



DIAGNOSZTIKA ÉS ÁLLAPOTFELÜGYELET

Készítette:

**Dr. Kocsis Imre
Deák Krisztián
Szabó Tamás
Kvasz Richárd**

Készült: Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Debrecen

Terjedelem: 204 oldal (5 ív)

Kézirat lezárva: 2015. augusztus 15.

A tananyag elkészítését a Munkaerő-piaci igényeknek megfelelő, gyakorlatorientált képzések, szolgáltatások a Debreceni Egyetemen Élelmiszeripar, Gépészet, Informatika, Turisztika és Vendéglátás területen (Munkaalapú tudás a Debreceni Egyetem oktatásában) TÁMOP-4.1.1.F-13/1-2013-0004 számú projekt támogatta. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Lektor:

Ráthy Istvánné Dr.

ISBN: 978-963-473-903-6



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Szociális
Alap



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE



TARTALOMJEGYZÉK

TARTALOMJEGYZÉK	2
TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE	5
ÁBRÁK JEGYZÉKE	6
1 A MÉRÉS SZEREPE A GÉPÉSZETI RENDSZEREK ÜZEMELTETÉSÉBEN ÉS KARBANTARTÁSÁBAN	13
1.1 Az üzemeltetési és karbantartási rendszerek fejlődése	13
1.2 A műszaki diagnosztika alapadatai	20
FELHASZNÁLT SZAKIRODALOM	25
2 STATISZTIKAI ESZKÖZÖK A TERMELÉSI FOLYAMATOK ÉS A GÉPÁLLAPOT LEÍRÁSÁBAN	26
2.1 A leíró statisztika eszközei az adatelemzésben	26
2.2 Minőségképesség-elemzés, statisztikai folyamatszabályozás	28
2.3 A 6σ szemlélet	37
2.4 Szórás-elemzés (ANOVA)	40
2.5 Mérőrendszer-elemzés	44
FELHASZNÁLT SZAKIRODALOM	49
3 A JELEK ELEMZÉSÉNEK MÓDSZEREI	51
3.1 Ortonormált függvényrendszerek	52
3.2 Klasszikus Fourier sorok	55
3.3 Fourier transzformáció	61
3.4. Diszkrét Fourier transzformáció	63
3.5 Gyors Fourier transzformáció (FFT)	68



3.6 Rövid idejű Fourier transzformáció	69
3.7 Wavelet transzformáció	72
3.8 Diszkrét Wavelet transzformáció	80
FELHASZNÁLT SZAKIRODALOM	81
4 JELFELDOLGOZÁSI MÓDSZEREK ÁTTEKINTÉSE	82
4.1 Időtartománybeli gépvizsgálatok	83
4.2 Frekvenciatartománybeli gépvizsgálatok	83
4.3 Idő- és frekvenciatartománybeli gépvizsgálatok	84
4.4 Mérési módszerek és a változó felbontású elemzés (MRA)	86
FELHASZNÁLT SZAKIRODALOM	88
5 GÉPI TANULÁSI MÓDSZEREK A MŰSZAKI DIAGNOSZTIKÁBAN	89
5.1 Mesterséges neurális hálók alkalmazása a diagnosztikában	89
5.2 Hilbert Huang transzformáció és EMD módszer	95
5.3 TARTÓVEKTORGÉPEK MÓDSZER (SVM)	96
FELHASZNÁLT SZAKIRODALOM	100
6 REZGÉSMÉRÉS A DIAGNOSZTIKÁBAN	102
6.1 Rezgésérzékelők	103
6.2 Lökésimpulzus módszer -SPM	103
6.3 „SEE” technológia és akusztikus emissziós vizsgálatok	104
6.4 Akusztikus emisszió	106
6.5 Jellegzetes hibafrekvenciák	107
6.6 Amplitúdó moduláció a műszaki diagnosztikában	117
6.7 Szerszámkopás felügyelet	121



FELHASZNÁLT SZAKIRODALOM	125
7 MŰSZAKI AKUSZTIKAI MÉRÉSEK	127
7.1 Zajok csoportosítása	127
7.2 A zajanalizátorok használt súlyozó görbék és üzemmódok	128
7.4 Adaptív zajcsökkentés	132
7.5 Akusztikai szoftverek	133
8. GÉPI DIAGNOSZTIKÁK	137
8.1. A gyakorlatban használt diagnosztika fajták	137
9. REZGÉS DIAGNOSZTIKA	140
9.1. Rezgés diagnosztika fajták	140
10. REZGÉSMÉRÉSI RENDSZEREK	142
10.1. Offline rezgésmérés	142
10.2. Online rezgésmérés	185
11. A REZGÉSDIAGNOSZTIKA GYAKORLATI JELENTŐSÉGE	200
11.1. Karbantartási stratégiák	200
11.2. A rezgésmérésekből levont következtetések	201



TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

2.1 táblázat: Minőségképesség indexek.	30
2.2 táblázat: Minőségképesség indexek számítása.	30
2.3 táblázat: DPMO értékek.	38
2.4 táblázat: Egyfaktoros ANOVA input adatok.	41
2.5 táblázat: Egyfaktoros ANOVA.	42
2.6 táblázat: A 2.1. példa adatai és a MS Excel által szolgáltatott elemzés	43
2.7 táblázat: A 2.2 példa input adatai és átlagok.	47
2.8 táblázat: A csoportátlagok a 2.2 példában.	48
2.9 táblázat: Eltérés négyzetösszegek a 2.2. példában.	49
2.10 táblázat. ANOVA eredménye a 2.2. példában.	49
5.1 Táblázat: A csapágyhibákra utaló tünetek és a neurális háló hatékonysága.....	95
6.1 táblázat: SEE határértékek [1].....	105
6.2 táblázat: ISO 10816 szabvány szerint előírt rezgés határértékek [14].....	116



ÁBRÁK JEGYZÉKE

1.1 ábra: Az üzemszervezési szempontok változása.	15
1.2 ábra: Meghibásodási ráta függvény („kádgörbe”).	16
1.3 ábra: A lökésimpulzusok alakulása a nem megfelelő kenés és felületi sérülések esetén.	22
1.4 ábra: A dBc/dBm és az LR/HR értékek értelmezése.	23
1.5 ábra: A HR és az LR-HR értékek megjelenítése.	23
1.6 ábra: Egy mérőponton felvett SPM spektrum és rezgésspektrum.	24
1.7 ábra: A „frekvenciaváltó probléma” szimptóma megjelenése villamos motor csapágyának SPM spektrumában.	25
2.1 ábra: Az időtartománybeli jel néhány számszerű jellemzője.	26
2.2 ábra: Tanulási szakasz és vizsgálati szakasz.	28
2.3 ábra: Szabályozatlan és szabályozott folyamat.	29
2.4 ábra: A C_m és a C_{mk} indexek jelentése.	32
2.5 ábra: A Gauss papír felépítése.	33
2.6 ábra: Kapcsolat a C_m és a C_{mk} indexek értéke és a Gauss papíron kialakult kép között.	35
2.7 ábra: Tipikus elemzés átlag-terjedelem kártyával (mean=átlag, range=terjedelem). .	36
2.8 ábra: Zónák az ellenőrző kártyán.	37
2.9 ábra: Az eltolódás szerepe a DPO értékben.	39
3.1 ábra: A Haar-rendszer néhány eleme.	53
3.2 ábra: A Rademacher-rendszer egy eleme.	55
3.3 ábra: $t \rightarrow \cos k \cdot 2\pi T \cdot t$ függvények, $k=1,2,3$	55
3.4 ábra: $t \rightarrow \sin k \cdot 2\pi T \cdot t$ függvények, $k=1,2,3$	55
3.5 ábra: Periodikus jel frekvenciaspektruma.	56
3.6 ábra: Az f függvény grafikonja a 3.1. példában.	57
3.7 ábra: „Komplex” spektrum.	57
3.8 ábra: Az f függvény képe a 3.2. példában.	59
3.9 ábra: A Fourier sor két részletösszege.	59
3.10 ábra: A Fourier sor két részletösszege.	60
3.11 ábra: Az f függvény és annak „komplex” spektruma.	62
3.12 ábra: Az f függvény és annak „valós” spektruma a 3.4 példában.	63
3.13 ábra: A valós és a komplex spektrum összehasonlítása.	63
3.14 ábra: Mintavételezés a DFT-hez.	65
3.15 ábra: Mintavételezett szinusz jel.	66
3.16 ábra: Aliasing, téves frekvenciák megjelenése a spektrumban.	66
3.17 ábra: Az ablakfüggvény hatása.	67
3.18 ábra: Az SPM rendszer „Color Spectrum” szolgáltatása.	69
3.19 ábra: Lokalizáció a rövid idejű Fourier transzformáció esetén.	70
3.20 ábra: A Hann és a Gauss ablakfüggvények és ezek Fourier transzformáltja.	70
3.21 ábra: Spektrogram.	71
3.22 ábra: Fázistér.	72
3.23 ábra: A bázisfüggvényeknek megfelelő tartomány a fázistérben.	72
3.24 ábra: Haar wavelet rendszer néhány függvénye.	73
3.25 ábra: Néhány gyakran alkalmazott wavelet.	75
3.26 ábra: Az a és a b paraméter jelentése a Mexikói kalap wavelet esetén.	75



3.27 ábra: Az a és a b paraméter változtatásának hatása a Mexikói kalap wavelet esetén.	75
3.28 ábra: Wavelet transzformáció.	76
3.29 ábra: A szinusz függvény és két szinusz függvény összegének transzformáltja.	77
3.30 ábra: A $\sin(x^2)$ függvény transzformáltja.	78
3.31 ábra: Él detektálása.	79
4.1 ábra: Csapágyhibák transzformációja frekvenciatartományba	84
4.2 ábra: Csapágy frekvencia hibaspektrum	84
4.3 ábra: Idő-frekvenciatartomány grafikon	86
4.4 ábra: Csapágyvizsgáló tesztpad	86
4.5 ábra: A változó felbontású elemzés frekvencia szerinti felbontása.	87
4.6 ábra: A belső gyűrű hibával rendelkező csapágy wavelet transzformáció után nyert spektruma	88
5.1 ábra: Az elemi neuron súlyokkal, aktivációs- és átviteli függvénnyel	90
5.2 ábra: Sigmoid függvény	90
5.3 ábra: A mesterséges neurális hálózatok lehetséges csoportosítása	91
5.4 ábra: A mesterséges neurális hálózatok topológiája	92
5.5 ábra: Az időtartománybeli rezgéskép (balra), frekvenciaspektrum FFT transzformációt követően a 6206 típusú csapágnál.	94
5.6 ábra: SVM elve	97
6.1 ábra: A rezgésmérés folyamatábrája	102
6.2 ábra: A rezgésérzékelő szenzorok rögzítése a mérendő frekvencia függvényében	103
6.3 ábra: SEE amplitúdó időbeli változása	105
6.4 ábra: Az akusztikus emisszió mérés tömbvázlata	106
6.5 ábra: Az akusztikus emissziószenzor tipikus átviteli frekvenciamenete	107
6.6 ábra: A kúpgörgős csapágy részei és megnevezése	108
6.7 ábra: A csapágyhiba frekvenciák a meghibásodás 1. stádiumában.	109
6.8 ábra: A csapágyhiba frekvenciák a meghibásodás 2. stádiumában.	109
6.9 ábra: A csapágyhiba frekvenciák a meghibásodás 3. stádiumában.	110
6.10 ábra: A csapágyhiba frekvenciák a meghibásodás 4. stádiumában	110
6.11 ábra: A csapágyhiba frekvenciák a meghibásodás 5. stádiumában	111
6.12 ábra: A csapágyhiba frekvenciák a meghibásodás 6. stádiumában	111
6.13 ábra: Az ultrahang generátor kapcsolási rajza	114
6.14 ábra: Az ultrahang generátor beültetési terve	115
6.15 ábra: A csapágyhibák helyesen megválasztott mérési pontjai a csapágyházon	117
6.16 ábra: A modulált jel és sávszélesség	117
6.17 ábra: A vivőhullám és a moduláló jel kapcsolata	118
6.18 ábra: 50%-os modulációs mélység esetén egy szinuszos AM jelalak idő (bal) és frekvencia tartományban (közép), valamint a burkoló demodulátor kimenete (jobb)	119
6.19 ábra: 80%-os modulációs mélység esetén egy szinuszos AM jelalak idő (bal) és frekvencia tartományban (közép), valamint a burkoló demodulátor kimenete (jobb)	119
6.20 ábra: Szinuszos jellel modulált AM-DSB jel a frekvenciatartományban.	119
6.21 ábra: Egyoldalsávós LSB és USB jelek megjelenése a spektrumban	120
6.22 ábra: Gördülőcsapágy hiba generált amplitúdómodulációs jel és feldolgozása	121
6.23 ábra: A szerszámkopások jelentkezése a szerszámon.	121
6.24 ábra: A szerszámkopás növekedése a forgácsolási idő függvényében	122
6.25 ábra: Szerszámkopás céljából zaj-és rezgésmérés esztergálás során.	123



6.26 ábra: Szeszámkopás céljából felállított zaj-és rezgésmérés tömbvázlat mesterséges neurális hálózat alkalmazásával	124
6.27 ábra: NI 9234 DAQ, PCB szenzor és NI Labview VI	124
6.28 ábra: Rezgésspektrum új (balra) és kopott (jobbra) szerszám esetén /VB=0,4 mm/	125
6.29 ábra: Zajspektrum új (balra) és kopott (jobbra) szerszám esetén /VB=0,4 mm/	125
7.1 ábra: Fletcher-Munson hangossági görbék.....	128
7.2 ábra: Súlyozógörbék frekvenciamenete.....	129
7.3 ábra: SL-100 kézi zajszintmérő.....	130
7.4 ábra: Mikrofonok gömbi és kardoid karakterisztikával	130
7.5 ábra: Zajszintmérő mikrofon kalibrálása pisztonfonnal	131
7.6 ábra: Gépzaj és környezeti zajterhelés mérése.....	132
7.7 ábra: Az adaptív zajcsökkentés elvi vázlata	132
7.8 ábra: Audacity program kezelőfelülete	134
7.9 ábra: A Spectrum Lab program kezelőfelülete.....	134
7.10 ábra: A Spectrum Lab program kezelőfelülete	135
7.11 ábra: A Zeitnitz oszcilloszkóp program kezelőfelülete	135
8.1 ábra: N101 görgőprésgép préselő felügyeleti rendszere	137
8.2 ábra: IR111 NOVA 10/90 kapcsolószekrény –Mágnes kapcsoló (kontaktor).....	138
8.3 ábra: IR109 AFE támfelület közsorú gép kihordó szalag motor	139
9.1 ábra: FAG Detector III offline rezgésmérő és tartozékai	141
9.2 ábra: SmartCheck online rezgésszenzor	141
10.1 ábra: Példa helyesen felállított struktúrára: 1. szint: gyártócella 2. szint: gyártósor 3. szint: gép megnevezés 4. szint: mérési pont 5. szint: mutatószámok.....	143
10.2 ábra: Csapágyhibára utaló időjel képe.....	144
10.3 ábra: Rezonancia vizsgálat jelölt rezonancia tartománnyal.....	144
10.4 ábra: Struktúra riasztási küszöbökkel és az mért értékek táblázata	145
10.5 ábra: A vizsgált csapágy kinematikus frekvenciáinak rávetítése a spektrum képre ...	145
10.6 ábra: Megfelelő és küszöb feletti mért érték kijelzése.....	145
10.7 ábra: Időjel és spektrum elnagyolt ábrázolása	146
10.8 ábra: FAG Detector III felülnézete	146
10.9 ábra: FAG Detector III alulnézete	147
10.10 ábra: Trend ábrázolása a Trendline programban	147
10.11 ábra: Gép állapot romlás felügyelet egy trend segítségével	148
10.12 ábra: Kiegyensúlyozatlanság	148
10.13 ábra: Egytengelyűségi hiba	149
10.14 ábra: Fogaskerék hibák	149
10.15 ábra: A jelfeldolgozás elmélete	150
10.16 ábra: A szenzor felépítése.....	150
10.17 ábra: A Trendline konfigurációs ablaka	151
10.18 ábra: Időjel analóg-digitális átalakítása	153
10.19 ábra: Időjel függvény kinagyított képe	154
10.20 ábra: Kerítés effektus.....	154
10.21 ábra: Felbontások összehasonlítása azonos FFT-vonalszám és különböző szűrő érték esetén	155
10.22 ábra: Felbontások és mérési idők.....	155
10.23 ábra: A HC7011 típusú csapágy kinematikus frekvenciái.....	156



10.24 ábra: Egy csapággy különböző elemeinek károsodásának szimulációi	157
10.25 ábra: Egy csapággy állapot durva becslése	158
10.26 ábra: A kiegyensúlyozatlanság és rezonancia képe	159
10.27 ábra: Kezdődő csapággykárosodás, álló külső gyűrű burkológörbe spektrumképei ...	159
10.28 ábra: Tengelyütés	160
10.29 ábra: Előrehaladott csapággykárosodás spektrumképe a gyorsulás görbén	160
10.30 ábra: Rezonancia	160
10.31 ábra: Kiegyensúlyozatlanság	160
10.32 ábra: Végleges csapággykifutás	160
10.33 ábra: Kétsínes adapter	161
10.34 ábra: Példa a helyes és helytelen felhelyezésre	161
10.35 ábra: Trendline-ba feltöltött adatok	162
10.36 ábra: Trendline-ban ábrázolt trend	163
10.37 ábra: Időjel és spektrum ábrázolása a Trendline programban	163
10.38 ábra: A FIS-Viewer eszköztára	164
10.39 ábra: Állapot jelzések	165
10.40 ábra: Automatikus betanítás	165
10.41 ábra: Manuális betanítás	166
10.42 ábra: ISO 10816 által megadott állapotzónák	166
10.43 ábra: ISO szerint megadott értékhatárok géposztályonként	167
10.44 ábra: A mérési pont színkódja a legutolsó mért érték szerint	168
10.45 ábra: Riasztási színkódok a struktúrában	169
10.46 ábra: Példa egy csak főriasztásnál mentett időjel beállításra	169
10.47 ábra: Kiegyensúlyozatlanság jellemző spektrumképe	170
10.48 ábra: Elhajlott tengely jellemző spektrumképe	170
10.49 ábra: Szögeltérési hiba	170
10.50 ábra: Szögeltérési hiba spektrumképe	170
10.51 ábra: Párhuzamhiba	171
10.52 ábra: Párhuzamhiba spektrumképe	171
10.53 ábra: Egyenetlen gépággy	171
10.54 ábra: Egyenetlen gépággy spektrumképe	172
10.55 ábra: Laza rögzítettség	172
10.56 ábra: Laza rögzítettség spektrumképe	172
10.57 ábra: Lazán illesztett alkatrészek spektrumképe	172
10.58 ábra: Laza szíjtárcsa valós spektrumképe	173
Forrás: [2]	173
10.59 ábra: Repedés a csapággyházon	173
10.60 ábra: Csapággyház repedés spektrumképei	173
10.61 ábra: Csapággyszerelési hiba	173
10.62 ábra: Csapággyszerelési hiba sebesség/gyorsulás spektrumképe	174
10.63 ábra: Csapággyház hiba	174
10.64 ábra: Csapággyház hiba spektrum képei	174
10.65 ábra: Új csapággy burkológörbe időjele és spektruma	175
10.66 ábra: Szíjhajtás	175
10.67 ábra: Nem megfelelő szíj feszesség	176
10.68 ábra: Szíj feszesség hiba spektrumképe	176



10.69 ábra: Szíjtárcsa excentricitás	176
10.70 ábra: Szíjtárcsa excentricitás spektrumképe.....	177
10.71 ábra: Párhuzamfutási hiba	177
10.72 ábra: Párhuzamfutás hiba spektrumképe	177
10.73 ábra: Szíj rezonancia.....	178
10.74 ábra: Szíj rezonancia spektrumképe.....	178
10.75 ábra: Szenzor elhelyezése a hajtómű házon	179
10.76 ábra: Szögeltérési hiba sebesség és gyorsulás spektrumképe.....	179
10.77 ábra: Szögeltérési hiba burkológörbe spektrumképe	179
10.78 ábra: Egy fog sérülés	180
10.79 ábra: Egy fog sérülés spektrumképe	180
10.80 ábra: Egy fog sérülés időjelképe	181
10.81 ábra: Több fog sérülés.....	181
10.82 ábra: Több fog sérülés spektrumképe.....	182
10.83: ábra: Több fog sérülés időjelképe	182
10.84 ábra: Törött fog.....	183
10.85 ábra: Törött fog spektrumképe	183
10.86 ábra: Törött fog időjelképe.....	184
10.87 ábra: Hajtómű állapot táblázata.....	184
10. 88 ábra: A SmartUtility kezdő felülete.....	185
10. 89 ábra: A szenzor és kezelőelemei	186
10.90 ábra: Felszerelt SmartCheck szenzor egy támfelület köszörű gép köszörű orsójára	187
10.91 ábra: Standard konfigurációs ablak	188
10.92 ábra: Valós idejű megjelenítés.....	189
10.93 ábra: Mérési adatok megjelenítése.....	189
10.94 ábra: Trend ábrázolás SmartWeb-en	190
10.95 ábra: Riasztási szintek változása a tanulási mód után.....	190
10.96 ábra: A riasztás számláló működése.....	191
10.97 ábra: Státusz sáv	191
10.98 ábra: Szenzor LED fényjelzései.....	192
10.99 ábra: Trend színjelölései	192
10.100 ábra: SmartViewer	193
10.101 ábra: Példa egy spektrumra illesztett harmonikus és oldalonkurzorra	193
10.102 ábra: Két mérés egymásra illesztése	194
10.103 ábra: Mutatószám konfiguráció csapágyra.....	194
10.104 ábra: Konfiguráció varázsló kezdőképe	195
10.105 ábra: HSS7011 csapágy kinematikus frekvenciái.....	195
10.106 ábra: Bemenet beállítás.....	196
10.107 ábra: Mérési feltétel megadása	197
10.108 ábra: Lépések.....	197
10.109 ábra: 1. lépés	198
10.110 ábra: 2. lépés.....	198
10.111 ábra: 3. lépés.....	198
10.112 ábra: 4. lépés.....	199
10.113 ábra: 5. lépés.....	199
11.1 ábra: Karbantartási stratégiák.....	200



11.2 ábra: A gép állapotának romlása	201
11.3 ábra: IRR tárgyorsó hátsó mérési pontjának értékei és trendje	202
11.4 ábra: AFE köszörű orsó online felügyelete.....	202

SZERZŐK



Dr. Kocsis Imre PhD, a matematika és számítástudományok tudományok doktora, tanszékvezető főiskolai tanár. 1992-ben szerzett oklevelet matematika-fizika szakon, 1997-ben informatika szakon, 2003-ban minőségügyi szakirányú továbbképzési szakon, 2013-ban gépészmérnöki szakon a Debreceni Egyetemen. 1992-től oktat a Debreceni Egyetem Műszaki Karán, tárgyfelelőse és előadója – többek között – a gépészmérnöki alapszak Diagnosztika tárgyának, valamint az angol nyelvű gépészmérnöki képzésben a Diagnostics és a Maintenance Engineering tárgyaknak.



Deák Krisztián, tanársegéd. 2003-ban szerzett gépészmérnöki és mérnöktanári oklevelet a Debreceni Egyetemen. 2011-ben környezetmérnöki MSc oklevelet szerzett, jelenleg az Informatikai Tudományok Doktori Iskolában végzi PhD, a Miskolci Egyetemen gépészmérnöki MSc tanulmányait. Kutatási területe a jelfeldolgozás, zaj- és rezgésdiagnosztika, neurális hálók és neurofuzzy rendszerek. Több éves oktatási tapasztalattal a diagnosztika, mechanika, mechanikai rendszerek dinamikája (MSc) tárgyak és Mechanical Engineering BSc szakon a Machine Repairing tárgy oktatója. 8 éves ipari tapasztalattal rendelkezik a gépészeti tervezés, gyártásirányítás, karbantartás területein, később fejlesztőmérnökként tevékenykedett. A Magyar Mérnöki Kamara és a Gépipari Tudományos Egyesület tagja.



Szabó Tamás 2004-ben végezte a Debreceni Egyetem Műszaki Főiskolai Karán a Műszaki Manager szakot. 2003 májusa óta az FAG Magyarország munkavállalója karrierje első időszakában TPM-mel foglalkozott, később az egyik gyártó szegmens termelőgépeinek karbantartásáért felelt majd a gyár Karbantartás vezetője lett, 2010 januárjától pedig a gyár Műszaki Szolgálat Vezetője. Ebben a funkciójában a felelősségi körébe tartozik a gyár termelő és ellátó berendezéseinek karbantartásának irányítása, szerszámgyártás és szerszám management terület vezetése. A Schaeffler konszern központi karbantartásával közös projekteken keresztül különböző Condition Monitoring eljárások és folyamatok kidolgozásában és bevezetésében vesz részt.



Kvasz Richárd 2011-ben szerezte meg a Debreceni Egyetem Műszaki Karán a gépészmérnöki oklevelet Üzemeltető-karbantartó szakirányon, de már 2010-ben az FAG Magyarország Ipari Kft. munkavállalója lett először mechanikus karbantartó, majd karbantartó mérnöki munkakörben. Jelenlegi feladata az állapot orientált karbantartás folyamatának koordinálása illetve az ehhez kapcsolódó gépállapot felméréseket és gépdiagnosztikát végzi. A németországi Herzogenrathban az FAG Industrial Service GmbH. központjában végezte el az offline és online Rezgésdiagnosztika képzés különböző fokozatait.



1 A MÉRÉS SZEREPE A GÉPÉSZETI RENDSZEREK ÜZEMELTETÉSÉBEN ÉS KARBANTARTÁSÁBAN

1.1 Az üzemeltetési és karbantartási rendszerek fejlődése

Az ipari termelésnek a második világháború utáni története az üzleti hatékonyság növelésének története. Az elmúlt hatvan év során a tömeggyártás termelékenysége rendkívüli mértékben megnövekedett. A termelékenység növekedése mögött a vállalatok üzleti folyamatainak jelentős átalakulása áll, beleértve a tervezési, gyártási, üzemeltetési, kereskedelmi és a gazdasági-pénzügyi területeket.

