan sok szennyezőanyag, vagy annyira durva mechanikai felületi hibák keletkeznek, hogy mikrohegedések már nem jönnek létre, a SEE érték pedig kissé csökken. A SEE mérési eredményeket teljes spektrumra vonatkoztatott „overall” értékkel, illetve a mérési eredményként kapott spektrum segítségével is ki lehet értékelni. A 2.2.táblázat a megengedhető SEE overall értékek riasztási szintjeit foglalja össze, a 2.25.ábrán pedig egy gördülőcsapágy hibára utaló SEE rezgésspektrumot kísérhetünk figyelemmel, melynek méréstechnikai előállítását az Envelop mérésekhez hasonló szűrők alkalmazásával történik. [69][72]

Összehasonlítva az egyes módszerek hiba előrejelző képességét, a 2.26. ábrán látható eredményt kapjuk. Látható, hogy a leghamarabb a kenési állapot romlásának pillanatában lehet a gép műszaki állapotába érdemlegesen beavatkozni, tehát a meghibásodásról először a SEE érték tájékoztat. A SEE mérések után az Envelop és „burkológörbe”, legvégül a rezgésyorsulás és rezgésebesség mérés mutatja ki a valós hibát. [73]

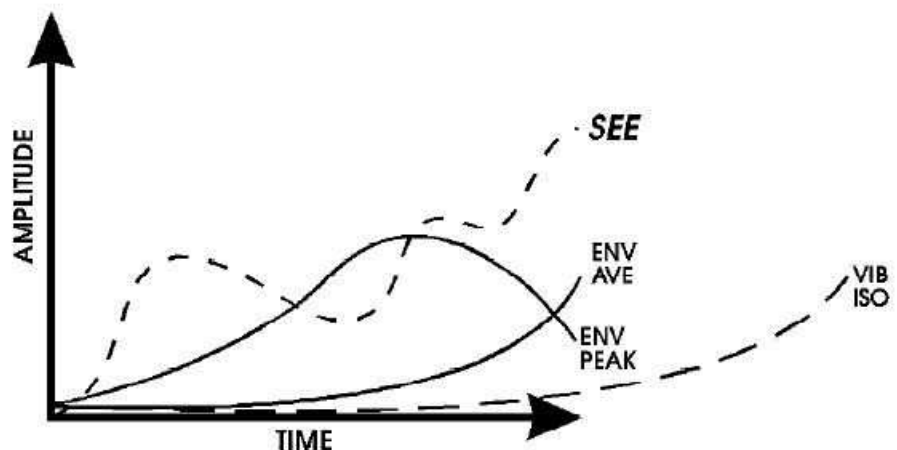
II.2. táblázat A megengedhető SEE értékek

Minősítés	Érték határok
jó	$SEE \leq 3$
megfelelő	$3 \leq SEE \leq 10$
nem kielégítő	$10 \leq SEE \leq 100$
elfogadhatatlan	$100 \leq SEE$

Tapasztalatom szerint az eddig felsorolt mérési eljárásokkal a csapágyhibákat úgy lehet a legnagyobb pontossággal meghatározni, ha azokat kombinálva alkalmazzuk, mivel egy-egy eljárással nem lehet kimutatni az összes meglévő hibát, illetve a különféle mérési eredmények több szempontból is megerősíthetik, nagyobb valószínűségi szintre emelhetik a diagnózist. Én a szakértői tevékenységem során az ún. „Multi paraméteres” rezgésvizsgálati módszert alkalmazom, amely során a felsorolt jellemzők mindegyikét minden csapágyon a terhelés irányában mérem és ez

alapján hozok döntést a gép, illetve a csapágyak fogaske-rekek műszaki állapotáról.

Az ipari gyakorlatra általánosan is jellemző, hogy a folyamatos gépállapot figyelő rendsze-



2.26. ábra. A rezgésvizsgálati módszerek hiba előrejelző képességének összehasonlítása [68]

rek egyidejűleg figyelik a rezgésebesség az Envelop és a SEE értékeit, az automatikus riasztási szintek mindhárom mérési eljárásra be vannak állítva. Az intelligens rezgés-diagnosztikai szakértő program, pedig figyeli a spektrumképet és az előre beállított jellegzetes csapágy frekvenciákat azonosítja, a hibaküszöb értékre javítási beavatkozási utasítást ad.

A mérési módszerek összefoglalásaként megállapíthatom, hogy mindegyik módszer rendelkezik előnyökkel és hátrányokkal, is. A rezgésebesség mérés egyszerű mérési és kiértékelési lehetőségeivel szemben, a jobb információkat adó, de komolyabb műszereket, speciális érzékelőket és nem utolsó sorban nagy szakértői tapasztalatot és szakmai hozzáértést igénylő nagyfrekvenciás eljárások állnak.

II.6. Következtetések

A fejezetben áttekintett rezgéstani alapfogalmak és gyakorlatban alkalmazott rezgésjellemzők alapján megállapítható, hogy a rezgésdiagnosztikai vizsgálatok során a gépek műszaki állapotának jellemzésére a rezgések frekvenciája, amplitúdója és fázisszöge egyértelműen felhasználható. Ezen rezgésjellemzők közül a frekvencia utal a meghibásodás jellegére, az amplitúdó a hiba veszélyességére, a fázisszöget pedig olyankor alkalmazzuk, amikor az egymáshoz hasonló szimptomákat mutató hibákat kell egymástól szétválasztani.

Megállapíthatom, hogy a gépek működése közben keletkezett mechanikai rezgéseket a korszerű digitális jelfeldolgozás eredményesen tudja átalakítani olyan formába, amelyek az adatbázis kezelő és feldolgozó szoftverek segítségével már alkalmasak a mérési eredmények kiértékelésére, dokumentálására.

Saját mérési eredményeimen keresztül bemutattam azokat a rezgésmérési módszereket, amelyeket a gépek gyakorlati rezgésdiagnosztikai vizsgálatánál alkalmaznak. Ezek alapján megállapíthatom, hogy a gyakorlatban alkalmazott módszerek mind a mechanikus meghibásodások, mind a rejtett csapágy tönkremenetelek, sőt, a kenési állapot romlásának előrejelzésére alkalmazhatók. A gyakorlati példák és az elméleti összefüggések arra engednek következtetni, hogy egy konkrét gép vizsgálatakor figyelembe kell venni a rendelkezésre álló műszerek lehetőségeit és az adott feladathoz szükséges módszerek hiba előrejelző képességét.

III. FEJEZET A rezgésdiagnosztikai módszerek alkalmazása, a WibroShoW rezgésdiagnosztikai próbapad fejlesztése

III.1. A rezgésdiagnosztikai módszerek alkalmazása

A műszakilag fejlett országokban ma már szinte minden karbantartásban dolgozó szakember tisztában van a gépdiaosztika alapjaival. Egy gyárban a hibásan működő alkatrészekről előbb, vagy utóbb mindenki észreveszi, hogy baj van, a cél azonban az, hogy a rendellenességet minél hamarabb ki tudjuk mutatni. A géphibák kimutatása, előrejelzése egyrészt a javítási költség szempontjából fontos, mert egy 100 kW-os elektromotor ára napjainkban milliókban mérhető, másrészt fontos akkor, ha egy sorba kapcsolt technológiai lánc valamely jelentéktelen része miatt egy egész gépsor kényszerül leállásra. Az ilyenkor fellépő piaci veszteségeket csak becsléssel lehet felmérni, mivel egy hosszabb termelésekiesés nem csak a termelési költséget növeli, hanem gyár jó hírnevében is komoly károkat képes okozni.

III.1.1. A méréshez szükséges adatok

A rezgésdiagnosztika a leg hatékonyabban az állapotfüggő karbantartási rendszerben alkalmazható. Az állapot-felügyeleten alapuló karbantartás megszervezéséhez először ki kell választani a gyártási technológiai sorból azokat a gépegységeket, amelyeket a leginkább érdemes mérni, majd a gyártósor gépeit rangsorolva, meg kell határozni a kulcsfontosságú berendezéseket, melyek meghibásodása kritikus helyzetben hozhatja a termelést. Túl sok gép esetén a betöltött funkciótól és a kiterheltségtől függően kell a rangsorolást végezni és különböző naptári ciklusokra osztani egyes gépek mérési gyakoriságát.

A méréshez szükséges adatok:

A kiválasztott gépek műszaki paramétereit, felépítésüket a lehető legapróbb részletekig fel kell deríteni. Ezeket a rezgésdiagnosztikához szükséges adatokat alapvetően két részre oszthatjuk. Vannak objektív információk és vannak szubjektívek, amelyek megfigyelésen alapulnak. Az objektív tényadatok alapvetően a gép műszaki adatait tartalmazzák. Ezekre mind a mérés tervezésénél pl. a beállítandó frekvencia, vonalszám, sávszélesség, szűrés, stb., mind pedig a kiértékelésnél szükség van, hiszen ezek segítségével lehet az alkatrész rezgésképét a spektrumban beazonosítani. A legfontosabb objektív gép adatok az alábbiak:

- Gépnév, gép azonosító, üzemóra állás, utolsó karbantartás időpontja,
- Metszeti rajz a berendezésről, a belső alkatrészek elhelyezkedéséről
- Az alapozás, a gép vázszerkezetének rögzítése, (merev, rugalmas),

- Hajtómotor teljesítmény, fordulatszám, csapágyadatok (csapágytípus és gyártó),
- Hajtómotor típus (AC/DC), hálózati frekvencia, kalicka szám, pólusszám, stb.,
- Csapágyazás jellege, különlegességei pl. gördülő, sikló, tám, ferde hatásvonalú, stb.,
- Az erőátadás jellege, iránya, a hajtáslánc vizsgált gépre gyakorolt hatása,
- Tengelykapcsoló típusa, elemszáma, fogszáma, megengedhető beállítási hibája,
- Szíjhajtás adatai (típus, tárcsa átmérők, áttétel, szíjhossz),
- Hajtott egység típusa (pl. szivattyú, ventilátor, kompresszor, hajtómű, stb.) ,
- Hajtott egység fordulatszámok, csapágyadatok (csapágytípus és gyártó),
- Hajtómű esetén az összes fogszám, és csapágyadat (csapágytípus és gyártó),
- Dugattyús gépek esetén, dugattyús szám, szelepszám,
- Hidraulikus, pneumatikus gépeknél lapátszám, csavarkompresszor bekezdésszáma,
- A hajtómotor és hajtott gép kenési rendszere, kenőanyag típusa,
- Terhelési állapot a mérés alatt (teljes terhelés, részterhelés, üresjárat).

Amint látjuk a dolog nem egyszerű, mivel szükséges ismerni az összes fordulatszámot, a tengelyeken lévő tekercek, ventilátorlapátok számát, csapágyak típusait és a gyártókat is, mert jelentős eltérések vannak a különböző gyártók által készített csapágyak hibafrekvenciái között. A tengelykapcsolók műszaki megoldását a várható rezgéskép szempontjából javasolt elemezni, mivel igen sok nehezen azonosítható frekvencia csúcsot tudnak produkálni. Fogaskerék áttételművek esetén a fogaskerek adataira nagy szükség van, fogszám és fordulatszám, az áttételviszony, a fogazás típusa, stb., mert ezeknél az alkatrészeknél a hibát csak pontos információk alapján lehet beazonosítani.

A mérés eredményessége szempontjából szükséges egy sor olyan mérési körülmény, vagy szubjektív információ is, amelyek segítségével a mérési eredmények elemzése során jó műszaki érzéssel összefüggést találunk a hibás működés és a rezgésspektrum között. Ezek az információk megfigyelésen alapulnak, jelentősen befolyásolják az emberi tényezők, de ipari tapasztalatom alapján nagymértékben hozzá járulnak a helyes diagnózis felállításához. Gyakorlati tapasztalataim alapján a **szubjektív információ** közül a legfontosabbak a következők:

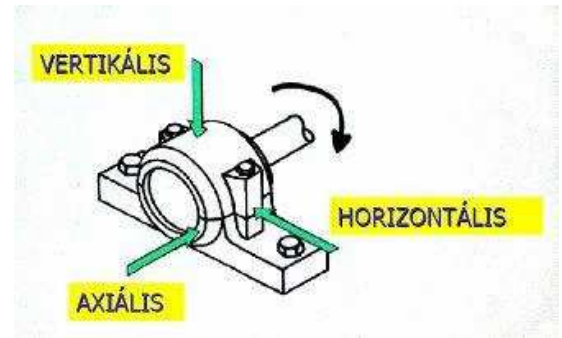
- A helyszínen, az üzemeltetés, karbantartás színvonalára utaló pozitív-negatív jelek
- Karbantartó személyzet géphez való viszonya,
- Személyes információk a gép történetéről, hibákról, intézkedésekről
- A mérendő gép környezetének jellemzői (beltér, kültér, rend, tisztaság, stb.)
- Csapágyhőmérsékletek és környezeti hőmérséklet

- Szemrevételezéssel megállapítható, nem megfelelő működésre utaló jelenségek:
pl. gépalap rögzítés, vázszerkezet remegés, gumibakok állapota, burkolatok állapota, rögzítése, repedés, törés, olajszivárgás, szállított anyag/munkaközeg szivárgás, csővezeték rezonancia, szíjrezonancia, alkatrész kopásra utaló fémrészecskék, szíjkopásra utaló guminyomok, szíjdarabok, hajtómotor hűtőventilátorának eltömődése, hibára utaló zaj, égésszag, stb.

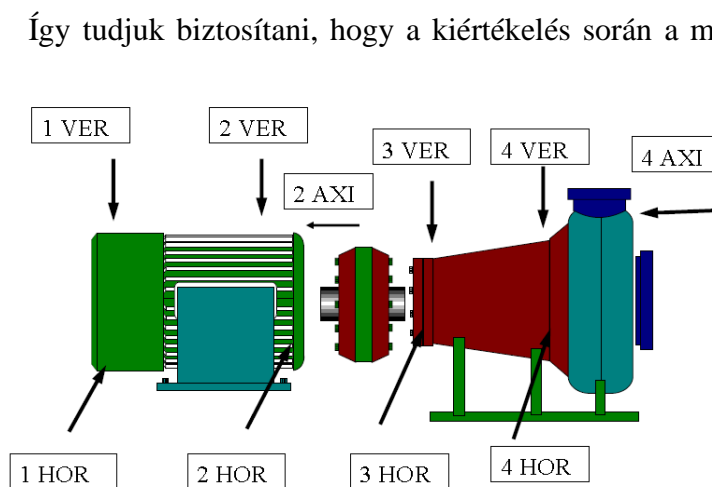
Az adatok megszerzése után, érdemes egy táblázatot készíteni a várható frekvencia csúcsok helyéről. Az első mérések könnyebb azonosíthatósága érdekében érdemes átgondolni, esetleg lerajzolni egy elméletileg várható spektrumképet a kiszámított frekvenciák megjelenési helyéről. Amennyiben jó az előkészítés, akkor a spektrumképeknek már az első méréseknél is meg kell egyezniük a számított és kapott értékeknek. Így rögtön szembeötlőek a környezeti zajproblémák, vagy az ismeretlen frekvencia csúcsokból megítélhetők az egyéb problémák.

III.1.2. A mérőpontok kiépítési szabályai

Mivel a rezgések rendkívül irányfüggőek, ezért az első szempont amit figyelembe kell venni, hogy lehetőleg minden lehetséges mérési irányt megragadjunk a rezgésadatok gyűjtésére, amint azt a 3.1 ábra is mutatja. Célszerűen és szabvány előírások alapján általában a Descartes koordináta rendszernek megfelelően alakítjuk ki a mérési irányokat, melyeket csapágyhely szerinti külön mérési azonosítóval is ellátunk.



3.1. ábra A rezgésmérési irányok



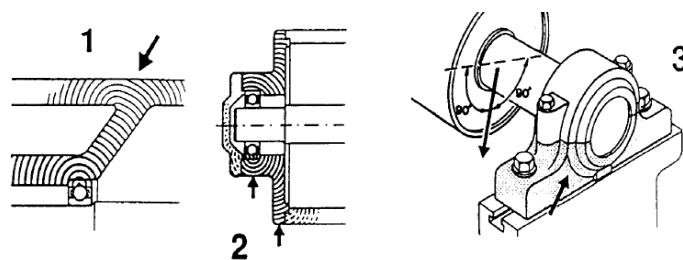
3.2. ábra Centrifugál szivattyú mérőpontok és mérési irányok

Így tudjuk biztosítani, hogy a kiértékelés során a megfelelő „HOR – horizontális, VER – vertikális, AXI – tengelyirányú méréseink és a hozzájuk rendelt spektrumképeink beazonosítása alapján helyes diagnózist kapjunk. A mérőpontok csapágyhelyhez kötöttek, amelyre egy centrifugál szivattyú mérőpont tervezési példáját a 3.2. ábrán kísérhetjük figyelemmel.

Munkánk tehát akkor lesz tökéletes, ha a csapágyazási pontok köze-

lében a gép felületén sikerül a legjellegzetesebb mérési pontokat megtalálnunk, illetve a későbbiekben kialakítanunk. Mint ismeretes, az egymáshoz súrlódó felületek energiahullámokat keltenek a gépalkatrészekben és ezeket a mennyiségeket elmozdulás, sebesség, vagy gyorsulás mértékegységben detektálják a műszerek. A különböző összeépítettség miatt a gépalkatrészek egymásra felfekvő határfelületein 80 %-ot is veszíthet a jel az energiataralmából. Több határfelületen átjutó jel esetén a jel gyengülési arányt 0.2^n hatvány adja meg, ahol n a rezgésjel keletkezési helye és a mérőszonda közötti határfelületek száma. Ezért a mérési pontokat közvetlenül a csapágyházaknál, vagy a jel keletkezési helyénél érdemes kialakítani, a három térbeli tengely irányában. Így a kézi, a csavarkötésű, vagy a mágneses rögzítésű rezgésérzékelőt vízszintes, függőleges és tengely irányban kell felszerelni, a nem egyértelmű, vagy a nem könnyen elérhető helyeken próbamérésekkel kell megállapítani a legkedvezőbb pozíciót. A használt műszer jellegéből, illetve a gépegység felépítésétől függően törekedni kell, hogy lehetőség szerint teljesen sík felületen és csavarkötéssel erősítsük fel a mérőfejet, mert csak így kaphatunk igazán pontos, mindig megismételhető mérési eredményt.

Egy konkrét gépen természetesen a burkolatoktól, vagy veszélyes közelségű forgórészek miatt nem minden esetben lehet minden irányt, sőt esetenként minden csapágyat sem megmérni, ilyenkor az adatgyűjtési pon-



3.3. ábra A mérőpontok kijelölési szabályai

pontokat a 3.3.ábrán szemléltetett szempontok szerint kell megválasztani: [74] [75] [76]

1. A csapágy és gyorsulásmérő között a legkisebb távolság legyen,
2. A jel csak egyszer léphet át az anyaghatáron, ez csak a csapágy és a ház között lehet,
3. A mérési pont csak a csapágy terhelési zónájában lehet.

A vastag festékréteg, a poros, piszkos felület meghamisítja a rezgésmérés eredményeit, ezért a mérési pontok előkészítésekor ezekre a szempontokra is ügyelve, drótkefével, reszelővel még a mágneses rögzítés esetében is célszerű letisztítani a mérési pont helyét. Rendszeres mérések esetén a mérőpontokat jól láthatóan megjelölni permanens festékkal, illetve ki kell alakítani a megfelelő csatlakozási pontot. Egyes mérőrendszerek egyedi csatlakozóval, vonalkód olvasóval oldják meg ezt a feladatot, amellyel az emberi tévedés megelőzhető.

Az előkészítő művelet folytatásaként, az adott mérési pontokhoz kiszámított frekvencia értékekhez hozzá kell rendelni a szabvány szerinti jó, kielégítő, nem kielégítő, elfogadhatatlan rezgésereősség értékeket a gép alapozása és teljesítménye függvényében. Ezek az értékek - általában a rezgésebesség effektív értékei mm/s dimenzióban - egy együttműködő gépcso-

porton belül, gépenként más-más küszöbértékeket is felvehetnek. Ezeknek a kategóriáknak a figyelembe vételével dönthető el az adott berendezés üzemeltethetőségi határa.

A rezgés-analizátortól függően el kell dönteni a mérési tartományokat (pl. 0 - 10 Hz-ig elmozdulást, 10 - 2000 Hz között sebességet, 2000 Hz felett gyorsulást érdemes mérni). Továbbá meg kell határozni a frekvencia felbontás mértékét, azaz a sáv szélességet (többtengelyes bonyolult gépeknél 1 Hz, egyszerűbb gépeknél 10 Hz), az egy mérési ponthoz tartozó átlagolást (stabil kis fordulátú gépeknél 4, nagy változó erőhatásokkal működőknél 16), saját frekvencia meghatározásánál az átlagolás elérheti az 25 - 50 értéket is.

Az előkészítő tevékenységnek a lelkiismeretes, pontról pontra történő precíz végrehajtása, az adott egységre és működési módjára kidolgozott mérési filozófia, valamint ezek következetes betartása lehet kizárólag munkánk sikerének záloga.

III.2. A gyakorlatban gyakran előforduló géphibák kimutatása a rezgésspektrumban

Amint a mérőpontok kialakításánál láttuk, a hatékony rezgésmérés, szisztematikusan megtervezett adatgyűjtés, melynek eredményeként különböző mérési helyekről és különféle mérési irányokból nagy mennyiségű (gépenként akár 30–60 db) rezgésspektrumot kapunk. Az eltárolt adatokat az analizátor memóriájából általában egy adatbázis kezelő és kiértékelő szoftverbe töltjük át. Itt végezzük el diagnosztikai munka érdemi részét a spektrumok elemzését, kiértékelését, ennek alapján állítjuk fel diagnózisunkat a vizsgált berendezés műszaki állapota vonatkozásán. A hiba jellegére a frekvencia és harmonikusai, veszélyességére az amplitúdó nagysága alapján következtethetünk. [77] [78]

Az ipari termelésben üzemelő forgógépek esetében több százra tehető azoknak a meghibásodásoknak a száma, amelyek a berendezés tönkremenetelét okozhatják. Gyakorlatilag ezek mindegyike egyenként, vagy összekeveredve megjelenhet a spektrumban. A diagnosztikai szakemberek több évtizede gyűjtik azokat a szimptomákat, amelyek a rezgésspektrumban egy-egy tipikus tönkremeneteli módra, vagy hibára utalnak. Disszertációm következő részében azoknak a gyakran előforduló géphibáknak a jellegzetes rezgésspektrumait mutatom be, amelyek ismeretében a diagnosztikai szakemberek megfelelő tapasztalat és gyakorlati tudás birtokában, az orvosi diagnosztikához hasonlóan akár azonnal meg tudják állapítani hiba okát.

Arra kell felhívnom még a figyelmet, hogy ezek a spektrumképek általában csak egyfajta hibára vonatkoznak, ellentétben a valósággal, amikor egy adott gépszerkezeten egyszerre létrejövő többféle hiba kombinációja miatt komolyabb feladat a pontos diagnózis megállapítása. Az összefoglaló gyakorlati jelentősége abban áll, hogy a valós gép felépítésének és "várható"

hibáinak, elhasználódásának ismeretében a rezgésspektrumokban könnyebben azonosíthatók a meghibásodásért felelős frekvenciák.

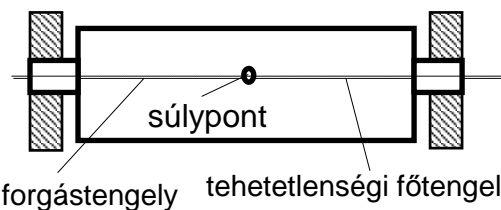
Mivel magam is gyakorló diagnosztikai szakember vagyok, ezért azoknál a géphibáknál, melyek a mérési gyakorlatomban már előfordultak saját mérési eredményeimet használom fel a valóságos spektrum bemutatására. A rezgésspektrumokat többféle műszerrel mértem és többféle szoftverrel értékeltem ki, ezért helyenként változik a spektrumképek külső megjelenési formája. Méréseimet SKF MICROLOG CMVA 10, MICROLOG CMVA 60 rezgésanalizátorok, a hozzátartozó Prism4 For Windows adatbázis kezelő és feldolgozó, valamint a VMI AB (Sweden) EasyViber64 rezgésanalizátorával és a hozzá tartozó Spectra Pro rezgésdiagnosztikai szoftverrel készítettem. [79]

Tulajdonképpen mindegyik hibáról egy-egy külön esettanulmányt is bemutatathatnék, azonban a disszertáció terjedelme ezt nem teszi lehetővé. Ezért a problémák bemutatása során röviden ismertetem az aktuális hiba jellegzetességeit, egy-egy magyarázó ábra segítségével illusztrálom a hiba gépre gyakorolt hatását, majd példaként bemutatok egy-egy spektrumképet a saját mérési eredményeim közül. Az ábrákon bejelöltem a hiba kimutatására leginkább alkalmas mérési irányt is.

III.2.1. Kiegyensúlyozatlanság

Forgó tömegek esetében a kiegyensúlyozatlanság fő oka a forgástengely és a forgó tömeg tehetlenségi főtengelyének nem megfelelő viszonya. [77] [78]

Egy merev test bármely tengely körül megforgatható, amely egy tetszőlegesen kijelölt forgástengely kialakítását tételezi fel. A forgástengely helye a konstruktóri szándékon a legyártás és a szerelés pontosságán múlik. Ha azt kívánjuk, hogy a test kiegyensúlyozottan forogjon e forgástengely körül, akkor a tengely helyzetének kiválasztása nem történhet tetszőlegesen. Minden merev testnek meghatározható ugyanis a súlypontja és a súlyponton áthaladó - legalább három - tehetlenségi főtengelye. Ezek egymásra kölcsönösen merőlegesek. [9] A tehetlenségi főtengelyek abban különböznek az összes többi súlyponti és nem súlyponti tehetlenségi tengelytől, hogy rájuk nézve a síkra vett - un. deviációs-nyomatékok rendre zérók. Általában a testre rákényszerített forgástengely (csapágyazás) a legcélrátörőbb tervezői szándék ellenére sem esik egybe egyik főtengellyel sem. Amikor kiegyensúlyozunk a cél mindig az, hogy a forgástengely éppen egybeessen valamelyik tehetlenségi főtengellyel (lásd.3.4.ábra), mivel a kiegyensúlyozatlanság jellege éppen ennek a két tengelynek a kölcsönös viszonyától függ.

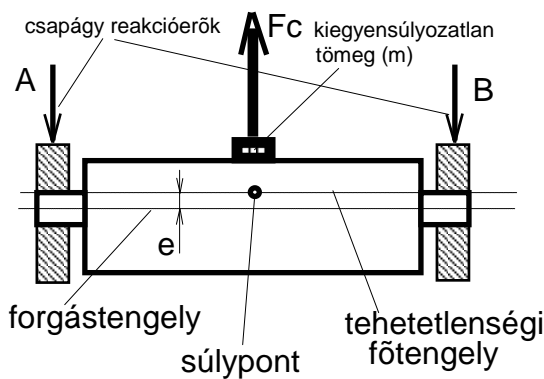


3.4. ábra A tökéletesen kiegyensúlyozott állapot

Mint láttuk a tehetetlenségi főtengely a merev test immanens tulajdonsága, a forgástengelyt pedig a géptervezői szándék és a gyártási technológia pontossága határozza meg. A kiegyensúlyozatlanság különböző eseteit a két tengely geometriai viszonya alapján választhatjuk el egymástól. Eszerint az alábbi esetek fordulhatnak elő. [80] [S19]

A. Statikus kiegyensúlyozatlanság [S9]

Statikus kiegyensúlyozatlanság esetén a gép forgástengelye párhuzamos az ebbe az irányba mutató tehetetlenségi főtengellyel.



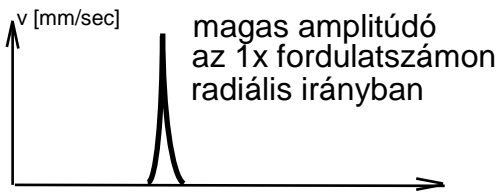
Ha a két tengely a 3.5. ábrának megfelelően párhuzamos egymással, akkor értelmezhető közöttük egy "e" távolság. Ennek segítségével meghatározható az a centrifugális erő, mely reakcióit lényegében a csapágyak veszik fel.

$$F_c = m \cdot e \cdot \omega^2 \text{ [N]} \quad (3.1)$$

ahol m - a test tömege [kg]

ω - a forgás szögsebessége [1/s]

TIPIKUS REZGÉSSPEKTRUM

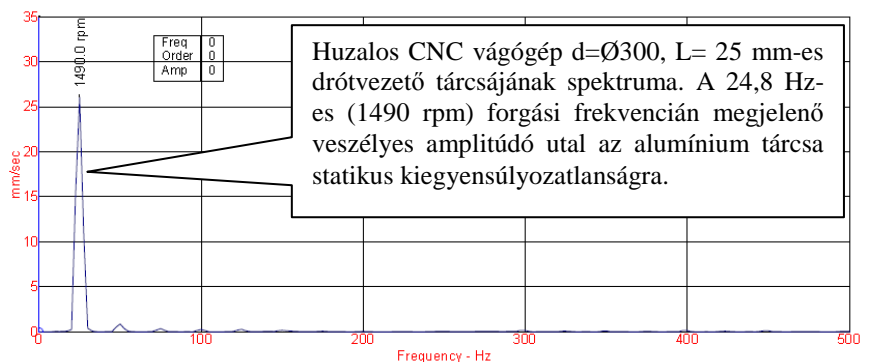


3.5. ábra Statikus kiegyensúlyozatlanság és elvi spektruma [S9]

A statikus kiegyensúlyozatlanság nagysága állandó és mindig azonos fázisban van. A tengely első kritikus hajlító frekvenciája alatt a kiegyensúlyozatlanságból adódó amplitúdó nagysága a fordulatszám növekedésével négyzetesen emelkedik

(pl. 3x-os fordulatszám növekedés 9x-es rezgésnövekedést okoz). Radiális irányban mérve az

1x-es forgási frekvencia - általában egy kiemelkedő értékkel - mindig jelen van a spektrumban. A statikus kiegyensúlyozatlanságot a rotor súlypontjának síkjában elhelyezett



3.6. ábra CNC vágógép statikus kiegyensúlyozatlanságra utaló spektruma

meggel tudjuk megszüntetni. A 3.6. ábrán látható spektrum egy alumínium tárcsa gyártási pontatlanságból származó vízszintes rezgéssebesség spektrumát mutatja, amelyben jól látszik az 1x-es forgási frekvencián megjelenő veszélyesen magas 25 mm/s-ot is elérő amplitúdója.

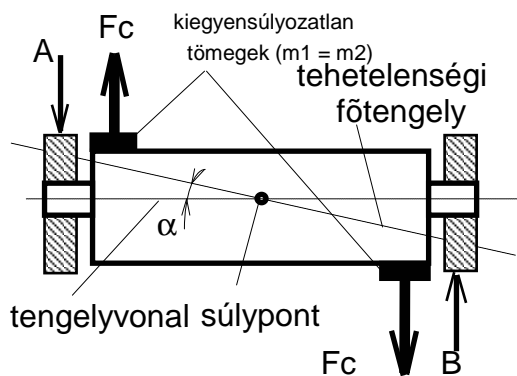
A statikus kiegyensúlyozatlanság jelenlétére egyrészt a rotor kialakításából (tárçaszerű forgórész, $L/D > 4$, $L_{\max} = 100\text{mm}$), másrészt a fázisszög mérés eredményeiből lehet következtetni. A forgórész két csapágyán nem lesz fáziseltérés, így. 90° -os fázisszög különbség fog mutatkozni a horizontális és vertikális irányú rezgésmérések között.

B. Nyomaték kiegyensúlyozatlanság

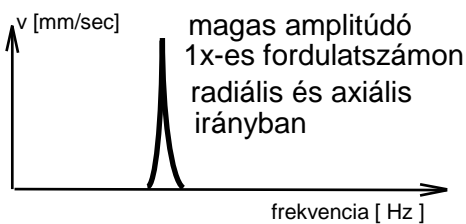
[S4_D] [S9] [S11] [77] [78][80]

Ez tulajdonképpen a tiszta dinamikus kiegyensúlyozatlanság esete, amikor a forgástengely a súlypontban metszi az egyik tehetetlenségi fő tengelyt. A rendszerben ilyenkor centrifugális erő nem keletkezik, de megforgatáskor nyomaték jön létre, amelyet a csapágyon kialakuló körben forgó egy mástól 180° -os fázisszög eltéréssel rendelkező reakcióerő-pár ellensúlyoz.

A 3.7. ábrán látható esetben a test statikusan kiegyensúlyozott (hiszen a súlypont rajta van a tengelyvonalon), megforgatáskor azonban egy nyomaték áll elő. A nyomaték nagysága és a csapágyreakciók a következő képen számíthatók:



TIPIKUS REZGÉSSPEKTRUM



3.7. ábra A nyomaték kiegyensúlyozatlanság és elvi spektruma [S9] [S11]

$$M_D = (\Theta_z - \Theta_x) \cdot \omega^2 \sin \alpha \cos \alpha \quad [Nm] \quad (3.2)$$

ahol $\Theta_z ; \Theta_x$ - az adott tengelyre számított tehetetlenségek $[N s^2 m]$

α - a két tengely hajlásszöge

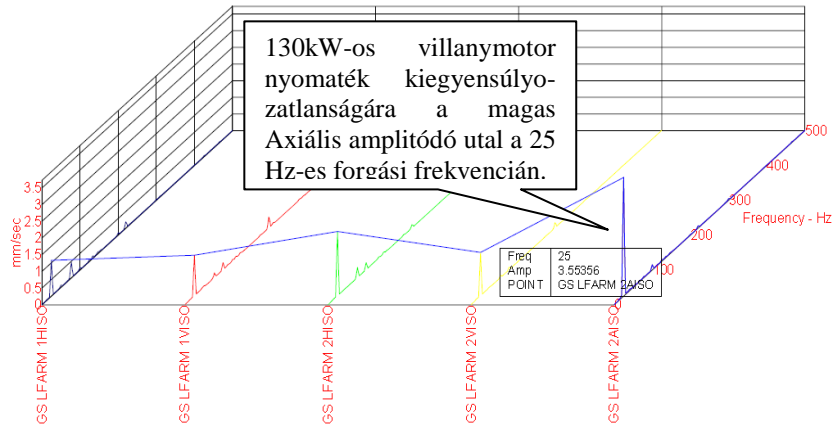
ebből a reakcióerők az alábbi összefüggéssel számíthatók :

$$A = B = \frac{M_D}{a + b} \quad [N] \quad (3.3)$$

ahol "a" és "b" a csapágy középpontok súlyponttól való távolságát jelentik.

Ezek a reakció erők okozzák tulajdonképpen a csapágy élettartam csökkenését. Az 1x-es (forgási) frekvencia általában itt is uralja a spektrumot és az első hajlító kritikus fordulatszám alatt a fordulatszám növekedés a rezgésszint négyzetes emelkedését vonja maga után. A tiszta dinamikus kiegyensúlyozatlanság esetén a magas radiális (általában vízszintes) irányú rezgések mellett, axiális irányban is hasonló nagyságú rezgéscsúcs keletkezhet. A hiba megszüntetéséhez két síkban történő tömeghozzáadás (vagy elvétel) szükséges.

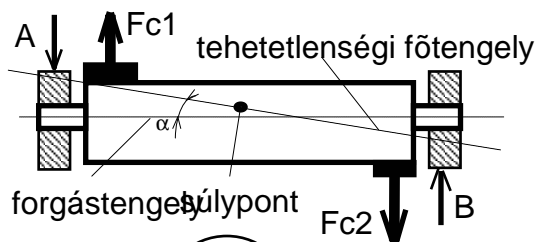
A két csapágy horizontális és vertikális irányban felvett spektrumát és fázisszögét vizsgálva azt tapasztaljuk, hogy a két csapágy azonos irányban felvett rezgéscsúcsai között 180°-os fáziskülönbség



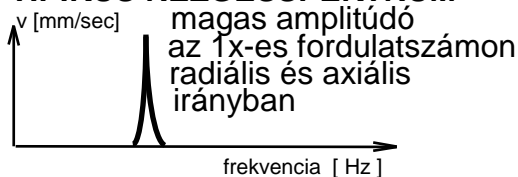
3.8. ábra Nyomaték kiegyensúlyozatlanságra utal a magas axiális rezgéssebesség amplitúdó, a Horizontális és Vertikális értékek láthatóan alacsonyabbak van, míg az egy csapágyon mért vertikális és horizontális irányok között megmarad a 90°-os fáziskülönbség. A 3.8. ábrán un. „Palogram” típusú diagramon egy villanymotor két csapágyának különféle irányból felvett rezgésspektrumait kísérhetjük figyelemmel. Látható, hogy a vízszintes (H) és függőleges (V) spektrumok amplitúdói megfelelőek, de a normálisnál magasabb axiális amplitúdó utal a nyomaték kiegyensúlyozatlanságra.

C. Általános dinamikus kiegyensúlyozatlanság [78] [S9]

Ez az eset a kiegyensúlyozatlanság legáltalánosabb esete, ennek megfelelően a gyakorlati életben is ez fordul elő a legtöbbször. A forgástengely és a test tehetetlenségi főtengelye kitérő helyzetűek, így a rotor megforgatása következtében a csapágyakat centrifugális erőből és



TIPIKUS REZGÉSSPEKTRUM

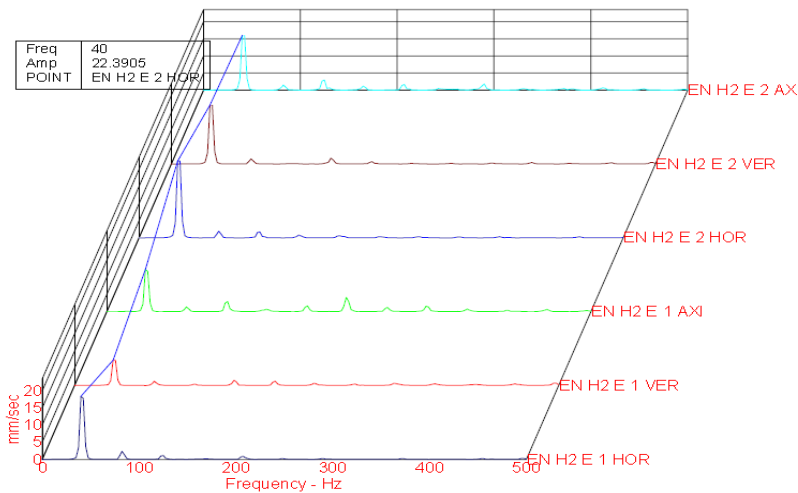


3.9. ábra Az általános dinamikus kiegyensúlyozatlanság és elvi spektruma

deviációs nyomatékból adódó reakció erők fogják terhelni, lásd 3.9. ábra. A dinamikus kiegyensúlyozatlanság esetében az 1x-es (forgási) frekvencián radiális irányban mért magas rezgésamplitúdó jellemzi a spektrumot. A történő tömeg-korrekciónak csak két síkban lehetősége, az A és B csapágy közötti radiális fázisszög különbség értéke a 0° és 180° között van. A jobb és baloldali csapágyak horizontális fázisszög eltérése összhangban kell, hogy legyen a vertikális fázisszög eltéréssel. Akkor jelenthetjük ki biztonsággal a kiegyensúlyozatlanságot, ha mindkét csapágyon 90°-os fázisszög különbséget mérünk a horizontális és vertikális

irányú, 1x-es forgási frekvencia amplitúdói között.

A 3.10. ábra „Waterfall”³⁶ diagramja egy gépjármű teljesítmény mérő pad két görgő támasztó csapágyának rezgésspektrumait mutatja. Az 500 kg-os görgőn veszélyesen magas közel 23 mm/s rezgéssebesség amplitúdók láthatóan vízszintes irányban (HOR) a legmagasabbak és merev alapozás miatt, függőlegesen (VER) a legalacsonyabbak a 40 Hz-es forgási frekvencián. Meg kell



3.10. ábra ENERGOTEST gépjármű teljesítmény mérő pad csapágyainak kiegyensúlyozás előtti "Waterfall" diagramja

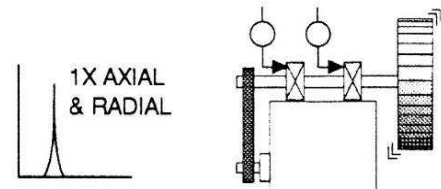
jegyezni, hogy egyértelmű esetekben a fázisszög értékeket már csak a kiegyensúlyozás közben szoktuk mérni. A teljesítménymérő pad görgőinek kiegyensúlyozását a helyszínen elvégeztem az ENERGOTEST Kft dunaharaszti telephelyén végeztem el, melynek során tömeghozzáadással mindkét síkban 1,2 mm/s alá csökkentettem a veszélyes amplitúdókat.

3.10. ábra ENERGOTEST gépjármű teljesítmény mérő pad csapágyainak kiegyensúlyozás előtti "Waterfall" diagramja

D. Konzolos forgórész-kiegyensúlyozatlanság

[77] [78] [80] [81] [S11]

A konzolos kialakítású forgórészek kiegyensúlyozatlansága az 1x-es (forgási) frekvencián mind radiális, mind axiális irányban mérve egyaránt magas rezgésamplitúdót okoz, amint azt a 3.11. ábra elvi spektrumképe is mutatja. Ilyen esetben az axiális irányban felvett amplitúdók azonos fázisban lesznek, miközben a radiális amplitúdók szögértékei ingadozást mutatnak. Mind emellett elmondható, hogy a kiegyensúlyozatlan forgórészen mérhető horizontális fázisszög értékek általában szoros összhangban vannak a vertikális irányban felvett amplitúdók szögértékeivel. A statikus és dinamikus kiegyensúlyozatlansággal rendelkező konzolos kialakítású forgórészek esetében mindkét hibát ki kell küszöbölnünk. Ezért a kiegyensúlyozást minden esetben két síkban kell végrehajtanunk, ami azt eredményezi, hogy a felhelyezett kiegyensúlyozó tömegek a statikus és dinamikus kiegyensúlyozatlanságot is meg fogják szüntetni.



3.11. ábra Konzolos forgórész kiegyensúlyozatlanságának elvi spektrumképe [15]

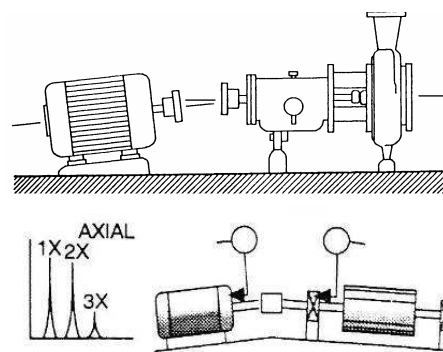
³⁶ Waterfall „vízesés” diagram – több rezgésspektrum egyszerre történő „vízesés szerű” megjelenítése

III.2.2. Tengely-beállítási hibák

A gyakorlatban a gépláncban összekapcsolt gépek tengelyei különféle helyzeteket vehetnek fel. Az ideális helyzet az egybeesés, melyre mindig törekszünk, de tökéletesen megvalósítani nem tudjuk. A kapcsolódó tengelyek egymáshoz viszonyított helyzete szerint megkülönböztetünk: egybeesést, párhuzamossági hibát, szöghibát, illetve kitérő helyzetű tengelyeket.

A. Szöghiba [S7] [S8] [S14]

A 3.12. ábrán bemutatott szögben álló tengelyeket magas axiális irányú rezgés és a tengelykapcsoló két oldalán szintén axiális irányban mérhető 180°-os fázisszög különbség jellemzi. Jellegzetessége, hogy magas amplitúdót találunk a spektrumban a forgási frekvencia 1x-es és 2x-es harmonikusainál, azonban nem ritka, hogy a 3x-os frekvencián, vagy az ezeknek egész számú többszöröseinél jelentkező magas amplitúdó sem. Hasonló szimptómákat tapasztalhatunk abban az esetben is, ha a tengelykapcsoló gyártási pontossága nem megfelelő (síktűtéssel rendelkezik). A veszélyes mértékű szög-



3.12. ábra Szöghiba értelmezése és jellegzetes elvi spektrumképe [81]

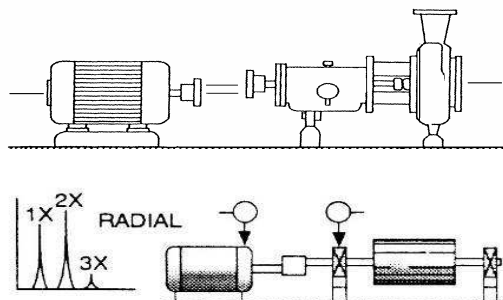


3.13. ábra Centrifugál szivattyú szöghibára utaló Axiális irányú rezgéssébség spektruma

hiba az 1x-es (forgási) frekvencia számtalan felharmonikusát gerjesztheti, veszélyes mértékű azonban nem szabad összekeverni a későbbiekben bemutatásra kerülő 3. típusba sorolható mechanikai lazasággal, ahol a kiemelkedő harmonikus csúcsok mellett még egy szabálytalanul kiemelkedő zajszint is jellemzi a spektrumot. A szöghiba megjelenésére mutat példát az 3.13. ábra, melyen egy centrifugál szivattyú tengelykapcsoló felőli motorcsapágyának axiális irányból készített spektrumképe látható.

