Debreceni Egyetem

Műszaki Kar

Rezgésdiagnosztikai és akusztikus emissziós vizsgálatok MATLAB alkalmazásokkal

Készítette:

Dr. Deák Krisztián

Debreceni Egyetem Műszaki Kar

2021

Lektor

Dr. Pálinkás Sándor

főiskolai docens

Debreceni Egyetem Műszaki Kar

Technikai szerkesztő

Csüllög Mihály

A tananyag elkészítését a „A Debreceni Egyetem nukleáris oktatási, kutatási és szolgáltatási portfóliójának fejlesztése” c. projekt támogatta.

©Debreceni Egyetem Műszaki Kar

ISBN 978-963-490-287-4

Tartalomjegyzék

Táblázatok jegyzéke 2
Ábrajegyzék 3
Jelölések jegyzéke 5
Bevezetés 6
1 A rezgésdiagnosztika és az akusztikus emisszió alapjai 8
1.1 Rezgésdiagnosztikai mérések és eszközei 8
1.2 Gépek és gépelemek minősítése rezgésdiagnosztikával 16
1.3 Akusztikus emissziós mérések és eszközei 21
2 Jelfeldolgozási módszerek 32
2.1 Időtartománybeli statisztikai módszerek 32
2.2 Frekvenciatartománybeli spektrumelemzési módszerek 33
2.3 STFT és a wavelet transzformáció alapjai 36
2.4 A digitális jelfeldolgozás alapjai 38
3 Kopásból eredő károsodások és a csapágy meghibásodások szakaszai 42
3.1 Kopásból eredő károsodások 42
3.2 Gördülőcsapágyak időbeli károsodásának szakaszai 43
4 Műszaki diagnosztikai esettanulmányok MATLAB alkalmazásokkal 46
4.1 Fourier transzformáción csapágyhiba diagnosztizáláshoz 46
4.2 Szerkezetintegritási vizsgálat akusztikus emissziós módszerrel 59
Összefoglalás 71
Irodalomjegyzék 73

Táblázatok jegyzéke

1. táblázat: 1. táblázat: ISO 10816 szabvány előírásai 21

2. táblázat: A mérés csapágy hibafrekvenciái különböző fordulatszámok esetén 63

3. táblázat: A csapágy hibafrekvenciák értékei a dinamikus terhelési állapotnál 67

Ábrajegyzék

1. ábra: A mérőrendszer funkcionális elemei 10
2. ábra: Sebességérzékelő szenzor felépítése 10
3. ábra: Rezgésgyorsulásmérő piezoelektromos szenzor felépítése 11
4. ábra: Örvényáramú mérőszonda 12
5. ábra: NI 9234 típusú rezgésmérő adatgyűjtő (DAQ) 16
6. ábra: Akusztikus emissziós mérés 22
7. ábra: Az akusztikus emissziós szenzor frekvenciaátvitele 26
8. ábra: Akusztikus emissziós jel 27
9. ábra: A Kaiser effektus 29
10. ábra: Sensophone AED-404 Streamer akusztikus emissziós mérőműszer 30
11. ábra: A ferdeségi együttható negatív és pozitív értéke 32
12. ábra: A csúcsossági együttható különböző értékei 33
13. ábra: Csapágy frekvencia hibaspektrum 35
14. ábra: Lokalizáció az STFT módszernél 36
15. ábra: Spektrogram 37
16. ábra: Aliasing, téves frekvenciák megjelenése a spektrumban 39
17. ábra: Az első szakasz spektrumképe 44
18. ábra: A második szakasz spektrumképe 44
19. ábra: A harmadik szakasz spektrumképe 45
20. ábra: A negyedik szakasz spektrumképe 45
21. ábra: A kísérleti próbapad elvi vázlata 47
22. ábra: A vizsgálandó csapágyat tartalmazó csapágyház és az opcionális akusztikus méréseket lehetővé tevő kondenzátormikrofon és akusztikus kamra 48
23. ábra: PCB IMI 603C típusú piezoelektromos rezgésmérő szenzor 49
24. ábra: NI 9234 adatgyűjtő NI 9223 típusú adatgyűjtővel 49
25. ábra: 1. eset: 0.78 mm, 2. eset: 0.47 mm ívhiba átlagos szélessége a külső gyűrűn 50
26. ábra: Az eszköz inicializálási párbeszédablak 51
27. ábra: Az eszköz analóg bemeneti jel választó felülete 51
28. ábra: Az csatornaválasztási párbeszédablak 52
29. ábra: Az adatgyűjtő érzékenységét és mintavételezési frekvenciát beállító párbeszédablak 53
30. ábra: A mérésekhez alkalmazott virtuális mérési áramkör (VI) 53
31. ábra: A teljesítményspektrum parametrizálása és az ablakfüggvény megadása 54

32. ábra: A munkatérbe (Workspace) beolvasott konstansok a script alapján 55

33. ábra: A mérési eredmények az időtartományban (fent) és a frekvenciatartományban (lent) a 0.47 mm hibaszélesség esetén 57

34. ábra: A BPFO hibatartomány kiemelt területe a 0.47 mm hibaszélesség esetén 58

35. ábra: A mérési eredmények az időtartományban (fent) és a frekvenciatartományban (lent) a 0.78 mm hibaszélesség esetén 58

36. ábra: A BPFO hibatartomány kiemelt területe a 0.78 mm hibaszélesség esetén 59

37. ábra: A Hilbert transzformáción alapuló burkológörbe elemzés akusztikus emissziós (AE) vizsgálathoz 61

38. ábra: Az akusztikus emissziós csapágyvizsgálat vázlata 62

39. ábra: Hibátlan csapágy állapot időtartománybeli jele (a) – Spektrumanalízis után (b) – Burkológörbe elemzést követően Hilbert transzformációval (c) 64

40. ábra: Hibás csapágy állapot időtartománybeli jele (a) – Spektrumanalízis után (b) – Burkológörbe elemzést követően Hilbert transzformációval (c) 65

41. ábra: Fedélzeti akusztikus emissziós diagnosztika 66

42. ábra: Az akusztikus emissziós időtartománybeli mérési jelek hibátlan és hibás csapágy állapotok esetében 67

43. ábra: Dinamikus vizsgálat, hibátlan csapágy állapot időtartománybeli jele (a) – Spektrumanalízis után (b) – Burkológörbe elemzést követően Hilbert transzformációval (c) 68

44. ábra: Dinamikus vizsgálat, hibás (kis hiba) csapágy állapot időtartománybeli jele (a) – Spektrumanalízis után (b) – Burkológörbe elemzést követően Hilbert transzformációval (c) 69

Jelölések jegyzéke

Hz	Frekvencia mértékegysége
°C	Celsius (hőmérsékleti skála)
Bit	Felbontás
dB	Erősítés logaritmikus mértékegysége
VdB	Feszültségerősítés logaritmikus mértékegysége
W	Teljesítmény mértékegysége
s	Idő (s)
R_a	Felületi érdesség (μm)
1/perc	Fordulatszám mértékegysége
mV/g	Felbontás mértékegysége
$\lvert P1(f) \rvert$	Teljesítménysűrűség
x(t)	Rezgéskitérés (mm)
STFT	Rövid idejű Fourier transzformáció
FFT	Gyors Fourier transzformáció
CFT	Folytonos Fourier transzformáció
DFT	Diszkrét Fourier transzformáció
S_{ku}	Kurtózis
RMS	Négyzetes középérték
BPFI	Külső gyűrű hibafrekvencia (Hz)
BPFO	Belső gyűrű hibafrekvencia (Hz)
FTF	Kosárfrekvencia (Hz)
BSF	Gördülőelem hibafrekvencia (Hz)
N	Gördülőelemek száma
F	Fordulatszám (Hz)
B	Gördülőelem átmérője (mm)
P	Osztás mértéke (mm)
θ	Hatásszög
F_s	Mintavételezési frekvencia (Hz)
BW	Felbontás (Hz)
L	Spektrumvonalak száma
T_o	Mintavételezési idő (s)

Bevezetés

A rezgésdiagnosztika és az akusztikus emissziós vizsgálatok a modern karbantartás fontos részét képezik. Mindkét eljárás roncsolásmentes vizsgálati módszernek tekinthető, mert a gép, berendezés megbontása nélkül nyerhetünk információt a belső állapotról és a hibákról. A módszerek kapcsolati viszonyban állnak a hagyományos roncsolásmentes vizsgálati módszerekkel (NDT- Nondestructive Testing Methods) de a rezgésvizsgálat és az akusztikus emissziós vizsgálatok villamos jelekkel dolgoznak, amelyek informatikai tartalmának kinyerése, a jelfeldolgozás következtében sokkal részletesebb vizsgálatra nyújtanak lehetőséget, mint például az örvényáramos vizsgálatok vagy a penetrációs vizsgálatok. Az informatikai módszerek az utóbbi évtizedekben, a mikroelektronika és a számítástechnika fejlődésével olyan folyamaton mentek keresztül, amely manapság egyeduralkodóvá tette ezeket a módszereket nagy értékű berendezések vizsgálataiban is, mint például atomerőművek turbina károsodásainak állapotfelügyeletére, szerkezetek károsodásának nyomon követésére mechanikai feszültségváltozás, kopások, korróziós károsodások hatására.

A vizsgálati módszer előnye, hogy az Ipar 4.0 folyamatokba illeszthető, és a CMMS rendszerek szervez részét képezheti. Természetesen lehetőség van rá, hogy további állapotfelügyeleti módszerekkel bővítsük a diagnosztikai vizsgálatok körét, például termográfiával, ultrahangos vizsgálatokkal, és ezáltal egy még precízebb diagnosztikai eljárást hozzunk létre.

Jelen jegyzet terjedelmi okok miatt elsősorban a rezgésdiagnosztikára és az akusztikus emissziós vizsgálatokra fókuszál.

Először hardver oldalról közelíti meg a méréseket, amelyek során a rezgésdiagnosztikai szenzorokat, adatgyűjtőket taglalja, a hardverek eszközök paramétereit és bemutat néhány, a gyakorlatban is alkalmazott szenzort és adatgyűjtő eszközt.

A hardveres elemzéseket követően a módszertani elemzés következik, tehát a kapott jelek matematikai feldolgozásának lehetőségei.

A jegyzet egyik témaköre a rezgésdiagnosztikai vizsgálatok, amely célja a gépek által generált rezgésjelek érzékelőkkel mérése, majd az jelfeldolgozás, jelanalízis, ahol vagy időtartományban vagy frekvenciatartományban vizsgálhatjuk az eseményeket. Napjaink irányvonala a paramétertérben történő vizsgálat STFT vagy wavelet transzformáció módszerekkel.

A másik témakör az akusztikus emissziós mérési eljárások, amelyek az 1970-es évektől képezik az ipari alkalmazások tárgyát. Magyarországon 1976-ban kezdtek el foglalkozni a módszer kínálta műszaki lehetőségek elemzésével, illetve hazai méréstechnikába történő bevezetésének lehetőségeivel a Központi Fizikai Kutatóintézetben (KFKI).

A jegyzet utolsó fejezetében esettanulmányok bemutatására kerül sor, ahol az iparban és a kutatásokban gyakori MATLAB szoftver is elemzésre kerül azokkal a funkciókkal, amelyek kiszolgálhatják a méréseket. A bemutatott módszerek forgógépek és gépelemek, elsősorban

csapágyak állapotvizsgálatán, mint esettanulmányokon keresztül mutatják be az eljárások létjogosultságát.

Az első esettanulmány kísérleti csapágyvizsgálathoz kapcsolódik rezgésdiagnosztikai módszerekkel MATLAB környezetben.

A második esettanulmány az akusztikus emissziós vizsgálatok alkalmazási és kiértékelési lehetőségeit mutatja be mérések segítségével.

A bemutatott módszerek először módszertani leírást tartalmaznak, amelyeket a mérőeszközök és a mérési környezet bemutatása követ, majd a kapcsolódó mérések elemzése, a következtetések levonása műszaki diagnosztikai szempontból.

Bízok benne, hogy az oktatási jegyzet hasznos segédeszköze lesz az egyetemi oktatás diagnosztika és állapotfelügyelet tantárgyaihoz.

1 A rezgésdiagnosztika és az akusztikus emisszió alapjai

1.1 Rezgésdiagnosztikai mérések és eszközei

A rezgéselemzés mechanikai alapjai

Azt a mozgást, amelynek két szélsőérték közötti jellemzője a szinuszos periodicitás, harmonikus rezgőmozgásnak hívja a szakirodalom. Ezt a gyakorlatban úgy kell elképzelni, hogy egy test, amely egy rugóhoz van rögzítve kitér a nyugalmi állapotából, majd magára hagyva megfigyelhető lesz, hogy periodikusan ismétlődő mozgást fog felvenni a két szélső helyzet között. (Ebben az esetben a testet pontszerűnek kell tekinteni, illetve a rugó maradandó alakváltozása elkerülése végett a kitérítés is csak kis mértékű lesz.)

Néhány kapcsolódó alapfogalom:

- Amplitúdó: A kitérésnek az a maximum értéke, amelyet a tömegközépponthoz kell viszonyítani.
- RMS: Az RMS egy négyzetes középérték, amely érzékelten az olyan rezgésekre, amik kis amplitúdóval rendelkeznek.
- Frekvencia: Tulajdonképpen egy periodikusan ismétlődő esemény ismétlődési gyakoriságát mutatja meg, tehát azt, hogy milyen mozgási ciklust futott a test egy másodperc alatt.
- Harmonikus: Az a frekvencia, amely a forgó alkatrész üzemi fordulatszámának felel meg.
- Felharmonikus: Egy harmonikus, vagyis alapharmonikus egész számú többszöröse.
- Rezgési spektrum (FFT analízis): A frekvenciához és az amplitúdóhoz kapcsolódóan mutatja be az egyes rezgésösszetevők képét.

Kitérés-idő függvény:

$$x(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi 0)$$

Sebesség-idő függvény:

$$v(t) = A\omega \cdot \cos(\omega t + \varphi 0)$$

Gyorsulás-idő függvény:

$$a(t) = -A\omega^2 \cdot \sin(\omega t + \varphi 0) = -\omega^2 \chi$$

A kitérés egyenes arányosságot mutat a harmonikus rezgőmozgásban lévő test gyorsulásával, valamint a kitérés iránya ellentétes. Tehát a harmonikus rezgőmozgást a harmonikus erő generálja. Mind a gyorsulás, mind pedig a sebesség az idő periodikus függvénye.

Maximum sebesség, a sebességamplitúdó: $v_{max} = A\omega$

Maximum gyorsulás, a gyorsulásamplitúdó: $a_{max} = -A\omega^2$

A dinamika alapegyenletében a D a rugóállandót jelöli.

A dinamika alapegyenlete:

$$m\ddot{x} = -Dx$$

Az egyenlet megoldása folyamán keresni kell egy függvényt, amely aránylik az idő szerinti második deriválthoz, mint például egy koszinuszfüggvény vagy egy szinuszfüggvény.

Megoldás: $x(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$,

a megoldásban a körfrekvencia: $\omega = \sqrt{\frac{D}{m}}$,

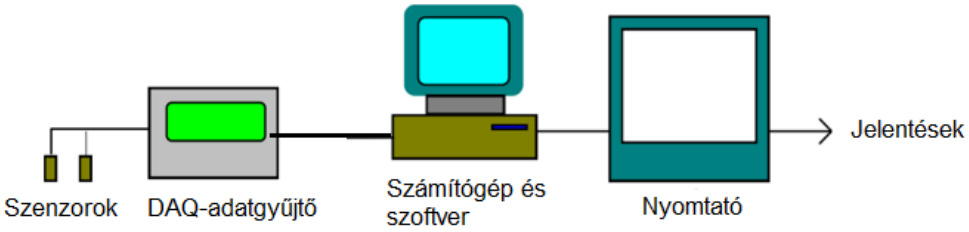
illetve a hozzá tartozó periódus idő: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{D}}$.

Mérőrendszer

A rezgésméréshez kiépített mérőrendszernek pontos, precíz és éles képet kell nyújtania a különböző jelalakok időbeni változásairól. Így ebben a részben bemutatásra kerül minden olyan elméleti és gyakorlati ismeret, amely a műszaki diagnosztika ezen szegmenséhez köthető. Többek között a kapcsolódó módszertanok, mint például a jelek, mérési eredmények kiértékelésének módjai, vagyis az adatfeldolgozás, valamint a rezgésmérés folyamatábrája is, amely a következő ábrán látható. Kiválóan szemlélteti a jel útját végig az alkalmazott adatgyűjtőig. [1]

- Analóg jel input
- Anti-aliasing szűrés
- A/D konverzió
- Átfedések
- Ablakolás
- FFT (Gyors Fourier transzformáció)
- Átlagolás elvégzése
- Adatok megjelenítése, archiválása [1]

Jól megfigyelhető a folyamatábrán is, hogy a mérés során rögzített analóg jel továbbításra kerül egy digitális műszerbe, amely több funkciójával segíti a kiértékelést. A rendszer képes arra, hogy közvetlenül is feldolgozza ezeket az analóg jeleket. Természetesen ez függ attól is, hogy milyen jellemzőkkel bírnak az analóg jelek természetes egységei, és hogy mire van igény az operátor oldalon. A folyamat egységei között különböző osztók található, mint például az előerősítők, illetve a DC/AC csatolás. A mérőműszerek nagy része végez FFT feldolgozást, ami a Fast Fourier Transform angol megnevezés rövidítése. Az FFT időben változó bemeneti jelek átlagolását és saját frekvenciakomponensekre bontását hajtja végre. A jelek további értelmezéséhez szükség van még több, különböző (felül és alul is áteresztő) szűrőre is, amelyek figyelembe véve a frekvenciát segítenek meghatározni a mért jel jellemzőit. [2]



1. ábra: A mérőrendszer funkcionális elemei [16]

Rezgésérzékelők

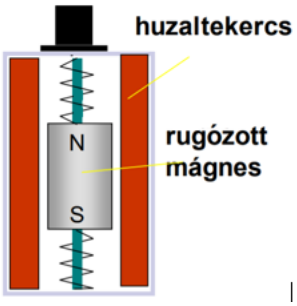
A szenzorok adott fizikai jellemzőket mérnek a vizsgálandó felületen. Ilyen jellemző lehet a korábban már említett sebesség, gyorsulás, illetve a kitérés paraméterek. Azt a villamos feszültséget, amely a beérkező analóg jel következtében jön létre, először is ki kell egyenlíteni, és fel kell erősíteni. Ezek az érzékelők többféle elven is üzemelhetnek. Például:

- Elektromos
- Mechanikus
- Optikai

A gyakorlat viszont azt mutatja, hogy leginkább a rezgésgyorsulás, valamint rezgéssebesség mérő érzékelőket részesítik előnyben a szakemberek a mérések során.

A sebességérzékelők egyik legfőbb jellemzője a tömegük, mivel súlyuk akár 500-600 g is lehet. Éppen ezért, ez a szenzor nem képesek a viszonylag gyorsan változó jelek megfelelő bemérésére. A sebességérzékelők üzemi frekvenciatartománya: 10 és 1000 Hz köz tehető. [16]

Általában egy ilyen szenzor belsejében tatláható egy tekercs, amely egy rugóra van felfüggesztve. A mechanikai rezgések hatására ez a tekercs megmozdul egy állandó mágnes homogén mágneses mezőjében. A tekercs sebessége, illetve a belsejében létrejövő feszültség arányosságot mutat egymással. A 2. ábrán látható a sebességérzékelő szenzor keresztmetszete.

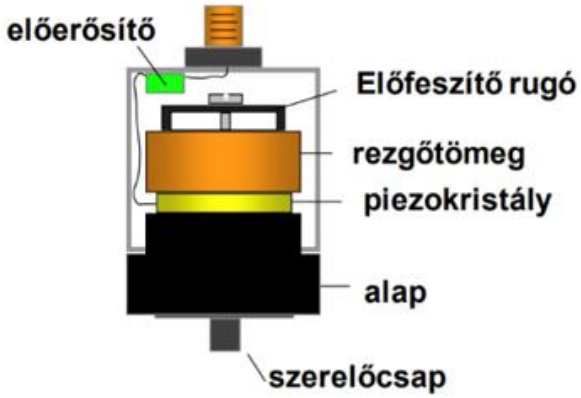


2. ábra: Sebességérzékelő szenzor felépítése [16]

A rezgésgyorsulás mérésre pedig az egyik legalkalmasabb a piezoelektromos módon működő szenzor. Ellentétben a sebességérzékelőkkel ennek tömege már lényegesen kisebb, nem befolyásolja a tehetetlenség a gyorsan változó jelek megfelelő felismerését és rögzítését. A rezgésgyorsulás érzékelők üzemi frekvenciatartománya igen széles. A piezoelektromos

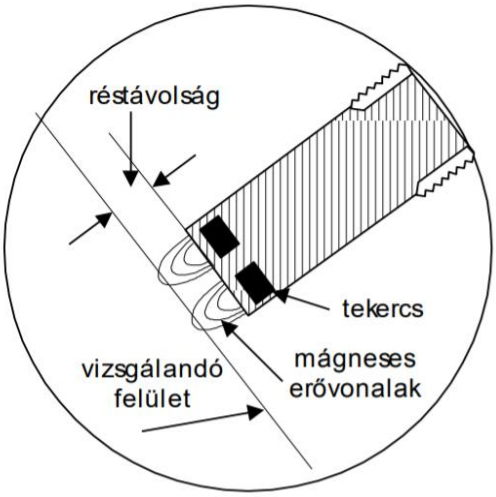
érzékelők másik előnye még, hogy az alacsony zajjal, illetve nagy dinamika tartománnyal dolgozik. Továbbá nem mutat érzékenységet a hőmérsékletváltozásokra, és egyéb környezeti hatásokra, és élettartama is hosszabb, tekintve, hogy nem tartalmaz mozgó alkatrészeket.

A mai, modern gyorsulásérzékelő szenzorok már rendelkeznek integrált áramkörrel, amely lehetővé teszi, hogy az operátor egyszerűen választhasson a mérési lehetőségek közül, legyen szó kitérésről, rezgéssebességről, vagy akár gyorsulásról. [16]



3. ábra: Rezgésgyorsulásmérő piezoelektromos szenzor felépítése [16]

Döntő jelentőségű a szenzorok rögzítésének módja a munkadarab felületére. A tapintó tüske körülbelül 500 Hz frekvencia tartomány biztosít lineáris átvitelt. A nem állandó értékű szorítóerő pontatlan mérést biztosít. A mágneses rögzítés lehetővé tevő szenzorok a tapintó tüskénél sokkal precízebb rögzítést tesznek lehetővé attól függően, hogy milyen erős mágnes alkalmaznak. A mai korszerű neodímium mágnesek erős, elmozdulás mentes rögzítését teszik lehetővé a szenzoroknak a vizsgálandó munkadarab felületére. Viszont még ennek ellenére is a gép üzemelése közben létrejövő nagy energiájú rezgések a szenzor részleges elmozdulását okozhatják ezzel meghamisítva a mérési eredményeket. Másik hátrányos tulajdonsága a mágneses rögzítési technológiának, hogy nagyobb hőmérsékleten a Curie pont elérése után a mágnes kilágyul, szorító ereje csökken, nem teszi lehetővé a szenzor további stabil rögzítését. Ez anyag típustól függően körülbelül 300 °C fok tartományában következik be. A szenzorok ragasztással történő rögzítési technológiája nagy népszerűségnek örvend a speciális ragasztók kifejlesztését követően. Fontos, hogy a rögzítés roncsolásmentes eltávolítást tegyen lehetővé, vagyis a szenzor eltávolítása után a munkadarab felülete ne sérüljön. A működési hőmérséklet szintén behatárolja a ragasztással történő szenzor rögzítési technológia alkalmazhatósági területét. Igen stabil és megbízható rögzítést tesz lehetővé a csavaros rögzítés. A rezgésmérő szenzorok általában hatlapfejű kialakítással rendelkeznek, amelyek lehetővé teszik csavarkulcs segítségével a specifikációban előírt nyomatékra történő meghúzást, ezáltal a mérés során a konstans előfeszítési erő biztosítását. A megfelelő nyomatékra meghúzott rezgésmérő szenzor a munkadarab felületén fixen helyezkedik el és a gép üzemelése során kialakuló járulékos rezgések nem befolyásolják a mérést negatív irányban. A leghatékonyabb szenzor rögzítési technológiának a csavaros rögzítés tekinthető műszaki szempontból. [16]



4. ábra: Örvényáramú mérőszonda [16]

Az örvényáramos mérőszondás mérés lényege, hogy a tekercs körül kialakuljon egy elektromágneses tér, amit a nagyfrekvenciás áram generál, mégpedig a tekercsből eredő, azzal párhuzamos erővonalak megalkotásával. [16]

Abban az esetben, ha a vizsgálat folyamán a ferromágneses tulajdonsággal rendelkező szerkezeti egység a szenzor érzékelési tartományába kerül, akkor a mágneses tér erővonalai bezárulnak a mért felületen. Így jönnek létre az úgynevezett örvényáramok. Attól függ, hogy milyen erős az örvényáram mező, hogy milyen távolságban van a vizsgálandó felület. [16]

Az örvényáramos mérőszonda, valamint a kialakult örvényáramok mágneses tere között kialakul egyfajta kölcsönhatás, és visszahatnak egymásra, tehát erősíthetik, vagy akár gyengíthetik is egymást. Ezt a jelenséget a mérőrendszer megfigyeli, felerősíti, és átalakítja egy egyenfeszültségű kimenetté. Ez az érték egyenes arányosságot mutat a távolsággal.

Mérési adatgyűjtők

A mérési adatgyűjtők biztosítják a szenzorok által mért jelek megfelelő mintavételezését, erősítését, tárolást, szűrését, amelyet összefoglaló néven a jel kondicionálásának nevezünk.

A korábbi időkben a jelek mérése analóg úton történt, manapság már digitális adatgyűjtőket használnak a technikai folyamatokban, ennek kapcsán felmerül, hogy milyen előnyei és hátrányai vannak az analóg és a digitális adatgyűjtésnek és adatfeldolgozásnak. [2]

A modern világban már digitális jelfeldolgozási technikákat alkalmaznak a szakértők. Ehhez azonban a kapott analóg jelet először át kell alakítani digitálisan kódolt információvá, amely digitális átalakítók segítségével lehetséges. Ez a lépés azért is nagyon fontos, mert ezeknek az átalakított digitális jeleknek a szűrése, a tárolása és még a jeltovábbítása is lényegesen könnyebben kivitelezhető, mint az analóg jelek esetében. [1]

Funkcionális modulokat érdemes alkalmazni a jelek mintavételes rendszerének felépítése során. Továbbá különböző intelligens szabályozókat is lehet használni mérés közben. Néhány példa az intelligens szabályozókra:

- Fuzzy
- Speciális PID (alapjel szabályozású anti-windup)
- Adaptív [1]

A mérés során alkalmazott irányító rendszer segítségével lehetőség van több berendezés egyidejű működtetésére. Valamint több digitális számítógép is alkothat egyetlen mintavételt irányító rendszert. A rendszeren belül pedig eltérő mintavételi sebességeket lehet beállítani.

A számítógépes méréseket komoly és összetett matematikai analízis teszi lehetővé, amely már a mérőrendszer tervezése során kiütközik, ellenben azokkal a módszerekkel, amelyek a folytonos rendszerek megtervezéséhez kapcsolódnak. Teljeskörű hatás analízisre, illetve behangolásra van szükség, ugyanúgy a mérőrendszer stabilitás vizsgálata során, mint minden egyéb szabályozási rendszer esetében. A különböző jelátalakítások egyik hátránya, hogy általuk a jel információt veszít a mintavétel folyamán. [1]

A rendszer megfelelő működését tovább gátolhatják a vizsgálat során használt algoritmusokból, vagy éppen zajokból származó programhibák. A mérő körben felmerülhet az információ késleltetés jelensége a mintavételezésnek köszönhetően. Elengedhetetlen a külső tápellátás biztosítása a digitális eszközök alkalmazásakor. Mindazonáltal a mai trend azt mutatja, hogy ezen hátrányok ellenére is a digitalizált világban, a modern mérő- és irányítórendszerek átveszik az analóg technika felett az uralmat. Mindössze olyan területeken használnak még ma is analóg mérőrendszereket, ahol nagyfrekvenciás, GHz tartományú mérések szükségesek. Ennek oka a korlátozott feldolgozási kapacitás a számítások terén. [1]

A méréshez minden olyan eljárás és parancs benne van az alkalmazott adatgyűjtő könyvtárában, ami szükséges lehet a mintavétel közben. Az adatgyűjtő csatlakoztatható számítógéphez, és vezérli a DAQ-ba illeszthető kártyákat. Több funkciót is képes ellátni egyetlen ilyen DAQ-ba illeszthető kártya. Többek között képes az analóg jelet digitálissá alakítani, kezelni tudja a számláló/időzítő feladatokat, illetve a digitális be- és kimeneteket kivitelezi. [2]

Az adatgyűjtők fő célja, hogy fizikai jeleket mérjenek, vagy éppen hozzanak létre a való világban. Első lépésként, érzékelő segítségével át kell transzformálni a fizikai jelet villamos jellé, még azt megelőzően, hogy a mérőrendszer megmérné azt. [2]

A méréshez használt adatgyűjtő kártyára úgy kell tekinteni, mint a rendszer egyik fontos elemére nem pedig úgy, mint egy komplett adatgyűjtő rendszerre. [2]

Azok az automatikus műszerek, amelyek a számítógép segítségével működnek, egyenként eltérő működést produkálhatnak, illetve néhány esetben nem lehetséges az adatgyűjtő kártya bemenetéhez kapcsolni a mért fizikai jelet. Mielőtt a rendszer a jelet átalakítaná digitális információvá, az analóg jelet be kell vezetni egy szűrő és szintillesztő áramkörbe. A mérési folyamat minden egyes momentumát szoftveres program segíti, az adatgyűjtéstől kezdve az analizáláson át, egészen a számítási eredmények megjelenítéséig. [2]

Az adatgyűjtők műszaki paraméterei:

Felbontás:

A felbontása azt a szám értéket adja meg, amely megmutatja, hogy az átalakító hány darab egyedi értéket tud képezni a bemenő analóg jelből. A felbontás mértékegysége a bit. Példa: Egy 256 egyedi elemre bontott analóg jel 8 bites felbontással bír, vagyis: 2^8=256. [2]

Méréshatár: Analóg eszköznél a méréshatár azt a számot jelöli, amely az eszköz skálájának osztásvonalán az utolsó érték. Digitális eszköznél viszont a kijelzőre kell hagyatkozni, ami a mérés határt úgy jeleníti meg, hogy a kijelzőn feltűntetett számjegyek értékét a megengedett maximumra állítja. [2]

Erősítés: Az erősítés értéke a ki- és bemeneti jel hányadosaként jelenik meg. Az erősítés mértékegysége: dB. [2]

Mintavételezési sebesség: A mintavételezés sebessége minden esetben a mérés során alkalmazott eszközök jellemzőitől függ. A gyártónak mindig fel kell tüntetnie a mintavételi frekvenciát az eszköz adatlapján. A mintavételezési sebesség mértékegysége: SPS (Simple Per Second). [2]

Átlagolás: Az elvégzett mérések összege, ideértve az átlapolásokat is.