A termelékenység növekedésének fő mozgatórugója hosszú ideig a technológia folyamatos fejlődése, új anyagok, eljárások alkalmazása volt, de a 20. század utolsó évtizedeire világossá vált, hogy a műszaki fejlesztések csak a gazdálkodó szervezetek működésének optimalizálásával eredményeznek üzleti sikert. Így a termelési folyamatok átszervezése, a dolgozók szerepének átalakulása, a minőség új értelmezése, a vevői elvárások középpontba állítása, a főleges tevékenységek, készletek, várakozások felszámolása, és általában a folyamatos fejlesztés került előtérbe. A kiélezett versenyben azok a vállalatok lehetnek sikeresek a világpiacon, melyek működésük minden elemében aktívan alkalmazzák a hatékonyság növelésének eszközeit, és ezáltal képessé válnak a vevői igények gyors, pontos és jó minőségű kiszolgálására. Az elmúlt évtizedek során számos módszer alakult ki a folyamatos fejlesztés gyakorlati megvalósítására, melyek megfogalmazása és sikerre vezetése általában konkrét vállalatokhoz köthető (pl. Toyota, Motorola, Du Pont, ABB, General Electric, Denso), de a hatékony eszközök idővel általánosan elterjedtek. Ma Magyarországon a lean és a 6σ („six sigma”) eszközrendszerének és „filozófiájának” terjedése tapasztalható, egyre több vállalat törekszik a tevékenységének lean alapú átszervezésére.

A termékek minőségével és a vevők kiszolgálásával kapcsolatos elvárások és az ezek hatására bekövetkezett üzemszervezési módszerek változásával folyamatosan változott a termelésre és általában az üzleti folyamatokra vonatkozó információk iránti igény. Az első minőségellenőrzési módszerek bevezetése óta folyamatosan növekszik a begyűjtött és feldolgozott adatok köre és mennyisége. Az igények mellett mindig a mérés-technika aktuális színvonala határozta meg, hogy mit, milyen időközönként, milyen pontossággal mértek. Ezen a téren a gyors processzorokra, a nagy kapacitású tárolókra és átviteli eszközökre épülő digitális mérés-technika megjelenése hozta a robbanásszerű változást. Ma már elmondható, hogy a korszerű eszközök gyakorlatilag korlátlan mennyiségű adatot képesek szolgáltatni a műszaki rendszerekről, így a hangsúly és a fejlesztési lehetőség az adatfeldolgozás módjára helyeződött, a műszaki diagnosztika és az állapotfelügyelet tökéletesítésének lehetősége az új, kifinomultabb adatelemzési módszerek kidolgozásában van.

Meghibásodásig tartó üzemeltetés

Az üzemeltetés-karbantartás történetét tekintve az 1950-es évekig tartó korszakot szokás a „meghibásodásig tartó üzemeltetés” megnevezéssel illetni (az angol nyelvű irodalomban run-to-failure maintenance). Erre az jellemző, hogy a gépeket a beüzemelés után minimális gondozás mellett üzemeltették, nem fordítottak különös gondot az előállított termékek minőségére, ezt a gép jellemzőjének tekintették. A visszajelzés ebben az időszakban a



vevőktől jött, és csak ennek hatására indult be a korrekciós folyamat (pl. termék cseréje). A „meghibásodásig tartó üzemeltetés” korszakában diagnosztikai célú mérésekről nem lehet beszélni, az üzemeltető gépkezelő tapasztalatán múlt a beavatkozás, az „állapotfelmérés” a gépkezelő érzékszervein keresztül bejövő információkon alapult. Ennek korlátozott volta miatt a beavatkozás jellemzően a váratlan gépleállásokhoz kötődött valamely alkatrész tönkremenetele miatt. Ezt a felfogást jellemzi a „ha nem romlott el, akkor ne javítsd meg” („If it ain't broke, don't fix it”) gondolat.

A második világháború előtti és alatti ipari termelésre az anyag, energia és munkaerő bősége, a piaci verseny alacsony szintje volt jellemző, ami a termékek magas piaci árszintje mellett lehetővé tette, hogy – a mai szemmel nézve – nagyon alacsony hatékonysággal is kifizetődő legyen a termelés, a termelő gépek meghibásodásig való üzemeltetése nem okozott gondot a bőségesen rendelkezésre álló tartalék idő, és a jelentős alapanyag és tartalék alkatrész raktárkészlet miatt.

A tömegtermelés és a piaci verseny kialakulása

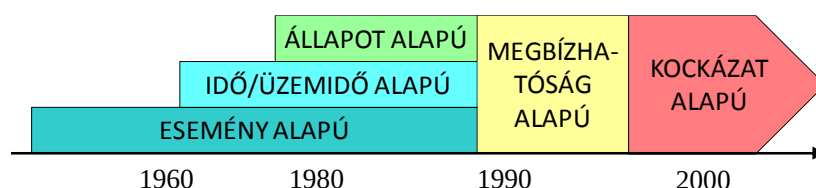
Az 1960-as évekre a „nyugati világ” iparában gyökeres változás következett be. A világháború igényei által felfuttatott ipari termelés következtében jelentős új kapacitások jöttek létre, új technológiák váltak ismertté, melyek a hadiipari megrendelések csökkenése után a polgári fogyasztás kiszolgálására álltak át a korábbi keresleti piac helyett kínálati piacot teremtve. Elindult a vevőkért folyó küzdelem, ami azóta meghatározza az ipari termelést. A versenytársaknál jobb ár-érték arány elérése a hatékonyság folyamatos növelését igényelte, ami a technológiai és szervezeti fejlesztések mozgatórugója volt az utóbbi fél évszázadban.

Az 1980-as évektől kezdődően a technológiai fejlesztéssel egyenrangú szerepet kapott a termelésszervezési, termelésirányítási, minőségügyi, szervezetfejlesztési módszerek kidolgozása és bevezetése, miután nyilvánvalóvá vált, hogy a kizárólag a műszaki problémák kezelésére koncentrált szemlélet nem képes a kívánt minőségi és termelékenységi szintet biztosítani. Az üzemeltetési-karbantartási tevékenység szerepe, megítélése, a szervezetben elfoglalt helye megváltozott, a korszerű vállalatirányításban a gépek, termelőeszközök rendelkezésre állását biztosító szervezeti egységeket az értékteremtés egyenrangú részeseinek tekintik, a karbantartás a termelési folyamatban költségtényezőből erőforrássá lépett elő, fejlesztése a vállalati stratégia részévé vált. A szerep megváltozása az eszközök, erőforrások, a feladatok, felelősségi körök módosulásával járt.

Az 1.1 ábra a műszaki rendszerek üzemeltetési elvének változását mutatja. Látható a hangsúlyeltolódás a tisztán műszaki szempontoktól az üzleti (és részben társadalmi) szempontok felé. Az üzleti profit növelését célzó technológiai fejlesztések az ipari termeléshez kapcsolódó kockázatok – általában pénzben is kifejezhető – növekedésével járt, így a kockázatok elemzése, kezelése az üzleti tervezés kritikus elemévé vált.

A piaci elvárások (a megfelelő minőségi és kiszolgálási színvonal mellett az alacsony árak) a termelékenység folyamatos és gyors növelését kényszerítették ki. A megnövekedett terhelés, a kiélezett teljesítménykövetelmények, a tartalék erőforrások hiánya és a közben egyre szigorodó munkavédelmi, környezetvédelmi és felelősségi követelmények kritikussá tették a megbízhatóság kérdését.

A kiélezett üzemeltetési viszonyok a meghibásodások számának növekedését eredményezik, amennyiben nem történnek hatékony intézkedések ezek megelőzésére. A meghibásodások, nem tervezett leállások jelentős veszteséggel járhatnak egyrészt a termelésekiesés, másrészt a meghibásodások okozta balesetek, károk, környezetszennyezés miatt jelentkező kártérítési kötelezettségek, büntetések miatt. A potenciálisan fellépő meghibásodások (és az ezek következtében fellépő veszteségek) elkerülése az üzleti siker egyik meghatározó elemévé vált az termelő vállalatoknál, ami megteremtette a műszaki diagnosztika fejlesztésének pénzügyi hátterét.



1.1 ábra: Az üzemszervezési szempontok változása.

A karbantartási tevékenységek (beavatkozások) időzítése szempontjából három alapvető módszert lehet megkülönböztetni, ezek a megjelenés sorrendjében:

- esemény alapú beavatkozás;
- idő/üzemóra/teljesítmény alapú beavatkozás;
- állapotfelmérésen alapuló beavatkozás.

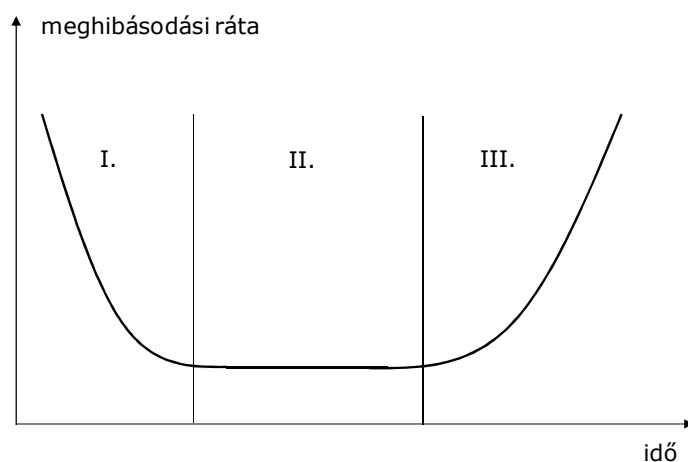
Az esemény alapú üzemeltetési munkaszervezést meghibásodásig tartó üzemeltetésnek is szokás nevezni, ahogyan azt már korábban említettük. Ebben a rendszerben a gépeket a gépkezelő üzemelteti és meghibásodás esetén javítja. Ez a megoldás idő- és erőforrás-igényes, alacsony termelékenységet biztosít, és a termékek minőségének nagymértékű ingadozásával, ehhez kapcsolódóan jelentős veszteségekkel jár. A meghibásodások váratlanul következnek be, a helyreállítási idő általában hosszú, így a meghibásodások következménye jelentős termelésekiesés. A hiba miatti hosszú állásidő csökkentése érdekében nagy készletet kell tartani tartalék alkatrészekből, ami szintén költséges.

Tervszerű megelőző karbantartás

A műszaki adatok első tervszerű gyűjtése és elemzése a tervszerű megelőző karbantartáshoz kötődik. Miután nyilvánvaló vált, hogy a meghibásodásig tartó üzemeltetés koncepció üzletileg tarthatatlan, és a hibák megelőzésére intézkedéseket kell hozni, elkezdődött az üzemekben nagy számban használt tipikus gépek működési, meghibásodási adatainak statisztikai elemzése. Jelentős számú gép üzemeltetése során szerzett tapasztalatok alapján karbantartási terveket kezdtek készíteni, statisztikai alapon ciklikus felülvizsgálatokat, alkatrész cseréket, felújításokat írtak elő. A tervszerű megelőző karbantartás célja, hogy ütemezett karbantartási tevékenységekkel biztosítsák a gépek rendelkezésre állását, a lehető legkisebbre csökkentsék a váratlan meghibásodások számát, emellett a tervezett leállások időtartamát a lehető legrövidebbre csökkentsék. Mivel a tevékenységek itt idő vagy üzemóra/teljesítmény alapján vannak ütemezve, merev ciklusú

karbantartásként is emlegetjük. A tervszerű megelőző karbantartás sikeresen alkalmazható olyan műszaki rendszerek esetén, ahol sok hasonló gépet működtetnek hosszú ideig (akár évtizedekig), de a folyamatosan megújuló géppark, illetve az egyedi berendezések karbantartásában kevésbé hatékony. A merev ciklusú karbantartási tevékenységek sok esetben a gyártói előírások alapján szerveződnek (ez a garanciavállalás feltétele is lehet).

A tervszerű megelőző karbantartás ciklusainak meghatározása a gépekre, alkatrészekre vonatkozó meghibásodási ráta függvényen alapszik. Ezt a függvényt általában „kádgörbe” néven szokták emlegetni a függvénygörbe jellegzetes alakja miatt (1.2 ábra). Adott időpontban meghibásodási ráta azt fejezi ki, hogy a következő egységnyi idő alatt mennyi a meghibásodás valószínűsége (vagy másképpen fogalmazva: az adott időpontban működőképes alkatrészek milyen arányban hibásodnak meg a következő egységnyi idő alatt).



1.2 ábra: Meghibásodási ráta függvény („kádgörbe”).

Egy termék életciklusa a klasszikus kádgörbe forma alapján három jól elkülöníthető szakaszra bontható. Ezek elnevezése nem egységes a szakirodalomban.

Az I. szakaszban jelentkeznek a kezdeti meghibásodások, melyek valamilyen jól körülírható okra vezethetők vissza (anyaghiba, gyártási hiba, beállítási probléma, sérülés, stb.). Ezek a meghibásodások jó esetben még a termék használatba vétele előtt kiderülnek általában a minőségellenőrzés során, illetve összetett berendezések, gyártógépek esetén a beüzemeléskor vagy a próbaüzem során. Az I. szakaszban időarányosan sok hiba felismerésére kerül sor.

A II. szakasz a normál használat időszaka, amikor a meghibásodási ráta alacsony, nagyjából konstans értéke tapasztalható. Ebben a szakaszban véletlenszerű meghibásodásokról beszélhetünk, ahol a hibák gyakorisága részben a termék tulajdonságaitól, részben az üzemeltetés, használat körülményeitől függ. A II. szakasz nevezhető a termék tervezett élettartamának, hiszen az élettartamot leginkább a tervezéskor rögzített minőségi jellemzők határozzák meg.



A III. szakaszban a termék már elhasználódott, túlélte a tervezett élettartamát. Az elhasználódás következtében folyamatosan növekszik a meghibásodási ráta értéke.

A ciklusidők meghatározásának alapgondolata az, hogy a váratlan meghibásodások elkerülése érdekében a III. szakasz kezdete előtt kell beavatkozni, és felújítást vagy cserét kell alkalmazni.

A módszer jelentős korlátokkal bír:

1. Az 1.2 ábrán vázolt klasszikus alak csak illusztráció, a görbe alakja termékenként jelentősen változik, számos kádgörbe alakot írtak le a kapcsolódó szakirodalomban. Minél pontosabb elemzést végeztek, annál bonyolultabbá vált a kádgörbe mintázatok rendszere.
2. Az élettartam-vizsgálatok meghatározott körülmények közt zajlottak, ezért nem adtak pontos képet a valóságos üzemi körülmények között, valóságos terhelés mellett történő elhasználódási folyamatról.
3. Csak tömegesen használt gépek, berendezések esetén lehetett használható, gyakorlati jelentőséggel bíró élettartam-adatokat nyerni.

Bár a karbantartási tevékenységeknek az időhöz, üzemórához (vagy más, a használat mértékét jellemző mennyiséghez) kötése jelentős előrelépést jelentett a korábbiakhoz képest, jelentős hiányossága (a fent említett korlátjai miatt), hogy sok esetben indokolatlan beavatkozást ír elő, gyakran előfordul, hogy még jelentős élettartam-tartalékkal rendelkező alkatrészeket (pl. csapágyakat) cserélnek ki fölösleges költségeket okozva. Ráadásul minden beavatkozás növeli a további meghibásodás esélyét („jól működő géphez lehetőség szerint ne nyúljunk”), így a fölösleges alkatrészcsere gyakran még ront is a gép állapotán.

Mivel az üzemeltetés konkrét körülményeit általában nem veszi figyelembe, a merev ciklusú karbantartás a jelentős ráfordítás ellenére sem képes biztosítani általában a megbízhatóság, illetve a rendelkezésre állás magas szintjét.

A tervszerű megelőző karbantartási rendszer egyik jelentősége abban áll, hogy az elméleti háttérnek kidolgozása elindította az üzemeltetési folyamatokhoz kapcsolódó adatgyűjtést, mérést és elemzést, ami a későbbiekben tovább fejlődhetett a gépek egyedi vizsgálata irányában.

A merev ciklusú karbantartási módszer évtizedeken keresztül meghatározó volt, és sok üzemben még mai is ez a meghatározó. A korszerű karbantartási mixekben a közepes fontosságú berendezések üzemeltetésének tipikus módszere.

Állapotfüggő karbantartás, a műszaki diagnosztika térhódítása

A tervszerű megelőző karbantartási rendszer hiányosságai miatt a megbízhatósági követelmények teljesítése a gépek vizsgálatának pontosabb és testreszabott módszereit igényelte, ami a műszaki diagnosztika eszközkészletének máig tartó töretlen fejlődéséhez vezetett.

A diagnosztikai módszerek célja a gépek állapotának minél pontosabb megállapítása lehetőleg működés közben (leállítással és szétbontással nélkül). Az állapotfelmérés a karbantartási döntések előkészítésének és megalapozásának eszköze. Főbb módszerei (pl. a rezgésdiagnosztika, az akusztika, a termográfia, az olajvizsgálatok) a meghibásodásokkal összefüggésbe hozható mérhető mennyiségek (rezgés, hőmérséklet-eloszlás, részecske-



eloszlás) mérésén, valamint a hibák és „szimptómák” kapcsolatának felismerésén alapszik. A méréssel adott gép vagy gépelem adott időpontbeli állapotát tudjuk rögzíteni, és a diagnózis alapján meghatározni a „terápiát”.

Az állapotfelügyelet célja a károsodás megelőzése, a korai jelek érzékelése és a beavatkozás elindítása. A korszerű diagnosztika hatékonyságát a gyors és pontos diagnózis adja. A telepített érzékelőket tartalmazó online rendszerek alkalmasak a folyamatos megfigyelésre, adatrögzítésre és figyelmeztetésre, ezen túl a szakértő számára bárhol és bármikor rendelkezésre állnak az aktuális mért értékek.

Mivel az állapotfelügyelet, különösen az online rendszerek telepítése meglehetősen költséges, az alkalmazás előtt megtérülési számítást célszerű végezni. A diagnosztikai beruházás vagy diagnosztikai szolgáltatás megrendelése általában csak a kulcsfontosságú berendezések esetén térül meg, melyeknek akár egyetlen meghibásodása több veszteséggel jár, mint a diagnosztika költsége. Egy üzemben belül az állapotfelügyelet mellett mindig jelen van a merev ciklusú, tervszerű megelőző karbantartás, és a meghibásodásokhoz kötődő karbantartás is. A termelésben a gyártási folyamat elvárt megbízhatósági szintjének biztosításához a berendezéseket be kell sorolni a kulcsfontosságú / jelentős / átlagos / alárendelt szerepű gépek kategóriájába, és ennek megfelelően kell meghatározni az alkalmazott felügyeleti és karbantartási módszert.

Az állapotfelmérésen alapuló karbantartás természetes gondolat, mindig is jelen volt a műszaki rendszerek üzemeltetésében, hiszen a gépkezelők nézték, hallgatták, tapintották, szagolták az általuk használt gépeket, és a működtetés során szerzett tapasztalataik alapján diagnosztizálták a gépeket. A kor követelményszintjén megfelelő döntéseket is hoztak a szükséges beavatkozásokról. A beavatkozásokat kellőképpen megalapozó állapotfelméréshez azonban szükség volt a méréstechnika fejlődésére, a gépállapot üzem közbeni pontos felmérése új, kifinomult mérési eljárásokat igényelt.

Fontos különbség a tervszerű megelőző karbantartás és az állapotfelmérésen alapuló karbantartás között az, hogy míg az előbbinél a napi karbantartási feladatokat végző személyek felelőssége addig tejed, hogy az előírt műveleteket időben és szakszerűen elvégezzék, addig állapotfelmérésen alapuló karbantartás során folyamatosan adódnak döntési helyzetek, melyek felelősséggel járnak. Ha például a csapágydiagnosztika hibát jelez, akkor arra reagálni kell: döntení arról, hogy be kell-e avatkozni (leállítás, teljesítménycsökkentés), vagy nem. Ebben a helyzetben az is döntés, hogy az adott pillanatban semmit sem kell még tenni. Egy gyártósor, ellátó, szolgáltató rendszer leállításának súlyos pénzügyi következményei lehetnek a folyamat jellegétől függően (alapanyagok tönkremenetele, újraindítási költség, termelés kiesés), de az üzem közbeni váratlan leállítás is jelentős veszteséggel járhat (tönkrement alkatrész vagy gép, baleset, környezetszennyezés). Így a tévedés (akár a fölösleges leállítás, akár az indokolt leállítás elmaradása) nagy veszteséget okozhat a vállalatnak. Az állapotfelmérésen alapuló karbantartásban rejlő költségmegtakarítás érdekében a diagnosztikai szakembereknek és a felelős üzemeltető, karbantartó vezetőknek el kell fogadni, hogy a döntési kényszer folyamatosan jelen van.



Az üzemeltetés szervezeti és irányítási módszereinek fejlődése

A fentiekben bemutatott módszerek tisztán technikai megfontolásokon alapulnak, célnak a gépek működőképességének, rendelkezésre állásának biztosítását tekintik. Az ipari termelés fejlődése során azonban a berendezések, folyamatok összetettsége jelentősen megnövekedett, továbbá a termelékenységi követelmények drasztikusan megemelkedtek, és egy ponton túl a termelési folyamat magas szintű megbízhatóságának garantálása nem volt teljesíthető a hagyományos karbantartási módszerekkel.

A veszteségeknek a lehető legalacsonyabb (ideálisan nulla) szintre való csökkentésének igénye a folyamatok szervezeti szintű összehangolását, egységes irányítási szemlélet érvényesítését követeli meg, melyben az üzemeltetési és karbantartási tevékenység az értékteremtő folyamat része, a karbantartási stratégia a vállalati stratégia egy alkotóeleme. Ebben a rendszerben a karbantartási tevékenység ütemezését csak részben határozzák meg a műszaki szempontok, a döntésekben figyelembe veszik a vállalat üzleti tervét, az aktuális piaci helyzetét, a termékváltást, az új beruházásokat.

A korszerű megközelítésekben nem az egyes gépek állapotát, rendelkezésre állását, hanem a folyamatok megbízhatóságát hangsúlyozzák. Jellegzetes példa erre a megbízhatóság-központú karbantartás (RCM), melynek célja annak biztosítása, hogy az eszközök teljesíteni tudják az aktuális folyamat szempontjából fontos funkcióikat, míg a többi, kevésbé fontos funkciók biztosítása kisebb prioritást kap. Az RCM elv a ténylegesen elvárt funkciónak való megfelelést elválasztja a tervezett funkciónak való megfeleléstől. Az RCM-elemzés alapja hét kérdés: Melyek a berendezés funkciói és a kapcsolódó teljesítményparaméterek a jelenlegi működési környezetben? (Funkciók és teljesítményelvárások); Milyen módon hiúsulhatnak meg e funkciók? (Funkcionális hibák); Mi okozhatja az egyes funkcionális hibákat? (Hibamódok); Mi történik akkor, amikor az egyes hibák bekövetkeznek? (Hibahatások); Milyen következményekkel járnak az egyes hibák?; Mit tehetünk az egyes hibák megelőzéséért?; Mit tehetünk akkor, ha valamely hibára nem találunk megelőzési módot? Az RCM igen költséges, és csak ott célszerű alkalmazni, ahol bonyolult, magas szinten automatizált rendszerek működnek viszonylag állandó módon, gyorsan változó eszközpark és folyamatosan változó termelési programok esetén általában nem térül meg.

Korszerű termelő vállalatok ma már nem működhetnek vállalati (vezetői) információs rendszer nélkül. A folyamatok tervezése, irányítása sok és sok szempontból feldolgozott adatot igényel, ráadásul gyorsan. Az üzemeltetési-karbantartási tevékenységek szervezését az ún. számítógépes karbantartás-irányítási rendszerek (CMMS) támogatják, melyek tartalmazzák a működés (beszerzés, anyagok, eszközök raktárkészlete, alkatrész cserék, beavatkozások, stb.) adatait és a diagnosztikai mérések eredményeit. A CMMS rendszer lehet a vállalati információs rendszer (pl. SAP) része, de lehet attól függetlenül működő is, más szempontból tekintve lehet valamely kereskedelmi forgalomban beszerezhető rendszer adaptációja a szervezetre, de lehet egyedileg kifejlesztett szoftver is.

A CMMS rendszerek hatékonysága az adatgyűjtés átgondoltságán, az adatokból leszűrt információknak az érintettek számára való megfelelő prezentálásán alapszik. Például hiába van telepítve online megfigyelő rendszer egy gépre, ha a gép állapotaért felelős személy nem kap azonnal információt egy probléma megjelenéséről (ha egy hiba azonnali leállítást követel, akkor hiába nézzük meg az adatokat egy óra múlva, mikor a károsodás már bekövetkezett).



A CMMS rendszerben adminisztrálható a karbantartási tevékenység és mérhető a karbantartás teljesítménye.

1.2 A műszaki diagnosztika alapadatai

A műszaki diagnosztika feladata a gépek, berendezések állapotát leíró adatok és elemzések szolgáltatása a karbantartási rendszer számára. Ehhez az elméleti (matematikai, fizikai) alapok régóta rendelkezésre álltak, de a gyakorlati diagnosztika lehetőségeit a mérés technikai háttér aktuális fejlettsége és az eszközök elérhetősége határozta meg. A hatékony munka lehetőségét a digitális technika fejlődése teremtette meg, lehetővé téve a gyors mintavételezést és tárolást, majd a nagymennyiségű adat feldolgozását, ami analóg eszközökkel nem volt kivitelezhető.