B. Párhuzamossági hiba [S7] [S8]

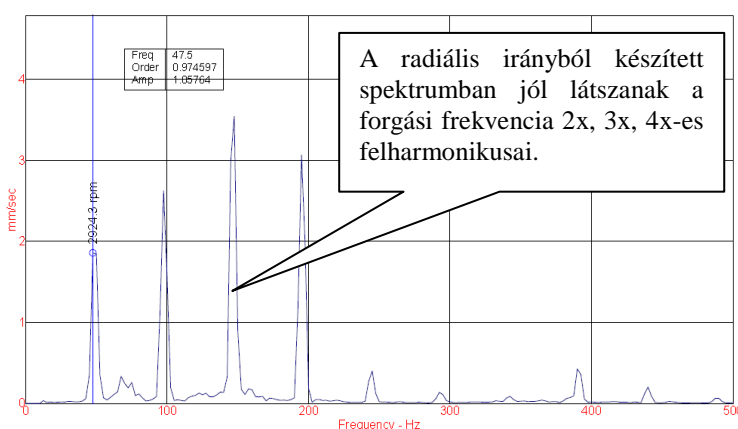
A párhuzamos tengely-beállítási hiba hasonló rezgés jelenségeket produkál mint a szöghiba, de a magas rezgés amplitúdók és a tengelykapcsoló két oldalán mérhető 180°-os fázisszög különbség ez esetben radiális irányban jelentkezik, amint azt a 3.14. ábra is mutatja.



3.14. ábra A párhuzamossági hiba értelmezése és jellegzetes elvi spektrumképe [S15]

A 2x-es harmonikus gyakran magasabb mint az 1x-es amplitúdó, ezek egymáshoz viszonyított arányát általában a tengelykapcsoló típusa, illetve a hajtás kialakítása határozza meg. Amikor egy szög-, vagy párhuzamossági tengelybeállítási hiba veszélyessé válik, a spektrumban

hasonló magasabb frekvenciákon jelentkező harmonikus csúcsok teljes sorozatát állíthatja elő.



3.15. ábra Centrifugál szivattyú párhuzamos tengely-beállítási hibára utaló Vertikális irányú rezgéssebesség spektruma

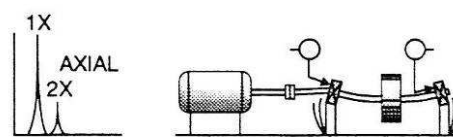
A tengelykapcsoló típusa anyagminősége, kialakítása gyakran jelentősen befolyásolhatja a hibátlan, illetve a veszélyes tengely-beállítási hibára jellemző spektrumképet. A hiba megkülönböztetése szempontjából fontos, hogy ilyenkor nem jellemző a szabálytalanul kiemelke-

ző zajszint. A radiális hiba megjelenését a 3.15. ábra rezgéssebesség spektruma mutat példát, melyen egy centrifugál szivattyú tengelykapcsoló felőli motorcsapágyának vertikális irányból készített spektrumképe látható. A spektrumban jól megfigyelhető a felharmonikusok jelenléte. [81] [82] [83] [84]

dő zajszint. A radiális hiba megjelenését a 3.15. ábra rezgéssebesség

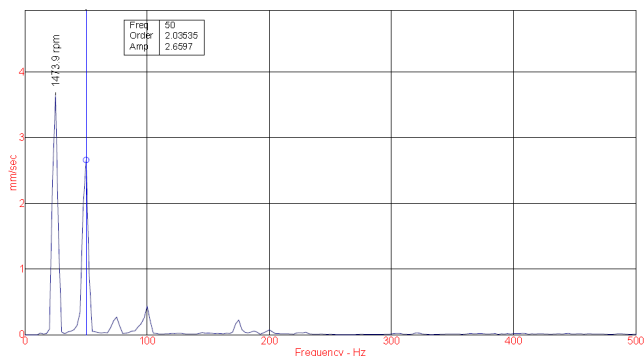
III.2.3. Elgömbült tengely

A 3.16. ábrán látható tengely elgömbülésének problémája magas axiális irányú rezgéseket okoz, emellett



3.16. ábra Az elgömbült tengely jellegzetes elvi spektrumképe [81]

a gépen 180°-os fázisszög különbséget is tapasztalhatunk. A domináns frekvencia általában az 1x-es (forgási) frekvencia, ha a tengely lehajlása (elgömbülése) a tengely közepén van, illetve a 2x-es frekvencia, ha a görbeség a két gép között a tengelykapcsolónál helyezkedik el. Ezért, ha ilyen hibára gyanakszunk az axiális irányú rezgés és fázisszög méréseknél legyünk óvatosak az érzékelő helyzetének figyelembe vételénél. A hiba pontos kimutatása érdekében mindkét mérés esetében végezzünk ellenpróbát és használjunk valamilyen jelölést a tengely különböző helyzeteinek azonosítására, esetleg végezzünk tengelybeállítás ellenőrzést.



3.17. ábra Motortengely görbeségére utaló axiális rezgésspektrum

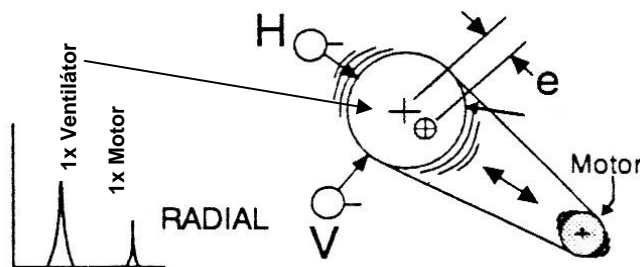
Tengely görbeségre utaló problémát egy 1490 1/min (24,9 Hz) fordulatszámú szivattyú tengelyen tapasztaltam, amelynek axiális irányú rezgésebbesség spektrumát a 3.17. ábrán kísérhetjük figyelemmel. A görbeségre utaló rezgésspektrum kissé hasonlít a tengely-beállítási problémához, először erre is gyanakodtam. Mivel a gépen

fázisszög mérésre nem volt lehetőség, ezért lézeres tengelybeállítás ellenőrzéssel győződtem meg arról, hogy nem tengely-beállítási hiba, hanem az elgörbült tengely okozta a problémát.

III.2.4. Excentrikus forgórész

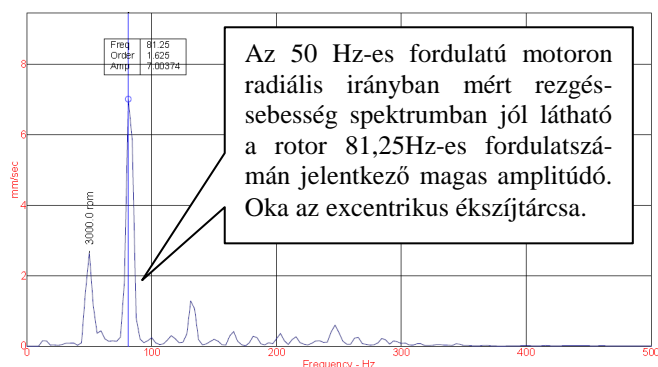
[78] [81] [83] [S33]

A forgórész excentrikusságáról akkor beszélhetünk, amikor az elméleti forgástengely és az ékszíj-tárcsa, fogaskerék, csapágy, motor forgórész,



3.18. ábra Excentrikus forgórész elvi spektruma [81]

stb. geometriai középpontja között párhuzamos eltérés (excentricitás) van. A két forgórész középvonalán átmenő egyenes irányában a többi irányhoz képest magasabb rezgés amplitúdó jelenik meg a excentrikus forgórész 1x-es fordulatszámának megfelelő frekvencián. Lásd 3.18.ábra. Összehasonlítva a horizontális és vertikális irányú fázisszög mérési eredményeket a fáziskülönbség 0° vagy 180° (az egyenes vonalú mozgás irányától függően). Ha egy adott radiális irányban megkíséreljük kiegyensúlyozni a forgórészt (a magas amplitúdó csökkentése érdekében) azt fogjuk tapasztalni, hogy a választott irányban csökkenni fog a rezgés amplitúdója, egy másik irányban viszont meg fog növekedni. A rotor excentrikusságát ilyenkor mé-



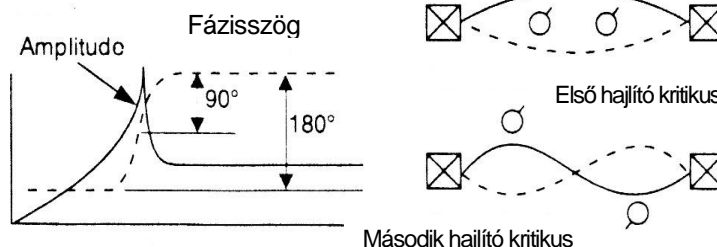
3.19. ábra Excentrikus forgórészére utaló rezgésebbesség spektrum

rőórával kell ellenőrizni, majd a forgórész cseréjével, illetve forgácsolással történő beavatkozással szüntethetjük meg a káros rezgéseket. A 3.19. ábrán cellulóz egy őrlő malom spektrumképe látható. A mérést a motor csapágyon végeztem, de ennek ellenére láthatóan a motor spektrumaiban is veszélyes mér-

tékben megtalálható a hajtott rotor fordulatszámán 81,25 Hz-en megjelenő veszélyesen magas rezgésesség amplitúdó. Az ékszíjtárcsa ütés ellenőrzését javasoltam, amely során megállapítható volt a tárcsa gyártási hibából adódó 0,3 mm-es excentrikussága, ütése. Az ilyen jellegű hibák javítása cserével, vagy felszabályozással valósítható meg.

III.2.5. Tengely rezonanciák

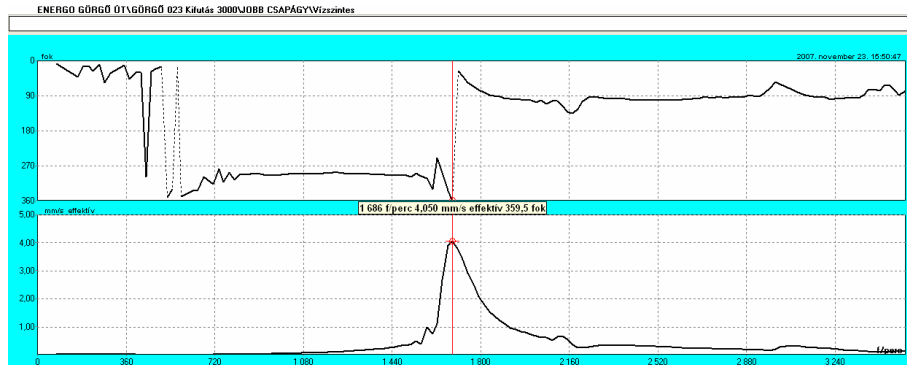
Rezonancia akkor keletkezhet, lásd. 3.20. ábra, amikor valamilyen külső erőhatás frekvenciája megegyezik a rendszer



3.20. ábra Tengely hajlító kritikus frekvenciájának elvi ábrája [81]

rendszer természetes (rezonancia) frekvenciájával. Ez nagymértékű rezgés-amplitúdó felerősödést okozhat, ami idő előtti gyors elhasználódáshoz, vagy hitelen tönkremenetelhez vezet. A rezonancia frekvencia lehet a forgórész sajátfrekvenciája is, de gyakran a tartószerkezet, az alapozás, a fogaskerék-hajtómű, vagy éppen a szíjhajtás által keltett hatások idézik elő. Gyakorlati tapasztalat, hogy ha egy forgórész a saját rezonancia frekvenciáján, vagy annak közelében üzemel, akkor a nagymértékű fázis eltolódások miatt majdhogynem lehetetlenné válik a rezgések kiegyenlítése, csökkentése (amint az ábrán is látható a rezonancia frekvencián 90°-os a fáziseltérés, míg ezen a ponton való átlépés után akár 180°-nál nagyobb eltérés is lehet). A rezonancia frekvencia növelésére, vagy csökkentésére gyakran van szükség. A fordulatszám változtatásával általában nem tudjuk jelentősen megváltoztatni a rezonancia frekvenciákat (kivéve a magasan kiemelkedő forgórészek és nagyméretű támcsapágyak esetében), ez a módszer azonban megkönnyíti ezen frekvenciák meghatározását. [85] [86] [87]

A tengelyek és forgórészek rezonancia frekvenciájának meghatározására általánosan használt módszer a kifu-



3.21. ábra Próbapadon Kifutásvizsgálat mérési eredménye a 3200 - 0 1/min fordulatszám tartományban az U-1000

tás vizsgálat, melyre példát a 3.21. ábrán láthatunk. A mérés során rezgés-amplitúdó és fázisszög mérésre is szükség van, ezért olyan műszert kell

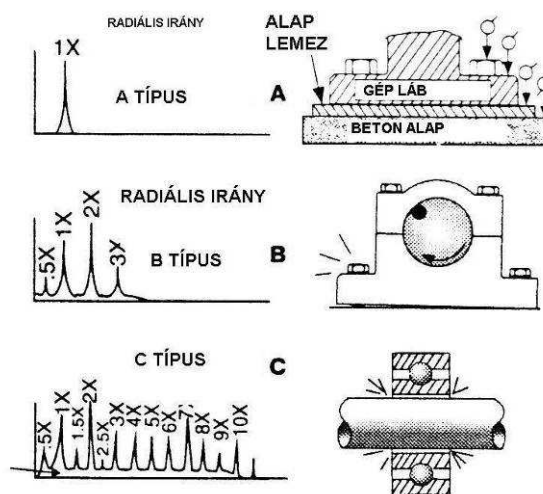
választanunk, amely ezt a két jellemzőt egy időben tudja mérni. A vizsgálandó forgórészt üzemi fordulatra gyorsítjuk (felfutás mérés), vagy üzemi fordulatról megállásig lassítjuk. Eközben az említett két jellemzőt mérve megkapjuk az ábrán alul látható amplitúdó változást, illetve az amplitúdókhoz tartozó fázisszög értékeket. Az így készített diagramból láthatóan már nem nehéz eldönteni, hogy ha a legmagasabb amplitúdó helyén fázisszög váltás történik, akkor ez a frekvencia a forgórész első hajlító kritikus fordulatszáma. A mérést az U-1000 próbapadon végeztem az Óbudai Egyetem Géptan laborjában. A gépszerkezetek sajátfrekvenciáinak meghatározását segíti az ún. „kalapács ütés” teszt is, amikor gépszerkezetet kalapáccsal megütve a valós idejű spektrumképen kiemelkednek a rezonancia frekvenciák. Azoknál a műszereknél, amelyekkel az ilyen mérések elvégezhetők, célszerű kihasználni ezt a lehetőséget.

III.2.6. Mechanikai lazaságok

[81] [87]

A mechanikai lazaságok által előidézett A, B, és C típusú jellegzetes spektrumképeket a 3.22. ábrán kísérhetjük figyelemmel.

Az „A” ábrán látható **A típusú** spektrumképet a gép láb, az alaplemez, vagy az alapozás szerkezeti lazasága, gyengesége okozza. Ugyanilyen hibát okoz a beton alap tönkremenetele, az alapozó csavarok meglazulása az alapban, illetve az alap, vagy a tartó(váz) szerkezet torzulása, deformációja (lásd még puha láb jelenség). Fázisszög mérés segítségével kimutatható, hogy ez esetben 90° és 180° közötti fázisszög különbség jelentkezik az alapcsavarokon, a géplábon, az alaplemezen és a beton alapozáson végzett vertikális irányú mérések között.

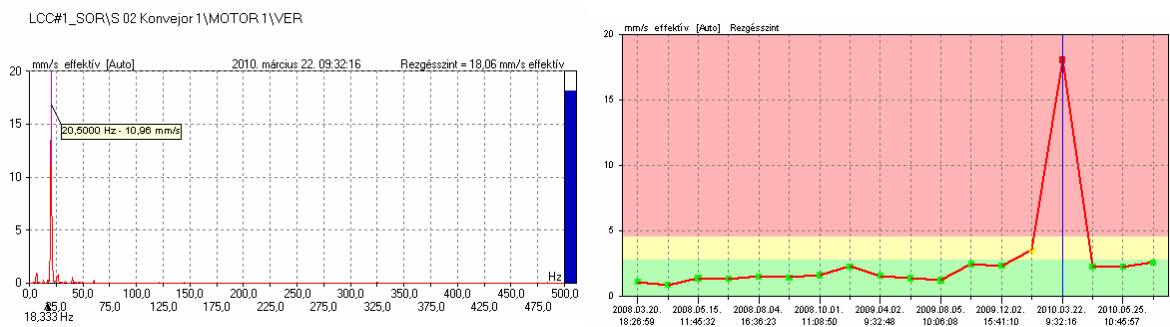


3.22. ábra Mechanikai lazaságok elvi spektrumképei

A **B típusú** mechanikai lazaságra jellemző spektrum általában akkor keletkezik, amikor fellazul a csapágy alapzata, törés van a vázszerkezetben a csapágy alatt, vagy meglazulnak a csapágyházat rögzítő csavarok.

A **C típusú** mechanikai lazaságra jellemző tipikus spektrumot általában a gépelemek közötti helytelen illesztés okozza. Ilyenkor a rotor és a fellazult alkatrészek között nemlineáris változó erők lépnek fel, aminek következtében ez a hiba számtalan harmonikus megjelenését

váltja ki a spektrumban. Amint az ábrából is kitűnik a frekvencia tartományban egy széles szabálytalan zajszint a jellemzője, az időjel pedig egy levágott, lapos hullámot mutat. Ezt a fajta spektrumot gyakran eredményezi a tengelyre lazán szerelt csapágy, a csapágy körbefordulása a tengelyen, sikló és gördülőcsapágyak indokolatlanul nagy csapágyhézaga, valamilyen fellazult hajtóegység a forgórészen, stb. A C típusú mechanikai lazaság gyakran bizonytalan, az egymás után mért spektrumképek jelentős mértékben megváltozhatnak, különösen akkor, ha a forgórész helyzete megváltozik a két elindítás között. A mechanikai lazaság a legtöbb esetben irányfüggő, előfordulhat az is, hogy egy csapágyházon körbe mérve a rezgéseket a rezgésszint növekedés a 30%-ot is elérheti. Megjegyzendő még, hogy a fellazulás gyakran alharmónikusokat is előidéz a spektrumban, ezek pontosan a forgási frekvencia $1/2x$ -es és $1/3x$ -os összetevői, illetve ezek felharmonikusai szoktak lenni (pl. $.5x$, $1.5x$, $2.5x$, stb.).

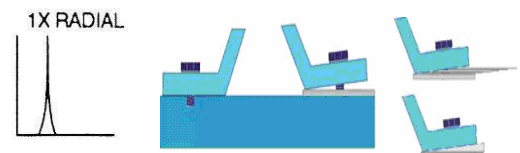


3.23. ábra Szervomotor nem megfelelő rögzítéséből adódó veszélyes fellazulásra utaló rezgésebbesség spektruma és trendje

Példaként az A típusú fellazulást egy szervó motor spektrumán és trendjén keresztül mutatom be a 3.23. ábrán, melyet a karbantartás után elfelejtettek megfelelően rögzíteni. A meglazult csavarok láthatóan hirtelen veszélyes rezgésszintet okoztak, melyet ugyan könnyű kijavítani, azonban a meglazult motor akár le is eshetett volna egy idő után a helyéről, amely a tönkremeneteléhez és gyártósor nem tervezett leállításához vezethetett volna. A jobb oldali képen látható trendből jól látszik a karbantartási intézkedés hatása, a csavarok megfelelő rögzítése után a berendezés rezgésszintje visszaállt az elfogadható normál üzemi értékre.

III.2.7. A géplábbal kapcsolatos hibák

"Puha láb" jelenségről beszélhetünk az esetben, ha a géplábak, vagy az állványszerkezet megmehibásodása (torzulása, elcsavarodása), olyan nagy mértékű, hogy amikor meglazítjuk a kézzel meghúzott alapsavarokat, a láb több mint 0,1 mm-rel megemelkedik. Ez nem minden esetben fő oka a rezgések növekedésének, viszont



3.24. ábra A "puha láb" jelenség elvi spektruma

az alapsavarok meglazítása után a rezgések növekedésének, viszont

jelentősen befolyásolja a tengelybeállítás pontosságát, valamint villamos motorok esetében a légrés nagyságát.

A géplábakkal kapcsolatos rezonanciák hasonlóan a 3.24. ábrán bemutatott fellazuláshoz, veszélyes mértékű amplitúdó emelkedést okoznak az 1x -es, frekvenciákon. A gépláb megrepedését az alapozás nagymértékű torzulása okozza, amelynek következtében a gépen megnövekednek a rezgések, erők és feszültségek keletkeznek a vázszerkezet egyes pontjain, a csapágyházakban, stb.

III.2.8. Gördülőcsapágyak tönkremenetelének folyamata

[S15] [S31] [S32] [S39]

A gördülőcsapágy mint az egyik legfontosabb és leggyakoribb gépelem a rezgésdiagnosztikai vizsgálatok során mindenütt kiemelt szerepet játszik. Ennek oka, hogy a csapágyazás hibája olyan meghibásodási sorozatot indíthat el a berendezésekben, amelyek akár több nagyságrenddel meghaladhatják a csapágycsere, illetve a diagnosztikai vizsgálat költségeit.

A csapágyak által keltett rezgések a gyakorlatban több okra vezethetők vissza:

- A kiegyensúlyozatlanságból származó erők hatására fellépő rezgések
- A tengelykapcsolók hibáiból eredő rezgések
- A gépek és gépcsoportok tengelyeinek helytelen beállítása miatt keletkező rezgések
- A lazaságból (hibás szerelés) eredő rezgések
- A csapágyak kopása (pitting, megnövekedett játék) miatt előálló rezgések.

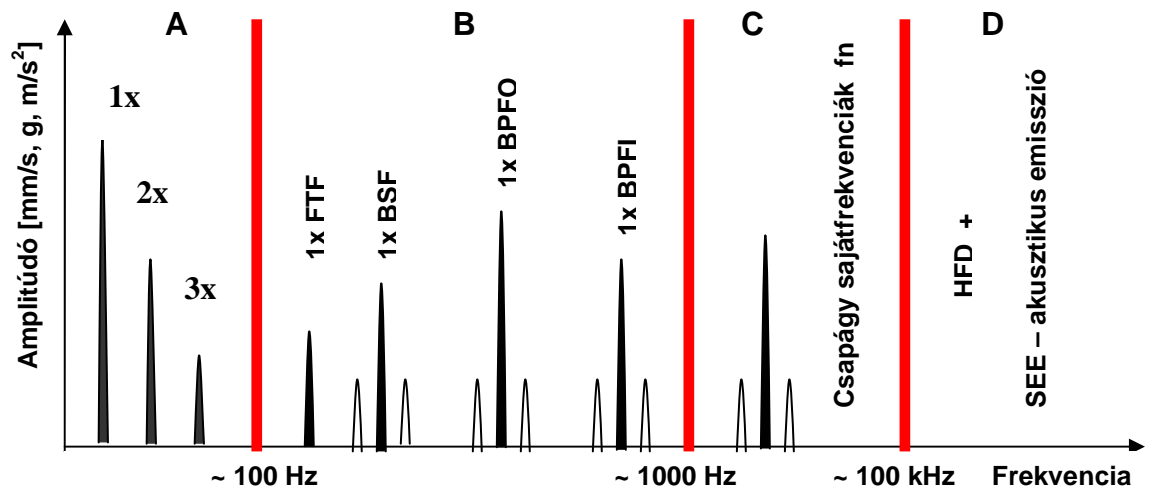
A csapágyak meghibásodására utaló jelek a legbiztonságosabban mindig a terhelés irányában mutathatók ki (pl. ékszíj, vagy lánchajtás esetében nem feltétlenül függőlegesen, hanem a feszítés irányában), mivel a terhelés hatására a csapágyak belső, külső futófelülete itt kopik meg a legnagyobb mértékben. [88] [89]

A gördülőcsapágyak véges élettartamát olyan tényezőkkel hozhatunk összefüggésbe, mint pl. a terhelés, fordulatszám, kenési állapot és a hőmérséklet. A leggyakrabban előforduló csapágy-meghibásodások: a belső, vagy külső gyűrű futófelületének kitöredezési hibái, a görgő vagy golyó lepattogzása, illetve a kosár tönkremenetelei. A csapágyhibák vizsgálatokor a rezgésspektrumban négy fontos frekvencia tartomány vizsgálatára kell figyelniük, melyek a 3.25. ábra szerint a következők:

A - alacsony frekvenciatartomány	≈ 100 Hz - ig
B - közepes frekvenciatartomány	≈ 100 Hz - ≈ 1000 Hz
C - magas frekvenciatartomány	≈1000 Hz - 100 kHz
D - akusztikus emisszió tartománya	≈100 kHz - 1000 kHz

Az egyes sávokon megfigyelhető, hogy viszonylag tág intervallumot mutatnak, ennek oka az, hogy a csapágyak rendkívül széles fordulatszám tartományban üzemelnek, az itt felsorolt intervallumok általános érvényűek.

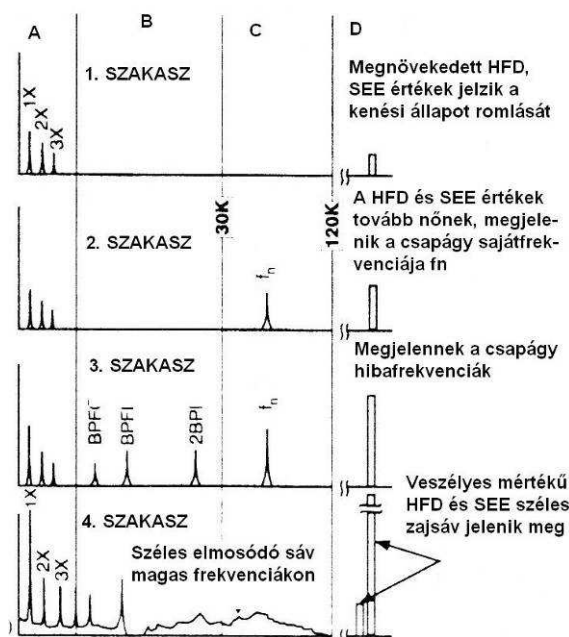
Az alacsony frekvenciatartományban a csapágy rezgéskeltő gépelemként viselkedik, azaz főként a kinematikai gerjesztés dominál. Ez a tartomány az, amelyben a csapágyak hibafrekvenciái normál érzékelőkkel kimutathatók. A magas frekvenciatartomány a csapágy szerkeze-



3.25. ábra Gördülőcsapágyak kibocsátott rezgéseinek érzékelési tartományai a frekvencia függvényében
 ti rezonanciáira jellemző szakasz, itt a csapágy működéséből származó lökésimpulzus jelek észlelhetőek, míg a 100 - 1000 kHz-es tartományban az egymással érintkező felületek kiszakadására utaló akusztikus emissziós folyamatokat lehet diagnosztikai módszerként felhasz-

nálni. [89] [90] [91]

GÖRDÜLŐCSAPÁGY TÖNKREMETELI FOLYAMATA



3.26. ábra Gördülőcsapágy tönkremenetele [81]

A csapágyvizsgálatnál általában többféle mérést végzünk, megpróbáljuk felhasználni a rezgésmérés minden típusát a pontos diagnózis felállításához. Ezek a típusok tartalmazzák a teljes rezgésszinteket, a csúcshatárértékek érzékelését (HFD), általános FFT spektrum összetevőket, burkoló (Envelop) eljárással készült spektrumokat, és végül a magas frekvencián kibocsátott akusztikus emissziós jelek analízisét felölölő Spektrális Kisugárzott Energia (SEE) technológiát, melyek részletes ismertetését a II.4. fejezetben mutattam be.

III.2.8.1. Gördülőcsapágyak tönkremenetele

[S31] [S32] [90]

Amint a 3.26. ábrán látható a gördülőcsapágyak meghibásodásainak, illetve a hiba kifejlődésének időbeli folyamatát négy főbb szakaszra lehet bontani. Ezeknek a szakaszoknak az ismerete azért igen fontos, mert a meghibásodás korai stádiumban való felismerésével - gyors beavatkozás révén - megelőzhetők a katasztrofális, hirtelen bekövetkező események.

1. SZAKASZ A csapágy meghibásodások (pl. kenési elégtelenség) a legkorábban az ultrahang tartomány felett az akusztikus emisszió tartományában kb. 250 000 - 350 000 Hz körül jelennek meg, később (lásd 2. szakasz) a kopás növekedésének következtében a hiba már az alacsonyabb 20000 - 60000 Hz tartományban is kimutathatóvá válik. Amint az ábrából is kitűnik az alacsonyabb 1000 Hz frekvencia tartományokban a meghibásodás kezdeti szakaszában még semmilyen rendellenesség sincs. Az első szakaszban a meghibásodásokra utaló frekvenciák, a HFD (gHFD), illetve a SEE módszerekkel mutathatók ki. Például a SEE módszer alapján az első szakaszban a hibára utalhat egy teljes spektrumra (overall) értelmezett 1-5 SEE érték (meg kell jegyezni, hogy a hibára utaló érték nagysága - a riasztási szint - a gép fordulatszámától és a mérés irányától függ). A burkoló (Envelope) eljárással készített spektrum alapján (megfelelő gyakorlat után) bizonyíthatóvá válik, hogy az adott csapágy a meghibásodás első szakaszában van, vagy sem.

2. SZAKASZ A kismértékű csapágy meghibásodás esetén kezdik el jelezni a hibát a csapágy alkatrészek saját (rezonancia) frekvenciái (fn), amelyek többnyire az 500 - 2000 Hz frekvencia tartományban fordulnak elő. Ezek a sajátfrekvenciák hasonlóak a csapágy tartószerkezetén kimutatható rezonanciákhoz. Különbséget jelent viszont az, hogy a második szakasz végén a csapágyra jellemző sajátfrekvencia alatt és felett oldalsáv frekvenciák jelennek meg (azonos, általában az 1x-es forgási frekvenciával egyenlő távolságban). Az előző szakaszban bemutatott példánál maradva, a második szakaszban a csapágy kopásának megfelelően emelkedik a HFD, a SEE, vagy a Spike Energy teljes energiaösszege is. A SEE érték itt már elérheti a 3-20 SEE értéket, amely már kenési hiánynak minősül, de ebben a szakaszban a csapágy, még megmenthető, ha az előírt minőségű kenőanyaggal a szokásosnál sűrűbben kenik.

3. SZAKASZ A károsodás fejlődésének ebben a szakaszában jelennek meg az ún. csapágy hiba frekvenciák és ezek egész számú harmonikusai. Amikor a csapágy elhasználódása felgyorsul, sok hiba frekvencia harmonikus és az ezekhez tartozó oldalsáv frekvencia jelenik

meg, ezen kívül megnövekszik a csapágy elemek sajátfrekvenciája és körülötte egyre több oldalsáv frekvenciát találunk. A magasabb frekvencia tartományban mérhető rezgésjellemzők szintje folyamatosan emelkedik. A csapágy kopása, elhasználódása, kipattogzása ilyenkor már szemmel látható lenne, különösen abban az esetben, ha a spektrumban a jól elkülöníthető (több harmonikuson keresztül a számított frekvenciákhoz jól "illeszkedő") hibafrekvencia harmonikusok alakulnak ki oldalsáv frekvenciák kíséretével. A magas frekvencia tartományból az alacsony frekvenciákra visszaalakító (demoduláló) eljárások (pl. Envelop, vagy SEE technika) igen hatékony segítséget nyújtanak a hibafrekvenciák kimutatásában és a csapágy élettartam harmadik szakaszának beazonosításában. **Ekkor kell csapágyat cserélni, amikor a rezgésspektrumban a hibafrekvencia csúcsok már jól elkülöníthetők !**

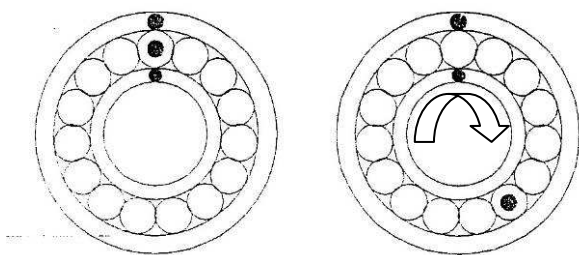
4. SZAKASZ A csapágy élettartamának vége felé a meghibásodás hatása már az 1x-es (forgási) frekvencián is érezhető hatását. A forgási frekvencia amplitúdója megnő és ez a növekedés számos harmonikus megnövekedését vonja maga után. A diszkrét (elkülöníthető) hibafrekvenciák és a csapágy komponensek sajátfrekvenciái kezdenek eltűnni, helyettük a spektrumban egy szabálytalan, széles frekvencia sávot átfogó magas zajszint jelenik meg. Ezt a zajszintet a legjobban a magas frekvencia tartomány miatt a rezgésgyorsulás spektrumban lehet megfigyelni. Emellett lehetséges, hogy a szabálytalan magas zajszint és a HFD, illetve SEE értékek átmenetileg csökkennek, de ez csak a teljes tönkremenetelt megelőző rövid időszakra jellemző, egyébként erre a szakaszra a HFD a SEE és a Spike Energy értékek jelentős megnövekedése lesz jellemző.

III.2.8.2. Gördülőcsapágyak hibafrekvenciáinak számítása és értelmezése

[87] [89] [91] [S31] [S32] Ha a gördülőcsapágyat csúszásmentes gördülőelemekből álló szerkezetként kezeljük, akkor az előzőekben említett spektrumfelosztást figyelembe véve a 10 kHz-ig terjedő közepes frekvenciatartományban nagyság szerint az alábbi ún. gördülési (hiba) frekvenciákat lehet megkülönböztetni :

- a csapágykosár forgási frekvenciája **FTF**
- a forgó gyűrű (tengely) forgási frekvenciája **RPM**
- a gördülőelemek forgási frekvenciája **BSF**
- a belső gyűrű futófelület egy adott pontján (hiba) való áthaladás frekvenciája **BPFI**
- a külső gyűrű futófelület egy adott pontján (hiba) való áthaladás frekvenciája **BPFO**

A csapágyak hibafrekvencia számítási képleteinek levezetése bonyolult, magyarázatuk azonban igen egyszerű megfigyeléseken alapszik. A 3.27. ábra bal oldali képének megfelelően képzeljük el egy olyan csapágyat, amelynek külső gyűrűje áll a belső pedig forog és a gyűrűket, illetve a kosarat egy tetszőleges helyen összejelöltem. Tételezzük fel azt, hogy az álló külső gyűrű jelölésének helyén egy csapágykipattogzás (pitting) található, amelyen



forogás közben áthaladnak a gördülőelemek. A

3.27. ábra A csapágyelemek kapcsolata forgás közben

3.27. ábra jobboldali képe azt az állapotot mutatja, amikor a belső gyűrű az óramutató járásával megegyező irányban egy fordulatot tett meg, míg a külső gyűrű állva maradt. Ekkor megállapítható, hogy egy fordulat alatt a görgőknek kb. 40%-a haladt át a feltételezett hibán.

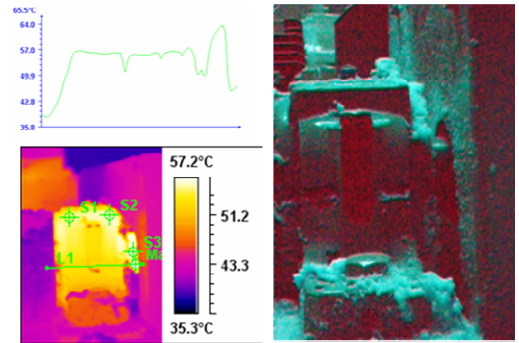
Ha a csapágyanak pl. 17 gördülőeleme van, akkor $0,4 \times 17 = 6,8$ görgő találkozik a külső gyűrű futófelületi hibájával, ami azt jelenti, hogy 1000 1/min fordulatszám esetén ennek a csapágyanak megközelítőleg $(6,8 \times 1000)/60 = 113,33\text{Hz}$ lesz a külső gyűrű futófelületének hibafrekvenciája (BPFO). Hasonló módon, természetesen a csapágy geometriai adatainak felhasználásával az összes előzőekben említett hibafrekvencia kiszámítható egy adott csapágy és a hozzá tartozó forgási frekvencia ismeretében. A számítási képleteket az 3.1. táblázatban foglaltam össze forgó és álló belső gyűrű esetében. [S31] [S32]

3.1. Táblázat A gördülőcsapágy hibafrekvencia számításának elméleti összefüggései

	Forgó belső gyűrű esetén	Forgó külső gyűrű esetén
BPMI [Hz]	$\frac{Z_B}{120} \left[1 + \frac{\cos\Theta \cdot D_B}{D_P} \right] \cdot n_{\text{belső}}$	$\frac{Z_B}{120} \left[1 + \frac{\cos\Theta \cdot D_B}{D_P} \right] \cdot n_{\text{közls}}$
BPFO [Hz]	$\frac{Z_B}{120} \left[1 - \frac{\cos\Theta \cdot D_B}{D_P} \right] \cdot n_{\text{belső}}$	$\frac{Z_B}{120} \left[1 + \frac{\cos\Theta \cdot D_B}{D_P} \right] \cdot n_{\text{közls}}$
BSF [Hz]	$\frac{D_P}{120 \cdot D_B} \left[1 - \left(\frac{D_B}{D_P} \right)^2 \cdot \cos^2 \Theta \right] \cdot n_{\text{belső}}$	$\frac{D_P}{120 \cdot D_B} \left[1 - \left(\frac{D_B}{D_P} \right)^2 \cdot \cos^2 \Theta \right] \cdot n_{\text{közls}}$
FTF [Hz]	$\frac{1}{120} \left[1 - \frac{\cos\Theta \cdot D_B}{D_P} \right] \cdot n_{\text{belső}}$	$\frac{1}{120} \left[1 - \frac{\cos\Theta \cdot D_B}{D_P} \right] \cdot n_{\text{közls}}$

A táblázat jelölései :

Z_B -	a gördülő elemek száma	[db]
D_B -	gördülő elem átmérő	[mm]
D_P -	a csapágy közepes átmérője	[mm]
$n_{\text{belső}}$ -	belső gyűrű fordulatszám	[1/min]
$n_{\text{külső}}$ -	külső gyűrű fordulatszám	[1/min]
$\cos \Theta$ -	érintkezési szög	[$^\circ$]



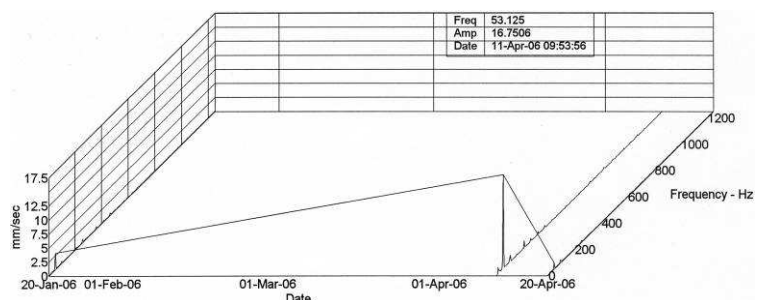
3.28. ábra Ventilátor csapágy „hőképe”

Mivel a külső futófelület kitöredezése a forgáshoz képest állandó helyen marad, így az ütközés amplitúdója az egyes gördülőelemeknek a külső futófelületen való áthaladása során nem változik meg. A belső futófelület ütközési amplitúdója a hiba helyétől függően változik úgy, ahogyan az bekerül, vagy kikerül a terhelési zónából.

III.2.8.3. Esettanulmány csapágy hibák gyakorlatban történő kimutatására

A csapágyhibák gyakorlati példát egy esettanulmányon keresztül mutatok be. A vizsgált $P=20$ kW teljesítményű és $n=3000$ 1/min fordulatszámú ventilátort egy nagy multinacionális cég üzemelteti, feladata egy gyártósorba szervezett, a termelésben a keletkezett melléktermék (hulladék) vákuum segítségével történő elszívása. Ha az elszívás nem működik, azaz a ventilátor leáll, a gépsor termelés képtelenné válik. A termelésből való kiesés a cég számára óránként a tízmillió forintot is meghaladó veszteséget jelent, a ventilátor cseréje kb. 4-5 órát, vesz igénybe, a csapágyak helyszínen történő cseréje nem kivitelezhető. A gép üzemeltetése során többször előfordul, hogy a gépkezelők figyelmetlensége folytán a ventilátor forgórészébe kerül az elszívott anyag, amely a lapátokra tapadva kiegyensúlyozatlanságot okoz.

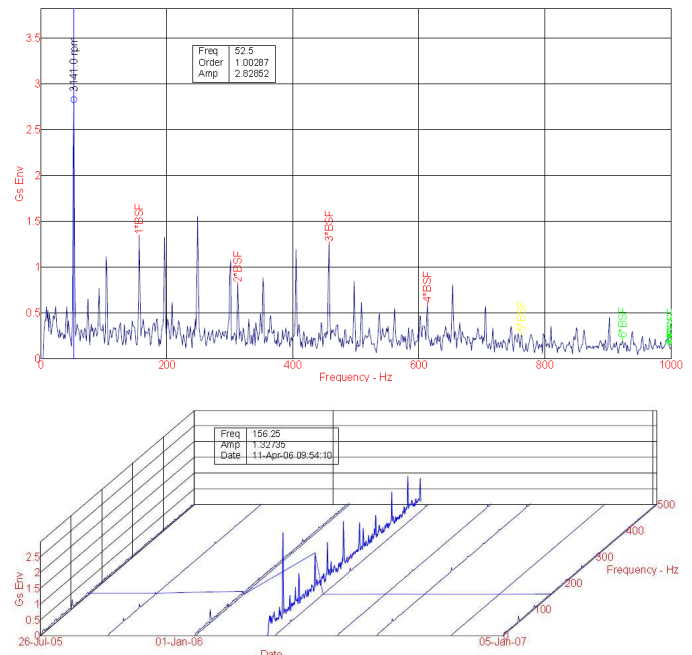
A termografikus inspekciónál (lásd 3.28. ábra) a lapát felőli csapágy hőmérsékletének 60°C fölé emelkedését tapasztaltam. Mivel ezek a csapágyak addig $35 - 40^\circ\text{C}$ körüli hőmérsékleten üzemelnek, a hőmérséklet emelkedés a tengely, illetve a csapágyház melegedésére utaló hőkép miatt soron kívüli rezgésmérést végeztem. A rezgésmérés során a kiegyensúlyozatlanság ténye egyértelműen bebizonyosodott, melyet a 3.29. ábrán látható vízesis diagram mutat. Láthatjuk, hogy a januári méréshez



3.29. ábra Rezgéssebesség RMS mérési eredmények 10-1000 Hz frekvencia tartományban

képezt drasztikusan nőtt a rezgésebbesség amplitúdó az 1x-es forgási frekvencián.

A mérések során természetesen a csapágyak elhasználódására utaló rezgésyorsulás, Envelop, SEE és HFD méréseket is végeztem. Mindegyik mérési jellemző a lapát felőli csapágy várható tönkremenetelét jelezte. Az csapágyhibákra utaló Envelop rezgésyorsulás spektrumokból a hiba is beazonosíthatóvá vált. A csapágyak elhasználódásának kimutatása érdekében végzett rezgésyorsulás, SEE és HFD mérési eredmények megerősítették a diagnózist. Az Envelop spektrumban megjelenő hibákat a 3.30. ábra szemlélteti. Az alsó



3.30. ábra SKF 1309E csapágy tönkremenetelére utaló Envelop spektrumok és „Palogram” diagram



3.31. ábra A kiszertelt csapágy golyón látható pittingesedés [S26]

spektrumképen a hiba előtti és utáni mérési eredményeket megfigyelve látszik a rezgésdiagnosztika hatékonysága, mivel a nem megfelelő műszaki állapotra utaló amplitúdók egyértelműen jelzik a hibát. A Prism4 for Windows³⁷ szoftverben kikeresve a beépített SKF 1309E típusú csapágyat és hozzárendelve a mérési eredményekhez a hibafrekvenciákat egyértelműen a csapágy gördülő elemeinek (BSF) hibájára utaló hibafrekvenciákon nem megfelelő nagyságú amplitúdókat mutatja lásd 3.30. ábra felső spektrumképe.

Mivel ennek a hibafrekvenciának megjelent az első négy felharmonikusa, valamint a rezgésyorsulás spektrumban 2000 Hz felett megjelent a hiba kifejlődés 4. szakaszára utaló zajsáv is ezért, azonnali intézkedésre szólítottam fel a karbantartókat. A ventilátort a mérés után azonnal kitisztították, melynek hatására a kiegyensúlyozatlanság természetesen elfogadható szintre csökken, de a csapágyat már megmenteni nem lehetett. Szakértői javaslatomra egy héten belül a tervezett karbantartási időben kicserélték. A csapágyon a kiszertelés után megtaláltuk a gördülő elemek kipattogzását, melyet az 3.31.ábrán kísérhetünk figyelemmel.

³⁷ Prism4 for Windows – adatbázis kezelő és kiértékelő rezgésdiagnosztikai szoftver (SKF)

III.2.9. Fogaskerék meghibásodások jellegzetes spektrumképei

[91] [92] [93]

Fogaskerék hajtások általános (ideális) spektruma

A fogaskerekes hajtások működésükből kifolyólag jellegzetes spektrummal rendelkeznek, melyet a 3.32.A. ábrán kísérhetünk figyelemmel. Az általános (hiba nélküli) spektrumban a fogaskerék fordulatszámának és az áttételnek megfelelő frekvenciákon kívül láthatóak az un. fogkapcsolódási (GMF³⁸) frekvenciák, illetve ezek igen alacsony rezgésamplitúdójú harmonikusai. A GMF frekvenciák és harmonikusaik körül szimmetrikusan a fogaskerék fordulatszámának megfelelő un. oldalsáv frekvenciák helyezkednek el. Mindegyik csúcs alacsony értékű és a spektrumban nem jelenik meg a fogaskerék saját frekvenciája (Gear f_n). Ha a kapcsolódó fogaskerekek fogszámait ismerjük, akkor a maximális mérési frekvencia nagyságát a GMF frekvencia 3.25x-esére ajánlott választani. Ha a fogszámokat nem ismerjük, akkor az adott tengely fordulatszámának legalább 200x-osára állítsuk be a maximális frekvencia nagyságát.

Fogkopás

A fogazat kopása esetén lásd 3.32.B ábra, a spektrumban megjelenik a hibás fogaskerekre jellemző saját frekvencia, olyan oldalsáv frekvenciákkal, amelyek a kopott kerék fordulatszámának felelnek meg. A GMF frekvencia amplitúdója nem változik minden esetben, noha általában a kopott fogaskerekek esetében megnövekszik a GMF frekvenciák oldalsáv frekvenciáinak nagysága és nő az oldalsáv amplitúdók száma is. Az oldalsávok amplitúdó változásainak megfigyelésével a fogkopás jobban kimutatható, mint a GMF frekvenciával. Szintén magas amplitúdók keletkezhetnek a 2xGMF, de még inkább a 3xGMF frekvencián, még akkor is, ha a GMF frekvencia amplitúdója elfogadható nagyságú.