Sávszélesség: Az a felső határfrekvencia, amely a bemenet analóg részeinek aluláteresztő jellegű frekvenciafüggésével áll kapcsolatban. Ez az érték nem biztos, hogy közel áll a mintavételezési frekvenciához, mivel léteznek olyan AD-k, amelyek alulmintavételezésre vannak felkészítve, továbbá léteznek olyanok is, ahol a mintavételi frekvencia nagyobb és a bemeneti sávszélesség pedig kisebb. [2]

LSB: A bemeneti értéken belül szükség van egy átlagos eltérésre, ami segít kiválasztani a legkisebb helyértékű bitet. [2]

Érzékenység: Ez egy olyan kitérés változás, amely a műszer által mért mennyiség egységnyi megváltozásához tartozik. Analóg eszköz alkalmazása esetén ezt a kitérést meg lehet adni mm-ben, fokban vagy osztásban, így az ehhez kapcsolódó mértékegység is annak megfelelően változik. [2]

Statikus karakterisztika hibák az adatgyűjtők esetében: Komplett működést figyelembe véve az átalakító karakterisztikája lineárisnak tekinthető. Azonban ez a gyakorlatban nem teljesen így van, és ennek megfelelően az eltéréshez tartoznak jellemző mutatók is. [2]

- Offset hiba: A 0 kódhoz rendelt karakterisztika értéke, és a kivezérlési tartomány százalékban szokás megadni.
- Erősítési hiba: Az az eltérés, amely az ideális karakterisztika erősítése, illetve a karakterisztikára illesztett egyenes között lép fel. A kivezérlési tartomány százalékában szokás megadni.
- INL: Az INL az integrált nemlinearitást rövidítése, ami az illesztett, valamint a valódi karakterisztika legnagyobb különbsége, LSB-ben kifejezve.

- DNL: A rövidítés jelentése Differenciális nemlinearitás, amely egy szórási képet ad a valódi karakterisztika egy lépcsőjének szélességéről.
- SNR: A zaj és a hasznos jel közötti teljesítmény arányt mutatja meg. Mértékegysége: dB.
- SINAD: A zaj, a hasznos jel, illetve a torzítások közötti teljesítmény arányt mutatja meg.
- ENOB: Magyarra fordítva a rövidítés azt jelenti, hogy effektív bitszám. Az átalakítóhoz tartozó bitszám nem feltétlenül utal az átalakító pontosságára. Ideális esetben mindössze csak a kvantálási zaj befolyásolhatná az átalakító teljesítményét. Viszont a valóságban ez nem így van, mivel egyéb zaj- és torzítási források is jelen vannak mérés közben. Ez pedig azt jelenti, hogy az átalakítót kisebb bitszámúnak kell feltételezni, mint amilyen valójában. [2]

Kábelek

A koaxiális kábel feladata a rezgésmérő szenzorok és az adatgyűjtő egység összekapcsolása. A koaxiális kábeleknek megfelelő vezetőképesség kell és zajszűrő tulajdonságokkal kell rendelkezniük. A zajszűrést a koaxiális kábel árnyékolása biztosítja. Léteznek egyrétegű és kétrétegű árnyékolások. A fizikai elvet tekintve a Faraday kalitka működési elve alapján az árnyékoló harisnya belső területén elhelyezkedő vezetőszál zavarjeltől mentes jel átvitelt biztosít kizárva a külső elektrosztatikus és elektromagnetikus zajok hatásait. A kétrétegű árnyékolás hatékonyabb zajcsillapítás biztosít, mint az egyrétegű. A fémháló rács méretének geometriai kiosztása alapvetően meghatározza, hogy milyen felső határfrekvenciával rendelkezik a koaxiális kábel a zajszűrés tekintetében. A kábelek fontos tulajdonsága a zajszűrésen túlmenően, hogy megfelelő mechanikai és kémiai védelmet biztosítsanak. Fontos, hogy minimális merevség mellett megfelelő mechanikai ellenállást biztosítsanak a kábelhajlításból származó erőhatások ellen, tehát ne törjön el ismétlődő igénybevétel hatására sem. A kémiai védelem szempontjából fontos tulajdonság, hogy legyen ellenálló a környezeti hatások ellen például igény szerint savas Ph értékű, vegyipari környezetben is használható legyen. [2]

Számítógépes elemző egység

Az adatok kiértékelését végző számítógépes egység lehet az adatgyűjtő egységbe épített vagy külön eszköz, amely asztali számítógépen található. Az adatgyűjtőre telepített szoftverek egyszerűbb méréseket tesznek lehetővé, általában a gyártó által meghatározott mérések végrehajtását teszi lehetővé. A számítógépekre telepített szoftverek előnye, hogy a felhasználó által tetszőlegesen szükséges mérési elemzések széles lehetőségét kínálják, tetszőleges adat elemzéseket biztosítanak. Ipari környezetben előnyösebbek az eszközre integrált rendszerek, a tudományos kutatás szempontjából a külön számítógépekre telepített szoftvereket részesítjük előnyben. [2]

Gyakori programok a MATLAB és a LABVIEW, az első szoftverrel kapcsolatban a jegyzet gyakorlati esettanulmány részében bemutatásra kerülnek méréses alkalmazások.

5. ábra: NI 9234 típusú rezgésmérő adatgyűjtő (DAQ) [3]

Az NI 9234 mérőeszköz egy 4 csatornás 16 bit felbontással rendelkező mérőkártya, amely jól használható diagnosztikai célokra. Alkalmas IEPE és nem IEPE szenzorok fogadására is. Az eszköz egyaránt kompatibilis TEDS érzékelőkkel is. Széles, 102 dB értékű dinamika tartományt biztosít a mérésekhez. 50 g értékű ütésállósággal rendelkezik és -40…70 °C között lehetséges vele a mérések elvégzése. Beépített anti-aliasing szűrő biztosítja az aliasing jelenség elkerülését. Az eszköz BNC csatlakozókkal és USB aljzattal rendelkezik. [3]

1.2 Gépek és gépelemek minősítése rezgésdiagnosztikával

A mérés hardver és szoftver oldali eszközrendszerének áttekintését követően felmerül a kérdés, hogy lehetséges a használatuk konkrét mérnöki problémák megoldására és melyek azok a fontosabb területek, ahol a gépészmérnöki területen belül sikerrel alkalmazhatók hibafeltárás céljából.

Az egyes gépelemekre jellemző hiba frekvenciák megmutatják az előforduló hibákat, amelyeket műszaki diagnosztikai eszközökkel ki lehet mutatni. A folyamat első lépéseként elő kell állítani a mérési jelből származtatott spektrumot majd spektrumelemzést követően meg kell keresni az egyes gépelemekre jellemző tipikus hibafrekvenciákat. A hibafrekvenciák amplitúdójának elemzése alapján összehasonlítva a hibátlan gépállapot esetében jelentkező amplitúdó értékekkel, következtetést vonhatunk le arra vonatkozóan, hogy milyen mértékű károsodás következett be. Az egyes gépekre vagy gépelemekre jellemző hibafrekvencia amplitúdó értékeket a szabványok nem definiálják, hanem gyakorlati tapasztalatokon alapulnak. A következőkben az egyes tipikus a gépiparban alkalmazott gépelemekre vonatkozóan kerülnek bemutatásra a hiba frekvenciák és ezzel kapcsolatos meghibásodások.

Gördülőcsapágyak

A gördülőcsapágyak a gépészmérnöki szempontból igen nagy jelentőséggel bíró gépelemek. A forgógépek tipikus elemei, amelyek nagymértékű radiális és axiális erőhatásoknak vannak kitéve. Ezek az erőhatások nem statikusok, hanem stacioner időben változó jellegűek. Az ismétlődő erőhatások a csapágy egyes elemein kifáradás károsodásokat okoznak, amelyek jellegzetes kopás kép formájában jelentkeznek. A kopásból származó károsodásokat rezgésdiagnosztikai eszközökkel és más módszerekkel, mint például az akusztikus emissziós eljárással hatékonyan ki lehet mutatni. A gördülőcsapágyakban jelentkező kopások nagy része adhéziós, abráziós, kifáradásos, valamint fretting kopás. A kopások általában nem külön-

külön, hanem együttesen jelentkeznek, ezért azonosításuk szakmai szempontból körülményes. Az adhéziós kopás elsősorban a csapágy túlterheléséből származik, amikor kis felületen nagy erőhatás maradó alakváltozást eredményez, majd a csapágy forgása következtében pittingesedést okoz. Igen jelentős az abráziós kopás, amely esetben általában külső szennyezés, például por kerül a csapágy forgó elemei közé, amelyek koptató hatást eredményeznek. A fretting kopás esetében a csapágyban kis amplitúdójú 70-700 mikrométerig terjedő rezgés kitérés jön létre, amely átlagos frekvenciája 5-100 Hz tartományba tehető. A jelenség megnyilvánul nem csak forgásban lévő csapágyak esetében, hanem álló csapágyak esetében is, amelyek ki vannak téve a környezeti rezgéseknek. Amennyiben a környezet páratartalma nagyértékű, úgy fokozottan jelentkeznek korróziós jelenségek, ezért a fretting kopás gyakran úgynevezett fretting korrózió formájában nyilvánul meg. [1]

Diagnosztikai szempontból lényeges a csapágy egyes elemeinek sajátfrekvencia számítása, ezek időben mérése és a spektrumanalizálás után az egyes hiba amplitúdó változásának időbeli követése a csapágy állapot romlásának meghatározása miatt. A következőkben láthatók a csapágy egyes elemeire jellemző közelítő hiba frekvenciák;

- Csapágy külső gyűrű hibafrekvencia: BPFO=0.4*z*f [Hz]
- Csapágy belső gyűrű hibafrekvencia: BPFO=0.6*z*f [Hz]
- Csapágy gördülőelem hibafrekvencia: BPFO=0.23*z*f [Hz]
- Csapágy kosár hibafrekvencia: BPFO=0.4*f [Hz]

ahol z: gördülőelemek száma, f: működési frekvencia [1]

Siklócsapágyak

A siklócsapágyak a gördülőcsapágyak után a gépészmérnöki felhasználás fontos gépelemei. Tipikus hibának számít a kenőanyag által létrehozott olajfilm rezonancia. A jelenség nagy amplitúdójú és szubharmonikus tartományba eső belső rezgéseket eredményez a csapágyban. A jelenség során úgynevezett olajék alakul ki, ezért az olajfilm és a csapágy felülete között lokális nyomás növekedés lép fel, ami a károsodásokért felelős. A Fourier transzformációt követő spektrumelemzés során az olaj rezonanciával eredő káros rezgések általában 0,38x és 0,48x frekvenciák környékén jelentkeznek. A másik siklócsapágyak esetében jelentkező jelenség az úgynevezett olajütés, amikor a kenőanyag a csapágy forgó részének frekvenciáját gerjeszti. Forgás során ez radiális instabilitás formájában jelentkezik. A kenőanyag által gerjesztett instabilitás a forgórész merevségét csökkenti. Az olajütés körülbelül 0,5x frekvencián jelentkezik hasonló az olajfilm rezonancia hoz, viszont nagyobb rezgés amplitúdó eredményez. Az instabilitás mérséklése céljából meg kell változtatni az üzemelési fordulatszámot vagy a rendszer rugómerevségének növelése segítségével is mérsékelhető a kialakuló káros jelenség. [1]

Tengelyek és tengelykapcsolók

A mechanikai hibák egyik fajtája a kiegyensúlyozatlanság. Ez esetben a tengely forgási középvonala nem esik egybe a forgórész geometriai középvonalával. Kiegyensúlyozatlanság

lehet statikus dinamikus okozhatja excentrikus forgórész vagy görbült tengely. A statikus kiegyensúlyozatlanság egyszeres forgási frekvencián mutatja hibajelenséget a spektrumban. A dinamikus kiegyensúlyozatlanság szintén hasonlóan 1x forgási frekvencián mutat rendellenességet. Excentricitás akkor jön létre amikor a tengelyforgás középvonala nem esik egybe annak geometriai tengelyével, hanem a két vonal között bizonyos mértékű eltolódás van. A kialakuló rezgés kép nagyon hasonló a kiegyensúlyozatlanságból származó rezgésképhez, szintén 1x működésű frekvencián mutat rezgés amplitúdó csúcsot a spektrumban. A görbült tengely tipikusan 1x és 2x frekvenciákon mutat csúcsértéke a spektrumban. Egyéb hibák is lehetségesek, amelyek a rendszer rezgését okozzák, ilyen a párhuzamos tengely beállítási hiba és a szög hiba. Ezek tárgyalása a tengelykapcsoló és azok beállításával kapcsolatban értelmezhető. [1]

Fogaskerék hajtóművek

A fogaskerékhajtás sok esetében számos hiba jelentkezhet. Hibátlan esetben a spektrumban megjelenik a tengely forgási frekvenciája és a fogaskerék áttétel frekvenciája viszont ez utóbbi jellemzően kisebb amplitúdó értékkel. Az időjel elemzése a fogaskerék meghibásodás diagnosztizálására eredményes módszere. Természetesen figyelembe kell venni a fogaskerék fog számát és a számítások során. Egyik tipikus jelenség a fogaskerék kopása, amely a csapágyak kopásához hasonlóan lehet általában adhéziós vagy abráziós kopás. A két kopás gyakran együttese jelentkezik. A kopás előre haladtával a hiba frekvenciák környezetében a rezgés amplitúdója megnövekszik, ezért időben, trendszerűen lehet nyomon követni a meghibásodás mértékét. Gyakran előfordul a fogaskerék túlterhelése is, amely szélsőséges esetben a fogak maradó károsodását esetleg törését eredményezi. Gyakori probléma, hogy a foghézag nem az előírt értéket veszi fel ez esetben egyszerre hiba frekvenciák jelentkeznek hasonlóan, mint a többi esetben viszont elmondható, hogy a sérült vagy a törött fogak esetében általában egy oldal sávú spektrum jelenik meg 1x hibafrekvencián. A fogaskerék foghézag az összefüggésben van a holtjátékkal, amelyet üzemelés során rendszeresen ellenőrizni kell. [1]

Szíjhajtások

A szíjhajtással rendelkező gépek esetében gyakori meghibásodás az elhasznált kopott rosszul illesztett vagy laza szíj excentrikus szíjtárcsák és a szíj rezonanciája. A kopott vagy megnyúlt szíj a szíjhajtás frekvencián oldalsáv frekvencia csúcsokkal rendelkező rezgés képet hoz létre. A szíjhajtás frekvenciája megfelelő formulák segítségével kiszámíthatók. Értékét alapvetően befolyásolja a rendszer forgási frekvenciája, a szíjtárcsa átmérője, a szíj hossza. Az excentrikus tárcsa jellemzően ütést hoz létre forgás során. Ez esetben a tárcsa forgási tengelye nem esik egybe a geometriai tengellyel. Erős radiális rezgések keletkeznek és a jelenség könnyen összetéveszthető a kiegyensúlyozatlansággal. Gyakori jelenség a szíjtárcsa beállítási hibája, amikor a hajtó és a hajtott szíjtárcsa nem egy síkba esik. Egyszeres rezgés csúcsot eredményez a spektrumban, lehet úgynevezett szögbeállítási hiba vagy metsző tengelyek, illetve kitérő tengelyek hibája is előfordulhat. A szíj rezonancia tipikus jelenség, amely magas rezgés amplitúdót okoz abban az esetben, ha a szíjhajtás saját frekvenciája

megegyezik a hajtó vagy a hajtott tárcsák forgási frekvenciával. Lényeges elkerülni a jelenséget mert időben változó harmonikus gerjesztés eredményez, amely fokozott igénybevételnek teszi ki a szerkezetet, fáradásos jelenségeket eredményez. Gyakran a motor tartó szerkezet hegesztéseinek pontjaiban mikró repedéseket okoz, amelyek később mélyebb repedéseket eredményezhetnek az anyagban, amelynek következménye lehet a váratlan törés. [1]

Áramlás keltette rezgések

Az üzemi fordulatszám meghatározza a spektrum csúcsot a lapát elhaladási frekvencián. Ezzel a csúcsértékkel a legtöbb áramlástechnikai gép rendelkezik, mint például kompresszor, szivattyú, vagy ventillátor. Abban az esetben, ha lapátsérülés következik be, megváltozik a lapát, illetve az állórész fúvókái között lévő rés mérete. A jelenség úgynevezett járulékos rezgéseket generál, amelyeket felismerésére kiválóan alkalmazhatók a rezgésdiagnosztikai módszerek.

A következő fontos esemény a kavitáció. A kavitáció szintén nagy károkat okozhat az adott gép életében. Tulajdonképpen egy olyan jelenségről van szó, ami akkor történik, amikor egy anyag állapotában hirtelen fázis változás következik be. Például egy folyadék nagyon rövid idő alatt gázfázist vesz fel a nyomás csökkenés eredményeképpen. Abban az esetben, ha hirtelen növekedésnek indul a folyadék sebessége, a nyomása csökken. Ezt támasztja alá az energiamegmaradás törvénye. Az így létrejött gázbuborék váratlanul összeomlik, amely következtében erős akusztikus lökéshullámok jönnek létre az egymáshoz ütköző folyadékfelületekből kiindulva. Egy ilyen esemény komoly rezgéseket és zajokat generál, továbbá a közelben lévő szilárd testek eróziójához vezet. A kavitáció jellemzője, hogy nagyfrekvenciás rezgéseket hoz létre, amelyek 36X és 40X határok között vannak. [4]

A következő áramláshoz köthető esemény a turbulencia. A forgóörvény jelensége komoly gondokat okozhat például a kompresszorokban vagy a ventilátorokban. Diagnosztika során jól megfigyelhető, mivel a jelenség a 0,1X, illetve a 0,4X között lévő szubharmonikus frekvenciatartományban helyezkedik el. [1]

Dugattyús gépek

Ide sorolható minden belsőégésű motor, illetve azok a szivattyúk, amelyek dugattyúval rendelkeznek, és a kompresszorok is. Jellemzően az 1X frekvencián figyelhető meg a jelenség kétütemű motorok esetében, míg a 0,5X frekvencián a négyütemű társaik különíthetők el. Kiemelkedő energia tartalmú, az esetek többségében 120 és 125 VdB eredményt produkálva jelentkezik, így igen bonyolult a rezgésmérés, mivel a finom hibák az óriási háttérrezgés miatt szinte elkülöníthetetlenek. [1]

Villamos forgógépek

A váltakozó áramú motorok lehetnek szinkron, vagy aszinkron, illetve egy- és háromfázisúak.

Aerodinamikus, valamint mágneses hatások eredményezik a villamos forgógépeknél felmerülő rezgéseket. Sajnos, ezek a jelenségek még olyan gépeknél is jelentkezhetnek,

amelyek tökéletes állapotban vannak. Jellemzője a hálózati, illetve a hajtási frekvencia, és a hálózati frekvencia értékének kétszerese is. Sok esetben félrevezető tud lenni, mivel azt a látszatot is kelthetik, hogy a gépnél mindössze kiegyensúlyozatlanság, vagy lazulás lépett fel. Miután lekapcsolják a hálózatról az indokolatlan rezgések is megszűnnek.

- Zárlatos vasmag esetében: 100 Hz értéken fellépő kiemelkedő csúcsok a spektrumban.
- Laza áramszedők, illetve fázisprobléma esetében: 33 Hz-es oldalsáv frekvenciával bíró 100 Hz-es csúcs.
- Forgórész hődeformáció esetében: radiális és tangenciális 1X csúcsok a spektrumban.
- Légrés excentrikusság esetében: kiemelkedő 1X és felharmonikusok (ötödik felharmonikusig).
- Laza forgórész rudak esetében: 100 Hz-es forgórész frekvenciák. [1]

Mindenképpen érdemes oszcilloszkóppal megvizsgálni, illetve spektrumelemezni a villamos hajtású motorok bejövő tápfeszültségét, mert a mágneses térerősségre ugyanúgy hatást gyakorolhatnak a mechanikus hibák. Ez a jelenség a megszokottól eltérő intenzitásvektort eredményezhet a váltakozóáramú spektrumban. Sőt, további megfigyeléssel észrevehető, hogy motoráram modulációt okoz a motoráram esés, illetve az FFT spektrumban oldalsávok képződnek. Háromfázisnál elegendő mindössze egyetlen fázist vizsgálni, amelyhez érdemes lakatfogót alkalmazni. A mérést természetesen terhelt állapotban kell elvégezni, és lehetőleg nagy felbontású FFT spektrumanalizátorral. [1]

Transzformátorok

A mágnesességből származó 100 Hz körüli rezgés, valamint annak lehetséges felharmonikusai általában megfigyelhetők transzformátorok vizsgálata során. A hőburkolat pedig lényegesen felerősíti a rezgéseket a teljesítmény-transzformátorok esetében. További erősítő tényező lehet még az axiálventilátor, amit kényszerhűtésre használnak. Más jellegű rezgések csupán a gép valamely részének fellazulásából eredhet, amely könnyen orvosolható probléma. Szintén nagyon hasznos lehet még a 20 kHz-et meghaladó ultrahangos elemzés. A módszer képes arra, hogy már korai stádiumban feltárja a kritikus hibákat. [1]

Hidraulikus és pneumatikus rendszerek

Ezeknél a rendszereknél az indokolatlan rezgéseket okozhatja akár csapágyhiba, kiegyensúlyozatlanság, vagy éppen a nem megfelelő szerelés. Ezek közül is talán a leggyakoribb a kiegyensúlyozatlanság, aminek fő kiváltója az az anyag, amely rárakódik a lapátokra, és a szállított közegből válik ki. Az intenzitás-növekedés a hajtási frekvencián szintén a kiegyensúlyozatlanság problémájára utalhat. Szerkezeti hibára pedig a működési frekvencia csúcsértéke utalhat. A pneumatikus gépeknél sokszor megfigyelhető az ultrahangtartományba eső hibafrekvencia. [1]

Határértékek és szabványok

A rezgésmérés során mért értékek minősítéséhez vagy tapasztalati vagy szabvány által előírt értékeket kell alkalmazni. Az ISO 2372 és az ISO 10816 jelű szabványok általános irányelveket tartalmaznak a forgógépek rezgésének vizsgálatára és értékelésére. Az ISO 10816 szabvány négy osztályba sorolja a gépeket a teljesítményfelvétel alapján. Ehhez kapcsolódóan definiálja, hogy mely rezgés gyorsulás értékek tartoznak a jó, elfogadható, nem kielégítő vagy veszélyes tartományokban. A szabvány szerinti minősítés a rezgés sebesség értékekre vonatkozik. A gyakorlatban a rezgés gyorsulás mérése dominál, amelyre vonatkozóan az ISO 10816 szabvány nem ad iránymutatást. Sok esetben gyakorlati tapasztalati összefüggéseken alapuló eljárásokkal lehet azt meghatározni, hogy egy adott gép megfelelő vagy nem megfelelő rezgést produkál. [1]

Az ISO 10816 nemzetközi szabvány ajánlásai gépek rezgésvizsgálatára				
Géposztályok	A rezgéssebesség 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	5,4-11,2	11,2 felett
III. oszt nagy gépek 300 kW-ig rugalmas alapozással	0-2,8	2,8-7,1	7,1-18	18 felett

1. táblázat: ISO 10816 szabvány előírásai [4]

1.3 Akusztikus emissziós mérések és eszközei

Az akusztikus emissziós vizsgálat áttekintése

Alapvetően az akusztikus emissziós vizsgálat a diszlokációk mozgásában figyelhető meg, vagyis abban a fizikai folyamatban, amikor az energia felszabadul, és ezt követően rugalmas hullámokká alakul át. Ameddig adott terhelés következtében a szilárdtest alakváltozása a rugalmas határon belül marad, a deformáció csupán a rácsban jelentkezik, tehát atommozgás nem lép fel. Viszont amikor már az említett terhelés meghalad egy bizonyos szintet, és képlékeny alakváltozás alakul ki, abban az esetben a deformációt szenvedett zónán belül megindul a diszlokációseregek vándorlása és az atomok elmozdulnak. Ebben a mozgási folyamatban a diszlokációk elsődleges feladata, hogy legyőzzék a rács rendellenességeit, mint például az idegen atomokat vagy a kiválásokat. A szabálytalanságok leküzdése folyamán úgynevezett rugalmas hullámok alakulnak ki, amelyek 100 kHz és 800 kHz közé tehetők. Ezek a rugalmas hullámok, erre a célra kifejlesztett érzékelőkkel megfelelően beazonosíthatók. Az érzékelők számának növelésével könnyebben lokalizálhatóvá válnak a

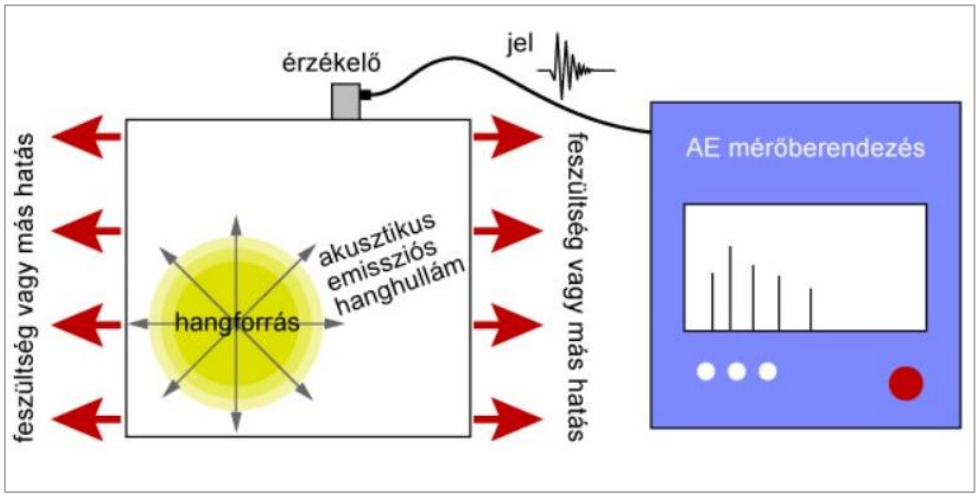
hullámok keletkezési helyei. Ez a vizsgálati módszer nagyon jól alkalmazható például csövekben, vagy tartályokban fellépő turbulens szivárgások keresésére. Ilyenkor azok a zajok kerülnek beazonosításra helyileg, amelyek a kisméretű réseken szivárgó közeg turbulenciájából erednek. [5]

Manapság az ipar számos területén alkalmazzák az akusztikus emissziós vizsgálatokat. Az itt alkalmazott AE technikák legfontosabb jellemzője viszont az, hogy ultrahangtartományon belül történik a hangkibocsátás maximum, nem pedig a hallható és észlelhető hangtartományában. [1]

Első lépésként el kell helyezni a szerkezet felületén az akusztikus érzékelőket, előre átgondolt módon, és megfelelő sűrűségben. A vizsgálat megkezdése előtt, fontos meggyőződni a mérőrendszer megfelelő működőképességéről. Ezt követően a vizsgáló rendszerhez csatlakoztatni kell egy analóg jelforrást, amely a terhelést leginkább jellemzi, és ami lehet egy hőmérséklet szonda vagy akár egy nyomástávadó. A mérés akkor kezdődik el, amikor a terhelés fokozatosan növekedésnek indul. A terhelés növelését szintén előre átgondolt menetrend szerint kell kivitelezni. A mérést akkor tekinthető befejezettnek, amikor megszűnik a terhelés. A vizsgálat folyamán beérkezett eredmények értékelése a folyamat közben, illetve utólagosan, vagyis offline módon is egyaránt lehetséges. Ahhoz, hogy a mérés során kapott eredményeket megfelelően lehessen kielemezni, és kiértékelni megfelelő szoftver szükséges. A szoftver segít feltárni a hiba helyeket, illetve megmutatja a hibák főbb jellemzőit. [1][8]

Az akusztikus emissziós vizsgálat fő alapvetése, hogy mivel a hang minden irányban terjed, ezért a vizsgált szilárd test felületén megfigyelhető az akusztikus emisszió jelensége.

Vagyis a cél az, hogy ennek a testnek a felületén olyan szenzorok kerüljenek elhelyezésre, amelyek képesek a rezgés mérésre egy adott frekvenciatartományon belül. Az eddigiek során már volt szó arról is, hogy a különböző fémek frekvenciatartománya az ultrahangtartományon belül található meg, így ennek megfelelően fémek vizsgálatánál ilyen szenzorokat kell alkalmazni. A 6. ábrán jól látható ennek az eljárásnak a gyakorlati megvalósításhoz szükséges szemléletes ábrája. [5]



6. ábra: Akusztikus emissziós mérés [1]

Maradva a korábbi példánál, szivárgás vizsgálat alkalmával nagyobb tartályok estében a leírt vizsgálati módszer alkalmas állandó, folyamatos megfigyelésre, valamint monitorozásra egyaránt.