Az állapotfelmérés alapja a megfelelően megtervezett, megfelelő eszközzel végrehajtott mintavételezés (mérés). A vizsgálat céljától, a szimptóma jellegzetességeitől függ, hogy milyen mérési tartomány, mérési pontosság, a számbázis pontosság, mintavételezési frekvencia, stb. szükséges. Egy rezgésdiagnosztikai vizsgálat során például egészen mások a mérőeszközzel szembeni elvárások egy viszonylag nagy tömegű forgó alkatrész kiegyensúlyozatlanságának vizsgálatakor, mint egy csapágy sérüléseiből adódó kis energiájú rezgések mérésekor. Az előbbihez elegendő egy gyorsulás szenzor és egy egyszerű kézi mérőeszköz, míg a csapágyvizsgálathoz speciális szenzor és jelfeldolgozó elektronika szükséges.

Nagy pontossági igényű mérések esetén szükség lehet ún. mérőrendszer elemzésre. A diagnosztikai vizsgálatokban általában nagy jelentősége van az időbeliségnek, sokszor egy mérés alapján nem is lehet ítéletet alkotni, mert a paraméterek időbeli megváltozása hordozza az információt. Telepített érzékelők esetén viszonylag egyszerűen megvalósul az ismételhetség követelménye, de ha minden mérés esetén újra rögzíteni kell az érzékelőt, akkor kérdéses, hogy azonos körülmények biztosíthatók-e. Például rezgésméréskor az érzékelők rögzítési módja lényeges (mágneses rögzítés, ragasztás, csavarozás), és külön figyelmet kell fordítani arra, hogy mindig azonos helyen és azonos irányban legyen elhelyezve érzékelő. A hőkamerás vizsgálatoknál is felvetődik a különböző időpontokban készített felvételek összevetésének kérdése, mivel a kamerák által mutatott hőmérséklet érték függ a vizsgált felület aktuális emissziós értékétől, illetve a környezettől (pl. sugárzó test jelenléte a közelben).

Az értékelés alapját részben a mért fizikai mennyiségek (pl. rezgéssebesség), részben az ezekből transzformációkkal kapott adatok (pl. rezgés spektrum) képezik. A rezgéselemzés témakörben időtartománybeli vizsgálatról (eredetileg mért adatok) és frekvenciatartománybeli vizsgálatról (transzformált adatok) beszélünk. A diagnosztikában, ahogyan a több más műszaki területen is, egyes lényeges információkhoz úgy jutunk, hogy a rögzített jelet valamilyen célszerűen megválasztott típusú összetevőkre bontjuk. Ezt az igen gyakran és széles körben alkalmazott eljárást spektrumanalízisnek nevezzük. A spektrumanalízis klasszikus problémája a hullámok harmonikus hullámkomponensekre való felbontásával foglalkozik, a rezgéselemzésben és az akusztikai vizsgálatokban is lényegében ez történik. A felbontásra azonban számos elméleti lehetőség van, a hatékony módszer kiválasztása sokszor az adott területen összegyűlt tapasztalaton múlik.



Mivel a korszerű mérőrendszerek mintavételezéssel diszkrét jelsorozatokot állítanak elő és tárolnak, a jelfeldolgozásra is ún. diszkrét transzformációkat kell alkalmazni. A digitális jelfeldolgozás során számos problémával kell megküzdeni, melyek abból erednek, hogy a mintavételezés időtartama véges, és mintavételezéssel a mért mennyiségnek véges számú értékét tudjuk rögzíteni bizonyos „diszkrét” időpillanatokban, miközben a „pontos” spektrum megállapításához egy periódusnyi intervallum (ami lehet akár a teljes időtengely is) minden pontjában ismerni kellene a mennyiség értékét.

A diagnosztikai módszerek közül a rezgésdiagnosztikai vizsgálatok igénylik a legtöbb elméleti ismeretet, ezért az alábbiakban elsősorban ezzel a témakörrel foglalkozunk. Azt is ki lehet jelenten, hogy a rezgésdiagnosztika a legszélesebb körben alkalmazott és általában a legeredményesebb módszer. A rezgésdiagnosztika hatékonyságát többek közt az adja, hogy a legtöbb esetben nem csak a hiba tényét lehet megállapítani, hanem a hiba jellegét is, így a diagnózis további vizsgálat nélkül is alkalmas beavatkozási döntések megalapozására.

Rezgésdiagnosztika megnevezéssel két vizsgálati módszerre is utalunk. Az egyik alapja a géptest periodikus rezgéseit átvevő, a géppel együtt rezgő gyorsulásérzékelőn keresztül mért érték. Ezt a mérési módszert egyszerűen rezgésmérésként emlegetjük. A rezgésmérésnél érdemes hangsúlyozni, hogy az érzékelő által átvett rezgés sok, általában nagyon különböző energiaszintű rezgéskomponens összege. Világos, hogy több nagyságrend energiakülönbséggel jelen lévő komponensek nem „látszanak” egyformán (a nagy energiaszintű jelek „elnyomják” az alacsony energiaszintűeket, miközben egy probléma súlyossága nem feltétlenül függ össze a keltett rezgés energiaszintjével. Például egy több száz kilogrammos forgó alkatrész kismértékű kiegyensúlyozatlansága által keltett normálisnak tekinthető géprezgés energiaszintje nagyságrendekkel nagyobb lehet, mint egy súlyos csapágyhiba vagy fogaskerék-hiba okozta rezgése.

Az alacsony energiaszintű, sokszor ütésszerűen jelentkező gerjesztő hatások kimérése más érzékelőt és feldolgozási módot igényel. Az ütésimpulzus mérésére az SPM cég által kifejlesztett módszer (mérőrendszer) sikeresen alkalmazható számos olyan fontos gépészeti probléma kimutatására, mely alacsony energiaszintű impulzusszerű lökések formájában jelentkeznek: például csapágyak elemeinek felületi sérülései, fogaskerék fogainak sérülései, villamos motorok hibái, frekvenciaváltó működési problémái.

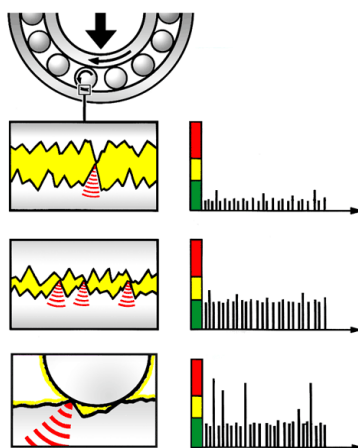
A napjainkban kifejlesztett szakértői rendszerekbe igyekeznek beépíteni a lehető legtöbb formalizált ismeretet, mellyel a rendszer képes felismerni egyes problémákhoz kapcsolódó mintázatokat. A mai fejlesztések részben ebbe az irányba mutatnak: kihasználva a tanuló algoritmusokat, az informatikai rendszerek tanuló képességét, az elemzés egyre több lépését képes átvinni a diagnosztikai rendszer szoftverére. A nagy tudású szoftverek birtokában a diagnosztika munkájában áttolódik a hangsúly az adatelemzés elemi lépéseiről a szoftver által szolgáltatott elemzés felülvizsgálatára, a feltárt rendellenességek okainak meghatározására, annak megítélésére, hogy a rezgésképpen megjelenő eltérés valódi oka lehet-e az, amit a rendszer meghatároz, vagy módosítani kell a diagnózist, esetleg szükség van a rendszer megtanítására egy korábban ismeretlen „szimptóma” helyes értékelésére.

A csapágyak jellegzetes meghibásodásai keltette alacsony energiaszintű rezgések mérése a rezgésdiagnosztika talán legjelentősebb feladata, ha a csapágyak szerepét, illetve a csapágytörések, beégések következtében előálló problémák súlyosságát tekintjük. A

futófelületek, gördülőelemek sérülései a csapágy geometriájától és a tengely fordulatszámától függő gyakorisággal (frekvenciával) lökeshullámok indulnak a géptest anyagában, és a geometria valamint anyagjellemzők által meghatározott hullámfrekvenciával terjednek. Ezeknek a lökésimpulzusoknak a mérése teremtette meg a lehetőségét a hatékony csapágydiagnosztikának. Az SPM Instrument speciális szenzort, mérő elektronikát és szoftvert fejlesztett ki a lökésimpulzusok detektálására (Shock Pulse Method), és erre alapozza a csapágyak állapotának felmérését (csapágyon belüli felületi sérülések, kenés). A lökésimpulzus-mérés esetén a speciális (32 kHz frekvenciára hangolt) szenzor érzékeli a mérőponthoz érkező hullámot és annak energiaszintjét.

A mért lökésimpulzus értékeket az időtartományban megjelenítve (1.3 ábra) vizuálisan is levonhatók következtetések. Az ábrán egy lökésimpulzusnak a megfelelő időpillanathoz rendelt vonal felel meg, a vonalak magassága az energiaszinttel arányos, a környezetükből kiemelkedő vonalak egy-egy nagyobb sérülésből eredő nagyobb ütésre utalnak. A vonalak „sűrűsége” arra utal, hogy a kiváltó hatás időegység alatt hányszor következik be, mennyi a „frekvenciája”. Pontos számszerű megállapításokat a gyakoriságok statisztikai elemzésével kaphatunk.

A csapágyak állapotának jellemzéséhez két fontos értéket kell meghatároznunk. Az egyik az ép felületek érintkezésekor jelentkező nagyon gyakori kis impulzusok szintje, amit szokás szőnyegszintnek is nevezni (carpet level). Ez a kenőfilm-réteg vastagságával és az alkalmazott kenőanyag megfelelőségével függ össze, mivel minél tökéletesebb a kenés, annál kevésbé érnek össze a felületek kiugró részei, annál kisebb lökésimpulzusok keletkeznek. A másik a ritkábban, de rendszeresen jelentkező, nagyobb vonalak szintje. Ezek jelenléte felületi sérülésekre utal, és annál nagyobbra, minél inkább kiemelkednek ezek a vonalak a szőnyegszintből.



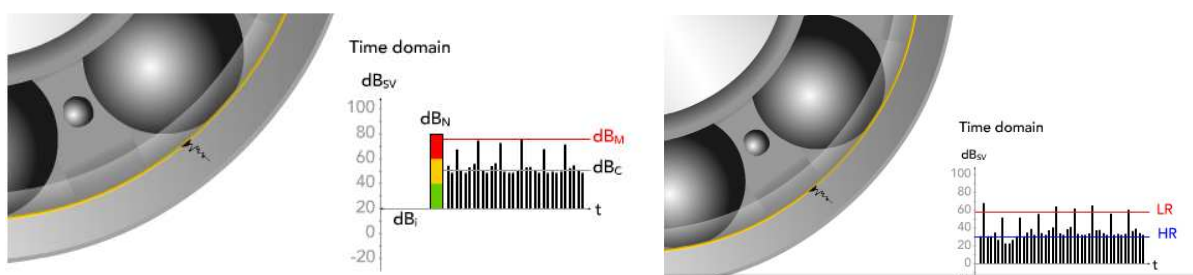
1.3 ábra: A lökésimpulzusok alakulása a nem megfelelő kenés és felületi sérülések esetén.

forrás: [1]

A dBm/dBc mérési módszer szőnyegszintnek (dBc) azt a legnagyobb értéket tekintjük, mely feletti értékkel másodpercenként legalább 200 impulzus fordul elő. A dBm szint a legnagyobb érték, mely feletti értékkel legalább 2 másodpercenként érkezik impulzus (azaz

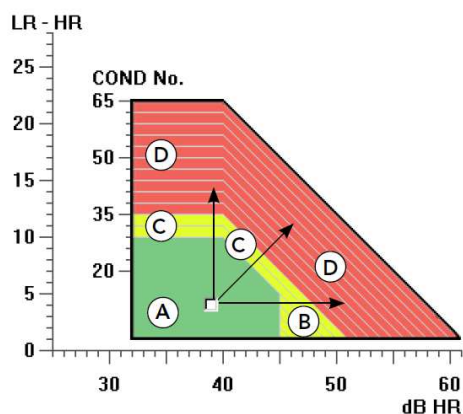
másodpercenként legalább 0,5 lökés fordul elő). A fentiek szerint a csapágó állapotát a dBc szint és a dBm-dBc különbség jellemzi.

A LR/HR mérési módszer esetén rögzítjük azt a legnagyobb értéket, mely feletti értékkel másodpercenként legalább 1000 lökés fordul elő, ez a HR érték (high rate of occurrence), és azt a legnagyobb értéket, mely feletti értékkel másodpercenként legalább 40 lökés fordul elő, ez az LR szint (low rate of occurrence). A csapágó állapotát itt a HR szint és az LR-HR különbség jellemzi.



1.4 ábra: A dBc/dBm és az LR/HR értékek értelmezése.

forrás: [1]



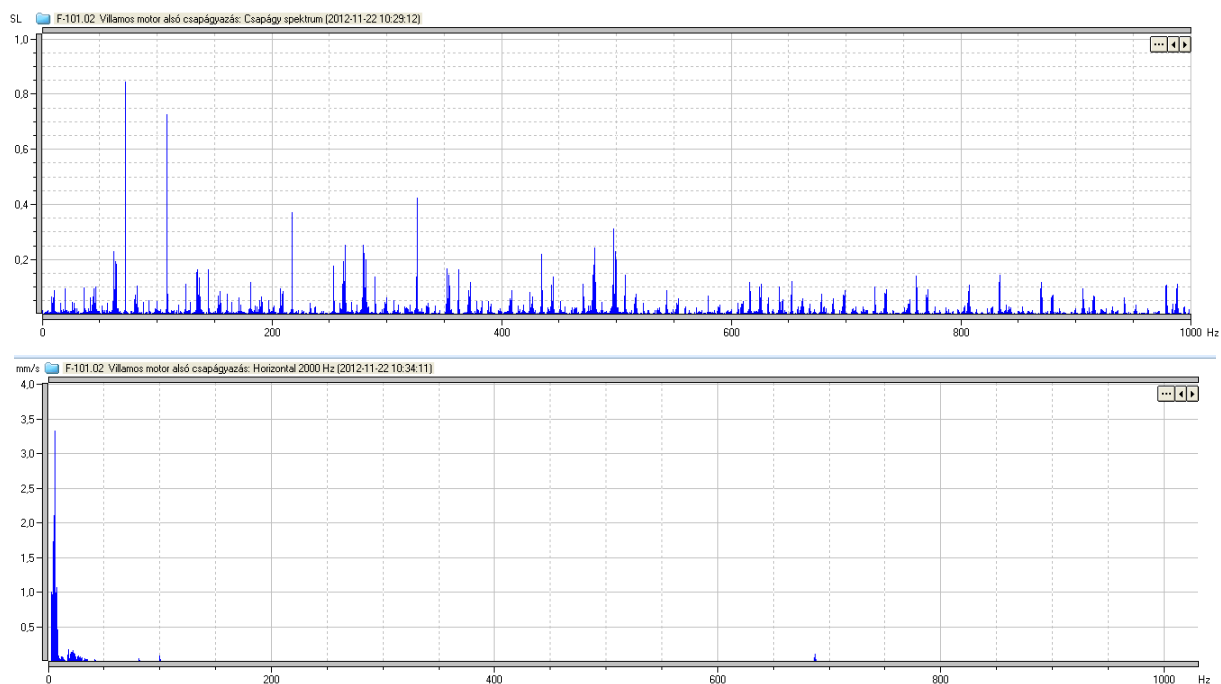
1.5 ábra: A HR és az LR-HR értékek megjelenítése.

forrás: [1]

A gépállapotról pontos képet a rezgésjel felbontásával kaphatunk, mivel a meghibásodások az általuk keltett jellegzetes frekvencia, vagy frekvencia-mintázat alapján azonosíthatók. Frekvenciaspektrum rezgésmérésből és lökésimpulzus-mérésből is származtatható. A mérés elvének különbözőségéből adódóan azonban a spektrumban megjelenő „amplitúdók” különböznek. Míg a rezgésmérés a nagy energiaszintű, általában az alacsony frekvenciatartományba tartozó jelekre érzékeny (ezek a gépelemek fordulatszámának megfelelő frekvenciák, vagy azok néhányszorosai), és így a nagyfrekvenciás, kis energiaszintű jelek nehezen azonosíthatók (1.6 ábra), addig a lökésimpulzus-mérés éppen az utóbbiakat emeli ki. A kiegyensúlyozatlanságból, görbült tengelyből, tengelykapcsoló

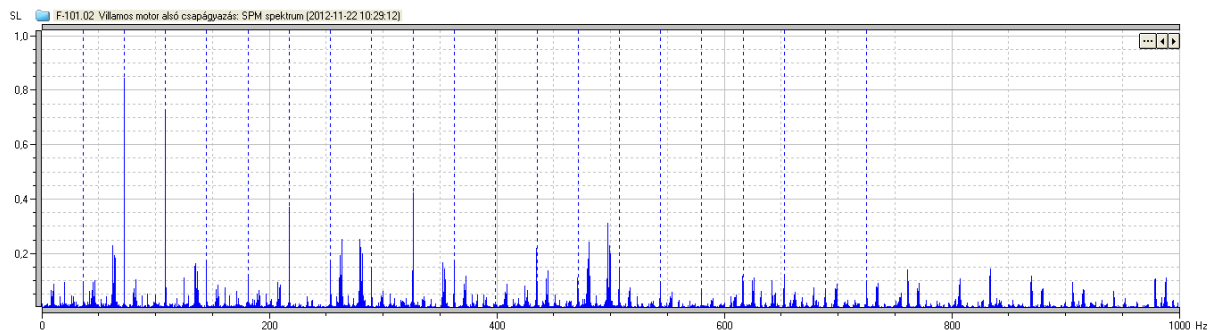
beállítási hibákból, lazaságból adódó alacsony frekvenciás rezgések megjelennek a lökésimpulzus-mérésből származó spektrumban is, de nem kiugró szinten.

Az „SPM spektrum” alkalmas igazán a nagyfrekvenciás csapágyrezgések detektálására, a szimptómák (mintázatok) azonosítására. Az 1.6 ábrán látható, hogy ugyanazon a mérőponton felvett SPM spektrum és rezgésspektrum nagyon eltér egymástól.



1.6 ábra: Egy mérőponton felvett SPM spektrum és rezgésspektrum.

A csapágyakból származó lökésimpulzusok nem csak a csapágyhibákból eredhetnek, hiszen a csapágyak a funkciójukból adódóan átveszik a kapcsolódó tengelyből és a géptestből származó rezgéseket. Speciális alkalmazásként említhető egy nagy teljesítményű, frekvenciaváltóval vezérelt villamos motor vizsgálata, ahol a frekvenciaváltó áramának hibája (a tisztán szinuszosztól való eltérése) a motor egyenetlen járását („rángatását”) eredményezte. Az 1.7 ábrán látható, hogy a „frekvenciaváltó probléma szimptóma” tisztán megjelenik az SPM spektrumban, a probléma egyértelműen azonosítható.



1.7 ábra: A „frekvenciaváltó probléma” szimptóma megjelenése villamos motor csapágyának SPM spektrumában.

FELHASZNÁLT SZAKIRODALOM

- [1] Leonova Infinity Infinity User Guide, SPM Instrument 71792B jelű kiadvány

2 STATISZTIKAI ESZKÖZÖK A TERMELESI FOLYAMATOK ÉS A GÉPÁLLAPOT LEÍRÁSÁBAN

2.1 A leíró statisztika eszközei az adatelemzésben

A korszerű diagnosztikai módszerek az adatfeldolgozásra épülnek. A feldolgozás egyrészt az „eredeti” adatok statisztikai elemzését, másrészt az adatok célszerű transzformációját jelenti.

Elsősorban a rezgésdiagnosztikában jelenik meg a felhasználó számára is látványosan az adatelemzés eredménye, a szakértői munka alapja éppen ezeknek az eredményeknek az értelmezése.

A rezgésjel időtartománybeli vizsgálata számos statisztikai jellemző meghatározását jelenti. Egyes jellemzők a rezgés „erősségével” vannak összefüggésben (átlagértékek, terjedelmek, csúcsértékek). Más esetekben azt használjuk ki, hogy a hibás állapothoz tartozó statisztikai jellemzők szignifikáns eltérést mutatnak a normál működés során tapasztalható jellemzőktől.

Az átlagok közül az

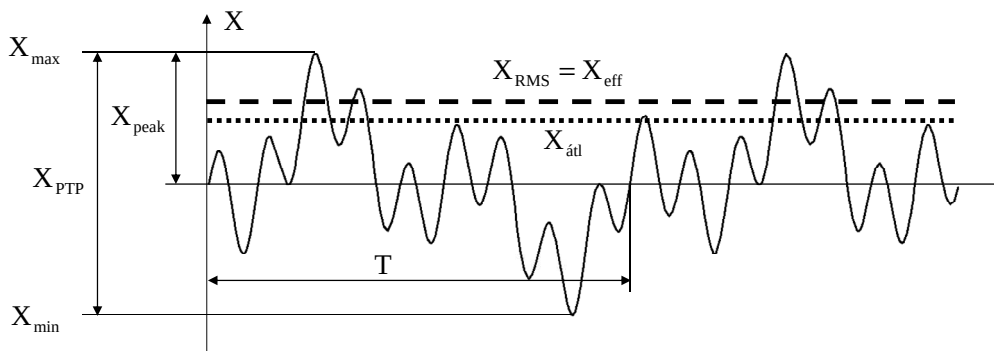
$$X_{RMS} = X_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T X^2(t) dt}$$

négyzetes közepet (RMS=root mean square), más szóval az effektív értéket használjuk a leggyakrabban, becslése a mintából:

$$\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i^2.$$

Az egyetlen értéket mutató egyszerű rezgésmérő eszközök az RMS értéket mutatják (leggyakrabban a rezgéssebesség RMS értékét, amit könnyen össze lehet vetni a rezgésszabványokban található határokkal). Előfordul az abszolút érték átlagának használata is: $X_{\text{átl}} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T |X(t)| dt$, becslése a minta átlag ($\bar{X}$).

A terjedelmet a *Peak to Peak* értékkel: $X_{PTP} = X_{\max} - X_{\min}$, vagy a Peak értékkel $X_{\text{peak}} = \max\{|X_{\max}|, |X_{\min}|\}$ jellemezzük.



2.1 ábra: Az időtartománybeli jel néhány számszerű jellemzője.



Az ép felületet sok kisméretű egyenetlenség jellemzi, így az együtt dolgozó felületek érintkezésekor nagyszámú érintkezés jön létre rezgéseket keltve. Ez alapján feltételezhető, és a tapasztalatnak is megfelelő, hogy az így keletkező rezgések amplitúdó-eloszlása normális. A felületek kopása, sérülése torzítja ezt az eloszlást, mivel ritkább, és az átlagosnál sokkal nagyobb ütközések kiugró amplitúdókat generálnak, így az amplitúdó-eloszlás eltér a normálistól. Az eltérés jól érzékelhető, ha a sűrűségfüggvény alakját viszonyítjuk a normális eloszlás sűrűségfüggvényéhez. Megváltozik a csúcsosság (keskenyebb kicsúcsosodás tapasztalható), és torzul a szimmetria is. A lapultság, a ferdeség és a csúcstényező statisztikai mutatószámokkal információt kaphatunk a felület állapotáról.

A sűrűségfüggvénynek a normális eloszlás sűrűségfüggvényéhez viszonyított **lapultságát** a

$$\frac{(X - E(X))^4}{D^4(X)} - 3$$

negyedik centrális momentumból származtatott értékkel szokás jellemezni, amit csúcsosságnak és **kurtosisnak** is hívunk. Becslése a mintából (n a minta elemszáma, $\bar{X}$ a minta átlag, s a tapasztalati szórás):

$$\frac{n \cdot (n-1)}{(n-1) \cdot (n-2) \cdot (n-3)} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4}{s^4} - 3 \cdot \frac{(n-1)^2}{(n-2) \cdot (n-3)}.$$

Ha a lapultság pozitív, akkor a sokaság eloszlásának sűrűségfüggvénye csúcsosabb, mint a normális eloszlás haranggörbéjéé, ha negatív, akkor laposabb.

A sűrűségfüggvénynek a normális eloszlás sűrűségfüggvényéhez viszonyított aszimmetriáját a

$$\frac{(X - E(X))^3}{D^3(X)}$$

harmadik centrális momentum (**ferdeség, skewness**) méri. Becslése a mintából:

$$\frac{n}{(n-1) \cdot (n-2)} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{s^3}.$$

Negatív ferdeség esetén a sűrűségfüggvény balra dől, pozitív esetén jobbra.

A **csúcstényező (crest faktor)** a maximális érték és az RMS érték hányadosa:

$$\frac{X_{peak}}{X_{RMS}}$$

a jel tüskességét jellemzi. Az ép csapágy crest faktora jellemzően nagyobb, mint a sérülté.

Az **alaktényező** az RMS érték és az átlag hányadosa:

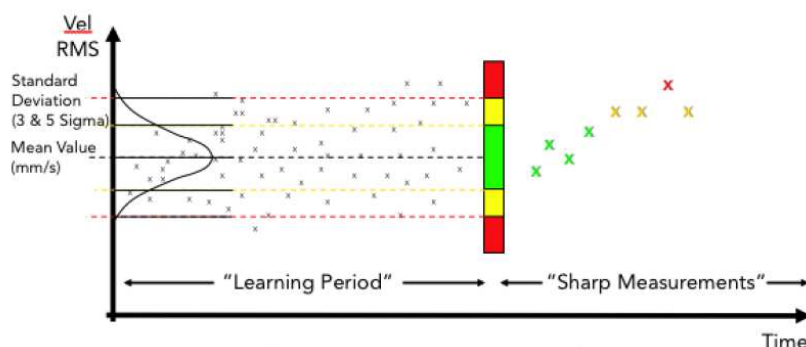
$$\frac{X_{RMS}}{X_{\text{átl}}}$$

A statisztikai mutatószámok iránymutatást adnak a gépállapot általános megítélésében (lásd pl. az ISO 10816 szabványt), de a jellegükből adódóan önmagukban nem alkalmasak mélyebb elemzésekre. A hibák feltárásához szükség van a frekvenciaspektrum elemzésére.