Fogaskerék ütés, kotyogás (nagy foghézag)

A meglehetősen magas oldalsáv frekvenciák a GMF frekvenciák körül gyakran a fogaskerék excentrikusságára, vagy a helytelen foghézagra engednek következtetni, melyet a 3.32.D. ábra szemléltet. Ezek a problémák az oldalsáv frekvenciák közötti távolságok (üres helyek) segítségével mutathatók ki. Ha a fő probléma a fogaskerék ütése, akkor általában magas amplitúdójú lesz a fogaskerék fordulatszámának 1x-es frekvenciája. A helytelen foghézag általában olyan GMF frekvenciákat és fogaskerék saját frekvenciákat (f_n) gerjeszt, amelyek oldalsáv frekvenciái a fogaskerék egyszeres forgási frekvenciájának felelnek meg. A helytelenül beállí-

³⁸ GMF - Gear Mesh Frequency - fogaskerék hajtás un. fogkapcsolódási frekvenciája

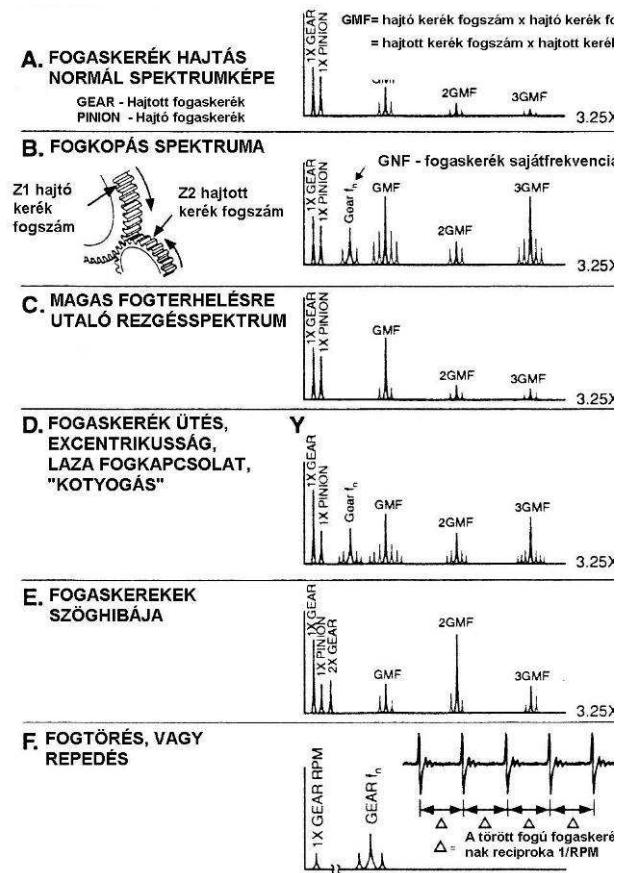
tott (nagy) foghézag miatt sok esetben előfordul, hogy a terhelés növekedésének eredményeként csökkenni fog a GMF amplitúdók magassága.

Túlterhelés

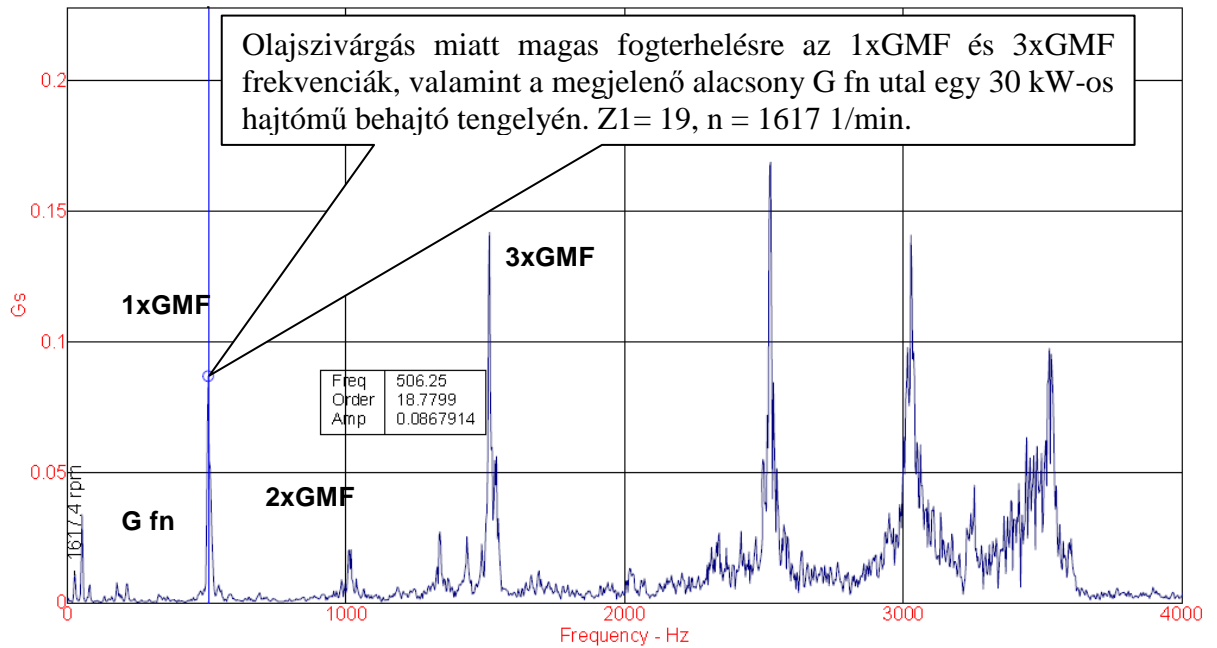
A fogazat magas fogterhelésére vonatkozó tipikus rezgésspektrumot a 3.32.C.ábrán kísérhetjük figyelemmel. A fogkapcsolódási frekvenciák a legtöbb esetben nagymértékben érzékenyek a terhelésre. A magas GMF frekvencia amplitúdók nem jelentenek szükségszerűen meghibásodást, különösen akkor nem, ha az oldalsáv frekvenciák alacsony szinten maradnak és a spektrumban nem jelenik meg a fogaskerék sajátfrekvenciájának amplitúdója. A teljes analízis végrehajtásához lehetőleg a maximális üzemi terhelésen végrehajtott vizsgálat szükséges. A fogazat kenőanyag hiány miatt létrejött túlterhelésére utaló rezgésspektrumot a 3.33. ábrán mutatom be.

Fogaskerekek szöghibája

Amikor egy fogaskerék hajtást szöghibával gyártanak le, vagy építenek be, akkor a 3.32.E.ábra szerinti jellegzetes spektrumképet tapasztalhatjuk. A fogaskerék szöghiba majdnem mindig a 2x-es forgási frekvenciát gerjeszti, vagy magas GMF harmonikusokat idéz elő a fogaskerék fordulatszámának megfelelő oldalsáv frekvenciákkal. Gyakori eset, hogy az 1x-es GMF frekvencián csak egy alacsony amplitúdót láthatunk, azonban igen magas rezgésamplitúdók keletkeznek a 2x-es, vagy a 3x-os GMF frekvenciákon. Ha fogaskerék szöghibára gyanakszunk, akkor a maximális mérési frekvencia értékét általában elegendő a 3x-os GMF frekvencia nagyságára választani. A 2x-es GMF frekvenciát körülvevő oldalsáv frekvenciák szöghiba esetén gyakran a fogaskerék forgási frekvenciájának 2x-esénél jelentkeznek. Megjegyzendő még, hogy a fogaskerék szöghibájának következtében a GMF frekvencia jobb és bal oldalán elhelyezkedő oldalsáv amplitúdók általában nem lesznek egyenlő nagyságúak. Ugyanilyen hibát okozhat az egyenlőtlen hordkép is.



3.32. ábra Fogaskerék hibák elvi spektrumképe [81]



3.33. ábra Fogaskerék hajtómű olajszivárgás miatt megnövekedett magas fogterhelésére utaló rezgés gyorsulás spektrum (DOW Hungary Kft. Balatonfüzfő)

Fogtörés

A részben letört, vagy kitört fog magas amplitúdót gerjeszt az 1x-es fogaskerék forgási frekvencián, de ez a meghibásodás csak az időtartományban történő vizsgálattal mutatható ki. A frekvencia tartományban a fogaskerék (fn) saját frekvenciája jelenik meg két oldalán a fordulatszámnak megfelelő oldalsáv frekvenciákkal. A legjobb érzékelési mód mégis az időjel felvétele, amely meghatározott (a törött fog periódusidejének megfelelő) időközönként jelentkező csúcsokkal kimutatja azt a jelenséget, amikor a kapcsolódó kerekek a törött fog helyén megpróbálnak kapcsolódni. Az ütközések között eltelt $\Delta = 1/n$ (1/RPM) periódus időből következtethetünk a meghibásodásra. Az időjelben kimutatható ütközési csúcs amplitúdók gyakran tízszer, húszszor magasabbak a frekvenciatartományban ugyanezen frekvenciánál található amplitúdóknál. A fogtörésre jellemző időjel a 3.32.F.ábrán látható.

III.2.10. Hidraulikus és aerodinamikus erőkből adódó problémák

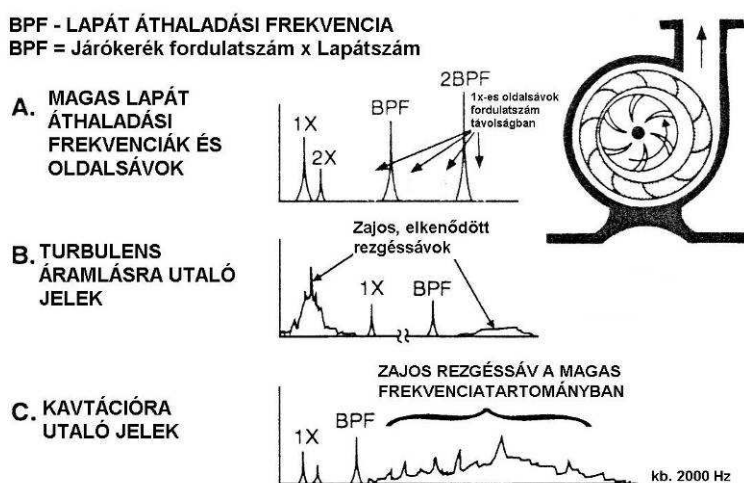
[95] [96] [S34]

A folyadékot, vagy gázokat szállító lapátos berendezések működéséből származó erőhatások a rezgésdiagnosztika segítségével szintén kimutathatók a rezgésspektrumban. Jellemző spektrumképeiket a 3.34. ábrán kísérhetjük figyelemmel. A **lapát áthaladási frekvencia** BPF³⁹ értékét a lapátszám és a fordulatszám (RPM) szorzataként számíthatjuk ki lásd 3.34.A.ábra. Ez a frekvencia szivattyúk, ventilátorok, kompresszorok működésére jellemző

³⁹ BPF - Blade Pass Frequency - Lapát áthaladási frekvencia

és jelenléte általában nem okoz különösebb problémát. Azonban a BPF frekvenciának (és harmonikusainak) magas amplitúdójából lehet következtetni arra a meghibásodásra, amikor a szivattyú járókereke és az állórész között körben nem azonos a légrés. Magas rezgések keletkeznek akkor is, ha a BPF frekvencia egybe esik a rendszer valamelyik sajátfrekvenciájával, ha a járókerék hegesztett kötése meghibásodik, a csővezetékben éles (nem megfelelő) kanyar van, ha valamilyen eltömődés, vagy helytelen fojtószelep beállítás megzavarja az áramlási viszonyokat, valamint abban az esetben is magas amplitúdó keletkezik a BPF frekvencián, ha a szivattyú, vagy ventilátor járókereke excentrikusan helyezkedik el a házban.[S34]

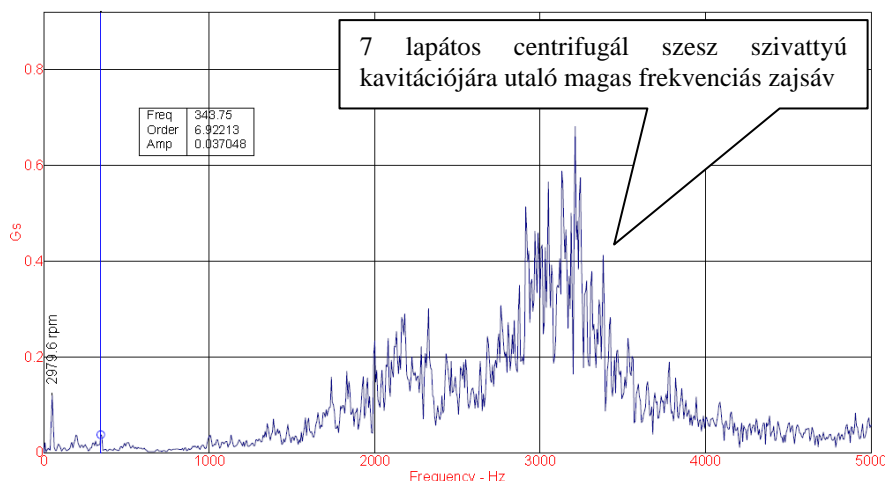
Turbulens áramlás szellőző berendezésekben a ventilátoron, vagy a hozzá kapcsolt csővezetéken átáramló levegő nyomásának, vagy sebességének megváltozása következtében jön létre.



Az áramlás akadozása okozza turbulenciát, amely szabálytalan alacsony frekvenciás rezgést okoz a 0.8 - 3.33 Hz frekvencia tartományban. Ha egy kompresszorban fordul elő, ilyen levegő hullámzás, akkor a szabálytalan

3.34. ábra Szivattyúk és ventilátorok elvi spektrumképei rezgéssáv a magasabb frekvencia tartományban jelentkeznek. Az igen nagymértékű turbulens áramlásra szintén a magasabb frekvenciákon keletkező szabálytalan rezgéssáv jellemző.

A **kavitáció** általában egy magas frekvencián jelentkező szabálytalan rezgéssávot hoz létre, amely



3.35. ábra Centrifugál szivattyú kavitációra utaló rezgésnyomás spektruma ráakad a BPF frekvencia harmonikusaira lásd. 3.34.C.ábra. Általában az elégtelen szívási nyomás, folyadékhiány miatt jön létre, jelenléte főként a járókerék lapátok eróziójához vezethet. Amikor egy berendezésben megjelenik a kavitáció, olyan hang (zaj) keletkezik, mintha

homok menne át a szivattyún. A kavitáció okozója lehet még a kis átmérőjű beáramló nyílás is, mert ez is folyadék „elégtelenséget” eredményez. A kavitáció a legtöbb esetben nem állandó hiba, létrejöhet azalatt az idő alatt amíg a mérést végezzük és megszűnhet a következő vizsgálatnál (ha pl. közben megváltoztatjuk a fojtószelep beállítást). Ipari gyakorlatomból a 3.35. ábrán mutatok be példát egy szeszszállító centrifugál szivattyú kavitációját, melyet a Györi Szeszgyár Zrt.-nél mértem. A kavitációs probléma gyakran fordul elő emberi hanyagság miatt (pl. nem nyitják ki teljesen a szívócső tolózárát), de sokszor szabályozott folyamatokban is jelentkezik, ahol automatika állítja a szelepeket a folyadék igénynek megfelelően.

III.2.11. Szíjhajtásból eredő rezgések

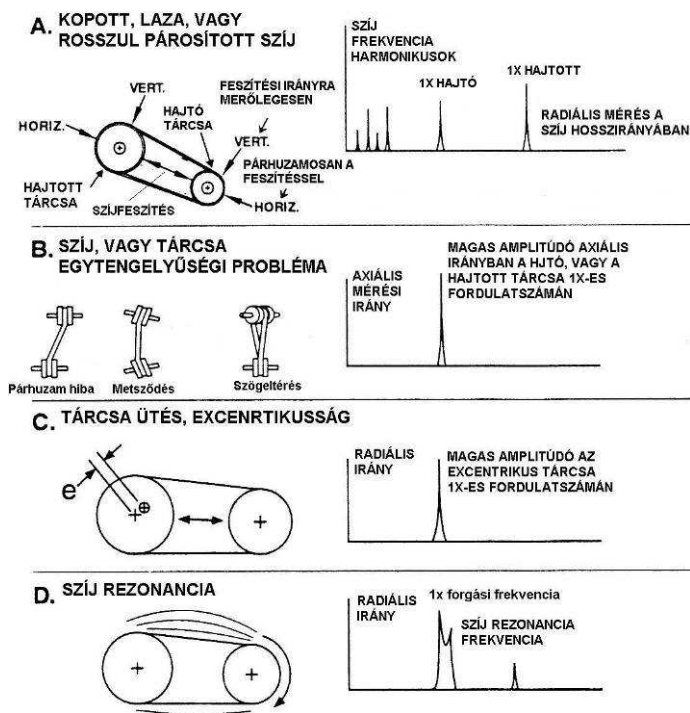
[97] [98]

A. Kopott, laza, vagy rosszul párosított szíjak

A különféle hajtásokra jellemző elméleti spektrumokat az 3.36.ábrán kísérhetjük figyelemmel. A szíjhajtásra jellemző frekvenciák a hajtó és hajtott gép forgási frekvenciája alatt helyezkednek el spektrumban. A hajtószíjak kopása, fellazulása, vagy rossz párosítás esetén általában az F_{SZ} (szíjfrekvencia) három-négy harmonikusa jön létre. Amint azt az 3.36.A.ábrán is megfigyelhetjük, gyakran a kétszeres szíjfrekvencia a domináns csúcs. Az amplitúdók általában ingadoznak, időnként lüktetnek a hajtó és hajtott fordulatszámánál. Fogazott szíjak kopása, vagy a szíjtárcsák szöghibája esetén a fogazott szíj frekvencián (F_{FGSZ}) keletkezik magas amplitúdó. Lánc hajtások esetén a problémák forrását a lánc áthaladási (F_L) frekvencián találhatjuk. A lánc, szíj és fogazott szíj hajtással kapcsolatos frekvenciákat a hajtás geometriai méreteiből és fordulatszámából kell kiszámolnunk, hogy az alacsony frekvencia tartományban lévő számos rezgésamplitúdó közül ki kell választanunk. A hibafrekvenciák kiszámításához szükséges képletek az alábbiakban láthatók.

B. Szíj és fogazott tárcsa szöghibák

A tárcsák szöghibája esetén a tárcsa $1x$ -es (forgási) frekvenciáján magas rezgésamplitúdó keletkezik axiális irányban, amint azt az 3.36.B.ábrán is látható. Az, hogy a magas amplitúdó a hajtó, vagy a hajtott tárcsa fordulatszámán jelentkezik, a mérés irányától a tárcsák tömegétől, illetve a vázszerkezet merevségétől függ. A tárcsák szöghibái magas axiális rezgést okoznak a motoron, vagy a hajtott gépen is. A szöghibát fázisszög méréssel tudjuk bizonyítani oly módon, hogy a hajtásban résztvevő tárcsák fordulatszámainak megfelelő frekvenciákon összehasonlíttuk az axiális mérések fázisszög értékeit.



3.36. ábra Szíj és lánchajtásokkal kapcsolatos hibák elvi spektrumképei

$$F_{SZ} = \frac{3,142 * n_{TH} * D_{TH}}{L_{SZ} * 60} \text{ [Hz]} \quad (3.4)$$

$$F_{FGSZ} = \frac{n_{FT} * Z_{FT}}{60} \text{ [Hz]} \quad (3.5)$$

$$F_L = \frac{n_{LK} * Z_{LK}}{60} \text{ [Hz]} \quad (3.6)$$

Ahol

F_{SZ} - ékszíjhajtás szíjfrekvenciája

F_{FGSZ} - fogazott szíj fogfrekvenciája

F_L - lánchajtás frekvenciája

n_{TH} - szíj hajtó tárcsa fordulatszám

n_{FT} - fogazott tárcsa fordulatszám

n_{LK} - lánchajtó tárcsa fordulatszám

D_{TH} - hajtó tárcsa átmérője

L_{SZ} - ékszíj hossz

Z_{FT} - fogazott tárcsa fogság

Z_{LK} - lánckerék fogság

C. Excentrikus szíjtárcsák

Amint azt a 3.36.C.ábrán láthatjuk a tárcsa ütés, vagy excentricitás a hibás tárcsa 1x-es (forgási) frekvenciáján fog magas rezgésamplitúdót okozni. Az amplitúdó normális esetben a szíjtárcsák középvonalán átmenő egyenes irányában lesz a legmagasabb, s ezt ki kell, hogy mutassuk a hajtó és a hajtott gép csapágyain is. Az excentricitás által okozott magas rezgésamplitúdó egyes esetekben kiegyensúlyozással csökkenthető úgy, hogy (amennyiben szerelt tárcsáról van szó) a leszorító csavarok alátéteinek tömegén változtatunk. A kiegyensúlyozással csökkenni fognak a rezgések, azonban a tárcsa excentricitása (mivel ez továbbra is megmarad) váltakozó feszültségeket kelt a hajtószíjban, ez a szíj idő előtti kifáradásához vezet. A tárcsa excentricitást fázisszög méréssel tudjuk bizonyítani azáltal, hogy a horizontális és vertikális irányú fázisszög különbségek nagysága 0° vagy 180° lesz.

D. Szíj rezonanciák

A hajtószíj rezonancia akkor okoz magas rezgésamplitúdót, ha a hajtószíj sajátfrekvenciája egybe esik, vagy megközelíti a gép tengelyének fordulatszámát. A szíj sajátfrekvenciájának változását a szíjfeszesség, a szíjhossz, vagy a szíj keresztmetszet változtatásával érhetjük el. A feszítés, vagy lazítás mértékét a szíjtárcsa, vagy a csapágyház elmozdulásából állapíthatjuk

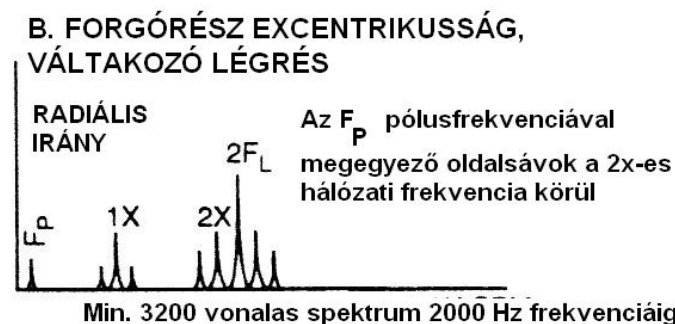
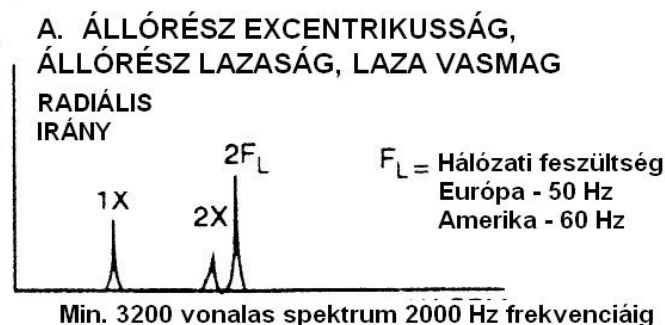
meg. Megjegyzendő még, hogy működés közben a húzott ágban sokkal magasabb saját frekvenciák jönnek létre, mint a szíj laza ágában. Lásd 3.36.D.ábrán.

III.2.12. Váltakozó áramú villamos motorok rezgései

A. Állórész excentrikusság, rövidzárlat, fellazult állórész, laza vasmag

[98] [99] [100]

Váltakozó áramú aszinkron motorok állórészével kapcsolatos meghibásodások a $2x$ -es hálózati frekvencián állítanak elő magas rezgéscsúcsokat. Az állórész excentricitása miatt állandó mértékű légrés változás lesz az álló és a forgórész között. A légrés nagyságának megengedett maximális eltérése aszinkron motorok esetében 5 %, szinkron gépek esetében 10 % lehet. Az állórész excentrikussága előállhat a puha láb jelenség, vagy a motor külső burkolatának hibája miatt is. Az állórész vasmagjának lazaságát az állórészt tartó szerkezeti elemek gyengesége, fellazulása okozza. Az



3.37. ábra Váltakozó áramú elektromotorok elektromos hibáinak elvi spektrumképei [81]

állórész lemezek rövidzárlata következtében az állórész helyi felmelegedése miatt torzul az állórész körkörös alakja, amely megint csak a légrés megváltozását okozza. Ezek a problémák jelentősen meg tudják emelni az említett frekvencián a rezgés amplitúdóját és egy állandó irányú légrés különbséget okoznak, melyet a 3.37. A ábra szemléltet.

B. Excentrikus forgórész

A forgórész excentrikusság következtében egy körbe forgó, folytonosan változó légrés jön létre az álló és forgórész között, amely (általában a $2x F_L$ hálózati és a forgási frekvencia $2x$ -es harmonikusa között) lüktető rezgést okoz. Gyakran ki kell nagyítanunk a spektrumnak ezt a részét, hogy szét tudjuk választani a $2x F_L$ és forgási frekvencia harmonikusát. Az excentrikus forgórész a $2x F_L$ frekvencia körül az F_p (pólus áthaladási) frekvenciával azonos oldalsáv frekvenciákat hoz létre, de ugyanilyen oldalsáv frekvenciák figyelhetők meg az $1x$ -es forgási frekvencia körül is. Amint az ábrából is látszik az F_p (pólus áthaladási frekvencia) egy viszonylag alacsony frekvencia, a szlíp frekvencia és a pólus-szám szorzataként jön létre. Értéke általában a 0.3 - 2 Hz tartományba esik, ezért fontos, hogy az ilyen hibára irányuló méréseinket a kb. 2000 Hz-es maximális frekvencia mellett min. 3200 vonalas felbon-

tással készítsük el. A „puha láb” jelenség és a tengely-beállítási hiba is okoz időnként váltakozó nagyságú légrést, de ez természetesen nem elektromos, hanem mechanikai jellegű probléma.

Az aszinkron motorok hibafrekvenciáinak beazonosításához szükségünk van a szinkron fordulatszám, illetve az un. pólus áthaladási frekvenciára, melyeket az alábbi összefüggésekkel tudunk meghatározni:

$$F_{SZN} = \frac{120 * F_L}{p} [\text{min}^{-1}], \text{ illetve } F_p = \frac{F_{SZ} * p}{60} [\text{Hz}] \text{ ahol,} \quad (3.7)$$

F_{SZN} – a forgó mágneses mező fordulatszáma, a szinkronfordulatszám

F_L - a hálózati frekvencia [1/s] –ban,

p - pólus szám

F_p – a pólus áthaladási frekvencia

A gyakorlatban előforduló és rezgésméréssel kimutatható hibaokok száma több százra tehető, én a legfontosabbakat foglaltam össze a disszertáció terjedelmére való tekintettel.

III.3. WIBROSHOW REZGÉSDIAGNOSZTIKAI PRÓBAPAD FEJLESZTÉSE

Az előző fejezetekből kiderült, hogy a gépek, igen sokféle képen hibásodhatnak meg, de látható az is, hogy diagnosztizálásuk a rezgésmérési módszerekkel megvalósítható.

A pontos hibadiagnózis végrehajtása érdekében azonban nem csak drága műszerekre, szoftverekre, hanem olyan magas szinten képzett szakemberekre is szükség van, akik ki tudják használni a korszerű eszközök képességeit és értelmezni tudják az általuk közölt információkat. A számítástechnika, az emberi szaktudást helyettesíteni próbáló szakértő rendszerek megkönnyítik a szakemberek munkáját, ezek kezeléséhez azonban szaktudás kell. Az általuk adott információkat csak az tudja értelmezni, akinek mérési és kiértékelési gyakorlata van.

Munkahelyemen az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Karán, ahol 20 éve tanítok, több évtizedes hagyománya van az állapotfüggő karbantartás és a műszaki diagnosztika oktatásának. Tizenöt éve rendszeresen részt veszek a KAJAOK⁴⁰ rendezvényein, így elmondhatom, hogy szinte az összes diagnosztikát oktató felsőoktatási intézmény laborjában jártam és volt lehetőségem megfigyelni az oktatási módszereket, segédeszközöket. Rendszeres szakértői tevékenységet végzek, ahol a gépek műszaki állapotára vonatkozó rezgésmérés, diagnosztikai szaktanácsadáson felül gyakran felmerül az igény az állapotfüggő karbantartással, diagnosztikával kapcsolatos tréningek iránt. Ezek a tréningek fontosak a vezetőknek, hogy megismerjék azokat a diagnosztikai lehetőségeket, melyek segítségével biztosítani tudják a gépek rendelkezésre állását és fontosak a konkrét karbantartási munkát végző szakembereknek is, akik értelmezni tudják a javasolt beavatkozások okát, vagy el tudják végezni az egyszerűbb gépbeállítási műveleteket. Ilyen ipari tréningekre 1993 óta eleinte az SKF meghívására, majd később önálló szervezésben több multinacionális cégnél is sor került, melyek során tapasztalatot szereztem és kialakult az oktatás tematikájával kapcsolatos igény is mind az ipar, mind az oktatás területén. Így szerzett tapasztalataim alapján elmondhatom, hogy a felsőoktatási intézményekben és az ipari gyakorlatban is komoly kihívást jelent, hogy az elsajátítandó ismeretanyag egyre növekszik, a gyakorlati oktatásra fordítható idő viszont egyre csökken. A mérnökképzésben és az ipari tréningeken is felmerül az igény, hogy a gyakorlati tudást gyorsan, hatékonyan és lehetőség szerint az elmélettel együtt lehessen átadni, melyet bemutató eszközökkel a valóságot hűen tükröző modellekkel lehet megoldani.

Az általam kifejlesztett és az Óbudai Egyetem Géptan laborjában készített WibroShoW nevű berendezés egy rezgésdiagnosztikai próbapad, amely segítségével a forgógépek üzemel-

⁴⁰ KAJAOK – Karbantartást Javítást Oktató Felsőoktatási Intézmények Országos Szövetsége. Alapítva 1995

tetése során előforduló, rezgésekkel kapcsolatba hozható tönkremeneteli módok és azok eredete bemutatható, modellezhető, elemezhető.

A WibroShoW demonstrációs eszközt speciálisan a diagnosztikával és állapotfüggő karbantartással kapcsolatos szaktudás oktatása érdekében készítettem. Az embert a világ megismerésének folyamatában mindig a közvetlen tapasztalat, majd az ebből eredő racionális okfejtés segítette és vitte előre az egyre bonyolultabb feladatok megoldásában. A régmúltban a legegyszerűbb mechanikai mozgások, a gravitáció, vagy az akár az embert körülvevő levegő nyomása, térfogata és hőmérséklete közötti összefüggések is misztikus, felfoghatatlan dolgok voltak. Minden tudósnak voltak azonban kísérleti berendezései, melyeken a vizsgált folyamatot akár többször is elő lehetett állítani. A WibroShoW tehát egy olyan anyagi modell, amely az oktatásban kiváló szemléltető eszköz, de alkalmas valóságos gépészeti folyamatok mélyebb vizsgálatára, magasabb szintű elemzésére is.

III.3.1. A WibroShoW rezgésdiagnosztikai próbapad létrejöttének előzményei



3.38. ábra Az U-500 rezgésdiagnosztikai próbapad (1993)

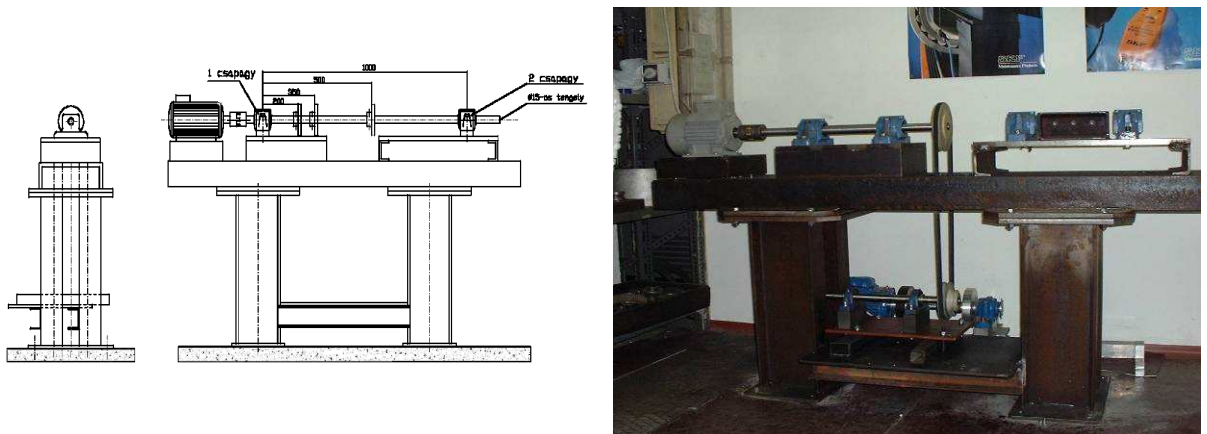
Az Óbudai Egyetem jogelődjében a Bánki Donát Műszaki Főiskolán több évtizede foglalkozunk az állapotfüggő karbantartás és a műszaki diagnosztika oktatásával. [S24] Oktatjuk mindazon elméleti és gyakorlati ismereteket, amelyek segítségével a gépek meghibásodásai üzem közben, akár teljes terhelés mellett kimutathatók és az alkatrészek idő előtti tönkremenetele megelőzhető. A legfontosabb műszaki di-

agnosztikai módszerek a rezgésdiagnosztika, a zajmérés, a thermográfia, az olajban lekopott részecskék vizsgálata, az ipari endoszkópia, valamint a korszerű gépbeállítási módszerek, a helyszíni kiegyensúlyozás, a lézeres tengely és szíjbeállítás, stb. Büszkén mondhatom, hogy mindezen módszerek és a hozzájuk tartozó műszerek az oktatásban bemutatásra kerülnek. El kell azonban mondani azt is, hogy a korszerű eszközök képességeinek bemutatásához feltétlenül szükségesek olyan berendezések is, amelyeken színvonalasan oktatni, tanulmányozni, elemezni lehet a különféle meghibásodásokat, tönkremeneteli módokat.

Erre a célra az évek során több megoldás is született. Az első ilyen szerkezet a 3.38. ábrán látható 90-es évek elején kollégámmal Dr. Kégl Tiborral közösen kifejlesztett U-500 fantá-

zianévre hallgató próbapadunk. A próbapad a kor színvonalának megfelelt, csapágyhibadiagnosztikát, egy- és kétsíkú helyszíni kiegyensúlyozást, lézeres tengelybeállítást és pálya-egyenesség mérést lehetett vele oktatni. Hordozhatósága révén sikerrel szerepelt, kiállításokon konferenciákon, segítségével például az SKF tanfolyamain, illetve az ország több egyetemén és főiskoláján tartottunk bemutató előadást. Hátránya, hogy ezt csupán bemutató eszközként lehet használni. Állandó fordulatszáma miatt a mérési eredmények nagymértékben függenek a felállítási helytől, sajnos a bemutatóhoz használt asztal határozza meg az aktuális rezgésjellemzőket.

A problémák kiküszöbölésére és mélyebb diagnosztikai vizsgálatok igénye által vezérelve 1996-ban terveztem és készítettem el a 3.39. ábrán látható U-1000 diagnosztikai próbapadot, amely (mint látható) olyan kísérletekre lett tervezve, amelyen valóságos gépészeti alkatrészeket lehetett vizsgálni. [S24] A próbapad tömege meghaladja a 300 kg-ot, frekvenciaváltós 1,1 kW teljesítményű motorjával meghajtva már ipari méretű akár 1:1 arányú alkatrész modellezésre is alkalmas. A berendezést a mai napig használjuk, az évek során számos ipari megrendelés, szakdolgozat és TDK munka készült el a segítségével.



3.39. ábra Az U-1000 próbapad szerkezeti felépítése "Laval tengely" (bal oldali kép), illetve csapágy kifáradás és ékszíj rezonancia vizsgálatokhoz (jobb oldali kép) felszerelve (2002)

A berendezés legnagyobb előnye, hogy valóságos méretű gépészeti rendszerek vizsgálatára alkalmas. Végeztünk már csapágy fárasztásos vizsgálatot többféle csapágytípusra, mértünk fogaskerék hajtóműveket, végeztünk tengely hajlító kritikus fordulatszám meghatározására szolgáló „Laval tengely” vizsgálatot, nem is beszélve a helyszíni kiegyensúlyozás, a tengelybeállítás, illetve a szíjrezonanciák vizsgálatáról. A próbapad rendkívül alkalmas hajtásláncok vizsgálatára és vázszerkezet vizsgálatokra. Számos rezonanciával, fellazulással, kiegyensúlyozással, tengely-beállítással kapcsolatos mozgás-animációs kísérletet hajtottam végre, melyekből az évek során sok tapasztalatot szereztem a különféle mechanikus és csapágyproblémák számítógépes szimulációjának témakörében is. [98 [S29]

A modell hátránya, hogy fixen telepített, nem mozdítható és minden kísérlet jelentős átépítéssel, új rögzítő és felfogató alkatrészek felszerelésével jár. Ez azt jelenti, hogy a már elkészült kísérleti összeállítást szét kell szerelni, amely sok esetben egész napos szerelési, beállítási munkát igényel. Az oktatás szempontjából nézve a próbapad kiváló lehetőséget adott a TDK és szakdolgozat kísérletek elvégzésére, azonban egy viszonylag kis területű laborban került telepítésre, amely korlátozza az órai bemutató méréseken résztvevők létszámát. Ipari tréningek körülményesen szervezhetők, a helyhiány és az átalakítás miatt.

III.3.2. A WibroShoW rezgésdiagnosztikai próbapad tervezési szempontjai

A mikroelektronika és a számítástechnika rohamos fejlődésével a műszaki diagnosztikai műszerek és szoftverek is jelentős változáson mentek keresztül. Az egyre korszerűbb műszerek az oktatási és kísérleti eszközpark fejlődését is igényelték, így született meg egy olyan kísérleti modellező és bemutató eszköz létrehozásának az igénye, amely rendelkezik az eddig elkészített próbapadok jó tulajdonságaival és egyben kiküszöböli hátrányait is. Nem utolsósorban szükség volt egy olyan modellre, amelyen a disszertációval kapcsolatos mérések elvégezhetők, a továbbiakban pedig hordozhatósága folytán a Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetemen, vagy igény esetén a Magyar Honvédség különféle alegységeinél képzési célokra elméleti és gyakorlati rezgésdiagnosztikai tréningekre is felhasználható.

Amint az előző fejezetben bemutatásra került, bizonyos tapasztalattal már rendelkezem a rezgésdiagnosztikai próbapadok tervezésének, elkészítésének és használatának területén, ezért a WibroShoW modellel szemben az alábbi követelményeket fogalmaztam meg:

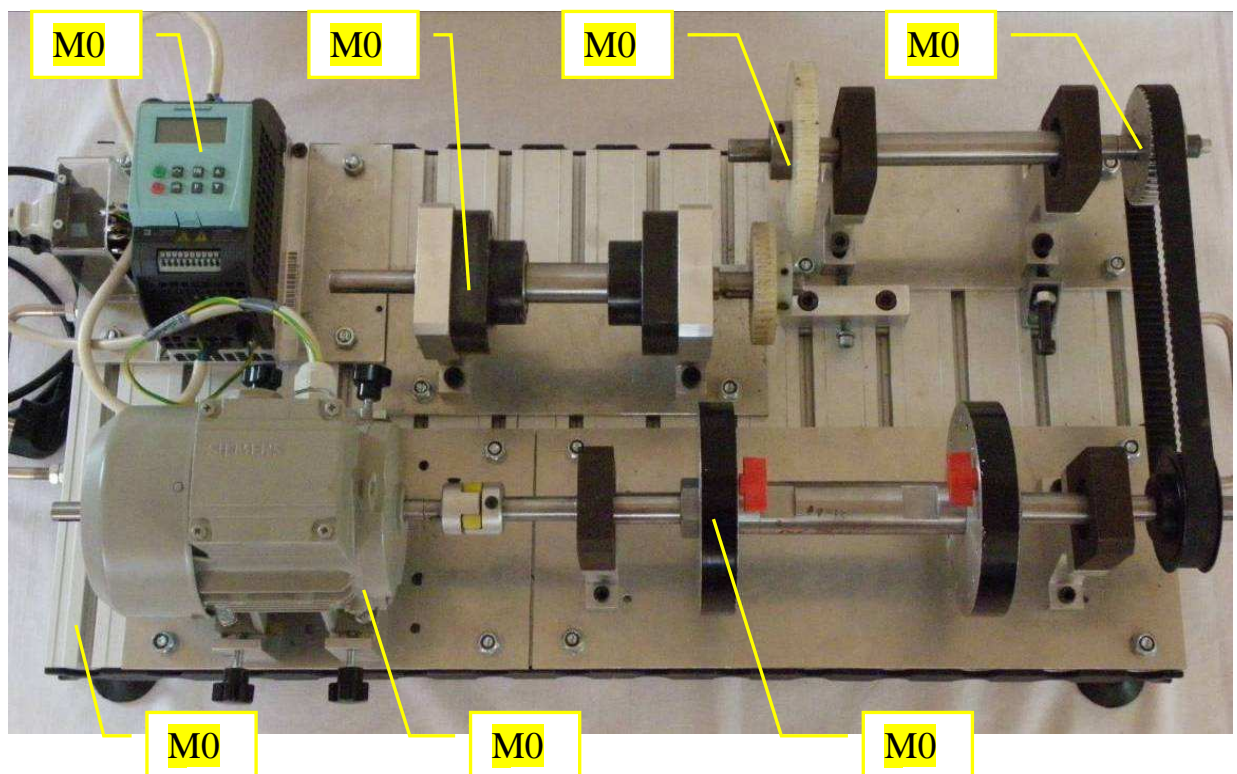
- alkalmas legyen kísérleti modellként és demonstrációs eszközként való használatra
- fontos a hordozhatóság, az optimális geometriai méret és tömeg, a merev alaplemez,
- rugalmas, lágy és merev alapozással is rendelkezzen
- legyen alkalmas sokféle rezgésdiagnosztikai kísérlet és bemutató elvégzésére,
- legyen alkalmas más műszaki diagnosztikai eszköz bemutatására is,
- könnyű szerelhetőség,
- könnyű és gyors átalakíthatóság a különféle kísérletekhez és bemutatókhoz,
- rugalmasan fejleszhető legyen, ne keljen szétfűzni egy-egy új kísérlet megvalósításához,
- a fordulatszám fokozatmentesen állítható legyen,
- szabályozható legyen a felfutás és kifutás időtartama
- legyen tartós, korrózió mentes és esztétikus kivitelű
- a kezelő és a megfigyelők számára is biztonságosan üzemeltethető legyen

III.3.3. A WibroShoW rezgésdiagnosztikai próbapad bemutatása

A vázolt szempontok figyelembe vételével egy állandó alaplemezzel rendelkező, modulokból felépíthető próbapad ötlete fogalmazódott meg. A méret és a tömegcsökkentés érdekében elsősorban alumínium alkatrészekben kellett gondolkodni, ennek azonban megfelelő merevséggel kell rendelkeznie a kísérletek során előforduló erőhatásokkal szemben.

III.3.3.1. A WibroShoW rezgésdiagnosztikai próbapad felépítése, kialakítása

A 3.40. ábrán a próbapad felépítése kísérhető figyelemmel. Amint az látható, a tömeg és méret optimalizálásának problémájára a megoldást egy kereskedelemben kapható hornyokkal ellátott FESTO alaplemez jelentette, amely alapvetően pneumatikus alkatrészek és mechatronikai elemek összeépítésére szolgál. Ez az alkatrész a lelke a szerkezetnek, mert erre lehet minden modult felszerelni. Az egyes modulokat egy-egy saját alumínium lemezre „modul felfogató lapra” szereljük fel. A modulokat az alap lemez hornyaiban speciálisan erre a célra kiválasztott csavarokkal, vagy horony anyákkal rögzítjük. Az így kialakított modul lemezek növelik az alaplemez merevségét és biztosítják a gyors modulcserét is. A következőkben a 3.40. ábrán látható alapkiépítés elemeit, funkcióit, legfontosabb jellemzőit tekintem át.



3.40. ábra A WibroShoW rezgésdiagnosztikai kísérleti pad, alapkiépítésű moduljaival.

III.3.3.2.A WibroShoW próbapad főbb műszaki adatai:

Méret: 700 mm x 350 mm x 300 mm

Horony osztás : 50 mm

Össztömeg : 15 – 25 kg (a kiépítéstől, modulszámtól függően)

Hajtómotorok típusa : Siemens 1LA7-060-2AA /Siemens 1LA7-063-2AA

Hajtómotorok teljesítménye: 180 W

Hajtómotorok fordulatszáma: 1350 /2860 1/min

Frekvenciaváltó típusa : Siemens Sinamics G110

Fordulatszám tartomány: 0 – 3000/6000 f/perc

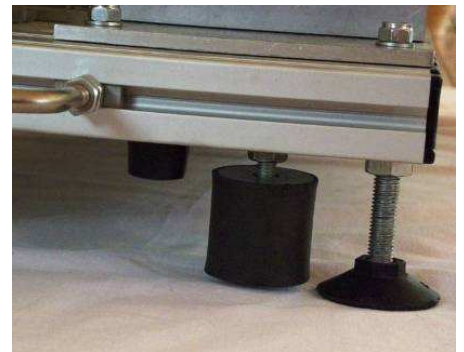
Alkalmazott egységes tengelyvég átmérő : Ø 14 mm

Alkalmazott csapágytípus: SKF 6202

III.3.3.3.A próbapad alapkiépítésének részei, ezek jellemzői, feladatai:

M01 – Alaplap modul: A modulrendszer kialakításában alapvető szerepet játszott a szerelhető hornyokkal ellátott esztétikus alaplap ötlete. A robottechnikában és pneumatikában alkalmazott FESTO oktatóablák kapcsán adódott a hornyolt szerelhető lemez ötlete, amelyre a modulrendszert fel lehet építeni. Gyakorlatilag ez az alaplemez volt az, amely a pad és a modulok további kialakítását meghatározta.