A vizsgálati módszer határai

Kizárólag olyan hibák detektálására alkalmas, amelyek bizonyos terhelés mellett aktivizálódnak, illetve növekednek, vagy pedig környezetükben képlékeny alakváltozás figyelhető meg (kivételt képez ez alól a szivárgás keresés). Teljes szerkezeti integritás vizsgálható akusztikus emissziós mérési módszerrel. Mindazonáltal meg kell jegyezni azt is, hogy olyan hibák, amelyek nem feltétlenül jelentenek veszélyt a szerkezetre, vagyis passzív hibák, nem mutathatók ki növekvő terhelés hatására sem. Ennek megfelelően, nem lehet hiba mentesnek titulálni egy szerkezetet mindössze az alapján, hogy nem volt kimutatható a vizsgálat során aktív hibaforrás. A mérést erősen befolyásolhatja, vagy éppen meghiúsíthatja, ha közvetlenül a mérés elvégzése előtt a szerkezetet hasonló terhelésnek vetik alá, mint amelyet a vizsgálat is megkövetelne (ilyen lehet egy nyomáspróba). Ebben az esetben már csak a korábbi terhelés során alkalmazott szint felett megszólaló hibák lokalizálhatók. Ez a jelenség a Kaiser-effektus. Továbbá, amennyire lehetséges kerülni kell a nagyobb, külső zajforrásokat is, mivel ez is lényegesen befolyásolhatja a mérés érzékenységét. Szintén korlátozó tényezőként kell tekinteni a vizsgálandó szerkezet méretére is, mivel minél nagyobb maga a szerkezet, annál több szenzorra lesz szükség az eredményes méréshez. Viszont a vizsgálókészülék korlátozott számban tudja befogadni ezeket az érzékelőket. [5]

Alkalmazhatóság köre

Feszültséggyűjtő helyként, és veszélyforrásként kell tekinteni minden egyes makroszkopikus anyaghibára, például egy zárványra, vagy egy repedésre, mivel mikor az anyag terhelést kap, akkor pontosan ezeken a helyeken és azok környezetében fog kialakulni a helyi alakváltozás. Az akusztikus emissziós vizsgálat egyik legnagyobb előnye, hogy segítségével a veszélyes hibákat is, már azok szemmel látható megjelenése előtt lokalizálni lehet, azáltal, hogy a rendszer érzékeli a hanghullámokat, amelyek a makroszkopikus hibahelyek környékén jönnek létre a diszlokációmozgás folyamán. A veszélyes hibák egyértelműen kimutathatók a vizsgálat során, illetve minimum 4 darab szenzor alkalmazása mellett azok forrásai is pontosan meghatározhatók. Amennyiben indokolt, úgy más roncsolásmentes vizsgálatok igénybevételével a hiba típusa, illetve fajtája is könnyen megállapítható. Sík jellegű hibák, veszélyes pontok a terhelt szerkezeti egységen kimutathatók, viszont a kisméretű, térfogatos jellegű hibák esetében az akusztikus emissziós módszer kevésbé érzékeny, nem hatékony. [5]

Közel 30 éve vizsgálják a kutatók aktívan az akusztikus emissziót, így manapság már számos területen sikeresen alkalmazható. Főbb területek [7]:

- mechanikai jellemzők vizsgálata
- törésmechanikai elemzések
- nyomástartó edények és csővezetékek analízise
- üzembevételi revízió

- folyamatközi ellenőrzés
- repedésterjedési elemzések
- repedés diagnosztizálása
- összetett szerkezetek vizsgálata
- hegesztett kötések vizsgálata
- szivárgások kimutatása
- megmunkálószerszámok monitoringja
- villamos szikrák és kisülések vizsgálata
- atomenergetikai alkalmazások (pl. sugárzásnak kitett hegesztett kötések vizsgálata) [7]

Az akusztikus emisszió előnyei

- Aktív hibahelyek pontos lokalizálása.
- Más eszközök által hozzáférhetetlen területek és hibák kimutatására képes.
- Bizonyos esetekben üzem szerű működés mellett is végre hajtható a mérés.
- Már a vizsgálat közben is lehetséges a beérkező adatok elemzése.
- Költséghatékony módszer, mivel további mérések és vizsgálatok csak akkor indokoltak, ha az akusztikus emisszió hibát mutat ki. [7]

Mindazonáltal már az atom-energiaipar is hatékonyan tudja alkalmazni, hiszen ezen a téren szintén kiemelt jelentősége van a kialakulóban lévő szerkezeti anyaghibák időben történő felismerésének. [7]

Az eljáráshoz szükséges felület

Nem kifejezetten szükséges előkészíteni a vizsgálandó felületet, sőt a helyzettől függően részleges szigetelés bontással (a szenzorok szigetelési helyein) is kivitelezhető. Viszont lényeges, hogy teljesen fémtiszta felületet kell biztosítani a vizsgálat elvégzéshez, amelyhez körülbelül egy 4 cm-es átmérőjű, (6 cm^2-es) terület szükséges, továbbá annyi hely, hogy gond nélkül felhelyezhetők legyenek a szenzorok.

Környezeti kitételek

Körülményekhez képest törekedni kell a száraz mérési környezet biztosítására. Amennyiben nem laboratóriumban, hanem szabad téren történik a vizsgálat, fokozottan figyelni kell az időjárásra, mivel az esős idő erősen befolyásolja a mérési érzékenységet. Az esőcseppek akusztikus jelet eredményeznek, a mintadarab felületére érve. Továbbá a zajforrásokat is minimalizálni kell a vizsgálat környezetében, és kerülni a vizsgálandó szerkezettel az érintkezést. Figyelemmel kell kísérni a szerkezeti egység hőmérsékletét is, mert az ultrahangos szenzorok hosszú távon nem tehetők ki magas hőmérsékletnek. Ennek megfelelően a szerkezet hőmérséklete ne lépje túl a +50 °C-ot.

Akusztikus aktivitás a szerkezet anyagában

Alapvetően 5 csoportba lehet sorolni azokat a rugalmas hullámokat, amelyek a testben tárolt energia felszabadulása közben jönnek létre. Ezek a csoportok az alábbiak:

- Surlódások
- Repedéskeletkezés, illetve repedésnövekedés
- Diszlokációs mozgások
- Törések
- Fázisátalakulások [5]

Mivel folyamatosan változik a szerkezet belsejében létrejövő hullámcsomag amplitúdója, valamint spektruma és fázisa is, ezért igen bonyolult a rendszerbe beérkező jelek eredetének beazonosítása (vagyis a generáló mechanizmus tisztázása). Ezek a változások jelentkezhetnek a visszaverődésben, az elhajlásban, a csillapodásban, a szóródásban, illetve a törésben. A mérés során piezoelektromos szenzorokat érdemes alkalmazni, amelyek a hozzájuk érkező hullámot annak rezonanciája következtében áttranszformálják egy csillapított szinuszhullámmá. Azonban az áttranszformált elektromos jelalak is sérül a jelfeldolgozás folyamán.

Néhány fémipari példa látható a következő felsorolásban:

- Diszlokáció változás: 10-20 dB
- Zárványelválás: 30-50 dB
- Zárványtörés: 50-70 dB
- Szemcsehatáron történő események: 60-80 dB
- Repedésterjedés: 80-100 dB
- Törés: 100-120 dB [5]

Maradva a fémfizikai megközelítésnél, az akusztikus emisszió két csoportra bontható. Az anyagszerkezeti kutatások szerint az első ilyen csoport a mikroszkopikus eredetű hibák csoportja:

- krisztallit deformáció,
- szemcsehatár elmozdulás,
- diszlokációkeletkezés és diszlokációvándorlás,
- anyag alapmátrix és idegen fázisok közötti interakciók,
- fázisátalakulások,
- mikrorepedések kialakulása az alapanyagban. [5]

A másik kategória, a makroszkopikus eredetű hibák halmaza. Ez a fajta osztályozás, azok körében elterjedt, akik az AE vizsgálatot roncsolásmentes anyagvizsgáló eljárásként alkalmazzák. Makroszkopikus források osztályozása:

- képlékenyzóna növekedés,
- repedésnövekedés,

- korrózió,
- feszültségkorrózió. [5]

A következő felsorolásban pedig azok a jelenségek láthatók, amelyek ugyan géppel kimutathatók, viszont mégsem tekinthetők akusztikus eseménynek:

- súrlódás, dörzsölés,
- elektromos kisülés,
- szivárgás,
- turbulens áramlás. [5]

Rezgésérzékelő frekvencia átvitele

A méréshez alkalmazandó piezoelektromos gyorsulásérzékelő ebben az esetben mindig az úgynevezett föléhangolási tartományon belül működik, köszönhetően az utógerjesztésnek és annak, hogy maga a szenzor egy tömeg-rugó-csillapítás rendszerként operál. Viszont ez a tartomány viszonylag nagy, mivel a piezoelektromos szenzor saját frekvenciája 10 és 100 kHz közé tehető. Egyszerűen levezethető az átviteli függvény, a következő dinamikai egyenlet felhasználásával, ahol a külső ház gyorsulását tulajdonképpen egy külső erőként kell figyelembe venni [5]:

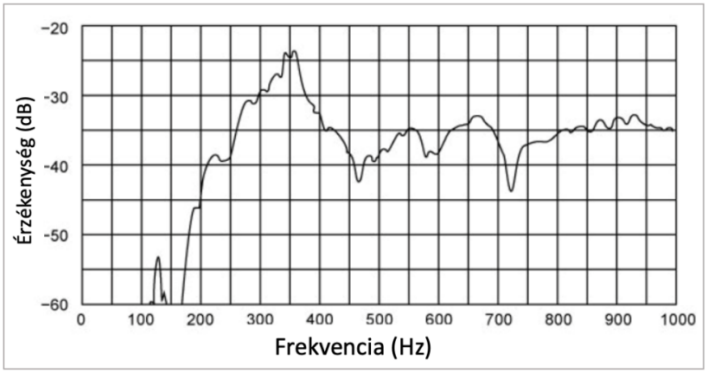
$$m\ddot{x}(t) + k\dot{x}(t) + \frac{1}{c}x(t) = P(t)$$

Az átviteli függvény rezonanciája:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{c \cdot m}}$$

Ezt a rezonanciát viszont tompítja, valamint ezzel egyidőben ki is szélesíti a rezonanciacsúcsot a csillapítási tényező, ami a nevezőben látható.

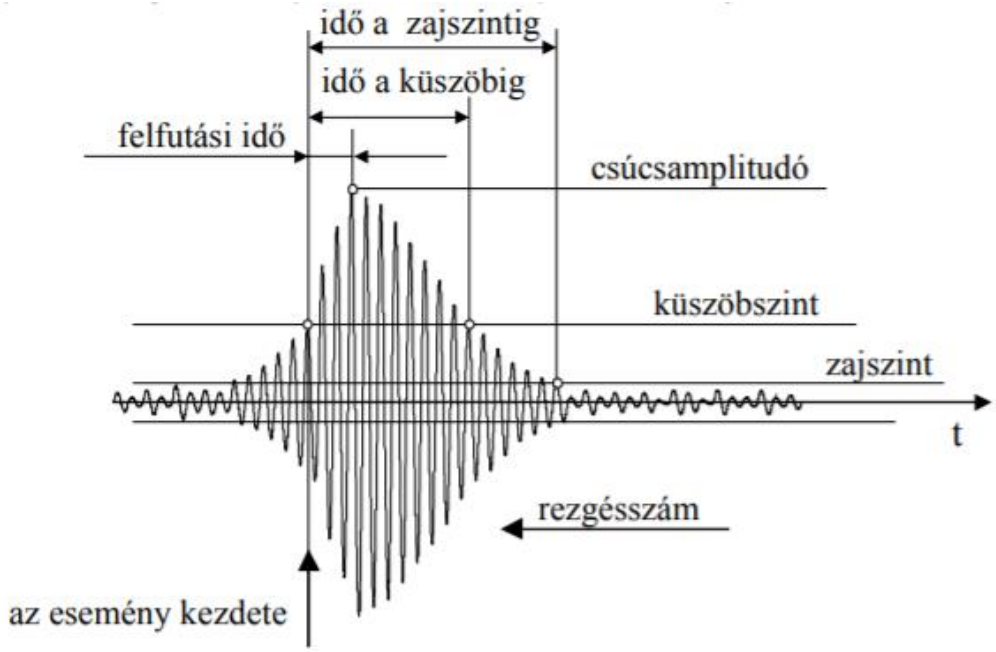
Napjainkban olyan elektronikákat készítenek, amelyek a detektorba vannak beépítve, tehát kivitelezhető, hogy már az érzékelőkben megtörténjen az előerősítés. Ez azért is nagyon fontos, mert különben a spektrális információ sérülne, torzulna, az olyan szenzorok esetében, amelyek rezonanciaelven működnek és nemlineáris erősítést végeznek. [5]



7. ábra: Az akusztikus emissziós szenzor frekvencia átvitele [8]

Amennyiben a mérés során sikerül az akusztikus emissziós jelet érzékelni, valamint rögzíteni is, úgy a grafikonon megfigyelhető lesz egy úgynevezett „burst” (vagyis kitörés, csúcsosság). Viszont ez csak akkor jelenik meg, ha már elég közel van a hiba helye. Nagyobb távolság esetén a jel időben szétcsúszhat, a jel eleje és a vége egyre távolabb kerül, és a megjelent csúcsosság ellaposodva jelenik meg, amire a hangsebesség diszperziója a magyarázat. [5]

Az ehhez hasonló jelek rögzítése már megkívánja a nagyfrekvenciás mintavételezést. Figyelembe véve azt, hogy a rezonancia, illetve a kibocsátás 100-tól több száz kHz-ig is terjedhet, az adekvát mintavételezés bővebb (akár MHz-es, sőt több 10, 100 MHz-es) tartományon belül lenne. [5]



8. ábra: Akusztikus emissziós jel [5]

Az akusztikus emissziós vizsgálat alkalmával, a jel jellemzői az alábbiak lehetnek:

- esemény hossz
- felfutási idő, mindaddig amíg a jelenség el nem éri a csúcs amplitúdóját
- csúcs amplitúdó
- rezgésszám
- jelenség észlelési ideje a vizsgálat során

Az akusztikus emissziós rendszer saját kalkulált jellemzőket is generál, a már lemért fizikai tulajdonságokat alapul véve, amelyek az alábbiak lehetnek:

- eseményösszeg, a vizsgálat folyamán beérkezett események összege,
- energia, vagyis a feszültséghullám négyzetének idő szerinti integrálja az akusztikus emissziós folyamatnál,
- MARSE, adott esemény egyenirányított jelének burkológörbéje alatti mérendő terület. [7]

Az akusztikus emissziós jel terjedése:

Az akusztikus emisszió a szerkezet belsejében jön létre, majd a hanghullámokat felhasználva kerül a felszínre. A szerkezeten belül ezek a hullámok különböző alakokat vehetnek fel. A jelentősebb hangterjedési formák a következők lehetnek:

- transzverzális,
- longitudinális,
- lambda-hullámok, stb. [5]

A jel terjedése során azonban problémát okozhatnak az eddig ismertetett tényezőkön felül az alábbi körülmények is:

- longitudinális és transzverzális hullámok terjedési viszonyainak eltérése
- eltérések a csoportsebességben
- sebesség diszperzió a frekvenciában [5]

A háttérzaj (mint zavaró tényezőről) esetében a legnagyobb problémát az okozza, hogy maga az esemény, vagyis a beütés elejének meghatározása ott történik, ahol a jel túllépi a háttérzaj szintjét. Ezt a határértéket be lehet állítani minden egyes gép esetében. Első lépésként meg kell mérni ezt a háttérzajt, majd megfigyelni a szórás duplikált értékét, amiből az olvasható le, hogy a jel az idejének 95%-át ezen határértéken belül tölti. A háromszoros szórás határ esetében pedig belül van az idő 99,7-ban. Ez azt jelenti, hogy még az utóbbi esetben is közel 100 mintavételből nem kevesebb, mint 3 átlépi a határértéket. Kivetítve ez a gondolat például egy 1 MHz-es mérésre, a kapott eredményben 300 beütés lenne megfigyelhető másodpercenként. Ennek megfelelően, nem véletlen, hogy a küszöbszintet lényegesen magasabb szintre kell emelni. Ez azonban már túllép az általános matematikai statisztikán, így a háttér küszöböt többnyire tapasztalat alapján szokás beállítani. Így óriási mennyiségű beütés képződik, viszont ezt a kitételt ki kell bővíteni egy olyan feltétellel is, ami megköveteli, hogy minimum további 3 szenzorban is beütés jelentkezzen belátható időintervallumon belül. Itt az idő pontosan nincs meghatározva, mindazonáltal a szakirodalom úgy fogalmaz, hogy ez az érték lehetőleg ne legyen nagyobb, mint a vizsgált szerkezet mérete, osztva a legkisebb terjedési sebességgel. [8] [5]

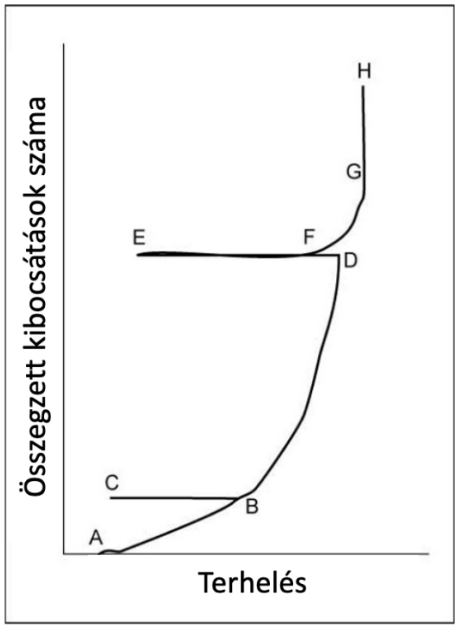
A következő zavaró tényező a sorban a longitudinális transzverzális hullámok volt. Ezek a hullámok leginkább azért okoznak gondot, mert eltérő sebességgel terjednek. Amennyiben a mérés során ezeket a hullámokat felhasználva szeretne az operátor lokalizálni, akkor lényeges, hogy jól elkülöníthető helyen legyen a beütés helye. A longitudinális hullámok egyik fő jellemzője, hogy az amplitúdójuk kisebb, ellenben az időben később érkező transzverzális hullám amplitúdójával, ami kiugrónak mutatkozik a közeli eseményekben. Feltételezni lehet, hogy az egyik szenzorban transzverzális, a másik szenzorban pedig longitudinális hullámrészek kerülnek rögzítésre, a küszöbszint megválasztása miatt. A mérés ez által, lokalizációt tekintve meglehetősen fals eredményt hozna, aminek oka a hamis terjedési idő. Az akusztikus emisszióhoz köthető kiemelkedő „burst” jelenségek kissé messzebb már szétúsznak, köszönhetően a diszperziónak, majd az összes energia csökkenése miatt,

redukálódik a részteljesítményük is. Az eredmény pedig az lesz, hogy elválaszthatatlanok lesznek a hullámalkotórészek. [8] [5]

Kaiser-effektus és Felicity-effektus

Joseph Kaiser nevéhez köthető a Kaiser-effektus, ami napjainkban, a modernkori akusztikus emissziós vizsgálatok terén kiemelkedő tudományos eredménynek számít.

Az már tisztázott, hogy az akusztikus emissziót terhelés alatt kell mérni a szerkezeten, mivel ekkor hallhatók, és regisztrálhatók legjobban az ilyen jellegű események. Kaiser volt az első, aki megfigyelte, hogy miként csökkennek az anyag szilárdsági paraméterei a terhelések hatására. Az elmélete szerint, amennyiben az események összességét a feszültség folyamatos emelése mellett vizsgáljuk, abban az esetben a B pontig ezek az események állandó növekedést mutatnak. Ez a lenti ábrán jól látható. Majd ezt követően a terhelést lecsökkentve nem figyelhető meg újabb esemény sorozat, mondhatni teljes csend tapasztalható (ez a B-C szakaszon mutatkozik meg). Ezen a ponton újabb terhelést adva a szerkezetnek C pontból indulva a B felé, mindaddig nem figyelhető meg újabb, kimutatható esemény, amíg az anyag el ne éri a korábbi terhelési szintet. Az anyag pontosan tudja, hogy milyen terhelést kapott előzőleg. Ebből kiindulva, ez a jellemző kiválóan felhasználható az akusztikus emissziós vizsgálatok során, és a szerkezetekről bármikor meg lehet állapítani, hogy addigi élete folyamán milyen maximális terhelésnek volt kitéve. [8]



9. ábra: A Kaiser effektus [8]

A szerkezet tesztelése során szintén kulcs fontosságú lehet a Kaiser-effektus. A következő példában az anyag terhelést kap, majd mikor az megszakad, akkor az anyagnak el kell csendesednie. Abban az esetben viszont, ha már megkezdődött a szakadási folyamat, akkor az anyag meggyengül, vagyis ugyanolyan terhelés hatására a feszültség is nagyobb lesz, a

vizsgált repedési csúcsban, így az anyag tovább károsodik, illetve folyamatosan bocsátja ki az akusztikus emissziós jeleket. [8]

Ezzel szemben a Felicity-effektus pedig szembe megy az eddig ismertetett Kaiser-effektus néhány elvével. Visszatérve a fenti ábrához, megfigyelve az E és F szakaszt látható, hogy a Kaiser-effektus mégsem zár vissza a D kiindulási pontba, hanem már sokkal hamarabb elkezdődik az akusztikus emissziós esemény. Az irodalom ezt hívja Felicity-effektusnak. Röviden összefoglalva annyi állapítható meg, hogy a szerkezet anyaga meggyengül, tehát ez okozza az újabb AE eseményeket. Az egyértelmű, hogy a már lepattogott körmök nem nőhettek vissza, sokkal inkább lehet szó más fajta erőhatásról, amely jelen van a szálak között. Továbbá azt is fontos kiemelni, hogy ez az effektus leginkább szálszerű anyagok esetében figyelhető meg. [8]

A SENSOPHONE AED-404 Streamer típusú akusztikus emissziós mérőeszköz

10. ábra: Sensophone AED-404 Streamer akusztikus emissziós mérőműszer [9]

Az AE vizsgálatok elvégzését szolgálja a Sensophone AED404-STREAMER adatgyűjtő, amely egy pontos, nagy felbontással rendelkező mérőeszköz, segíti a kezelőt az adott anyaghibák feltárásban. Az eszköz alkalmas nyomástartó edények, illetve egyéb mechanikai terhelésnek kitett tárgyak problémás helyeinek elemzésében. Felhasználásával lokalizálhatók a hibahelyek, hanem a korróziós, valamint kifáradásos események nyomon követhetők, a diagnosztikai folyamatba implementálható sok esetben a rezgésméréssel párhuzamosan alkalmazva. Egyszerűen konfigurálható mérőeszköz, alkalmas mind ipari, mind labor körülményekhez egyaránt, továbbá speciális ipari létesítmények eszközeinek diagnosztizálására, mint például erőművekben. Alkalmas a négy csatornán párhuzamos adatgyűjtésre, valós idővel az online dagnosztika részeként. [9]

Az eszköz fontosabb műszaki paraméterei [9]:

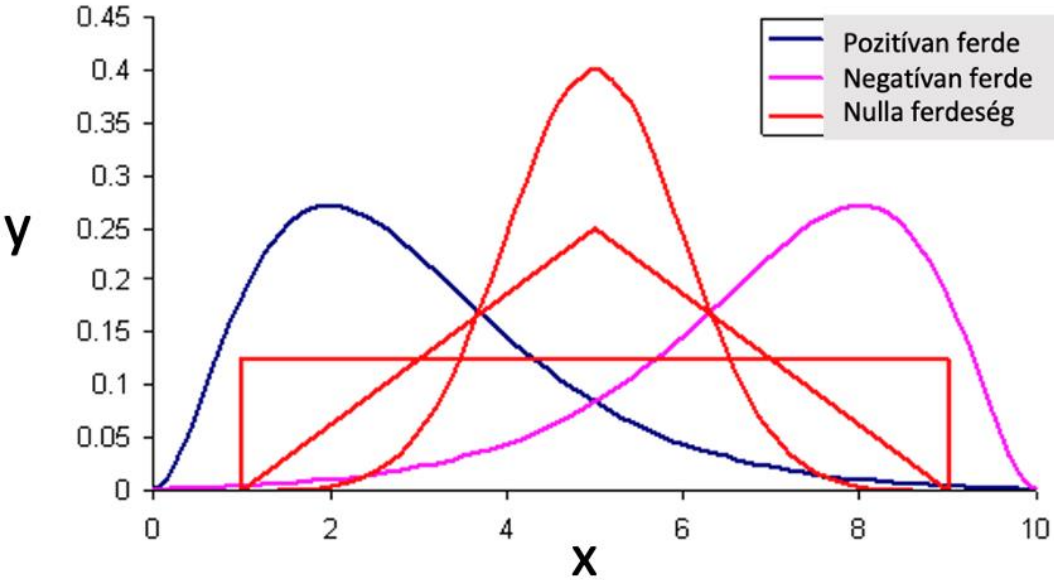
- Programozható digitális szűrő a bemeneti csatornákon: 30 kHz .. 1 MHz

- Az AE zajforrás lokalizálás síkban, henger- vagy gömbfelületen: igen
- Időtartományú jel minta mentése az AE csatornák jelein: 8 ms
- Időtartomány és spektrumanalizálás: igen
- Jelek közötti korrelációs számítások végzése: igen
- A bemeneti csatornák jeleinek valós idejű és folyamatos rögzítése (streaming) és exportálása külső adathordozóra
- Az bemeneti mérőcsatornák száma: 4
- AED404 vagy AED416 készülékek szinkronizált összekapcsolhatóságának lehetősége: nem szinkronizálható
- Programozható lineáris vagy logaritmikus erősítési működési: igen
- Akusztikus emissziós adatok mérése: igen
- L-C sávszűrők alkalmazhatósága a bemeneti csatornákon: négy féle közül
- Analóg környezeti paraméterek mérése: feszültség bemenet 1 db (+3 db belső paraméter)
- Kontroll bemeneti/kimeneti vonalak száma (digitálisan): 3
- Detektor teszt üzemmód bármely akusztikus emissziós sávra programozhatóan: igen
- PC interfész: USB
- Expander lehetőség: nincs
- Külső táplálási lehetőség: 5..12 V / 3 W
- Méret (befoglaló): 119x113x35 mm
- Tömeg: 400 g [9]

2 Jelfeldolgozási módszerek

2.1 Időtartománybeli statisztikai módszerek

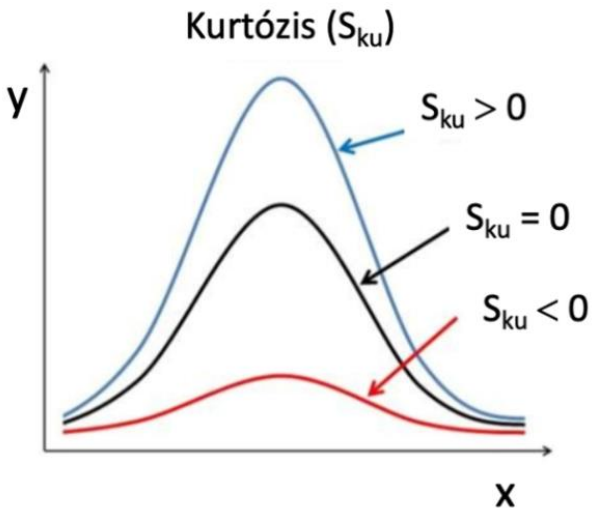
Az időtartománybeli mérések elve, hogy a mérés kitérés értéke az idő függvényében kerül ábrázolásra. Ez olyan adathalmazt eredményez, ami táblázatba exportálható és a mérési adatokon el lehet végezni a statisztikai jellemzők számításait, mint a négyzetes középérték (RMS), a valószínűségi változók sűrűségfüggvénye, variancia, csúcsossági tényező (kurtosis), a ferdeség (skewness) és a lapultsági együttható. Például csapágydiagnosztikában a hibátlan csapágyak rezgésgyorsulásának valószínűség sűrűségfüggvénye Gauss-eloszlást mutat, ezzel szemben a hibás csapágynak eltérő valószínűség sűrűségfüggvénnyel rendelkezik. A mérési jelek statisztikai momentumai eredményesen alkalmazhatók gépek és gépelemek meghibásodásainak nyomon követésére, állapotfelügyeletre és a maradék élettartam becslésére is. A csúcsossági tényező értéke körülbelül hármas értéket mutat meghibásodással nem rendelkező csapágyak esetében, ha meghaladja ezt az értéket akkor előrehaladott károsodás valószínűsíthető. Az eljárás helyi hibáknál eredményesen működik, viszont felület mentén elosztott kiterjed hibák esetében a csúcsossági tényező értéke megmarad a 3 érték körül, így nem egyértelmű indikátora a meghibásodásnak, amelynek következtében az ipari gyakorlatban ez a módszer egyeduralkodóan és széles körben nem terjedt el. [1]



11. ábra: A ferdeségi együttható negatív és pozitív értéke [10]

$$\tilde{\mu}_3 = \left[\left(\frac{X-\mu}{\sigma}\right)^3\right] = \frac{\mu_3}{\sigma^3} = \frac{E[(X-\mu)^3]}{(E[(X-\mu)^2])^{3/2}} = \frac{\kappa_3}{{\kappa_2}^{3/2}}$$

ahol μ az átlag, σ standard eltérés, E az elvárás operátora, μ_3 a harmadik central moment, κ_t a t-edik kumuláns.