2.2 Minőségképesség-elemzés, statisztikai folyamatszabályozás

A műszaki diagnosztika feladata tágabb értelemben a műszaki folyamatok stabilitásának, megfelelőségének támogatása. A statisztikai folyamatszabályozás lényege olyan eszközök alkalmazása, melyekkel a normális működéstől való eltérés egyszerűen és gyorsan érzékelhető. A folyamatok aktuális állapota meghatározott paraméterek mérésével, és az eredményeknek a referenciaértékekhez való viszonyításával értékelhető. A tömeggyártásban a folyamatos működésű berendezések esetén a termékek paramétereinek és a gépek állapotjelzőinek párhuzamos mérése jelent hatékony megoldást. Előfordulhat, hogy a termék hibájából lehet következtetni a gép meghibásodására vagy „elállítódására”, de az is jellemző, hogy a gépek diagnosztizálásával lehet előre jelezni a hibás termékek előállítását, és még időben be lehet avatkozni ennek elkerülése érdekében.

A statisztikai folyamatszabályozás lényege, hogy a megfelelő működés időszakában vett minta alapján megállapítják azt a tartományt, melyben a jellemző értékének egy meghatározott (a folyamat jellegétől, illetve a vizsgáló szakmai megfontolásától függő) valószínűséggel kell lennie, és ez alapján figyelmeztető és beavatkozási határokat állapítanak meg.



2.2 ábra: Tanulási szakasz és vizsgálati szakasz.

forrás: [5]

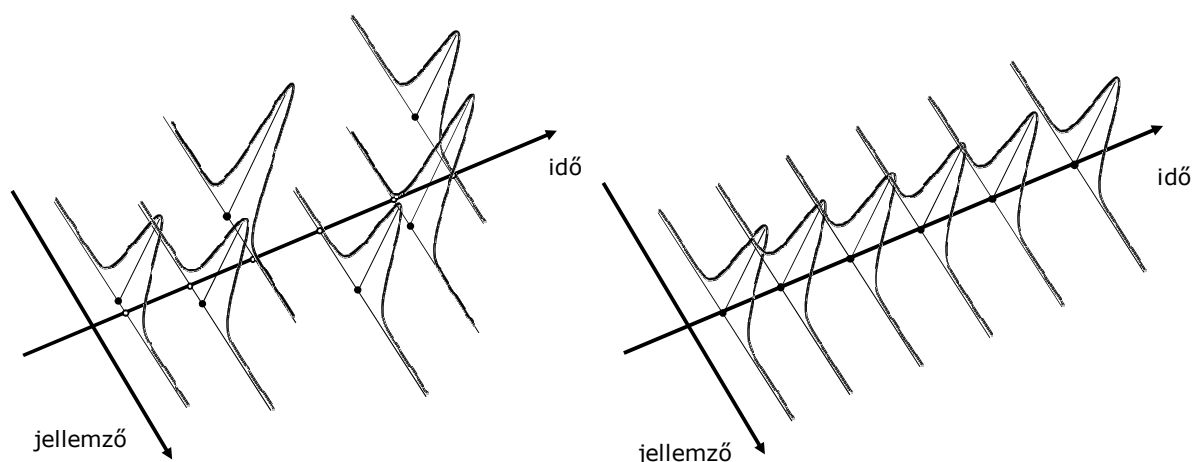
A rezgésértékek elfogadható szintje nem függetleníthető a gép környezetétől, terhelésétől, üzemi körülményeitől. Ezért általában nem várható el, hogy pontos „recept” álljon rendelkezésre a gép pillanatnyi állapotának megítélésére. A célszerű megközelítés az, hogy az új, megfelelően működő gépen elkezdjük a méréseket (mintavételezést), és ezzel teremtjük meg az alapot a későbbi ítéletalkotásra. Sok esetben az értékek tendenciózus, vagy hirtelen megváltozása hordozza az információt.

Ideális esetben a megtervezett folyamat paraméterei állandóak és megegyeznek a tervezett értékkel. Ilyen a valóságban nem létezik, a gyakorlatban szembesülnünk kell a folyamatok jellemzőinek ingadozásával (változékonyságával). A változékonyság egy bizonyos szint után már hibát jelent, például egy köszörűgép rezgésszintjének növekedése a megmunkált felület minőségét olyan mértékben ronthatja, hogy a termék selejt lesz.

A mérések során tapasztalt változékonyság megítéléséhez meg kell különböztetnünk a véletlenszerű eltéréseket, melyeket számtalan befolyásoló tényező (ember, gép, anyag, módszer/technológia, környezet) együttes hatása okozza akkor is, ha a gép, illetve a folyamat megfelelő, és az ún. veszélyes vagy rendszeres eltéréseket, melyek a rendszer

valamely elemének meghibásodásából (pl. rossz beállítás, elállítódás, kopás, törés, hibás alapanyag), vagy a környezeti feltételek lényeges megváltozásából (hőmérséklet, por, páratartalom) adódnak.

Ha a folyamatban csak véletlen hibák vannak, azt mondjuk, hogy a folyamat szabályozott, stabil állapotban van. Ha a folyamatban veszélyes hibák is vannak, akkor a folyamat szabályozatlan.



2.3 ábra: Szabályozatlan és szabályozott folyamat.

Míg a véletlen hibák a folyamatjellemzők időben állandó (általában normális) eloszlását eredményezik (2.3 ábra), addig a veszélyes hibák torzítják a folyamatjellemzők eloszlását, és beavatkozást igényelnek.

Az említett véletlen és veszélyes hibákon túl időnként előfordulhatnak ún. kiugró értékek, melyek általában hibás mérés, vagy a jellemzőt nagymértékben befolyásoló egyedi hatás (pl. áramszünet) következtében alakulnak ki. A kiugró értékek okát lehetőleg meg kell állapítani, de az értéket nem kell bevonni a folyamat értékelésébe.

Minőségképesség-elemzés

Egy folyamat stabilitása, tehát a változékonyság időben állandó volta önmagában nem jelent megfelelőséget. A megfelelőség (minőség) a vevői elvárásoknak való megfelelés, vagy konkrétabban fogalmazva a paramétereknek az előírt toleranciatartományban való maradása. Egy stabil folyamat bizonyos elvárások mellett lehet megfelelő, míg megváltozott (szigorított) elvárások mellett lehet nem megfelelő. A minőségképesség-elemzés ezeket a viszonyokat tisztázza.

A minőségképesség-elemzésben megkülönböztetjük a rövid távú és a hosszú távú vizsgálatokat. Egy gyártási folyamat elemzésekor rövid távnak akkor tekinthető az időtartam, ha az alatt a környezeti feltételek megváltozása nem jelentős, így a tapasztalt változékonyság a gép működéséből fakad. A rövid távú vizsgálat tehát a gép minőségképességének vizsgálatát teszi lehetővé. Hosszabb távú mintavételezés célja az,



hogy a működés közben általában előforduló jellegzetes hatások megjelenjenek a mintában, mert az elemzés célja ekkor a folyamat minőségképességének jellemzése.

Stabil folyamat esetén gép-, illetve folyamatképességet, nem stabil folyamat esetén folyamatteljesítményt számolunk (2.1 táblázat). A megfelelő indexeket hasonló formulák definiálják, csak a kiszámított értékek értelmezése más a mintavételezés körülményeinek ismeretében (2.2 táblázat).

2.1 táblázat: Minőségképesség indexek.

	stabil folyamat	nem stabil folyamat
rövid távú (short-term) elemzés	gép-képesség (machine capability) index, C_m, C_{mk}	
hosszú távú (long-term) elemzés	folyamat-képesség (process capability) index, C_p, C_{pk}	folyamatteljesítmény (process performance) index, P_p, P_{pk}

Az indexek a minta átlaga, szórása és a toleranciatartomány viszonyát tükrözik. A C_m, C_p, P_p értékek a tolerancia tartomány hosszának (felső tűréshatár - alsó tűréshatár = FTH-ATH) és a szórás hat- vagy nyolcszorosának arányát fejezik. Ezek a mutatók érzéketlenek az átlag eltolódására.

A C_{mk}, C_{pk}, P_{pk} értékek számításakor a toleranciatartomány széleinek a mintaátlagtól való eltéréséből indulunk ki (FTH- μ , illetve μ -ATH), és ezek közül a kisebbiket (a „rosszabbikat”) viszonyítjuk a szórás három- vagy négyszereséhez.

2.2 táblázat: Minőségképesség indexek számítása.

C_m	$\frac{\text{tolerancia}}{6\sigma_{\text{short-term}}} = \frac{FTH - ATH}{6\sigma_{st}}$
C_{mk}	$\min\left\{\frac{FTH - \mu}{3\sigma_{st}}, \frac{\mu - ATH}{3\sigma_{st}}\right\}$
C_p, P_p	$\frac{\text{tolerancia}}{6\sigma_{\text{long-term}}} = \frac{FTH - ATH}{6\sigma_{lt}}$
C_{pk}, P_{pk}	$\min\left\{\frac{FTH - \mu}{3\sigma_{lt}}, \frac{\mu - ATH}{3\sigma_{lt}}\right\}$

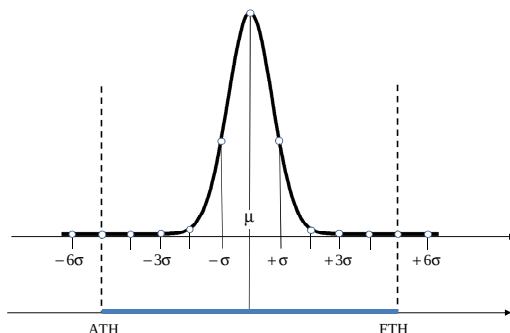
A gépképesség jellemzésekor egyes forrásokban a $C_m = \frac{\text{tolerancia}}{8\sigma_{st}} = \frac{FTH-ATH}{8\sigma_{st}}$, ill. $C_{mk} = \min\left\{\frac{FTH-\mu}{4\sigma_{st}}, \frac{\mu-ATH}{4\sigma_{st}}\right\}$ formulák szerepelnek, így az index értelmezésekor tekintettel kell lenni arra, hogy a nevezőben a szórás hányszorosa szerepel.

A toleranciatartománynak a szórás hatszorosához való viszonyítása abból ered, hogy a statisztikai folyamatszabályozás elveinek megalkotása idején a „3σ”-s folyamat volt a minimális elvárás, vagyis az, hogy a tolerancia tartomány hossza legalább 6σ legyen. Ezt a szintet jelzi például a gépképesség esetén a $C_m = 1$ érték. A minőségképesség-indexekkel szembeni elvárás függ az iparágtól, azon belül is egy-egy vállalat, üzem minőségkultúrájától. Bhote szerint [4] a 80-as évek előtt az USA iparában 0,67 volt a jellemző C_p érték (a legyártott termékek mintegy 4,5%-a nem felelt meg). A 90-es évekre (a japánok által diktált minőségfejlesztési folyamatok hatására) az 1,33-as C_p érték vált elfogadottá a korszerű ipari termelésben. A hightech ágazatokban mára az 1,67-es érték az elfogadott, míg a Minolta szabványában $C_p = 2,0$. [5]

A 2.4 ábra a C_m és a C_{mk} indexek jelentését mutatja grafikusan a sűrűségfüggvény és a tolerancia tartomány viszonyán keresztül.

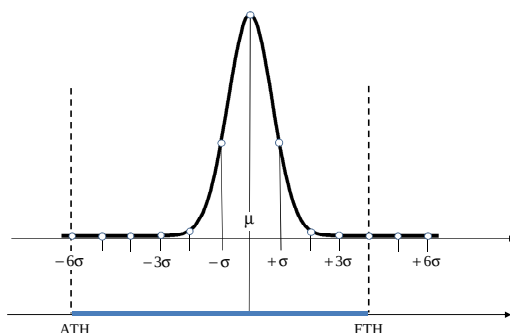
$$C_m = 1,67$$

$$C_{mk} = 1,67$$



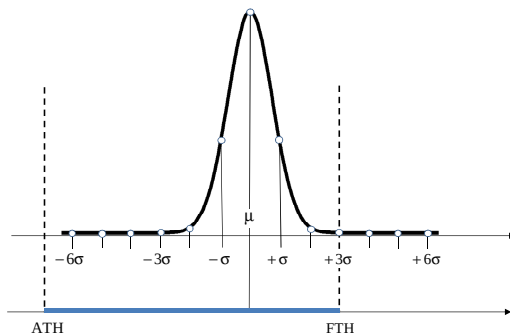
$$C_m = 1,67$$

$$C_{mk} = 1,33$$



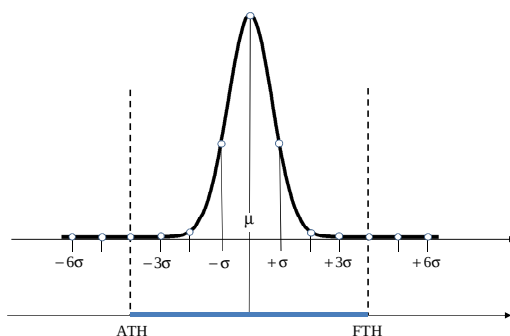
$$C_m = 1,67$$

$$C_{mk} = 1$$



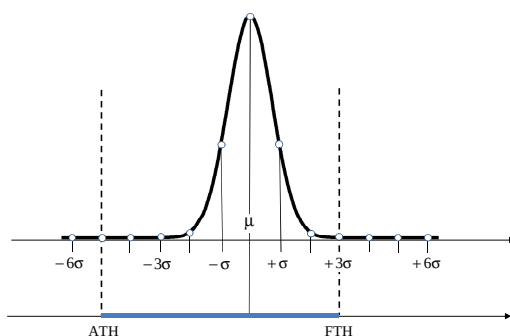
$$C_m = 1,33$$

$$C_{mk} = 1,33$$



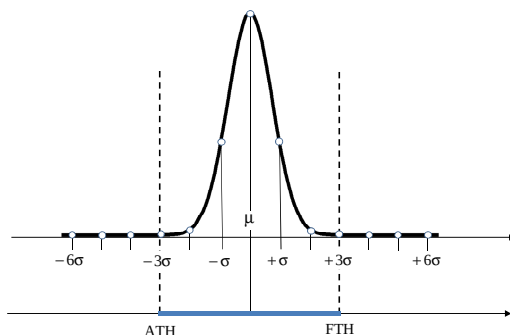
$$C_m = 1,33$$

$$C_{mk} = 1$$



$$C_m = 1$$

$$C_{mk} = 1$$

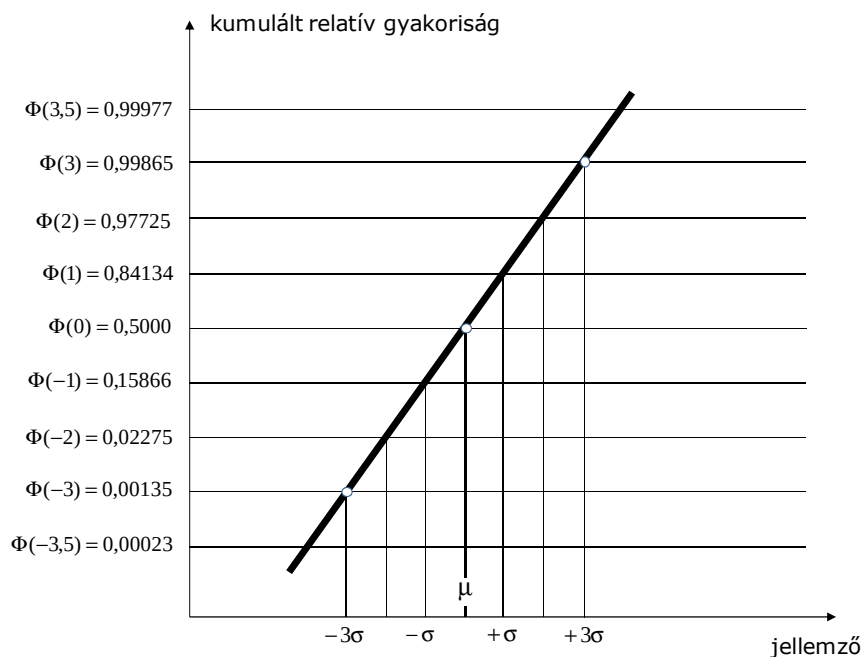


2.4 ábra: A C_m és a C_{mk} indexek jelentése.

A „Gauss-papír” alkalmazása

A normalitásvizsgálatra használt grafikus módszer, a kumulált relatív gyakoriságnak az ún. Gauss-papíron való ábrázolása szemléletesen használható a minőségképesség szemléltetésére. A Gauss-papír egy speciálisan skálázott „koordinátarendszer”, mely a normális eloszláshoz tartozó eloszlásfüggvényt „kiegyenesíti”, vagyis ha a minta normális eloszlású valószínűségi változótól származik, akkor a pontoknak elméletileg egy egyenesre kell esni.

A függőleges tengelyen a 0,5 értékhez képest szimmetrikusan, k egység távolságra helyezkednek el a $\Phi(k)$ és a $\Phi(-k)$ értékek, $k = 1,2,3, \dots$ (2.5 ábra). Az, hogy milyen k értékig kell elmenni, a kapott kumulált relatív gyakoriság értékek határozzák meg. Minél nagyobb a minta elemszám, annál közelebb kerülnek a kumulált relatív gyakoriság értékek a 0-hoz, illetve az 1-hez, ezért annál szélesebb tartomány szükséges a megjelenítéshez.

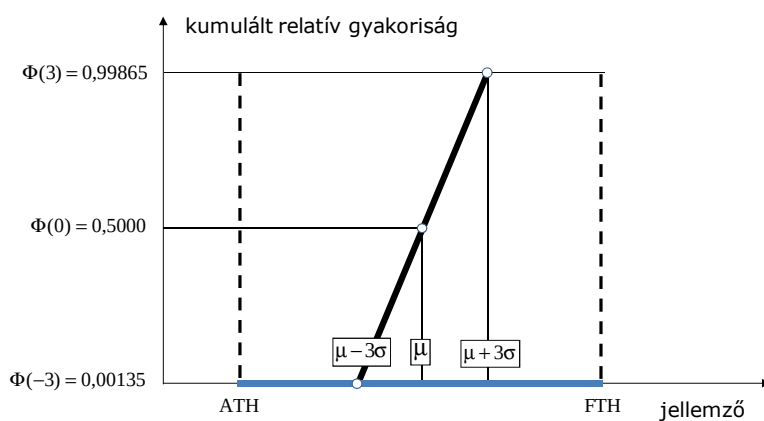


2.5 ábra: A Gauss papír felépítése.

A 2.6 ábra azt mutatja, hogy a kumulált relatív gyakoriság Gauss papíron ábrázolva hogyan alakul egyes minőségképeség index értékek esetén. A Gauss papíros ábrázolás, illetve ennek szoftveres megvalósítása könnyen használható vizuális eszköz a folyamatszabályozásban.

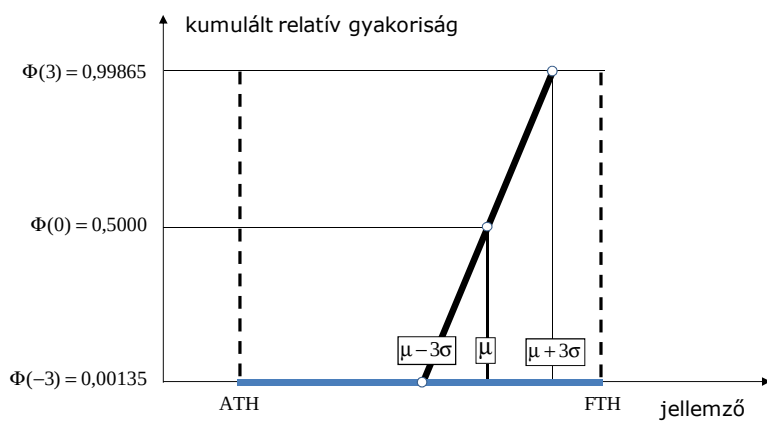
$$C_m = 1,67$$

$$C_{mk} = 1,67$$



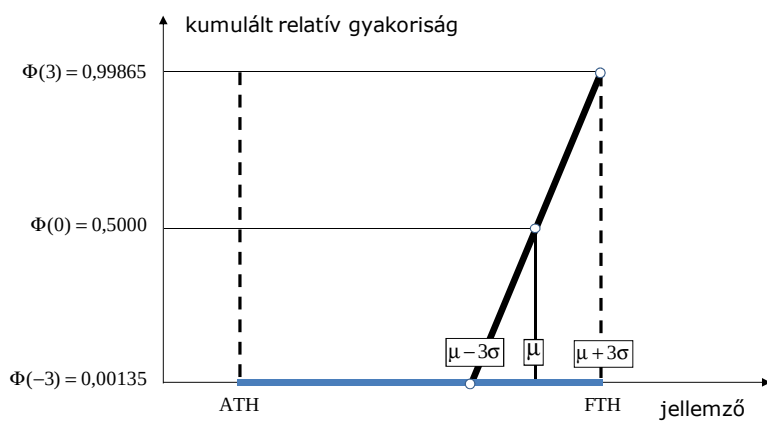
$$C_m = 1,67$$

$$C_{mk} = 1,33$$



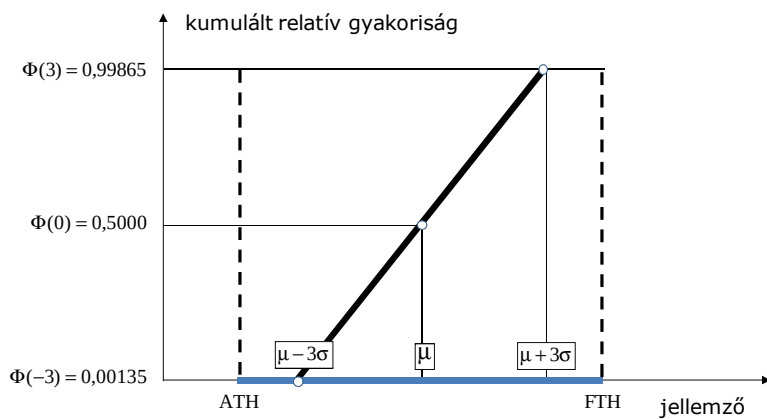
$$C_m = 1,67$$

$$C_{mk} = 1$$



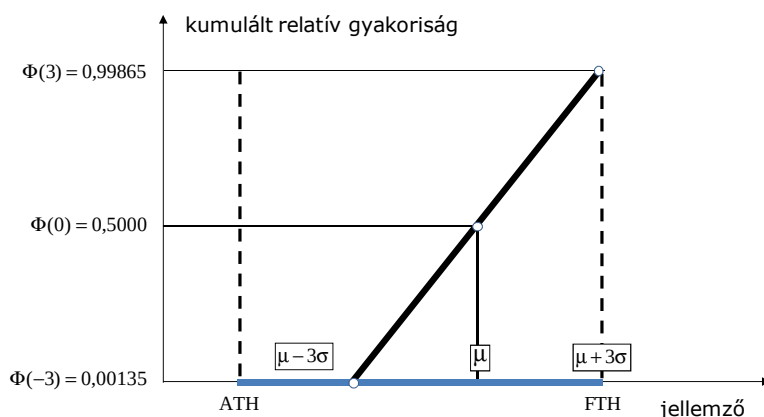
$$C_p = 1,33$$

$$C_{pk} = 1,33$$



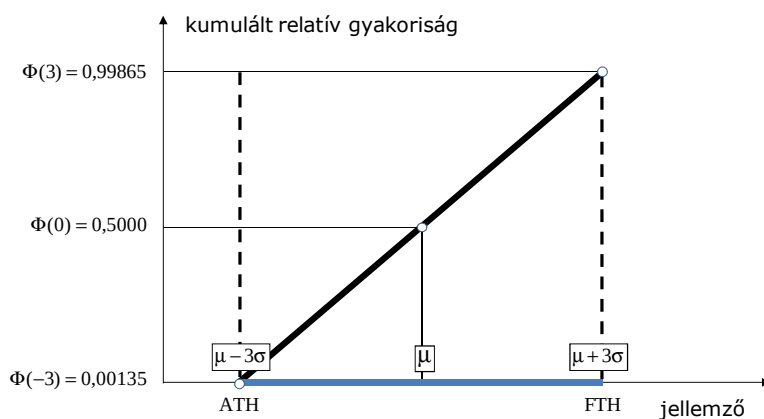
$$C_m = 1,33$$

$$C_{mk} = 1$$



$$C_m = 1$$

$$C_{mk} = 1$$



2.6 ábra: Kapcsolat a C_m és a C_{mk} indexek értéke és a Gauss papíron kialakult kép között.

A képességelemzés gyakorlati megvalósítása a kritikus paraméterek kiválasztásával kezdődik. A kritikus paraméterek szoros kapcsolatban vannak a termék minőségi paramétereivel, így megváltozásuk figyelemmel kísérése alkalmas arra, hogy elkerüljük a minőségi jellemzőknek az elfogadhatatlan tartományba való csúszását.

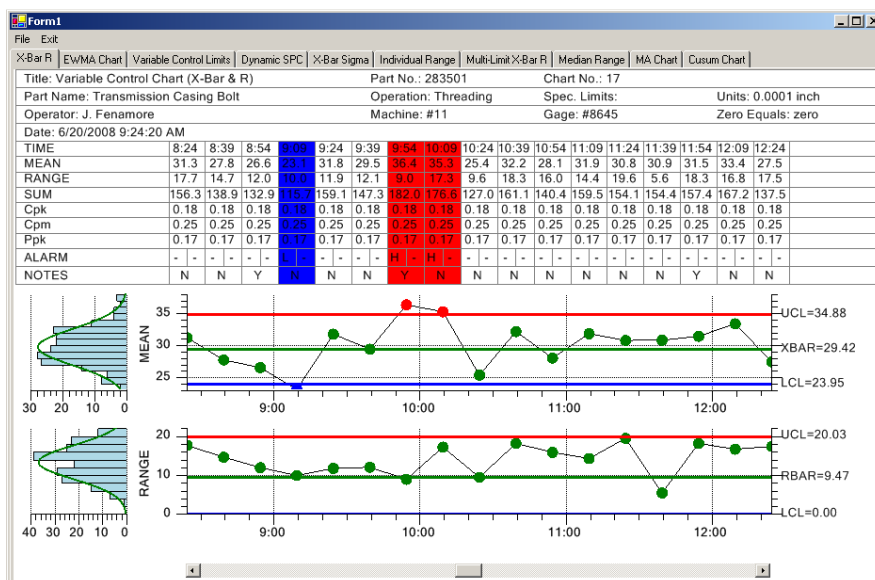
A kritikus paraméterekre vonatkozóan mintát kell venni a működő folyamatból. Itt a nagy minta elemszám biztosítja, hogy a folyamatjellemzők becslése elegendően megbízható legyen. A minta alapján megállapítható, hogy a folyamat stabil-e, vagy számolni kell veszélyes hibákkal is. Stabil folyamat esetén elegendő a mintavételezést kisebb minta elemszámmal időközönként megismételni. Nem stabil folyamat esetén viszont gyakoribb mintavételezés és szabályozókártya (más néven ellenőrzőkártya) alkalmazása szükséges.