Ezzel a megoldással a próbapad új feladatra történő átépítése rendkívül egyszerű, mert az egyes modulok furatai a horonyosztásnak megfelelően vannak kialakítva, így a modul bárhová felszerelhető és a horonyban a kívánt helyre csúsztatható. Mivel az alaplap mindkét oldalán vannak hornyok, így a modell talajjal való érintkezésének módját (a csillapítási tényezőt) is könnyedén meg lehet változtatni, amely a rezgések jellegét látványosan módosítja. Amint azt a 3.41. ábrán is látható két különféle csillapítású és kialakítású rugalmas gumibakkal és egy merev lábbal lehet kísérletezni. Az alaplap legfontosabb funkciója, hogy lehetőséget teremt a modulok variálható konfigurációkban történő rögzítésére, valamint a rászertelt fülek segítségével biztosítja a pad hordozhatóságát.

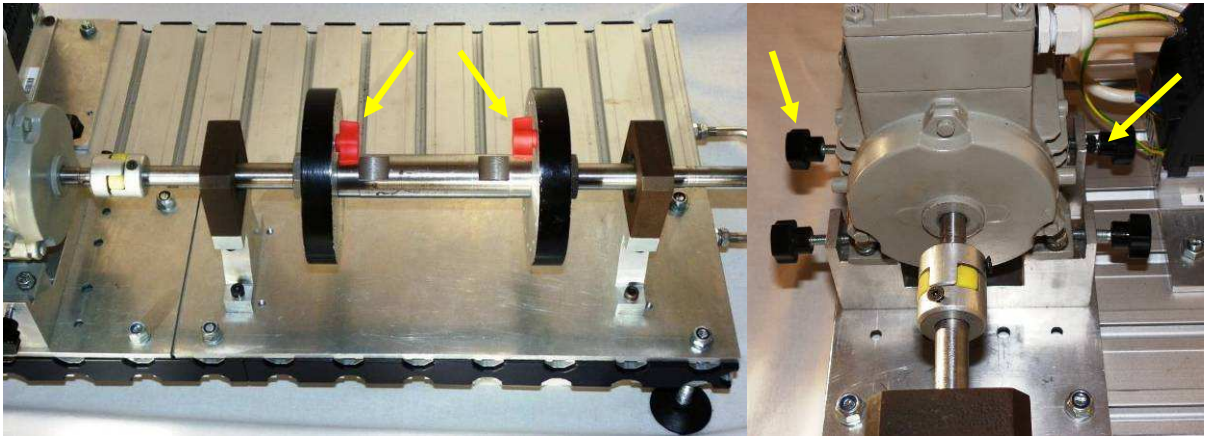


3.41. ábra Rugalmas és merev lábak beépítési lehetősége

M02 – Frekvenciaváltó modul: Tapasztalataim szerint fontos, hogy a hajtómotor fordulatszáma lehetőleg széles tartományban változtatható legyen. Ennek a célnak a megvalósítása-ként olyan frekvenciaváltót kellett keresni, amely együttműködik a motorral, a fokozat nélküli

fordulatszám változtatás mellett látható az aktuális hajtási frekvencia, kétirányú forgatásra képes, valamint szabályozható a felfutási és leállási időtartama. Ezekkel a paraméterekkel a Siemens Sinamics G110 típusa rendelkezik, a Siemens motorokkal kommunikál, ezért esett választásom erre a berendezésre, mely a próbapad többi részével tökéletesen együtt működik.

M03 – Motor modul: A Siemens 1LA7-063-2AA motorral ellátott modul elsődleges feladata a forgó mozgás fokozatmentes megvalósítása, de jelentős funkciója van a gépbeállítási műveletek megvalósításában is. A motortartó bakokat úgy alakítottam ki, hogy lehetőséget biztosítsanak a lézeres tengelybeállítás végrehajtására is. A motor tölti be ebben az esetben a mozgatott gép szerepét, ezt állítjuk hozzá a tengelybeállító modulhoz. A motor mindkét oldalon rendelkezik kihajtással, így ha szükséges egyszerre két kisebb modult is meg tud hajtani.



3.43. ábra A tengelybeállítás és helyszíni kiegyensúlyozás modul elrendezése

M04 – Tengely-beállítási és dinamikus kiegyensúlyozási modul

A tengely-beállítási és dinamikus kiegyensúlyozási modul az iparban legtöbb problémát jelentő és a III.2 fejezetben ismertetett tengely beállítási és dinamikus kiegyensúlyozási problémák bemutatására szolgál. A modul felépítése egy tengelykapcsolóból, tengelyből, két támasztó csapágyból, illetve két tengelyre rögzített tárcsából áll, lásd 3.43. ábra.

A két alapvető helyszíni rezgéscsökkentési módszert, úgy lehet bemutatni a próbapadon, hogy mind a pontos tengelybeállítást, mind pedig a kiegyensúlyozott állapotot egyszerű csavarozással „el lehet rontani”. A gépen ilyenkor veszélyes nagyságú rezgések jönnek létre, azaz produkálja a III.2 fejezetben bemutatott szimptomákat. A nem megfelelő állapotból a műszerek által javasolt beállítási utasításokat követve vissza lehet állítani a tökéletes beállítási értékeket, melynek hatására a rezgések ismét elfogadható rezgésszintet vesznek fel. A tengelybeállítási művelethez a motor modul használata is szükséges. A motor két oldalán (lásd 3.43. ábra jobb oldali képen nyíllal jelölt) csavarokat helyeztem el, amelyek a vízszintes

síkban megkönnyítik a beállítást, a függőleges síkban történő beállítás az ipari gyakorlatnak megfelelően alátét lemezek behelyezésével történik. Ezt a funkciót azért készítettem így, mert ez szemlélteti a valóságos "életszerű" tengely-beállítási lehetőségeket.

A tengely-beállítás művelete:

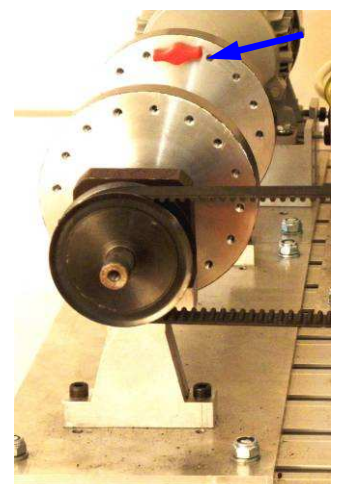
A tengelybeállítási műveletet napjaink korszerű lézeres tengelybeállító műszereihez terveztem. Intézetünk egy COMBI LASER típusú lézeres tengelybeállító készülékkel rendelkezik, így a felfogató kiegészítő alkatrészeket ehhez a műszerhez gyártottuk le, de természetesen más típusok is alkalmazhatók. A



3.44. ábra A COMBI LASER műszer felszerelése a próbapadra.

beállítás folyamatát itt részletesen nem ismertetem, mivel ezzel kapcsolatosan több olyan publikációt [S7] [S8] [S14] is írtam, melyek ezt megfelelő mélységben tárgyalják. A lézeres tengelybeállító felszerelését, a beállítás összeállítását a 3.44. ábrán láthatjuk. A képen nyíllal jelölt alkatrészt speciálisan a lézer adó-vevő felfogatására terveztem, mivel a kis átmérő és a szűk hely miatt ez nem volt megoldható a COMBI LASER alapfelszerelésével. Ilyen segéd alkatrészeket a gyakorlatban is használlok, amikor nincs elegendő hely a beállítandó gép és a tengelykapcsoló között.

A tengely-beállítási művelet előtt a motorrögzítő és beállító csavarok felszabadítása után vízszintesen eltoljuk 1-2 mm-rel a motort, majd közepes fordulatszámra (kb. 1500 1/min) minden mérési irányban rezgésmérést végzünk a csapágyakon. A mérések „overall” rezgésszintjét összehasonlítjuk az ISO 10816 szabvány I.-es géposztály ajánlásaival. A rezgésmérő műszer képernyőjén bemutatjuk a hibára utaló szimp-tómákat axiális és radiális rezgésmérési spektrumokat. Ezután felszereljük a motorra TD-M (mobil-gép) a tengelyre a TD-S (stabil-gép) lézer adó-vevőt, majd a műszerben megadjuk az alapadatokat. A műszer képernyőjén megjelenő párhuzamossági és szöghiba ismeretében a motor modul beállító csavarjaival a motort a tökéletes tengely-beállítási értékekig mozgatjuk. A motorcsavarok rögzítése után leszereljük a lézert, majd a motort megforgatva elvégezzük kontroll rezgésmérést, amelyen bemutathatjuk a veszélyes amplitúdók megszűnését.



3.45. ábra A kiegyensúlyozatlanságot okozó plusz tömeg.

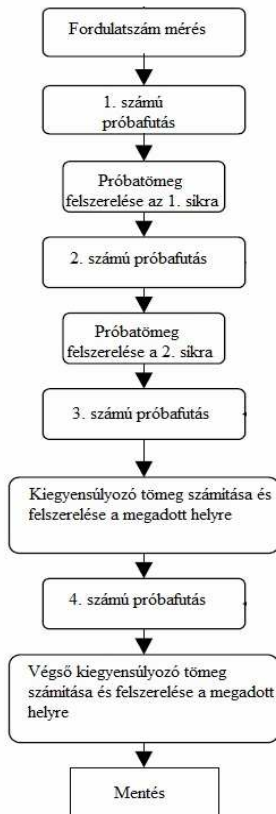
Helyszíni dinamikus kiegyensúlyozás:

A helyszíni kiegyensúlyozási rezgésnövelő műveletet a tengelyre szerelt 2 db tárcsa segítségével tudjuk elvégezni. A tárcsák közötti távolság 160 mm, tehát megfelel a 100 mm-nél szélesebb forgórész kritériumának. A két tárcsa, lásd. 3.45.ábra testesíti meg a kiegyensúlyozandó rotort, amelynek tömegelrendezését a menetes furatokba

csavart tömegek segítségével (nyíllal jelölt piros fejű csavar) mind a két síkban „el lehet rontani”.

A kiegyensúlyozatlanságot okozó csavarok segítségével minden típusú kiegyensúlyozatlanság előállítható, mivel mindkét tárcsán $22,5^\circ$ -os osztásban 16-16 db M5 menetes furat található. Ezáltal megvalósítható a statikus kiegyensúlyozatlanság, ha mindkét tárcsába ugyanazon orientációjú furatba azonos tömegeket csavarunk be. Amennyiben a két tárcsára felszerelt tömegek között 180° -os eltérés van, akkor tiszta nyomaték kiegyensúlyozatlanság állítható elő, ha pedig az egyikbe egy, a másikba mondjuk kettő csavart helyezünk el bármelyik furatba, akkor azonnal az általános dinamikus kiegyensúlyozatlansággal találjuk szemben magunkat.

A kiegyensúlyozás műveletéről szintén több cikkem [S9] [83] [84] [S21] [S35] jelent meg, így csak annyit kívánok elmondani, hogy a kiegyensúlyozatlanság bemutatását a forgórész tömegelrendezésének megváltoztatásával kezdjük. Mindkét csapágyon minden mérési irányban rezgésmérést végzünk és itt is összehasonlítjuk a mérési eredményeket az ISO 10816 szabvány I.-es géposztályra vonatkozó ajánlásaival. A rezgésmérést és a kiegyensúlyozást elvégezhetjük egyszerű rezgésösszeg mérő ceruzával is, ez hosszadalmas és bonyolult. A próbapadon történő egyensúlyozást látványosan egy kétcsatornás rezgésanalizátorral lehet bemutatni, amely mindkét csapágyon a rezgésekkel egy időben a fázisszögeket is méri. Erre a mérésre a tárcsákra ragasztott fényvisszaverő csíkok szolgálnak, melyek „trigger” jelként (indítójelként) szolgálnak a fordulatszám és a fázisszög mérésére alkalmas optikai fázisreferencia mérő részére. A kétcsatornás rezgésanalizátorok rendelkeznek kiegyensúlyozó algoritmussal, amelyre például a VMI EasyViber 64 rezgésanalizátorának algoritmusán keresztül a 3.46. ábrán kísérhetünk figyelemmel. A mérési folyamat során a próbatömeg 1-es és 2-es síkra való felszerelése után a műszer megadja a szükséges kiegyenlítő tömegek nagyságát és szöghelyzetét a „trigger” jeltől számítva a forgásiránnyal ellentétes irányban. Ezeket a megajánlott tömegeket mérlegben kimérve, majd fel-

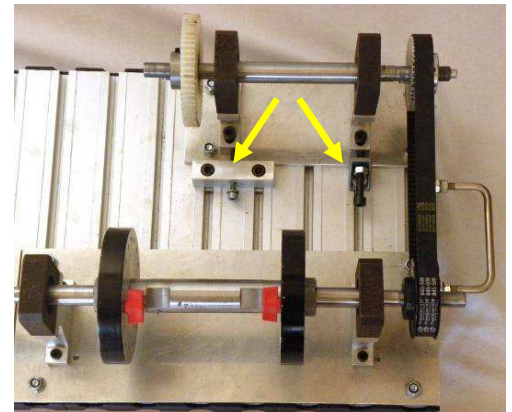


3.46. ábra Kétsíkú dinamikus kiegyensúlyozás algoritmus

szerelve a veszélyes rezgések lecsökkennek és a kontrollmérésekkel bemutatható a hibára utaló amplitúdók csökkenése a rezgésspektrumban. A bemutató igen látványos, mert az elrontott rotoron, illetve a próbapad alaplapján kézzel is érezhető a rezgésváltozás, sőt a hibára utaló „dübörgő zaj” csökkenése is. A lengések amplitúdója a lágyabb gumibakkal fokozható, bemutatható a merev és rugalmas alapozás rezgésszintjének különbsége a lábak cseréjével.

M05 – Ékszíz-, fogazott szíz-, és lánchajtás modul

Ez a modul egy alaplapra szerelt csapágyazott segédtegyel, melyet a 3.47. ábrán kísérelhetünk figyelemmel. A tegey meghajtása közvetlenül a motorról, vagy a kiegyensúlyozó modulról történhet, melyekre a hajtásoknak megfelelő tárcsákat szerelhetjük fel. A tárcsák furatátmérője illeszkedik a padon beépített egységes tegeyvég átmérőkhöz ($\varnothing 14$ mm) retesz horonnyal, illetve szorító hüvellyel viszik át a nyomatékot. A feszesség a nyíllal jelölt szíjfeszítők segítségével állítható be, attól függően, hogy milyen állapot rezgéképét kívánjuk bemutatni.



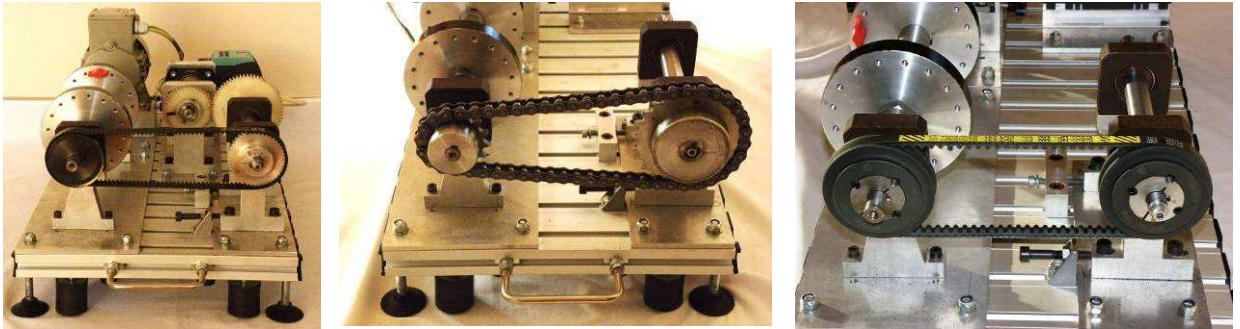
3.47. ábra A hajtás modul a feszítőkkel



3.48. ábra Szíz és lánchajtás készletek

A szíjfeszítők egyenlőtlen beállításával szöghibát, tegeyeken hosszirányban egymástól eltolt tárcsákkal a tárcsa párhuzamossági problémák megjelenését és rezgésekre gyakorolt hatását tudjuk demonstrálni. A hajtások többféle üzemállapotban történő vizsgálatára minden hajtástípusból készleteket állítottam össze (lásd 3.48.ábra), amelyek többféle szíjhosszúságú szíjakat, többféle áttételű tárcsákat tartalmaznak. A változatos hajtáslehetőségekkel, a többféle áttétellel, más forgásiránnyal, eltérő feszességgel és beállítási hibákkal készített rezgésspektrumok alapján olyan elemzések készíthetők, melyek akár az ipari gyakorlatban is felhasználhatók. Mivel ezek a hajtások már működési zajt is kibocsájtanak, valamint a fog és a szíz csúszása, súrlódása során hőfejlődés is bekövetkezhet, ezért már komplex diagnosztikai módszerek elvégzésére is lehetőség nyílik. Egy-egy beállítási hiba, működési probléma esetében tehát nem csak rezgésspektrumot lehet készíteni, hanem egyszerre zajdiagnosztikai, és/vagy termográfiai méréseket is lehet végezni. A rezgésspektrumok, a zajspektrumok és a „hőképek” összevetése, a különféle mérések összehasonlító elemzése rámutathat az egyes

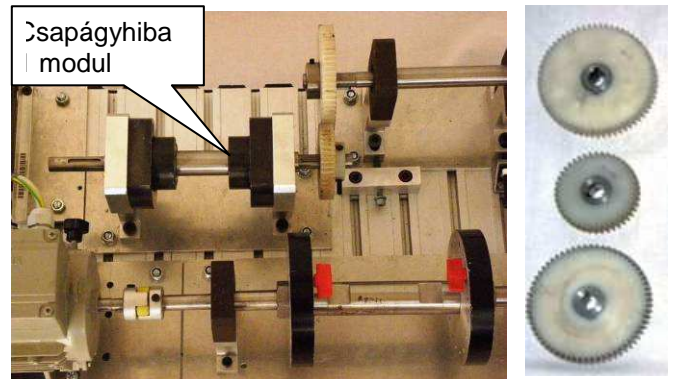
eljárások hibával szemben való érzékenységére és hiba előrejelző képességére. A különféle hajtások megvalósítását a 3.49. ábrán kísérhetjük figyelemmel.



3.49. ábra. A WibroShoW próbapadon megvalósított fogazott szíj, lánc és ékszíj hajtások

M06 – Fogaskerék hajtás modul :

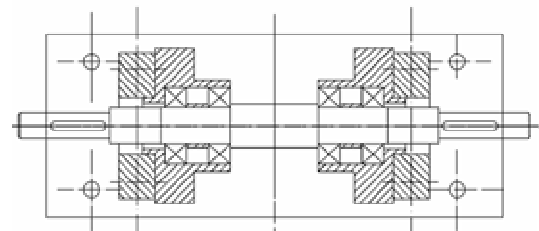
A fogaskerék hajtás egyik lehetséges elrendezését és a rendelkezésre álló fogaskerék készletet a 3.50. ábrán kísérhetjük figyelemmel. Az fogaskerekek az iparban már leselejtezett kopott műanyag (danamid) kerekek, melyek próbapadhoz illesztését acélperselyekkel oldottam meg. A fogaskerekek illeszkednek az egységes \varnothing 14 mm-es tengelyátmérőhöz, így bármelyik modul tengelyvégre felszerelve beépíthetők a hajtáslándba. A jelenleg rendelkezésre álló kerekekkel gyorsító, lassító és $i=1$ áttételre van lehetőség. A fogaskerekeken a fogkapcsolódási frekvenciák, a laza fogkapcsolat és a fogirány hibák is bemutatathatók, ha a szíjfesztítőt beépítve ferdén szereljük össze őket. Ez a modul szintén diagnosztizálható a komplex (rezgés, zaj és hő) diagnosztikai módszerekkel.



3.50. ábra A csapágyhiba és fogaskerék modul

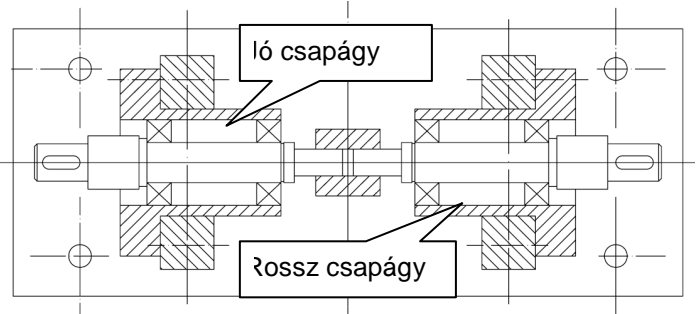
M07 – Hibás gördülőcsapágy modul

A gördülőcsapágyak hibáinak felismerése, amint már szoltam róla, azért alapvető fontosságú a rezgésdiagnosztikában, mert általában a csapágyazás meghibásodása felelős az összes tengelyre szerelt alkatrész tönkremeneteléért. A próbapad csapágyhiba modulja egyszerű felépítésű, a 3.50. és 3.51. ábrának



3.51. ábra A hibás gördülőcsapágy 1 modul metszete

megfelelően egy tengellyel két csapágyházat kötöttem össze, melyekbe 2-2 db 6203 típusú csapágyat építettem be. Mivel a csapágy tönkremenetel szimptomáinak megértése és mérési lehetőségeinek gyakorlása szintén nagy jelentőségű az oktatásban és az iparban egyaránt, ezért előre koptatott csapágyakat alkalmazok, így válik lehetővé a tönkrement csapágyak bemutatása. Tönkrement csapágy modulból kétféle megoldást is készítettem. A hibás gördülőcsapágy 2 modul a 3.52. ábrán kísérhető figyelemmel. Lényege, hogy a csapágyak rugalmas tengelykapcsolóval vannak összekötve, így az egyik csapágyházba jó a másikba rossz csapágyat szerelve a tengely kevésbé viszi át a csapágyhibát a jó csapágyra, ezáltal egy modulon lehet szemléltetni a két eltérő műszaki állapot különbségét.

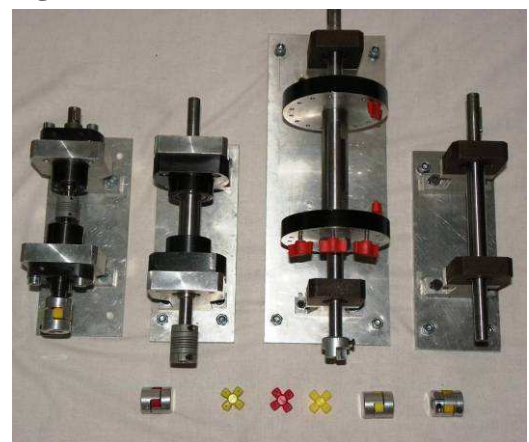


3.52. ábra A hibás gördülőcsapágy 2 modul metszete

A csapágy diagnosztika bemutatásánál fontos, hogy a II.3 fejezetben tárgyalt „Multi-paraméteres” vizsgálati módszernek megfelelően lehetőleg minden mérési módszert, valamint az egyes módszerek előrejelző képességét is be tudjuk mutatni. Ebben nagy segítségünkre van a frekvenciaváltó, amelynek segítségével elemezni lehet az alacsony fordulatszámon még megfelelő, de a fordulat növekedésével együtt növekvő csapágyhibára utaló jellegzetes spektrumképeket. Látványos vízszintes diagramokat lehet készíteni a fordulatszám növelésével együtt mozgó csapágy hibafrekvenciákról. A komplex diagnosztika, csapágyzaj, csapágymelegedés bemutatására ezek a modulok is alkalmasak, amely a pad univerzális tulajdonságait erősíti.

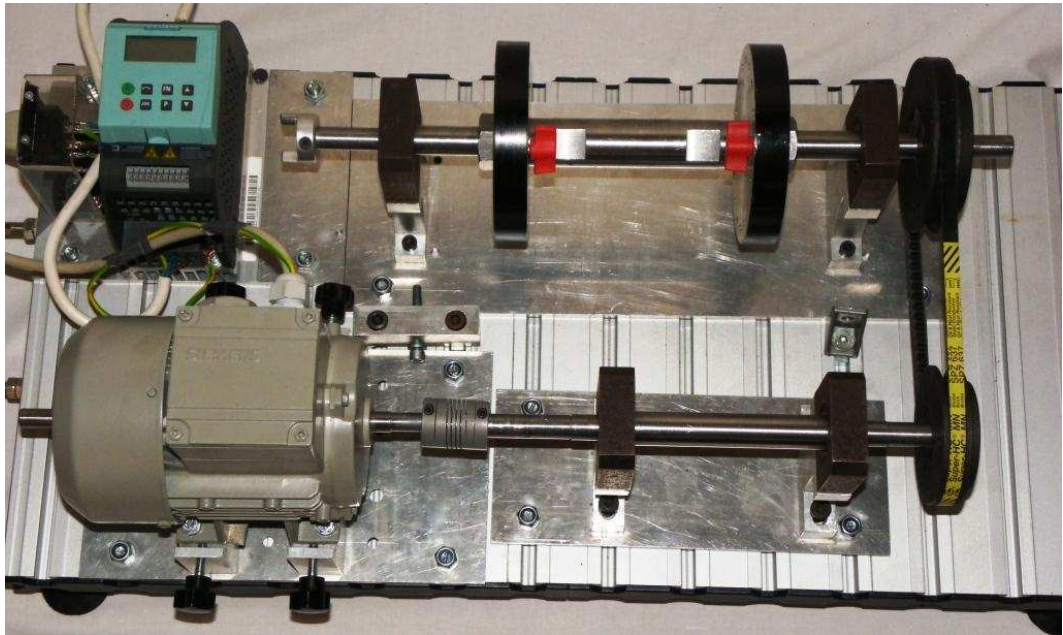
III.3.4. A WibroShoW próbapad variációs lehetőségei

Amint az eddigiekből is látható volt a próbapadon sokféle beállítási lehetőség kínálkozik a meghibásodások előállítására és rezgésdiagnosztikai vizsgálatára. Mivel egységes $\varnothing 14$ mm-es tengelyvég méreteket terveztem és a hajtóelemeket is egységes furattal láttam el, így az egyes szíj, lánc, fogaskerék hajtások felcserélhetők, illetve többféle hajtási sorrend állítható össze. Az alaplemez hornyaiba a 3.53. ábrán látható eddig elkészített modulok hosszában és keresztben is becsúsztathatók, ezáltal a különféle áttételű tárcsákkal, a

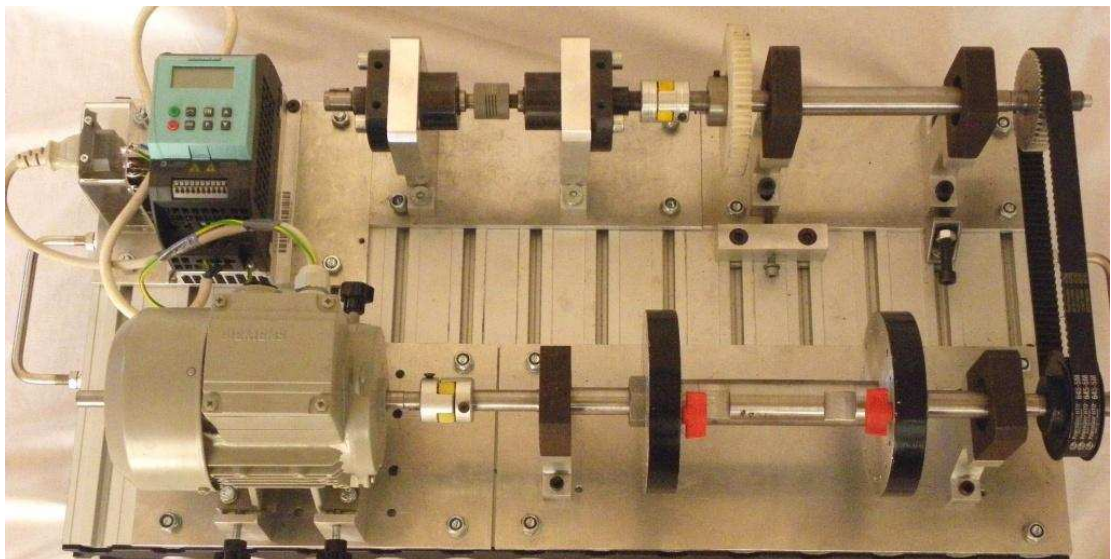


3.53. ábra Modulok és tengelykapcsolók

különbéféle méretű és típusú tengelykapcsolókkal, számtalan összekapcsolási lehetőség kínálkozik. Ezek a változatok egy-egy rezgésmérési spektrumelemzési lehetőséget rejtenek, amelyekkel a különböző hajtásláncok közötti rezgésszint különbségeket és rezgésspektrum változásokat ki lehet mutatni, elemezni lehet a változtatások rezgésspektrumra gyakorolt hatását. A hallgatók mérés közben nem csak a rezgésdiagnostikával találkozhatnak, hanem működés közben láthatnak mechatronikai hajtásláncokat, amely általános műszaki intelligenciájukat is növeli. A 3.54. és 3.55. ábrák a próbapad variációs lehetőségeire mutatnak példát.



3.54. ábra Szíjhibák és kiegyensúlyozatlanság hatásának együttes vizsgálata



3.55. ábra Hajtáslánc a gördülőcsapágy 2 modul beépítésével

III.3.5. A WibroShoW próbapad előnyei, felhasználási lehetőségei:

A fejlesztés eredményeként olyan készülék született, mely egyértelműen lehetővé teszi a hordozhatóságot, de a rendelkezésre álló helyet maximálisan kihasználja. Megfelel a variálhatóság és könnyű átszerelhetőség igényének, életszerű hajtáslánc kialakítások megvalósítását teszi lehetővé. Legfontosabb tulajdonsága, hogy a változtatható fordulatszámú hajtáshoz bármikor, újabb modul tervezhető és diagnosztizálható, csak az áthajtást kell megtervezni.

Gyakorlatilag egy soha véget nem érő fejlesztési potenciállal rendelkezik, mert az egyes modulokat külön-külön megtervezve és elkészítve máris egy teljesen új tulajdonságokkal rendelkező mérési összeállításra, kísérleti modellre tehetünk szert. A fejlesztésnek csak a fantázia szab határt. A jelenleg elvégezhető legfontosabb diagnosztikai vizsgálatok az alábbiak:

- jó és rossz csapágyak összehasonlító vizsgálata,
- tengelyek hajlító kritikus fordulatszámának vizsgálata,
- görbe tengely vizsgálata,
- kifutás és felfutás tranziens vizsgálatok,
- rezgéselnyelő talpak rezgéselnyelő képességének összehasonlító elemzése,
- fogaskerék hajtások rezgésmérése, (bolygómű és csigahajtás rezgés vizsgálatai),
- ékszív, fogazott szív és lánchajtások üzemelésének, beállítási hibáinak vizsgálata,
- vázszerkezet rezonanciavizsgálata szinuszosan gerjesztett rezgésekkel,
- mozgás-animációs vizsgálatok az összes előzőekben felsorolt hibákra,
- forgórészek egy és kétsíkú helyszíni kiegyensúlyozása,
- lézeres tengelybeállítás, lézeres szívbeállítás, stb.

A próbapad oktatói, felhasználói szempontból értékes tulajdonságai:

- a könnyű szerelhetőség miatt pillanatok alatt össze- és szétkapcsolható elemek segítségével hatásosan mutatható be az alkatrészek meghibásodása, rezgésekre gyakorolt hatása
- könnyen demonstrálható a jó és rossz állapot közötti különbség,
- a fordulatszám fokozatmentes változtatása lassú és gyorsfordulatú hajtások modellezésére, vagy akár rezonanciában való üzemelésre is alkalmassá teszi,
- a csillapítás változtatásával aktív és passzív rezgésmentesítési módszerek is bemutatathatók,
- a rezgésmérés mellett thermografikus hőmérséklet mérésre és zajmérésre is alkalmas, így nem kell másik eszközt fejleszteni ezek bemutatására
- bemutatathatók a gépbeállító módszerek (tengelybeállítás, szívbeállítás, kiegyensúlyozás) is,
- a próbapadon végzett kísérletek eredményei az ipari gyakorlatba is átültethetők

A közeljövőben tervezett, jelenleg fejlesztés alatt álló, további modulok:

- Fékező modul
- Laval- tengely modul
- Bolygómű modul
- Csigahajtómű modul
- Szinuszosan gerjesztett keretes vázszerkezet

III.3.6. A WibroShoW rezgésdiagnosztikai próbapad fejlesztésének összegzése

Az WibroShoW próbapad 2010-ben készült el, gyakorlatban történő felhasználása az Óbudai Egyetemen a Korszerű Diagnosztika, Műszaki diagnosztika és a Karbantartás tantárgyak oktatásában történik. A próbapad segítségével a hallgatók elméleti tudásukat kiegészíthetik gyakorlati tapasztalatokkal. Saját méréseket végezhetnek, kísérleteket hajthatnak végre, TDK és diplomamunka keretein belül. Testközelből tapasztalhatják, hogy egy mechatronikai rendszer rezgéseire milyen hatással van egy kiegyensúlyozatlan rotor, egy rosszul beállított tengelykapcsoló, vagy egy „pittinges” csapágy. Megtanulhatják, hogyan lehet a károsító hatásokat üzem közben a rezgésspektrumok segítségével megjeleníteni, illetve dokumentálni.

A próbapad nagy segítséget jelent az oktatóknak is, mert a modulrendszernek köszönhetően egy-egy gyakorlati órán akár többféle műszaki probléma bemutatására is sor kerülhet.

Szeretném még kiemelni, hogy az elkészült próbapad nem egyszerű oktatóeszköz, mivel láthatóan alkalmas különféle meghibásodások kísérleti elemzése által új információk megszerzésére is, amelyet a mesterképzésben is felhasználhatunk.

A próbapadra hordozhatósága jó kezelhetősége és kompakt kivitele miatt már rögtön elkészülte után jelentkezett ipari igény. Az SKF Svéd Golyóscsapágy Zrt. már árajánlatot kért a próbapad egy hasonló példányának legyártására, amelyet saját szervezésű tanfolyamain kíván alkalmazni. Szakmai körökben a 2010-es dunaújvárosi Magyar Karbantartási Konferencián történt bemutatása szintén komoly érdeklődést keltett az oktatási és ipari résztvevők körében.

El kell még mondanom, hogy a próbapad kifejlesztése több százezer forintba került, amelyhez az anyagi háttérrel ipari kapcsolataimon keresztül szintén önállóan szerveztem meg. A támogató cégektől kapott szakképzési hozzájárulások mind a műszerek, mind az alkatrészek beszerzésében komoly segítséget jelentettek a diagnosztika oktatásának területén. Bizom abban, hogy munkámmal hozzájárultam a rezgésdiagnosztika és a gépészmérnökök oktatásának magyarországi fejlődéséhez.

III.4. KÖVETKEZTETÉSEK

Saját mérési tapasztalataimat felhasználva meghatároztam a rezgésmérések gyakorlata során szükséges legfontosabb objektív és szubjektív gépadatokat, valamint mérési körülményeket. Ezek az adatok és megfigyelések csak hosszú gyakorlati idő, jelentős mérési tapasztalat alapján alakulnak ki, fontosságuk abban rejlik, hogy ezek segítik a gyakorlati szakembert a pontos diagnózis felállításában.

A gépek meghibásodásait a gyakorlatban a jellegzetes spektrumképek alapján lehet beazonosítani, amelyet minden jellegzetes géphiba esetében rezgésdiagnosztikai mérési tapasztalatom alapján alátámasztottam egy – egy hibára jellemző szakértői tevékenységem során mért rezgés spektrummal. Mérési gyakorlatom alapján minden egyes spektrumhoz egy – egy esettanulmányt is illeszthettem volna, de ezt a dolgozat terjedelme nem tette lehetővé. Az elméletben és gyakorlatban bemutatott spektrumképek alapján megállapíthatom, hogy a megfelelő műszerek és szoftverek alkalmazásával a géphibákra jellemző hibafrekvenciák mérhetőek és beazonosíthatók.

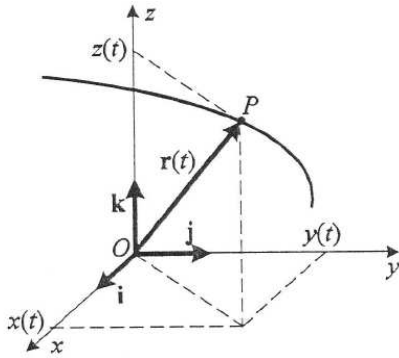
A disszertációt előkészítő kutatómunka eredményeképpen tanulmányoztam az oktatásban jelenleg alkalmazott módszereket, bemutató eszközöket, majd ennek eredményeképpen kifejlesztettem WibroShoW rezgésdiagnosztikai próbapadot. Ez egy olyan univerzális demonstrációs és kísérleti eszköz, amelynek segítségével a géphibák szemléltethetők a műszaki felsőoktatásban. A próbapad modulrendszerű kialakításának ötlete jelen pillanatban egyedülálló Magyarországon, mivel gyors átépítésre és folyamatos fejlesztésre ad lehetőséget. Egy-egy diagnosztikai problémát egy – egy újabb modulban összefoglalva, máris egy teljesen új tulajdonságokkal rendelkező mechatronikai rendszert kapunk, melyet a rezgésmérésen felül zajdiagnosztikai és thermográfiai elemzésekre is alkalmazhatunk.

A próbapad a tervezési szempontokban kialakított követelményeket maradéktalanul teljesítette, hordozhatósága és kompakt kivitele a 2010. szeptemberi dunaújvárosi Magyar Karbantartási Konferencián való bemutatása után a szakma széles körű érdeklődését váltotta ki. Külön elismerést jelent, hogy a diagnosztika alkalmazásával és oktatásával foglalkozó SKF Svéd Golyóscsapágy Zrt. árajánlatkérésével benyújtotta igényét a prototípussal egyező példány megvásárlására, melyet országos szintű rezgésdiagnosztikai tanfolyamaikon kívánnak a gyakorlati oktatásban felhasználni.

IV. FEJEZET A mozgás-animációs rezgésdiagnosztikai módszer és gyakorlati alkalmazása

IV.1. A mozgás-animáció elméleti alapjai

A testek, vagy egy jellemző pontjuk mozgásának leírására a mechanika által kidolgozott



4.1. ábra A P pont mozgását leíró koordináta rendszer [101]

mozgásfüggvényeket alkalmazzuk, melyek leggyakrabban Descartes koordináta rendszerben helyezhetők el. Az x, y, z koordináta rendszerben elhelyezkedő test tetszőleges egyenlőre még álló $P(x_P, y_P, z_P)$ pontjának helyzetét egy \mathbf{r} helyvektor segítségével adhatjuk meg, majd a koordináta tengelyek irányába mutató $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ egységvektorok segítségével létrehozhatjuk az $\mathbf{r} = x_P \mathbf{i} + y_P \mathbf{j} + z_P \mathbf{k}$ (4.1)

és a P pont kapcsolatát. Az \mathbf{r}_P vektorkoordinátái, az (x_P, y_P, z_P) számhármassal, egyértelműen kifejezi a pont térbeli

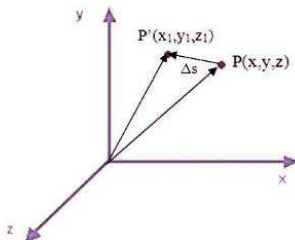
helyzetét. A vektor nagyságát a

$$r = |\mathbf{r}| = \sqrt{x_P^2 + y_P^2 + z_P^2} \quad (4.2)$$

összefüggéssel a vektor irányát pedig a vektor irány koszinuszaival számíthatjuk ki. Ha a P pont elmozdul például a test rezgő mozgása következtében, akkor ez azt jelenti, hogy a pont különböző időpillanatokban elfoglalt helyzetéhez különböző, időtől függő helyvektorok fognak tartozni, amely $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$ vektor-skalár függvénnyel leírja a pont mozgásfüggvényét. Ez a függvény minden t időpillanathoz egy olyan \mathbf{r} vektort rendel, amelynek végpontjában a mozgást végző P pontot találjuk. Ez az \mathbf{r} időtől függő vektor egyértékű, a vizsgált $t_0 \leq t \leq t_1$ időintervallumban folytonos és legalább kétszer deriválható, ezáltal képes a P pont által a vizsgált időtartam alatt 4.1 ábrán látható mozgáspálya leírására. A mozgáspálya tulajdonképpen egy geometriai alakzat, amely az

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(q) \quad (4.3)$$

általános koordináta felírással a q mint független változó szerepel az egyenletben. A q általános koordináta egy, a mozgással kapcsolatba hozható időtől függő mennyiség, amely lehet a megtett út, vagy a mozgás közben létrejött szögelfordulás is. A q értékének időbeni változását leíró $q = q(t)$ (4.4)



4.2. ábra A pont térbeli helyzetének változása

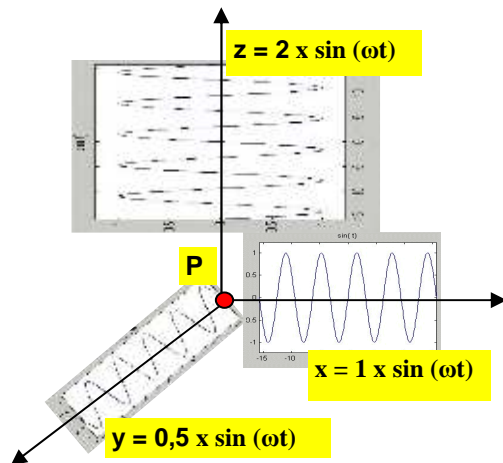
függvény ismeretében a mozgásfüggvényre felírható az

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(q(t)) \quad (4.5)$$

közvetett mozgásfüggvény, amely azt fejezi ki, hogy egy P pontból egy tetszőleges P' pontba való elmozduláskor a pont helyzete az időben a befutott mozgáspályától is függ. Egy

pont mozgása közben a pályagörbén megtett távolság tulajdonképpen a megtett úttal azonos, tehát a 4.1.ábra szerinti $r(t)$ függvény pályagörbén történő megváltozását a $s = s(t)$ (4.6)

út-idő függvénnyel fejezhetjük ki, a mely a mozgáspálya befutás függvénye. Egyszerűbben kifejezve a 4.2.ábrán látható $P(x,y,z)$ pont (amely lehet egy gyakorlatban mért gépen lévő pont is) elmozdulásakor x , y vagy z értéke változik meg, és a helye a mért kitérés (Δs) értékével



4.3. ábra A „P” pont térbeli szinuszos rezgőmozgása [S28]

vel mozdul el a $P'(x_1, y_1, z_1)$ helyzetbe. A periodikus rezgőmozgás alapegyenlete egy pont térbeli szinuszos mozgását a pont $s = A \sin(\omega t + \varphi)$ rezgés kiterés függvényével írja le.

A pont mozgásának meghatározásánál a problémát az jelenti, hogy a gép egy pontja gyakorlatilag a tér minden irányában szinuszos mozgást végez, amely azonos frekvenciájú, de a tér különböző irányokban más amplitúdóval rendelkezik, amint azt a 4.3.ábra is mutatja. Mivel a mozgás-animáció során egy géptestet, azaz több pont mozgását kívánjuk

egymással összehasonlítani (valamint együtt megjeleníteni), így magától értetődő, hogy a mozgások amplitúdójának figyelembe vétele nem elegendő információ egy összetett pont-halmaz, illetve egy gépszerkezet mozgásának reprezentálására.

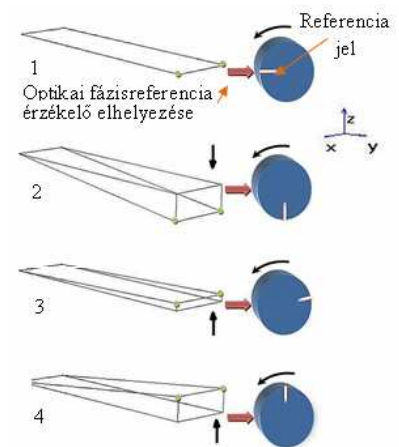
Tudjuk azonban, hogy a gépek valóságos rezgéseit leíró harmonikus függvény $s(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$ szerint a harmonikus rezgést nem csak az amplitúdója és periódus ideje, hanem a fáziszöge is jellemzi. Ezért, ha a pont egy adott időpillanatban elfoglalt helyzetét akarjuk meghatározni ismernünk kell a rezgő mozgás fáziszögét is. Ebből következik, hogy akkor tekinthetjük a pont kitérését minden mérési irányban meghatározottnak, ha olyan mérési összeállítást hozunk létre amellyel az adott pillanatra vonatkozó rezgés-amplitúdók mellett meg tudjuk határozni a rezgés adott pillanatra vonatkozó fáziszögét is. Ugyanez vonatkozik arra az esetre is, ha nem egy, hanem több pont mozgását kívánjuk egyszerre és egy időben megvizsgálni, vagy a pontok helyváltoztatását akarjuk egymással összehasonlítani. Meg kell azonban jegyeznem, hogy ez természetesen csak az $s(t)$ rezgés kiterés függvényben meghatározott ω szögsebességre, vagyis egy meghatározott rezgési frekvenciára vonatkozik.

A mozgás animációs vizsgálat alapelve tehát a mozgástörvényt használja fel egy adott gép pont elmozdulásának leírására. Kihhasználja a korszerű mérőműszerek azon jellemzőjét, hogy egyszerre képesek a rezgés amplitúdóját és fáziszögét mérni. A II.2.2. fejezetben leírtak (lásd

2.11.ábra) szerint a rezgés fázisszöge a rezgő mozgást végző pont pozíciója egy adott pillanatban, egy fix kezdőponthoz, vagy egy másik rezgőmozgást végző elemhez viszonyítva.