12. ábra: A csúcsossági együttható különböző értékei [11]

$$Kurt[X] = E\left[\left(\frac{X-\mu}{\sigma}\right)^4\right] = \frac{E[(X-\mu)^4]}{(E[(X-\mu)^2])^2} = \frac{\mu_4}{\sigma^4}$$

2.2 Frekvenciatartománybeli spektrumelemzési módszerek

A frekvenciatartománybeli vizsgálatok alapja, hogy mért diagnosztikai jelet az időtartományból matematikai módszerekkel áttranszformáljuk és előállítjuk a frekvenciaspektrumot. Az eljárás matematika hátterét a Fourier transzformáció szolgáltatja. Attól függően, hogy a jel folytonos vagy diszkrét jellemzőkkel rendelkezik, használni kell a folytonos Fourier transzformációt (CFT) vagy a diszkrét Fourier transzformációt (DFT). A valós fizikai mennyiségek természetükből eredően folytonos mennyiségek, pl. a hőmérséklet változása az időben. A régi analóg (mutatós, Deprez-alapú) műszerek egyre inkább a feledés homályába merülnek mind a laboratóriumi, mind az ipari méréseknél. A digitális mérőműszerek mintavételezésen alapuló méréseket szolgáltatnak, digitális jeleket eredményeznek, amelyekkel könnyen végezhetők matematikai műveletek és a zajjal szembeni viselkedésük is jobb. [1]

A függvények elemzése során megállapítható, hogy az ún. négyzetesen integrálható, **T** periódusú $\mathbb{R} \to \mathbb{C}$ függvények terében az $\left\{\mathbf{e}^{\mathbf{i}\cdot\mathbf{k}\cdot\frac{2\pi}{T}\cdot\mathbf{t}}, \mathbf{k} \in \mathbb{Z}\right\}$ függvények ortogonális rendszert alkotnak és egy adott **f** függvény Fourier együtthatói felírhatók az alábbi alakban [1]:

$$\hat{\mathbf{f}}_{\mathbf{k}} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}} \cdot \int_{-\mathbf{T}/2}^{\mathbf{T}/2} \mathbf{f}(\mathbf{t}) \cdot \mathbf{e}^{-\mathbf{i}\cdot\mathbf{k}\cdot\frac{2\pi}{T}\cdot\mathbf{t}} \mathbf{dt},$$

A függvény Fourier sora az alábbi:

$$\mathcal{FS}\mathbf{f}(\mathbf{t}) = \sum_{\mathbf{k}=-\infty}^{\infty} \hat{\mathbf{f}}_{\mathbf{k}} \cdot \mathbf{e}^{\mathbf{i}\cdot\mathbf{k}\cdot\frac{2\pi}{T}\cdot\mathbf{t}}, \mathbf{t} \in \mathbb{R}$$

Használva a körfrekvenciára vonatkozó $\frac{2\pi}{T} = \omega_0$ jelölést, az exponenciális rendszer $\{e^{i\cdot k\cdot\omega_0\cdot t}, k \in \mathbb{Z}\}$, a Fourier sor $\mathcal{FS}f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \hat{f}_k \cdot e^{i\cdot k\cdot\omega_0\cdot t}, t \in \mathbb{R}$ alakú lesz. Több esetben felmerül kérdésként a rezgésdiagnosztikában, hogy lehet meghatározni a mért jel energiatartalmát, amelyre az amplitúdók négyzetének integrálja ad választ, amelyre elmondható, hogy arányos az energiatartalommal és az alábbi matematikai formulával fejezhető ki, amelyet számos program (pl. Labview) már beépített funkcióként kínál számítási lehetőségként a felhasználó számára:

$$\frac{1}{T} \cdot \int_{-T/2}^{T/2} |f(t)|^2 \, dt = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left|\hat{f}_k\right|^2$$

Felmerül annak a kérdése, hogy a Fourier sorok felírását követően, hogy lehet értelmezni a Fourier transzformációt, ugyanis gyakorlati szempontból kitüntetett jelentősége van, amelynek segítségével állítjuk ez a vizsgált jel spektrumát műszaki diagnosztikai elemzés céljából, a transzformáció egy adott $f: \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ integrálható függvényre az alábbi alakban írható fel:

$$\hat{f}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{t=-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-i\cdot\omega\cdot t} \, dt, \quad \omega \in \mathbb{R},$$

Előállítható az előbbi függvény Fourier integrálja is, a következőképpen:

$$\mathcal{FI}f(t) = \int_{\omega=-\infty}^{\infty} \hat{f}(\omega) \cdot e^{i\cdot\omega\cdot t} d\omega, \quad t \in \mathbb{R}.$$

A matematikában ismert az úgynevezett Euler formula, amely segítségével a függvény felírható sin és cos függvények összegére, tehát alkalmazva a jól ismert szabályt, az alábbit kapjuk eredményül:

$$\begin{aligned}\hat{f}(\omega) &= \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{t=-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-i\cdot\omega\cdot t} \, dt \\ &= \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{t=-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \cos(\omega \cdot t) \, dt + i \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{t=-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \sin(\omega \cdot t) \, dt \\ &= \frac{1}{2} \cdot \left(\hat{a}(\omega) + \hat{b}(\omega)\right)\end{aligned}$$

Ahogy korábban a jegyzetben már utaltam rá, a folytonos jel egy fizikai mennyiség változását mutatja és az is érvényes rá, hogy negatív időtartományban nincs értélme az integrálásokat elvégezni, csak pozitív időtartományban. Ugyanakkor az is lényeges szempont, hogy hány darab mérési pont kerül mentésre és eltárolásra. Gondolhatnánk, hogy minél több mérési adat, annál jobb és pontosabb eredményt kapunk a műszaki diagnosztizálás szempontjából, de sajnos ez nincs így. Egyes méréseknél felesleges a nagyon sok mérési pont, mert nem

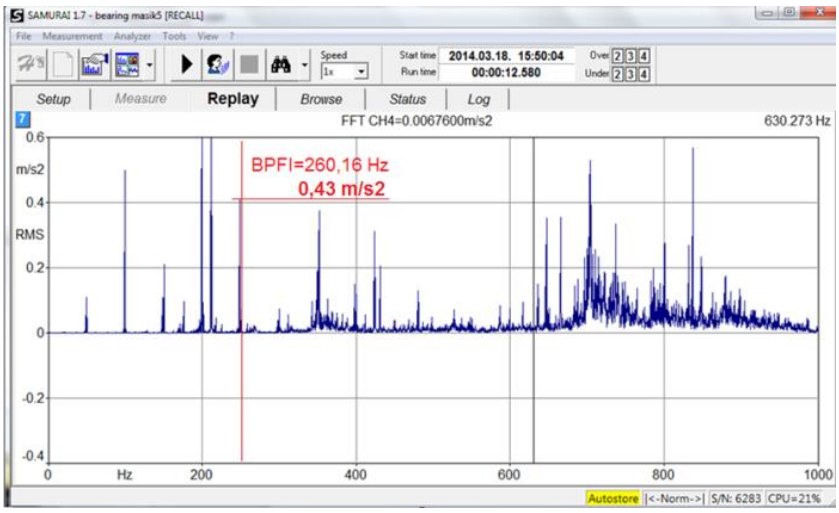
szolgáltat egyéb, specifikus információt, lásd példának a környezeti hőmérséklet változásának mérését. Az okok az alábbiakra vezethetők vissza: a sok mérési pont nagy tárolókapacitást igényel, ha online, valós idejű mérésekről van szó, akkor irreálisan hosszú gépidőt eredményez, hosszabbat, mint sokszor a hiba detektálásra fordítható idő.

Ez a gondolat vezetett el a diszkrét Fourier transzformáció (DFT) fogalmához. A jelet az idő tartományból át kell transzformálni a frekvencia tartományba, amelynek célja a Spektrum előállítása a hiba frekvenciák felismerése céljából. A műszaki mérés technikában és a diagnosztikában azzal is szembe kell nézni, hogy a mérési adatok növekedésével egyre több adatot szükséges tárolni, amelyeket fel kell dolgozni és a számítógépek véges adattárolási és számítási kapacitásával eredően a feladat korlátozottan hajtható végre. Főleg a valós idejű mérések esetében jelentett problémát, ahol a mérési adatok egyidejű feldolgozása szükséges annak értékelésével és elemzésével párhuzamosan ebben az esetben tekintettel kell lenni mintavételezési frekvencia ára a mérési adatok összes számára és ezeket az adott műszaki diagnosztikai feladatnak megfelelően megválasztani.

A diszkrét Fourier transzformáció kiszámításához szükséges egy $x[n], n = 0, \dots, N-1$ diagnosztikai mérésekkel előállított jelsorozat, amelynek eredménye paraméteresen a diszkrét Fourier transzformáció után az alábbi lesz:

$$X[k] = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-i \cdot k \cdot n \cdot \frac{2\pi}{N}}, \quad k = 0, \dots, N-1 .$$

A Fourier transzformáció van kapott frekvencia spektrumból Ki kell választani azokat a frekvencia komponenseket Amelyek az adott gépelem hiba frekvenciája jellemzőek Tehát az adott gépelem meghibásodás arra utalnak ezeket a frekvenciákat össze kell hasonlítani a hibátlan gépelemek által generált frekvencia amplitúdókkal és amennyiben növekedés tapasztalunk az egészséges állapothoz képest a károsodás megállapítható és be kell avatkozni a folyamatba akár a gépelem cseréjével akár a megfelelő javítás technológiai intézkedés végrehajtásával.



13. ábra: Csapágy frekvencia hibaspektrum

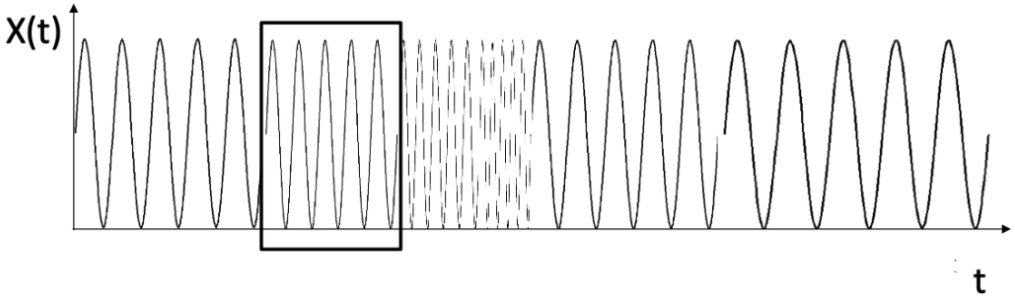
Gyors Fourier transzformáció (FFT)

A diszkrét Fourier transzformáció egyik speciális változata a gyors Fourier transzformáció, ami fokozott számítási kapacitást tesz lehetővé csökkenti a számításhoz szükséges időtartamot abból eredően, hogy a gyors Fourier transzformáció esetében nem szükséges kiszámolni az összes mérési pont együtthatóit, hanem csak bizonyos pontok értékénél szükséges kiszámolja transzformációt, ezáltal gyorsítani tudjuk a számítást. Az egyik klasszikusnak mondható módszer lényege, hogy a mérési adatokat két csoportra választjuk az egyik csoporttól elvégezzük a megadott számítási metódus majd a másik csoport értékeivel a kapott eredményeket kombináljuk a felezés egyenetlensége céljából a páros elemszámú mintákkal végezzük el a számítást és a páratlanokat elhanyagoljuk. [1]

2.3 STFT és a wavelet transzformáció alapjai

Szóba került már, hogy az időtartománybeli mérés a diagnosztikában lehetővé teszi, hogy a mérési pontokat az idő függvényében megjelenítjük még a frekvenciatartománybeli mérés lehetővé teszi, hogy elő állítsunk a mérési jel spektrumát. Ezen túlmenően a laboratóriumi és az ipari gyakorlatban egyaránt felmerült annak az igénye, hogy ne csak külön az idő tartományban és külön a frekvenciatartományban kerüljenek megjelenítése a jelek, hanem egyidejűleg mindkét tartományban elemzésre kerülhessen, ennek céljából jelent meg az STFT és a wavelet transzformáció. Az STFT transzformáció más néven rövid idejű vagy ablakhoz ott Fourier transzformáció, amely segítségével a jelet olyan keskeny idősávok bontjuk, amelyben állandónak tekinthető és ezekben a sávokban végezzük el a Fourier transzformációt, tehát úgynevezett lokalizálást hajtunk végre, amelyhez ablak függvényeket alkalmazunk és a rövid intervallumon elemezzük a diagnosztikai jelet, ennek segítségével a jel egy precízebb felbontását kaphatjuk meg a hagyományos Fourier transzformáció az képest.

Short Time Fourier Transformation (STFT) esetében a jelet kis méretű tartományokra bontjuk fel ablakozás segítségével. [1]



14. ábra: Lokalizáció az STFT módszernél [1]

Folytonos idejű STFT számítása esetében csak egy ablakfüggvénnyel való szorzást követően végezzük el a Fourier transzformációt a mérési jelen az alábbi formula szerint [1]:

$$X(\tau,\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} (x(t) \cdot w(t-\tau)) \cdot e^{-i\omega t}\, dt,$$

ahol a $w(t)$ ablakfüggvényt jelöli, lehet például Hanning, Hamming, Blackmann, négyszögletes stb. ablakfüggvény. [1]

A diszkrét idejű STFT matematikai képlete az alábbi összefüggéssel jellemezhető [1]:

$$X(m,\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] \cdot w[n-m] \cdot e^{-i\omega n},$$

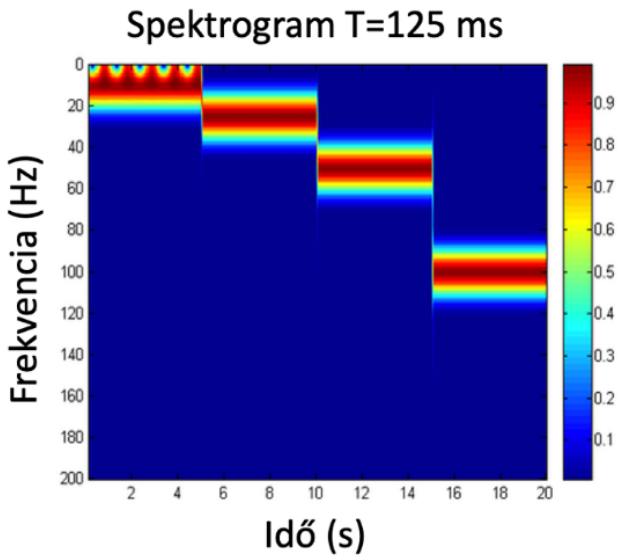
ahol $x[n]$ a diszkrét érték készlettel rendelkező diagnosztikai vizsgálati jel, $w[n]$ az mérések során alkalmazott ablakfüggvény. [1]

Az úgynevezett spektrogram az amplitúdó értékek négyzetéből számítható, vagyis $(\tau,\omega) \rightarrow |X(\tau,\omega)|^2$

Az eredeti jel inverz matematikai művelettel visszaállítható az alábbi formula alapján [1]:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} X(\tau,\omega) \cdot e^{i\omega t}\, dt d\omega$$

Az ablakozott Fourier transzformáció egyik hátránya a műszaki diagnosztikában, hogy fix értékű ilyen felbontást produkál, tehát választani kell egy megfelelő idő vagy megfelelő frekvencia felbontás közül ez sok esetben nem egyszerű feladat. Ennek oka, hogy a jelek prioritását nehéz meghatározni, viszont általánosságban elmondható, hogy a széles ablak az ablakozott Fourier transzformáció esetében jobb frekvencia felbontást biztosít, viszont egy keskeny ablak rossz a frekvencia felbontást eredményez, továbbá az is megállapítható, hogy a szélessávú felbontás alkalmazásával az időben történő felbontás nem megfelelő lesz míg a keskeny sávú felbontás esetében az időben történő elemzés részletgazdag lesz és a frekvencia felbontás nem rendelkezik elegendő információval ahhoz, hogy a jelből a megfelelő műszaki diagnosztikai következtetést levonjuk. [1]



15. ábra: Spektrogram [1]

Az itt leírt problémára kínál megoldást a wavelet transzformáció, amely megfelelő idő felbontást eredményez nagyfrekvenciás műszaki diagnosztikai mérések esetében és ugyanakkor megfelelő frekvencia felbontást ad az alacsony frekvenciák esetében is, ennek a transzformációnak a tárgyalásra viszont már túlmutat a jegyzet terjedelmén.

2.4 A digitális jelfeldolgozás alapjai

Az alábbi fejezetben a digitális jelfeldolgozás alapjairól lesz szó műszaki diagnosztikai megközelítésben is, mert a méréstechnikában a műszaki jelek mérése az egyes gépeken vagy gépelemeken ezeken a különböző szenzorok segítségével történik, amelyek alapvetően lehetnek elmozdulás érzékelő szenzorok lehetnek a sebesség érzékelő vagy gyorsulás érzékelő szenzorok.

Az érzékelők egy folytonosan változó fizikai mennyiség mérését teszik lehetővé és előállítják a bele arányos villamos feszültséget ez a feszültség lehet vagy analóg és követi a folytonosan változó értékét, vagy lehet digitális, amely esetben digitális konverter alkalmazunk az az analóg jel digitálissá történő alakítására, amelyek kvantálásnak nevezünk és szoros összefüggésben áll a digitalizálás és a mintavételezés fogalmaival.

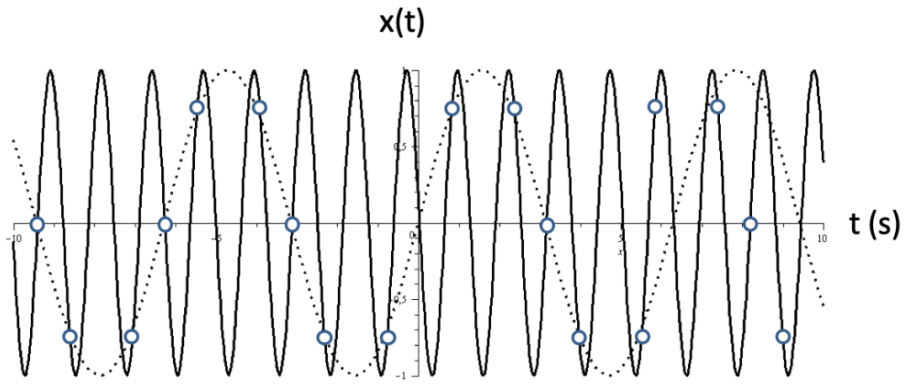
Az elmozdulás érzékelő sok esetben örvényáram érzékelő formájában kerülnek alkalmazásra és a mérendő objektumra vagy közvetlen módszerrel például ragasztással vagy mágneses rögzítésre kerülnek rögzítésre. Az örvényáramú érzékelők nincs közvetlen kapcsolata a mérési jellel a méret objektum. Az elmozdulás érzékelőket széles körben alkalmazzák siklócsapágyak vizsgálatára és tengelyek pozícióinak megállapítása céljából is.

Az érzékelők másik nagy csoportja a sebesség érzékelők, amelyek felépítésére jellemző, hogy az érzékelő házban tekercs helyezkedik el, amely mágneses erőtérben mozog és az ismert fizikai elv alapján a tekercs végén villamos feszültség keletkezik a villamos feszültség változásából lehet következtetéseket levonni arra vonatkozóan, hogy milyen rezgés sebesség változás következett be a gépen vagy a gépelemen. Ezeknek az érzékelőknek az előnye a viszonylag egyszerű felépítés viszont a nagy geometriai méret és a nagy tömeg, amely nem teszi lehetővé kisméretű és kis tömegű gépek a diagnosztizálását.

Igen elterjedtek a rezgés gyorsulásérzékelők, amelyek piezoelektromos elven működnek, ennek az elvnek a lényege, hogy ha a fizikai erőhatás gyakorlunk a szenzorra, akkor a szenzor felületein töltés halmozódás jön létre, amely villamos feszültség formájában jelentkezik. A villamos feszültség változásra arányos a szenzor ható erővel, és ismert, hogy Newton II. törvénye értelmében az erő és a gyorsulás egymással arányos. A rezgésmérő szenzorok előnye a kis tömeg és kis méret. Minden szenzornak van egy saját frekvenciája, amelyre a legérzékenyebb viszont egy viszonylag széles tartományban lehetővé teszi a mérések elvégzését, amely a szenzor specifikációjában megtalálható.

A digitális méréstechnika fontos része az analóg digitális jelátalakítás, amelyet analizátorok végeznek és az időjelek mintavételezési alapul a mintavételezés. Tulajdonképpen egy olyan eljárás, amelyet különböző áramkörök segítségével lehet végezni, ezt a diagnosztikában az adatgyűjtő egységek teszik lehetővé az adatgyűjtő egységekben található A/D konverter

segítségével. Az adatgyűjtő a mintavételezést a szoftverben beállított értékek segítségével végzi el a mintavételezési frekvenciára vonatkozóan a Shannon féle mintavételezési törvény az iránymutatásával. A mintavételezés pontosságát nagyban eldönti a mintavételezési frekvencián túlmenően az úgynevezett bit-szám, vagy bit- mélység, amely azt határozza meg, hogy hány lépcsőre lehetséges bontani a mérési jelet az amplitúdó vonatkozásában. Minél nagyobb bit számmal rendelkezik a mérőeszköz, annál nagyobb felbontás tesz lehetővé, viszont annál nagyobb számítási kapacitás igény és adattárolási memória szükséges a mérési adatok tárolásához és feldolgozásához. Mindig az adott alkalmazás dönti azt el, hogy hány bit mélységű mérést szükséges elvégezni. Általában elmondható, hogy a 12 bit mélységű mérő kártyát megfelelő felbontás biztosítanak. Ma már általánosnak mondható a 16 bit felbontással rendelkező adatgyűjtő kártyák és egyes pontos esetekben a 24 bit felbontású kártyákat alkalmazzák. A mintavételi sebesség döntő hatással van a legnagyobb mérhető frekvenciára és az erre vonatkozó elméleti összefüggést Shannon féle mintavételezési törvény fejezi ki, amely szerint a mintavételezési frekvenciának legalább kétszeresének kell lennie, mint a mérendő jel maximális frekvenciájának. A pontos elméleti szám erre vonatkozóan 2.56, viszont a gyakorlatban kijelenthető, hogy jóval a kétszeres mintavételezési frekvencia alkalmazása történik, ugyanis a legnagyobb mérési frekvencia 4-5-ös értékével, sőt adott esetben tízszeres értékével dolgoznak. Ennek oka az aliasing jelenséggel kerülése, amely igen káros hatással van a mérési eredmények értékelésére és műszaki diagnosztikai szempontból a jelenlévő hibák megállapítását is negatívan befolyásolja. [1]



16. ábra: Aliasing, téves frekvenciák megjelenése a spektrumban [1]

Az aliasing jelenség hátránnyal főleg a jel Fourier transzformáció jó után keletkezik, ugyanis rezgés spektrumban megjelennek olyan komponensek is, amelyek nem részei az eredeti jelnek, ebből eredően hibás következtetéseket vonhatunk le a diagnosztika során. A korszerű digitális mérőeszközökben aliasing szűrő áramkörök biztosítják a jelenség elkerülését. [1]

A mérések során a gyakorlatban csak a frekvencia tengelyének a pozitív tartománya az érdekes, viszont tekintettel kell lenni a teljes frekvenciaspektrumra is. A spektrum olyan részleteket is tartalmazhat, amelynek nincs köze az eredeti jelhez, vagyis a spektrum a frekvenciatartományban elkentnek látszik. Ezt a jelenséget az angol szakirodalom „leakage” jelenségnek nevezi, ami kiszivárgást vagy kifolyást jelent magyarul. [1]

Gyakran keletkezik a jelben egy látszólagos ugrás, amelynek az értékét azzal lehet csökkenteni, hogy egy jól megválasztott ablak függvénnyel megszorozzuk a mérési jelet. Az ablak függvényre jellemző, hogy a kezdeti érték és a végponti értékelés zérus, vagyis a szorzást követően mérési jel szintén nulla értéket vesz fel. Ezzel megszüntethető a szakadás, illetve a szét folyás jelensége. Számos ablak függvény ismert és mindig a pontos jelalak határozza meg, hogy mely ablak függvény alkalmazása szükséges. Pár tipikus ablak függvény a Hanning, Hamming, Blackman-Harris ablakfüggvények. Általában a laboratórium és az ipari méréstechnikában Hanning ablakfüggvény használatos. [1]

Összefoglalva tehát megállapítható, hogy a szivárgás abból ered, hogy a mérési jel értékei nem zérus a mintavételezési időszak elején és a végén. Az egyes időjel összetevők mérséklése esetén az adott spektrum vonal teljesítménye fokozza a szomszédos vonalak amplitúdóját, így a spektrum egy véletlenszerű sztochasztikus torzítása következik be. Ugyanakkora mérőeszköz csak a mintavételezési szakaszban meghatározott diagnosztikai jeleket ismeri, és azt feltételezi, hogy a mérési időszak végén a mérési jel zérus értékű, viszont ez a valóságos esetekben sokszor nem áll fenn. Egy bemeneti jel rövid idejű tranziens jel, akkor zérussal kezdődik és zérus a végződik és ebben az esetben nem lenne szükséges ablak függvénnyel történő szorzás. Előfeltétele, hogy a tranziens jel időtartama legyen kisebb, minta mérési ablak hossza. [1]

A műszaki diagnosztikai mérési spektrum legfontosabb jellemzői az alábbiak, mint a; frekvenciatartomány, a spektrumvonalak száma (L), az alkalmazott ablakfüggvény fajtája és további információ lehet az átlagolás, a mintavételezési frekvencia (F_s), a felbontás (BW), a mintavételezési idő (T_o), a minta elemszám (N), melyeket a mérőrendszerhez kapcsolódó programban lehet definiálni. [1]

Lényeges matematikai formulák az értékek számításához:

$$F_s = 2{,}56 \cdot F_{max}\ [Hz] \qquad T_s = \frac{1}{F_s} = \frac{1}{2{,}56 \cdot F_{max}}\ [s]$$

$$BW = \frac{F_{max}}{L}\ [Hz] \qquad N = 2{,}56 \cdot L$$

$$T_o = \frac{L}{F_{max}} = N \cdot T_s = N \times \frac{1}{2{,}56 \cdot F_{max}}\ [s]$$

Megállapítható, hogy a műszaki diagnosztikában előforduló gépek többségében forgó mozgást végeznek. Ebből eredően harmonikus függvényekkel leírható mozgást generálnak, vagyis, sin és cos függvények lineáris kombinációjával jellemezhetők. Elméleti esetben a gépek rezgései és a belőlük származtatott mérési jelek determinisztikusak, jól meghatározhatók, viszont a valóságos mérnöki gyakorlatban a jelek sztochasztikus képet mutatnak. Ennek oka a terhelés változásból származó fordulatszám ingadozás, illetve a hálózati tápellátás során jelentkező feszültségingadozások. Másik oka a valóságos rezgések nem determinisztikus jellegének a mérések során fellépő járulékos zajok, amelyek többnyire

környezeti rezgések formájában jelentkeznek és károsan befolyásolják a mérési eredményeket. Sok esetben ez számottevő különbségeket eredményezhet ugyanazon a mérőponton több mérés végrehajtása esetében. A spektrumok átlagolásával a véletlen zaj és véletlen rezgések szerepe csökkenthető, simább frekvencia képet eredményeznek, amelyben csökken a sztochasztikus jelenségek hatása és fokozódik a determinisztikus összetevők dominanciája. A környezeti zajokat, amelyek a villamos zajok formájában is megjelennek a mérése áramkörökben teljesen megszüntetni nem lehet. A zajok egy másik csoportja a villamos eredetű zajok, amelyek a villamos áramkörök belső kapacitív és induktív jelenségeivel vannak összefüggésben. [1]

Az átlagolásnak két fő típusa a lineáris átlagolás és az exponenciális átlagolás. A lineáris átlagolás során az összes átlagolandó frekvencia képet egyenlő súllyal kell figyelembe venni, az exponenciális átlagolás esetében viszont a legutóbbi mintavételezéshez kapcsolódó frekvenciaspektrumokat nagyobb súllyal kell figyelembe venni, mint az időben korábbiakat. Az exponenciális átlagolást elsősorban időben változó jelek méréséhez alkalmazzák. [1]

3 Kopásból eredő károsodások és a csapágy meghibásodások szakaszai

3.1 Kopásból eredő károsodások

Adhéziós kopás

Az adhéziós kopás során az érintkező felület elemek kis területen érintkeznek egymással és a nagy működési erő, a folyáshatárt meghaladó feszültséget eredményez. Ennek hatására képlékeny alakváltozás történik. Az egymással kölcsönhatásban lévő anyagokkal és maradó deformáció keletkezik a terhelés megszűnése után. Mivel az egymással érintkező felületek nem statikus, hanem dinamikus állapotban vannak, az elmozdulás következtében az egymással érintkezésbe került és a hideghegedés folyamán összetapadt felületek elválnak egymástól és gödröcskéket eredményeznek a munkadarabon. Így előáll a felületi minőség számottevő romlása, amely megnyilvánul a rezgésszint általános növekedésében is. Tipikus megjelenési formája az adhéziós kopásnak a berágódás, lyukak pikkelyek képződése a felületeken. [12]

Abráziós kopás

Az abráziós kopás során a kemény szemcse (pl. csapágyolajban lévő fémforgács) barázdát eredményez és a barázdából kiváló rész kopási részecske formájában leválik. Rideg anyagok esetében fokozott az abráziós kopás, mint képlékeny anyagoknál. Megjelenési formái: rovátkolódás, kaparási nyom, vájat, hullámok, kráter. Az abráziós (csiszoló) kopás akkor fordul elő, ha kemény durva felület csúszik a lágyabb felületen.