Az ellenőrzőkártyák a stabilitás ellenőrzésének egyszerű, üzemi körülmények között is használható eszközei. Alkalmazásuk hasonlatos a hipotézisvizsgálathoz, hiszen a kártyákon lényegében az van rögzítve, hogy ha megfelelő a működés (nullhipotézis), akkor a mért értékeknek milyen tartományban kell lenniük. A tartományon kívüli értékek arra utalnak, hogy a nullhipotézis nem áll fenn. Ezzel természetesen csak a módszer logikáját akartuk érzékeltetni, az ellenőrzőkártyákon látható mintázatok értékelése ennél összetettebb.

Aszerint, hogy a folyamatból vett minta milyen típusú mérési skálán értékelhető, a kártyákat két fő csoportra osztjuk: számszerűsíthető mennyiségek esetén a méréses

ellenőrzőkártyák (pl. átlag, medián, terjedelem, szórás kártya), kategóriákba sorolható jellemzők esetén a minősítéses ellenőrzőkártyák (pl. selejtszám, hibaszám kártyák).

Az ellenőrző kártyák alkalmazásához meg kell határozni a mintavételezés módját (minta elemszám, mintavételezés gyakorisága), és a beavatkozási határokat. A határok a hipotézisvizsgálatokból ismert első- és a másodfajú hiba elkövetésének valószínűségével függnek össze, ami az alkalmazó szakmai döntésén múlik. Minél szűkebb a megfelelőségi tartomány, annál könnyebben minősítjük a folyamatot nem megfelelőnek, így annak esélye, hogy egy megfelelő folyamatot nem megfelelőnek minősítünk (elsőfajú hiba) annál nagyobb. És fordítva: minél tágabb a megfelelőségi tartomány, annál könnyebben minősítjük a folyamatot megfelelőnek, így annak esélye, hogy egy nem megfelelő folyamatot megfelelőnek minősítünk (másodfajú hiba) annál nagyobb.



2.7 ábra: Tipikus elemzés átlag-terjedelem kártyával (mean=átlag, range= terjedelem).

forrás: [6]

Arról, hogy egy konkrét folyamat esetén hogyan kell megtervezni az ellenőrzőkártyás vizsgálatot, a szakirodalom részletes útmutatást tartalmaz (lásd például: [1]).

Hagyományosan az átlag-terjedelem ($\bar{x} - R$) kártyát használják leggyakrabban, mivel mindkét érték könnyen számolható a mintából (2.7 ábra).

A gyakorlatban sokszor a Western Electric-től származó értékelési elveket („szabályokat”) használják. Ehhez a kártyán zónákat alakítanak ki (2.8 ábra), melyek határai az átlagtól egyszeres, kétszeres, háromszoros szórásnyira vannak.

Beavatkozásra az alábbi szituációkban kerül sor:

- Egy pont a beavatkozási határon kívül van: kiugró érték (outlier).

- 9 egymás utáni pont a középső vonal egyik oldalán helyezkedik el, ilyenkor az átlag eltolódott az előírthoz képest.
- 6 egymás utáni pont egyirányú menetet mutat (monoton csökken vagy nő).
- 14 egymás utáni pont le-föl ingadozik.
- 3 egymás utáni pont közül 2 az A zónában vagy azon kívül van.
- 5 egymás utáni pont közül 4 a B zónába vagy azon kívülre esik.
- 15 egymást követő pont a C zónában van, a középső vonal mindkét oldalán.
- 8 egymást követő pont a C zónán kívül, a középső vonal két oldalán helyezkedik el.



2.8 ábra: Zónák az ellenőrző kártyán.

2.3 A 6σ szemlélet

A 6σ elnevezésű minőségmenedzsment módszer és szemlélet a követelményeknek való megfelelés javításának egyik legsikeresebb eszköze. Célja a vevői igények lényegében hibamentes kiszolgálása, vagyis az, hogy a folyamatból ne kerüljenek ki hibás termékek. Az elnevezése is a kis szórásra utal áttételesen, ami számszerűsítve úgy hangzik, hogy 1 millió hibázási lehetőségből legfeljebb csak 3,4 hibázás következzen be. Ennek a szintnek az érzékeltetésére látványos példákat szoktak hozni az élet különböző területeiről: pénzügyi tranzakciók, közlekedési balesetek, ahol milliószámra következnek be események, és így elképzelhetővé válik a hibákra kitűzött rendkívül kis arányszám.

A termékek jellemzőinek a tolerancia tartományban való tartását („tökéletes” termék előállítását) úgy érik el, hogy a jellemzőt meghatározó kritikus paraméterek (folyamatjellemzők) változékonyságára (variációjára) előírják a szükséges, jellemzően rendkívül szigorú követelményeket, és gondoskodnak ezek betartásáról. A 6σ megvalósítása csak részben műszaki kérdés, mint általában minden sikeres filozófia, áthatja és a kitűzött cél szolgálatába állítja a szervezet minden folyamatát.



A 6σ módszer visszahozta a statisztikai szemléletmódot, ami az SPC kialakulása idején jellemző volt, és az alkalmazott eszközök között a statisztikai elemzések kaptak nagy hangsúlyt.

A vizsgálatokhoz szükséges adatok előállítása a mérőrendszereknek kitüntetett szerepet adott. A mérések pontosságának jóval alatta kell maradnia a mért értékre kiszabott (jellemzően nagyon kis) toleranciaértéknek, így a mérések előtt meg kell győződni arról, hogy a rendelkezésre álló mérőeszközök képesek használható eredményt szolgáltatni.

A technológiai paramétereknek az előírt szűk sávban való tartása az alkalmazott gépek állapotjellemzőire értelemszerűen nagyon szigorú előírásokat jelent. A hatékony és kifinomult diagnosztikai eszközökre, állandó megfigyelésre és gyors beavatkozási képességre van szükség.

A 6σ az 1980-as évekből ered, amikor a Motorolánál nagyszabású minőségfejlesztési projekt keretében a hibák gyakoriságát tizedére csökkentették. A látványos eredmények hatására több nagyvállalat (pl. a General Electric) is átvette és továbbfejlesztette a módszert, és jelentős üzleti sikereket ért el vele.

A 6σ módszer lényegesen különbözik a statisztikai folyamatszabályozástól. Ugyan a hibaarányra vonatkozó (sokkal szigorúbb) előírást a szórás és a tűrés kapcsolatán keresztül itt is hasonlóan lehet megfogalmazni, de az előírásoknak való megfelelés egészen új folyamatszerkezési szemléletet és megoldásokat igényel.

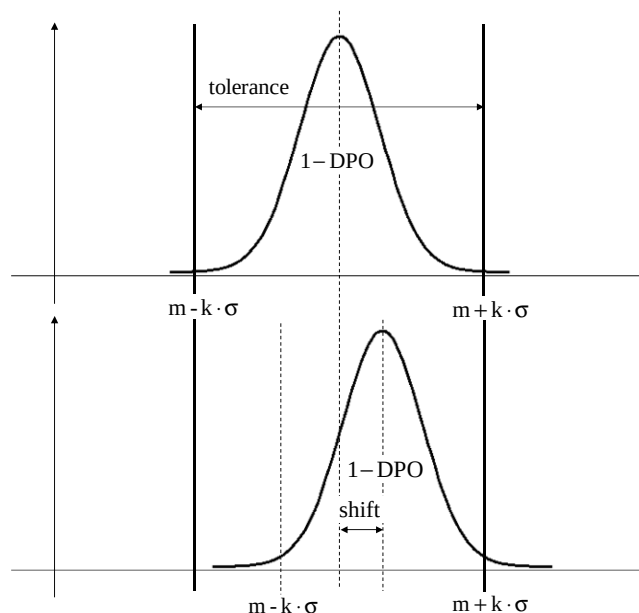
Míg a statisztikai folyamatszabályozás gondolatvilágában a megfelelés a $\mu \pm 3 \cdot \sigma$ tartománynak a tűréshez való viszonyán alapult, addig a 6σ esetén a $\mu \pm 6 \cdot \sigma$ tartományt kell figyelnünk. Ez rendkívül nagy változást jelent, hiszen (normális eloszlást feltételezve) egy valószínűségi változó értéke 0,9999999975 valószínűséggel esik a $\mu \pm 6 \cdot \sigma$ tartományba, míg a $\mu \pm 3 \cdot \sigma$ tartományba csupán 0,9973003792 valószínűséggel.

2.3 táblázat: DPMO értékek.

	DPMO	
σ szint	0 eltolódás	1,5σ eltolódás
1	317 311	697 672
2	45 500	308 770
3	2 700	66 811
4	64	6 210
5	0,6	233
6	0,002	3,451

Míg hagyományosan %-ban fejezik ki a hibák számát egy termékhalmazon belül (pl. 99,73% a $\mu \pm 3 \cdot \sigma$ tartományon belül), addig a 6σ -ban – a kis gyakoriságértékek miatt – 1 millió hiba előfordulási lehetőségre vonatkoztatják a hibák számát, és a DPMO (Defects per Million Opportunities) mérőszámot használják. (Ha hiba valószínűséget kell megadni, akkor értelemszerűen a DPO (Defects per Opportunity) értéket kell használni, ami a DPMO milliommód része.)

Egy folyamatot $k\sigma$ szintűnek nevezünk, ha a $\mu \pm k \cdot \sigma$ intervallum hossza megegyezik a toleranciatartomány hosszával. Ha azt feltételezzük, hogy μ a toleranciatartomány közepére esik (2.9 ábra), akkor a 2.3 táblázat második oszlopában („0 eltolódás”) látható DPMO értékek adódnak. A gyakorlatban általában $1,5 \cdot \sigma$ eltolódást feltételeznek (2.10 ábra), és a harmadik oszlopban („1,5 σ eltolódás”) található értékekkel számolnak. Így pl. egy „6 σ -s” folyamatban 1 millió hibalehetőségre átlagosan 3,451 hiba jut.



2.9 ábra: Az eltolódás szerepe a DPO értékben.

A 6σ komplex szervezet- és folyamatfejlesztési módszer, az alkalmazás alapjait sokrétű intézkedési tervvel kell megteremteni. Ha a szervezet felkészült a módszer alkalmazására, akkor lehet a napi munka részeként végezni a szisztematikus méréseket, statisztikai elemzéseket, és feltárni az összefüggéseket, a hibák okait.

A módszertan az üzleti folyamat minden elemének mérését és elemzését jelenti, nincs a technikai folyamatokra korlátozva. Az elvek akár nem termelő vállalatok fejlesztésére is alkalmazhatók. A módszer részeként alkalmazott mérési technikák és minősítési eljárások összefüggésben vannak a nagy pontosságú gyártáshoz kötődő minőségügyi szabványokkal (pl. a járműgyártásban alkalmazott QS 9000-rel).



A módszer fő részei a [2] szerinti terminológiával a

- Definíció (Define),
- Mérés (Measure),
- Elemzés (Analyze),
- Fejlesztés (Improve),
- Szabályozás (Control),

angol betűszóval a DMAIC.

A definiálás az üzleti szituáció megértését, a fejlesztési projekt céljainak és feltételeinek meghatározását, a vevők számára fontos, a minőségre kritikus (Critical to Quality) paraméterek azonosítását jelenti.

A mérés a jellemzők számszerűsítését, az elérendő értékek és tűrések rögzítését, az alkalmazott mérőrendszer ellenőrzését jelenti. A számszerűsítés lényeges eleme az általában kvalitatív vevői elvárások kvantitatív termék-, illetve folyamatjellemzőkké való átfordítása.

Az elemzés fázisban határozzák meg a folyamatok minőségképességét, ok-okozat feltáró eszközökkel (pl. halszálka diagram, FMEA) és statisztikai elemzéssel azonosítják a kimenetet befolyásoló kulcsfontosságú, független bemeneteket.

A fejlesztés fázisban választják ki a legfontosabb változókat, ezek hatását a kimenetre (tervezett kísérletek), majd keresik az optimális megoldást, és azt leírják a kulcsbemenetek tűrésezésével.

A szabályozás feladata a javított folyamatok fenntartása, összességében a hatékony minőségrendszer működtetése. [2]

A gyakorlatban az elért minőségszint hosszú távú fenntartása legalább olyan nehéz vezetési feladat, mint a célok elfogadtatása és a kitűzött állapot elérése.

2.4 Szórásanalízis (ANOVA)

Egy jellemző „szóródását” legtöbbször a szórással, illetve a szórásnégyzettel (variációval) adjuk meg. A szórás értéke könnyebben „érzékeltető”, mivel ennek a „dimenziója” egyezik meg a vizsgált jellemző dimenziójával, de mint statisztikai jellemző a variancia rendelkezik jobb tulajdonságokkal, pl. független hatások okozta varianciák összeadódnak.

A variancia a várható értéktől való négyzetes eltérés várható értéke (vagy ha megengedjük, hogy a várható érték helyett egyszerűen átlagot mondjunk, akkor a variancia az átlagtól való átlagos négyzetes eltérés). A variancia becslésére általában a tapasztalati szórásnégyzetet, vagy a korrigált tapasztalati szórásnégyzetet használjuk, melyek az eltérés négyzetösszeg (Sum of Squares, SS) értékekből származnak

$$\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2,$$

ahol n a minta elemszáma, $x_i, i = 1, \dots, n$ a minta elemek, $\bar{x}$ a minta átlag. A továbbiakban a variancia becslésére a korrigált tapasztalati szórásnégyzetet használjuk, és s^2 -tel jelöljük.

A gyakorlati módszereket ismertető szakirodalomban gyakran nem különül el a statisztikai mutatószámok elméleti értéke és becslése, továbbá a normális eloszlás esetén használatos jelöléseket használják általánosan. Így például a tapasztalati szórást, vagy a korrigált tapasztalati szórást gyakran σ -val jelölik.

Ha egy jellemzőre vonatkozóan mintát veszünk, akkor a minta varianciával kapcsolatban felvetődik a kérdés, hogy vannak-e elkülöníthető hatások, melyek ezt okozzák. Tipikus példa erre egy egészségügyi beavatkozás, pl. gyógyszer alkalmazás hatásának (eredményességének) vizsgálata. Itt a vizsgált halmazban (populációban) vannak kezelt és nem kezelt részcsoporthoz, és arra keressük a választ, hogy mutatkozik-e lényeges különbség az egyes részcsoporthoz közt.

Sok esetben többszemponút csoportosítás célszerű, például a csoportok és kontrollcsoportok egyedeit tovább oszthatjuk életkor, nem, korábbi kezelési módok szerint (több faktoros elemzés). A több faktoros elemzések előnye, hogy az egyes faktorok együttes hatása („összejártsága”) is kimutatható. A kétfaktoros variancia-analízis jellegzetes példája a műszaki életben a mérőrendszer elemzés, amit a következő pontban mutatunk be.

A variancia-analízis (ANOVA) lényege, hogy a mintaelemek valahány szempont (faktor szerint) csoportosítva („címkézve”) vannak, és összehasonlítjuk a teljes minta varianciáját a csoportokon belüli és a csoportok közti varianciákkal. A szétbontás háttérében technikailag a teljes eltérés négyzetösszeg részekre bontása áll.

A varianciák aránya azt jellemzi, hogy egy-egy faktor (hatás) mennyire domináns oka a szóródásnak. Például a gyógyszerek hatásának vizsgálatokor kiderülhet, hogy a kezelés hatását jelentősen befolyásolja az életkor, a nem, vagy a korábbi kezelési mód, sőt akár az is, hogy vagy ezek valamelyike, vagy valamilyen kombinációja jelentősebb szóródást okoz, mint maga a kezelés.

A variancia-analízis egyben statisztikai próba a csoportok várható értékére vonatkozóan. A próba nullhipotézise az, hogy a csoportok homogének abban az értelemben, hogy a várható értékek megegyeznek, az ellenhipotézis az, hogy legalább egy csoport esetén a várható érték eltér a többitől.

Az egyfaktoros ANOVA az alábbiak szerint működik. Adott k csoport azonos minta elemszámmal (n).

2.4 táblázat: Egyfaktoros ANOVA input adatok.

	faktor			
	1. csoport	2. csoport	...	k. csoport
	x_{11}	x_{21}	...	x_{k1}
	x_{21}	x_{22}	...	x_{k2}
	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$
	x_{n1}	x_{2n}	...	x_{kn}
csoport átlag	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	...	$\bar{x}_k$
csoport variancia	s_1^2	s_2^2	...	s_k^2



Az alábbiak szerint kiszámítjuk az átlagokat és az átlagoktól való négyzetes eltérés összegeket a teljes halmazra és a csoportokra, ezekből adódnak az ún. belső és a külső eltérés négyzetösszegek. A belső és a külső eltérés négyzetösszegek összege megegyezik a teljes eltérés négyzetösszeggel. Az, hogy a csoportokat megkülönböztető jellemző (pl. a kezelés ténye) hatása mennyire jelentős, abból érzékelhető, hogy a teljes összegben milyen arányt képviselnek az összetevők.

A hatások viszonyának számszerűsítéséhez ki kell számolni a varianciákat (átlagos négyzetes eltéréseket, MS), figyelembe véve az összegek tagszámából adódó szabadsági fokokat (degrees of freedom, df). A próbastatisztika értékét a külső és a belső variancia aránya adja.

2.5 táblázat: Egyfaktoros ANOVA.

Főátlag:	$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k x_{ij}$
Csoportátlagok:	$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_{ij}, j = 1, \dots, k$
Teljes eltérés négyzetösszeg:	$SS_{teljes} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (x_{ij} - \bar{x})^2, \quad df_{teljes} = n \cdot k - 1$
Csoport eltérés négyzetösszegek:	$SS_j = \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2, j = 1, \dots, k$
Belső eltérés négyzetösszeg:	$SS_{belső} = \sum_{j=1}^k SS_j, \quad df_{belső} = (n - 1) \cdot k$
Külső eltérés négyzetösszeg:	$SS_{külső} = n \cdot \sum_{j=1}^k (\bar{x}_j - \bar{x})^2, \quad df_{külső} = k - 1$
<i>megjegyzés:</i>	$SS_{teljes} = SS_{belső} + SS_{külső}$ $df_{teljes} = df_{belső} + df_{külső}$
Csoportvarianciák:	$s_j^2 = \frac{SS_j}{n - 1} = \frac{1}{n - 1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2, j = 1, \dots, k$
Belső variancia:	$MS_{belső} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{j=1}^k s_j^2 = \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{n - 1} \cdot SS_{belső}$
Külső variancia:	$MS_{külső} = n \cdot \frac{1}{k - 1} \cdot \sum_{j=1}^k (\bar{x}_j - \bar{x})^2 = \frac{1}{k - 1} \cdot SS_{külső}$
Próbastatisztika:	$F = \frac{MS_{külső}}{MS_{belső}}$

(SS = eltérés négyzetösszeg, Sum of Squares, MS = eltérések négyzetes közepe, Mean Square)



Az F próbastatisztika $(k - 1, k(n - 1))$ szabadsági fokú F eloszlású. A szignifikanciaszinttől függően adódik az F_{krit} kritikus érték, amit a próbastatisztika értékével összehasonlítva dönthetünk a nullhipotézis elfogadásáról (ha $F < F_{krit}$, akkor elfogadjuk a nullhipotézist, különben elvetjük).

2.1. példa

Vizsgáljuk meg ANOVA segítségével a 2.6 táblázatban megadott adathalmazt!

2.6 táblázat: A 2.1. példa adatai és a MS Excel által szolgáltatott elemzés

1. tétel	2. tétel	3. tétel	4. tétel	5. tétel
19.4	18.4	18.6	20.3	22.4
18.6	22.4	20.6	16.8	22.0
21.2	23.0	20.1	16.7	19.3
16.8	19.4	20.1	23.0	22.7
18.6	22.6	22.9	20.3	17.4
18.0	22.2	18.5	23.0	19.3
21.6	21.2	18.8	20.7	19.9
17.8	20.8	21.3	20.9	20.0
16.8	21.6	16.9	23.2	19.5
20.4	20.2	19.2	21.5	19.4
19.2	22.2	21.9	19.3	19.3
16.4	20.4	17.9	18.4	17.5

ÖSSZESÍTÉS

Csoportok	Darabszám	Összeg	Átlag	Variancia
1. tétel	12	224.8	18.73	2.92
2. tétel	12	254.4	21.20	1.97
3. tétel	12	236.8	19.73	3.05
4. tétel	12	244.1	20.34	4.98
5. tétel	12	238.7	19.89	2.91

VARIANCIAANALÍZIS

Tényezők	SS	df	MS	F	p-érték	F krit. (5%)
----------	----	----	----	---	---------	--------------



Csoportok között	38.90	4	9.73	3.07	0.02	2.54
Csoporton belül	174.09	55	3.17			
Összesen	213.00	59				

Előfordulhat, hogy csak két csoportot kell összehasonlítani, ekkor a páros t-próbát alkalmazzuk. Ha a csoportok elemszáma nem egyenlő, akkor a kétmintás t-próbát kell használni.

A lineáris modellre épülő varianciaanalízis abból a feltételezésből indul ki, hogy az egyes megfigyeléseket (mérési eredményeket) terhelő hibák

- függetlenek;
- normális eloszlásúak;
- egyenlő a szórásúak.

Ha az ANOVA eltérést mutat, akkor szükség lehet annak vizsgálatára, hogy melyik csoport tér el a többitől, illetve mely csoportpárok mutatnak szignifikáns eltérést (post hoc analízis). Erre több módszer is van, például a Tukey féle eljárást gyakran alkalmazzák.

A többfaktoros variancia-analízis célja az, hogy a faktorok együttes hatását is vizsgálni lehessen amellett, hogy a faktorok egyedi hatásai is egy számításon belül adódnak.

A többfaktoros vizsgálat alapját is a teljes négyzetes eltérés tagokra való felbontása képezi. Ez tetszőleges faktorszám esetén elvégezhető. Itt csak a kétfaktoros variancia-analízist mutatjuk be a mérőrendszer-elemzéshez kötődően.

2.5 Mérőrendszer-elemzés

Egy mérőrendszer (mérőeszköz + kezelő személy + vizsgált termék) esetén azok a jellemzők fontosak, melyek a mérési eredmények használhatóságát (a mérés céljának elérését) befolyásolják. Egy gyártási folyamathoz kapcsolódóan egyfajta mérést általában több kezelő végez több hasonló műszerrel, különböző munkadarabokon, változó környezetben. Ezek a körülmények hatással vannak a mérések eredményére, így ezek értelmezésekor figyelembe kell venni, hogy termékek jellemzőinek tényleges varianciája mellett (ezt akarjuk mérni), jelentkezik a mért értékeknek a ténylegestől való eltérése is. A mérőrendszer-elemzés (R&R, repeatability & reproducibility vizsgálat) célja annak számszerűsítése, hogy a lehetséges okok milyen „súllyal” szerepelnek a mérési eredmények varianciájában.

Az alábbiakban röviden összefoglaljuk a mérőrendszerek alapvető jellemzőit.

Mint általában a pontbecsléseknél, a mérések esetén is felvetődik a torzítatlanság és a konzisztencia kérdése. A torzítatlanság annyit jelent, hogy a mérés (becslés) várható értéke megegyezik a mért jellemző tényleges értékével. A konzisztencia akkor áll fenn, ha egy jellemzőt többször megmérve a mérések számának növelésével az átlag tetszőlegesen nagy (1-nél kisebb) valószínűséggel, tetszőleges (0-nál nagyobb) pontossággal megközelíti a tényleges értéküket.



A felbontás azt a legkisebb különbséget jelenti, amely mellett két érték egyértelműen megkülönböztethető. A felbontásnak értelemszerűen jóval kisebbnek kell lennie a toleranciánál.

A mérés stabilitása azt a természetes követelményt fogalmazza meg, hogy a mérést azonos körülmények között megismételve „azonos” eredményt kapjunk.

A mérőrendszer elemzés általában kétfaktoros variancia-analízissel (ANOVA) történik, valamely általános célú statisztikai szoftverrel (pl. MS Excel), vagy egí R&R vizsgálatra felkészített speciális szoftverrel (pl. Minitab). Használatos egy egyszerűbb és papíron is kivitelezhető megoldás, mely az átlag-terjedelem kártyák adatai alapján becsli a variancia összetevőket, de ezzel az alkatrész-kezelő együttes hatás nem mutatható ki. (A szoftverek használata előtt ez volt kivitelezhető üzemi körülmények között, de még mai is gyakran használják.)

A vizsgálat során több kezelő (egyik faktor) végez több mérést több terméken (másik faktor), a mérési eredmények kezelőnként és termékeként csoportosítva állnak rendelkezésre. Az analízis alapja a termékekre, a kezelőkre, valamint ezek együttesére jellemző eltérés négyzetösszegek (SS) és varianciák (MS) kiszámítása és összehasonlítása.

A jellemző variancia értékek:

- a **termékek** jellemzőinek varianciája; ideális esetben csak ez mutatkozik meg a mérési eredményekben;
- a mérési folyamatból adódó variancia, ezen belül:
 - o az ugyanazon alkatrészen ugyanazon kezelő által több ismételt mérés során kapott mérési eredmények eltéréséből adódó variancia; ennek mértéke a mérés **ismételhetőségét** (a mérési módszer végrehajtása során előforduló elhelyezési, rögzítési, stb. bizonytalanságot) jellemzi;
 - o az ugyanazon alkatrészekon különböző kezelők által azonos körülmények közt kapott mérési eredmények eltéréséből adódó variancia, ami a mérés **reprodukálhatóságát** jellemzi; ez eredhet
 - a kezelők felkészültségének, képességeinek különbözőségéből, vagy
 - a kezelő és az alkatrész közötti kölcsönhatásból (előfordul, hogy egyes kezelők különböző pontossággal mérik a különböző alkatrészeket).