A működő gépen a gerjesztő erők általában a forgási frekvencián keletkeznek. A diagnosztikai mérések során is leginkább a gép forgásával kapcsolatos elmozdulásokról akarunk információt kapni, ezért a pont mozgásának megjelenítésekor lehetőleg a gép gerjesztett tengelyének, célszerűen a hajtó tengely a forgási frekvenciáját kell alapul vennünk. A valóságban ezt úgy biztosíthatjuk, hogy erre a kiválasztott tengelyre ragasztjuk fel a referencia jelet adó fényvisszaverő csíkot (trigger jelet), majd ehhez képest mérjük a gép kiválasztott pontjait.

A 4.4. ábrán a fázisszög és a rezgés kitérés együttes változását szemléltetem egy rezgőmozgást végző lemez példáján. [102] [103] Ez egy különleges állapot, hiszen a lemez csak egy irányába mutató függőleges rezgőmozgást végez. A gerjesztést adó forgórészt (behajtó tengelyt) a kék tárcsa testesíti meg, ezen helyezkedik el a referencia jel. Az ábrán megfigyelhető, hogy az 1-es számú mérés indítási pozícióban a kitérés és a fázisszög egyaránt 0 értéket vesznek fel, majd a forgásiránynak megfelelően a forgórész körmozgásával együtt a fázisszög 90° -os és 270° -os elfordulásaihoz a lemez lefelé, vagy felfelé történő negatív, vagy pozitív amplitúdónak megfelelő kitérése tartozik. Az egy időben mért rezgés és fázisszög között a műszer úgy teremti meg a kapcsolatot, hogy a referencia jel optikai fázisszög mérő előtt való elhaladása egy indító (trigger) jelet ad a műszernek, amely ettől a pillanattól kezdve több száz részre felosztva a teljes körülfordulás ideje alatt (a következő triggerjelig) méri az egyes pozíciókhoz tartozó rezgés amplitúdót a megadott frekvencián.



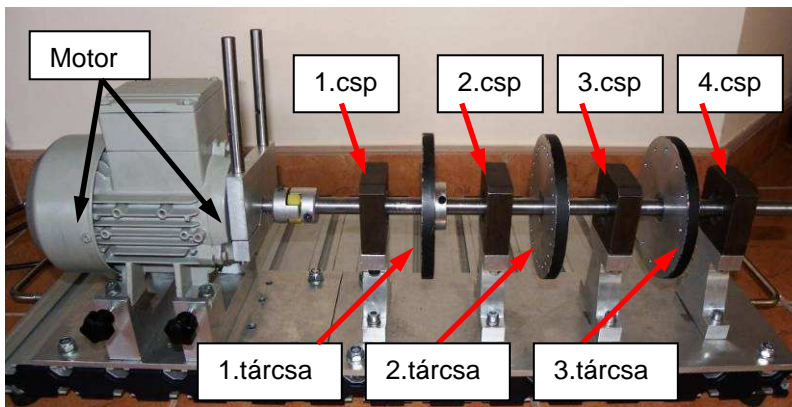
4.4. ábra A rezgés kitérés és fázisszög kapcsolata [S28]

Ha egy gép több pontjának mozgására vagyunk kíváncsiak és azt akarjuk, hogy az elmozdulások a valós képet mutassák, a vizsgált test fő pontjainak amplitúdóját, frekvenciáját, és egy vonatkoztatási ponthoz mért fázisszögét kell megmérnünk. Ehhez az összes mérést az optikai fázisreferencia-érzékelő jelével (fordulatonként egy impulzus) kell a fordulatszámmal és a fázisszöggel szinkronizálni (triggerelni). Ezután a műszer az érzékelt rezgésjelet feldolgozza, meghatározza a megadott frekvenciákon a rezgés amplitúdóját és fázisszögét.

Méréseink eredményeként ez esetben tehát az általunk kijelölt szerkezetileg fontos csomópontként három-három (mindegyik térbeli irányra vonatkozó) rezgés-amplitúdó érték és fázisadat áll rendelkezésünkre. Ezek az adatok együttesen írják le, hogy a vizsgált mérőpont a megadott frekvenciára nézve, milyen térbeli mozgást végez. [S28]

IV.2. A mozgás-animációs vizsgálati folyamat bemutatása a WibroShoW próbapadon

A gépek elmozdulásának megjelenítése régi vágya a diagnosztikai szakembereknek, hiszen egy berendezés látható elmozdulásai azonnal rámutatnak a gyenge pontokra, a nem megfelelő műszaki állapotra. A feladatot nehezíti, hogy a valóságos elmozdulások a legtöbb esetben olyan kicsik és olyan gyorsak, hogy azt az emberi szem nem képes feldolgozni. A mozgás-függvények elméletére alapozva a piacon több gyártó is van, akik az elektronika lehetőségeit kihasználva olyan műszereket forgalmaznak, melyek képesek egy, vagy esetleg több frekvencián a rezgés-amplitúdó és a fázisszög egyidejű mérésére. Korszerű számítástechnikai szoftverek segítségével pedig ezek valóságos a mérési adatok, a gép valóságos elmozdulását megtestesítő animációkban jeleníthetők meg. A módszer alkalmazhatóságának bizonyításaként



4.5. ábra A vizsgálathoz tervezett forgórész és a mérési helyek

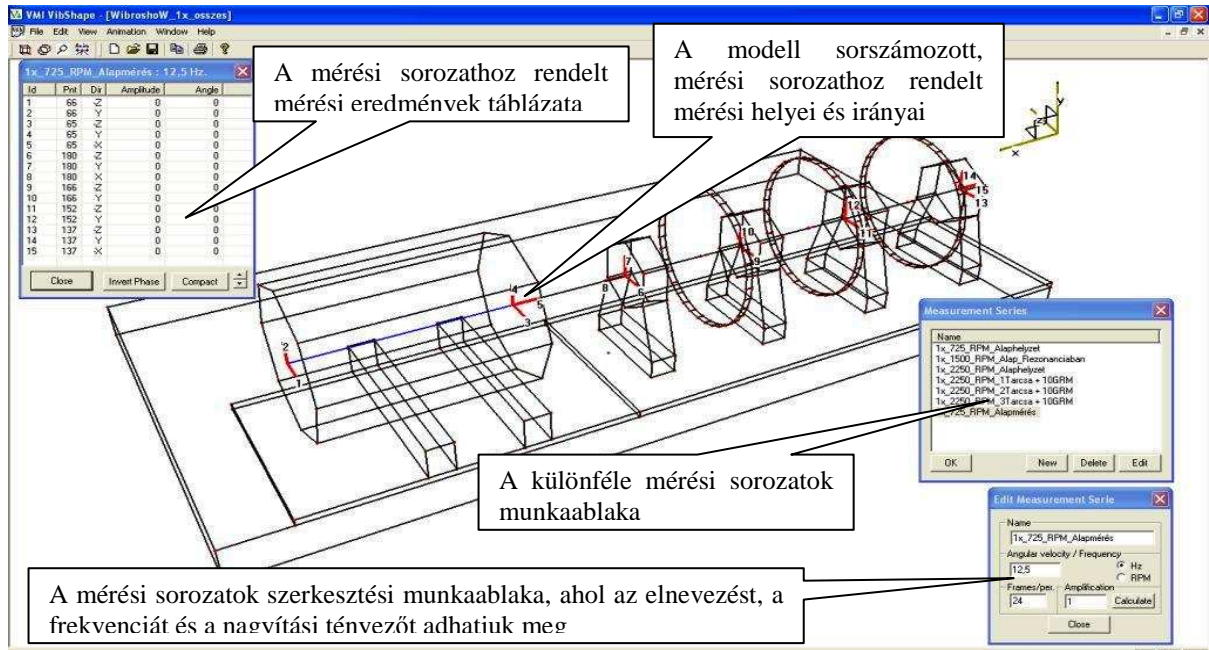
egy modellkísérletet mutatok be, melyhez a WibroSoW rezgésdiagnosztikai próbapadot használtam fel. A kísérlet végrehajtásához a 4.5. ábrán látható négy helyen csapágyazott három tárcsából álló forgórészt fejlesztettem, amelyen az egyes tárcsákon létre-

hozott kiegyensúlyozatlanság hatása mozgás-animációs módszerrel vizsgálható.

IV.2.1. A vizsgálat végrehajtásának menete a szoftver és műszer használata

A vizsgált modell mozgásának megjelenítéséhez speciális képességekkel rendelkező VMI (Sweden) Vibshape™ mozgás-animációs szoftverre és a mérési adatok rögzítésére alkalmas szintén VMI (Sweden) EasyViber64 rezgés-analizátorra van szükség. A mozgás-animáció készítésének folyamata során az alábbi lépéseket kell betartani: [102] [103]

1. Geometriai adatok felvétele, a gép mérési pontjainak kijelölése
2. Modellalkotás a geometriai arányok megtartásával a Vibshape™ szoftverben
3. Mérési pontok tervezése a berendezés pontjainak megfelelően
4. A mérési irányok tervezése
5. Mérés végrehajtása a mérési irányok sorrendjében EasyViber64 rezgésanalizátorral
6. A mérési adatok fordulatszámnak megfelelő visszatöltése a Vibshape™ szoftverbe
7. A modell mozgásának elemzése, a mérési eredmények kiértékelése, dokumentálása



4.6. ábra A kísérleti háromtárcsás modul modellje és mérési sorozatai a Vibshape szoftverben

IV.2.2. Modellalkotás és mérés tervezés [104][105]

A mérések elvégzéséhez tervezett modult saját kezűleg építettem össze, így a geometriai adatok ismeretében rögtön a modellkészítés következhetett, melynek eredménye a 4.6. ábrán a Vibshape™ szoftver képernyőjén látható. A szoftverben Descartes-koordináta rendszerben építhetjük fel téglatest és henger elemekből, valamint ezeket összekötő vonalakkból a valóságos berendezés egyszerűsített vázát. A modell készítésekor ügyelni kell a geometriai arányok betartására, valamint az egyes géprészek összekapcsolására, hiszen az elmozdulások majd ennek függvényében lesznek láthatók. Ezután a mérési helyeket és ezeken a mérési helyeken a valóságban is hozzáférhető és megmérhető mérési irányokat kell megtervezni, amely esetünkben ez a 4.6. ábrán látható módon a motor és a csapágyházak csapágyhelyein van. A tárcsa és a csapágy között az érzékelő elhelyezése veszélyes ezért a 2-es és 3-as csapágyakon csak vízszintes és függőleges irányokat adtam meg.

A sorrend tervezésénél arra ügyeltem, hogy a mérési irányok a „természetes” vízszintes, függőleges, axiális sorrendet kövessék a mérések végrehajtásának megkönnyítése érdekében. A mérési irányok mellett meg kell tervezni a mérési sorozatokat is, amelyek segítségével a szoftver egy mérési eredmény táblázatot rendel a sorozathoz a mérési pontokkal, irányokkal, valamint az ezekhez tartozó amplitúdó és fázisszög mérési eredményekkel. Ez a különféle üzemiállapotok és mérési fordulatszámok megkülönböztetése miatt szükséges.

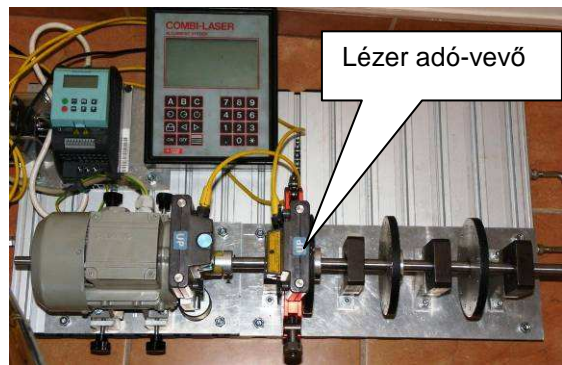
IV.2.3. A mozgás-animációs vizsgálathoz szükséges rezgésmérések elvégzése:

A mérési körülmények:

A mérés helyszíne: Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépészmérnöki Kar Géptan labor

A méréshez felhasznált műszerek és eszközök:

- A hajtómotor Siemens 1LA7-063-2AA P=180W, $n = 1350$ 1/min
- Frekvenciaváltó Siemens Sinamics G110, a motor max. fordulatszáma: 3000 1/min
- COMBI-LASER lézeres tengelybeállító,
- SKF CMSS 6455 stroboszkóp,
- VMI EasyViber64 rezgés-analizátor optikai fázisreferencia mérővel,
- Mérőóra ütés ellenőrzéshez 0,01 mm pontossággal,
- Hézagmérő és hézagoló alátétlemezek
- Mérleg 1 gr pontossággal

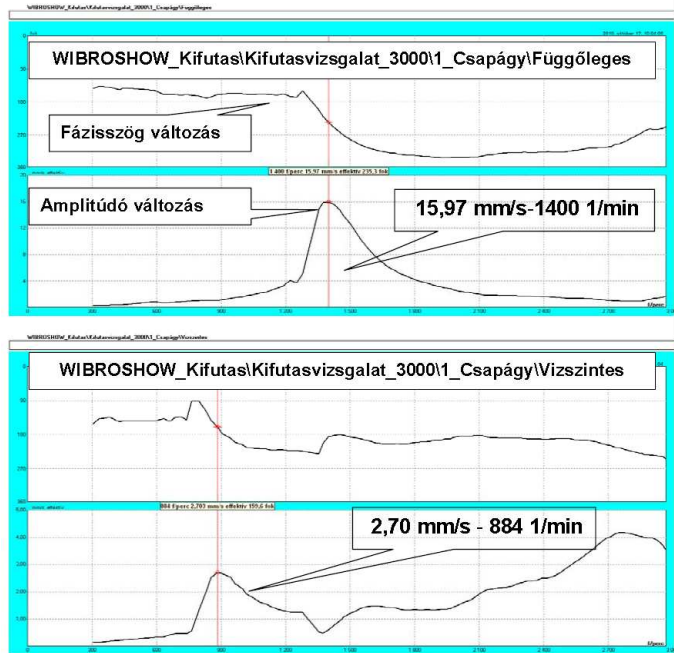


4.7. ábra Tengelybeállítás, rezgésmérés előtt

Az elkészült modell megtervezett mérési helyinek és irányainak birtokában el kell végezni az adott pontokon és irányokban az adatok felvételét. Esetemben a mérés előtt, a mérnöki precizitás érdekében először is biztosítani kellett a modul pontos tengelyvonalát, melyet a csapágy tartó bakok kihézagolásával oldottam meg. Ezen felül ellenőrizni kell a tengely és a tárcsák ütését, amely során kiderült, hogy sajnos mindhárom tárcsa ütése 0,1 és 0,15 mm között volt. Ez azt jelenti, hogy az excentrikus futás már eleve kiegyensúlyozatlanná teszi a forgórész működését, melyet a próbatömegek felhelyezésénél figyelembe kell venni. Ezt a ténytet kénytelen voltam elfogadni, mert a legyártott elemeken már változtatni nem állt módomban. A ütésellenőrzés után biztosítani kell a motor és a háromtárcsás modul közötti egytengelyűséget vízszintes és függőleges irányban egyaránt, melyet COMBI LASER tengely-beállítóval végeztem el 0,01 mm-es pontossággal. A tengely-beállítás a 4.7. ábrán látható.

A mérési fordulatszámok pontosítása érdekében ezek után a mérési összeállításban szereplő rendszer rezonancia frekvenciájának meghatározására van szükség. Ez két dolog miatt fontos. Egyrészt a rezonancia sávban rezgések veszélyes nagyságúra emelkedhetnek, ezért a próbapad védelme érdekében nem szabad pontosan ezen a fordulaton járni a berendezést. Másrészt a rezonanciához közeli fordulaton megváltozik a gép viselkedése így lehetőségünk nyílik a rezonanciás állapotok közben kialakult mozgások tanulmányozására.

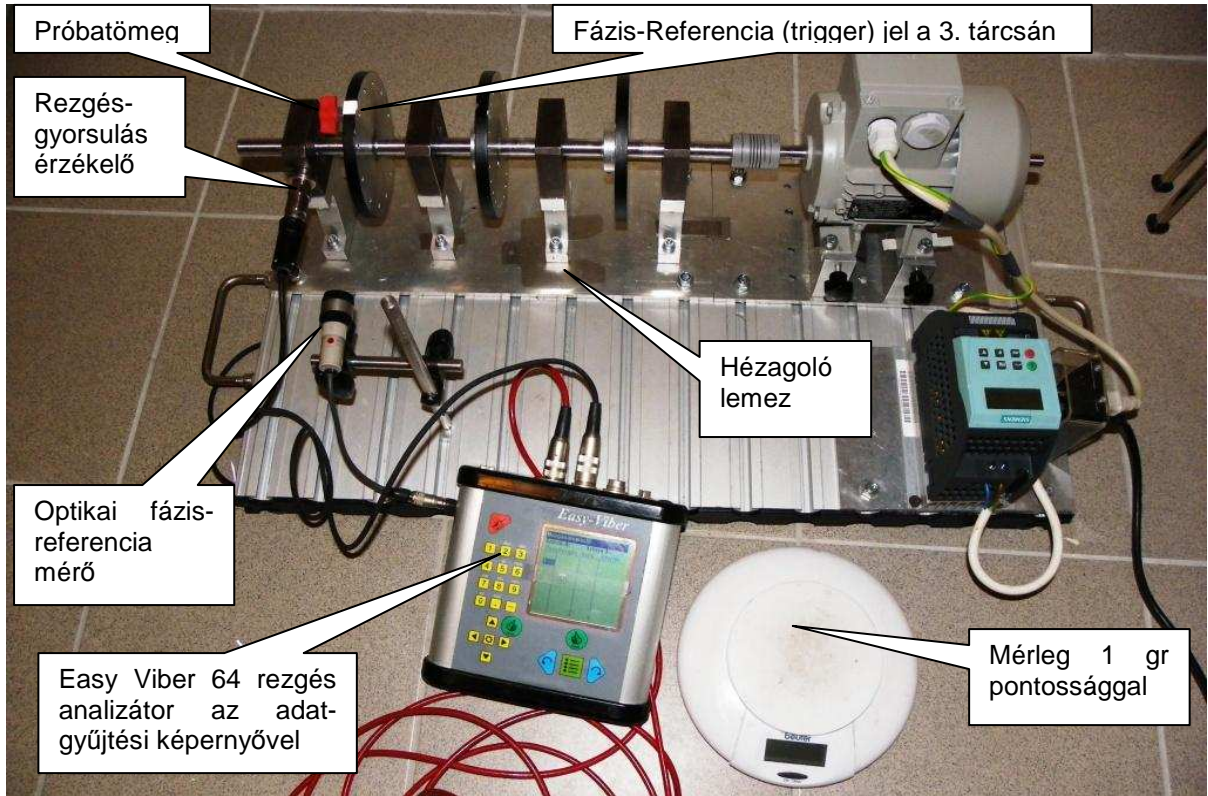
A tengelyek hajlító kritikus frekvenciája meghatározható számítással, illetve a helyszíni rezgésdiagnosztikai vizsgálatok közül a felfutás, a kifutás mérés, vagy a „kalapács ütés” teszt segítségével. Mivel az EasyViber64 műszer kifutás és felfutás mérési lehetőséggel rendelkezik, ezért nyilvánvalóan ezt (az egyébként legpontosabb) módszert alkalmaztam. A kifutás vizsgálati módszer elvégzéséhez egyébként ugyanaz a mérési összeállítás szükséges, mint a mozgás-animációs



4.8. ábra A kifutás vizsgálat mérési eredményei

vizsgálathoz, ezért ennek eredményei alapján határoztam meg a mozgás-animáció végleges mérési fordulatszámait. A kifutásvizsgálat végrehajtása úgy történik, hogy a motort a maximális fordulatszámra felpörgetjük, majd leállítva hagyjuk, hogy szabadon kifusson a rendszer. A leállás közben mérjük a rezgésebbesség effektív értékét a rezgésérzékelővel, valamint a fordulatszámot és a fázisszöget az optikai fázisreferencia mérő készülékkel. A műszer képernyőjén a pillanatnyi fordulatszám függvényében felül a fázisszög, alul a rezgés-amplitúdó változása látható. A rendszer rezonancia frekvenciája ott van, ahol a magas amplitúdó környezetében legalább 90°-os fázisszög változást tapasztalunk. Mivel a mérési összeállítás teljes egészében megegyezik a mozgás-animációval, ezért ezt is a 4.9. ábrán mutatom be.

A kifutás vizsgálat mérési eredményeit a VMI SpectraPro adatbázis kezelő és feldolgozó szoftver képes kezelni, amelybe visszatöltve a kifutás mérés eredményeit az 1-es csapágyon mérhető és 4.8. ábrán látható rezonancia görbéket kaptam vízszintes, illetve függőleges mérési irányban. A rezonancia frekvenciák vízszintes irányban **884 1/min** sajátfrekvencián **2,70 mm/s**, függőleges irányban **1400 1/min** sajátfrekvencián **15,97 mm/s** rezgésebbesség amplitúdó értékre adódtak. A mérés tervezésnél ezt úgy kellett figyelembe vennem, hogy egy mérést a sajátfrekvenciák alatt, egyet a sajátfrekvencia környezetében, egyet pedig felette terveztem az üzemállapotok és a rendszer mozgásainak jó megkülönböztethetősége érdekében. Mivel a műszer két frekvencia mérésére alkalmas, a méréseket az aktuális forgási frekvencia mellett a 2x-es forgási frekvenciára is megterveztem. A sajátfrekvenciák ismeretében pontosítottam a Vibshape™ szoftverben a mérési sorozatokat, illetve a megadtam a végleges mérési fordulatszámokat.



4.9. ábra A mozgás-animációs vizsgálat rezgés mérésének mérési összeállítása

A mozgás-animációs mérések során mindezek ismeretében az alábbi mérési sorozatokat alakítottam ki:

1. animációs mérés $n = 725 \text{ 1/min} = 12,5 \text{ Hz}$ fordulatszámon
2. animációs mérés $n = 1500 \text{ 1/min} = 25 \text{ Hz}$ fordulatszámon
3. animációs mérés $n = 2250 \text{ 1/min} = 37,5 \text{ Hz}$ fordulatszámon
4. animációs mérés $n = 2250 \text{ 1/min} = 37,5 \text{ Hz}$ fordulatszám az 1. tárcsában +10gr tömeggel
5. animációs mérés $n = 2250 \text{ 1/min} = 37,5 \text{ Hz}$ fordulatszám a 2. tárcsában +10gr tömeggel
6. animációs mérés $n = 2250 \text{ 1/min} = 37,5 \text{ Hz}$ fordulatszám a 3. tárcsában +10gr tömeggel

A tárcsák „elrontására” szolgáló minimális próbatömeget a kiegyensúlyozási eljárásoknál alkalmazott képlet alapján ellenőriztem, illetve becsültem meg: [S9] [S21]

$$q_{p,MIN} = \frac{v_{REF} \cdot m}{\omega r} [\text{gr}] = \frac{15,97 \text{ mm/s} \cdot 2600 \text{ gr}}{146,8031/\text{s} \cdot 50 \text{ mm}} = 5,65 [\text{gr}] \quad \text{ahol} \quad (4.7)$$

$q_{p,MIN}$ – a tárcsák „elrontására” szolgáló minimális próbatömeg

$v_{REF} = 15,97 [\text{mm/sec}]$ - a mért maximális rezgéssebesség a rezonancia fordulatszámon

$m = 2600 [\text{gr}]$ - a forgórész tömege (motorral együtt)

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n / 60 = 2 \cdot \pi \cdot 1400 / 60 = 146,803 [1/\text{s}]$ - a szögsebesség

$r = 50 [\text{mm}]$ - a próbatömeg felerősítési sugara

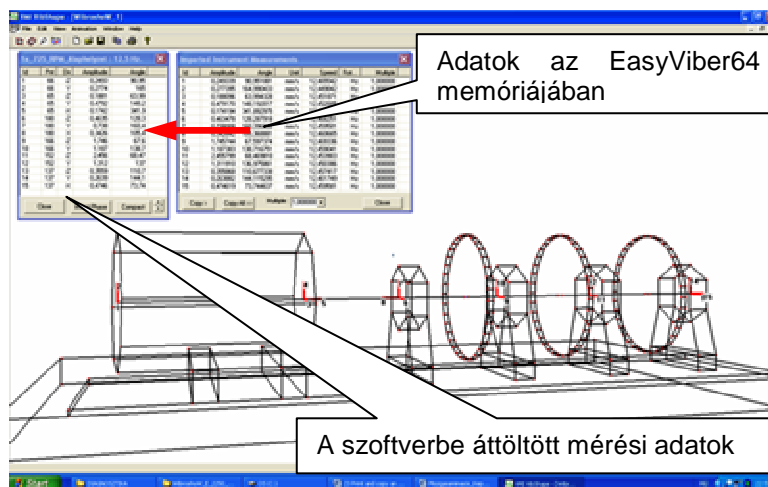
A próbatömeg becslésének alapvetően a minimális tömeg meghatározásában van jelentősége, mégpedig abban, hogy ennél kisebb tömeg esetén nem, vagy csak nehezen érzékelhető a tömeg által kifejtett centrifugális erőhatás, ezért a tárcsák 0,15 mm-es ütésének ismeretében, úgy döntöttem, hogy az így kiszámított próbatömeg kb. kétszeresét, azaz 10 gr tömeget alkalmazok.

Ezen előkészületek után már végre lehet hajtani a mozgás-animáció mérési, adatgyűjtési részét, melynek mérési összeállítását a 4.9. ábrán kísérhetjük figyelemmel. A mérés végrehajtása közben arra kell ügyelni, hogy minden mérési sorozatnál, minden mérési irány a szoftverben meghatározott sorrendben kerüljön rögzítésre. Az rossz irányban elhelyezett érzékelő fázisszög hibát és az animált modell teljes „szétesését eredményezi”. A méréseket tehát a tervezett módon, előbb próbatömegek nélkül, majd a 10 gr-os próbatömeget sorra átszerelve méréseket végeztem az egyenként kiegyensúlyozatlanná tett tárcsák esetében is.

IV.2.4. A mérési eredmények bemutatása és kiértékelése:

Mivel a vizsgálatokat annak érdekében végezzük, hogy bizonyítsuk, hogy a módszer alkalmas a gyakorlatban a forgó gépek műszaki állapotváltozásait követni, a kiértékelést az alábbi szempontok alapján kell elvégezni:

- Kimutatható-e fordulatszám változás műszaki állapotra gyakorolt hatása?
- Kimutatható-e a rezonancia mentes és a rezonanciában való üzemelés különbsége?
- Milyen változást okoz a tárcsák kiegyensúlyozatlanságának növelése?
- Alkalmas-e a módszer a műszaki állapotban bekövetkezett változások megjelenítésére, illetve az adott állapot alapján diagnózis felállítására?

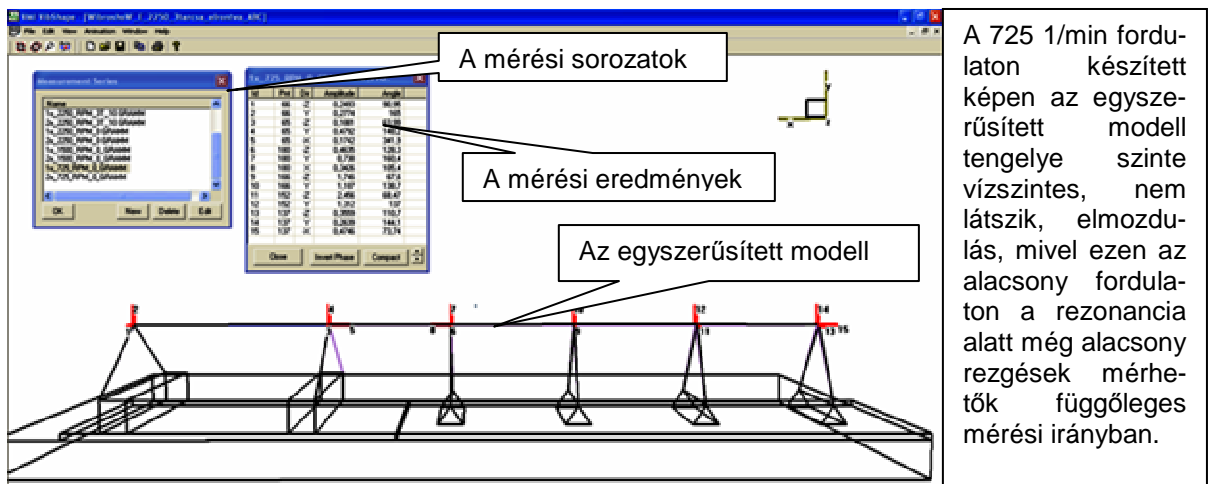


4.10. ábra Az adatátvitel folyamata

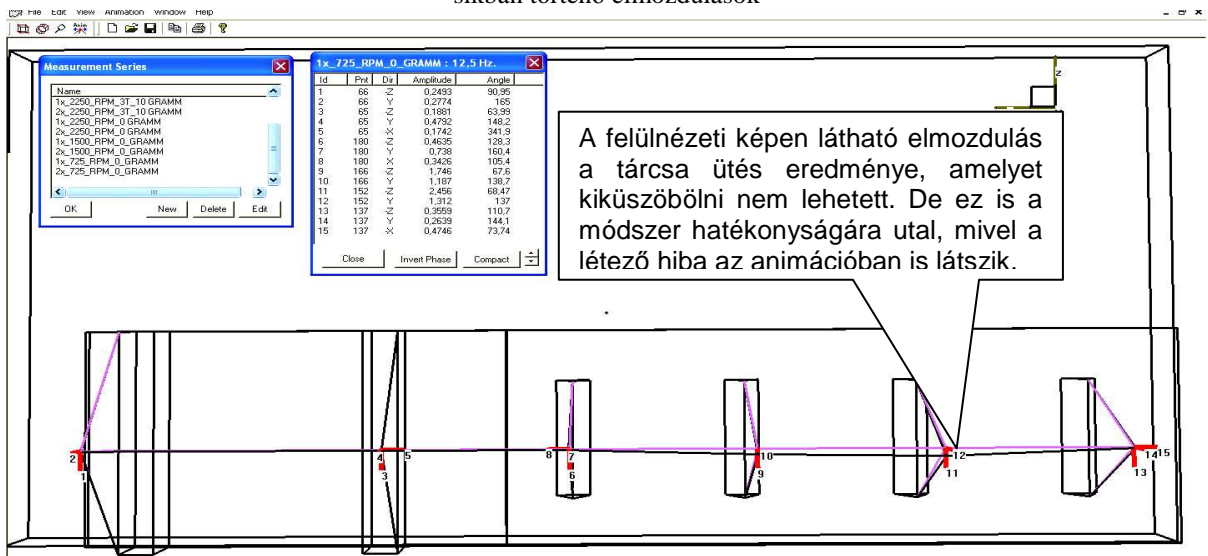
A kiértékelés előtt a rezgésanalizátorban tárolt adatokat RS 232 soros számítógépes adatátviteli kábelon keresztül visszatöltöttem a szoftverbe. Az áttöltés után, a 4.10. ábra képernyőjén látható a mért rezgés-amplitúdók és fázisszög értékek a szoftverben kialakított mérési pontokhoz adódnak.

A mérési eredmények bemutatása :

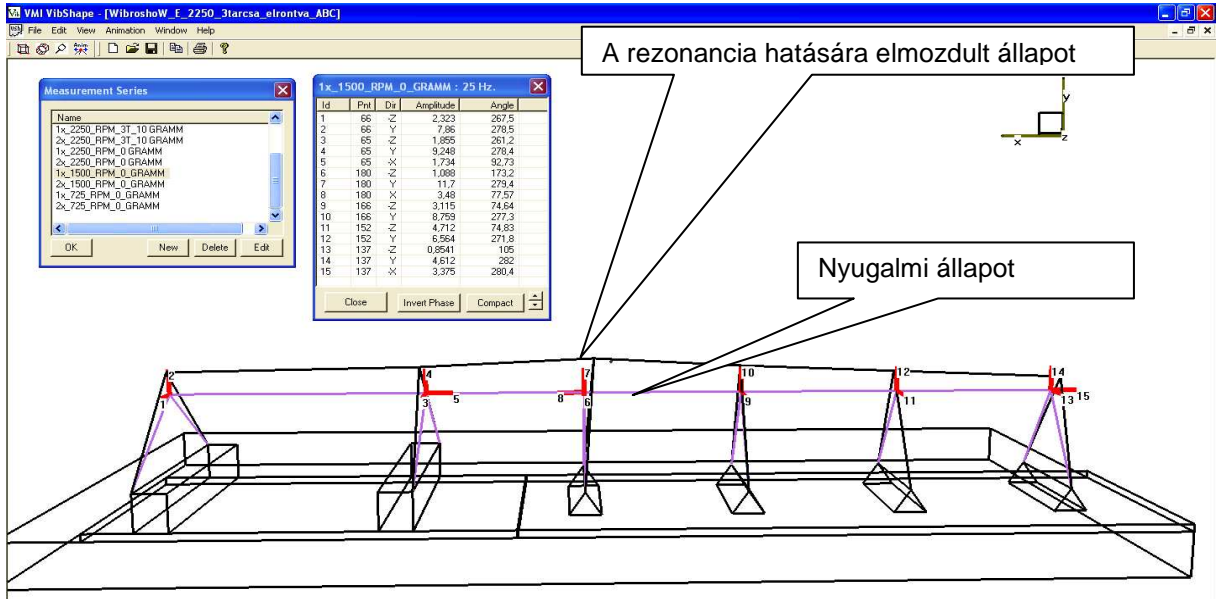
Mérési eredményként egy olyan 3 dimenziós mozgó animációt kapunk, melyet minden irányban körbeforgathatunk, kinagyíthatunk, tehát a gép egészét és a kisebb részleteket is tanulmányozhatjuk. Lehetőség rá, hogy a mozgást a szélső helyzetekben megállítsuk, így a kimerevített képen az eltérések még jobban láthatóvá válnak. A disszertáció kétdimenziós lapjain nehéz egy három dimenzióban mozgó objektum bemutatása, ezért az elvégzett hat mérési sorozatból egy-egy jellegzetes kimerevített képet mutatok be a kiértékelés alátámasztásaként. A kiértékeléshez egy egyszerűsített modellt készítettem, mivel nem a motor, a tárcsák, vagy csapágyházak körvonalára, hanem ezek mérési pontjainak elmozdulására vagyunk kíváncsiak. Az egyes képeken megtalálhatók a mérési sorozatok és a kimerevített képhez tartozó mérési eredmények táblázatai, melyeket a szoftver a képen látható animációhoz használt. A mérési eredményekkel kapcsolatos megállapításaimat a képek mellett kommentálom.



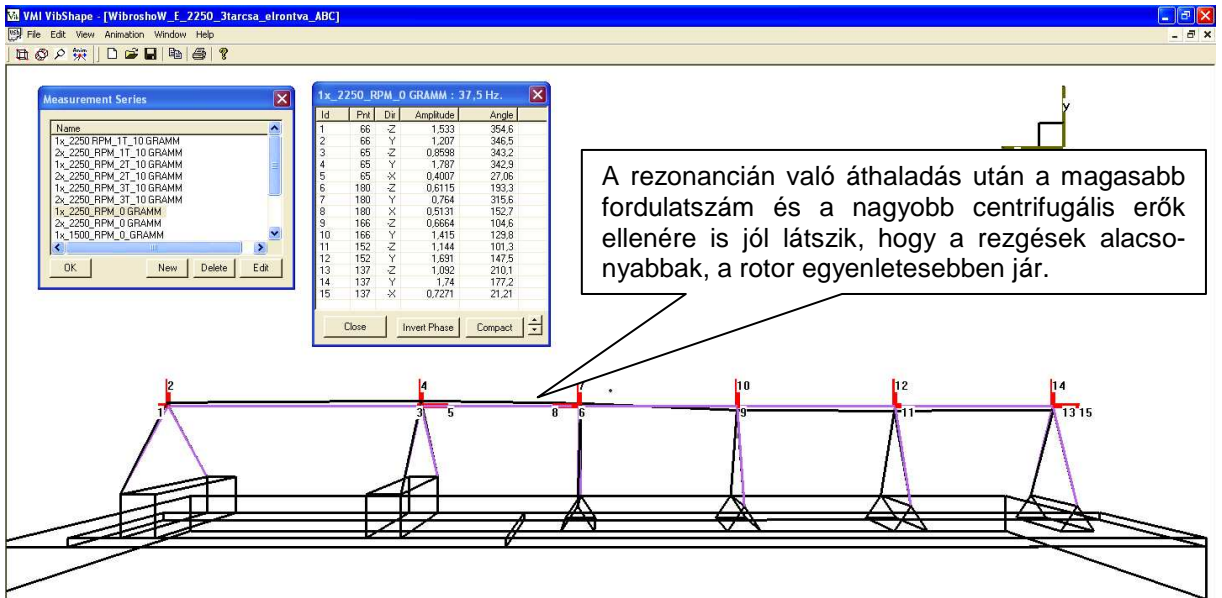
4.11. ábra Az 1. animációs mérési sorozat eredménye $n = 725 \text{ 1/min} = 12,5 \text{ Hz}$ fordulatszámra a függőleges síkban történő elmozdulások



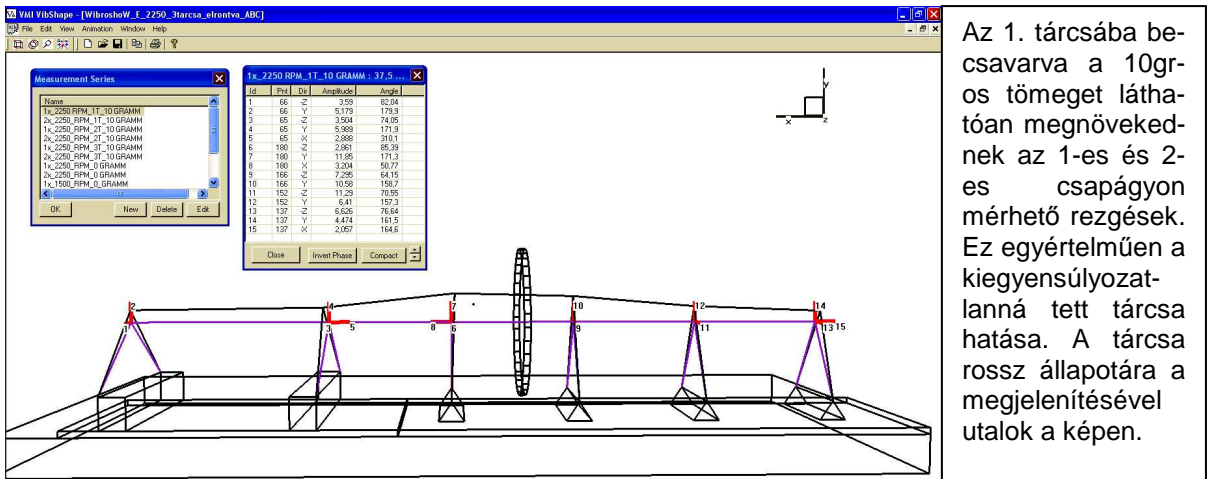
4.12. ábra Az 1. animációs mérési sorozat eredménye $n = 725 \text{ 1/min} = 12,5 \text{ Hz}$ fordulatszámra a vízszintes mozgások a felülnézeti képen már mutatják a 3-as-4-es csapágy elmozdulását



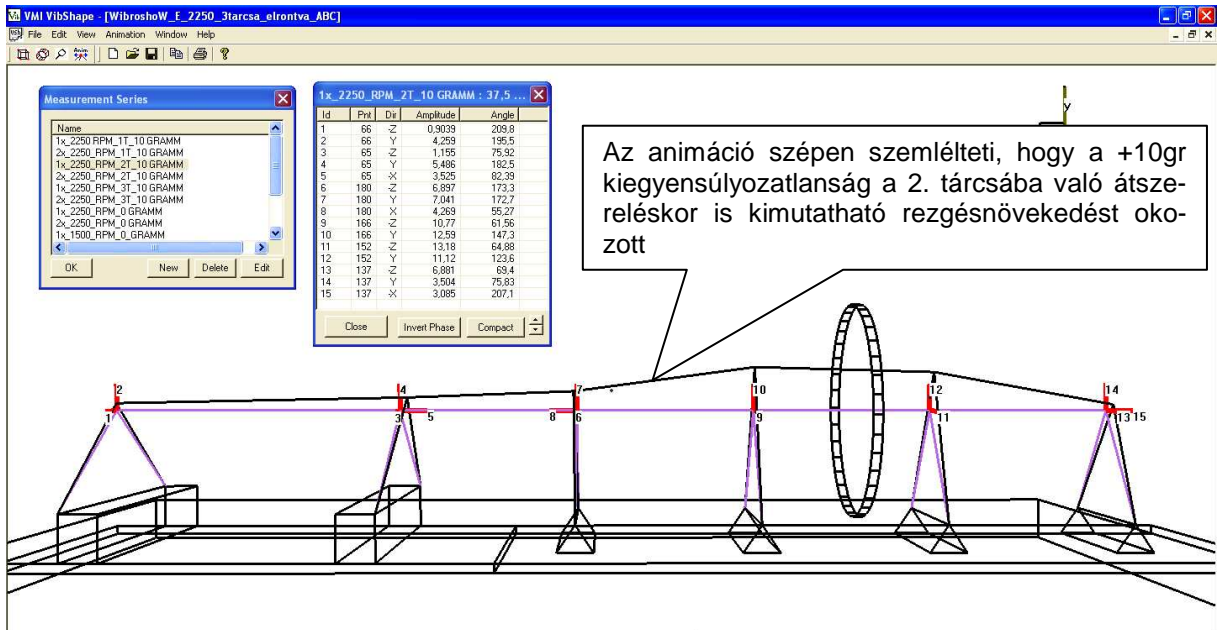
4.13. ábra A 2. animációs mérési sorozat eredménye 1500 1/min=25 Hz rezonancia fordulatszámon jól látható, hogy a rezonanciában üzemelés jelentősen növeli a függőleges irányú rezgéseket



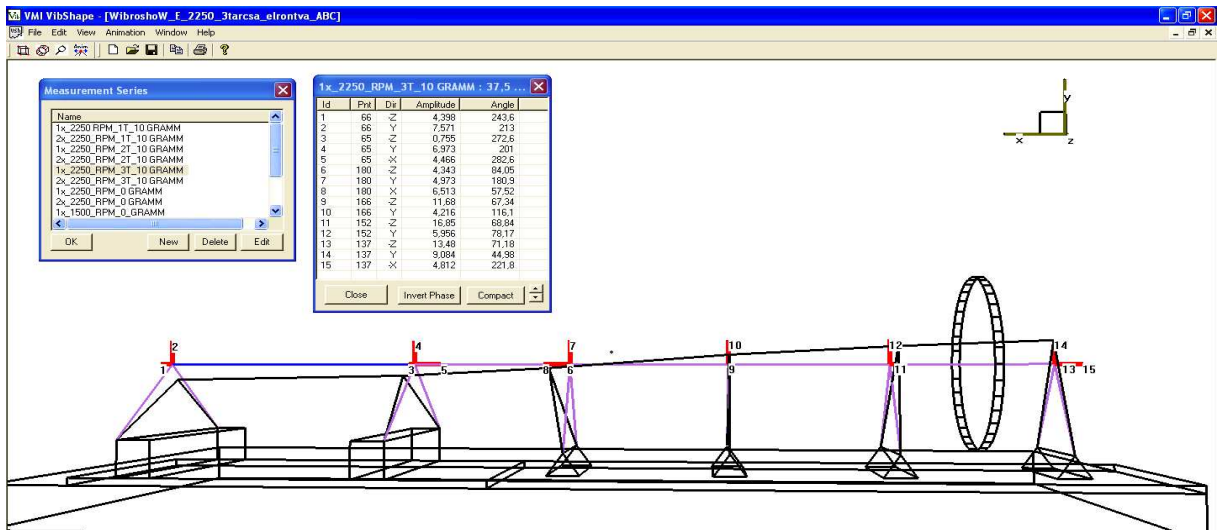
4.14. ábra A 3. animációs mérési sorozat eredménye 2250 1/min=37,5 Hz fordulatszámon jól látható, hogy a rezonancián való áthaladás után jelentősen csökkentek a függőleges irányú rezgések



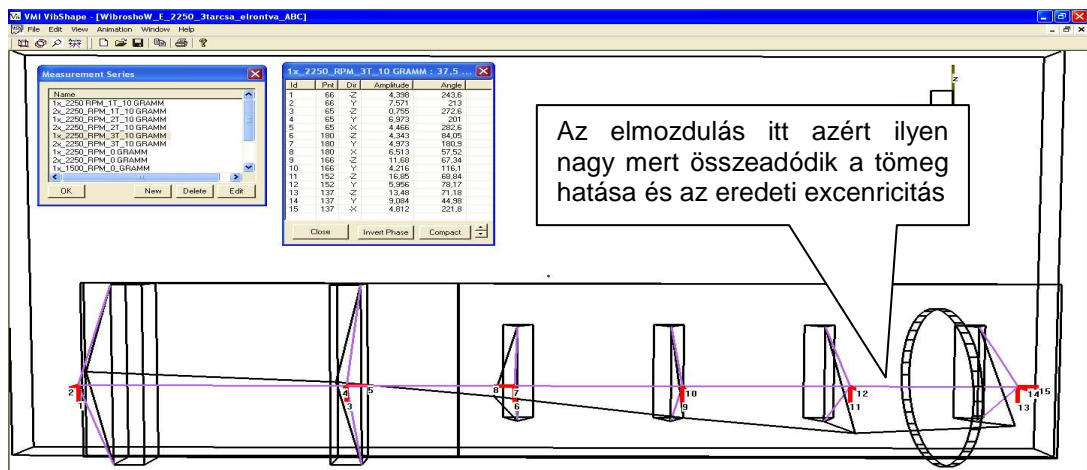
4.15. ábra A 4. animációs mérési sorozat eredménye 2250 1/min=37,5 Hz fordulatszámon jól látható, hogy az 1-es tárcsába szerelt +10 gr kiegyensúlyozatlanság hatására jelentősen nőttek a rezgések



4.16. ábra Az 5. animációs mérési sorozat eredménye 2250 1/min=37,5 Hz fordulatszám on jól látható, hogy az 2-es tárcsába szerelt +10 gr kiegyensúlyozatlanság itt is megváltoztatta az eredeti állapotot



4.17. ábra A 6. animációs mérési sorozat eredménye 2250 1/min=37,5 Hz fordulatszám on a 3-as tárcsába szerelt +10 gr kiegyensúlyozatlanság hatásának rezgésnövekedése kísérhető figyelemmel.