A csiszoló kopás általában a kontaktus típusa és az érintkezési környezet szerint osztályozható. A felületek érintkezési típusa határozza meg a csiszoló kopás módját. A csiszoló kopás két módja két testnek és három test kopásnak ismert. Két test kopás akkor jelentkezik, amikor a szemcsék vagy a kemény részecskék eltávolítják az anyagot az ellenkező felületről. A közös analógia az, hogy az anyagot levágják vagy elforgatják vágó vagy szántó művelettel. A három test kopása akkor következik be, ha a részecskék nincsenek korlátozva, és szabadon gördülnek és csúsznak le a felületen. Az érintkezési környezet határozza meg, hogy a kopás nyílt vagy zárt állapotban van-e. Nyitott érintkezési környezet akkor fordul elő, ha a felületek megfelelően eltolódnak egymástól. [12]

Számos olyan tényező létezik, amely befolyásolja a kopás kopását és így az anyageltávolítás módját. Számos különböző mechanizmust javasoltak annak leírására, hogy milyen módon távolítják el az anyagot.

Az abrázió akkor következik be, amikor az anyag oldalra kerül, a kopási részecskéktől távolodva, ami olyan hornyok kialakulását eredményezi, amelyek nem tartalmaznak közvetlen anyageltávolítást. Az eltolódott anyag a hornyokkal szomszédos gerinceket képez, amelyek a csiszolószemcsék későbbi áthaladásával eltávolíthatók. Töredezettség akkor következik be, amikor az anyagot vágási eljárással elválasztják a felületről, és a behúzódó csiszolóanyag a

kopásálló anyag helyi repedését okozza. Ezek a repedések ezután szabadon terjednek a kopási horony körül, ami további anyag eltávolítását eredményezi. [12]

Felszíni kifáradás az anyagfáradás egyik fajtája. Fáradt kopás keletkezik, amikor a kopási részecskéket eltávolítják a felületen lévő mikro méretű felületrészek ciklikus repedés-növekedése. Ezek a mikrolemezek vagy felületi repedések, vagy felszín alatti repedések. [12]

Fáradásos kopás

A fáradásos kopást ismétlődő, ciklikus mechanikai igénybevételek okozzák. Fáradásos kopás során kifáradás, repedésképződés, repedésterjedés lép fel, amely anyaghámlást okoz. A fáradásos kopási mechanizmus száraz és vegyes súrlódási állapotban fordul elő. Fáradásos kopást okozó repedések a felszínen és felszín alatt keletkezhetnek. A felületi hibákból a súrlódás hatására repedések indulnak az anyag belseje felé, rontva annak belső mechanikai szilárdságát. A korróziós kölcsönhatások növelik a fáradásos kopás sebességét. [12]

Fretting kopás

A fretting kopás a két felület közötti ismételt ciklikus kopás. A fretting eltávolítja az anyagot az egyik vagy mindkét érintkező felületről. Általában a csapágyaknál fordul elő, jóllehet a legtöbb csapágy felülete keményedik, hogy ellenálljon a problémának. A felszínen repedések keletkeznek, vagyis kifáradás lép fel. Egy kapcsolódó probléma az oxidáció megjelenése. Az oxidok általában keményebbek az alatta lévő fémnél, így a kopás felgyorsul, mivel a keményebb részecskék tovább súrolják a fémfelületeket. A fretting kopás gyakran együtt jelentkezik a korrózió jelenségével, ennek neve fretting korrózió. [12]

Eróziós kopás

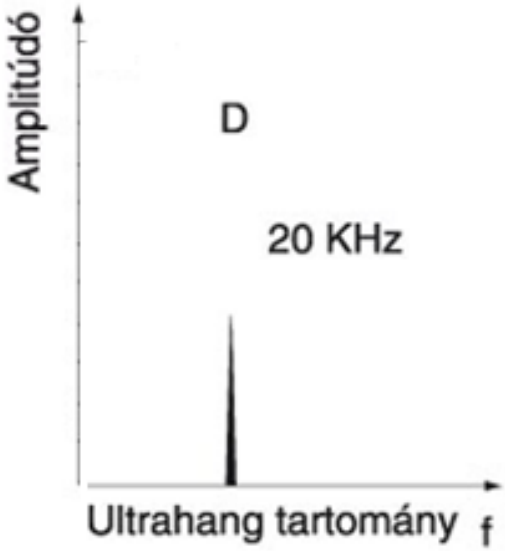
Az eróziós kopást a szilárd vagy folyadék részecskéknek az objektum felszínére gyakorolt hatása okozza. Az ütköző részecskék fokozatosan eltávolítják az anyagot a felszínről és ezzel kopást idéznek elő. [12]

Az eróziós kopás sebessége számos tényezőtől függ. A részecskék anyagjellemzői, mint például alakjuk, keménységük, ütközési sebességük és ütközési szögük, a mozgási energia, az alapanyag, valamint a lecsapódó felület tulajdonságai. Az ütközés szöge az egyik legfontosabb tényező, és széles körben ismeretes a szakirodalomban. [12]

3.2 Gördülőcsapágyak időbeli károsodásának szakaszai

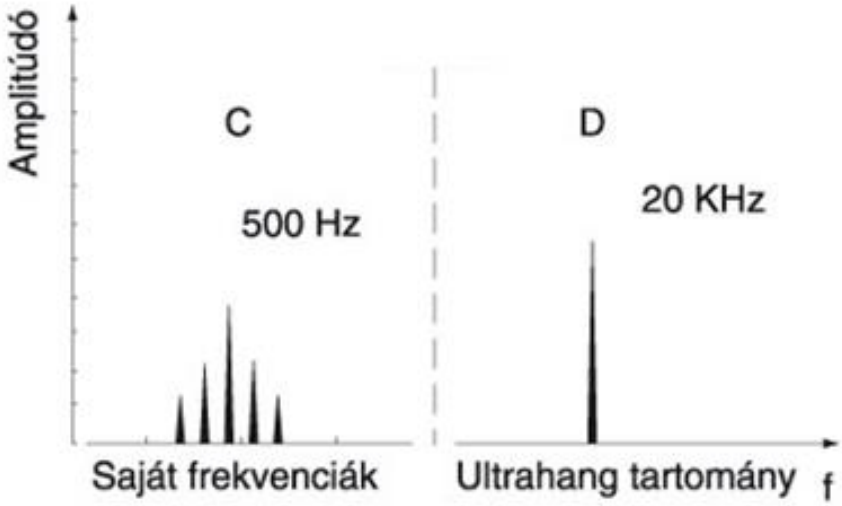
A gépek és a csapágyak károsodására általánosan jellemző, hogy a meghibásodás korai szakaszában a frekvenciák a magas ultrahang tartományban jelentkeznek gyakran több száz kHz tartományban. A diagnosztizálás csak igen magas frekvencia tartományban működő eszközökkel lehetséges, mint például akusztikai emissziós módszert alkalmazó mérőeszközökkel. A meghibásodások korai szakaszában jelentkező nagyfrekvenciás rezgések nem minden esetben utalnak a gépek vagy a csapágy tényleges meghibásodás ára. A felületi minőségből eredően, abból eredően, hogy nem tökéletesen simák az egymással kapcsolódó felületek, keletkezik egy alap nagyfrekvenciás rezgés, amely csupán a kapcsolódó felületek kölcsön hatására utal, de nem a hiba tényleges jelenlétére. A felületi érdesség romlása, tehát

az elhasználódás és a kopásokból eredően a rezgésmérés során meghatározott frekvenciatartomány az igen magas frekvencia értékektől az alacsony a frekvencia érték irányába tolódik el. Ez egyrészt magyarázható az átlagos felületi érdesség romlásával, másrészt azzal is, hogy megjelennek helyi lokális hibák a munkadarab felületén, amelyek kisebb frekvenciájú rezgéseket produkálnak a spektrumban. [13]



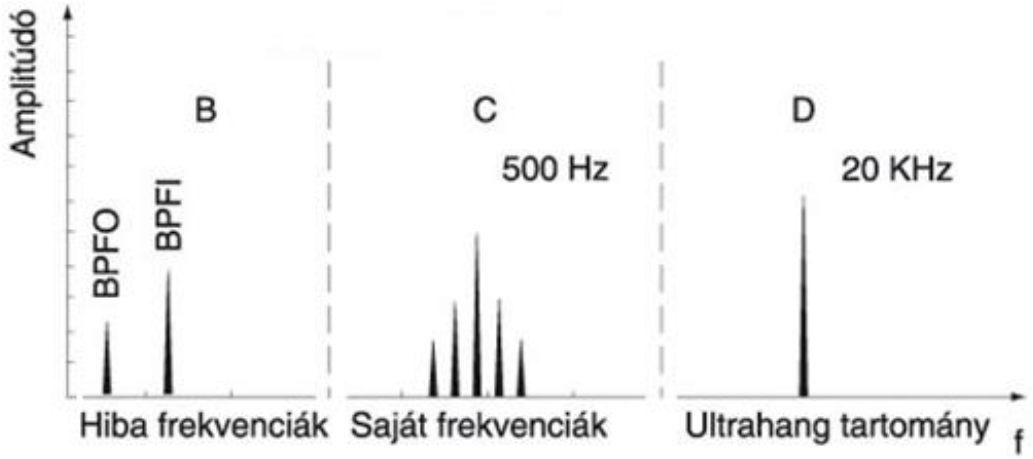
17. ábra: Az első szakasz spektrumképe [13]

A csapágy második meghibásodási szakaszában (18. ábra) kis méretű gödrök (pitting) jelennek meg a csapágy alkotóelemein. Üzem közben szélessávú amplitúdómodulált gerjesztés jelenik meg a csapágyban, amelyeket diagnosztizálni lehet és a csapágy komponenseinek sajátfrekvenciáit gerjeszti. Rezgésamplitudó növekedés lép fel az 500 Hz – 20 kHz tartományban, ezzel párhuzamosan diagnosztizálhatók az oldalsáv frekvenciák az amplitúdómoduláció következtében. [13]



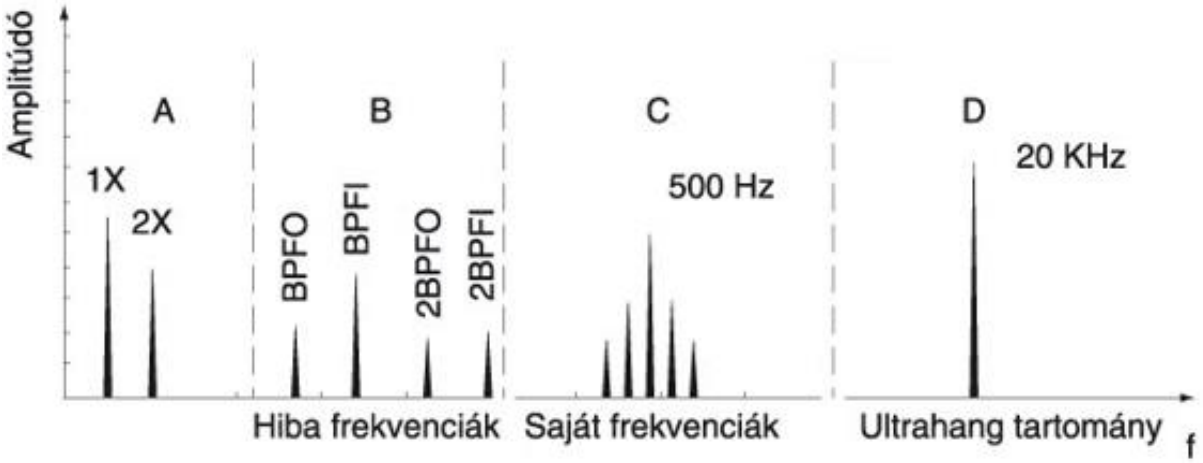
18. ábra: A második szakasz spektrumképe [13]

A csapágykopás miatt a hibafrekvenciák alsóbb tartományok felé tolódnak és már az üzemi frekvencia felett, tipikus BPFO, BPFI tartományokban is rezgések jelennek meg, amelyek a csapágy irreverzibilis károsodására utalnak (18. ábra). A csapágyat szétszerelve ekkor már szemmel is észlelhető hibák keletkeznek a külső- és belső gyűrűkön. [13]



19. ábra: A harmadik szakasz spektrumképe [13]

A következő szakaszban jellegzetes akusztikai zajjal társulva megjelennek az üzemeltetési frekvencia körüli és annak többszörösei frekvenciákat tartalmazó hibák (19. ábra). Gépjárművek esetében tipikus zörgési és búgási jelenségek utalnak a csapágy károsodására. A csapágyat szétszerelve egyértelművé válik a kipikkelyesedés, alak- és méretdeformáció. [13]



20. ábra: A negyedik szakasz spektrumképe [13]

A további állapotromlást mutatja az oldalsáv frekvenciák megjelenése a rezgési spektrumban. (20. ábra) Az üzemeltetési hőmérséklet gyakran meghaladja az üzemi hőfokot is, amely a csapágy kenési állapotát tovább rontja, javasolt a termoelemekkel és hőkamerával történő diagnosztika. Az itt leírt jelenségekkel párhuzamosan a sajátfrekvenciák és az ultrahang tartományokban további és fokozott rezgésamplitúdó növekedés tapasztalható. [13]

4 Műszaki diagnosztikai esettanulmányok MATLAB alkalmazásokkal

4.1 Fourier transzformáción csapágyhiba diagnosztizáláshoz

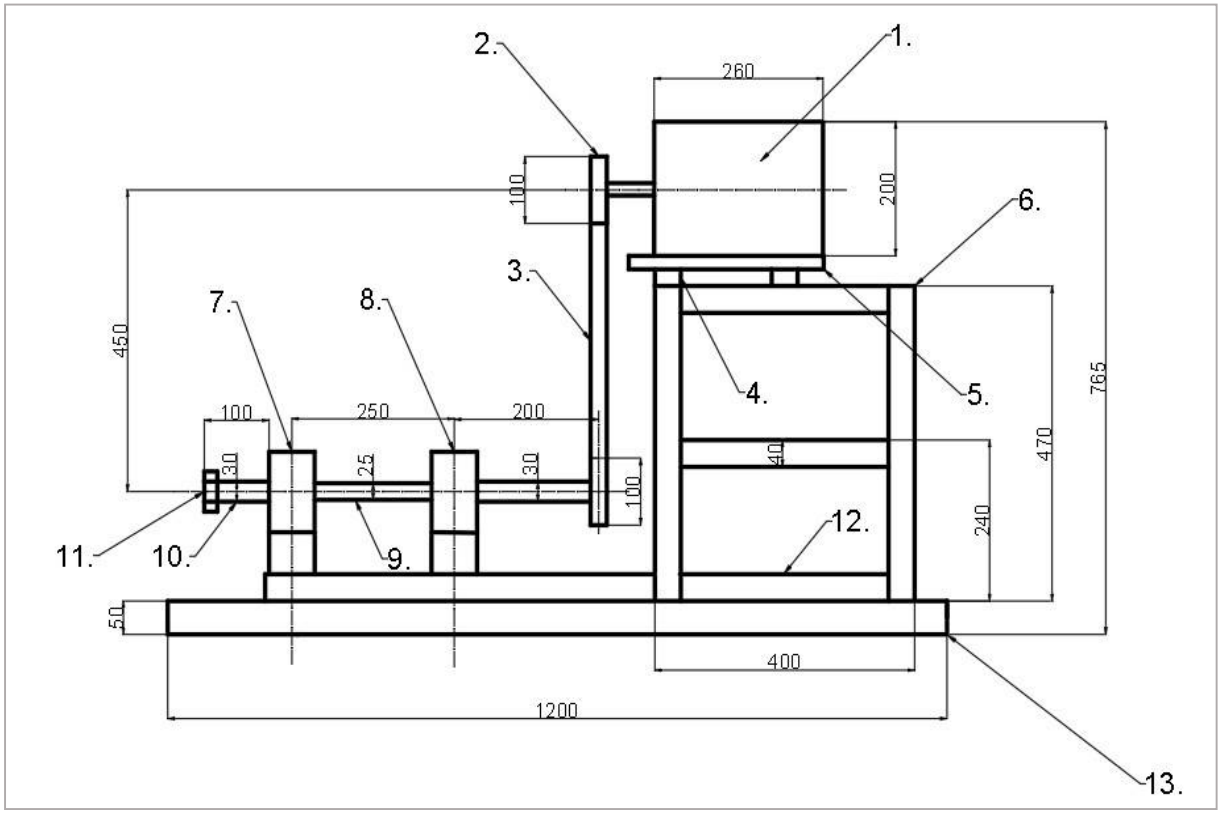
Az alábbi fejezetben rezgésdiagnosztikán alapuló kísérleti próbapaddal történő csapágyvizsgálat kerül bemutatásra.

A próbapad elsősorban kúpgörgős csapágyak, de átalakítást követően egyéb típusú csapágyak vizsgálatát is lehetővé teszi. A csapágyház felülete, amelyben a vizsgálandó csapágy található, megfelelően síkköszörült felület, így biztosítva piezoelektromos rezgésmérő szenzor illeszkedését. A szenzor rögzítése csavarkötéssel történik, vékony réteg olajfilmet használva csatolóközegként. A szenzor megfelelően árnyékolt koaxiális kábellel csatlakozik a National Instrument NI-9234 típusú adatgyűjtőhöz, amely vezérlése MATLAB környezetben történik, illetve opcionálisan a LABVIEW szoftverrel is megvalósítható, megfelelő virtuális áramkör (VI) építésével. Itt történik a mintavételezési paraméterek beállítása, mint a mintavétel időtartama, mintavételezési sebesség megadása. [14]

A 30205 jelű kúpgörgős csapágy a külső gyűrűn átmenő áram hatására ún. ‘ívhiba okozta meghibásodást” szenvedett, tehát a BPFO külsőgyűrű hibafrekvencia ellenőrzése alapján lehetséges a meghibásodás vizsgálata. A mérések kiértékelése a szoftveres környezetben történik, ahol egyrészt az időtartománybeli jellemzők kerülnek elemzésre, másrészt a Fourier transzformáció utáni spektrumnanalízis, ahol a csapágyra jellemző hibafrekvenciák kerülnek detektálásra. [14]

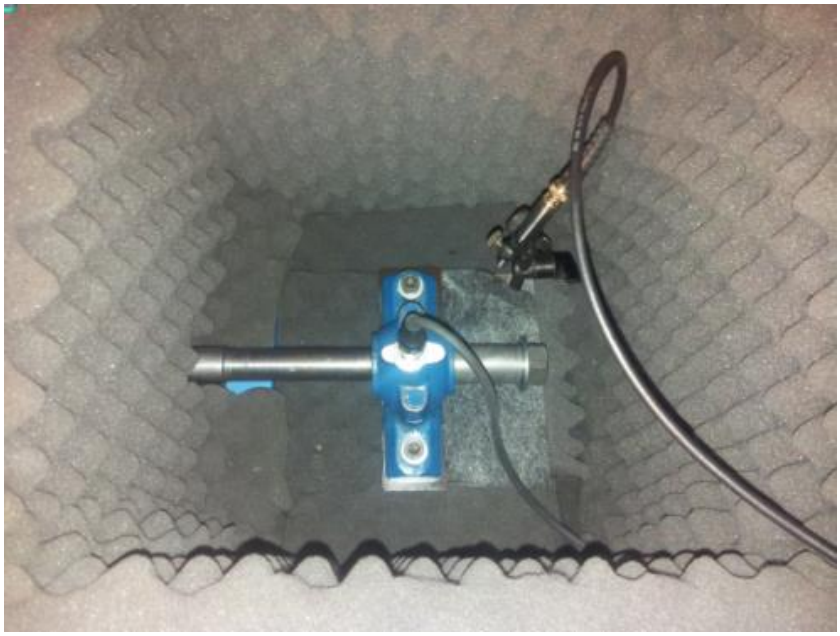
A kísérleti próbapad a Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszékén került megépítésre, amely felépítésére jellemző, hogy meghajtását egy Crompton gyártmányú 50 Hz hálózati frekvenciáról üzemelő, 4.2 A áramfelvételű, 2880 1/perc névleges fordulatszámú villanymotor biztosítja. A motor fordulatszám, így a csapágy vizsgálatának fordulatszámát frekvenciaváltó biztosítja. A meghajtó tengelyen reflexiós fényvisszaverő csík került elhelyezésre és lézeres fordulatszámmérővel lehetséges az előre beállított forgási sebesség ellenőrzése. A piezoelektromos gyorsulásérzékelő szenzor a csapágyházra merőlegesen helyezkedik el, tehát a függőleges irányú rezgések mintavételezését teszi lehetővé. A próbapadhoz akusztikus kamra is használható, amely megfelelő zajcsillapítással és utózengési idő korrekcióval rendelkezik. A csapágyházban elhelyezkedő vizsgálandó csapágy axiális irányú előfeszítését csavarorsós mechanizmus biztosítja. Az előfeszítő erő Wheatstone hídba kötött nyúlásmérő bélyeg segítségével mérhető, amely az álló előfeszítő hüvelyen kerül elhelyezésre. Miután előzetesen az előfeszítési erő lemérésre és mentésre került, a csavarorsó szögelfordulásának mérésével is szabályozható az axiális erő, tehát nem szükséges minden újabb mérés alkalmával nyúlásmérő bélyeg használata. Amennyiben állandó nagyságú előfeszítő erő szükséges (ez a pontos mérések során elvárás), úgy a mérések során Loctite 243 típusú menetrögzítő ragasztó kerül alkalmazásra, amely kis nyírószilárdsága miatt lehetővé teszi a kötés roncsolásmentes, az orsó menetének károsodása nélküli bontását. A gyakorlatban 3-4 működő menethosszon történik a ragasztó használata. [14]

A próbapad elvi vázlatát a főbb egységekkel az alábbi ábra szemlélteti:



21. ábra: A kísérleti csapágyvizsgáló próbapad elvi vázlata [14]

1. Villamos megható motor (típus: Cemer, névleges áramfelvétel: $0.75kW$)
2. Bordázott hajtótárcsa (méret: $100 \times 20mm$)
3. Bordázott szíj (6 bordás kivitel, méret: $20mm$)
4. Rezgéscsillapító gumitalpak (méret: $40 \times 25mm$)
5. Villanymotor tartó lap
6. Villanymotor tartószerkezet (méret: $40 \times 40 \times 3mm$)
7. A vizsgálandó csapágy csapágyháza
8. A meghajtó csapágy csapágyháza
9. Lépcsős tengely (hosszúság: $600mm$, átmérő: $25mm$ / $30mm$)
10. Előfeszítő hüvely (méret: $30 \times 80mm$)
11. Anya ($M24 \times 1.5mm$)
12. Alapkeret (méret: $40 \times 40 \times 3mm$) x 1200 mm
13. Rezgéscsillapító gépalap (méret: $1200 \times 600mm$) [14]



22. ábra: A vizsgálandó csapágyat tartalmazó csapágyház és az akusztikus méréseket lehetővé tevő kondenzátormikrofon akusztikus kamrával [14]

A kísérleti próbapad tervezésénél és kivitelezésénél fontos szempont volt, hogy a hajtásból eredő járulékos rezgések minimális szintet mutassanak, ezért a motortartó lap alá rezgéscsillapító gumibakok kerültek, továbbá a hajtáshoz alacsony értékű rezgéseket produkáló gumírozott, lágygumi anyagú bordásszíj került alkalmazásra. A hajtás szíj feszítő ereje és a tárcsák középtengelye közötti távolság úgy lett meghatározva, hogy a káros lengési szíjfrekvenciák elkerüljék a vizsgálati fordulatszámot, ezáltal ne befolyásolják károsan a mérési adatok jóságát. [14]

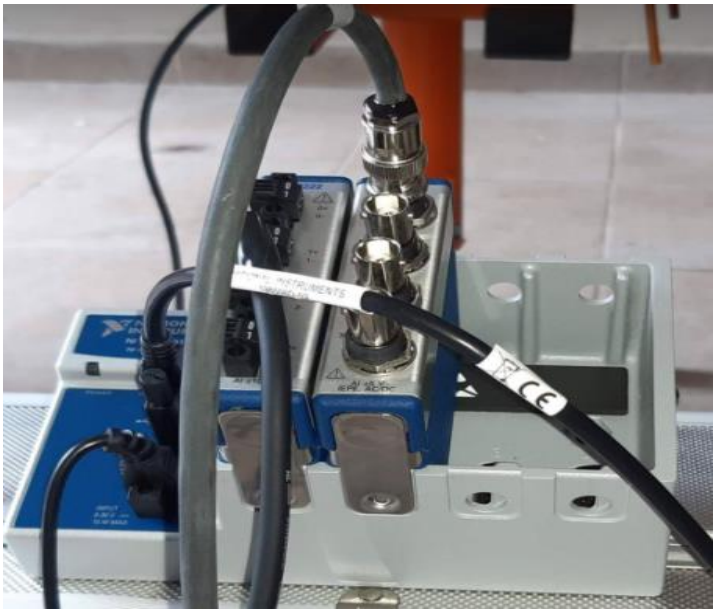
A vizsgálati csapágyat tartalmazó csapágyház felső felülete síkköszörüléssel lett kialakítva, amely megfelelő alaktűrést és átlagosan $R_a = 1.6\ \mu m$ felületi érdességet biztosít. A csapágyház felületére merőlegesen menetes furat lett kialakítva, amely a szenzor csavaros rögzítését biztosítja. A vizsgálatokhoz alkalmazott IMI603C01 piezoelektromos rezgésmérő szenzor specifikációja szerint 6.8 Nm meghúzási nyomaték szükséges, amely a konstans mérőerőt biztosítja. Opcionálisan mágneses rögzítés is alkalmazható, viszont ez esetben figyelembe kell venni, hogy a frekvenciaválasz függvény linearitása rosszabb lesz és a mérés felső határfrekvenciája a -3 dB-es töréspontot alapul véve is a kisebb frekvenciák felé tolódik, tehát aluláteresztő szűrő viselkedését mutatja. A ragasztásos szenzor rögzítési megoldás esetében ez a jelenség még fokozottabban jelentkezik, tehát kerülendő. Csatolófolyadékként műszerolaj használata javasolt a szenzor talpfelülete és a síkköszörült felület között. A műszerolaj javítja a frekvenciamenetet, ugyanakkor viszkozitása miatt csak elenyésző csillapítást produkál, amely a szükséges erősítési tényező csökkentését eredményezi az adatgyűjtő tekintetében. [14]

A rezgésgyorsulásmérő típusa PCB IMI 603C01, amely platinum kivitelű alacsony zajszinttel rendelkező érzékelő, átlagos érzékenysége $100\,mV/g$, frekvenciaátviteli

tartománya $0.27\ kHz$ - $10\ kHz$, felső kivezetéses, 2 csatlakozóponttal rendelkező ISO17025 szerint kalibrált. [14]

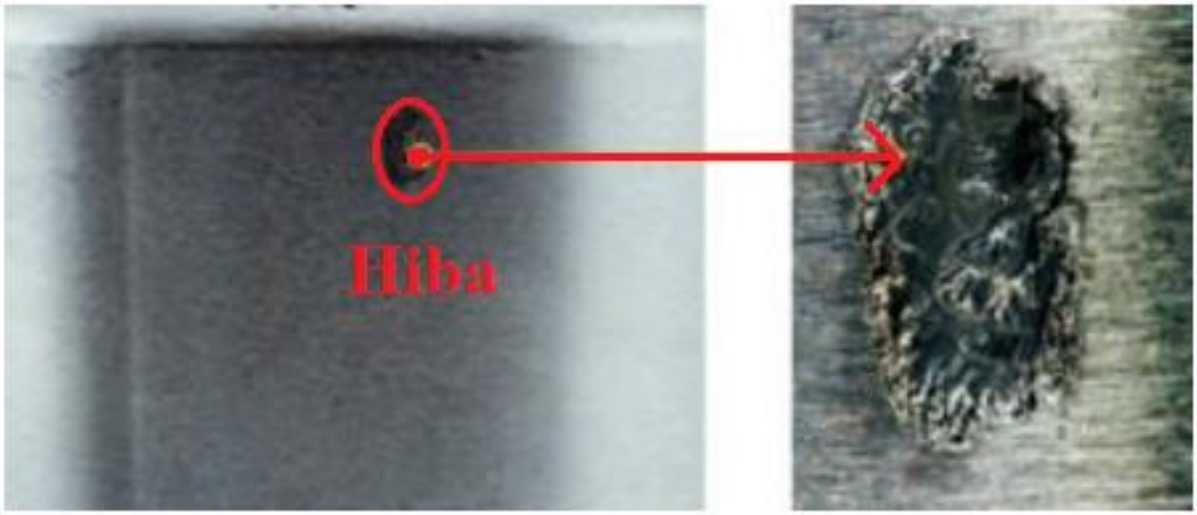
23. ábra: PCB IMI 603C01 típusú piezoelektromos rezgésmérő szenzor [14]

A mérésekhez alkalmazott mérési adatgyűjtő National Instrument gyártmányú NI-9234 típusú eszköz, amelyre jellemző, hogy 4 független csatornával rendelkezik, IEPE és nem IEPE típusú szenzorok csatlakozását is lehetővé teszi, kommunikál az NI CompactDAQ és a CompactRIO rendszerekkel. 102 dB értékű dinamikatartománnyal rendelkezik, a mintavételi sebesség a Matlab vagy a Labview szoftverek segítségével 51.2 KHz felső határfrekvencia értékig állítható. Beépített anti-aliasing szűrő teszi lehetővé a jelek szűrését és az aliasing jelenség elkerülését, amelyről a jegyzet korábbi fejezetében esett szó. A mérés kiértékeléséhez tetszőleges hardver választható, amely az eszköz specifikációjának megfelel. Az NI 9234 típusú adatgyűjtő párhuzamos kiértékelést végezhet egyéb adatgyűjtőkkel (pl. NI 9223), amennyiben a mérési feladat megkívánja. Szükség esetén az eszközök külön-külön aktiválhatók, attól függően, hogy melyikkel eredményesebb a mérési feladat végrehajtása. [14]



24. ábra: NI 9234 (bal) és NI 9223 (jobb) típusú adatgyűjtők

A vizsgálandó kúpgörgős csapágyra jellemző, hogy a külső gyűrűn villamos ívből származó hibát szenvedett, amely optikai mérőmikroszkóppal lemérésre került 40x-es nagyításban. A kísérletben két különböző méretű károsodási hiba lett vizsgálva, amelyeknek a hibaszélesség értéke kiemelt paraméterként lett kezelve, egyik esetben 0.47 mm, a másik esetben 0.78 mm hibaszélesség méret adódott. Bizonyos vizsgálatokban lehetséges a mérési jelből a csapágyhiba szélességének a becslése, amely roncsolásmentes eljárásnak tekintendő. Jelen esettanulmány közvetetten részletezi a hiba geometria méretének becslését, a hibajel amplitúdójának vizsgálatával, de nem tér ki a gördülőelem hibába belépési és kilépési pontjának elemzésére. Alapvető cél a hiba jelenlétének kimutatása és másodlagos cél a hiba méretének becslése. [14]

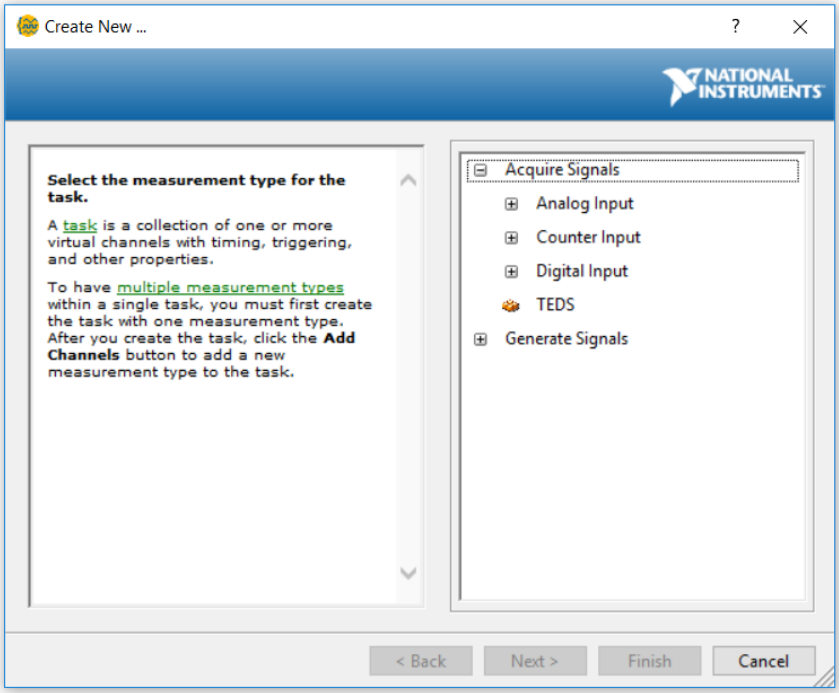


25. ábra: 1. eset 0.78 mm, 2. eset 0.47 mm ívhiba átlagos szélessége a külső gyűrűn

A mérés első lépése a mérőműszer számítógéphez történő csatlakoztatása és a műszer felparaméterezése figyelembe véve a mérési körülményeket és az adatgyűjtő specializációját.