A varianciák az eltérés négyzetösszegekből származnak. A teljes eltérés négyzetösszeg felbontása:

$$SS_{teljes} = SS_{termék} + SS_{kezelő} + SS_{termék-kezelő} + SS_{ismételhetőség}$$

Az utolsó három tag függ össze a méréssel: $SS_{mérés} = SS_{kezelő} + SS_{termék-kezelő} + SS_{ism}$, ezzel $SS_{teljes} = SS_{termék} + SS_{mérés}$.

A kezelőkkel a középítő két tag függ össze: $SS_{reprodukálhatóság} = SS_{kezelő} + SS_{termék-kezelő}$.

A mérőrendszer jellemzője, hogy az egyes tagok milyen arányban szerepelnek az összegben.

A számolás részletei:

$$SS_{termék} = n_{kezelő} \cdot n \cdot \sum_{i=1}^{n_{termék}} (\bar{x}_{i..} - \bar{x})^2$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n_{termék} \cdot n_{kezelő} \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^{n_{termék}} \sum_{j=1}^{n_{kezelő}} \sum_{k=1}^n x_{ijk}$$



$$SS_{kezelő} = n_{termék} \cdot n \cdot \sum_{j=1}^{n_{kezelő}} (\bar{x}_{.j} - \bar{x})^2$$

$$SS_{ism} = \sum_{i=1}^{n_{termék}} \sum_{j=1}^{n_{kezelő}} \sum_{k=1}^n (x_{ijk} - \bar{x}_{ij})^2$$

$$SS_{teljes} = \sum_{i=1}^{n_{termék}} \sum_{j=1}^{n_{kezelő}} \sum_{k=1}^n (x_{ijk} - \bar{x})^2$$

$$SS_{termék-kezelő} =$$

$$= SS_{teljes} - SS_{termék} - SS_{kezelő} - SS_{ism}$$

$$\bar{x}_{i..} = \frac{1}{n_{kezelő} \cdot n} \cdot \sum_{j=1}^{n_{kezelő}} \sum_{k=1}^n x_{ijk}$$

$$\bar{x}_{.j} = \frac{1}{n_{termék} \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^{n_{termék}} \sum_{k=1}^n x_{ijk}$$

$$\bar{x}_{ij.} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n x_{ijk}$$

ahol $n_{kezelő}$ a kezelők száma, n az egy kezelő által egy terméken ismételt mérések száma, $n_{termék}$ a termékek száma, x_{ijk} a mért értékek, $\bar{x}$ a főátlag, $\bar{x}_{i..}$ az i . terméken mért értékek átlaga, $\bar{x}_{.j}$ a j . kezelő által mért értékek átlaga, $\bar{x}_{ij.}$ az i . terméken a j . kezelő által mért értékek átlaga.

2.2. példa

Végezzünk R&R vizsgálatot az alábbi esetben!

$n_{kezelő} = 3$ kezelő: K1, K2, K3

$n_{termék} = 10$ termék: T1,...,T10

Minden kezelő minden terméket $n = 3$ -szor mér meg.



2.7 táblázat: A 2.2 példa input adatai és átlagok.

kezelő (operator)					termék átlag ($\bar{x}_{i..}$)
x_{ijk}	K1	K2	K3		
termék (part)	T1	496	497	497	$\bar{x}_{1..} = 497.22$
	T1	496	499	498	
	T1	499	497	496	
	T2	498	498	497	$\bar{x}_{2..} = 498.11$
	T2	497	496	499	
	T2	499	499	500	
	T3	498	497	496	$\bar{x}_{3..} = 497.44$
	T3	498	498	498	
	T3	498	497	497	
	T4	497	496	498	$\bar{x}_{4..} = 497.22$
	T4	497	496	497	
	T4	498	499	497	
	T5	499	499	499	$\bar{x}_{5..} = 499.44$
	T5	501	499	499	
	T5	500	499	500	
	T6	499	500	498	$\bar{x}_{6..} = 498.44$
	T6	498	499	498	
	T6	499	497	498	
	T7	503	498	500	$\bar{x}_{7..} = 500.11$
	T7	499	499	499	
	T7	502	499	502	
	T8	500	501	500	$\bar{x}_{8..} = 499.56$
	T8	499	498	501	
	T8	499	499	499	
	T9	499	500	500	$\bar{x}_{9..} = 499.44$
	T9	500	500	499	
	T9	499	498	500	
	T10	497	500	496	$\bar{x}_{10..} = 496.56$



T10	496	494	498
T 10	496	496	496
kezelő átlag ($\bar{x}_{.j}$)	$\bar{x}_{.1} = 498.53$	$\bar{x}_{.2} = 498.13$	$\bar{x}_{.3} = 498.40$
	$\bar{x} = 498.36$		
	főátlag		

2.8 táblázat: A csoportátlagok a 2.2 példában.

csoport átlag ($\bar{x}_{ij.}$)	K1	K2	K3
T1	497.00	497.67	497.00
T2	498.00	497.67	498.67
T3	498.00	497.33	497.00
T4	497.33	497.00	497.33
T5	500.00	499.00	499.33
T6	498.67	498.67	498.00
T7	501.33	498.67	500.33
T8	499.33	499.33	500.00
T9	499.33	499.33	499.67
T10	496.33	496.67	496.67

$$SS_{termék} = n_{kezelő} \cdot n \cdot \sum_{i=1}^{n_{termék}} (\bar{x}_{i..} - \bar{x})^2 = 3 \cdot 3 \cdot \sum_{i=1}^{10} (\bar{x}_{i..} - 498.36)^2 = 122.40$$

$$SS_{kezelő} = n_{termék} \cdot n \cdot \sum_{j=1}^{n_{kezelő}} (\bar{x}_{.j} - \bar{x})^2 = 10 \cdot 3 \cdot \sum_{j=1}^3 (\bar{x}_{.j} - 498.36)^2 = 2.49$$

$$SS_{ism} = \sum_{i=1}^{n_{termék}} \sum_{j=1}^{n_{kezelő}} \sum_{k=1}^n (x_{ijk} - \bar{x}_{ij.})^2 = \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 (x_{ijk} - \bar{x}_{ij.})^2 = 87.33$$

$$SS_{teljes} = \sum_{i=1}^{n_{termék}} \sum_{j=1}^{n_{kezelő}} \sum_{k=1}^n (x_{ijk} - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 (x_{ijk} - 498.36)^2 = 228.62$$

$$SS_{termék-kezelő} = SS_{teljes} - SS_{termék} - SS_{kezelő} - SS_{ism} = 16.40$$



2.9 táblázat: Eltérés négyzetösszegek a 2.2. példában.

termék	$SS_{termék} = 122.40$	54%				
mérés	$SS_{mérés} = 106.22$	46%				
ebből:		reprodukálhatóság	$SS_{repr} = 18.89$	8%		
			ebből:	kezelő	$SS_{kezelő} = 2.49$	1%
				termék-kezelő	$SS_{termék-kezelő} = 16.40$	7%
		ismételhetőség	$SS_{ism} = 87.33$	38%		
összesen	$SS_{teljes} = 228.62$	100%				

Az ANOVA eredményei a 2.10 táblázatban vannak összefoglalva.

2.10 táblázat. ANOVA eredménye a 2.2. példában.

	SS	df	$MS = \frac{SS}{df}$	$F = \frac{SS}{SS_{ism}}$	F_{krit}
termék	122.40	9	13.600	9.344	2.040
kezelő	2.49	2	1.244	0.855	3.150
termék-kezelő	16.40	18	0.911	0.626	1.778
ismételhetőség	87.33	60	1.456		
összesen	228.62				

FELHASZNÁLT SZAKIRODALOM

- [1] CSIKÓS Istvánné, JUHÁSZ Tibor: Minőségtervezés és irányítás, Statisztikai folyamatszabályozás (SPC), Novorg, Budapest, 1997.
- [2] TÓTH Csaba László, TÓTH László: *A minőség a fenntartható fejlődésért, Amikor a minőséget előre megtervezzük – 1. rész*, Magyar Minőség, XXI. (10) 2012., 40-47.
- [3] BHOTE, K.R.: *World Class Quality, Design of experiments made easier, more cost effective than SPC*, AMA Membership Publication Division, American Management Association, 1988.



- [4] KEMÉNY Sándor: Statisztikai minőség- (megfelelőség-) szabályozás, Műszaki Könyvkiadó – Magyar Minőség Társaság, Budapest, 1999.
- [5] What's new in Condmaster®Nova 2010 <http://www.timken.com/en-us/products/maintdiag/reliability/products/Documents/71904B%20Whats%20new%20in%202010.pdf> (letöltés: 2015.06.26.)
- [6] <https://www.quinn-curtis.com/QCSPCChartProdPage.htm> (letöltés: 2015.06.26.)



3 A JELEK ELEMZÉSÉNEK MÓDSZEREI

A műszaki folyamatok jellemzőinek időbeli változását leíró függvények elemzésekor sok esetben természetes módon vetődik fel a gondolat, hogy egy függvény valamely függvényosztálybeli függvények lineáris kombinációja.

Például egy gép rezgését vizsgálva jó közelítéssel feltételezhetjük, hogy egy kiegyensúlyozatlan forgó alkatrész harmonikus gerjesztő hatást gyakorol a géptestre. Ha egy több forgó alkatrészt tartalmazó gép rezgését leíró (általában igen bonyolult képet mutató) kitérés-idő függvényt tekintjük, akkor – a mechanikából ismert szuperpozíció elvét figyelembe véve – joggal gondolhatjuk, hogy a látott rezgésekép harmonikus (szinusz) függvények lineáris kombinációja.

Vagy – maradva a gépek rezgésdiagnosztikájánál – ha alkatrészek felületei ütésszerűen érintkeznek, akkor a géptestben impulzusszerű (gyorsan csillapodó) lökeshullám indul, ami tranziens hatásként jelenik meg a rezgéseképben. Ilyen esetben időben lokalizált mintázatot (waveletet) kell keresnünk a függvényben ahhoz, hogy az ütésimpulzus jelenlétét érzékeljük.

Vannak olyan esetek, amikor a gyors változások („élek”) jelenlétének van információtartalma, ebben az esetben azt célszerű megvizsgálni, hogy periodikus négyszögjelek, vagy négyszögjel szakaszok (Haar waveletek) vannak-e a jelben.

A függvények felbontásával (dekompozíciójával) a matematika egyik fontos területe, az ortogonális függvénytér elmélete foglalkozik, melynek alapja a klasszikus Fourier elmélet, aminek fókuszában a periodikus függvények trigonometrikus függvényekre való felbontása áll. (Fourier eredetileg a rezgő húr tetszőleges állapotának trigonometrikus komponensekkel való felírhatóságát állította, hozzátevé, hogy a komponensek száma általában nem véges.)

Az a kérdés, hogy egyes függvények milyen függvényrendszer elemeinek segítségével és hogyan állíthatók elő, annak általánosítása, hogy a lineáris térben mik a bázisok, és mik az egyes elemek koordinátái egy adott bázisban. A válasz összefügg a belső (skaláris) szorzással, illetve a merőlegességgel (ortogonalitás) fogalmával. Egyszerű példaként tekintsük a geometriai vektorok terét. Egy $\vec{v}$ vektor felbontása egy $\{\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3\}$ ortonormált bázisban (a bázisban egymásra páronként merőleges egységvektorok vannak):

$$\vec{v} = \langle \vec{v}, \vec{e}_1 \rangle \cdot \vec{e}_1 + \langle \vec{v}, \vec{e}_2 \rangle \cdot \vec{e}_2 + \langle \vec{v}, \vec{e}_3 \rangle \cdot \vec{e}_3$$

ahol $\langle \rangle$ a belső szorzást jelöli. Jól látható, hogy a felbontás együtthatói a vizsgált elemnek az ortonormált rendszer elemeivel képzett belső szorzatai. Ehhez hasonló konstrukcióval találkozunk a függvényterekben végzett vizsgálatokban is.

A korszerű műszaki diagnosztikában digitális mérőrendszereket használnak, így mintavételezéssel kapott adatokkal kell dolgozni, és ezekre az adathalmazokra ún. diszkrét transzformációkat kell alkalmazni. Ezek megvalósítása és értelmezése eltér az intervallumon értelmezett függvényekre vonatkozó klasszikus eredményektől, de a megértést segíti, ha röviden áttekintjük a folytonos periodikus függvények elemzésére szolgáló Fourier sorra, ill. a folytonos nem periodikus függvények esetén alkalmazott Fourier transzformációra vonatkozó alapvető megállapításokat.



3.1 Ortonormált függvényrendszerek

Egy lineáris teret Hilbert térnek nevezünk, ha benne értelmezve van ún. belső szorzás, és a tér teljes a belső szorzásból származó normában. (A teljesség fogalmát nem részletezzük, de utalunk a valós számok halmaza teljességének analóg fogalmára.)

Fontos példák Hilbert térre az Euklideszi terek (pl. geometriai vektorok tere, a valós vagy komplex szám n -esek tere) és számos függvénytér, például a négyzetesen integrálható függvények tere. A négyzetesen integrálható függvények központi szerepet játszanak a továbbiakban. (A célszerűség kedvéért komplex értékű függvényekkel dolgozunk.)

A belső szorzás fogalmából származnak az ortogonalitás és ezen keresztül az ortogonális rendszer, ortogonális felbontás fogalmak. A geometriai vektorok körében jól ismertek ezek a fogalmak, amik megalapozzák a függvényterekben megjelenő összefüggések megértését.

Az X (komplex) lineáris téren értelmezett $\langle \cdot, \cdot \rangle: X \times X \rightarrow \mathbb{C}$ függvényt belső szorzásnak nevezzük, ha bármely $x, y, z \in X$ és $\lambda \in \mathbb{C}$ skalár esetén fennáll, hogy

1. $\langle x, x \rangle \geq 0, \langle x, x \rangle = 0 \Leftrightarrow x = 0$
2. $\langle x, y \rangle = \overline{\langle y, x \rangle}$
3. $\langle \lambda \cdot x, y \rangle = \lambda \cdot \langle x, y \rangle$
4. $\langle x + y, z \rangle = \langle x, z \rangle + \langle y, z \rangle$

– itt és a továbbiakban a komplex konjugálás műveletet jelöli.

Az $(X, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ struktúrát belső szorzat térnek nevezzük. Az $(X, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ belső szorzat téren az $\| \cdot \|: X \rightarrow \mathbb{C}, \|x\| = \sqrt{\langle x, x \rangle}$ függvényt normának nevezzük.

Egy $[a, b]$ intervallumon értelmezett négyzetesen integrálható $[a, b] \rightarrow \mathbb{C}$ függvények tere Hilbert tér, ahol az $f, g: [a, b] \rightarrow \mathbb{C}$ függvények belső szorzata a következőképpen van értelmezve:

$$\langle f, g \rangle = \int_a^b f \cdot \bar{g},$$

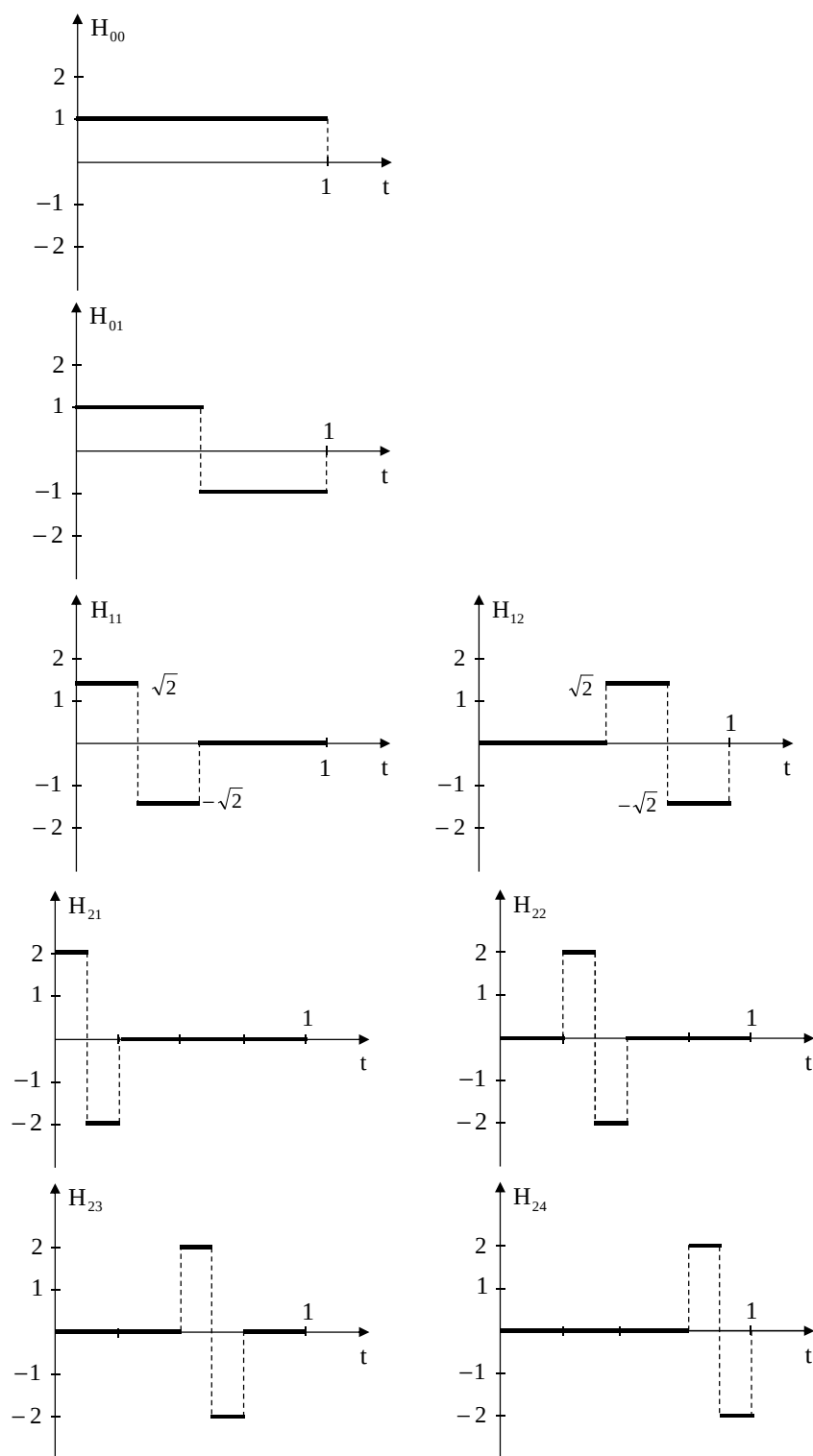
amiből a norma: $\|f\| = \sqrt{\langle f, f \rangle} = \sqrt{\int_a^b |f|^2}$.

Az $f, g: [a, b] \rightarrow \mathbb{C}$ négyzetesen integrálható függvények ortogonálisak, ha $\langle f, g \rangle = \int_a^b f \cdot \bar{g} = 0$.

Egy Hilbert tér elemeinek egy halmazát ortogonális rendszernek nevezzük, ha elemei páronként ortogonálisak. Ha egy ortogonális rendszer minden eleme egységnyi normájú, akkor ortonormált rendszerről beszélünk.

Egy végtelen dimenziós Hilbert térben egy megszámlálhatóan végtelen számosságú $\{\varphi_1, \varphi_2, \dots\}$ ortonormált rendszert ortonormált sorozatnak, ebből az $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ skalárokkal képzett $\sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i \cdot \varphi_i$ összeget ortogonális sornak nevezzük.

Egy Hilbert térben egy f elemnek egy $\{\varphi_1, \varphi_2, \dots\}$ ortonormált sorozatra vonatkozó Fourier együtthatói: $\hat{f}_k = \langle f, \varphi_k \rangle, k = 1, 2, \dots$, Fourier sora pedig $\sum_{k=1}^{\infty} \hat{f}_k \cdot \varphi_k = \sum_{k=1}^{\infty} \langle f, \varphi_k \rangle \cdot \varphi_k$.



3.1 ábra: A Haar-rendszer néhány eleme.



A négyzetesen integrálható $[a, b] \rightarrow \mathbb{C}$ függvények terében egy f függvény Fourier együtthatói egy $\{\varphi_1, \varphi_2, \dots\}$ ortonormált sorozatra vonatkozóan: $\hat{f}_k = \langle f, \varphi_k \rangle = \int_a^b f \cdot \bar{\varphi}_k, k = 1, 2, \dots$, Fourier sora pedig

$$\sum_{k=1}^{\infty} \hat{f}_k \cdot \varphi_k = \sum_{k=1}^{\infty} \langle f, \varphi_k \rangle \cdot \varphi_k = \sum_{k=1}^{\infty} \left(\int_a^b f \cdot \bar{\varphi}_k \right) \cdot \varphi_k.$$

Egy $\{\varphi_1, \varphi_2, \dots\}$ ortonormált sorozatot teljesnek nevezünk, ha abból, hogy $\langle f, \varphi_k \rangle = 0, k \in \mathbb{N}$ következik, hogy $f = 0$.

Ortogonalis rendszer például a trigonometrikus rendszer és az exponenciális rendszer, melyekről az alábbiakban részletesen szólnunk, a különböző ortogonalis polinomrendszerek (pl. Legendre polinomok), a Haar-, a Rademacher- és a Walsh-rendszer.

A Legendre polinom rendszer elemei a $t \rightarrow (t^2 - 1)^n$ függvény deriválásával képzett, a $[-1, 1]$ intervallumon értelmezett

$$P_n(t) = \frac{1}{2^n \cdot n!} \cdot \frac{d^n}{dt^n} (t^2 - 1)^n$$

polinomok.

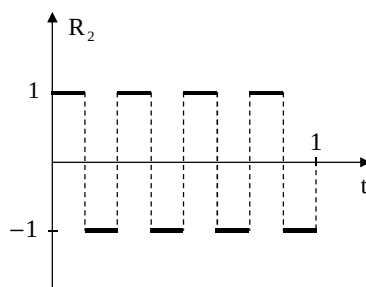
Négyszögfüggvényekkel kapcsolatos függvényrendszer a Haar-rendszer. A H_{00} és a H_{01} függvényeket a 3.1 ábra mutatja. A további $H_{mk}, m = 1, 2, \dots, k = 1, 2, \dots, 2^m$ függvények úgy állnak elő, hogy a $[0, 1]$ intervallumot 2^m egyenlő részre osztjuk, a H_{mk} függvény értéke a k -adik intervallumon kívül 0, a k -adik intervallum első felében $+2^{-\frac{m}{2}}$, a második felében $-2^{-\frac{m}{2}}$ az értéke. A H_{mk} függvények képlettel az alábbiak szerint adhatók meg:

$$H_{mk}(t) = \begin{cases} 2^{-\frac{m}{2}}, & \text{ha } \frac{k-1}{2^n} \leq t < \frac{k}{2^n} \\ -2^{-\frac{m}{2}}, & \text{ha } \frac{k-1}{2^n} < t \leq \frac{k}{2^n} \\ 0 & \text{egyébként} \end{cases}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, k = 1, 2, \dots, 2^n$$

A Haar-rendszernél jobb tulajdonságokkal rendelkezik a belőle származtatott Rademacher-rendszer, illetve a Rademacher-rendszert teljessé tevő Walsh-rendszer [2].

Rademacher-rendszer elemei:

$$R_0 = H_{00}, \quad R_1 = H_{10}, \quad R_n = 2^{-\frac{n}{2}} \cdot \sum_{k=1}^{2^n} H_{nk}, \quad n = 1, 2, \dots$$



3.2 ábra: A Rademacher-rendszer egy eleme.

Walsh-rendszer elemei:

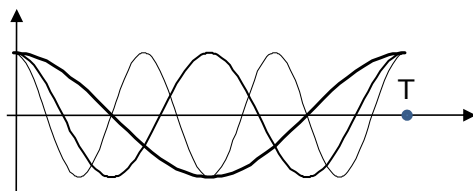
$$W_0 = R_0, \quad W_1 = R_1, \quad W_n = R_{n_1+1} + R_{n_2+1} + \dots + R_{n_p+1}$$

ahol $n = 2^{n_1} + 2^{n_2} + \dots + 2^{n_p}$ az n bináris előállítása.

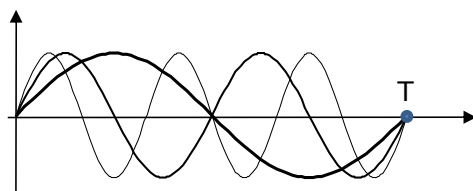
A Walsh-rendszer szerinti előállítások szerepe jelentős a műszaki rendszerek vizsgálatában. [2]

3.2 Klasszikus Fourier sorok

A klasszikus Fourier elmélet alapja a $\left\{ \cos\left(k \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t\right), \sin\left(k \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t\right), k = 1, 2, \dots \right\}$ trigonometrikus rendszer a T periódusú függvények elemzésében.



3.3 ábra: $t \rightarrow \cos\left(k \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t\right)$ függvények, $k=1,2,3$.



3.4 ábra: $t \rightarrow \sin\left(k \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t\right)$ függvények, $k=1,2,3$.

Az exponenciális és a trigonometrikus függvények közt kapcsolatot teremtő $e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \cdot \sin \varphi$ Euler formula alapján a trigonometrikus felbontással egyenértékű az $\left\{ e^{i \cdot k \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t}, k \in \mathbb{Z} \right\}$ exponenciális függvényeken alapuló felbontás. Az exponenciális függvények használata kényelmesebb, továbbá az általánosítások is az exponenciális alakból vezethetők le. Ezért a T periódusú függvények felbontását az exponenciális rendszerrel írjuk le.