4.18. ábra A 6. mérési sorozatnál felülnézetből még durvább kitérések láthatók, melyeket a + 10 gr-os tömeg kiegyensúlyozatlansága és az egyébként alaphelyzetben is jelen lévő tárcsa ütés együttesen okoznak

Megállapítások, következtetések, a mérési eredmények értékelése:

- A mérési eredmények alapján megállapítható, a mozgás-animációs diagnosztikai módszer a mechanikai rezgéseket, az üzem közben létrejövő elmozdulásokat jól szemlélteti,
- A 4.11, 4.12. 4.13. és 4.14. ábrákon közölt animációk alapján kijelenthetem, hogy a gép fordulatszám változásának hatása az animációban megjelenik.
- A 4.12. 4.13. és 4.14. ábrákon közölt animációk, valamint a 4.8. ábrán közölt kifutás vizsgálat eredményei azonos műszaki állapotra a rezonanciában való üzemelésre utalnak, tehát a módszerrel a gépek rezonanciában való üzemelése láthatóvá tehető.
- A 4.13. valamint a 4.15., 4.16., és 4.17. ábrából megfigyelhető, hogy a rezonancia mind a négy csapágyon egyszerre közel azonos rezgésváltozást okozott, míg a kiegyensúlyozatlanságok előállításakor csak az elrontott tárcsa körüli csapágyon következett be szemmel látható és a mérési eredményekből számszerűen is kiolvasható rezgésváltozás. Ez bizonyítja, hogy a módszerrel a mechanikus hibák és a rezonanciák megkülönböztethetők annak ellenére, hogy mindkettő az 1x-es forgási frekvencián fejt ki hatását.
- Megállapítható, hogy a forgórész három tárcsájának 4.15., 4.16. 4.17. és 4.18. ábrákon látható egymás utáni kiegyensúlyozatlanságát a mozgás animációból kapott mérési eredmények segítségével jól le lehet követni. A próbatömeg átszerelése egyértelműen látszik. Tehát a mechanikus hibákkal, kiegyensúlyozatlansággal, vagy fellazulással, szerkezeti rezonanciákkal, tengely-beállítási hibákkal kapcsolatos meghibásodások, a műszaki állapotban bekövetkezett ilyen jellegű változások a módszer alkalmazásával láthatóvá tehetőek.
- Az animációs vizsgálat eredményei, valamint a III.2. fejezetben bemutatott géphibák spektrumképei alapján levonható az a következtetés, hogy azoknál a tönkremeneteli módoknál, amelyeknél meg tudjuk mérni a gerjesztési frekvenciát, vagy a gép sajátfrekvenciáját ismerjük a mozgás-animáció a spektrumanalízisnél hatékonyabban alkalmazható a diagnózis felállításában. Különösen ott van jelentősége, ahol egy frekvencia pl. a forgási frekvencia jelenléte egyszerre többféle (kiegyensúlyozatlanság, rezonancia, tengely-beállítási hiba, tárcsa excentrikusság, stb.) meghibásodásra is utalhat.

IV.3. Esettanulmány, a mozgás-animáció gyakorlati alkalmazásának bemutatására

A mozgás-animációt természetesen nem csak kísérleti célokkal, hanem az ipari gyakorlatban „éles helyzetekben” is számos esetben alkalmaztam már diagnosztikai gyakorlatom során. Esettanulmányomban az ipari méréseknél elforduló műszaki problémákra mutatok be egy olyan példát, amelyben a rezgésdiagnosztikai, a mozgás-animációs szaktudásra, valamint a

rezgéscsökkentési tapasztalatra is szükség volt a berendezés műszaki problémájának megállapításához, illetve a rezgések csökkentéséhez.

IV.3.1. A vizsgálat tárgyát képező légfúvó berendezés felépítése, főbb műszaki adatai

A légfúvó berendezést üzemeltető gazdasági társaság egy külföldi tulajdonú, de Magyarországon régóta üzemelő élelmiszer ipari cég a Lessafre Magyarország Kft (Budafoki Élesztőgyár) nem járult hozzá a légfúvó részletes jellemzőinek, illetve gazdasági jellegű adatainak közléséhez, így a továbbiakban a műszaki paramétereket és a diagnosztikai vizsgálatok eredményeit mutatom be.

A 4.19. ábrán látható légfúvó egy élelmiszer ipari folyamat, az élesztőgombák fejlődésének levegőellátását biztosítja. A termelés a kb. 50.000 m³/h levegő igény miatt időnként több fúvó együttes üzemelését is igényli. A gépek termelésben betöltött szerepe kulcsfontosságú, ha leáll a levegőszállítás, tönkremegy a termék, naponta akár több tízmillió forintos kár is keletkezhet. A gép üzemelésével kapcsolatban a legfontosabb információk a következők:

Teljesítmény:	1100 kW
Motor fordulatszám:	2976 1/min
Rotor fordulatszám:	9000 1/min
Motor kenés :	zsírkenés
Hajtómű kenés :	kényszer olajzás

A motoron a nem hajtott oldalon 6318 C3 mélyhornyú golyós, a hajtás felől NU 218 EC3 hengergörgős, a hajtómű behajtásnál 22218 C3 beálló hordógörgős, a kihajtásnál siklócsapágyat építettek be.

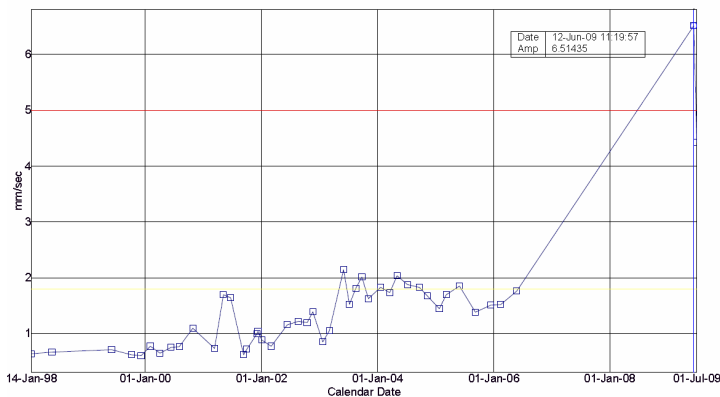


4.19. ábra A légfúvó berendezés

A légfúvó egy tengelykapcsolón és gyorsító áttételű hajtóművön keresztül hajtott, nagysebességű és nagy szállítási kapacitású centrifugál ventilátor. A kihajtó csapágyon rezgésvédelmi rendszert telepítettek, amely 4 másodperc után és 6 mm/s rezgéssebesség RMS érték felett leállítja a motort. A folyamatirányító rendszer a terhelést fokozatmentesen állítja a diffúzor segítségével a pillanatnyi levegőigénynek megfelelően. A motor fordulatszám tehát állandó, de a változó lapátszög beállítással fokozatmentesen változik a terhelés és a szállított mennyiség.

IV.3.2. A légfúvó „életútja”, diagnosztikai vizsgálatának fontossága

A légfúvó berendezésen a gép műszaki átadás átvétele óta 1998-tól végeztük rezgésmérést. Ez azt jelenti, hogy 2006-ig két-három hónaponként ugyanazon mérési helyeken ugyanazon műszerrel és mérési beállításokkal rendszeres időszakos rezgésvizsgálattal ellenőriztem a gép műszaki állapotát. A 4.20. ábrán látható rezgésebesség trend is mutatja, hogy az időben történt beavatkozások, például az időben elvégzett kenések és csavar meghúzások eredményeképpen a rezgések sohasem haladták meg a riasztási szintet.



4.20. ábra A 2-es motorcsapágó vízszintes rezgésebesség rezgésösszeg trendje (RMS 10-1000 Hz) 1998 – 2009-ig

képpen, a gép a tervezett nagyjavítási ciklus kétszeresét élte meg felújítás nélkül. Megjegyzem, hogy ebben az időben a gyár többi gépét is bevontuk az állapotfüggő karbantartásba, a méréseket termelés szempontjából fontos gépeken rendszeresen végeztem.

2006-ban egy vállalati átszervezés kapcsán először csökkentették, majd teljesen megszüntették a méréseket, a döntést költségcsökkentéssel indokolták. A karbantartásokat elvégeztették a szakszervizekkel, de nem a műszaki állapotra, hanem a cégek által javasolt „szokásos” TMK jellegű csereintervallumokra támaszkodtak. Előfordult, hogy teljesen felújítottak egy gépet majd ezután rendelték meg az állapot ellenőrző rezgésmérést.

A vizsgálat tárgyát képező légfúvóval is ez történt, a megfelelő működés ellenére döntöttek a gép szétszereléséről, felújításáról, (több millió forintos beruházás) és az alábbi beavatkozások történtek:

- Előzetes műszaki állapotfelmérés nélkül szétszerelték az egész gépet;
- Motor álló-, és forgórész elektromos felújítás, csapágycsere;
- Hajtómű csapágó és fogaskerék csere;

A nagymértékű, hosszantartó és költséges felújítás „nagyjavítás” után:

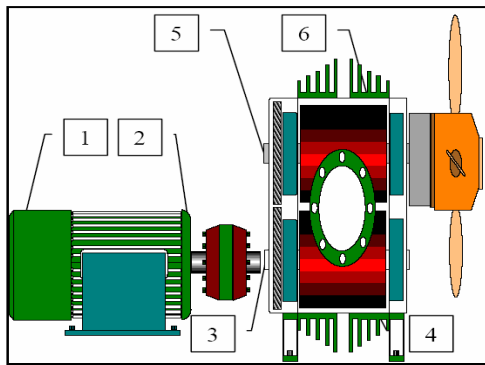
A felújítást végző cég a motort kiegyensúlyozta és az összeszerelésnél saját elmondása szerint ügyelt a tengelybeállítás ellenőrzésére is, azonban a gépen az indulás után veszélyesen

magas rezgésebesség értékeket tapasztaltak. Amint az a 4.20. ábrán is látható, az indulás után felterhelés közben a telepített rezgésvédelem letiltott, leállította a gépet;

A felújító cég tengelykapcsoló cserét javasolt (csak ez az egy alkatrész csere kb. egy millió forint), amit el is végeztek. Újra lézeres tengelybeállítóval ellenőrizték és „elvileg pontosan” beállították a tengelykapcsolatot, de a gép rezgésállapota nem javult. Kb. 40-50% terhelés után olyan magas rezonancia jött létre, amely miatt a rezgésvédelem továbbra is beavatkozott. **A karbantartás eredménye:** A gép gyakorlatilag használhatatlan, felterheléskor a rezgésőr továbbra is letiltott. Ekkor hívtak „vissza” engem.

IV.3.3. A légfúvón elvégzett rezgés diagnosztikai vizsgálatok bemutatása

A légfúvó berendezésen az előző években jól bevált multi-paraméteres rezgésdiagnosztikai vizsgálatot végeztem MICROLOG CMVA 60 rezgésanalizátorral és Wilcoxon CMSS 786

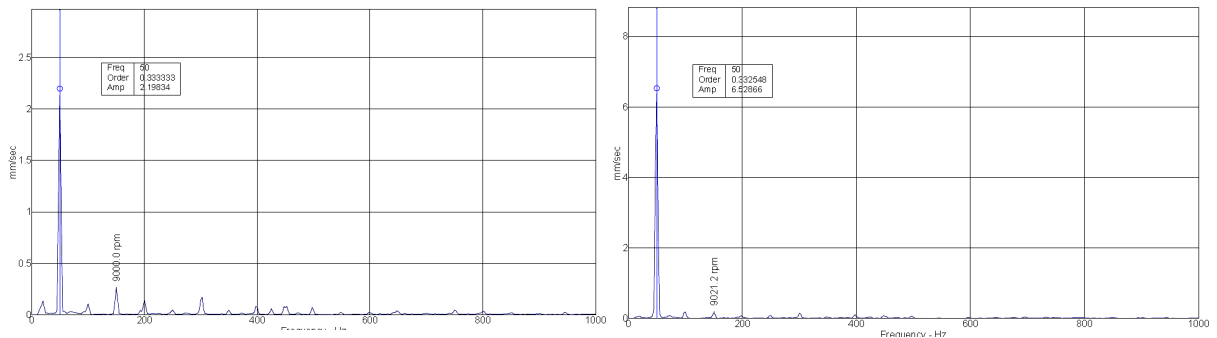


4.21. ábra A légfúvó sematikus ábrája és a mérési helyek

kombinált magas frekvenciás piezoelektromos érzékelővel a gép csapágyazási helyein. A mérési helyeket (csapágyhelyeket) a 4.21. ábrán a gép sematikus ábrája mutatja.

A méréseket rögtön kétféle 38%-os, 19.800 m³/h térfogatáramú, illetve kb. 60%-os 26.800 m³/h terhelésen végeztem el. Az alacsonyabb terhelésen a mérési eredmények a gépre vonatkozó ISO 10816-1

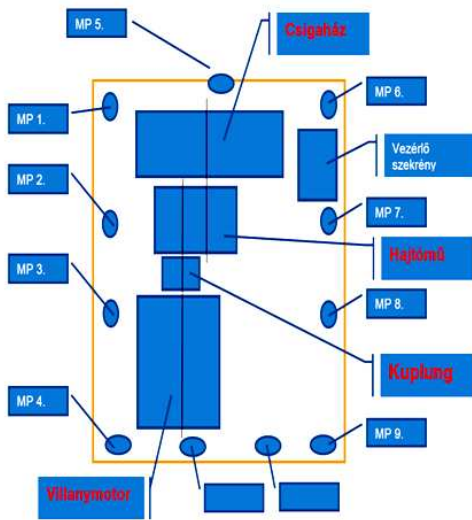
(lásd. III.1 fejezet) szabványnak megfelelő mérési eredményeket mutattak, a magasabb terhelésen azonban drasztikus rezgésnövekedés volt megfigyelhető. Két spektrumot mutat a 4.22. ábra, a magasabb terhelésen az eredmények az ISO szabvány nem kielégítő, illetve veszélyesen rossz kategóriájába sorolhatók. A terhelés növelés hatására a motor forgási frekvencián 2,19 mm/s-ról 6,52 mm/s értékre nőtt a rezgésebesség effektív értéke.



4.22. ábra A rezgésebesség spektrumok a 6-os csapágyon vízszintes (HOR) mérési irányban. A baloldali spektrum 38%-os a jobb 60%-os terhelésen készült.

Ezek a mérési eredmények jól mutatják, hogy a domináns 50 Hz-es frekvencián jelentkezik a legnagyobb amplitúdó mindkét esetben, de a terhelés növelésével veszélyesen nő. A rezgések jellege és a mérési eredmények szerkezeti, illetve a gép alapozásával is összefüggő 1x-es frekvenciákon jelentkeztek, ezért a 4.23. ábrának megfelelően rezgésméréseket végeztem a gép vázszerkezetén az „MP..”-vel jelölt rezgéselnyelő talpaknál 9 feltámasztási helyen.

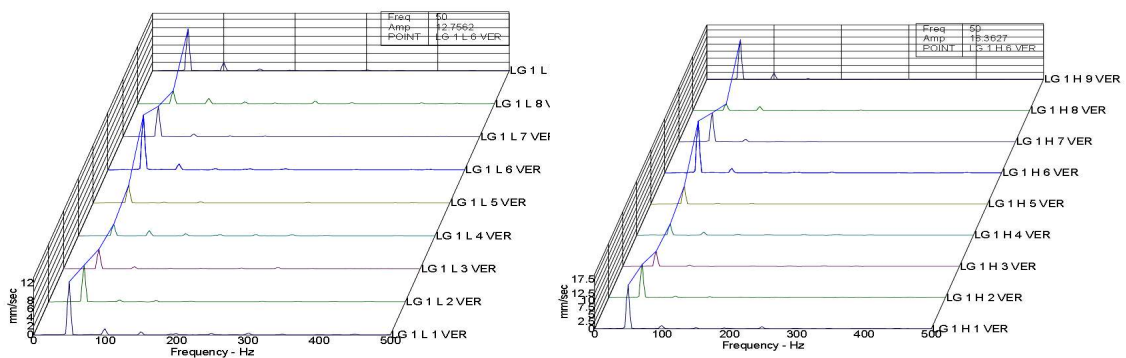
Ezek a mérési eredmények, amelyeket ún.”vizesés” diagramban mutatok be a 4.24. ábrán még szemléletesebben mutatják a vázszerkezet egyes pontjain mérhető veszélyes rezgésamplitúdókat, amelyek függőleges mérési irányban láthatóan a „6-os” számú mérési helyen a legmagasabbak.



4.23. ábra A vázszerkezet mérési pontjai

A gép váz mérése alapján megállapítottam, hogy a motor fordulatszámának, vagy a rotor fordulót 1/3x-os frekvenciájának megfelelő 50 Hz-es frekvencián rezeg a gépalap is. A mérések során végeztem kivitás vizsgálatot is, de alacsonyabb fordulatszámokon rezonancia nem jelentkezett, és üzemi fordulatszámokon sem, csak amikor a terhelés 50-60 %-os értékre nőtt, akkor kezdődött a veszélyes rezgésnövekedés. A mérési eredményekből kitűnik, hogy a legmagasabb rezgések irány szerint vertikális hely szerint pedig a csigaház felőli lábakon a legmagasabbak.

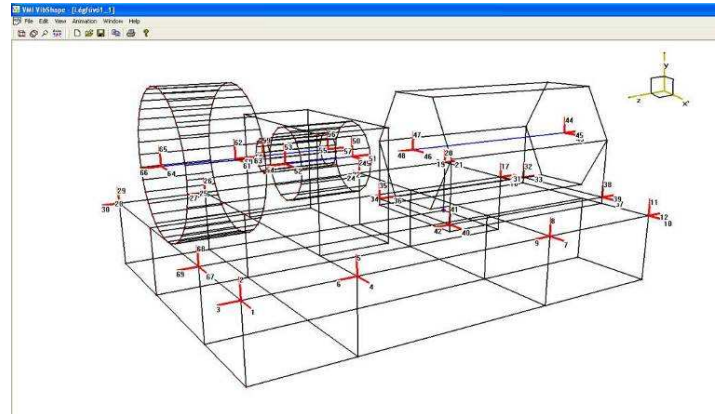
Konkrétan az MP 1 és MP 6 mérési pontokon vertikális irányban a magasabb terhelésen mérhető a legmagasabb értékek. Az is megállapítható, hogy a rezgések már az alacsonyabb terhelésen is veszélyesen magasak. A mérések alapján javasoltam a mozgás-animációs vizsgálat elvégzését javasoltam, melyet a cég megrendelt, így a méréseket el lehetett végezni.



4.24. ábra A vázszerkezet mérési pontjain mérhető függőleges rezgésspektrumok "vizesés" diagramjai. Bal oldali ábra alacsony 38 % terhelésen, JOBB oldali ábra magasabb 60% terhelésen

IV.3.4. Mozgás-animációs vizsgálatok végrehajtása és mérési eredményei

A mozgás animációs vizsgálatot ennél a berendezésnél is a „Vibshape™” [103] szoftverrel és az „EasyViber 64” rezgés-analizátorral, valamint optikai fordulatszám és fázisszög mérő készülékkel végeztem el. A vizsgálat menete megegyezett az előző fejezetben ismertetett folyamattal. A légfúvó modellje, melyet a 4.25.



4.25. ábra A légfúvó mozgás-animációs modellje a VibShape szoftverben

ábrán kísérhetünk figyelemmel, meglehetősen sok mérési pontot tartalmazott, így kb. 200 mérést kellett a helyszínen elvégezni a motoron, a hajtóművön, illetve a

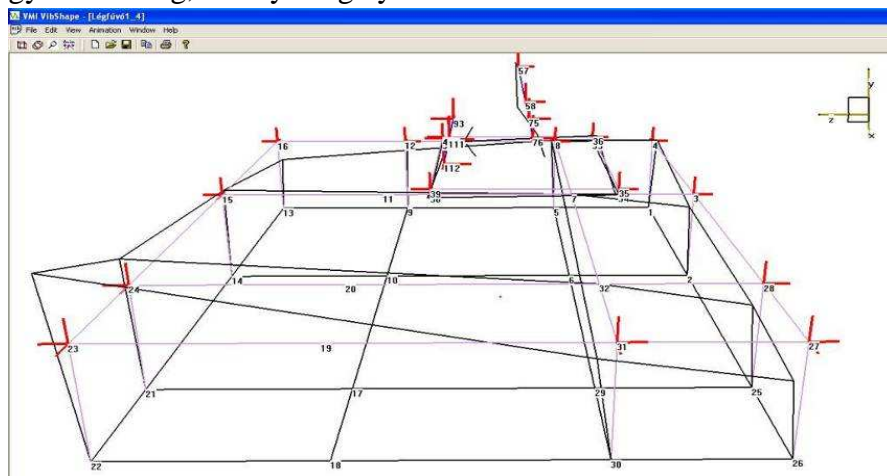
vázszerkezeten. A mérésről helyszínen készített fotót a 4.26. ábrán kísérhetjük figyelemmel. A referencia jelet a motor tengelyre felragasztott fényvisszaverő csík szolgáltatta.



4.26. ábra A mozgás-animációs mérés helyszíni végrehajtása

A mozgás-animáció mérési eredményei két fontos mozgásra hívták fel a figyelmet. Először is a vázszerkezet veszélyes mértékű billegésére, amely feltámasztási, vázszerkezet merevségi, valamint a rezgéselnyelő talpakkal

kapcsolatos problémákra utalt. Másrészt a motor és a hajtómű tengely ellentétes mozgása figyelhető meg, amely tengely beállítási hibára utal. A vázszerkezet mozgásainak merevített

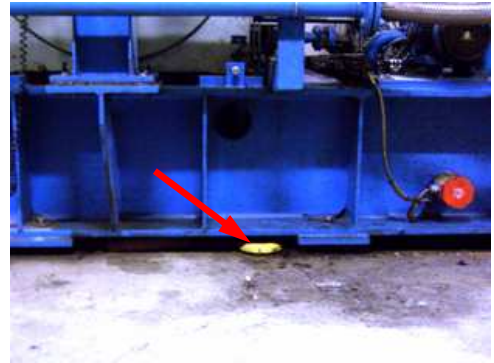


4.27. ábra A légfúvó vázszerkezetének veszélyes elmozdulásai

képét a 4.27. ábrán a tengelykapcsoló problémára, vagy tengely-beállítási hibára utaló animációs merevített képet a 4.30. ábrán kísérhetjük figyelemmel.

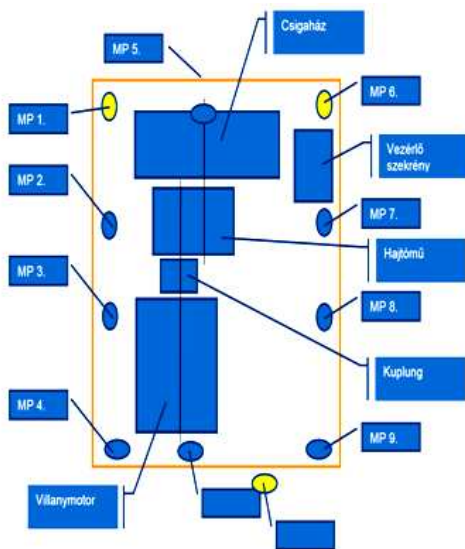
Javaslat a mozgás-animáció alapján :

Az animáción jól látható a váz kereszt irányú veszélyes elmozdulása, így legelőször a vázszerkezet rezgéscsökkentését javasoltam karbantartóknak. Első javaslat ilyenkor minden esetben a kötőelemek, csavarok hegesztések ellenőrzése, mivel a szerkezetben kialakult veszélyes rezonanciák szétvázzák a gép csavarjait. A mérések alapján a helyszíni rezgéscsökkentés indokolt, rezgéselnyelő talp cserét javasoltam, de ennek költségeit a cég túl magasnak tartotta, így alternatív megoldást kért. Mivel a fő cél a váz elhangolása volt, ezért ezt a 4.28. ábrán látható pórt rezgéselnyelő talpakkal oldottam meg, melyek feladata a vázon létrejött sajátfrekvencia megváltoztatása, a gerjesztést okozó rezonancia frekvencia elhangolása.



4.28. ábra A pórt rezgéselnyelő talp

A mozgás-animációs mérések után elvégzett beavatkozások :



4.29. ábra A gépalap elhangolási, illetve a pórt rezgéselnyelő talpak beépítési helyei

Első intézkedésként átnéztem a vázszerkezet rögzítését és éppen a járókerék felőli oldalon csavar fellazulást találtam. Úgy éreztem megvan a dolog nyitja, azonban a fúvón ennek ellenére sem csökkentek a rezgések. Ezek után a vázat a három legmagasabb rezgésű a 4.29. ábrán „sárgával jelölt” helyen pórt talpakkal alátámasztottuk, azaz aláhangeléssel próbáltuk a plusz talpakkal „elnyeletni” a gerjesztő erők hatását. Ez a beavatkozás hatékony volt, mert a gerjesztett rezgések nagy részét kiküszöbölte. A beépített rezgéselnyelő talpaknak köszönhetően ezeken a helyeken csökkent is a rezgéssebesség, mégpedig oly mértékben, hogy 60%-

ról 75%-ig fel lehetett menni a légfúvó terhelésével. Ennél magasabb terhelésen azonban ismét növekedni kezdtek a rezgéssebesség mérési eredmények.

A helyszíni rezgéscsökkentés után az alábbi megállapításokat tettem:

- Mivel a vázat a legmagasabb rezgésű helyeken kitámasztottam a mozgás animáció figyelembevételével, ennek hatására a hajtóművön a rezgések 27.000 m³/h 60%-os terhelésnél elfogadhatóak voltak és motoron sem nőtt jelentősen a rezgés.
- 31.800 m³/h, 75 %-os terhelésnél a rezgések ismét jelentősen nőttek, a motoron veszélyes mértékű rezgésnövekedés következett be.

- Az ellenőrző rezgémérésből kiderült, hogy a magas rezgések továbbra is a motor fordulatszámán jelennek meg, a mozgás-animációból viszont látszik, hogy a motor és hajtómű tengely ellentétesen mozog.
- A motoron fellazulásra és tengely-beállítási hibára utaló rezgésspektrumokat lehetett mérni, a motor rezgéseit sem merev sem rugalmas kitámasztással nem lehetett csökkenteni.
- Jelentősen emelkedett a motorcsapágyak hőmérséklete, míg a hajtóművön a magasabb terhelésen inkább csökkenés látható, a motoron ez a jelenség a csapágy kenési elégtelenségére utal, ezért a motorcsapágyak soron kívüli kenését javasoltam



4.30. ábra A motor és hajtómű tengely-beállítási hibájára utaló animációs kép

Végleges javaslatok a helyszíni rezgéscsökkentés után:

- A motor és hajtómű tengely-kapcsolatának újbóli ellenőrzése és beállítása. Az ellenőrzésből ki kell derülnie, hogy van-e tengely-beállítási hiba. Lehet, hogy melegedés hatására alakult ki a tengelyek párhuzamos eltérése, a tengelyek láthatóan ellentétesen mozognak.
- A tengelykapcsoló geometriai pontosság ellenőrzése, ütésellenőrzés, amennyiben hibás vissza kell cserélni a régi tengelykapcsolóra és ellenőrizni a rezonancia kialakulását.
- A motor „puha láb” és fellazulás ellenőrzése, kiküszöbölése.
- A motor alatti vázszerkezet tüzetesebb ellenőrzése, nincs-e megrepedve a váz.
- Amennyiben a rezgések nem csökkennek az előző beavatkozások hatására, ki kell cserélni a gép rezgéselnyelő talpait, majd tökéletesen vízszintbe kell állítani a berendezést.

A vizsgálatot 2009 nyarán végeztem, és a rezgéseket majdnem elfogadható szintre sikerült csökkentenem általam a talpak beépítésével. A javasolt intézkedéseket csak egy fél év múlva 2010-ben tudták a válság miatt betervezni, mivel a rezgéselnyelő talp csere meglehetősen

költséges. A motor és a hajtómű tengelykapcsolatát a felújítást végző cég újból ellenőrizte és megfelelő értékre állította. Szóbeli információim szerint a berendezés továbbra sem üzemel megfelelően, én azonban kontroll mérésre már nem kaptam megrendelést.

IV.4. Következtetések

A fejezetben bemutatott kísérleti mérések útján bebizonyítottam, hogy a „Vibshape™” mozgás-animációs szoftverrel és Easy Viber64 rezgés-analizátorral történő mérés segítségével láthatóvá tehető és megérthető az alkatrészek, illetve gépszerkezetek elmozdulásai, mechanikai rezgései. A kísérletek során az általam létrehozott mesterséges hibákat a valós rezgés-mérési eredményeknek megfelelő valóságos formában jelenítettem meg a modell mozgásában. A módszer hatékonyságának igazolása érdekében saját mérési tapasztalatomból vett gyakorlati példával bizonyítottam, hogy a módszer nagy teljesítményű és nagy fordulatszámú berendezések gerjesztett rezgéseinek vizsgálatánál hatékonyan alkalmazható. A vizsgálat mind a kísérleteknél, mind pedig a gyakorlatban megfelelő eredményt adott, javította és plusz információkkal növelte a spektrumanalízis alapján adható diagnózis pontosságát.

Megállapíthatom, hogy a módszer által szolgáltatott mérési eredmények a hibás alkatrész gyorsabb felfedezésére és a meghibásodás fajtájának pontosabb megállapítására nyújtanak lehetőséget. Mérési tapasztalatom alapján kijelenthetem, hogy a méréseket az iparban teljes terhelés mellett is elvégezhetjük, így gyakorlatilag a termelés leállítása nélkül tudunk hatékony információt adni a forgó gépek valós műszaki állapotáról.

A mozgás-animációs módszert az alábbi diagnosztikai feladatok elvégzésre javaslom:

- Vázszerkezetek, gépalapok, gépelemek „rezonanciás viselkedésének” kimutatása
- Vázszerkezetek repedési, törési helyeinek kimutatása
- Kiegyensúlyozatlanságból eredő gerjesztések hatásának kimutatása
- Tengely-beállítási hibából eredő gerjesztések hatásának kimutatása
- Mechanikai lazaságok kimutatása
- Géplábak fellazulásának kimutatása
- Csővezeték rezonanciák kimutatása
- Gerjesztett gépek (rázósziták, rázó asztalok) üzem közbeni viselkedésének vizsgálata
- Gerjesztési helyek, rezgést keltő források lokalizálása.

V. FEJEZET Mozgás-animációs rezgésdiagnosztikai vizsgálat kidolgozása vadászrepülőgép állapotfüggő karbantartásához

Célkitűzéseim között a rezgésdiagnosztikai módszerek haditechnikai alkalmazhatóságának kutatása is szerepel, melyet a haditechnika csúcstechnológiáját képviselő JAS-39 Gripen típusú vadászrepülőgép hajtóművének állapotfüggő karbantartásában kívánok hasznosítani.

Napjaink korszerű hadviselésében a katonai műveletek alapvető eleme a légiere alkalmazása. A légiere alkalmazhatósága és az általa elvégezhető harcászati feladatok végrehajthatósága azonban nagymértékben függ a haditechnikai eszközök megfelelő rendelkezésre állásától is. A légiernél rendszerbe állított vadászrepülőgépek csak a kor színvonalának megfelelő technológiák alkalmazásával lehetnek az ellenféllel szemben eredményesek. Az egyre bonyolultabb eszközök esetében azonban nem csak beszerzésük, hanem üzemben tartásuk is magas ráfordítást, üzemeltetési költséget igényel.

A vadászrepülőgépek eredményes harcászati alkalmazhatósága mellett tehát gondot kell fordítani a repülőtechnika gazdaságos üzemeltetésére is. A hosszú élettartamon keresztül megbízhatóan működő berendezések fenntartásának alapja a műszaki állapot minél pontosabb megítélése, annak érdekében, hogy a karbantartási intézkedések, javítások, vagy cserék tekintetében is optimális döntéseket lehessen hozni. Az időben felderített meghibásodások növelik a hadrafoghatóságot és csökkentik a fenntartási költségeket.

A speciális rezgésdiagnosztikai szimulációs módszer, a mozgás-animációs vizsgálat felhasználásával a repülőgép sugárhajtómű szimulációs modelljének elkészítésével arra kívánok lehetőséget teremteni, hogy egyszerű rezgésdiagnosztikai eszközök segítségével a hajtómű rezgéseit láthatóvá lehessen tenni. Ilyen eljárást tudomásom szerint még nem alkalmaznak haditechnikai eszközök karbantartásában. A karbantartó szakemberekkel folytatott személyes megbeszéléseim során pedig arra a következtetésre jutottam, hogy a műszaki állapot megítélését jelentős mértékben támogatná a mozgás animációs eljárásból származó információ.

V.1. A JAS-39 GRIPEN típusú vadászrepülőgép főbb jellemzői

A Svéd Légierő 1980-ban kezdte el egy újszerű, negyedik generációs harci repülőgép létrehozásának programját, melynek célja egy különböző jellegű harc feladatok végrehajtására alkalmas könnyű harci repülőgép kifejlesztése volt. A JAS-39 Gripen (Griffmadár) névre keresztelt repülőgép felhasználása többcélú, hiszen vadász (Jakt), csapásmérő (Attack), felderítő (Spanung) feladatkörök ellátására is képes. A Gripen tervezésénél már a 21. század harci repülőgépével szemben támasztható követelményeket vették figyelembe, a megfelelő harci ha-

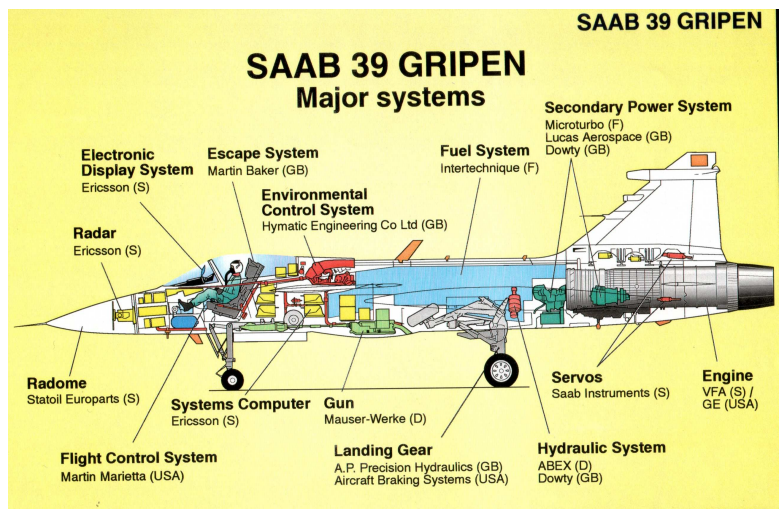
tékonyságot, a taktikai rugalmasságot, a földön és levegőben megfelelő túlélőképességet, a repülési biztonságot, hajózszemélyzet hatékony kiképzési lehetőségei, a fejleszthetőséget és nem utolsósorban az alacsony üzemeltetési költségeket.

A tervezők arra törekedtek, hogy egy tartós, kis tömegű és sérülésálló sárkányszerkezet hozzanak létre, amely a repülőgép a többi korszerű típushoz hasonlóan -3 és $+9g$ közötti terhelhetőségét biztosítja. A sárkányszerkezet élettartama a konkurens vadászpilóta (pl.F-16) hasonlóan 8000 repült óra, ami normál repülési igénybevétel mellett 30 éves használatra terjeszthető ki. [106] [107][109]

A vadászpilóta felépítése és főbb rendszerei:

Egy vadászpilóta felépítése nyilvánvalóan rendkívül összetett, a disszertáció terjedelme nem teszi lehetővé, hogy mindegyikkel részletesen foglalkozzunk. A fedélzeti elektronikai rendszer, amelyben a központi fedélzeti számítógép 40 mikroprocesszoron keresztül vezérli és ellenőrzi a repülőgép 5.1. ábrán látható fő rendszereit. Ezek a rendszerek a következők:

- repülésvezérlő rendszer
- hajtóművezérlő rendszer
- futó- és fékrendszer
- elektromos táplálás
- hidraulikus rendszer
- kisegítő energiaellátó rendszer
- tüzelőanyag rendszer
- kondicionáló rendszer
- mentőrendszer
- alapvető repülési adatok és navigáció rendszerei
- kommunikációs rendszer
- válaszadó rendszer
- célazonosító rendszer
- tűzvezérlő és fedélzeti fegyverrendszer
- kijelző és vezérlő rendszer
- adatrögzítő rendszer [106][109][110][111]



5.1. ábra A JAS-39 Gripen rendszerei és ezek gyártói

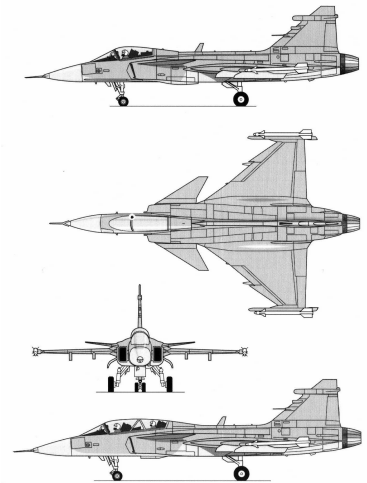
A rendszereket az indítást követően átfogó, mindenre kiterjedő beépített önellenőrző rendszerek automatikusan ellenőrzik, melyek a folyamatos működés közbeni ellenőrzésre is szá-

mos funkciót tartalmaznak. Például minden repülőgép rendelkezik repülési terhelés figyelő rendszerrel, amely méri a hat fő repülési terhelést, azaz a tér három koordináta tengelyének irányában az erőket és nyomatékokat. Ezeket az adatokat az adatrögzítő rendszer segítségével tárolják, így lehetőség van a teljes repülési élettartam során tervezett és a valós terhelési viszonyok, valamint a sárkányszerkezet kifáradási viszonyainak rögzítésére, elemzésére. Az önellenőrzést biztosító digitális technika a repülőgép áram aláhelyezése után az ellenőrző tesztek lefuttatása után lehetőséget biztosít az egyes rendszerek funkció figyelésére, a meghibásodás helyének meghatározására, valamint repülés közben történt meghibásodások rögzítésére is. A repülőgépbe folyamatos rezgésfigyelő rendszer nem került beépítésre.

A JAS-39A Gripen vadászrepülő felépítését az 5.2 ábrán, főbb műszaki adatait a [106] [111] szakirodalom alapján az 5.1. táblázatban kísérelhetjük figyelemmel.

5.1. táblázat A JAS-39 Gripen vadászrepülő főbb műszaki adatai

A repülőgép típusa	JAS-39A
A repülőgép hossza: (méter)	14, 1
Fesztávolsága: (méter)	8, 4
Magassága: (méter)	4, 5
Szárnyfelülete: (m ²)	30
Futómű nyomtávja: (méter)	2, 4
Futómű tengelytávja: (méter)	5, 2
Üres tömege: (kg)	6622
Maximális felszálló tömege: (kg)	12800
Külső függesztmények tömege: (kg)	5300
Maximális hatótávolság 3 póttartállyal: (km)	3300
Hatósugár vadászbevetésen: (km)	1250
Csúcssebesség: (M)	1, 8
Starthossz max. felszálló tömeggel: (méter)	800
Leszállási úthossza: (méter)	500



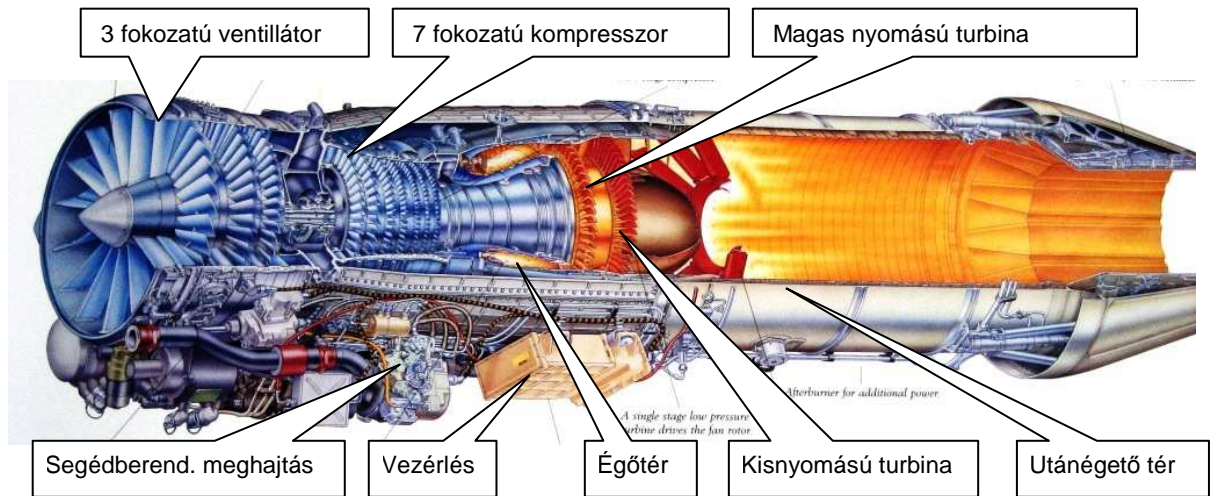
5.2. ábra A JAS-39 Gripen vadászrepülő felépítése [111]

Mivel a disszertáció témaköréhez a repülőgép egyéb rendszerei nem képezik, ezért a továbbiakban a sugárhajtómű és a fedélzeti energia ellátó rendszerek bemutatására szorítkozom.

A vadászrepülőgép RM 12 B típusú hajtóműve:

A Volvo RM12 hajtóművet a Volvo és a General Electric együttműködésével hozták létre a General Electric F404 hajtóművének (amely az F-18-as vadászgép hajtóműve) továbbfejlesztése útján. A fejlesztések eredményeképpen az új konstrukció tolóerejét 72 kN-ról 80,5 kN-ra sikerült megemelni. A Volvo RM12 egy két-forgórészes, kis kétáramúsági fokú, két-

áramú utánégető térrel ellátott sugárhajtómű, melynek fő részeit az 5.3.ábrán kísérhetünk figyelemmel.



5.3. ábra A Volvo RM 12 hajtómű felépítése és főbb részegységei

Amint az ábrán is látható hajtómű kompresszora egy három-fokozatú ventilátorból és egy hét-fokozatú nagynyomású kompresszorból áll, melyeket külön-külön egy-fokozatú turbinák hajtanak. A nagy és kisnyomású turbina lapátjai egykristályosak, így biztosítják a megfelelő mechanikai szilárdságot. A kompresszor állítható álló-terelő lapátkoszorú biztosítja a hajtómű nagy stabilitási tartalékát a szívócsatorna instabil és a hajtómű átmeneti üzemmódjaiban. A hajtómű legfontosabb műszaki adatait az 5.2. táblázatban mutatom be.

5.2. táblázat A Volvo RM 12 hajtómű főbb műszaki adatai [111][112]

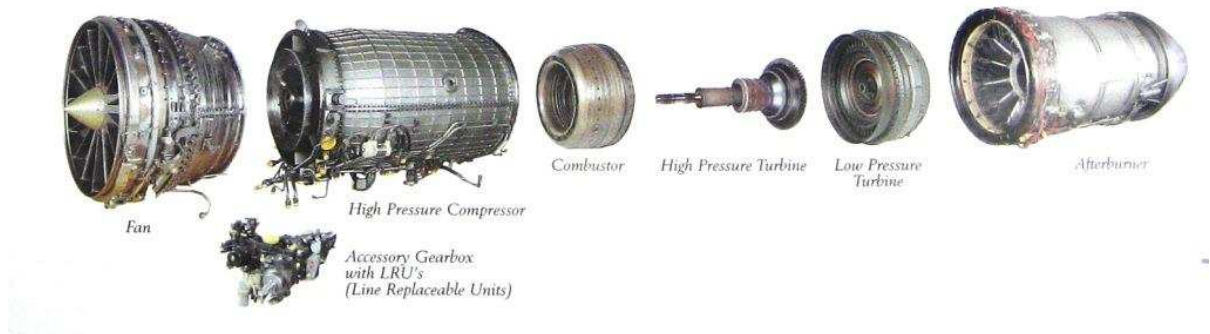
Teljes hossza:	4,04 m
Maximális átmérője:	0,884 m
Száraz tömege:	1055 kg
Kétáramúsági foka:	0,31
Sűrítési viszonya:	27,5
Tolóerő teljes utánégetéssel:	80,5 kN
Tolóerő maximál üzemmódon:	54,0 kN
Tolóerő alapgáz üzemmódon:	1,45 kN
Tüzelőanyag fogyasztás utáégetéssel:	1,78 kg/daNh
Tüzelőanyag fogyasztás utánégetés nélk.:	0,84 kg/daNh
Levegőfogyasztás:	68 kg/s

A hajtómű ventilátor kialakítását úgy tervezték, hogy az elődjénél jobban viselje az idegen tárgyakkal és madárral történő ütközést. A Volvo RM12 nagy tolóerő-tömeg aránnyal rendelkezik köszönhetően a ventilátor és a kompresszor optimalizált aerodinamikájának, valamint a turbina előtti magas gáz-hőmérsékletnek. A magas hőmérsékletet az égőtér megfelelő

kialakítása biztosítja. Az égőtér egyenes áramlású, gyűrűs kialakítású, olyan kombinált levegő és tüzelőanyag porlasztó belépőkúpot tartalmaz, amely finoman porlasztja a belépő üzem-

anyagot, ezáltal egyenletesebb gázhőmérsékletet, valamint alacsonyabb füstképződést eredményez. [106]

A hajtómű az 5.4. ábrán látható hét modulból épül fel. Mivel mindegyik modul csereszabatos más RM12 hajtóművek moduljaival ez a kialakítás minimalizálja és egyszerűsíti a karbantartást, mivel az esetlegesen meghibásodott részek rövid idő alatt kicserélhetők.