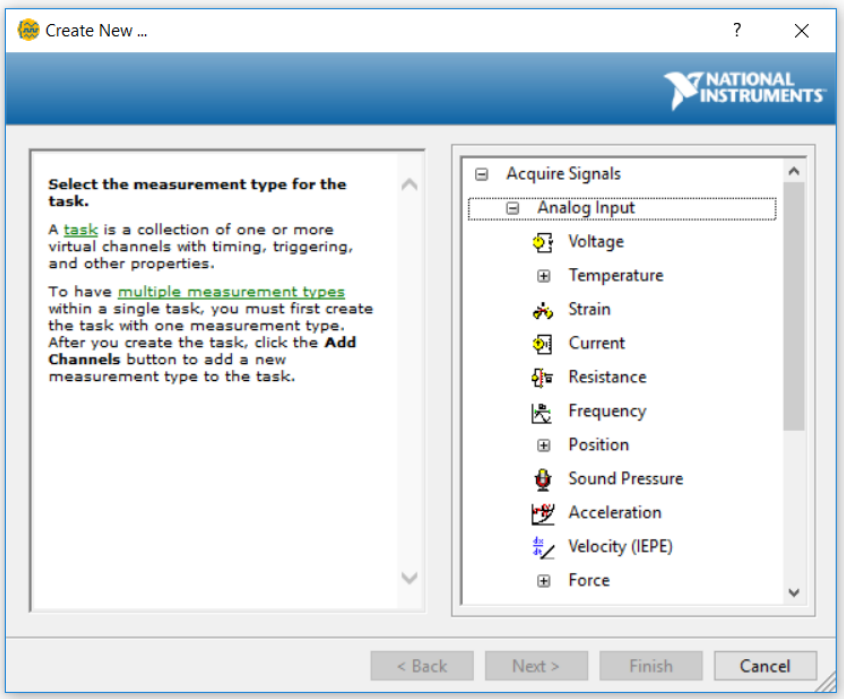
Jelen esetben az IMI 603 C01 szenzor 10 KHz-ig terjedő lineáris frekvenciamenetéből és felső határfrekvenciájából adódó felső határfrekvencia maximum értéke került alkalmazásra és a Shannon-féle mintavételezési törvény szerint (lásd a jegyzet elméleti fejezeteit) 25.6 KHz mintavételezési frekvencia volt szükséges. A mérés időtartama 1.0 s volt, amely 25600 minta elemet (25600 x 1 vektor) jelent.

Az adatgyűjtő egység konfigurálásának lépései a Labview környezetben az alábbiakban található. USB csatlakozón keresztül a számítógéphez csatlakoztatva az adatgyűjtőt, a szoftver automatikusan detektálja, majd a DAQ Assistant platformon ki kell választani, a jel vétel (Acquire Signals) opciót, amely a mérésekre utal. Mivel a rezgésjelek analóg és folytonos fizikai mennyiségek, így az analóg bemenet (Analog Input) opció választandó. Lehetséges egyes aktív szenzorok vezérlése is a mérőkártya segítségével, amely esetben a jelgenerálás (Generate Signals) funkciót kell választani a párbeszédablakból. [14]



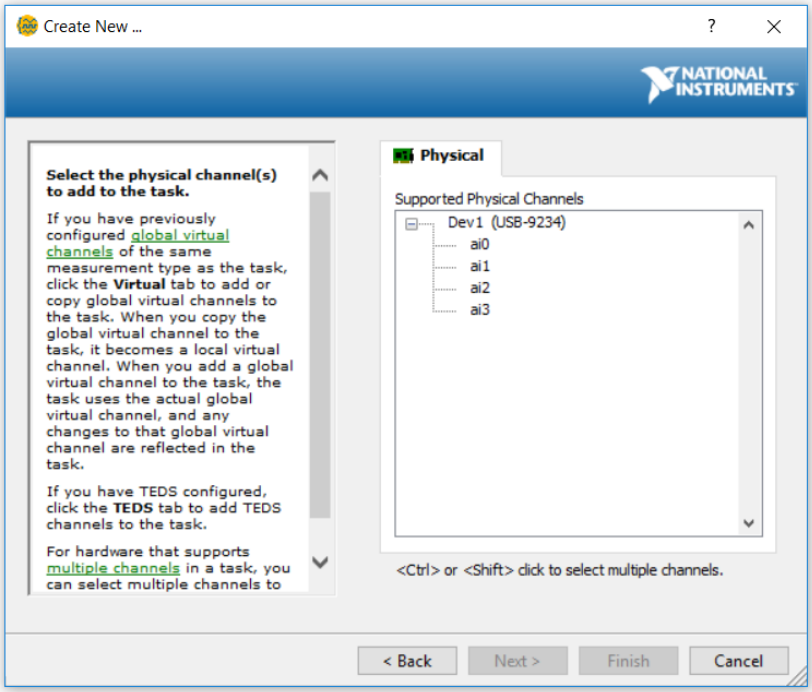
26. ábra: Az eszköz inicializálási párbeszédablak

Az analóg bemeneti jel funkció kiválasztását követően azt is ki kell választani a párbeszédablakban megjelenő listából, hogy milyen analóg mennyiséget szeretnénk mérni. Mivel az NI 9234 adatgyűjtő a specifikációja szerint zaj- és rezgésparaméterek mérésére alkalmas, ezért a rezgésgyorsulás (Acceleration) opciót kell kiválasztani. [14]



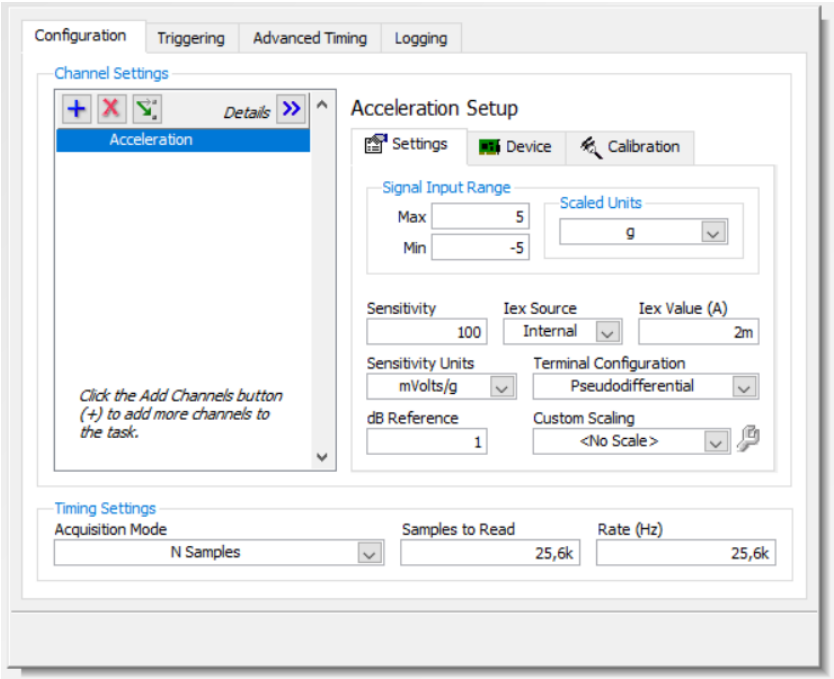
27. ábra: Az eszköz analóg bemeneti kezelőfelülete

Ki kell választani, hogy az NI 9234 jelű eszköz melyik csatornája az aktív, vagyis melyik csatornájára került rögzítésre a koaxiális kábel BNC csatlakozója az IMI PCB 603 C01 típusú szenzorral. Jelen kísérletben az ai0 jelű csatorna került alkalmazásra, viszont ezt aktuálisan a felhasználónak ellenőriznie kell és helyesen kiválasztani. Csatorna prioritással az eszköz nem rendelkezik. [14]



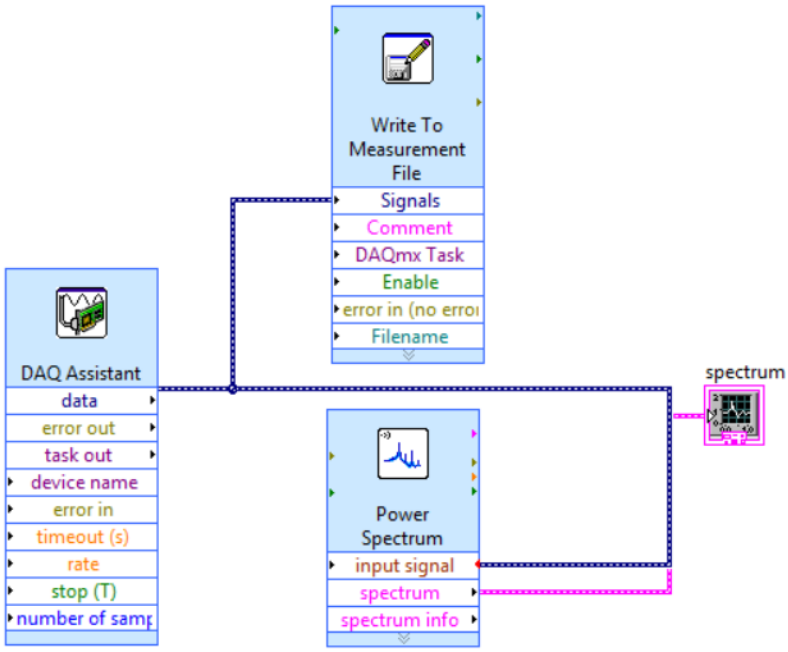
28. ábra: A csatornaválasztási párbeszédablak

Az adatgyűjtő paraméterezése a következő lépés, amelyet pontosan meg kell adni. A bemeneti tartomány feszültség értéke a szenzor típusától függ, az érzékenységet mindig a szenzor specifikációjában található értékre kell beállítani, amely 100 mV/g értékű. Az N elemű mérési adathalmaz mérési hosszát mindig a mérnöki feladat jellege dönti el, ahogy korábban írtam, jelen esetben 25600 mérési adatot gyűjtött a mérőeszköz 1.0 s mérési időtartam alatt, vagyis 25.6 kHz mintavételezési frekvenciát kellett választani a PCB szenzor 10 KHz-es, - 3 dB-es törési pontjához tartozó felső határfrekvencia mellett, ezek a beállítások láthatók az alábbi párbeszédablakban. [14]



29. ábra: Az adatgyűjtő érzékenységét és mintavételezési frekvenciát beállító párbeszédablak

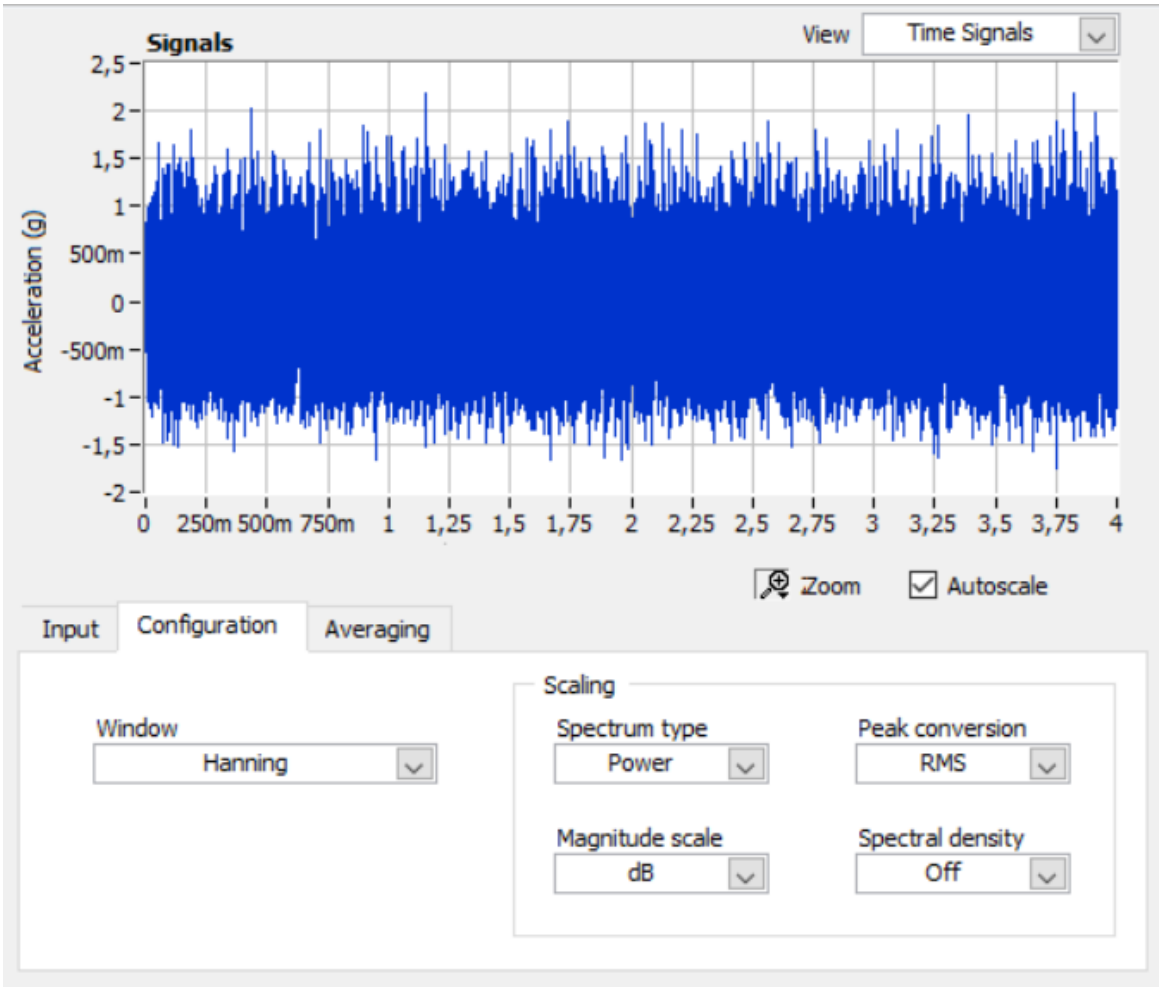
Miután az eszköz felparaméterezése megtörtént a célfeladatnak megfelelő virtuális áramkör szerkesztésével a mérés kivitelezhető. A DAQ Assistant "data" kimenete szolgáltatja a hasznos jelet, viszont további paraméterek is kezelhetők. A mérési adat kiíratható. lvm adatfájlba, későbbi felhasználás céljából, amely minden esetben javasolt, ehhez úgynevezett Sub-VI kialakítása szükséges. [14]



30. ábra: A mérésekhez alkalmazott virtuális mérési áramkör (VI)

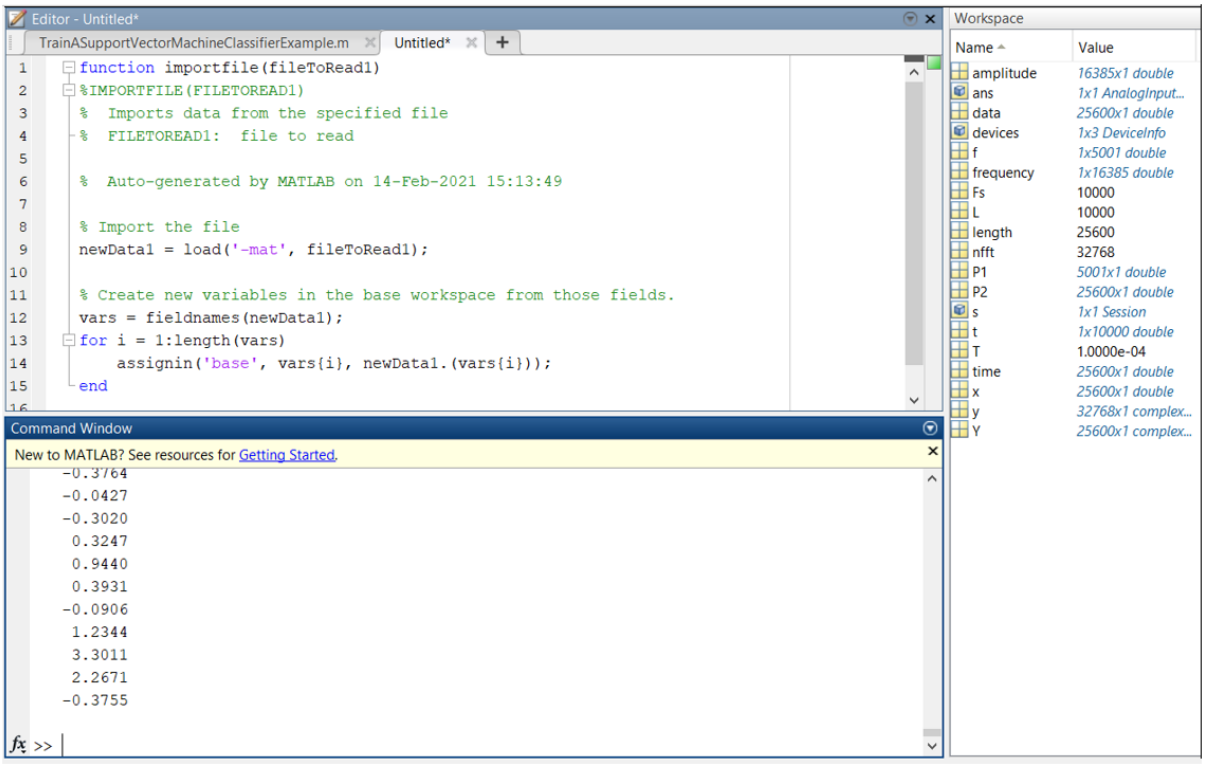
A Power Spectrum Sub-VI biztosítja a Fourier transzformáció után matematikai együtthatók kezelését, illetve spektrummegjelenítési funkcióval az eredmények grafikon formájában megjeleníthetők.

Megadásra kell kerüljön a választott ablakfüggvény is. Jelen mérések során a Hanning ablakolás került alkalmazásra, amely általános átvitelt biztosít (lásd a jegyzet elméleti fejezeteinek leírását). Természetesen választható egyéb ablakfüggvény is, mint Blackman-Harris, Flat Top, Gaussian, de ez esetben javasolt a jel további elemzése, például tranziens jeltartalom megállapítással vagy csúcsdetektálás módszerrel. Kiértékeléshez az RMS jelparaméter javasolt. [14]



31. ábra: A teljesítményspektrum parametrizálása és az ablakfüggvény megadása

A Matlab felületen scriptek segítségével lehetséges a mérés végrehajtása, amely a „getDevices” parancs kiadásával történik. Szükséges definiálni az analóg bemenetet, a mintavételezési rátát, időtartamot, majd az időtartománybeli grafikon megjelenítési opcióit, végül a spektrumanalizálás adatait kell megadni a tengelyek feliratozásával zárva a parancssort. A kapott értékek a munkatérbe kerülnek, amelyet az alábbi ábra mutat. Az ábra alatt látható a művelet végrehajtását lehetővé tevő script programrész. [14]

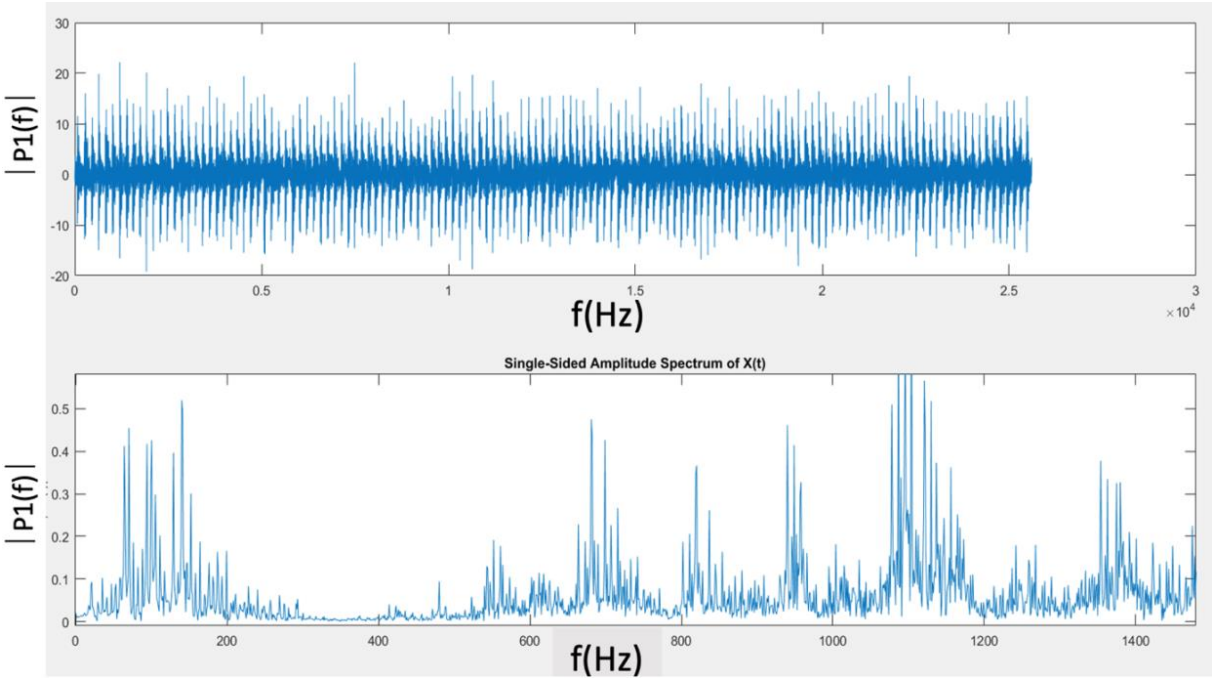


32. ábra: A munkatérbe (Workspace) beolvasott paraméterek a script alapján

<u>Az alkalmazott script utasításkészlete:</u>

```
devices = daq.getDevices
s = daq.createSession('ni');
addAnalogInputChannel(s,'Dev0', 0, 'Accelerometer');
s.Rate = 25600;
s.DurationInSeconds = 1;
s
s.Channels(1).Sensitivity = 0.00922;
s.Channels(1)
[data,time] = s.startForeground;
subplot(2,1,1)
title('Time domain signal')
plot(time,data)
xlabel('Time (Secs)');
ylabel('Acceleration (Gravities)');
length = double(s.NumberOfScans);
```

```
nfft = 2^nextpow2(length);
y = fft(data,nfft)/length;
frequency = s.Rate/2*linspace(0,1,nfft/2+1);
amplitude = 2*abs(y(1:nfft/2+1));
subplot(2,1,2)
plot(frequency,amplitude);
xlim([0 10000]);
title('FFT spectrum')
xlabel('Frequency (Hz)');
ylabel('Amplitude');
%FFT már előzetesen lemért jelre
x=data
Fs = 10000; % Sampling frequency
T = 1/Fs;   % Sampling period
L = 10000;  % Length of signal
t = (0:L-1)*T; % Time vector
Y = fft(x);
P2 = abs(Y/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
f = Fs*(0:(L/2))/L;
subplot(2,1,1)
plot(x)
subplot(2,1,2)
plot(f,P1)
title('Single-Sided Amplitude Spectrum of X(t)')
xlabel('f (Hz)')
ylabel('|P1(f)|') [14]
```



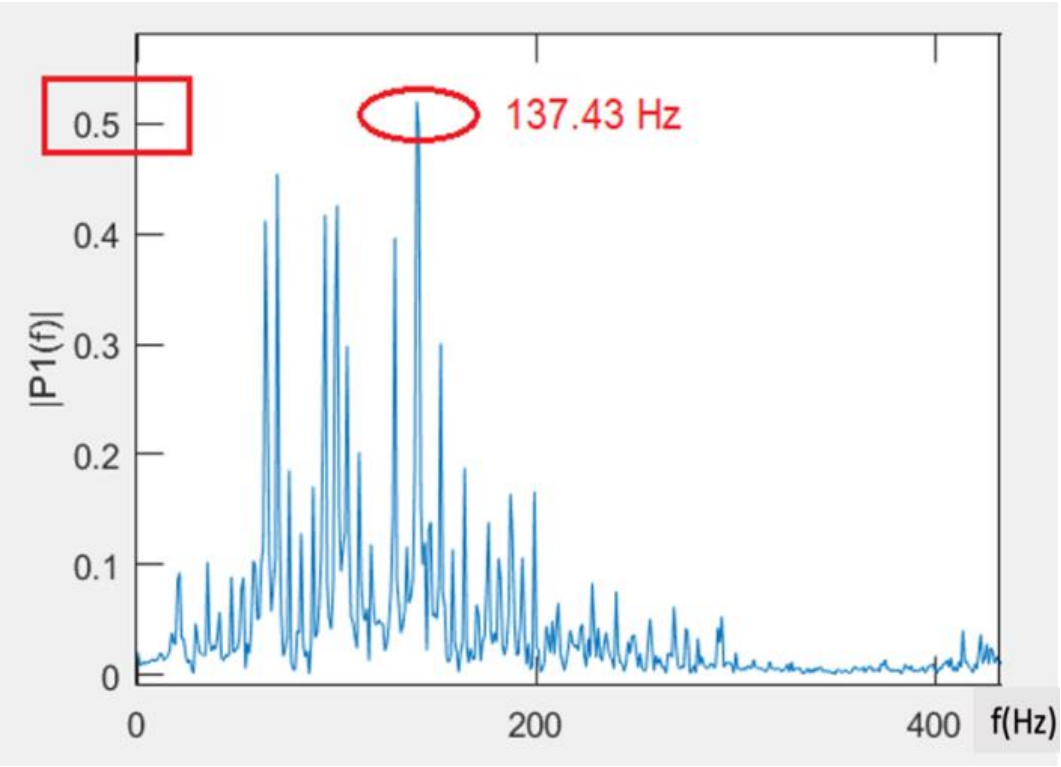
33. ábra: A mérési eredmények az időtartományban (fent) és a frekvenciatartományban (lent) a 0.47 mm hibaszélesség esetén

A mérésekhez és a jelek kiértékeléshez elengedhetetlen, hogy a 3025 típusú kúpgörgős csapágyra jellemző hibafrekvenciákat meghatározzuk az 1200 1/perc vizsgálati fordulatszám mellett, hiszen a spektrumelemzés során ezeket az értékeket kell keresni és a hozzájuk tartozó amplitúdó értékeket a spektrumban és összehasonlítani a hibátlan állapottal, vagy különböző geometriai hibanagyságokat tartalmazó állapotokkal. [14]

Számított hibafrekvencia értékek:

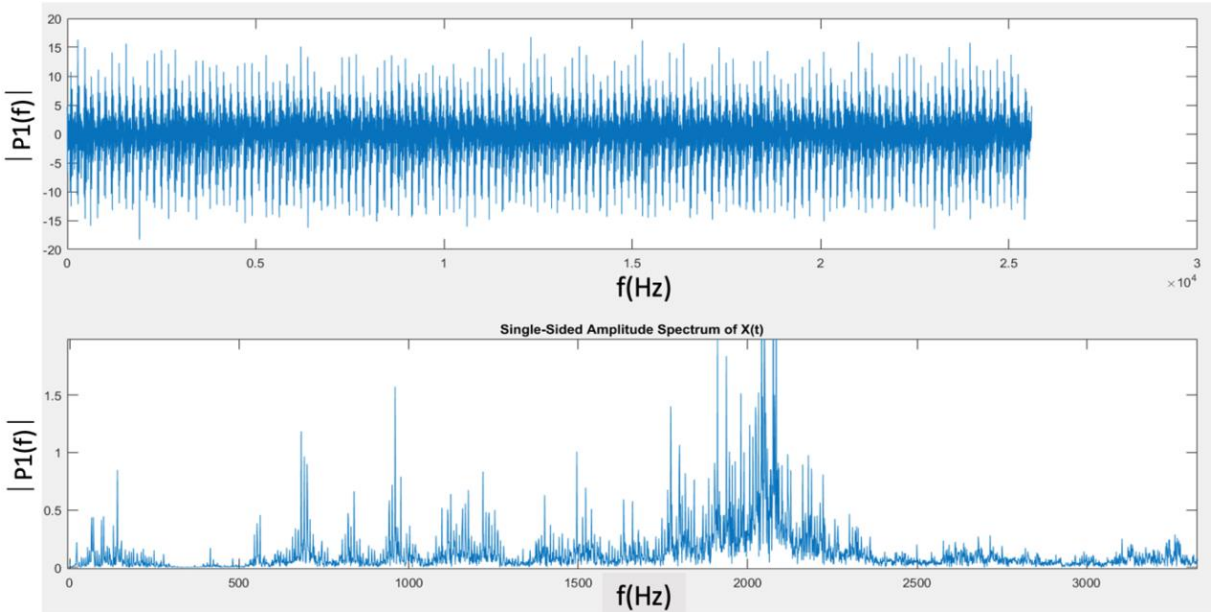
- BPFO: 137.43 Hz (külső gyűrű hibafrekvencia)
- BPFI: 191.41 Hz (belső gyűrű hibafrekvencia)
- FTF: 8.58 Hz (kosárhiba frekvencia)
- BSF: 59.91 Hz (gördülőelem hiba frekvencia) [14]

Az itt bemutatott kísérleti mérési sorozatban az ívhiba okozta meghibásodás a csapágy külső gyűrűjén jelentkezett, tehát elegendő csak a 137.43 Hz körüli frekvenciatartomány keresése és elemzése. Kis mértékű eltérés mindig jelentkezik a számított értéktől, hiszen a mérés során fluktuációk, terhelésingadozások és hálózati tápellátás ingadozások is jelentkezhetnek. [14]

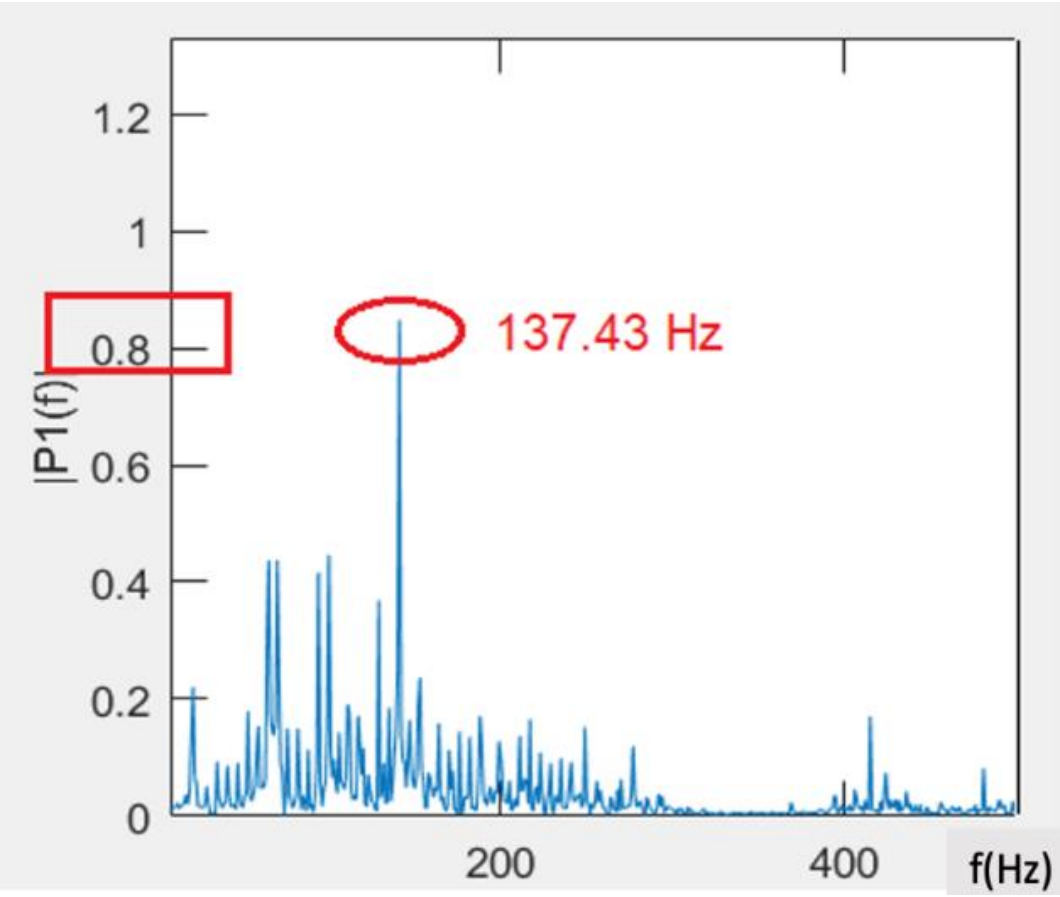


34. ábra: A BPFO hibatartomány kiemelt területe a 0.47 mm hibaszélesség esetén

Megfigyelhető, hogy a 0.47 mm-es, mikroszkóppal lemért geometriai hibaméret esetében 0.52 értékű amplitúdó csúcs jelentkezett és 0.84 értékű amplitúdó csúcs volt mérhető a 0.78 mm-es geometriai hibanagyság esetében.



35. ábra: A mérési eredmények az időtartományban (fent) és a frekvenciatartományban (lent) a 0.78 mm hibaszélesség esetén



36. ábra: A BPFO hibatartomány kiemelt területe a 0.78 mm hibaszélesség esetén

Megállapítható volt a kísérletek során, hogy az optikai mérőmikroszkóppal megállapított hibanagyság és a rezgésméréssel megállapított hiba okozta rezgésgyorsulás érték egymással szoros korrelációt mutatott, jelen esetben 1.8 % eltérés jelentkezett a két módszer között. A jegyzet terjedelmi okai miatt a többi geometriai hibanagysághoz tartozó grafikonok nem kerülnek itt részletezésre, de kijelenthető kapcsolat áll fent a paraméterek között. Ennek feltételezhető oka a csapágyhiba és a gördülőelem közötti rugalmas ütközés és a lineáris viselkedés, a Hooke-törvény szerint, tehát még nem lépett fel képlékeny alakváltozás, és az anyag nemlineáris viselkedése. Ezt a feltételezést a csapágyak utólagos vizuális és mikroszkópos elemzése is alátámasztotta (nem észleltünk maradó alakváltozást). [14]

Az itt bemutatott módszer hatékonyan alkalmazható csapágyhibák egyes felületén található sérülések roncsolásmentes vizsgálatára csak a rezgésjelek detektálásával és elemzésével. A módszer eredményesen végrehajtható online és offline állapotfelügyelet formájában is.

4.2 Szerkezetintegritási vizsgálat akusztikus emissziós módszerrel

Az alábbi fejezetben akusztikus emissziós vizsgálaton alapuló csapágydiagnosztikai eljárás kerül bemutatásra.

A növekvő piaci igények miatt a biztonságosabb és a gyorsabb vasúti közlekedés iránt egyre fontosabb szerepet kap a karbantartás és a rendszeres állapotfelügyelet. Az igénybevett

alkatrészek ki vannak téve az időjárás okozta hatásoknak, amelyek fokozzák a kifáradás és a termikus hőhatások jelenségét, az ebből eredő mechanikai feszültségállapot változás hátrányosan befolyásolja az élettartamot. Az fokozatos állapotromlás negatív hatást gyakorol az anyag szerkezeti integritására, amely váratlan leállásokat, többletköltségeket eredményez. Az üzem közben megnövekedett zaj, rezgés és hőmérséklet a meghibásodások előre haladott állapotára utal. Az akusztikus emissziós roncsolásmentes vizsgálati módszer az anyagban terjedő elasztikus hullámok elemzésén alapul, amelyek annak hatására keletkeznek, ha hőterhelés vagy mechanikai terhelés éri az anyagot. A kialakuló energiahullámokat érzékeny piezoelektromos szenzorokkal lehet detektálni. Az utóbbi években az online, valósidőben történő akusztikus emissziós vizsgálatok is előtérbe kerültek a forgógépek állapotvizsgálatának tekintetében. Az alkalmazott módszerek között gyakran szerepel a hagyományos rezgésvizsgálat és a tranziens impulzusokat mintavételező akusztikus emissziós vizsgálatok kombinálása. [15]

A csapágyakban jelentkező meghibásodások alapvetően két csoportba sorolhatók: helyi (lokális) hibák, amelyek a csapágyakon pontszerűen jelennek meg és rövid idejű impulzusokat okoznak a mérési jelekben, illetve a felületi hibák, mint a hullámossági hibák, a durva felületi érdesség okozta kiterjedt hiba, amelyek általánosan megnövelik a gépekben jelentkező zajt és rezgésszintet, de nem produkálnak tranziens impulzus jellegű mérési jeleket. Az akusztikus emissziós vizsgálatok szempontjából a helyi meghibásodások okozta jelenségek vizsgálata jelentős, mint a repedések, kifáradásból eredő lokális anyaghibák miatt keletkező impulzusok vizsgálata. Az adatok elemzéséhez elterjedt az ún. Empirikus mód dekompozíció (EEMD) és a Hilbert transzformáció. [15]

Bizonyos csapágyhibák, mint a gördülőelemeken található meghibásodások és a csapágy gyűrűn elhelyezkedő hibák növekedést okoznak a csapágy sajátfrekvenciáiban. Ezek a sajátfrekvenciák a csapágy belső felépítéséből adódnak. Van egy nyugalmi szint a csapágy sajátfrekvenciákra vonatkozóan, amelyek a hibátlan állapothoz tartoznak. Rendszerint ez esetben az amplitúdószint alacsony, de méréseket igényel, hogy egy későbbi meghibásodás során egyértelműen megállapítható az állapotromlás jelensége és mértéke. A sajátfrekvenciák alapvető összefüggésben állnak a csapágyak geometriai méretével, a gördülőelemek számával, a hatásszöggel és az üzemi fordulatszámmal. Ez utóbbival egyenes arányban növekedést mutat a kialakuló sajátrezgések frekvenciája. [15]

A csapágyakra jellemző sajátfrekvenciákat az alábbi képletekkel lehet kiszámolni [15]:

$$BPFI = \frac{N}{2} \times F \times \left(1 + \frac{B}{P} \times cos\theta\right)$$

$$BPFO = \frac{N}{2} \times F \times \left(1 - \frac{B}{P} \times cos\theta\right)$$

$$FTF = \frac{F}{2} \times \left(1 - \frac{B}{P} \times cos\theta\right)$$

$$BSF = \frac{P}{2B} \times F \times \left[1 - \left(\frac{B}{P} \times cos\theta\right)^2\right]$$

Ahol:

BPFI= Külső gyűrű hibafrekvencia (Hz)

BPFO= Belső gyűrű hibafrekvencia (Hz)

FTF= Kosárfrekvencia (Hz)

BSF= Gördülőelem hibafrekvencia (Hz)

N = Gördülőelemek száma

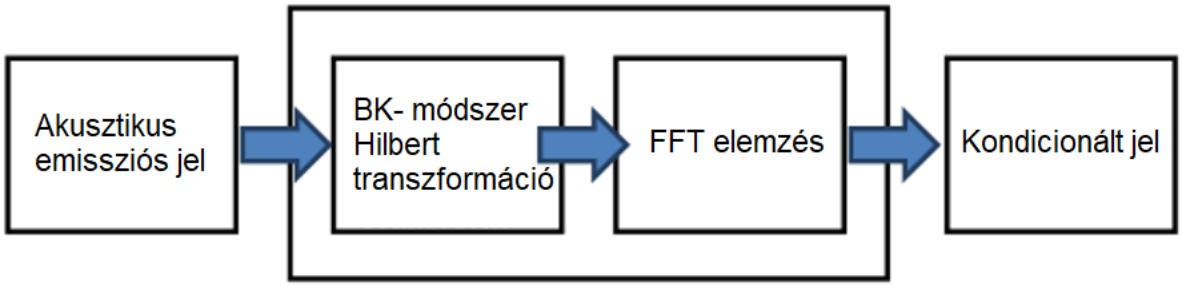
F = Fordulatszám (Hz)

B = Gördülőelem átmérője (mm)

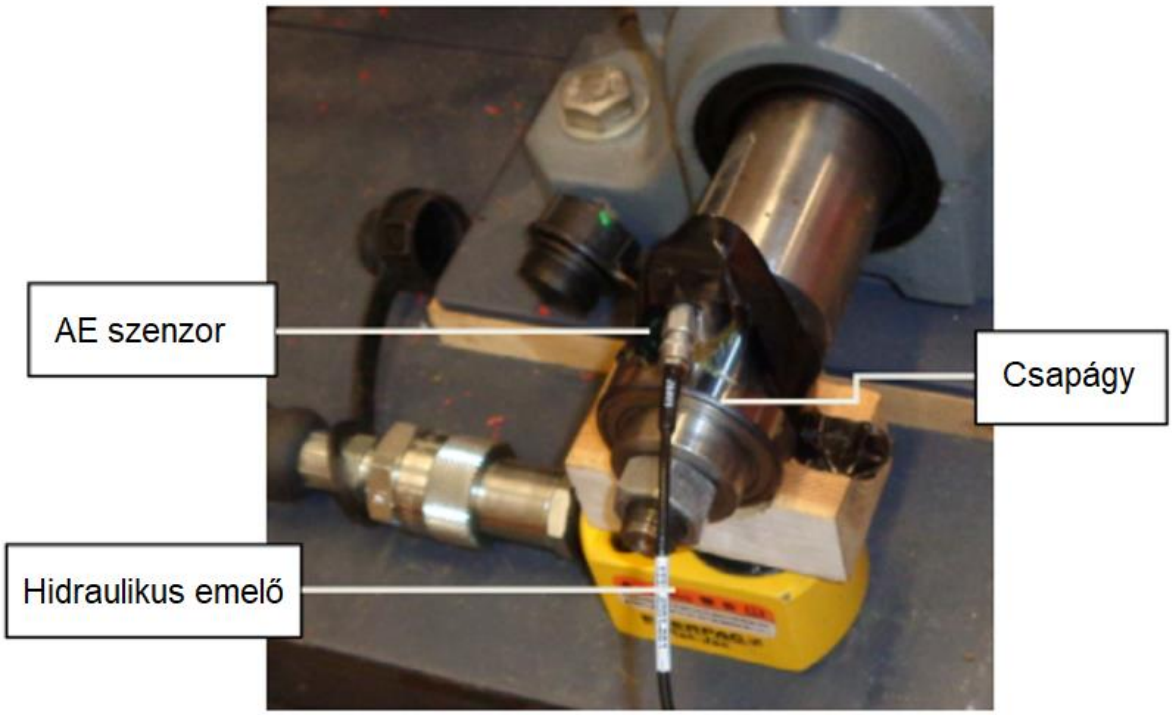
P = Osztás mértéke (mm)

θ = Hatásszög. [15]

Amikor a csapágy egy bizonyos eleme hibával találkozik, gerjeszti valamelyik elemre jellemző sajátfrekvenciát, amelyben amplitúdó növekedést okoz. Az akusztikus emissziós vizsgálatok burkológörbe módszer elvének lényege, hogy a külső zavarjeleket elnyomjuk, vagy legalábbis mérsékelni próbáljuk és igyekszünk kiemelni a hasznos jeleket, amelyek a meghibásodásokra jellemző információkat hordozzák. A gyakorlatban azt tapasztalhatjuk, hogy a csapágyak állapotromlásának függvényében változik a meghibásodásra jellemző frekvencia tartomány. A korai meghibásodások szakaszában többnyire kis értékkel jelentkeznek a jelben a hagyományos FFT gyors Fourier transzformációval kimutatható komponensek, inkább akusztikus emissziós vizsgálattal lehet hatékonyabban detektálni. A mérésekhez alkalmazott burkulógörbe módszer hatékony arra vonatkozóan, hogy a jel jel-zaj viszonyát (SNR) javítsa, tehát hatékonyabban kiemelhető legyen az adott meghibásodásra jellemző jelkomponens. A burkológörbe módszer elsősorban Hilbert transzformációt alkalmaz, amelyet a spektrum elemzése követ a már hagyományos gyors Fourier transzformáció módszerrel. Az ezt bemutató folyamatábra alább látható. [15]



37. ábra: A Hilbert transzformáción alapuló burkológörbe elemzés akusztikus emissziós (AE) vizsgálathoz [15]



38. ábra: Az akusztikus emissziós csapágyvizsgálat vázlata [15]

Az ábrán látható akusztikus emissziós csapágyvizsgálat során hibátlan állapotot mutató és meghibásodásokat tartalmazó csapágyak kerültek összehasonlításra. Az akusztikus emissziós jelek nem csak a csapágyakból származhatnak, hanem fogaskerék hajtásokból, tengelyektől, tengelykapcsoló elemekből és egyéb gépelemekből, amelyek bizonyos meghibásodásokat tartalmaznak. [15]

A Hilbert transzformáció az egyoldalas Fourier transzformáció valós és képzetes részei közötti kapcsolatot reprezentálja. A Hilbert transzformáció a Fourier transzformációval ellentétben nem változtatja meg a független változót, az eredmény ugyanabban a tartományban marad. A transzformáció létezik természetesen az idő tartományban is. A Hilbert transzformáció lényege könnyebben kezelhető a frekvencia tartományban, mint az idő tartományban. Ez a transzformáció ugyanis nem változtatja meg F(f), illetve F(ω) amplitúdóit, hanem csupán a fázisukat tolja el. [15]

Kiszámítása az alábbi összefüggéssel lehetséges:

$$[g(t)] = g(t) * \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g(\pi)}{t-\tau} d\tau = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g(t-\tau)}{\tau} d\tau$$

A Hilbert transzformáció az elemzett jelet reprezentálja és tulajdonképpen az eredeti jel burkológörbe módszerrel képzett nagyságát mutatja. A burkológörbe módszer tulajdonképpen amplitúdó demodulációnak tekinthető, és arra alkalmas, hogy egy hiba által amplitúdó modulált jelből inverz művelettel kiemelje a moduláló jelkomponenst (ez lesz az, amit a

diagnosztikában tovább elemzünk). Meg kell jegyezni, hogy a nyers teljesítménysűrűség spektrum a Fourier transzformációt követően alacsony jel-zaj viszony (SNR) mellett is tartalmaz bizonyos mértékű diagnosztika számára hasznos információt a csapágy sajátfrekvenciáival és annak megváltozásával kapcsolatban. De a burkológörbe módszerrel az amplitúdó demoduláció segítségével az ismétlődő mechanikai hatások okozta tranziens impulzusokat még zajjal terhelt környezetben is eredményesebben lehet detektálni. [15]

A következőkben egy akusztikus emissziós méréshez kapcsolódó gyakorlati vizsgálat kerül bemutatásra. A kísérlethez próbapad került alkalmazásra, amely 100…1000 1/perc fordulatszámok között teszi lehetővé a csapágyak vizsgálatát. Annak érdekében, hogy a csapágyhiba okozta impulzusokat minél hatékonyabban ki lehessen mutatni, érzékeny Physical Acoustics Corporation (PAC) gyártmányú, R50α típusú akusztikus emissziós szenzor került alkalmazásra mágneses rögzítéssel a csapágyházra. Az akusztikus emissziós szenzor csatolását Vaseline típusú folyadék biztosította. Az akusztikus emissziós jelek előerősítőn keresztül 43 dB erősítési értékkel kerültek az Agilent 2531A típusú adatgyűjtő egységbe, amely 500kS/s mintavételezési sebességgel végzett adatgyűjtést. A laboratóriumi kísérletek során 5 s mérési időtartammal került mentésre a mérési jel. A szoftveres kiértékelés MATLAB környezetben történt. [15]

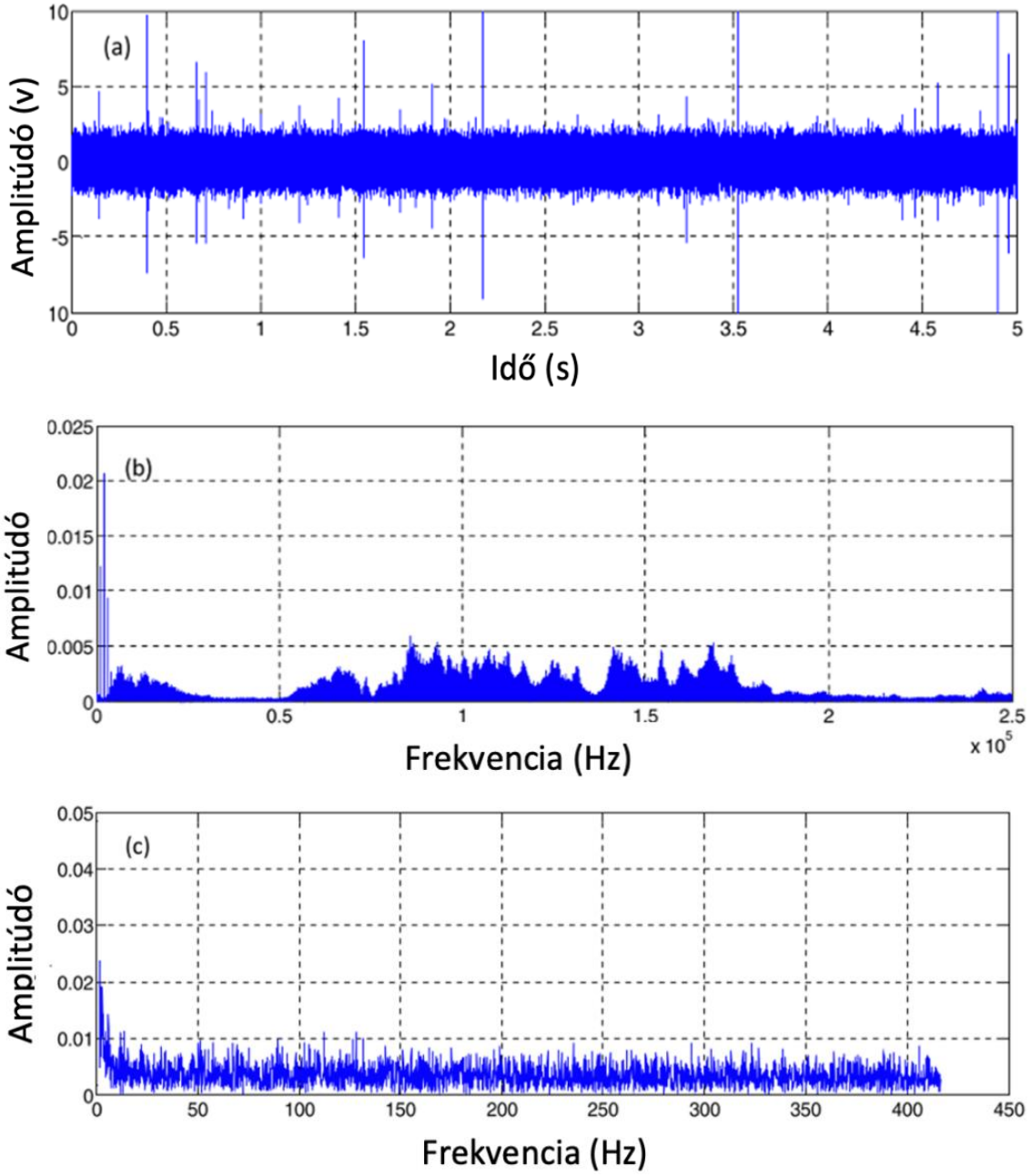
A vizsgálatokhoz használt csapágy mérete: 28 x 53 x 37 mm (típus: PW29530037CSHD).

A 2. táblázatban 150… 1000 1/perc közötti fordulatszámhoz tartozó mérési adatok láthatók a csapágy hibátlan és hibás külső gyűrű állapotára vonatkozóan. [15]

Hiba típus	**Fordulatszám (1/perc)**						
	150	**250**	**300**	**400**	**500**	**600**	**1000**
FTF	1.1	1.8	2.2	2.9	3.6	4.4	7.3
BPFO	23.1	38.4	46.1	61.5	76.9	92.3	153.8
BPFI	29.4	49.05	58.8	78.5	98.1	117.7	196.2
BSF	19.7	32.9	39.5	52.7	65.85	79	131.7

2. táblázat: A mérés csapágy hibafrekvenciái különböző fordulatszámok esetén [15]

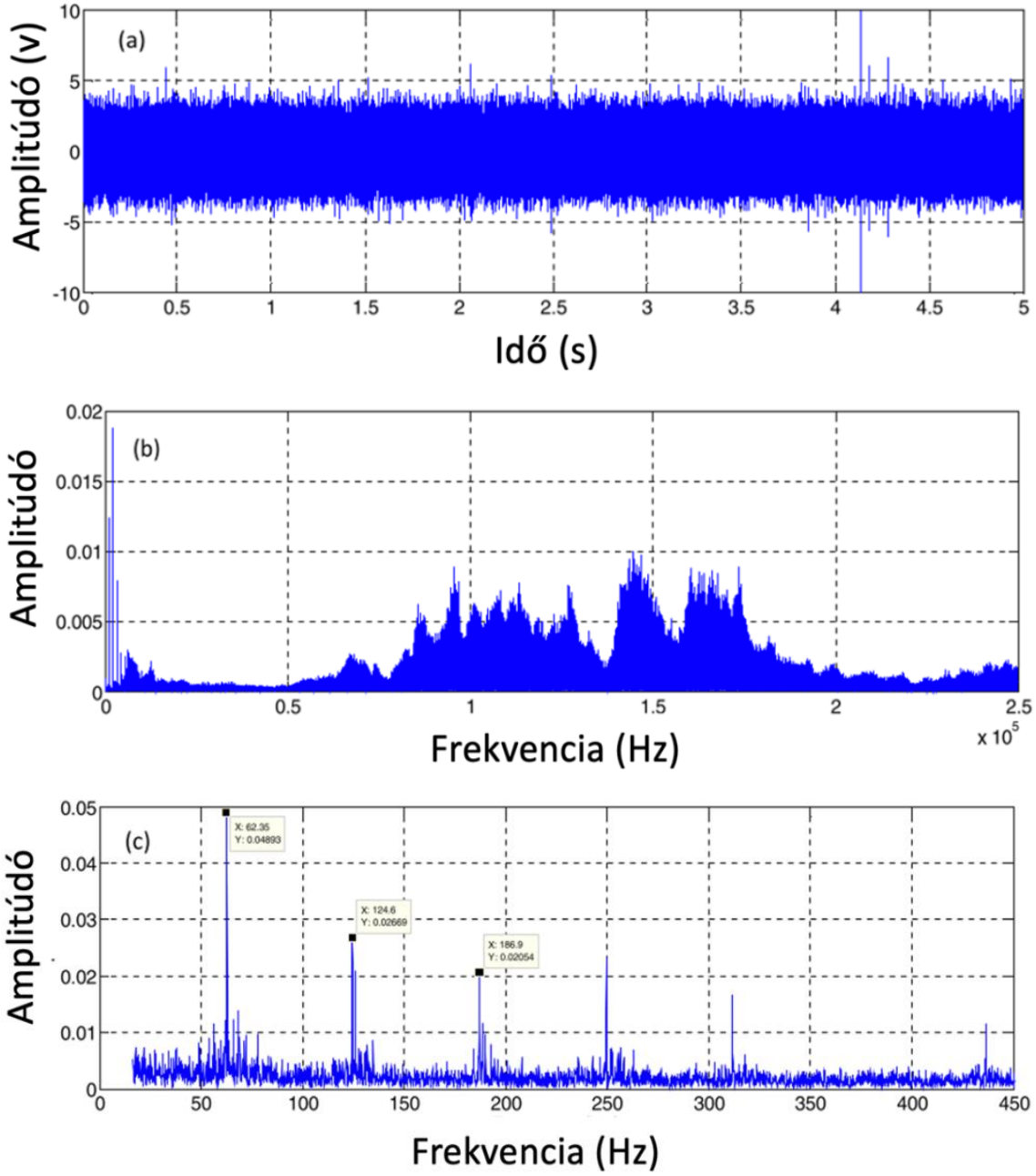
A hidraulikus emelő szerepe a csapágy terhelésének változtatása, ezzel az üzemeltetési körülmények, a terhelésállapot modellezése. Az alábbi ábrák a mérési eredményeit mutatják be, az időtartománybeli jelet, majd a Fourier transzformáció utáni teljesítménysűrűség spektrumot, végül a Hilbert transzformáció utáni burkológörbe elemzés szolgáltatta grafikont. A teljesítménysűrűség spektrum az autokorrelációs függvény Fourier transzformáltja. [15]