A négyzetesen integrálható, T periódusú $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ függvények terében az $\{e^{i \cdot k \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t}, k \in \mathbb{Z}\}$ függvények teljes ortogonális rendszert alkotnak. Itt egy f függvény Fourier együtthatói:

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

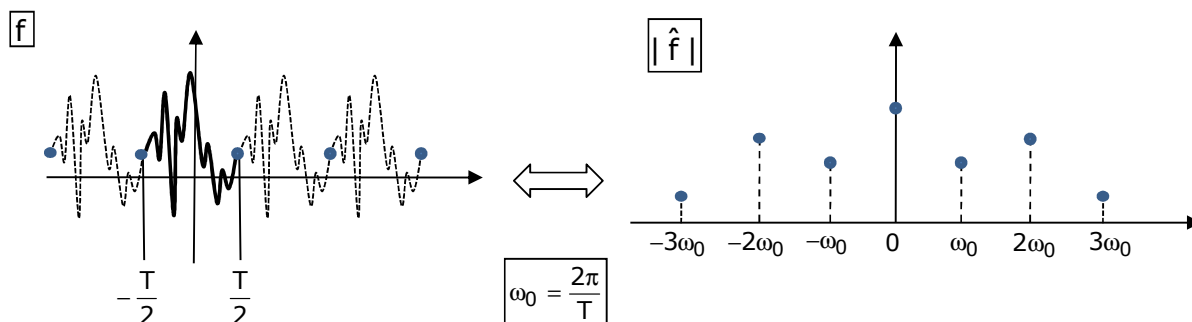
Fourier sora:

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

A $\frac{2\pi}{T} = \omega_0$ jelöléssel élve (ω_0 az „alap körfrekvencia”, $k \cdot \omega_0$ a felharmonikusok körfrekvenciái), 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. A rezgésdiagnosztikában inkább használatos $\left[\frac{1}{s}\right] = [Hz]$ dimenziójú frekvencia, de a formulák kényelmesebben írhatók a $\left[\frac{rad}{s}\right]$ dimenziójú ω körfrekvenciával, ami a frekvencia 2π -szerese.

Megjegyzések

1. Az $\hat{f}_k$ együtthatók és az $e^{i \cdot k \cdot \omega_0 \cdot t}$ függvények értékei is komplex számok, de a Fourier sor részletösszegei és összegfüggvénye valós értékű függvény.
2. A k index $-\infty$ -tól $+\infty$ -ig fut, így a felbontásban „negatív frekvenciák” is jelen vannak. Valójában csak a pozitív frekvenciáknak van fizikai jelentése, de ezek „duplán” jelennek meg a komplex spektrumban.
3. $\hat{f}_k = \overline{\hat{f}_{-k}}, k \in \mathbb{Z}$, amiből azonnal adódik az is, hogy $|\hat{f}_k| = |\hat{f}_{-k}|, k \in \mathbb{Z}$, vagyis a spektrum szimmetrikus.
4. A $k \cdot \omega_0 \rightarrow |\hat{f}_k|$ függvényt amplitúdó spektrumnak, a $k \cdot \omega_0 \rightarrow \arg(\hat{f}_k)$ függvényt fázis spektrumnak, a $k \cdot \omega_0 \rightarrow |\hat{f}_k|^2$ függvényt energia spektrumnak nevezzük.



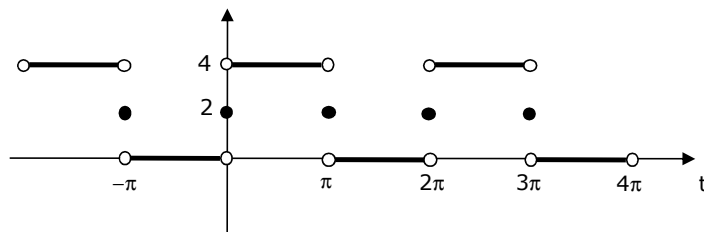
3.5 ábra: Periodikus jel frekvenciaspektruma.

Egy mechanikai rezgés, vagy elektromos jel esetén az amplitúdók négyzetének integrálja (vagy összege) arányos az energiatartalommal úgy az idő, mint a frekvenciatartományban. A kétfajta kifejezést, és ezek egyenlőségét a Parseval formula mutatja:

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

3.1. példa

Az $f(t) = \begin{cases} 0, & \text{ha } -\pi < t < 0 \\ 2, & \text{ha } t = 0 \\ 4, & \text{ha } 0 < t < \pi \\ 2, & \text{ha } t = \pi \end{cases}$ $T = 2\pi$ periódusú négyszögjel exponenciális Fourier sora:



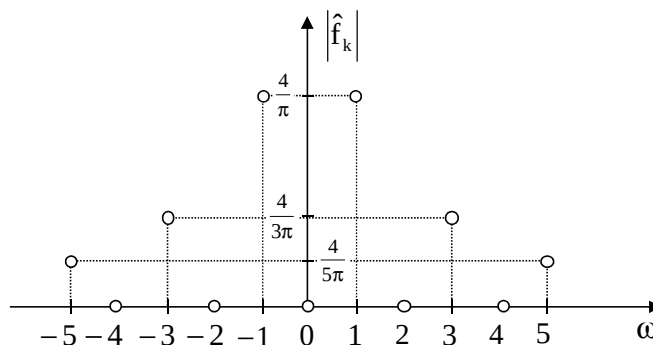
3.6 ábra: Az f függvény grafikonja a 3.1. példában.

$$\hat{f}_k = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cdot e^{-i \cdot k \cdot t} dt = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} 4 \cdot e^{-i \cdot k \cdot t} dt = \frac{4}{-2\pi \cdot i \cdot k} \cdot [e^{-i \cdot k \cdot t}]_0^{\pi} = \frac{-2}{\pi \cdot i \cdot k} \cdot (e^{-i \cdot k \cdot \pi} - 1)$$

Ha k páros, akkor $\hat{f}_k = 0$, ha k páratlan, akkor $\hat{f}_k = \frac{-4 \cdot i}{k \cdot \pi}$. Így a Fourier sor

$$\mathcal{FS}f(t) = 2 + \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{-4 \cdot i}{(2k-1) \cdot \pi} \cdot e^{i \cdot (2k-1) \cdot t}$$

Ha k páros, akkor $|\hat{f}_k| = 0$, ha k páratlan, akkor $|\hat{f}_k| = \frac{4}{k \cdot \pi}$, így a spektrum ($\omega_0 = 1$):



3.7 ábra: „Komplex” spektrum.

A négyzetesen integrálható, T periódusú $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ függvények terében teljes ortogonális rendszert alkotnak a

$$\left\{ t \rightarrow 1, t \rightarrow \cos\left(k \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t\right), t \rightarrow \sin\left(k \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t\right), k = 1, 2, \dots \right\}$$

függvények. Ezt a függvényrendszert trigonometrikus rendszernek nevezzük. A konstans 1 függvénytől eltekintve, a rendszer olyan koszinusz és szinusz függvényekből áll, melyek periódusa $\frac{T}{k}$, ahol k pozitív egész szám.



A már említett Euler formula, valamint a koszinusz függvény páros és a szinusz függvény páratlan jellege ($\cos x = \cos(-x)$, $\sin x = -\sin(-x)$, $x \in \mathbb{R}$) alapján az alábbi számolással jutunk a trigonometrikus rendszer szerinti felbontáshoz.

$$\hat{f}_k = \frac{1}{T} \cdot \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cdot e^{-i \cdot k \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t} dt = \frac{1}{T} \cdot \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cdot \cos\left(k \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t\right) dt - i \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cdot \sin\left(k \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t\right) dt$$

Ezzel a Fourier sor:

$$\begin{aligned} \mathcal{F}Sf(t) &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} \hat{f}_k \cdot e^{i \cdot k \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \hat{f}_k \cdot \cos\left(k \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t\right) + i \cdot \sum_{k=-\infty}^{\infty} \hat{f}_k \cdot \sin\left(k \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t\right) = \\ &= \hat{f}_0 + \sum_{k=-\infty}^{\infty} (\hat{f}_k + \hat{f}_{-k}) \cdot \cos\left(k \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t\right) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} i \cdot (\hat{f}_k - \hat{f}_{-k}) \cdot \sin\left(k \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t\right) = \\ &= \hat{a}_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \hat{a}_k \cdot \cos\left(k \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t\right) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} \hat{b}_k \cdot \sin\left(k \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t\right), \end{aligned}$$

ahol

$$\hat{a}_0 = \hat{f}_0 = \frac{1}{T} \cdot \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt,$$

$$\hat{a}_k = \hat{f}_k + \hat{f}_{-k} = \frac{2}{T} \cdot \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cdot \cos\left(k \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t\right) dt, k = 1, 2, \dots$$

$$\hat{b}_k = i \cdot (\hat{f}_k - \hat{f}_{-k}) = \frac{2}{T} \cdot \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cdot \sin\left(k \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t\right) dt, k = 1, 2, \dots$$

Az $\hat{a}_k$ és a $\hat{b}_k$ valós számok az f függvény Fourier együtthatói a trigonometrikus rendszerre nézve. (A felírásban szereplő két összeget az f függvény *koszinusz*, illetve *szinusz Fourier sorának* is szokás nevezni.)

Érdemes megjegyezni, hogy ha f páros, akkor a $\hat{b}_k$ együtthatók értéke 0 (a felbontásban nincsenek szinuszos tagok), ha f páratlan, akkor az $\hat{a}_k$ együtthatók értéke 0 (a felbontásban nincsenek koszinuszos tagok).

A Fourier együtthatók összefüggése másképpen kifejezve:

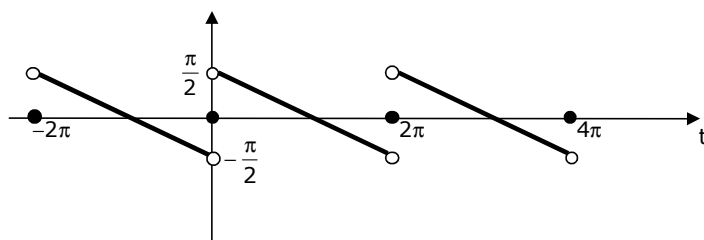
$$\hat{f}_k = \frac{\hat{a}_k - \hat{b}_k \cdot i}{2}, k = 1, 2, \dots, \quad \hat{f}_k = \frac{\hat{a}_{-k} + \hat{b}_{-k} \cdot i}{2}, k = -1, -2, \dots$$

amiből látszik, hogy a páros függvények komplex Fourier együtthatói tisztán valósak, páratlan függvény komplex Fourier együtthatói tisztán képzetesek. A komplex Fourier együtthatók nagysága és a valós Fourier együtthatók összefüggése: $|\hat{f}_k| = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\hat{a}_k^2 + \hat{b}_k^2}, k \in \mathbb{Z}$. A Parseval egyenlőség megfelelője:

$$\frac{1}{T} \cdot \int_{-T/2}^{T/2} f^2(t) dt = \hat{a}_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} \hat{a}_k^2 + \sum_{k=1}^{\infty} \hat{b}_k^2$$

3.2. példa

Az $f(t) = \begin{cases} 0, & \text{ha } t = 0 \\ -\frac{1}{2}t + \frac{\pi}{2}, & \text{ha } t \in]0, 2\pi[\end{cases}$ $T = 2\pi$ periódusú függvény Fourier sora:



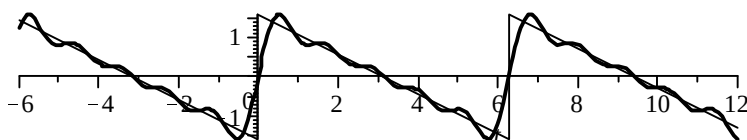
3.8 ábra: Az f függvény képe a 3.2. példában.

Mivel páratlan függvényről van szó, $\hat{a}_k = 0, k = 0, 1, 2, \dots$, $\hat{b}_k = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} \left(-\frac{1}{2}t + \frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin(k \cdot t) dt = \frac{1}{k}, k = 1, 2, \dots$ A Fourier sor

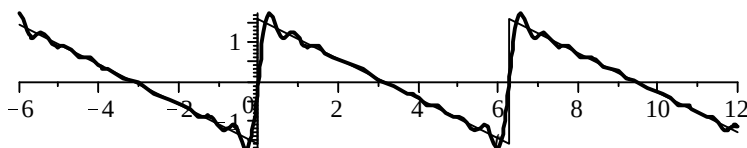
$$\mathcal{FS}f(t) = 1 \cdot \sin t + \frac{1}{2} \cdot \sin 2t + \frac{1}{3} \cdot \sin 3t + \dots = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \cdot \sin kt$$

A 3.9. ábra két részletösszeget mutat:

$$t \rightarrow \sum_{k=1}^5 \frac{1}{k} \cdot \sin kt$$



$$t \rightarrow \sum_{k=1}^{10} \frac{1}{k} \cdot \sin kt$$



3.9 ábra: A Fourier sor két részletösszege.

3.3. példa

A korábban már vizsgált $f(t) = \begin{cases} 0, & \text{ha } -\pi < t < 0 \\ 2, & \text{ha } t = 0 \\ 4, & \text{ha } 0 < t < \pi \\ 2, & \text{ha } t = \pi \end{cases}$ négyszögjel Fourier sora:

$$\hat{a}_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} f(t) dt = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{\pi} 4 dt = 2,$$



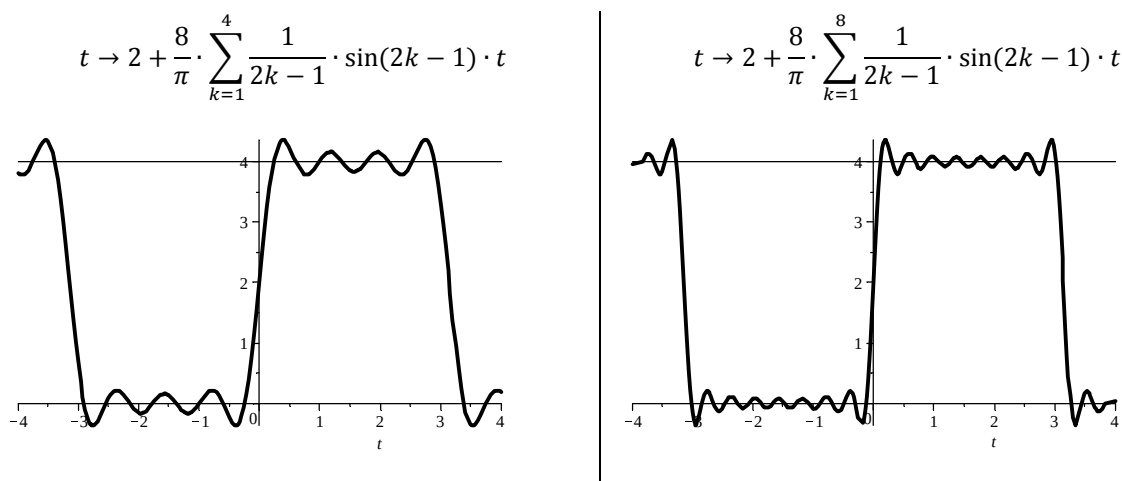
$$\hat{a}_k = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cdot \cos(k \cdot t) dt = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{\pi} 4 \cdot \cos(k \cdot t) dt = 0, k = 1, 2, \dots$$

$$\hat{b}_k = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cdot \sin(k \cdot t) dt = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{\pi} 4 \cdot \sin(k \cdot t) dt = \frac{4}{k \cdot \pi} \cdot (1 - \cos(k \cdot \pi)), k = 1, 2, \dots$$

Ha k páros, akkor $\hat{b}_k = 0$, ha k páratlan, akkor $\hat{b}_k = \frac{8}{k \cdot \pi}$. Így a Fourier sor:

$$\mathcal{FS}f(t) = 2 + \frac{8}{\pi} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2k-1} \cdot \sin(2k-1) \cdot t$$

Két részletösszeg:



3.10 ábra: A Fourier sor két részletösszege.

Érdemes megjegyezni, hogy a közelítés a vizsgált függvény ugrásainál lassabb (Gibbs jelenség).

Megjegyzés

A spektrum meghatározásakor zavaró lehet, hogy a trigonometrikus rendszer szerinti felbontásban egy frekvencia két tagban is szerepelhet (egy koszinuszban és egy szinuszosban). Ezt a problémát kezelhetjük az

$$\hat{a}_k \cdot \cos\left(k \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t\right) + \hat{b}_k \cdot \sin\left(k \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t\right) = \sqrt{\hat{a}_k^2 + \hat{b}_k^2} \cdot \sin\left(k \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t + \arctan \frac{\hat{a}_k}{\hat{b}_k}\right)$$

összefüggésekkel, mellyel a Fourier sor a következő alakot ölti:

$$\mathcal{FS}f(t) = \hat{a}_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \hat{A}_k \cdot \sin\left(k \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t + \varphi_k\right),$$

ahol $\hat{A}_k = \sqrt{\hat{a}_k^2 + \hat{b}_k^2}$, $\varphi_k = \arctan \frac{\hat{a}_k}{\hat{b}_k}$, $k = 1, 2, \dots$ (Vessük ezt össze a komplex és a valós Fourier együtthatók $|\hat{f}_k| = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\hat{a}_k^2 + \hat{b}_k^2}$ összefüggésével!)



3.3 Fourier transzformáció

A matematikában gyakran alkalmazott módszer, hogy transzformáljuk egy halmaz (rendszer) elemeit annak érdekében, hogy a képhalmazban könnyebben elvégezhessünk bizonyos vizsgálatokat. Legegyszerűbb példa erre az, amikor geometriai vektorok helyett azok koordinátaival, tehát szám n -esekkel dolgozunk. Ide sorolhatjuk azt is, amikor egy periodikus függvényt a Fourier együtthatóinak sorozatával azonosítunk. Egyes folyamatok vizsgálatakor ilyen jellegű transzformáció, amikor az „időtartományból” a „frekvenci tartományba” térünk át.

Az ilyen célú transzformációk között igen fontosak az ún. integráltranszformációk. Integráltranszformáción egy valós $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ függvény esetén azt értjük, hogy a függvényhez egy

$$F(s) = \int_a^b f(t) \cdot K(t, s) dt$$

összefüggéssel definiált F valós vagy komplex függvényt rendelünk hozzá. A transzformációt a K magfüggvény határozza meg. A műszaki alkalmazásokban kitüntetett szerepük van a $K(t, s) = e^{-s \cdot t}, s \in \mathbb{C}$ típusú magfüggvénnyel definiált Fourier, ill. Laplace transzformációknak.

Egy $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ integrálható függvény Fourier transzformáltja

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

Fourier integrálja

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

A Fourier együtthatók és a Fourier sor definíciójával összevetve ezeket a formulákat az analógia könnyen felfedezhető. Míg a periodikus függvények esetén egy periódusra számított integrálokkal diszkrét $k \cdot \omega_0$ körfrekvenciákhoz kapjuk a Fourier együtthatókat, addig a Fourier transzformáció esetén a teljes számegyenesen számított integrálokkal tetszőleges valós ω körfrekvenciákhoz kapunk $\hat{f}(\omega)$ értékeket. A Fourier sorok gondolatvilágából kiindulva a Fourier integrált szokás úgy interpretálni, mint végtelen hosszú periódusú határesetet, amikor $T \rightarrow \infty$, $\omega_0 \rightarrow 0$, ahol a spektrumban megjelenő frekvenciák „diszkrétisége” megszűnik.

A komplex értékű $\hat{f}(\omega), \omega \in \mathbb{R}$ függvényből számított $\omega \rightarrow |\hat{f}(\omega)|, \omega \in \mathbb{R}$ „komplex” spektrum szimmetrikus függvény, ahogyan az $|\hat{f}_k|, k \in \mathbb{Z}$ Fourier együtthatók is szimmetriát mutatnak.

A Fourier soroknál látott módon itt is szétbontható a transzformált koszinusz és szinuszos függvényekkel származtatott részekre. Az Euler formula alapján:

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

ahol $\hat{a}(\omega)$, ill. $\hat{b}(\omega)$ az f koszinusz és a szinuszos Fourier transzformáltjai:



$$\hat{a}(\omega) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{t=-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \cos(\omega \cdot t) dt, \quad \omega \geq 0,$$

$$\hat{b}(\omega) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{t=-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \sin(\omega \cdot t) dt, \quad \omega \geq 0,$$

az f Fourier integrálja pedig

$$\mathcal{F}f(t) = \int_{\omega=0}^{\infty} \hat{a}(\omega) \cdot \cos(\omega \cdot t) d\omega + \int_{\omega=0}^{\infty} \hat{b}(\omega) \cdot \sin(\omega \cdot t) d\omega, \quad \omega \in \mathbb{R}.$$

Páratlan függvény koszinusz Fourier transzformáltja, ill. páros függvény szinuszos Fourier transzformáltja nulla. Ezt összevetve a fentiekkel világos, hogy páros függvény Fourier transzformáltja tisztán valós értékű, páratlan függvény Fourier transzformáltja tisztán képzetes értékű függvény.

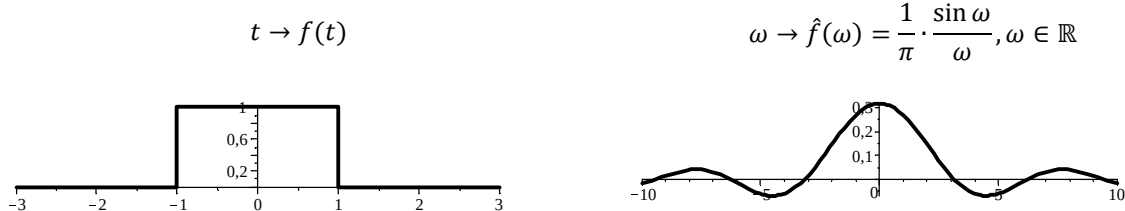
3.4. példa

Az $f(t) = \begin{cases} 1, & \text{ha } -1 \leq t \leq 1 \\ 0, & \text{egyébként} \end{cases}$ négyzet jel Fourier transzformáltja:

$$\hat{f}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{t=-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-i\omega \cdot t} dt = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{t=-1}^1 e^{-i\omega \cdot t} dt = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\sin \omega}{\omega}.$$

Így az f függvény Fourier integrálja (előállítás):

$$f(t) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{\omega=-\infty}^{\infty} \frac{\sin \omega}{\omega} \cdot e^{i\omega \cdot t} d\omega.$$



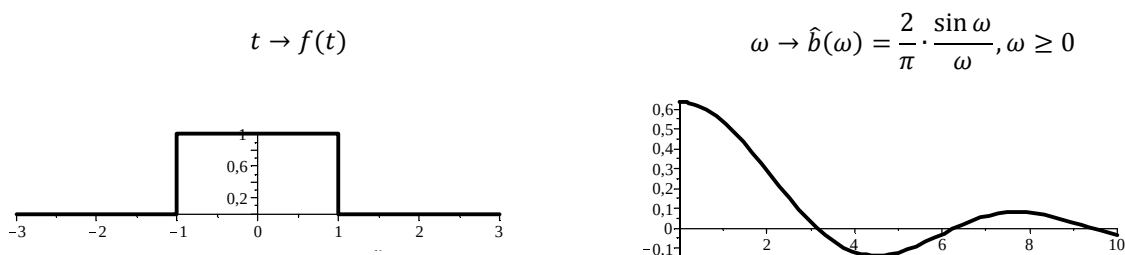
3.11 ábra: Az f függvény és annak „komplex” spektruma.

A számolást elvégezzük a trigonometrikus függvényeket tartalmazó formulákkal is. A jel szinuszos Fourier transzformáltja nulla, mivel páros függvény. A jel koszinusz Fourier transzformáltja:

$$\hat{b}(\omega) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{t=-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \sin(\omega \cdot t) dt = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{t=-1}^1 \sin(\omega \cdot t) dt = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\sin \omega}{\omega}.$$

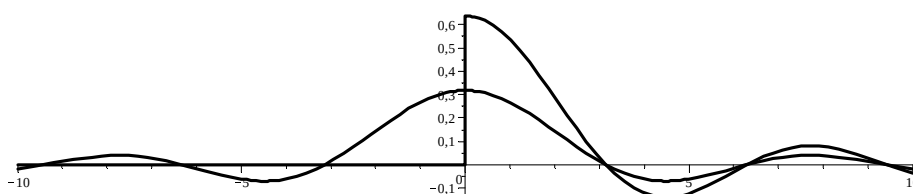
Így az f függvény előállítás:

$$f(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \int_{\omega=0}^{\infty} \frac{\sin \omega}{\omega} \cdot \cos(\omega \cdot t) d\omega.$$



3.12 ábra: Az f függvény és annak „valós” spektruma a 3.4 példában.

A két transzformáltat összehasonlítva jól láthatók a korábban megfogalmazott összefüggések:



3.13 ábra: A valós és a komplex spektrum összehasonlítása.

Parseval egyenlőség, energiatartalom

Egy nemperiodikus folytonos jel energiatartalma az idő-, illetve a frekvenciatartományban:

$$\frac{1}{2\pi} \cdot \int_{t=-\infty}^{\infty} f^2(t) dt = \int_{\omega=-\infty}^{\infty} |\hat{f}(\omega)|^2 d\omega.$$

3.4. Diszkrét Fourier transzformáció

A Fourier sor és a Fourier integrál fogalmak képezik az elmélet és az absztrakt számolások alapját. A gyakorlatban az ezekhez kapcsolódó formulák nem alkalmazhatók közvetlenül, mert nem áll rendelkezésre a függvények értéke a teljes számegyenesen. A digitális mérés és adattárolás miatt csak meghatározott időtartam alatt mért véges sok függvényérték ismert. A digitális jelfeldolgozásban az időtartománybeli minta alapján – vagyis a jelre vonatkozó korlátozott információ mellett – kell a spektrumot a lehető legpontosabban meghatározni.

A diszkrét Fourier transzformáció (DFT) fogalma és az ehhez kapcsolódó elmélet választ ad arra, hogy miként lehet a rendelkezésre álló véges sok függvényértékből kiindulva a lehető legpontosabban előállítani a spektrumot, miként lehet a torzító hatásokat csökkenteni.