5.4. ábra A Volvo RM 12 hajtóművének külön-külön szerelhető csereszabatos részegységei [106], [109]

Ez egyrészt azt jelenti, hogy nem kell a teljes hajtóművet javításba küldeni, csak a meghibásodott egységet kicserélni, másrészt az újonnan beépített elemet a hajtómű vezérlő elektronika automatikusan szabályozza hozzá a rendszerhez, így elmaradhat a besabályozás miatti hajtóműpróba, amely jelentős karbantartási időt takarít meg.

Tulajdonképpen a hajtóműnek ez a tulajdonsága adta az ötletet a mozgás-animáció alkalmazásának lehetőségére, mert az egyes részek nem megfelelő működési állapota a csapágyazási helyeken és a hatómű összeépítési pontjain mindenképpen rezgésnövekedésben nyilvánul meg. Ezek alapján a nem megfelelő működésre a rezgésvizsgálat eredménye alapján lehet következtetni és dönteni a szükséges csere fogantatosításáról.

A hajtómű egyes részegységeinek vizsgálatára 13 db technológiai nyílás áll rendelkezésre, amelyek a belső alkatrészek műszaki állapotának endoszkópos vizsgálatát teszik lehetővé.

A Volvo RM12 teljes körű digitális hajtómű vezérlőrendszerrel (FADEC) rendelkezik, amely optimalizálja a hajtómű ciklusait, vezéri a hajtómű állapotfigyelő rendszert, amely biztosítja a hajtómű különféle üzemiállapotainak optimális értéken való tartását, valamint a meghibásodásra utaló jelekről tájékoztatja a központi vezérlőegységet. [106][111]

V.2. A JAS-39 Gripen karbantartási rendszerének legfontosabb jellemzői

A repülőgép karbantartás múltjára visszatekintve azt mondhatjuk, hogy repülőgépeket már az 1945–1950-es évek óta TMK rendszerben, azaz adott üzemidő ciklusonként végzett karbantartási és javítási rendszer szerint kezdték üzemeltetni. A repülő eszközök légi alkalmas-

sági képességének fenntartására 1968 óta alkalmazzák az MSG-1 típusú állapot szerinti, megbízhatóság alapú (RCM) karbantartási és minőség biztosítási rendszert, melyet alapvetően a Boeing 747 polgári repülőgép üzemeltetéséhez dolgoztak ki. Az MSG-1 majd MSG-2 továbbfejlesztett változataként napjainkban az 1980-ban életbe lépett MSG-3 típusú nemzetközileg elismert szabványosított karbantartási rendszert alkalmazzák a polgári és a haditechnikai repülőgépek fenntartási költségeinek optimális szinten tartása érdekében. [106][113]

Az nemzetközileg kialakított MSG-3 szerinti fenntartási szervezetek három szinten tevékenykednek, így a Gripen üzemben tartási rendszerében is három szintet különböztetünk meg:

Az „O szint” (operational level) a repülőtéren a repülések kiszolgálása során végzendő előkészítési, ellenőrzési munkákat foglalja magába. Ez a repülőtereken a repülőgépek repülés előtti, repülés utáni, illetve ismételt repülési feladatra történő előkészítését végzi. Katonai repüléseknél általában alegység (század) szintű szervezet végzi ezt a tevékenységet. Technikai szempontból előírás, hogy a repülőgépnek teljesen üzemképesnek kell lennie. A repülőgépeken ezen a szinten általában csak üzemanyag és fegyverzet feltöltést, rakéta, vagy speciális berendezés felfüggesztést, általános üzemképesség ellenőrzést végeznek. Ide tartoznak azok a váratlan meghibásodások javításai is, melyeket azért kell elvégezni, mert a repülőgép központi számítógépe az öndiagnózis során hibát talált valamelyik rendszer működésében. Lehetőség szerint el kell kerülni, hogy a repülések előkészítésénél a közvetlen repülés előkészítési zónában, a szerkezet megbontásával járó, mélyebb hibajavító tevékenységet végezzenek. [114]

A következő az „I szint” (intermediate level) középszint, amelyet a repülőalakat hangárjában, a műhelyek segítségével lehet elvégezni. Gyakorlatilag ezen a szinten történik a repülőgépeken előírt periodikus ellenőrzések végrehajtása. Ennek érdekében a javítási, ellenőrzési célnak megfelelő hangárt és műhelyt hoznak létre a technológiai folyamatok szakszerű végrehajtására. Az „I” szintű tevékenység létszám és szakképzettség szükségletét a karbantartási technológiában előírt szakmák és munkaigény alapján határozzák meg.

A legfelső a „D szint” (depot level) ipari javítási szint. Ennek a javítási formának feladata az előző két ellenőrzési technológia végrehajtásával, alapvetően csapat szinten végzett ellenőrző javító tevékenység kiegészítése a repülőgépek olyan mélységű szétszerelésével, az alkatrészek, berendezések szétszerelt állapotban történő, főleg műszeres vizsgálatával, melyet csapat szinten a repülőtéren, illetve a hangárban nem célszerű végezni. [108][113]

A repülőtechnika üzemben tartásában a nemzetközi gyakorlatban, az egyik legfontosabb mutatószámként az „MTBF”⁴¹-et, mint két meghibásodás közötti átlagos működési időt hasz-

⁴¹ MTBF - Mean Operating Time Between Failure - két meghibásodás közötti átlagos működési idő

nálják, melyet az üzemeltetés egy szakaszára, vagy a teljes időtartamára is meg lehet határozni. Ezzel a mutatószámmal a véletlenszerűen bekövetkező meghibásodások előfordulásának a számát, illetve ennek alapján a várható költségeket becsülik meg. A Gripen néhány konkurensére vonatkozó [114]. szakirodalomból származó üzemeltetési jellemzőkkel kapcsolatos adatokat az 5.3. táblázatban mutatom be.

5.3. táblázat Korszerű vadászrepülőgépek üzemeltetési jellemzői [114]

Üzemeltetési jellemzők	F-15	F-16C Block 50	F/A-18C	Mirage 2000	MIG-29B (MIG-29M)	TORNADO	JAS-39	EFA
Újrafelszállás előkészítés közepes ideje [perc]	35	27		29	30	32	10	10
Üzemeltetési készenlét fok ($A_0 \times 100$) [%]	85	88	85	90	90		91	87
Egy repült óra kiszolgálásához szükséges munkaerő ráfordítás MMH/FH [fő óra/rep. óra]	15	8,2	9,8	11,5	17,6 (11,6)	33	5,2	9
Egy meghibásodásra eső repült idő MTBF [rep. óra]	2,7	4,1	3,3	6	3	2,4	7,5	9
sárkány összes üzemideje [rep. óra]	8000	7000			2500		4000	6000

Az MTBF kiszámításánál figyelembe kell venni a környezeti viszonyokat, a terv szerinti üzemeltetést, a repült órák számát, a repülési feladatok légi időtartamát, pilótára és a repülőgépre vonatkoztatott terhelési határértékeket. A két meghibásodás közötti átlagos működési idő előre jelzett, számított idő, melyet a repülőgép tervezett alkalmazása és tervezési paramétere határoznak meg [114]. A berendezés életciklusa során ez az átlagos integrált mutató állandóan módosul, végleges értékét csak a élettartam végén éri el.

A vadászrepülőgépek üzemeltetési folyamatait, azaz a repülőgép rendelkezésre állását a megbízhatósági, üzemben tarthatósági és fenntarthatósági jellemzők határozzák meg. Ezeket a jellemzőket már a tervezési folyamatban meghatározzák, majd a repülőgép üzemelése során az adatrögzítő rendszerben és a karbantartási rendszerben folyamatosan rögzítik és dokumentálják a berendezéssel történt összes eseményt. [115]

V.3. A JAS-39 Gripen vadászrepülőgépen jelenleg alkalmazott rezgésvizsgálat

Amint a kutatási módszerek ismertetésénél utaltam rá az MH Repülőműszaki Szolgálatfőnök engedélye alapján több alkalommal is lehetőségem volt eljutni az MH 59. Kecskeméti Szentgyörgyi Dezső Repülőbázisra, ahol részt vehettem egy JAS-39 Gripen vadászrepülőgép Volvo RM 12 B típusú hajtóműpróbáján, valamint éppen aktuális időszakos rezgésmérésén is.

A repülőgép időszakos rezgésvizsgálatára az eredeti tervek szerint hajtóműcsere esetén, illetve a repülőgép 200 óránként elvégzett ciklusos kötelező felülvizsgálatán került sor, azon-

ban az elmúlt évtől kezdve a gyár a következőképpen módosította a vizsgálatok végrehajtásának esedékességét. Az új rendszer szerint rezgésmérést kell végezni:

- Hajtómű csere után
- Hajtómű modul csere után
- Idegen tárgy beszívása esetén
- Ha a pilóta erős rezgéseket tapasztal repülés közben

Mivel a JAS-39 Gripen vadászrepülőgépnek nincs repülés közbeni rezgés ellenőrző rendszere ezért a hajtómű rezgésméréséhez a Saab gyár egy külső céggel tesztberendezést fejlesztett ki az időszakos rezgésvizsgálatok végrehajtására.



5.5. ábra A repülőgép hajtómű próbához és rezgésméréshez előkészítve

A hajtómű rezgésmérését a repülőtér erre a célra kialakított vizsgáló állomásán kell elvégezni álló helyzetben, a repülőgép rögzítésével, ahogyan azt 5.5. ábra is mutatja. A Saab gyár által alkalmazott rezgésdiagnosztikai eszköz az alábbi részegységekből áll:

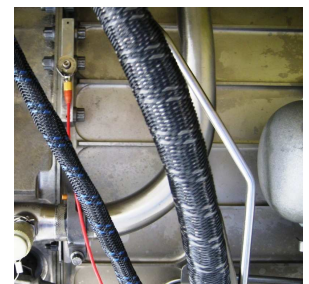
- Központi mérési adatrögzítő egység
- 4 db rezgésérzékelő
- Az érzékelőket rögzítő idomok,
- Interface egység
- Kábelek a részegységek összekötéséhez



5.6. ábra Az interface egység rögzítése a repülőgépen

A vizsgálat az érzékelők és az interface egység repülőgépen való elhelyezésével kezdődik, amelyhez rögzítő elemek állnak rendelkezésre. Az érzékelők felszerelése a hajtómű négy pontján történik, :

- v0 - A ventilátor fokozat síkjában (Front Frame)
- v1 - Az elosztó ház síkjában (Midframe)
- v3 - A turbina síkjában (Rear Mount Ring)
- v5 - A repülőgép segédberendezés hajtóművén (Aircraft Gearbox)



5.7. ábra Az érzékelők hajtóműházra és turbina csapágyzásra való rögzítésének megoldása.

A mérési helyeket v0, v1, v3, és v5 jelölésekkel látták el. Az interface elhelyezését az 5.6. ábrán, az érzékelők rögzítését az 5.7. ábrán kísérhetjük figyelemmel.

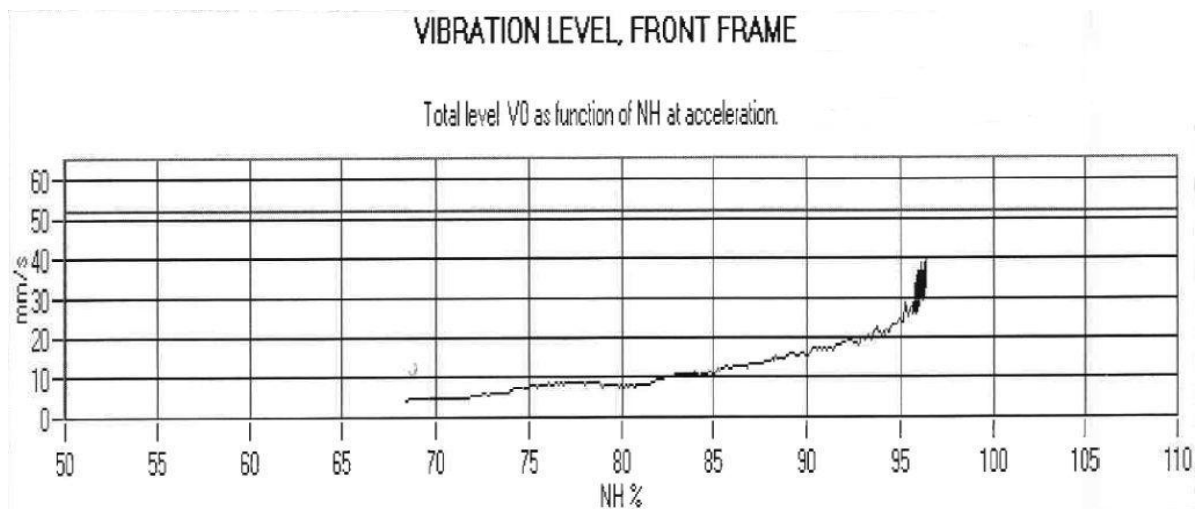
A mérés megkezdése előtt az adatgyűjtővel összekötik az érzékelők jeleit fogadó interface egységet, majd a repülőgéptől biztonságos távolságban elhelyezkedve a meghatározott mérési menetrend szerint el lehet kezdeni a mérést. A mérés külső körülményei az által vannak biztosítva, hogy a hajtómű indításának, alapjáraton való járatásának, felterhelésének leterhelésének az ideje és a terhelés változás sebessége is rögzítve van a mérési utasításokban.

A mérést a hajtómű alapjáraton való járatása után különböző időtartamokig történő meghatározott teljesítmény szinteken kell járatni, miközben a felterhelések és a leterhelések, valamint az utánégető működtetése előtt, meghatározott időben el kell indítani az adatrögzítést.

A mérési eredmények rögzítése tehát nem csupán egy diszkrét fordulatszám értéken történik, hanem a terhelési folyamatok változása során az adatrögzítő folyamatában rögzíti a hajtómű rezgéseit. A mérés alapjáratról 95%-os terhelésig való gyorsítási, utánégető üzemmódban, és alapjáratra történő lassítási fázisban történik. A gyorsítási és lassítási folyamatok alatt a mérést végző személy rádióon tartja a kapcsolatot a repülőgép fülkében ülő kezelővel.

A mérés során a rezgésebesség effektív értékét rögzíti a berendezés, a mérési frekvenciatartomány azonban nincs megadva. Az adatrögzítő csak a különböző felterhelési és leterhelési állapotokhoz tartozó maximális rezgésebesség mérési eredményeket (overall értékeket) jeleníti meg képernyőn, majd a mérési adatok számítógépbe való visszatöltése után a az üzeml-
 állapotoknak megfelelő terhelés függvényében skálázott rezgésvaltozási grafikont készít. Erre a grafikonra példát az 5.8. ábrán láthatunk.

A mérési eredmények kiértékelése is tulajdonképpen ezen adatokból történik oly módon,



5.8. ábra A ventilátor csapágyázáson (FrontFrame) mérhető rezgésebesség változás a terhelés % függvényében, gyorsítási üzemmódban

hogyan a különböző mérési helyekhez megadják azokat a maximális rezgésszint értékeket, amelyek a nem megfelelő üzemállapotra utalnak. Ezeket a maximális értékeket mérés közben is figyelemmel lehet kísérni.

Tekintettel a magas fordulatszámú üzemelő nagy tömegű alkatrészekre a repülőgépen képződő rezgésebbesség szintek a normál gépekhez viszonyítva nagyon magasak, így a megengedhető értékek is sokkal magasabb rezgésszintet engednek meg. A megengedhető értékek nagysága természetesen függ a rezgésmérés helyétől, de függ a felterhelési, illetve leterhelési üzemállapottól is, mivel eközben jelentősen változik a berendezés fordulatszáma. A megengedhető értékeket csak az adott mérési pontra vonatkozó gyorsítási, vagy lassítási üzemre lehet vonatkoztatni. Tájékoztató adatként a megengedhető rezgésebbesség szintek 35 mm/sec, illetve 60 mm/sec közötti tartományban változhatnak. A repülőgép maximálisan megengedhető rezgésebbesség szintje 75 mm/sec, amennyiben a rezgések ezt a veszélyesen magas szintet bármilyen üzemmódban elérik, a mérést meg kell szakítani és a hajtóművet le kell állítani.

Az RM 12 B hajtómű vizsgálatánál alkalmazott rezgésmérési módszer értékelése:

A mérési módszer és a hozzá tartozó mérőrendszer természetesen a hajtómű előre tervezett várható meghibásodásainak függvényében került kialakításra. Mivel a repülőgépen nincs telepített rezgésfigyelő rendszer, ezért ez az időszakos vizsgálati módszer mindenképpen hasznos abból a szempontból, hogy legalább a repülőgépet érintő különleges esetekben képet ad a hajtómű műszaki állapotáról.

A módszer előnye, hogy a valós repülési helyzetet megközelítő gyorsítási és lassítási és „teljes utánégetési üzemben” (max. terhelésnél) ad információt a hajtómű rezgésállapotáról.

Jelenleg mind a rezgésmérést, mind a kiértékelést és javítást a magyar karbantartó alegység végzi. A rezgésvizsgálat adatait számítógépen rögzítik, amennyiben a rezgésértékek elérik, vagy megközelítik a megengedhető értékeket a műszaki „hotline” vonalon segítséget kérhetnek, illetve ez esetben a rögzített adatokat elküldik a gyártóműnek. Ilyen esetben a mérési eredmények ismeretében a karbantartási intézkedésekre gyár tesz javaslatot, de a felelősség a magyar karbantartóké.

A magyar karbantartó személyzet számára ez a rendszer azért okoz nehézségeket, mert sok esetben a határértékek közelében lévő mérési eredmények alapján is megadják a felszállási engedélyt, a pilóta esetenként a normálnál magasabb rezgéseket tapasztal a felszállás után.

A helyszínen dolgozó üzemeltető személyzettel készített interjúk szerint, a magas, a maximális értéktől csak egy-két mm/sec értékkel alacsonyabb rezgésmérési eredmények bizonytalanná tehetik a repülési körülményeket.

A gyártó az elmúlt időszakban több mérési pont tekintetében több mint 10%-kal megemelte a megengedhető rezgésszintet. Ez az intézkedés arra utal, hogy az előzőleg veszélyesnek értékelt tartomány a biztonságos működési sávba került. A repülőgépek rezgései viszont nem csökkentek. Ez ellentmondást jelent, hiszen, ami egy évvel ezelőtt veszélyes volt, az mára nem jelenthet megfelelő állapotot.

A jelenleg alkalmazott módszer hátrányaként azt lehet még megemlíteni, hogy a rezgésmérést nem rendszeresen, hanem esetlegesen végzik, a pilóták jelzései alapján, illetve csak a hajtómű részegység cseréket követően kötelező a rezgésmérés és a hajtómű próba.

Ezen információk ismeretében a Gripen repülőgép hajtóművek üzembiztonságának növelése érdekében határoztam el, hogy az iparban hatékonyan alkalmazott mozgás-animációs módszerrel e területen alternatív rezgésmérési lehetőséget dolgozok ki.

V.4. Esettanulmány a MIG-29 B típusú vadászrepülő RD33 típusú hajtóművének rezgésvizsgálatáról

A mozgás-animációs módszer első lépése, amint azt a IV. fejezetben ismertettem, a vizsgálati fordulatszámok megtervezése. Annak bizonyítása érdekében, hogy a hajtómű rendellenes működésére utaló rezgés amplitúdók kimutathatók, rezgésmérést kellett végezni egy vadászrepülőgépen. Sajnos az érvényben lévő államközi szerződések alapján a JAS 39 Gripen vadászrepülőn semmilyen kísérlet, illetve az üzemeltetési szabályzatba nem tartozó tevékenység nem hajtható végre, csak a gyártómű engedélyével. Mivel a SAAB Gripen gyártómű engedélyének megszerzésére idő és megfelelő kapcsolat hiányában nem volt lehetőségem, ezért az MH Repülőműszaki Szolgálatfőnök engedélye alapján az MH 59. Kecskemét Szentgyörgyi Dezső Repülőbázison MIG 29 B típusú repülőgépeken végeztem rezgésméréseket hajtómű próba alatt a hajtómű hibák rezgésspektrumban való kimutatása érdekében.

V.4.1. A mérési körülmények ismertetése

A vadászrepülőgépek üzemeltetési feladatait a kecskeméti repülőtéren látják el. Mivel a repülőgépek beszerzési ára és az óránkénti üzemeltetési költsége nagyon magas, a kutatási feladatok megvalósítását az alegység által tervezett karbantartási intézkedésekkel összhangban kellett elvégezni. Ez azt jelenti, hogy a helyszíni rezgésmérések elvégzésére csak olyankor nyílt lehetőségem, amikor egy repülőgépen hajtómű próbát hajtottak végre, amely

során a méréseket a különböző üzemállapotokban lehetett elvégezni. Ráadásul a repülőgépnek még valamilyen magas rezgés miatt létrejött műszaki problémával is rendelkeznie kellett, hiszen a hiba kimutatására csak ez által van lehetőség. Ennek megszervezése egy „civil” látogatónak nem egyszerű feladat, ezúton is köszönöm a karbantartó alegységben mindazoknak, akik ezt a konstellációt lehetővé tették. A vizsgált repülőgépen kétféle hibát tapasztaltak. Az egyik hiba az üzemanyagszint-jelző meghibásodása, a másik pedig a baloldali hajtómű magas rezgésszintje volt, a két hiba természetesen nem függött össze.

A MiG-29 B (UB) típus (5.9. ábra) beépített rezgésmonitorozó rendszerrel rendelkezik, amely mind a földi, mind a légi üzemeltetés során folyamatosan rögzíti a rezgésmérési adatokat. A repülőgép rendszereit felügyelő központi vezérlő egység e beépített rezgésvédelmi rendszernek a segítségével különbözteti meg a hajtómű jó és nem megfelelő üzemállapotait.

A kicserélt üzemanyag szintjelző ellenőrzését hajtómű próbával egybekötve földi körülmények között végzik. Ez teremtette meg a lehetőséget arra, hogy az egyébként magas rezgésen üzemelő berendezést földi körülmények között meg tudjam mérni. Meg kell jegyezni, hogy a méréskor a csapágyadatok, a fogaskerék áttételek sajnos nem álltak rendelkezésemre, mivel ezek csak a gépkönyvekben fellelhető információk.

A MiG-29 típusú repülőgép két RD 33 típusú hajtóművel rendelkezik. A hajtómű főbb műszaki adatai:

Tömege: 1150 kg

Hossza: 4240mm

Maximális átmérője: 930mm

Kétáramúsági fok: $m = 0,55$

Levegő tömegáram: $\dot{m} = 77 \text{ kg/sec}$

A teljes nyomásviszony: 21,7

A hajtóművek üzemi fordulatszám:

- alpjáraton kisnyomású forgórész: 4072 1/min = 67,86 Hz

- alpjáraton nagynyomású forgórész: 10 468 1/min = 174,46 Hz

- 85 % terhelésen kisnyomású forgórész: 9 078 1/min = 151,3 Hz (max. 178 Hz)

- 85 % terhelésen nagynyomású forgórész: 12 984 1/min = 216,4 Hz (max. 254,6 Hz)



5.9. ábra. MiG-29 UB repülőgép előkészítése hajtómű próbához

A két hajtómű működésének összehangolására, a segédberendezések meghajtására szolgál a két hajtómű között elhelyezkedő KSZA berendezés. A KSZA a repülőgép egyik legfontosabb mechanikus része, ennek segítségével biztosítják a gép hajtóműveinek indítását, valamint ez szolgál a repülőgép energiával való ellátására és hidraulikus egységeinek táplálására,

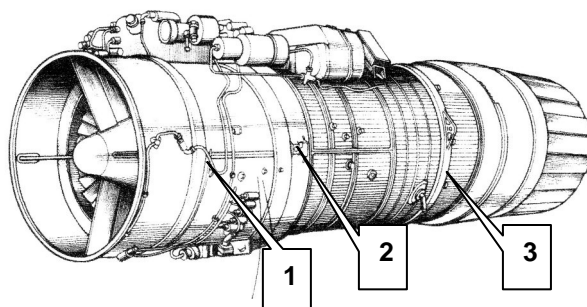
tehát a KSZA végzi a hidraulika szivattyúk meghajtását is. A KSZA egyik legkényesebb része a szögkihajtás, amellyel az üzemeltetők elmondása szerint már többször volt probléma.

A KSZA üzem közben a GSZR–SZT–12/40A generátorral, a GTDE indító hajtóművel, két darab NP–103A típusú hidraulika szivattyúval, a DCN–80 típusú tüzelőanyag szivattyúval, valamint a GP-21 meghajtással működik együtt. [113][114] A segédberendezések erre az egységre vannak felszerelve, (lásd 5.11. ábra) így működése létfontosságú a repülőgép üzemelése szempontjából. Nem véletlen tehát, hogy a hajtómű állapotfigyelésére szolgáló rezgésérzékelők a ventilátor és kompresszor figyelésen kívül a KSZA berendezés rezgéseit is figyelik.

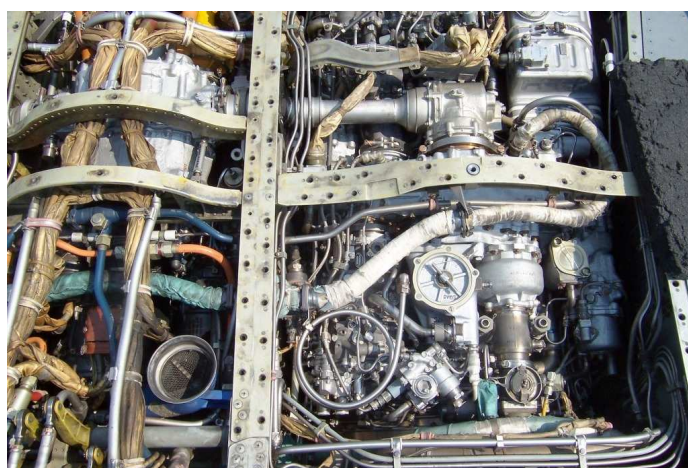
A repülőgép hajtómű vizsgálatára szintén az erre rendszeresített hajtómű vizsgáló állomáson került sor, melynek során a repülőgép mindkét hajtóművét álló helyzetben (a gép rögzítése mellett) lehet próbálni. A rezgésmérés során a következő mérési sorozatokat végeztem el:

1. jobb hajtómű alapjáraton
2. jobb hajtómű 85 %-os terhelésen
3. bal hajtómű alapjáraton
4. bal hajtómű 85 %-os terhelésen
5. két hajtómű együtt, alapjáraton
6. két hajtómű együtt, 85 % terhelés

A méréshez Microlog CMVA60 típusú rezgés-analizátort és CMSS 786M több-funkciós érzékelőt alkalmaztam. A rezgés-analizátorhoz tartozó Prism4 for Windows adatbázis kezelő és adatfeldolgozó szoftver segítségével a mérések előtt megterveztem a mérési útvonalat, amelyeket a hajtómű 5.10. ábrán látható sematikus rajzán jelöltem be. A méréseket alapvetően a három fő csapágyazási helyeken, valamint a KSZA berendezés szögkihajtásán és a szárnybekötési csomópontjaiban terveztem vízszintes (HOR) és függőleges (VER) mérési irányban. A szoftverben minden mérési jellemzőt egyedi azonosítóval láttam el, így a multiparaméteres rezgésvizsgálat során kapott különféle adatok elkülöníthetők. A mérési azonosítók az alábbi szerkezetben épülnek fel:



5.10. ábra Az RM 33 hajtómű és a hajtómű mérési pontjai



5.11. ábra A KSZA berendezés a szögkihajtással és a tüzelőanyag szivattyúval felülnézetből

- A jobb és bal oldalt, illetve az üzemállapotok mérését azonosítókkal különítettem el.
 - A könyvtárakon belül a mérési helyeket sorszámmal (1-3, 1K – 3K,) láttam el
 - Példa: 1 HOR ISO – az 1 mérési pont vízszintes ISO rezgéssebesség mérésére vonatkozik.
- A mérések tervezése után a mérési útvonalat a rezgés-analizátorba töltöttem, majd a helyszínen a tervezett mérési pontokon a különféle üzemállapotokban elvégeztem a rezgésméréseket.

Last Measurements							
ID	Units	Last Value	Detection	Lines	Frequency	Average	Window Type
Machine 85% BAL EGYEDUL							
B 85 1 HOR ISO	mm/sec	20.54	RMS	400	0 -1000 Hz	3	Hanning
B 85 1 HOR VEL	mm/sec	29.24	Peak	800	0 -12000 Hz	3	Hanning
B 85 1 HOR ACC	Gs	13.02	RMS	1600	0 -12000 Hz	3	Hanning
B 85 1 H ENV A	Gs Env	6.977	Peak	800	0 -5000 Hz	3	Hanning
B 85 1 HOR SEE	SEEs	32.69	Peak-to-Peak	800	0 -1000 Hz	3	Hanning
B 85 1 VER ISO	mm/sec	23.59	RMS	400	0 -1000 Hz	3	Hanning
B 85 1 VER VEL	mm/sec	33.74	Peak	800	0 -12000 Hz	3	Hanning

5.12. ábra Az 1-es mérési pont mérési eredményei és beállítási értékei a BAL hajtóművön 85% terhelésen

V.4.2. Mérési eredmények és kiértékelésük

Az előzőekben elmondottakból látszik, hogy a hatféle üzemállapotban csapágyanként hét féle mérést végeztem nyolc mérési pontban, tehát vizsgálatból nagy mennyiségű mérési adat keletkezett rezgésspektrum formájában, melyeket spektrum-analízissel értékeltem ki. A mérési helyek az alábbiak voltak :

1. Ventilátor csapágyazás (1 HOR,1VER)
2. Nagynyomású kompresszor és ventilátor között (2HOR,2 VER)
3. Kompresszor végcsap bekötés (jelölés 3 HOR, 3 VER)
4. Szárny bekötési pont (jelölés BEK 2 HOR, VER, AXI)
5. KSZA szögkihajtás hajtómű felől (jelölés KCA⁴² 1 HOR)
6. KSZA szögkihajtás KSZA felől (jelölés KCA 2 HOR)
7. KSZA testen rezgésérzékelő mellett (jelölés KCA 3 HOR)

A jobb és bal oldali hajtómű azonos mérési pontjain készített mérések teljes mértékben összehasonlíthatók mivel a mérés tervezésénél mindkét oldal azonos mérési pontját azonos mérési beállításokkal láttam el. A mérési beállításokra, valamint a mérési eredményekre példát az 5.12. ábrán láthatunk, de az összes eredményt az értekezés keretein belül ismertetni nem tudom. A nagy mennyiségű mérési adat sajnos még mellékletben sem férne el, ezért a szoftver által nyomtatott táblázatban a BAL hajtómű 85%-os terhelésén az 1-mérőpont eredményeit és műszer beállítási adatait láthatjuk. A spektrum analízis során vízszintes diagramok

⁴² KCA – csak rövidítés, a KSZA jelölésére használtam, nincs összefüggésben a hajtómű egyéb egységeivel.

segítségével megállapítottam a hajtóművek mérési pontjai közötti rezgéskülönbségeket, valamint elemeztem a két hajtómű azonos pontjain mérhető rezgésspektrumok különbségét is. Erre példát az 5.14. ábrán láthatunk.

A méréseket ipari rezgésmérési gyakorlatomra támaszkodva próbáltam meg kiértékelni, a rendelkezésemre álló viszonylag kevés információ alapján. Mivel fogaskerék, vagy áttétel adatok nem álltak rendelkezésemre, így a magas rezgésű hajtóművel és segédberendezésekkel kapcsolatos egyéb hibára utaló jeleket az eredmények alapján nem tudtam figyelembe venni.

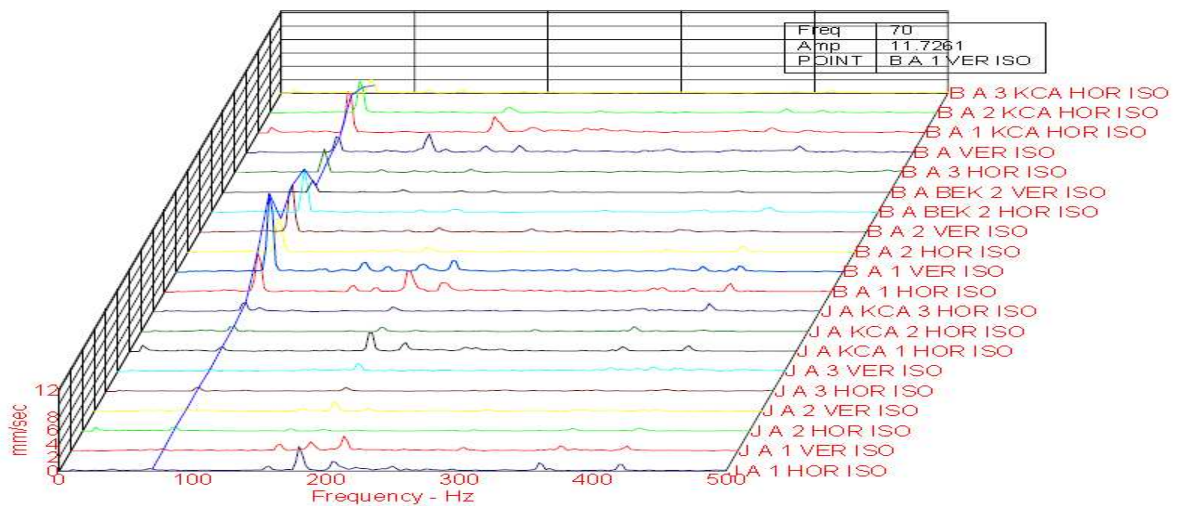


5.13. ábra A BAL oldali hajtómű legmagasabb rezgésebbesség értéke a ventilátor IVER mérési pontján

Megállapítások a mérések alapján:

- A spektrumok alapján megállapítható, hogy minden üzemmódban, minden mérési helyen a BAL oldali hajtómű rezgései magasabbak, a legmagasabb 23,5mm/s volt. lásd. 5.13.ábra.
- A legmagasabb amplitúdók alapján 67,5 Hz és 70 Hz frekvenciákon, 85 %-os terhelésen 147,5 Hz frekvencián tapasztalható, melyek mindkét hajtóművön, mindkét üzemállapotban a ventilátor csapágyazási helyén függőlegesen mérhető. lásd. 5.13.ábra. és 5.14.ábra.
- A spektrumokból megállapítható, hogy a hajtómű magas rezgését okozó meghibásodás minden üzemállapotban, alapján és 85%-on is a kisnyomású forgórész forgási frekvenciáján jelentkezik. Alapjáraton 67,5és 70 Hz körüli, 85%-os terhelésen pedig 147-149 Hz-es frekvencián találunk domináns amplitúdót a rezgésspektrumokban.
- A rendelkezésemre álló fordulatszám adatok és mérési eredmények alapján a kisnyomású forgórész kiegyensúlyozatlanságára utaló jeleket állapítottam meg, javaslatom az lett volna, hogy ellenőrizték a lapátok műszaki állapotát, nincs- e rajta törés, vagy repedés.

• Ez természetesen a karbantartóknak is eszébe jutott. Ők is gondoltak a hajtómű javításba küldésére, de csak a hajtómű próba után, mivel a próba előtt már megpróbálták a szokásos rutinműveletekkel megoldani a rezgésproblémát. Első lépésként megcserélték a KSZA szögkihajtás tengelyeit, de a rezgés erőssége nem csökkent. Mivel már volt példa a repülőgép rezgésérzékelőinek meghibásodására, ezért a rezgésérzékelőket is megcserélték egymással, de ez is hatástalannak bizonyult. Az ismételt hajtómű próbánál az egyik kolléga felfigyelt a maximális hidraulika nyomásra, ekkor állapították meg a ferde tárcsás hidraulika szivattyú vezérlésének hibáját, amely abban nyilvánult meg, hogy hidraulika rendszer nyomását mutató műszer mutatója a maximum érték környékén "ugrált". Az NP-103A típusú hidraulika szivattyú ferde tárcsáját állító automatika meghibásodott, a szivattyú tehermentesítő szelepe kinyitott, a szivattyú ferdetárcsáját maximum állásban megállította. A nyitott rendszerbiztosító szelep miatt szivattyúban a hidraulika olaj a fogyasztók fogyasztásának mértékében pulzált, és hidraulikus ütésekkel produkált az egész rendszerben. A szivattyú cseréje után a vadászgép rezgésmérő rendszere megfelelő értéket mutatott, a hiba oka tehát nagy valószínűséggel ez volt.

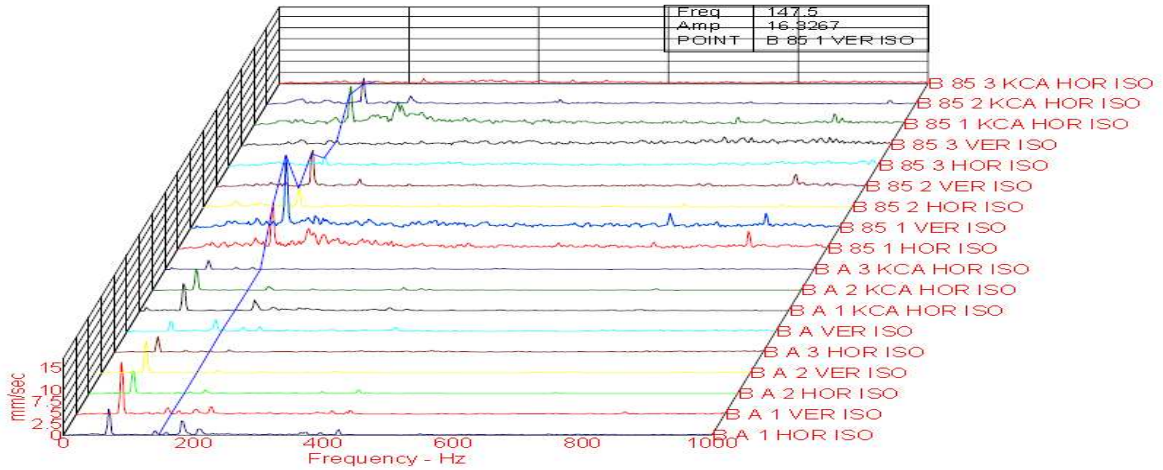


5.14. ábra A MiG 29 JOBB és BAL oldali hajtóművén mérhető rezgésebbesség RMS spektrumok összehasonlító "vizesés" diagramja (JA) és (B A jelöléssel) alapjáratú terhelésen

Következtetések a mérések alapján:

Annak ellenére, hogy a hibát nem én találtam meg, a rezgésmérésből két fontos következtetést vontam le. Egyrészt a célokat elértem, mert a hibára utaló magas rezgést, annak frekvenciáját és amplitúdóját ki tudtam mutatni, másrészt megismerkedtem a karbantartók lehetőségeivel és munkamódszereivel. Láthatóan támaszkodnak a MiG-29 vadászgépbe épített rezgésmérő rendszer adataira, amelyet a Gripennél nem tudnak megtenni csak, ha felszerelik a teljes mérőrendszert, ezen felül láthatóan azt tartják a leg hatékonyabbnak, ha egyből látják a beavatkozásuk hatását.

Mindezek alapján úgy gondolom, ha egy hajtómű rezgéseit a láthatóvá tehetném a számukra, akkor a tapasztalataikat a mérési eredményekkel összekapcsolva növelni lehetne a műszaki állapot pontosabb meghatározásának lehetőségét.



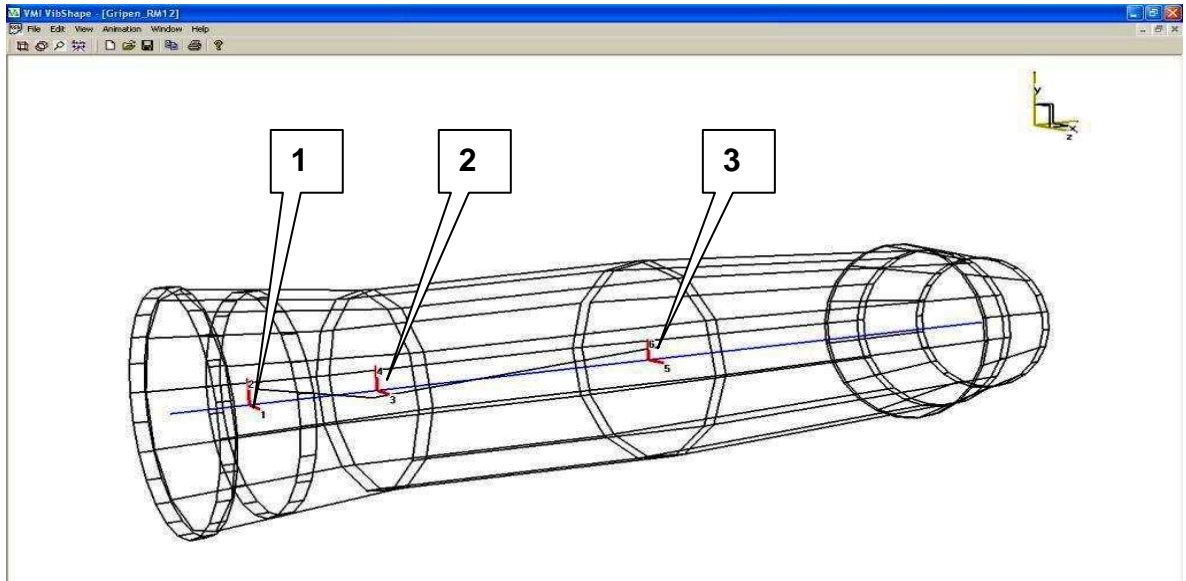
5.11. ábra A MIG 29 BAL oldali hajtóművén mérhető rezgésebbesség RMS spektrumok összehasonlító "vizesés" diagramja alpjáraton (BA) és 85% (B 85) terhelésen

V.5. Mozgás-animációs mérési módszer kidolgozása a Volvo RM 12B hajtómű diagnosztikai vizsgálatára

A JAS 39 Gripen vadászrepülőgép üzemeltetési és rezgésmérési gyakorlatának ismeretében, támaszkodva disszertációm IV. fejezetében kidolgozott eredményekre, melyek alapján a mozgás-animációs módszer alkalmazhatóságát bizonyítottam, javaslom a mozgás-animációs mérés bevezetését a vadászrepülőgép állapotfüggő karbantartási rendszerébe.

A mérés állapotfüggő karbantartásba való integrálására az alábbiakat javaslom:

- Rezgésanalízis szükséges a megengedhető értékek és hibafrekvenciák megállapításához
- Az érzékelő rögzítésére felfogató idomokat kell tervezni és alkalmazni.
- A fordulatszám és fázisszög mérése a repülőgép segédberendezés hajtás tengelyére ragasztott fényvisszaverő csík segítségével történhet, lásd 5.17.ábrán, ennek felragasztásához szükséges engedélyeket be kell szerezni.
- Vízszintes, függőleges és axiális méréseket kell végezni a Front Frame, Mid Frame, Rear Mount Ring és Aircraft Gearbox pontokon, így a térbeli mozgás láthatóvá tehető
- A mozgás-animációs vizsgálatot 50 óránként, illetve **minden hajtómű próbánál** javaslom elvégezni alpjáraton és maximális fordulatszámon a nagynyomású és kisnyomású forgórész forgási frekvenciáján
- A mérés tervezésében és kivitelezésében igény esetén szakértőként részt veszek



5.16. ábra A JAS-39 Gripen Volvo RM 12 B típusú hajtóművéhez készített mozgás-animációs modell a javasolt mérési pontokkal

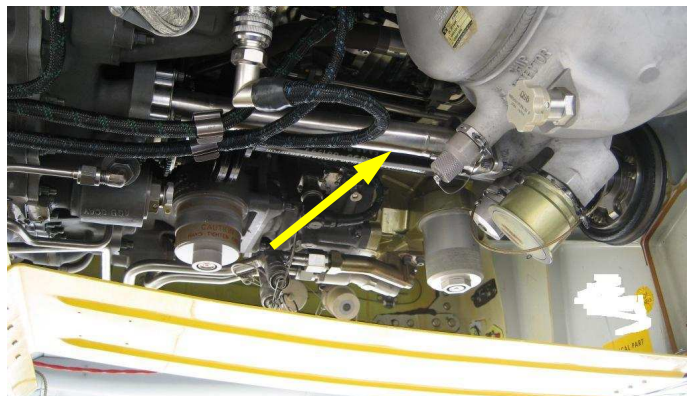
A mozgás-animáció által szolgáltatott előnyök értékelésénél a következő szempontrendszer átgondolását tartom szükségesnek :

A mozgás-animációs módszer eszközigénye az egyébként magas költségkeretek tekintetében nem jelentős

A rezgés spektrumokhoz, vízésés diagramokhoz képest a fázisszög helyesen elkészített mozgás-animációs mérések a térbeli mozgás láthatóvá tétele által a hibás területek és hibára utaló jelek könnyebb felismerhetőségét teszik lehetővé

A jelenlegi rendszer mérési eredményeiből megállapítható, hogy a legmagasabb rezgések általában a maximális fordulatszám on jelentkeznek, így ezen a fordulatszám on elkészített mozgás-animáció szemléletesebben, térben mutatja a hajtómű egyes részeinek mozgását.

Nagyon fontos információk lehetnek az egyes mérési pontok egy fordulat alatt egymáshoz képest történő elmozdulásai, amelyek láthatóvá teszik a hajtóműre üzemkőzben ható erőket.