39. ábra: Hibátlan csapágy állapot időtartománybeli jele (a) – Spektrumanalízis után (b) – Burkológörbe elemzést követően Hilbert transzformációval (c) [15]

Mint a grafikonok elemzéséből látható, a burkológörbe módszerrel részletesebb felbontás látható a kiemelt 400 Hz-ig terjedő frekvencia tartományban, de jelen esetben a hibátlan csapágynál anomáliát nem mutat. Ha a csapágyhiba már súlyosabb, nagyobb kiterjedésű, a csapágyakra jellemző hibafrekvencia már alacsonyabb frekvenciatartományban megjelenik és egyszerűen kimutatható FFT elemzéssel is. Ha a hiba kiterjedése kicsi, csak a burkológörbe módszerrel lehet hatékonyan detektálni, amely a képes a moduláló jel visszaállítására. Meg kell jegyezni, hogy az optimális sáváteresztési frekvenciatartományt a csapágy rezonanciafrekvenciáira alapozva kell megállapítani. A jelenlegi méréseknél 6 KHz-es

középfrekvencia és 2 KHz-es sávszélesség került alkalmazásra a burkológörbe elemzéshez. [15]

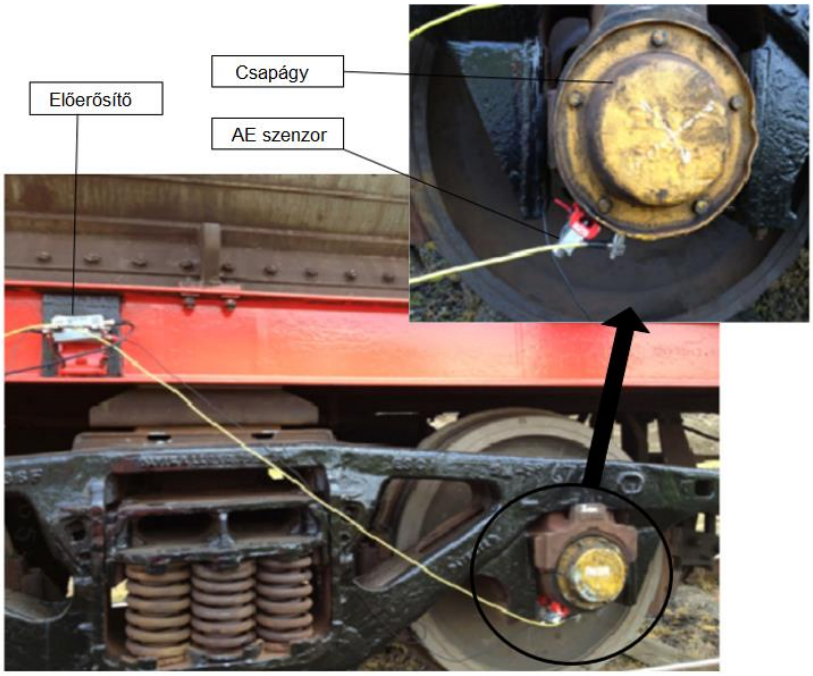


40. ábra: Hibás csapágy állapot időtartománybeli jele (a) – Spektrumanalízis után (b) – Burkológörbe elemzést követően Hilbert transzformációval (c) [15]

A hibás csapágy esetében, a grafikonok elemzéséből az alábbi következtetéseket lehet levonni. A csapágy elemeire jellemző rezonanciafrekvenciáknál and azok felharmonikusainál a jelek energiatartalmának növekedése volt tapasztalható, amely a ciklikus, csapágyhiba és csapágyelemek közötti rugalmas ütközésekből ered. [15]

Igen jól látható, hogy a teljesítménysűrűség spektrum, tehát az autokorrelációs függvény Fourier transzformáltja ugyan növekedést mutatott a teljes frekvenciatartományban, de ez elosztott növekedés általánosan jelentkezik és specifikusan nem utal arra, hogy a csapágy egy bizonyos frekvencián milyen károsodást mutat, mivel az ún. "jellemzőkinyerés" a mért jelből a környezeti zajok, rezgések hatására nem elégséges módon történik. Viszont a Hilbert transzformáció alapján, a burkológörbe módszernél, a jel demodulálását követően már sokkal határozottabban láthatók a csapágy egyes elemeire jellemző hibafrekvenciák és ezeket össze lehet hasonlítani a hibátlan csapágy grafikonjaival. A 62 Hz környékén jelentkező csúcs egyértelműen detektálható a burkológörbe grafikonból. A frekvencia jelzi a hibát, amellyel a csapágy rendelkezik a vizsgálatok során. A számítással meghatározott elméleti hibafrekvencia és a méréssel kapott hibafrekvencia között bizony eltérés tapasztalható, de jelen esetben nem jelentős. Az akusztikus emissziós mérési eljárás hatékonyan alkalmazható a csapágy terhelt és terheletlen állapotaira egyaránt. Dinamikus terhelés esetén mivel a terhelőerő periodikusan változik, gyakran harmonikus függvényeket követ, a forgási körfrekvencia változása jelentősebb, ezért az elmélet és a mért hibafrekvencia értékek is nagyobb eltérést mutatnak.

A következő részben egy másik alkalmazása kerül bemutatásra az akusztikus emissziós módszernek, amely vasúti tengely csapágy állapot felügyeletéhez kapcsolódik. Természetesen a csapágy bármely más gépben vizsgálható lenne, viszont jelen esetben mobil diagnosztikai rendszer működésének bemutatása a cél mozgást végző rendszeren. A diagnosztikai rendszer telepíthető fixen a pálya mentén, viszont ez esetben jobban ki van téve a közvetett járulékos zajoknak és rezgéseknek. Amennyiben az egységre telepített mobil kialakítással végezzük a méréseket a környezeti zavaró hatások mérsékelhetők [15]. A kísérletben 2, 4 és 8 mm átmérővel rendelkező Timken 99591-99100 típusú csapágy szerepelt a vizsgálatok céljából. A táblázatban látható a csapágyhoz tartozó hibafrekvencia értékek. [15]



41. ábra: Fedélzeti akusztikus emissziós diagnosztika [15]

Frekvencia (Hz)	Hibák
4.198	BSF – Görgő hibafrekvencia
11.7	BPFI – Belső gyűrű hibafrekvencia
9.3	BPFO – Külső gyűrű hibafrekvencia
0.443	FTFI – Kosárfrekvencia

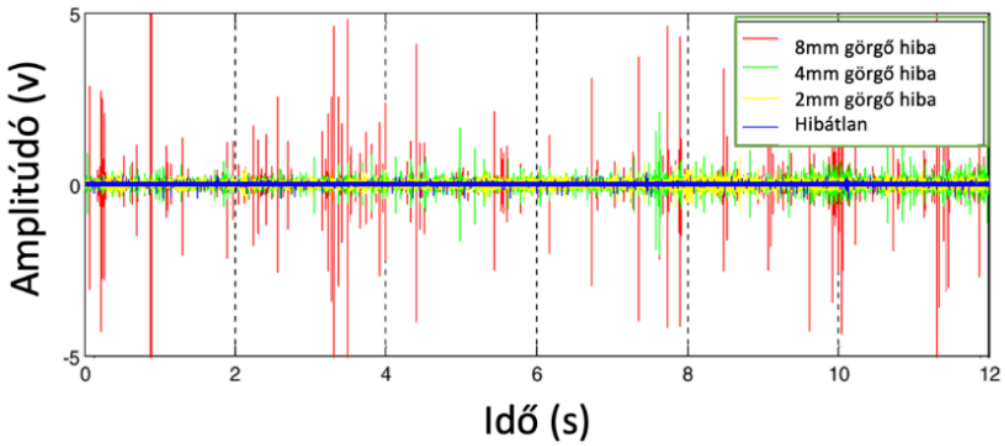
3. táblázat: A csapágy hibafrekvenciák értékei a dinamikus terhelési állapotnál [15]

A méréseket 48 km/h sebességgel egyenes menetben és 32 km/h sebességgel tolatóüzemben hajtották végre 200 m vizsgálati szakaszon. Az adatgyűjtő egység 500 kHz mintavételezési frekvenciára lett beállítva. A szenzor rögzítését mágnes biztosította a vizsgálati csapágy házának felületén Vaseline csatolóközeg segítségével. A szenzor a terhelt zónához közel került elhelyezésre. [15]

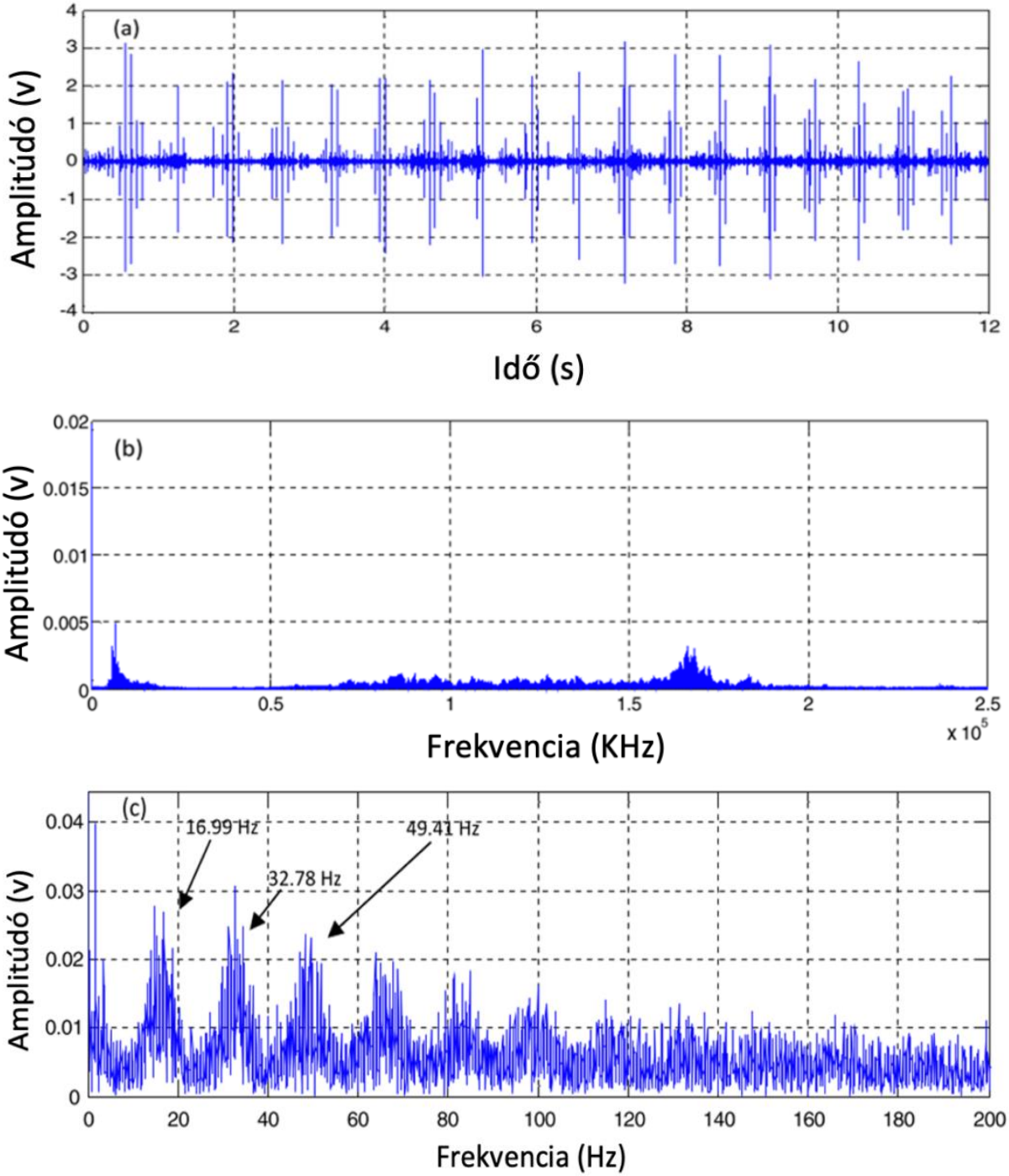
Amikor a vontatási sebesség 48 km/h volt, a kerék 4.2 Hz (256 1/perc) forgási frekvenciát produkált. Ebből eredően a csapágy hibafrekvenciáját alapul véve, azt megszorozva a kerék forgási frekvenciájával lehetett megkapni a hibafrekvencia tényleges értékét. [15]

4.198 Hz × 4.2 Hz (kerék forgási frekvencia) = 17.6 Hz

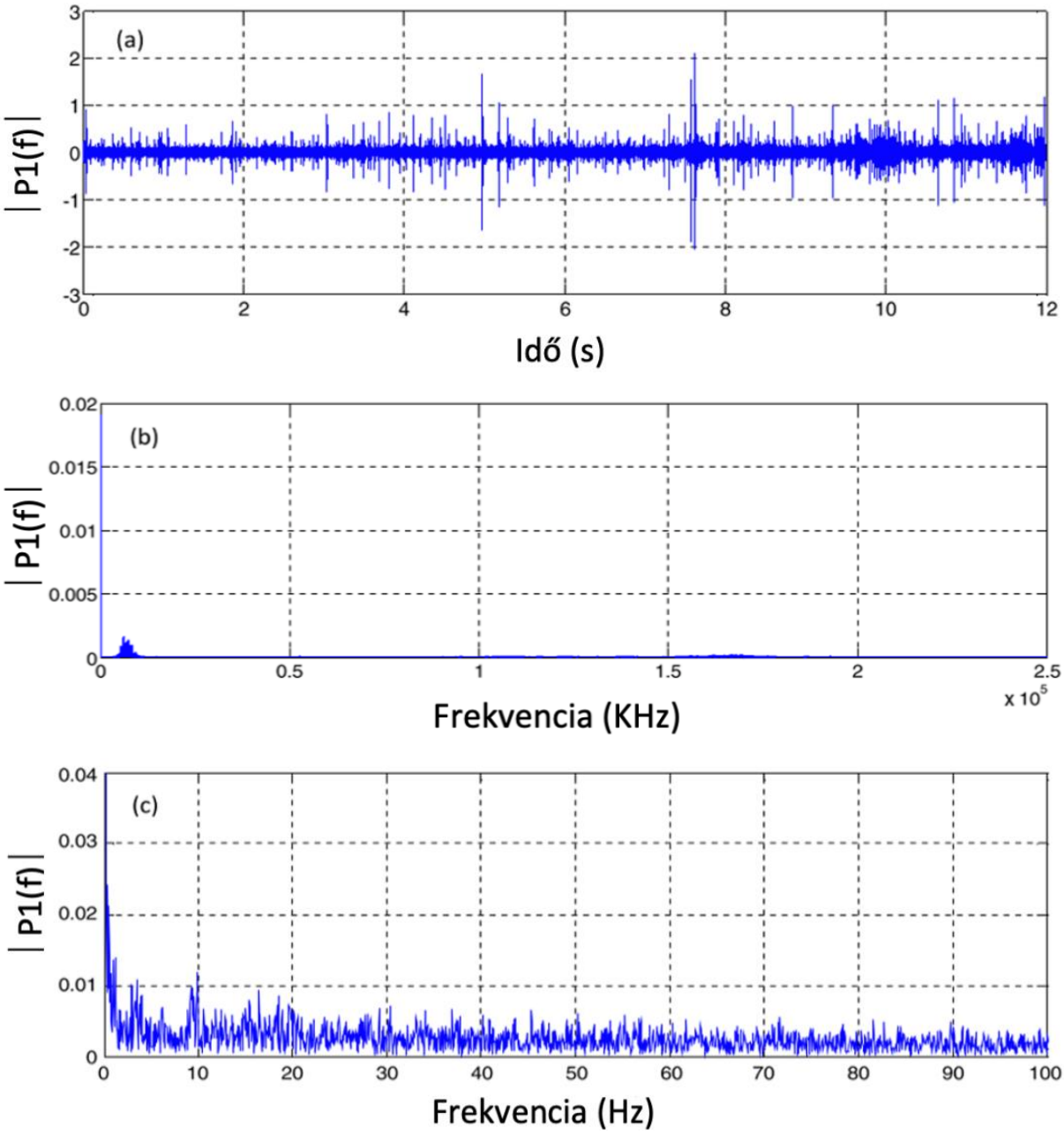
Ha a mérés eredményeit és a hozzá tartozó grafikonokat elemezzük, látható, hogy a nyers időtartománybeli adatok ugyan utalnak a hiba jelenlétére, de arra nem, hogy a csapágy melyik eleme hibás. Ehhez szükséges Fourier transzformáció, hogy a spektrumanalízis segítségével következtetéseket vonjunk le. Megállapítható, hogy a hiba geometriai nagysága határozta meg, hogy ki lehet-e mutatni a meghibásodást már a teljesítménysűrűség spektrumból vagy szükséges-e hozzá burkológörbe elemzés Hilbert transzformációval. Jelen esetben hibanagyságtól függetlenül egységesen elkészült a burkológörbe elemzés, amelyből egyértelműen látható és beazonosíthatók a csapágy egyes részeivel kapcsolatos károsodások. A burkológörbe elemzéssel 16.99 Hz környékén és a felharmonikusoknál határozott csúcs jelentkezett, illetve bizonyos mértékű oszcilláció volt tapasztalható a dinamikus terhelésii viszonyok ingadozása következtében. [15]



42. ábra: Az akusztikus emissziós időtartománybeli mérési jelek hibátlan és hibás csapágy állapotok esetében [15]



43. ábra: Dinamikus vizsgálat, hibátlan csapágy állapot időtartománybeli jele (a) – Spektrumanalízis után (b) – Burkológörbe elemzést követően Hilbert transzformációval (c) [15]



44. ábra: Dinamikus vizsgálat, hibás (kis hiba) csapágy állapot időtartománybeli jele (a) – Spektrumanalízis után (b) – Burkológörbe elemzést követően Hilbert transzformációval (c) [15]

A kis mértékű hibát tartalmazó dinamikus vizsgálat esetében a burkológörbe módszer sem eredményezett megfelelő eredményt a hibák detektálásra. Ez esetben még érzékenyebb módszerre van szükség, amely még hatékonyabban képes kiszűrni a jelentkező járulékos mechanikai rezgéseket, amelyek elmossák a hasznos jelet. Ennek elemzése további vizsgálatot igényel. [15]

Összefoglalva megállapítható, hogy az akusztikus emissziós módszerek megfelelő detektálás biztosítanak a fellépő strukturális rezgések kimutatására. Ezek a rezgések keletkezhetnek egészen nagy frekvenciatartományokban, akár 100 kHz felett, természetesen ekkor a meghibásodás mértéke még olyan kicsi, hogy mérnöki szempontból problémát sok esetben nem jelent. Mindig egyedi vizsgálatot igényel annak megállapítása, hogy jelent-e problémát a 100 kHz feletti akusztikus emissziós hibajel. Ahogy a hiba mértéke növekszik úgy tolódik kisebb frekvenciatartományba a strukturális rezgés. A szerkezeti rezgések egy bizonyos fajtája az adott gépelemek saját rezgés számához köthető, jelen csapágyvizsgálat esetén a BPFO, BPFI, FTF és BSF frekvenciák jellemezték a csapágy meghibásodását. Az ezeken a frekvenciákon fellépő, állapotromlás, károsodás okozta amplitúdó növekedés sem triviális. Érzékeny módszerek szükségesek ahhoz, hogy a járulékos rezgésekkel terhelt környezetben hatékonyan detektáljuk a kis energia tartalmú hibajeleket. Sok esetben a hagyományos Fourier transzformációval képzett spekrumelemzés nem elegendő, mert még nem emelkedik ki belőle a hibajel. Érzékenyebb és hatékonyabb vizsgálatot jelent, ha Hilbert transzformációval detektáljuk a jel burkológörbéjét, majd ennek képezzük a Fourier transzformáltját. Így hatékonyan visszaállítható az a moduláló jel, amit tulajdonképpen a hiba modulált rá a vivőjelre. Tehát egy amplitúdó demodulációt hajtunk végre, amelyet áttranszformálunk az időtérből a paramétertérbe. Ez a megközelítés sok esetben, így jelen esetben is eredményesnek bizonyult. További érzékeny és adott esetben még hatékonyabb szűrést és jellemzőkinyerést tesz lehetővé a wavelet transzformáció, a sokskálás elemzés (multiresolution analysis –MRA), egy adott anya wavelet család tagjának használatával, vagy még hatékonyabban komplex Morlet wavelet használatával, amely szabadon optimalizálható paramétereket tartalmaz akár genetikus algoritmussal, vagy szimulált hűtés segítségével. Ennek tárgyalása viszont már túlmutat a jegyzet keretein. [15]

Összefoglalás

A műszaki diagnosztika karbantartás fontos részét képezi. A szemlélet integrálható a megbízhatóság központú karbantartás stratégiában, amelynek egyik alkalmazása a gép vizsgálatok és a szerkezet vizsgálatok. A karbantartás korai fázisában a meghibásodási üzemeltették a gépeket ezzel kihasználva a teljes rendelkezésre álló tartalékot. Ez a szemlélet a mai napig érvényes lehet kis értékű és nem kritikus gépek üzemeltetésére. A nagyobb értékű és bonyolultabb gépeknek követelik a méréseken alapuló korszerű karbantartási stratégiák alkalmazását. A gépek rendelkezésre állási ideje a korszerű diagnosztikai módszerekkel fokozható és elkerülhető a váratlan gép leállás termeléskiesés növelhető. A rendelkezésre állási idő csökken a balesetek és a meghibásodásokból származó események száma. A rezgésdiagnosztika és az akusztikus emissziós módszerek meghatározó szerepet töltenek be a műszaki diagnosztikában. A rezgés diagnosztikai módszerek segítségével detektálhatók az egyes gépekben és gépelemekben bekövetkező meghibásodások. A rezgésdiagnosztika előnye az egyéb roncsolásmentes vizsgálatokkal szemben, hogy a mérési jellemzése segítségével nagyfelbontású részletgazdag információt biztosít a berendezés aktuális állapotáról és jelenlévő hibáira vonatkozóan. Ez az előny az akusztikus emissziós vizsgálatra is elmondható mivel szintén részletgazdag és kifinomult jelfeldolgozás alkalmaz. Mindkét módszer előnye, hogy a gép leállítása és megbontása nélkül szolgáltat információt a gép vagy a gépelem aktuális állapotáról és lehetővé teszi a valós idejű állapot felügyeletet. Ahhoz, hogy a megfelelő műszaki diagnosztikai feladatot eredményesen végre hajtsuk ismerni kell a rendelkezésre álló hardver eszközöket és a kapcsolódó szoftveres applikációkat. A mérés hardver oldala a szenzorok, a kábelek, az adatgyűjtő egységek, amely ismerete szintén elengedhetetlen. A műszaki diagnosztikában a rezgésdiagnosztika területén igen elterjedtek a kis méretű és kis tömegű piezoelektromos rezgésmérő szenzorok. A megfelelő pontossággal és felbontással rendelkező adatgyűjtő az csatlakoztatva cél szoftver segítségével igen hatékony hibafeltárást tesz lehetővé. Ugyanez elmondható az akusztikus emissziós mérés technikára, amelynek sok közös vonása van a rezgés méréssel, viszont magasabb frekvencián történő méréseket valósít meg és elsősorban a rövid idejű tranziens impulzusok detektálását foglalja magába. A jegyzet második fejezete részletesen bemutatta mind a rezgés diagnosztikához, mind az akusztikus emissziós vizsgálathoz szükséges mérőrendszer tartozékokat, azok működését és legfontosabb paramétereit. A fejezet utalt a hardver elemeken túlmenően a módszerek leírására is, amely a mérések elengedhetetlen részét képezik. A jegyzet harmadik fejezete a jelfeldolgozási módszerekre tért ki, amelyben megemlítésre kerültek az idő tartománybeli statisztikai módszerek, illetve a frekvencia tartománybeli, Fourier transzformáció alapuló spektrum elemzést szolgáló diagnosztikai eljárás. A műszaki gyakorlatban mindkét módszernek van létjogosultsága. Viszont a frekvenciatartománybeli elemzésnek, vagyis a spektrum elemzés során szolgáltatott diagnosztizálásnak sok esetben nagyobb jelentősége van, mint az időtartománybeli elemzésnek. Ennek során ugyanis feltárják és azonosítják a spektrumban jelenlévő és már korábban kiszámított hiba frekvenciákat, amelyek az adott gépekre vagy gépelemekre jellemzőek. Ezeknek a frekvenciájának az időbeli nyomonkövetése hasznos információt

szolgáltat arra vonatkozóan hogyan alakul a gép vagy a gépelem időbeli állapota. Gyakori módszer a diszkrét Fourier transzformáció úgynevezett gyors Fourier transzformáció változata, amely gyorsabb számítást tesz lehetővé kisebb hardverigény mellett. A fejezetben megemlítésre került továbbá az ablakozott rövid idejű Fourier transzformáció, amely a jel egy bizonyos szakaszára koncentrál és a frekvencia információ mellett az idő tartománybeli információt is megjeleníti. A wavelet transzformáció tárgyalására terjedelmi okok miatt a jegyzet nem tért ki. Bemutatásra kerültek a digitális jelfeldolgozás alapjai, amelynek lényege, hogy a folytonos természetben előforduló mérési jelet korszerű digitális adatfeldolgozási módszerekkel digitális jellé alakítják. Az analóg digitális átalakítás során tekintettel lenni a mintavételezési sebességre, mivel döntően befolyásolja a maximálisan elemezhető legnagyobb frekvenciát, ugyanakkor hatással van a mérés sebességére és befolyásolja az adattárolással kapcsolatos hardver igényeket is. Említésre került az aliasing jelenség, amely a Shannon-féle mintavételezési törvény be nem tartásából ered. A jegyzet negyedik fejezete a kopásból eredő károsodásokkal és a csapágyak meghibásodásai szakaszaival foglalkozott. Részletes bemutatásra kerültek a kopásból eredő károsodások, illetve a gördülőcsapágyak időbeli károsodásának szakaszai.

A jegyzett utolsó fejezetében két esettanulmány bemutatására került sor. Az első esettanulmány Fourier transzformáción alapuló rezgésdiagnosztikai csapágy hiba diagnosztizáláshoz kapcsolódott, amelyben eredményesen kimutatásra kerültek kopásból származó hiba spektrum elemzés segítségével. A két esettanulmány akusztikus emissziós módszerrel vizsgálata csapágyakban előforduló meghibásodásokat mind kísérleti, mind valós mérés segítségével. Mindkét vizsgálat hatékonyan diagnosztizálta a jelenlévő hibákat és beazonosította azokat az okokat, amelyek a csapágyakban fellépő hiba jelenségeket okozták.

Irodalomjegyzék

[1] Kocsis I., Deák K., Szabó T., Kvasz R. (2015) Diagnosztika és állapotfelügyelet, Debrecen, Debreceni Egyetem Műszaki Kar, ISBN: 978-963-473-903-6

[2] Huba A., Lipovszki Gy. (2014) Méréselmélet, Budapest, BME-MOGI Kiadó

[3] NI 9234 típusú rezgésmérő adatgyűjtő: https://www.ni.com/pdf/manuals/374238a_02.pdf (Letöltve: 2021.01.25.)

[4] Szabó J. Z. (2010) Rezgésdiagnosztikai vizsgálatok és haditechnikai alkalmazhatóságuk kutatása. PhD értekezés, Budapest, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, Bolyai János Katonai Műszaki Kar, Katonai Műszaki Doktori Iskola

[5] Pór G., Fodor O. (2013) Roncsolásmentes és roncsolásos anyagdiagnosztikák, Budapest, *TÁMOP-4.1.2 A1 és a TÁMOP-4.1.2 A2 könyvek*

[6] Gál I. (2007) Anyagvizsgálat - Előadás anyag, Miskolc: Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszék

[7] Kánnár A. (2004) Az akusztikus emissziós kísérleti technika alkalmazhatóságának vizsgálata a faanyag mechanikai tulajdonságainak megítélésére - PhD értekezés, Nyugat-Magyarországi Egyetem, Faipari Mérnöki Kar, Cziráki József Faanyagtudományi és Technológiák Doktori Iskola

[8] Roncsolásos és roncsolásmentes diagnosztikák-Akusztikus emisszió tananyag: https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0013_roncsolasmentes_es_roncsolasos_anyagdiagnosztikak/akusztikus_emisszio.scorml (Letöltve: 2021.01.25.)

[9] Sensophone AED-404 Streamer akusztikus emissziós mérőműszer: https://www.sensophone.hu/?lang=hu (Letöltve: 2021.01.26.)

[10] Ferdeségi együttható negatív és pozitív értéke című ábra: https://www.vosesoftware.com/riskwiki/Skewness(S).php (Letöltve: 2021.01.25.)

[11] A csúcsossági együttható című ábra: https://www.bogleheads.org/wiki/Excess_kurtosis (Letöltve: 2021.01.25.)

[12] Menyhárt József (szerk.) (2018) Gépészeti rendszerek károsodása, javításstechnológiája és karbantartása, Debrecen, Debreceni Egyetem, ISBN 978-963-490-038-2

[13] Nagy I. (2006) Állapotfüggő karbantartás. Műszaki diagnosztika I. Rezgésdiagnosztika, Budapest, *Delta-3N Kft.*

[14] Deák K. (2020) Development of bearing fault diagnostics methodology based on signal processing and machine learning tools, Debrecen, University of Debrecen, Doctoral Counsil of Natural Sciences and Information Technology Doctoral School of Informatics, Debrecen

[15] Amini A., Entezami M., Papaelias M. (2016) Onboard detection of railway axle bearing defects using envelope analysis of high frequency acoustic emission signals, Birmingham, University of Birmingham, B15 2TT, UK

[16] Rezgésdiagnosztika-BME jegyzet: http://www.gjt.bme.hu/sites/default/files/2jfd_rezgesdiagnosztika_2008.pdf (Letöltve: 2021.01.30.)