5.17. ábra A fázis referencia jel javasolt elhelyezése a JAS-39 Gripen repülőgép segédhajtás áthajtó tengelyén

Mivel a IV. fejezetben a modell készítésének alapjait és részleteit áttekintettem, ezért az 5.16. ábrán csak a hajtómű arányos mozgás-animációs modelljét mutatom be mesterséges szimulációt alkalmazva a pontok mozgásainak szemléltetésére.

V.6. KÖVETKEZTETÉSEK

A vadászrepülőgépek folyamatos és biztonságos üzemeltetése a magyar honvédelmi szempontok tekintetében is kiemelt terület. Úgy gondolom, hogy minden többlet információ, amely a megbízhatóság növelését, a meghibásodások csökkentését eredményezi, a nemzetbiztonság érdekeit szolgálja. Szakmai szemmel úgy érzem, hogy mint minden működő gép vonatkozásában, a repülőtechnika tekintetében is szükséges a megelőző karbantartás folyamatos fejlesztése.

A reptéri hajtóműpróbák helyszínén szerzett rezgésmérési tapasztalataim megerősítettek abban a hipotézisemben, hogy az általam javasolt animációs módszer többletinformációval szolgálhat a repülőtechnika állapotfüggő karbantartásában.

Megállapíthatom a MiG 29-es vadászrepülőn végzett méréseimből, hogy a hibák kimutatására az egyszerűbb, az iparban rezgés analizátorok is alkalmasak, ugyanakkor kidolgoztam a lehetőségét annak, hogy a mozgás-animációt bevezetésre alkalmasnak találjam. A Gripen tekintetében sajnos a jelenleg érvényben lévő üzemeltetői szerződések miatt csak elméleti síkon tehetek fejlesztési javaslatokat.

ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK

A KUTATÁSI TEVÉKENYSÉG ÖSSZEGZÉSE

Témaválasztásomat az a mindennapokban, korszerű iparvállalati környezetben szerzett szakmai tapasztalat motiválta, amely a rezgésdiagnosztikával való első találkozásom óta meghatározó része az életemnek. Az üzemfenntartás és a karbantartás is olyan műszaki terület, amelynek szakértőjévé csak az válhat, aki valós, gyakorlati tapasztalattal rendelkezik. Számomra a csokoládégyáraktól az aszfaltkeverő üzemekig sok tízezer mért rezgés spektrum alakította ki azt az érdeklődést, melynek terméke disszertációmban bemutatásra kerül.

Oktatási munkám során számtalanszor szembesültem már az elmélet és a gyakorlat ismereteinek átadása körül jelentkező problémákkal. Meggyőződésem, hogy a gazdaságnak szüksége van jól képzett műszaki szakemberekre. Többször bebizonyosodott a labormunkák során, hogy az elméleti ismeretek demonstrációs eszközökkel való szemléltetése a műszaki képzésben elengedhetetlenül fontos. Pályafutásomat végigkísérte a szemléltető eszközök fejlesztése, így disszertációm egyik alappillére, az általam kifejlesztett WibroShoW próbapad. A próbapad azért egyedülálló, mert a modulrendszerű felépítése lehetővé teszi, hogy az ipari igények, az üzemeltetés során előforduló problémák széles skáláját szemléltetve a gyakorlatot integrálja a műszaki képzésbe. Sikere már az első konferencia-bemutatás után jelentkező ipari érdeklődésben is mérhető.

A WibroShoW próbapad egyrészt demonstrációs eszköz, amellyel megjeleníthetők a forgógépek hibái, másrészt vizsgálati modell, amelyen bizonyítható a mozgás animációs vizsgálat hatékonysága. Disszertációm III. fejezetében a próbapad alkalmazásával igazoltam a gépek üzemállapot változásainak diagnosztikai módszerekkel történő követhetőségét.

A rezgésmérés területe az iparvállalatok számára azért fontos terület, mert gazdasági szempontból jelentős költségmegtakarításokat eredményezhet. A folyamatos rendelkezésre állás nemcsak az ipari gépeknél, hanem a haditechnikai eszközök tekintetében is stratégiai fontosságú tényező. Kiemelten igaz ez a csúcstechnológiát képviselő vadászrepülőgépek üzemeltetése kapcsán. Kísérleteimet a Magyar Honvédség 59. Szentgyörgyi Dezső kecskeméti repülőbázisán végeztem, ahol lehetőségem volt MiG-29 B típusú vadászrepülő hajtómű meghibásodásának rezgésdiagnosztikai elemzésére, valamint a JAS-39 Gripen rezgésmérési rendszerének megismerése által egy olyan alternatív mérési módszer kidolgozására, amely lehetőséget teremt a hajtómű üzemállapotának meghatározására.

ÖSSZEFOGLALÓ VÉGKÖVETKEZTETÉSEK

Disszertációm célkitűzéseivel összhangban kutatómunkám értékeléseként az egyik legfontosabb tapasztalatom az, hogy a gépészmérnöki és diagnosztikai szakma elméleti ismeretekkel jól felkészített, gyakorlati tapasztalatokkal rendelkező műszaki szakemberekre számít a diagnosztikai és üzemeltetési feladatok megoldásában.

Ennek érdekében egyrészt a demonstrációs eszközök körében tettem új lépéseket a rezgésdiagnosztika területén, másrészt a diagnosztikai módszerek alkalmazási és fejlesztési lehetőségeit számomra új területen mértem fel.

Sikerült létrehoznom egy olyan új terméket, amely a meghibásodások széles skálájának modellezésére alkalmas, ezáltal több generáció tudását, mérnöki szemléletmódját képes fejleszteni.

Ipari és próbapadi mérési eredményeimen keresztül bemutattam azokat a rezgésmérési módszereket, amelyeket a gépek gyakorlati rezgésdiagnosztikai vizsgálatánál alkalmaznak. Ezek alapján megállapíthatom, hogy a gyakorlatban alkalmazott módszerek mind a mechanikus meghibásodások, mind a rejtett (felszín alatt kialakuló) csapágy tönkremenetelek, sőt, a kenési állapot romlásának előrejelzésére alkalmazhatók.

Napjaink korszerű hadviselésében a katonai műveletek alapvető eleme a légierő alkalmazása. A légierő által elvégezhető harcászati feladatok végeredménye azonban nagymértékben függ a haditechnikai eszközök megfelelő rendelkezésre állásától. A légierőnél rendszerbe állított vadászrepülőgépek csak a kor színvonalának megfelelő technológiák alkalmazásával lehetnek az ellenféllel szemben eredményesek. Az egyre bonyolultabb eszközök esetében azonban nem csak beszerzésük, hanem üzemben tartásuk is nagy ráfordítást igényel. Ezen üzemeltetési költségek csökkentését teszi lehetővé a mozgás-animációs rezgésmérési módszer, melynek gyakorlati alkalmazhatóságát kísérletekkel és valós berendezéseken végzett vizsgálatokkal egyaránt bizonyítottam. Ezek alapján a módszer megfelelő előkészítés, az alapállapot és a meghibásodási szimptóma rendszer kidolgozása esetén alkalmas a JAS-39 EBS HU típusú vadászgépek állapotfüggő karbantartásában való felhasználásra.

Mindezek figyelembevételével a rezgésdiagnosztikai vizsgálatok haditechnikai alkalmazásának kutatására vonatkozó kutatómunkám során elért új tudományos eredményeimet a kutatómunka téziseit az alábbiakban foglalom össze:

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK, TÉZISEK:

1. *Kifejlesztettem a WibroShoW modulrendszerű rezgésdiagnosztikai próbapadot, mely által korszerűsítettem a hazai rezgésdiagnosztika oktatás módszereit.*
 - a. Mérésekkel és az elkészített berendezéssel igazoltam, hogy a WibroShoW kísérleti modellként és demonstrációs eszközként is használható. Bizonyítottam, hogy hordozhatósága mellett, alkalmas a géphibák, a gépbeállítási, illetve komplex diagnosztikai módszerek szemléltetésére.
 - b. Igazoltam, hogy a könnyű szerelhetőség által gyorsan megvalósítható a jó és rossz műszaki állapotú alkatrészek cseréje. A modul rendszer lehetőséget teremt a műszaki állapotok közötti különbség, illetve a meghibásodások önmagukban, összetetten, vagy változó sorrendben történő szemléltetésére.
 - c. Bebizonyítottam, hogy a WibroShoW próbapadon végezhető rezgés-diagnosztikai vizsgálatok, mozgás-animációs kísérletek az ipari és a haditechnikai alkalmazásokban hasznosíthatók. A berendezésen igazoltam, hogy a próbapad olyan további széles körű fejlesztési lehetőséggel rendelkezik.

2. *Bebizonyítottam, hogy a mozgás animációs módszerekkel megjeleníthetők a forgógépek valóságos térbeli mozgásai, ezáltal alkalmas a gépészeti és haditechnikai berendezések műszaki állapotának megítélésére, az állapotváltozás követésére.*
 - a. A WibroShoW próbapadhoz fejlesztett háromtárcsás modullal bebizonyítottam, hogy a mozgás-animációval a fordulatszám változása, a rezonancia frekvencián történő üzemelés, vagy a tárcsákon okozott szándékos kiegyensúlyozatlanság által okozott állapotváltozást egyértelműen követhető.
 - b. Bebizonyítottam, hogy a mozgás-animációs módszer által szolgáltatott mérési eredmények, amelyek a vizsgált alkatrészek térbeli elmozdulását szemléltetik, a módszerrel a vadászpülögépek hajtóműveinek problémái (pl. kiegyensúlyozatlanság) kimutathatók, ezáltal lehetőséget teremt az üzemképtelenség, vagy a légi katasztrófa elkerülésére.

3. *Létrehoztam a JAS-39 Gripen RM12B hajtóművének mozgás-animációs modelljét, amelynek alkalmazásával a hajtómű fő részeinek mozgása, ezáltal a hajtómű műszaki állapotában beállt változások a helyszíni rezgésmérési eredmények alapján láthatóvá tehetők és elemezhetők.*

- a. A MiG-29 B vadászrepülőgépen a helyszíni rezgésmérésekkel bizonyítottam, hogy a hajtómű és közlőmű meghibásodásaira utaló amplitúdók a rezgésspektrumban kimutathatók, így meghatározhatók azok a hiba frekvenciák, amelyen a mozgás animációs vizsgálatot célszerű elvégezni
- b. Meghatároztam a mozgás-animációs vizsgálathoz szükséges mérési helyeket és mérési irányokat, amelyekkel az RM 12B hajtómű állapotváltozásainak hatása a mozgás-animációs modellben megjeleníthető.
- c. Bebizonyítottam, hogy az animáció a térbeli mozgás láthatóvá tételével lehetőséget teremt a meghibásodás helyének, irányának és súlyosságának azonnali elemzésére és dokumentálására.

A KUTATÓMUNKA EREDMÉNYEINEK GYAKORLATI HASZNOSÍTÁSI LEHETŐSÉGEI, AJÁNLÁSOK:

- A kutatás eredményeként kifejlesztett és létrehozott, tökéletesen működő WibroShow próbapad alkalmazását ajánlom az összes Magyar műszaki felsőoktatási intézménynek, mert segítségével az oktatók munkája megkönnyíthető, a rezgésdiagnosztika elméleti összefüggései gyakorlati példákkal jól szemléltethetők.
- A WibroShow próbapadot az Óbudai Egyetemen hasznosítjuk a karbantartás és rezgésdiagnosztika oktatásban.
- A WibroShow próbapad követendő példaként szolgál a rezgésdiagnosztika oktatásával foglalkozó magyar műszaki felsőoktatási intézmények részére. Igény esetén a rezgésmérő próbapad részükre legyártható.
- Igény esetén felajánlom a korszerű diagnosztikai módszerek és műszerek gyakorlati alkalmazásának oktatását a WibroShow próbapad segítségével a ZMNE üzemfenntartást oktató tanszékeinek.
- A próbapad hasznosítható a MH alegységeinél is a rezgésméréssel, karbantartással foglalkozó szakemberek gyakorlati képzésében.
- A próbapad hatékonyan alkalmazható ipari tréningeken a diagnosztikai módszerek oktatására ezért erre a területre is mindenképp ajánlom. Külön elismerést jelent, hogy a diagnosztika alkalmazásával és oktatásával foglalkozó SKF Svéd Golyóscsapágy Zrt. árajánlatkérésével benyújtotta igényét a prototípussal egyező példány megvásárlására, melyet országos szintű rezgésdiagnosztikai tanfolyamaikon kívánnak a gyakorlati oktatásban felhasználni.
- A mozgás-animációs kísérletek eredményei, valamint maga a mozgás-animációs módszer a repülőgép hajtóművek diagnosztikai vizsgálata mellett, hatékonyan alkalmazható a MH összes olyan alegységénél, amelyek forgó gépeket üzemeltetnek.
- A Gripen RM 12 hajtóművének mozgás-animációs modelljét a Magyar Honvédség 59. Szentgyörgyi Dezső kecskeméti repülőbázisán történő felhasználásra terveztem, ezért javaslom a mozgás-animáció gyakorlati részleteinek, az alapállapot és a különféle meghibásodásokra utaló szimptómarendszer kidolgozása után beépíteni a JAS-39 Gripen típusú vadászrepülőgépek állapot szerinti karbantartási rendszerébe.

Jelölés	Mértékegység	Megnevezés
$F(t)$		Valószínűség eloszlás függvény
$f(t)$		Valószínűség sűrűség függvény
$\lambda(t)$	%	Meghibásodási ráta
$g(t)$		Harmonikus rezgésfüggvény
A	$\mu\text{m}, \text{mm}, \text{mm/s}, \text{m/s}^2$	Rezgésamplitúdó
ω	1/s	Körfrekvencia
φ	°	Fázisszög
T	sec	Periódusidő
f	1/s, 1/min, Hz	Rezgésfrekvencia
m	kg	Rezgő test tömege
c	m/N	Rugóállandó
f_0	1/s, 1/min, Hz	Saját frekvencia
ω_0	1/s	Saját szögsebesség
A_{PTP}	$\mu\text{m}, \text{mm}, \text{mm/s}, \text{m/s}^2$	Csúcstól csúcsig amplitúdó
$g_{\text{normál}}$		A harmonikus rezgésfüggvény normál átlaga
$g_{\text{effektív}}$		A harmonikus rezgésfüggvény effektív átlaga
F_t		Formatényező
F_{cs}		Csúcstényező
k	Ns/m	Sebességarányos csillapítási tényező
ζ	1/s	Csillapítási tényező
D_L		Lehr-féle abszolút csillapítás
$Y_{(j\omega)}$		Gerjesztés frekvencia függvénye
A_1	$\mu\text{m}, \text{mm}, \text{mm/s}, \text{m/s}^2$	Gerjesztő amplitúdó
A_2	$\mu\text{m}, \text{mm}, \text{mm/s}, \text{m/s}^2$	A vizsgált rendszer amplitúdója
v		Nagyítási tényező
F_G	N	Gerjesztő erő
ω_{krit}	1/s	Kritikus szögsebesség
n_{krit}	1/min	Kritikus fordulatszám
x	μm	Rezgéskitérés
v	mm/s	Rezgésebbesség
a	$\text{m/s}^2, g$	Rezgésgyorsulás
F_c	N	Centrifugális erő
M_D	Nm	Deviációs nyomaték

Jelölés	Mértékegység	Megnevezés
Θ_x, Θ_z	Ns^2m	Tengelyre számított tehetetlenségi nyomaték
BPFO	Hz	Külső gyűrű hibafrekvencia
BPFI	Hz	Belső gyűrű hibafrekvencia
BSF	Hz	Gördülő elem hibafrekvencia
FTF	Hz	Csapágykosár hibafrekvencia
f_n	Hz	Gördülő csapágy saját frekvencia
Z_B	db	Gördülő elemek száma
D_B	mm	Gördülő elem átmérő
D_P	mm	Csapágy közepes átmérője
$n_{\text{belső}}$	1/min	Belső gyűrű fordulatszáma
$n_{\text{külső}}$	1/min	Külső gyűrű fordulatszáma
Θ	°	Érintkezési szög
GMF	Hz	Fokkapcsolódási frekvencia
BPF	Hz	Lapát áthaladási frekvencia
F_{SZ}	Hz	Ékszíjhajtás szíjfrekvenciája
F_{FGSZ}	Hz	Fogazott szíj fogfrekvenciája
F_L	Hz	Lánchajtás frekvenciája
n_{TH}	1/min	Ékszíz hajtó tárcsa fordulatszáma
n_{FT}	1/min	Fogazott tárcsa fordulatszáma
n_{LK}	1/min	Lánchajtó tárcsa fordulatszáma
D_{TH}	mm	Hajtótárcsa átmérője
L_{SZ}	mm	Ékszíz hossz
Z_{FT}	db	Fogazott tárcsa fogszáma
Z_{LK}	db	Lánckerék fogszáma
F_{SZN}	1/min	Szinkronfordulatszám
F_P	Hz	Pólus áthaladási frekvencia
F_{LH}	Hz	Hálózati frekvencia
p	db	Pólusszám
r		Helyvektor
$s(t)$		Út - idő függvény
q_{pMIN}	gr	Minimális próbatömeg
r	mm	Próbatömeg felerősítési sugár
V_{REF}	mm/s	Rezonancia maximális rezgésebbessége

IRODALOMJEGYZÉK

Hivatkozott irodalom

- [1] Tóth András : JAS-39 Gripen EBS HU többfeladatú vadászpilóta nélküli repülőgépek
Repüléstudományi Közlemények Különszám „Fél évszázad forgószárnyakon a magyar katonai repülésben ” Szolnok, 2005. április 15.
- [2] CH. Eichler: A karbantartás tervezése
Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1982. pp. 15. – 16.
- [3] Szerk. Dr. Janik József: Gépjárműkarbantartás I. Főiskolai jegyzet
Főiskolai Kiadó, Dunaújváros 2000. p. 6.
- [4] Dr. Janik József: Gépjárműkarbantartás I.
Szaktudás Kiadó Ház, Budapest, 2003. pp. 12 - 13
- [5] Dr. Vermes Pál : Gazdaságosság a gépjárműkarbantartásban – elvek és módszerek
Gépjárműjavítástechnológia, 1992. 7-8. GTE, Budapest, 1992. pp. 302-308
- [6] Prof. Dr. Turcsányi Károly: SEGÉDANYAG az I. évfolyamos PhD hallgatók szigorlati felkészüléséhez (Katonai műszaki ismeretek I.) Haditechnika. ZMNE, 2002 pp. 1-2.
- [7] Prof. Dr. Turcsányi Károly: ref. [6] p. 3.
- [8] Cs. Nagy Géza : Új kihívások a Magyar Honvédség gépjármű technikai eszközeinek üzemfenntartási tevékenységeiben GTE GÉP LX. évf. 2009. 4-5. Budapest, pp. 57- 61
- [9] Prof. Dr. Turcsányi Károly: ref. [6] pp. 6 – 7.
- [10] Prof. Dr. Turcsányi Károly: Üzemfenntartás elmélet és módszertan (ábrák, vázlatok és komp.) Tananyag a ZMNE PHD képzésében, 2000. p.12.
- [11] Gáspár Tibor: A fegyverzeti, a technikai és az anyagi szolgálatok integrációjáról
Hadtudomány folyóirat, 1992/3-4. sz. 60-70. oldal
- [12] Szerk. Dr. Janik József: ref. [3] pp. 19-20.
- [13] Dr. Janik József: ref. [4] pp. 24 – 27.
- [14] Gaál Z. – Kovács Z.: Megbízhatóság – Karbantartás
Veszprémi Egyetemi Kiadó, Veszprém, 1994. ISBN 963 733226X pp. 11-18.
- [15] Dr. Janik József: ref. [4] pp. 28 – 31.
- [16] Prof. Dr. Turcsányi Károly: ref. [10] pp. 26 – 41.
- [16] Dr. Janik József: ref. [4] pp. 39 – 45.
- [17] Szerk. Dr. Janik József: ref. [3] pp. 50-57.
- [18] Dr. Szánó Jenő : Karbantartási stratégiák és filozófiák
KAJAOK Konferencia 2009.jan 29-30. Nyíregyháza PowerPoint előadás
- [19] Dr. Fazekas Lajos - Dr. Pálincás István: Karbantartás, tribológia és az alkatrész-felújítás kapcsolata. GTE GÉP különszám LX. évf. 2009. 4-5. Budapest, pp. 62- 65.
- [20] DIN 31051 szabvány – Instand Haltung. Begriffe und Massnahmen
- [21] Lipovszki Gy.– Sólyomvári Gy. – Varga J.: Gépek rezgésvizsgálata és a karbantartás
Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1981. pp. 12.-17.
- [22] Szerk. Dr. Dömötör Ferenc: Rezgésdiagnosztika I. kötet
Dunaújvárosi Főiskola Kiadói Hivatala, Dunaújváros 2008. pp. 8.-17.
- [23] C.Scheffer-P.Girdhar: Practical Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance
Verlag: Newnes (30. September 2004) pp. 1-5.
- [24] Prof. Dr. Turcsányi Károly: ref. [10] pp. 49 – 52.

- [25] Szerk. Dr. Dömötör Ferenc : A rezgésdiagnosztika elemei
SKF Svéd Golyóscsapágy Rt., Budaörs, 1996. pp. 26.-31.
- [26] Dr. Péceli György: A karbantartás korszerű irányzatai
Karbantartás & Diagnosztika, AA Stadium Kft. kiadványa Szeged, 2002/9 pp. 12-19.
- [27] Dr. Szántó Jenő: Megbízhatóság alapú karbantartás
Előadás Nemzetközi Karbantartási Konferencia, Veszprém, 2001.
- [28] Dr. Düll Sándor: Gépjármű állapot ellenőrzése állapotfüggő rendszerek megválasztása
Karbantartás & Diagnosztika, AAA Stadium Kft. kiadványa Szeged, 1996/2. pp. 2.-7.
- [29] Pék Katalin: A CMMS bevezetése a gyakorlatba
Karbantartás & Diagnosztika, AA Stadium Kft. kiadványa Szeged, 2000/4 pp. 5-11.
- [30] Baksai G. – Csete L.- Dr. Nagy I. – Pap N. – Kertay N. : „CORIM” állapotfüggő és kockázat alapú karbantartást segítő rendszer
Magyar Karbantartási Konferencia, Dunaújváros, 2010. aug. 30-31.
- [31] Baksai G. – Kungl I.- Dr. Nagy I. – Pap N. – Kertay N. : E-maintenance tanácsadó rendszer felépítése és eredményei
Magyar Karbantartási Konferencia, Dunaújváros, 2010. augusztus 30-31.
- [32] Makhult Mihály: Gépjárművek rezgéstani méretezése
Akadémiai Kiadó, Budapest, 1974. pp. 27.- 28.
- [33] MAGYAR SZABVÁNY – MSZ ISO 2041 - 1995
Rezgés és lökés. Fogalom meghatározások ETO 534.1/2:621-752:001.4
- [34] Dr. Ludvig Győző: Gépek dinamikája
Műszaki Könyvkiadó, 1973. pp. 80.-81.
- [35] Szerk. Dr. Dömötör Ferenc: ref. [22] pp. 71.- 76.
- [36] Dr. Ludvig Győző: ref. [34] pp. 140.-144
- [37] Makhult Mihály: ref. [32] p.38.
- [38] Dr. Ludvig Győző: ref. [34] pp. 398.- 400.
- [39] cm5003.pdf SKF Vibration Guide-12007 AB SKF Letöltés dátuma: 2010.10.20.
http://iis.apitudexchange.com/inquire/psp/DisplayQA.aspx?segment=MISCELLANE OUS&filename=q200603_como_eabd0ff2575e37ff88257139007d4264.html
- [40] Azima DLI provides products and services for Predictive Maintenance including vibration analysis instruments, monitoring and diagnostic software, and consulting for CBM programs.Part: The Fast Fourier Transform 2009 - Azima DLI Letöltés dátuma: 2010.10.20. <http://www.dliengineering.com/vibman/default.htm>
- [41] Azima DLI ref. [40] Part: The Vibration Test and Analysis Guide (VTAG)
- [42] Dennis Shreve: Rezgésanalízis: alapok
A.A.Stádium Kft, Karbantartás & Diagnosztika, II. évf. 4. szám, 1995. dec. pp.4.-9.
- [43] Azima DLI ref. [40] Part: Vibration Units, Displacement, Velocity and Acceleration
- [44] Dr. Nagy István: Állapotfüggő karbantartás Műszaki Diagnosztika I.,
Rezgésdiagnosztika Delta-3N Kft. 2006. pp. 20.- 25.
- [45] Azima DLI ref. [40] Part: The Concept of Phase
- [46] Dennis Shreve: Jelfeldolgozás a hatékony rezgésanalízisben
A. A. Stádium Kft. Karbantartás & Diagnosztika, III. évf. 4. sz. 1996. dec. pp.28.-38.
- [49] Cornelius Scheffer - Paresh Girdhar: ref. [23] pp. 35-37.
- [50] 2007 AB SKF : ref [39] cm5003 vibration guide-1

- [51] Dr. Nagy István: ref. [44] pp. 67.- 71.
- [52] Brüel & Kjær Vibro: Measurement techniques
<http://www.bkvibro.com/Main/Monitoring+Solutions+%26+Applications/Measurement+Techniques/Measurement+Techniques> Letöltés dátuma: 2010.10.20.
- [53] Cornelius Scheffer - Paresh Girdhar: ref. [23] pp. 29-30.
- [54] Rahne Eric: ICP érzékelők felépítése
PIM Kft. Kiadványa 2004.
http://www.pim-kft.hu/szakmai_anyagok Letöltés dátuma: 2010.10.20.
- [55] Brüel & Kjær Vibro: Acceleration+Sensors
<http://www.bkvibro.com/Main/Products+%26+Services/Sensors+%26+Accessories/Accelerometers/Acceleration+Sensors++Standard> Letöltés dátuma: 2010.10.20.
- [56] Rahne Eric: Digitális mérőlánc elemei
http://www.pim-kft.hu/szakmai_anyagok Letöltés dátuma: 2010.10.20.
- [57] Rahne Eric: Aliasing szűrők alkalmazása
http://www.pim-kft.hu/szakmai_anyagok Letöltés dátuma: 2010.10.20.
- [58] Azima DLI ref. [40] Part: Aliasing
- [59] Azima DLI ref. [40] Part: The Fast Fourier Transform
- [60] Szerk. Dr. Dömötör Ferenc: ref. [22] pp. 169.- 176.
- [61] J.T. Broch: Vibration measurements
Brüel & Kjaer, 1976. pp. 32.- 38.
- [62] Azima DLI ref. [40] Part: Averaging
- [63] James E. Berry: Proven method for specifying both 6 spectral alarm bands as well as narrowband alarm envelopes using today's predictive maintenance software systems
Technical Associates Of Charlotte, Inc. 1992. 1-3 pp.10.-11.
- [64] CMVA60 Microlog, Adatgyűjtő/Elemző
Kezelési utasítás SKF Condition Monitoring Inc., San Diego, 1999
- [65] ISO 10816-1 – International Standard: Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts
Reference number: ISO 10816-1:1995/Amd.1:2009(E)
- [66] ISO 10816-2 – International Standard: Reference number: ISO 10816-2:2009(E)
Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts Land-bases steam turbines and generators in excess of 50 MW with normal operating speeds of 1 500 r/min, 1 800 r/min, 3 000 r/min and 3 600 r/min
- [67] ISO 10816-3 – International Standard: Reference number: ISO 10816-3:2009(E)
Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15 000 r/min when measured in situated
- [68] Early Warning Fault Detection in Rolling Element Bearings Using Microlog Enveloping 2006 AB SKF Letöltés dátuma: 2010.10.20.
http://iis.aptitudexchange.com/inquire/psp/DisplayQA.aspx?segment=MICROLOG&filename=q200602_como_2f0959103d7d2b228825711e00574eec.html
- [69] What Are Enveloping and SEE? 2007 AB SKF Letöltés dátuma: 2010.10.20.
http://iis.aptitudexchange.com/inquire/psp/DisplayQA.aspx?segment=MICROLOG&filename=q200602_como_2f0959103d7d2b228825711e00574eec.html
- [70] Gergely Mihály: Csapágyállapot, csapágyalkalmasság gyakorlati diagnosztikája

- Diagnosztika 2001. IX. Nemzetközi Diagnosztikai Konferencia és Szakkiállítás, Hajdúszoboszló, 2001.
- [71] EasyViber Felhasználói kézikönyv
PIM Professzionális Ipari Méréstechnika Bt., 2002. május pp. 68.-74.
- [72] A MICROLOG ADATGYŰJTŐK – Gyors kezdés kézikönyv
1992 SKF Condition Monitoring Inc., San Diego pp. 2-3. – 2-18
- [73] James E. Berry: Proven method for specifying both 6 spectral alarm bands as well as narrowband alarm envelopes using today's predictive maintenance software systems
Technical Associates Of Charlotte, Inc. 1992. 1-3 p.25.
- [74] Dr. Nagy István: ref. [44] pp. 156 - 158.
- [75] Szerk. Dr. Dömötör Ferenc : ref. [25] pp. 45.-47.
- [76] Rahne Eric: Rezgésszint értékelés (ISO)
PIM Kft. Kiadványa 2004. <http://www.pim-kft.hu/szakmai anyagok>
- [77] Dr. Nagy István: ref. [44] pp. 172 – 178.
- [78] Szerk. Dr. Dömötör Ferenc: ref.[22] pp. 309 – 313.
- [79] A MICROLOG ADATGYŰJTŐK – ref [72] Gyors kezdés kézikönyv pp. 2-22. – 2-28
1992 SKF Condition Monitoring Inc., San Diego
- [80] Cornelius Scheffer - Paresh Girdhar: ref. [23] pp. 90 - 94.
- [81] James E. Berry: Proven method ... ref [63] pp.2.-8.
- [82] James I. Taylor: The Vibration Analysis Handbook – A Practical Guide for Solving Rotating Machinery Problems, pp.119 – 120.
Published by Vibration Consultants, Inc., Tampa 2000.
- [83] Dr. Nagy István: ref. [44] pp. 179 – 185.
- [84] Szerk. Dr. Dömötör Ferenc: ref.[22] pp. 316 – 319.
- [85] James I. Taylor: The Vibration.... Ref. [82], pp.125 – 130.
Published by Vibration Consultants, Inc., Tampa 2000.
- [86] Cornelius Scheffer - Paresh Girdhar: ref. [23] pp. 105 - 108.
- [87] Dr. Nagy István: ref. [44] pp. 205 – 207.
- [88] Péczely György: Gördülőcsapágyak rezgésvizsgálata különös tekintettel a kenettségi állapotra
Karbantartás & Diagnosztika, II. évf. 4. szám, 1995. december pp.22-27
Kiadja: A. A. Stádium Kft.
- [89] REZGÉSDIAGNOSZTIKA Haladóknak II. rész pp.8-1 – 8-15.
SKF, Budapest, 1992.
- [90] James I. Taylor: The Vibration.... Ref. [82], pp.167. – 178..
Published by Vibration Consultants, Inc., Tampa 2000.
- [91] Rahne Eric: Csapágyhiba-rezgésanalízis
PIM Kft. Kiadványa 2004. <http://www.pim-kft.hu/szakmai anyagok>
- [92] Berry, J. E. Predictive Maintenance and Vibration Signature Analysis I. – III. Technical Associates of Charlotte, P. C. USA.
- [93] Stuart Courtney : A Spike Energy™ (gSE) mérése értelmezése
Karbantartás & Diagnosztika, V. évf. 3. szám, 1998. szept. Kiadó: A. A. Stádium Kft.
- [94] Rahne Eric: Fogaskerékajtások analízise
PIM Kft. Kiadványa 2004. <http://www.pim-kft.hu/szakmai anyagok>

- [95] REZGÉSDIAGNOSZTIKA Haladóknak I. rész pp. 5-20 – 5-50.
SKF, Budapest, 1992.
- [96] Dr. Nagy István: ref. [44] pp. 221. – 230..
- [97] Azima DLI ref. [40] Part: The Vibration Test and Analysis Guide (VTAG)
- [98] Rahne Eric: Géprezgések spektrumelemzése
PIM Kft. Kiadványa 2004. http://www.pim-kft.hu/szakmai_anyagok
- [99] REZGÉSDIAGNOSZTIKA Haladóknak I.ref. 95. pp. 4-30 – 4-42.
SKF, Budapest, 1992.
- [100] Michael Norton – Denis Karczub: Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers Second edition, Cambridge University Press, New York 2003 pp. 110-115-
- [101] Szerk. M. Csizmadia Béla – Nándori Ernő MOZGÁSTAN mechanikai mérnököknek
Nemzeti Tankönyvkiadó, 1997. pp.26 – 43.
- [102] EasyViber Felhasználói kézikönyv ref.71. pp. 77 – 82.
- [103] Vibshape Manual Használati utasítás, VMI AB, Norrköping, 2002
- [104] Szerk. M. Csizmadia Béla – Nándori Ernő Modellalkotás mechanikai mérnököknek
Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2003. pp.23-47.
- [105] Rahne Eric: Gépszerkezetek mozgás-animációs vizsgálata
PIM Kft. Kiadványa 2004. http://www.pim-kft.hu/szakmai_anyagok
- [106] Peták, Gy. – Szabó, J. A Gripen. Petit Real könyvkiadó, Budapest, 2003.
- [107] Paul Jackson Jane's All the World's Aircraft 2000-2001.
- [108] Dr. Peták, Gy. A repülőtechnika üzemeltetése és javítása. Főiskolai jegyzet.
- [109] Szerk. Prof. Turcsányi Károly: HADITECHNIKAI ISMERETEK I. (tansegédlet a PhD képzésben résztvevők részére) Budapest ZMNE, 2004.
- [110] Farkas Gábor: JAS 39 Gripen – a Magyar Légierő lehetséges váltótípusa
Járművek, építőipari és mezőgazdasági gépek 42.évf. 1995. 10.sz. pp.345-355.
- [111] Tóth András: Gripen – új technológia a Magyar Honvédségben
Repüléstudományi Közlemények Különszám, Szolnok, 2006. április 21
- [112] Gripen News, The magazine of Saab-BAE Systems Gripen AB, June 2001.
- [113] Békési, B. Az üzemeltető szervezet és tevékenysége.
Repüléstudományi Közlemények, Szolnok, 2006/1.
- [114] Békési Bertold: A katonai repülőgépek üzemeltetésének, a kiszolgálás korszerűsítésének kérdései PHD értekezés, Budapest, ZMNE, 2006.
- [115] Gripen Fatigue and Damage Tolerance Management. Saab Military Aircraft, 39AA09Bis:001 IssueB.

SAJÁT TUDOMÁNYOS ÉS PUBLIKÁCIÓS TEVÉKENYSÉG JEGYZÉKE
Szabó József Zoltán

[S1] Szerk: Dr. Dömötör Ferenc : Rezgésdiagnosztika I. Főiskolai tankönyv 4. fejezet (Rezgésmélelet) Dunaújváros 2008. pp.71. – 100.

[S2] Szerk: Dr. Dömötör Ferenc : Rezgésdiagnosztika II. Főiskolai tankönyv 22. fejezet (A helyszíni rezgéscsökkentés eszközei) Dunaújváros 2010. **megjelenés alatt**

[S3] Szerk: Dr. Dömötör Ferenc : Rezgésdiagnosztika elemei Könyv, SKF Svéd Golyóscsapágy Rt. Kiadványa, Budaörs, 1996. 4. fejezet (Forgógépek beállítási problémái) pp.117-135.

[S4_A] Dr. Kégl Tibor - Szabó József: Műszaki diagnosztika
BDMF főiskolai jegyzet, 1993. 2. kiadás 2002, L-253. pp. 9.-12.

[S4_B] Dr. Kégl Tibor - Szabó József: ref. [S4_A]. pp. 19.-22.

[S4_C] Dr. Kégl Tibor - Szabó József: ref. [S4_A]. pp. 31.-64.

[S4_D] Dr. Kégl Tibor - Szabó József: ref. [S4_A]. pp. 67.-76.

[S4_E] Dr. Kégl Tibor - Szabó József: ref. [S4_A]. pp. 97.-101.

[S4_F] Dr. Kégl Tibor - Szabó József: ref. [S4_A]. pp. .110-115.

[S5] Dr. Kégl Tibor - Szabó József Zoltán: Korszerű diagnosztikai módszerek
Dunaújvárosi Főiskolai Jegyzet, 1995.

[S6] Szabó József Zoltán

Az akusztikus emisszió és ipari alkalmazásai

Borsodi Műszaki Gazdasági Élet 1994. 1-2. szám, kiadja: Műszak és Természettudományi Egyesületek Szövetsége BAZ megyei Egyesületi Szervezetek Szövetségi Tanácsa, Miskolc, 1994., pp. 65 – 74.

[S7] Szabó József Zoltán – Dr. Kégl Tibor

A tengelybeállítás korszerű eszközei

Gépgyártástechnológia, 1994. I – II. szám, kiadja: Gépipari Tudományos Egyesület, Budapest, 1994. pp. 65 – 74.

[

S8] Szabó József Zoltán – Dr. Kégl Tibor

A tengelybeállítás korszerű eszközei

Borsodi Műszaki Gazdasági Élet, 1994. 1.-2. szám, kiadja: Műszak és Természettudományi Egyesületek Szövetsége BAZ megyei Egyesületi Szervezetek Szövetségi Tanácsa, Miskolc, 1994., pp. 65 – 74.

[S9] Dr. Kégl Tibor – Szabó József Zoltán

A rezgésméréssel történő kiegyensúlyozás korszerű módszerei

Gépgyártástechnológia, 1994. 5.–6. szám. Kiadó: Gépipari Tudományos Egyesület, Budapest, 1994. pp. 203-211,

[S10] Dr. Kégl Tibor – Szabó József Zoltán

A rezgésméréssel történő kiegyensúlyozás korszerű módszerei

Járművek, építőipari- és mezőgazdasági gépek, 1995. II.

Kiadó: Gépipari Tudományos Egyesület, Budapest, 1995.,pp. 73 – 81.

- [S11] *Szabó József Zoltán*
Rezgéscsökkentő eljárások alkalmazása forgórészek helyszíni kiegyensúlyozásával
Bólyai Szemle 2004/4. Kiadó: Bólyai Szemle Szerkesztősége, Budapest, 2004., pp. 204 – 223. (ISSN: 1416-1443)
- [S12] *Szabó József Zoltán*
Termográfia és rezgésmérés a megelőző karbantartásban – a komplex diagnosztika előnyei (lektorált magyar nyelvű cikk) GTE GÉP folyóirat Különszám 2006. július
- [S13] *Szabó József Zoltán*
Modul rendszerű rezgésdiagnosztikai próbapad fejlesztése
GTE GÉP 2010. **megjelenés alatt**, várható megjelenés 2010., Gépipari Tudományos Egyesület, Budapest
- [S14] *Szabó József Zoltán*
Gépek élettartamának növelése tengelybeállítással (nem lektorált magyar nyelvű cikk) Pneumatika, hidraulika, hajtástechnika, automatizálás szakfolyóirat X. évf. 2006 Info-Prod Kiadó Kft. Budapest, 2006. pp. 49-55.
- [S15] *Szabó József Zoltán – Dr. Kégl Tibor*
Gördülőcsapágyak hibáinak megállapítása a gyakorlatban korszerű SKF műszerek és szoftverek alkalmazásával
Gépgyártástechnológia, 1995. V. Gépipari Tudományos Egyesület, Budapest, 1995. pp.
- [S16] *Szabó József Zoltán – Dr. Bencsik Attila*
Rezgésdiagnosztika kardántengelyes mechatronikai hajtásoknál;
Pneumatika, hidraulika, automatizálás c. folyóirat 1999/2000
Info-Prod Kiadó, Budapest, 2000. pp. 35-41.
- [S17] *Dr. Pap A. – Dr. Kégl Tibor – Szabó József Zoltán*
Gépipari üzemfenntartás oktatása a Bánki Donát Műszaki Főiskolán
Gépgyártástechnológia, 1994. V.-VI. Kiadó: Gépipari Tudományos Egyesület, Budapest, 1994. V. – VI. pp. 212.-213.
- [S18] *K. Sólyomvári - F. Dömötör - J.Z. Szabó :*
Untersuchungen der Wälzlagershäden von Vibrationsmaschinen mit der Schwingungsdiagnosemethode an Ort und Stelle
VI. Kolloquium Technische Diagnostic Technische Universität, Dresden, Bundesrepublik Deutschland, 14. und 15. März 1996
- [S19] *Dr. A. L. Bencsik, Dr. T. Kégl, and Mr. J. Szabó:*
Balancing of High rotating Machinery
30th International Symposium on Automotive technology & Automation Florence, Italy 16th - 19th June '97.
- [S20] *K. Solyomvári - J.Z. Szabó - F. Dömötör*
Saving Maintenance Costs by a Successful Detection of Rolling Element Bearing Defects in an Exhausting fan of a Hungarian Food Process Plant
Acoustical and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques, 3rd International Conference, Senlis, France, October 13-15 1998
- [S21] *K. Sólyomvári - J.Z. Szabó - F. Dömötör*

Balancing of high speed rotating machinery with the influence coefficient method

Acoustical and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques, 3rd International Conference, Senlis, France, October 13-15 1998

[S22] *J. Z. Szabó - Dr. Attila Bencsik:*

Vibration Analysis for mechatronical Drives of Cardan Shaft

INES 2000 2000 IEEE International conference on Intelligent Engineering Systems, September 17-19, Portoroz, Slovenia Proceeding 157-162 pp.

[S23] *József Zoltán, Szabó - Dr. Attila Bencsik - Dr. Tibor Kégl:*

Operation Maintenance of Pump Systems by Diagnostic Forecast of Bearing Faults.

IEEE Konferencia Bp. 1997. szeptember INES '97 Budapest

[S24] *Szabó József Zoltán*

A karbantartás és diagnosztika oktatása a BMF Bánki Donát Gépészmérnöki karon - KAJAOK 2006 Országos Karbantartási Konferencia 2006.jan.26.-27. CD formátum ISBN 978-963-7154-58-4

[S25] *Szabó József Zoltán*

Termográfia és rezgésmérés a megelőző karbantartásban – a komplex diagnosztika előnyei

(nem lektorált magyar nyelvű előadás és cikk a Bólyai Szemle Különkiadásában CD formátumban) Haditechnika 2006 IV. Nemzetközi Haditechnikai

[S26] *Szabó József Zoltán*

Termográfia alkalmazása mechatronikai szerkezetek állapotvizsgálatában

Nemzetközi Mechatronikai Szimpózium 2006.nov. 10.

BMF BDGBK Mechatronikai és Autótechnikai Intézet kiadásában CD formátumban) ISBN 978-963-7154-59-1

[S27] *Szabó József Zoltán*

Elektromos szervó hajtások diagnosztikai vizsgálata

Országos Karbantartási és Munkabiztonsági Konferencia 2007

április 26.-27. Pécs) Gépipari Tudományos Egyesület

Karbantartási szakosztálya, a Magyar Karbantartók Szövetsége,

GTE-KTE-MTESZ Baranya megyei szervezetei, Pécs, 2007.

Konferencia kiadvány CD formátumban

[S28] *Szabó József Zoltán*

Mechatronikai szerkezetek mozgás-animációs vizsgálata

Nemzetközi Mechatronikai Szimpózium 2007. nov. 12. BMF

BDGBK, Budapest, 2007.

CD formátum ISBN 978-963-7154-68-1

[S29] *Szabó József Zoltán*

Gépészeti szerkezetek mozgás-animációs rezgésdiagnosztikai vizsgálata

Nemzetközi Gépész és Biztonságtechnikai Szimpózium BMF,

Budapest 2007.nov.14. CD formátum ISBN 978-963-7154-68-3

[S30] Szabó József Zoltán: Géprezgések csökkentése helyszíni kiegyensúlyozással (elektronikus publikáció) www.muszeroldal.hu/szakmaicikkek

[S31] Szabó József Zoltán

Gördülőcsapágyak diagnosztikai vizsgálata nagyfrekvenciás eljárással

Előadás, GTE Országos Karbantartási Konferencia, Harkány, 1994.

[S32] Szabó József Zoltán – Dr. Kégl Tibor

Gördülőcsapágyak meghibásodásainak gyakorlati vizsgálata

DIALGON '95 V. Nemzetközi diagnosztikai konferencia, Siófok, 1995.III.10.

[S33] Szabó József Zoltán

Irányított rezgésű gépek amplitúdójának helyszíni beállítása

GTE III. Nemzetközi Karbantartási Konferencia, Nyíregyháza, 1995.

[S34] Szabó József Zoltán

Centrifugál szivattyúk állapot felügyelete szakértő rendszer alkalmazásával

DIALGON '96 VI. Nemzetközi diagnosztikai konferencia, Siófok, 1996.

[S35] Szabó József Zoltán

Forgórészek helyszíni kiegyensúlyozása a hatástényezők módszerével

DIALGON '97 VII. Nemzetközi diagnosztikai konferencia, Siófok, 1997. március

[S36] Szabó József Zoltán

Rezgésdiagnosztikai vizsgálat mozgás-animációval

Magyar Karbantartási Konferencia - Dunaújvárosi Főiskola (Csak előadás) Dunaújváros, 2008. szeptember 4.- 5.

[S37] Szabó József Zoltán

Az üzemanyag ellátás fejlődése a T-Model-től a Mondeo-ig

100 éves a FORD T-Model Nemzetközi Konferencia, BMF BDGBK Budapest, 2008. október 20.-21

[S38] Dr. Bencsik Attila - Szabó József Zoltán

Teleoperációs rendszer fejlesztése erőérzettel

Miskolci Egyetem Dunaújvárosi Főiskolai Kar Jubileumi Tudományos Emlékülés, Dunaújváros, 1992. október

[S39] Szabó József Zoltán – Benedek Zsolt

Az állapotfüggő karbantartás bevezetése az AGA Gáz Kft-nél

GTE IV. Nemzetközi Karbantartási Konferencia, Pécs, 1996.

[S40] Szabó József – Dr. Kégl Tibor – Moro Tibor

Termovízió és a rezgésanalízis alkalmazása a gépdiagnosztikában

GTE VI. Nemzetközi Karbantartási Konferencia, Nyíregyháza, 1998.