A diszkrét jelek elemzésekor a gyakorlatban azzal is szembe kell nézni, hogy a számítógépek adatátviteli és számítási sebessége, valamint a tároló kapacitása véges. Ez



határt szab az eredmény pontosságának, mert minél pontosabb elemzést szeretnénk, annál több erőforrásra és időre van szükség. A számítási igény csökkentésére több algoritmust dolgoztak ki, ezeket gyors Fourier transzformáció (FFT) néven emlegetjük.

A diszkrét Fourier transzformáció formálisan a következő számolást jelenti. Adott az egyenlő időközönkénti mintavétellel nyert $x[n], n = 0, \dots, N-1$ (véges) jelsorozat. Az ehhez tartozó $X[k]$ frekvencia spektrum:

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

Látható, hogy a transzformáció „bemenete” N db szám: $x[0], \dots, x[N-1]$, „kimenete” ugyancsak N db szám: $X[0], \dots, X[N-1]$.

Egy N elemű jelsorozat elemzésének alapját a komplex egységkörön elhelyezkedő $e^{-i \cdot k \cdot n \cdot \frac{2\pi}{N}}$ számok képezik, $k, n = 0, \dots, N-1$.

Például az $X[1]$ kiszámításához az $1, e^{-i \cdot \frac{2\pi}{N}}, e^{-i \cdot 2 \cdot \frac{2\pi}{N}}, \dots, e^{-i \cdot (N-1) \cdot \frac{2\pi}{N}}$ számokat használjuk, melyek komplex egységkörön egy szabályos N szög csúcspontjai, a szummázás során N lépésben (egyenlő „lépésközökkel”) egyszer jutunk körbe. Az $X[2]$ kiszámításához az $1, e^{-i \cdot \frac{4\pi}{N}}, e^{-i \cdot 2 \cdot \frac{4\pi}{N}}, \dots, e^{-i \cdot (N-1) \cdot \frac{4\pi}{N}}$ számokat használjuk, a szummázás során N lépésben (egyenlő „lépésközökkel”) kétszer jutunk körbe az egységkörön. A DFT egyszerű számolási lépéseket jelent, de azokból nagyon sokat. Főleg a nagyszámú szorzás elvégzése időigényes.

A transzformáció, vagyis az $(X[0], \dots, X[N-1])^T$ és az $(x[0], \dots, x[N-1])^T$ vektorok közti kapcsolat megadható mátrix szorzás segítségével is. Bevezetve az $\omega = e^{-i \cdot \frac{2\pi}{N}}$ jelölést (ω N -edik komplex egységgyök)

$$X[k] = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot \omega^{k \cdot n}, \quad k = 0, \dots, N-1,$$

illetve

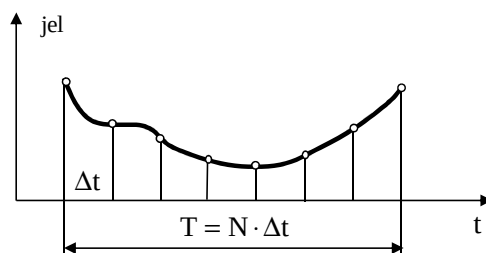
$$\begin{pmatrix} X[0] \\ X[1] \\ X[2] \\ \vdots \\ X[N-1] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \omega^1 & \omega^2 & \dots & \omega^{N-1} \\ 1 & \omega^2 & \omega^4 & \dots & \omega^{2 \cdot (N-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \omega^{N-1} & \omega^{2 \cdot (N-1)} & \dots & \omega^{(N-1)^2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x[0] \\ x[1] \\ x[2] \\ \vdots \\ x[N-1] \end{pmatrix}.$$

A diszkrét transzformáció képlete nem tartalmaz közvetlen utalást az időre és a frekvenciára. Így az értelmezéshez tekintetbe kell venni a mintavételezés módját: az egyes mintaelemek rögzítése között mennyi idő telt el (Δt), illetve milyen hosszú volt a teljes mintavételezési időtartam ($T = N \cdot \Delta t$). Ebből adódik a spektrumvonalak távolsága (felbontás, Δf), és a frekvenciatartomány felső határa ($N \cdot \Delta f$).

Az $\Omega = \frac{2\pi}{N \cdot \Delta t}$ bevezetésével szokásos a transzformációt az

$$X[k \cdot \Omega] = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x[n \cdot \Delta t] \cdot e^{-i \cdot k \cdot n \cdot \Omega \cdot t}$$

alakban is írni, mely utal arra, hogy az X spektrumértékek milyen körfrekvenciákhoz, illetve az x függvényértékek milyen időponthoz tartoznak. Ω , illetve $\Delta f = \frac{\Omega}{2\pi} = \frac{1}{N \cdot \Delta t}$ a spektrumban megjelenő minimális körfrekvencia, illetve frekvencia.



3.14 ábra: Mintavételezés a DFT-hez.

3.5. példa

Végezzük el a DFT-t az alábbi négy értékre:

n	0	1	2	3
$x[n]$	0	1	0	-1

$$X[0] = \frac{1}{4} \cdot \sum_{n=0}^3 x[n] \cdot e^{-i \cdot 0 \cdot n \frac{2\pi}{4}} = \frac{1}{4} \cdot \sum_{n=0}^3 x[n] = 0$$

$$\begin{aligned} X[1] &= \frac{1}{4} \cdot \sum_{n=0}^3 x[n] \cdot e^{-i \cdot 1 \cdot n \frac{2\pi}{4}} = \frac{1}{4} \cdot \sum_{n=0}^3 x[n] \cdot e^{-i \cdot n \frac{\pi}{2}} = \frac{1}{4} \cdot \left(0 \cdot e^{-i \cdot 0 \cdot \frac{\pi}{2}} + 1 \cdot e^{-i \cdot 1 \cdot \frac{\pi}{2}} + 0 \cdot e^{-i \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{2}} - 1 \cdot e^{-i \cdot 3 \cdot \frac{\pi}{2}} \right) = \\ &= \frac{1}{4} \cdot \left(e^{-i \frac{\pi}{2}} - e^{-i \cdot 3 \cdot \frac{\pi}{2}} \right) = \frac{1}{4} \cdot \left[\left(\cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) + i \cdot \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) \right) - \left(\cos\left(-\frac{3\pi}{2}\right) + i \cdot \sin\left(-\frac{3\pi}{2}\right) \right) \right] = -\frac{1}{2} \cdot i \end{aligned}$$

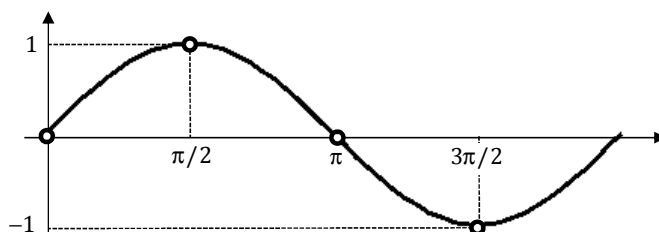
$$\begin{aligned} X[2] &= \frac{1}{4} \cdot \sum_{n=0}^3 x[n] \cdot e^{-i \cdot 2 \cdot n \frac{2\pi}{4}} = \frac{1}{4} \cdot \sum_{n=0}^3 x[n] \cdot e^{-i \cdot n \pi} = \frac{1}{4} \cdot \left(0 \cdot e^{-i \cdot 0 \cdot \pi} + 1 \cdot e^{-i \cdot 1 \cdot \pi} + 0 \cdot e^{-i \cdot 2 \cdot \pi} - 1 \cdot e^{-i \cdot 3 \cdot \pi} \right) \\ &= \frac{1}{4} \cdot \left(e^{-i \pi} - e^{-i \cdot 3 \cdot \pi} \right) = \frac{1}{4} \cdot \left[\left(\cos(-\pi) + i \cdot \sin(-\pi) \right) - \left(\cos(-3\pi) + i \cdot \sin(-3\pi) \right) \right] = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X[3] &= \frac{1}{4} \cdot \sum_{n=0}^3 x[n] \cdot e^{-i \cdot 3 \cdot n \frac{2\pi}{4}} = \frac{1}{4} \cdot \sum_{n=0}^3 x[n] \cdot e^{-i \cdot n \frac{3\pi}{2}} = \frac{1}{4} \cdot \left(0 \cdot e^{-i \cdot 0 \cdot \frac{3\pi}{2}} + 1 \cdot e^{-i \cdot 1 \cdot \frac{3\pi}{2}} + 0 \cdot e^{-i \cdot 2 \cdot \frac{3\pi}{2}} - 1 \cdot e^{-i \cdot 3 \cdot \frac{3\pi}{2}} \right) \\ &= \\ &= \frac{1}{4} \cdot \left(e^{-i \cdot \frac{3\pi}{2}} - e^{-i \cdot 3 \cdot \frac{3\pi}{2}} \right) = \frac{1}{4} \cdot \left[\left(\cos\left(-\frac{3\pi}{2}\right) + i \cdot \sin\left(-\frac{3\pi}{2}\right) \right) - \left(\cos\left(-\frac{9\pi}{2}\right) + i \cdot \sin\left(-\frac{9\pi}{2}\right) \right) \right] = \frac{1}{2} \cdot i \end{aligned}$$

k	0	1	2	3
$X[k]$	0	$-\frac{1}{2} \cdot i$	0	$\frac{1}{2} \cdot i$

Megjegyzés

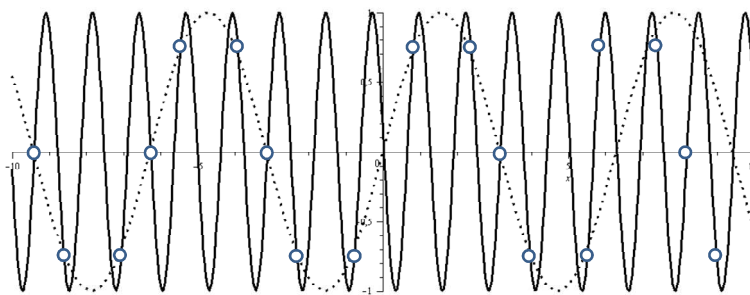
A megadott négy érték születhetett a szinusz függvény alábbi mintavételezésével:



3.15 ábra: Mintavételezett szinusz jel.

A DFT bemenete a gyakorlati alkalmazásokban egy jelből vett minta. Ennek a mintának, ahogyan azt már korábban említettük, korlátozott az információtartalma, ami abban mutatkozik meg, hogy a DFT-ből adódó spektrum eltér a valótól. A számos hatás közül kettővel mindenképpen foglalkozni kell a jelfeldolgozó rendszerekben, ezek az aliasing jelenség (a jelben nem létező frekvenciák megjelenése a spektrumban), a másik a szétfolyás (a spektrumvonalak sokszorozódása).

Az aliasing jelenséget a 3.16. ábra szemlélteti. Ennek lényege az, hogy a mintavételezési frekvencia korlátozza a jelben kimutatható frekvenciák értékét. A Shannon tétel ezzel kapcsolatban azt mondja ki, hogy a mintavételezési frekvenciának legalább kétszer akkorának kell lennie, mint a vizsgált jelből kimutatni kívánt legnagyobb frekvencia.



3.16 ábra: Aliasing, téves frekvenciák megjelenése a spektrumban.

Ez a hiba aluláteresztő („anti-aliasing”) szűrő alkalmazásával kerülhető el, ami a DFT előtt kiszűri a túl magas frekvenciájú komponenseket. A gyakorlatban a szűrő vágási frekvenciáját a mintavételi frekvencia kb. 40%-ára állítják be ($f_{\text{mintavételi}} \approx 2,56 \cdot f_{\text{vágási}}$).

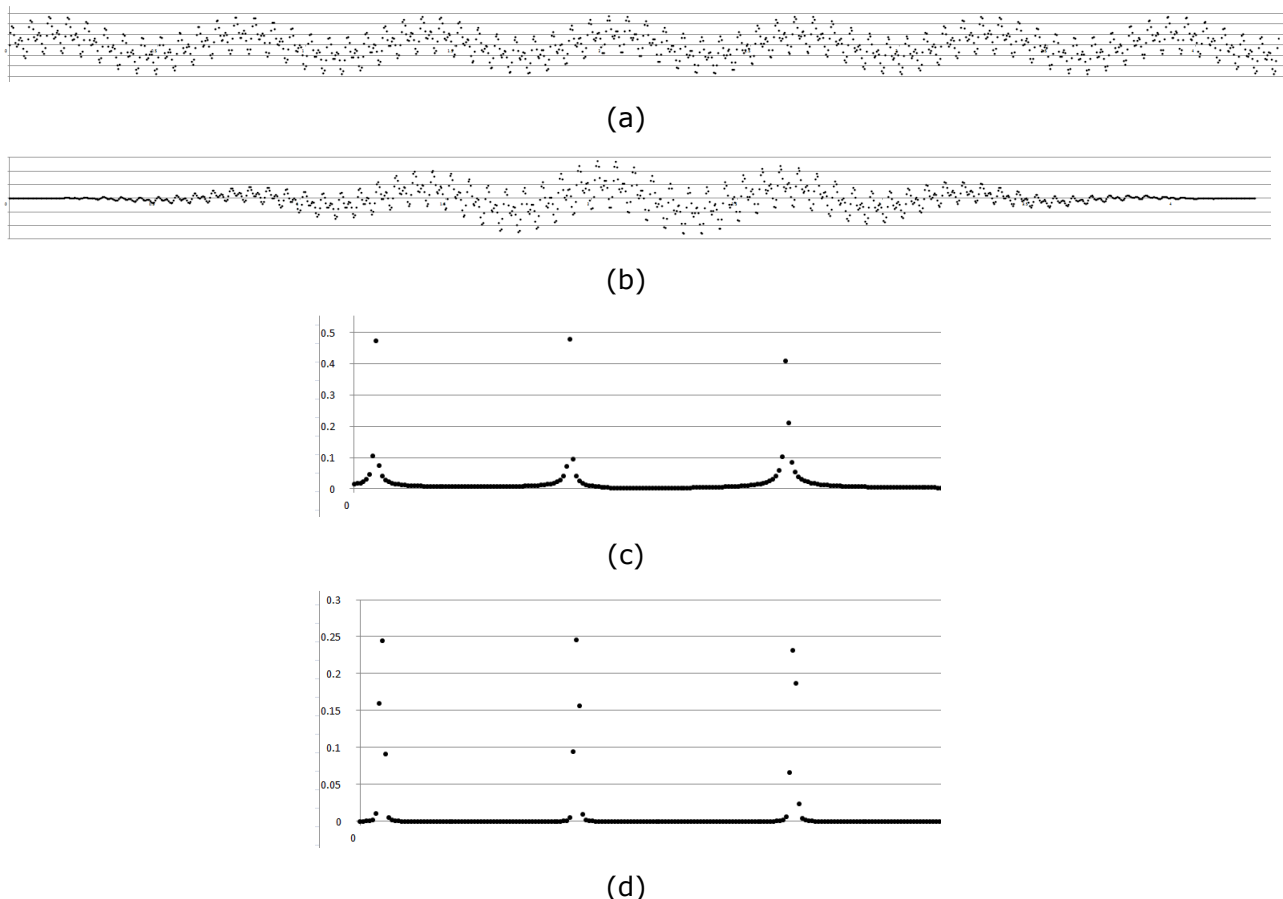
A szétfolyás jelenség oka az, hogy a mintavételezési időtartam nincs összhangban a jelben lévő periodikus komponensek periódusával, így a minta töredékperiódust tartalmaz. A DFT természete az, hogy a bevitt adatsort a jel egy periódusának tekinti, így a minta első és utolsó értékének eltérése olyan, mintha szakadás (ugrásszerű változás) lenne a jelben. Ez a spektrumban „szétfolyásként” jelentkezik. A 3.17 ábra c részében egy olyan jelből vett minta alapján készült spektrum látható, mely három harmonikus jel összege. A pontos

spektrum így három vonalból áll, míg az ábrán a három tényleges frekvencia közelében számos más frekvenciaérték is megjelenik.

A látszólagos ugrás hatását úgy lehet csökkenteni, hogy egy alkalmas függvénnyel (ablakfüggvénnyel) szorozzuk meg a jelet, mely a függvény értékét a végpontokban nullává teszi, ezáltal a DFT számára a bemenet olyan, mintha egy ugrás nélküli periodikus függvényből származna a minta.

A gyakorlatban többféle ablakfüggvény használatos, ezek előnyeivel és hátrányaival. Leggyakrabban Hanning féle ablak függvényt alkalmazzák. A 3.17 ábra „a” részében egy mintavételezett jelet látunk, a „b” részében pedig ennek megváltozott formáját a Hanning féle ablakfüggvény alkalmazása után.

Az ábra „c” része az eredeti jel DFT eredményét, a „d” része az ablakfüggvénnyel módosított jel DFT eredményét mutatja. Jól látható, hogy az ablakfüggvény alkalmazása után a spektrum kevésbé „folyik szét”, miközben a jelben meglévő tényleges frekvenciák ugyanúgy megjelennek.



3.17 ábra: Az ablakfüggvény hatása.

A digitális mérőrendszerek alkalmazásához nem feltétlenül szükséges a háttérben futó transzformációk ismerete, bizonyos beállításokra szükség van, ha az elemzésben spektrumot is akarunk számoltatni.



Az előállított spektrum legfontosabb jellemzői az ábrázolt frekvenciatartomány, a spektrumvonalak száma (L), az alkalmazott ablakfüggvény típusa, az átlagolás módja. Ezek összefüggnek a mintavételezési frekvenciával (F_s), a felbontással (BW), a mintavételezési idővel (T_o), a minta elemszámmal (N), melyeket a mérőrendszer szoftvere meghatározza a beállítások alapján.

Néhány fontos összefüggés az említett mennyiségek közt:

$$\begin{aligned}F_s &= 2,56 \cdot F_{max} [Hz] & T_s &= \frac{1}{F_s} = \frac{1}{2,56 \cdot F_{max}} [s] \\ BW &= \frac{F_{max}}{L} [Hz] & N &= 2,56 \cdot L \\ T_o &= \frac{L}{F_{max}} = N \cdot T_s = N \times \frac{1}{2,56 \cdot F_{max}} [s]\end{aligned}$$

Például egy $L = 400$ vonalas spektrumhoz $N = 2,56 \cdot 400 = 1024$ elemű minta kell.

Ha a mérni kívánt legnagyobb frekvencia $F_{max} = 2000[Hz]$ és $L = 400$ vonalas spektrumot szeretnénk, akkor a mintavételezési frekvencia $F_s = 2,56 \cdot F_{max} = 5120[Hz]$, a szükséges minta elemszám a fentiek szerint $N = 1024$, így a mintavételezési idő $T_o = \frac{1024}{5120} = 0,2[s]$. Két mintavétel közt eltelt idő: $T_s = \frac{1}{5120[Hz]} = 0,2[ms]$, avagy: $T_s = \frac{T_o}{N} = \frac{0,2[s]}{1024} = 0,2[ms]$.

Ha a mérni kívánt legnagyobb frekvencia $F_{max} = 100[Hz]$ és $L = 400$ vonalas spektrumot szeretnénk, akkor a mintavételezési frekvencia $F_s = 2,56 \cdot F_{max} = 256[Hz]$, a szükséges minta elemszám a fentiek szerint $N = 1024$, így a mintavételezési idő $T_o = \frac{1024}{256[Hz]} = 4[s]$. Két mintavétel közt eltelt idő: $T_s = \frac{1}{256[Hz]} = 4[ms]$, avagy: $T_s = \frac{T_o}{N} = \frac{4[s]}{1024} = 4[ms]$. ([4] alapján)

A mérési időtartam és a felbontás közti összefüggés megérthető, ha arra gondolunk, hogy azonos fázisban induló, közel azonos frekvenciájú rezgések megkülönböztetéséhez idő kell: meg kell várni, míg a két rezgés eléggé különválnak.

Átlagolás szerepe (mint általában a méréseknél) a véletlenszerű zavaró hatásokból adódó csúcsok mérséklése. A mérés során időeltolódással több mintát veszünk, és a spektrumokat átlagoljuk.

3.5 Gyors Fourier transzformáció (FFT)

A DFT fent említett jelentős számolási igényét több ötlet (pl. részekre bontás, szimmetriák felismerése) alapján csökkentették. Ezeket a számolási módszereket gyors Fourier Transzformációknak hívjuk.

Az egyik klasszikus módszer lényege az, hogy az értékeket két halmazra bontjuk, a részhalmazokon elvégezzük az előírt számolást, majd a kapott értékeket összekombináljuk. A felezés egyenletessége érdekében páros, $n = 2m$ (illetve további felbontást felételezve kettő hatvány) elemszámú mintát veszünk.

Az $x[0], \dots, x[N-1]$ értékeket csoportosítsuk páros és páratlan sorszámúakra:

$$\begin{aligned}
 X[k] &= \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-i \cdot k \cdot n \frac{2\pi}{N}} = \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2m] \cdot e^{-i \cdot k \cdot 2m \frac{2\pi}{N}} + \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2m+1] \cdot e^{-i \cdot k \cdot (2m+1) \frac{2\pi}{N}} = \\
 &= \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2m] \cdot e^{-i \cdot k \cdot m \frac{2\pi}{N/2}} + e^{-i \cdot k \cdot \frac{2\pi}{N}} \cdot \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2m+1] \cdot e^{-i \cdot k \cdot m \frac{2\pi}{N/2}} = Y[k] + e^{-i \cdot k \cdot \frac{2\pi}{N}} \cdot Z[k], \quad k = 0, \dots, N-1.
 \end{aligned}$$

Igazolható, hogy $Y\left[k + \frac{N}{2}\right] = Y[k]$, $Z\left[k + \frac{N}{2}\right] = Z[k]$, továbbá $e^{-i \cdot k \cdot \left(k + \frac{N}{2}\right) \frac{2\pi}{N}} = -e^{-i \cdot k \cdot \frac{2\pi}{N}}$, így

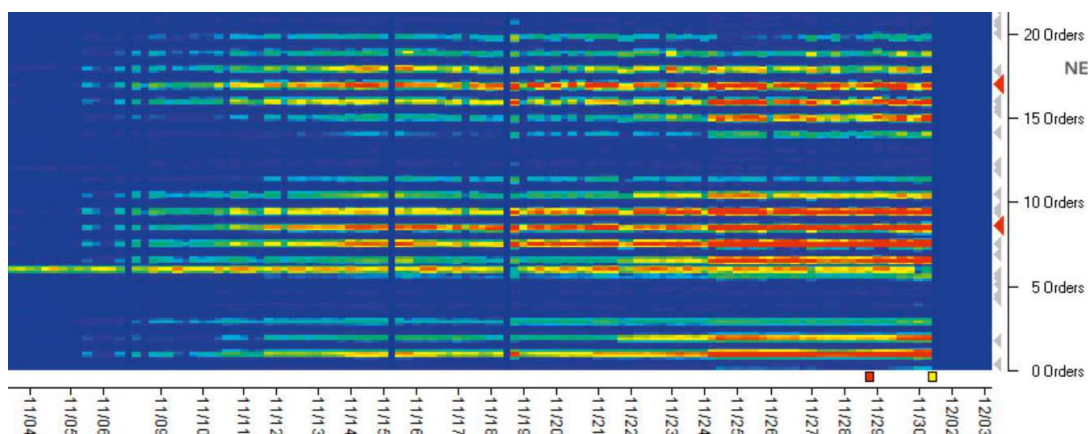
$$X[k] = Y[k] + e^{-i \cdot k \cdot \frac{2\pi}{N}} \cdot Z[k], \quad k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1,$$

$$X\left[k + \frac{N}{2}\right] = Y[k] - e^{-i \cdot k \cdot \frac{2\pi}{N}} \cdot Z[k], \quad k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1.$$

Ez pedig azt jelenti, hogy az N elemű DFT kiszámolható két $\frac{N}{2}$ elemű DFT-vel.

3.6 Rövid idejű Fourier transzformáció

A gyakorlatban általában olyan jeleket vizsgálunk, melyek frekvencia-összetétele (spektruma változik). Sőt bizonyos esetekben (pl. a rezgésdiagnosztikában) éppen a spektrum megváltozásának van információértéke. A korszerű rezgésdiagnosztikai rendszerek ezért valamilyen formában megjelenítik a változást. A 3.18 ábrán például az SPM állapotfelügyeleti rendszer ún. „Color Spectrum” szolgáltatása látható. Itt a vízszintes tengely az idő értékek (mérési időpontok) találhatóak, a függőleges tengelyen pedig az alaphfrekvencia többszöröseként, ún. orderekkel kifejezett frekvencia értékek vannak. Adott időpontban adott frekvenciához tartozó intenzitási szint színekkel van érzékeltetve.



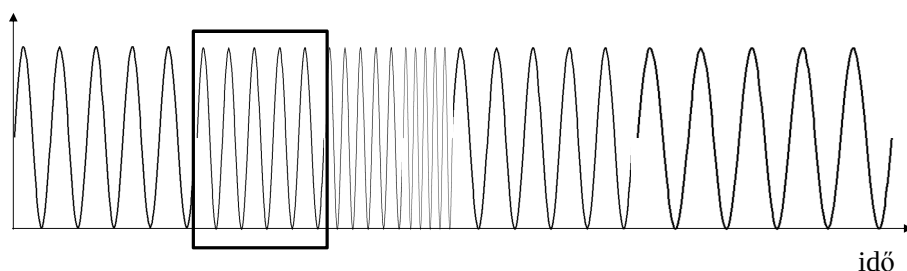
3.18 ábra: Az SPM rendszer „Color Spectrum” szolgáltatása.

forrás: [5]

A változó spektrumú, különösen a gyorsan változó jelek elemzésében az időtartománybeli és a frekvenciatartománybeli leírás külön-külön nem hatékony, mert az előbbi teljes képet ad időben (elvileg végtelen az időtartomány), de nem azonosíthatók a frekvenciakomponensek, míg az utóbbi teljes képet ad a jelben lévő frekvenciák tekintetében (elvileg végtelen a

frekvenciatartomány), de az nem látható, hogy egyes időintervallumokban ténylegesen milyen frekvenciák voltak jelen.

A problémákra egyfajta választ ad az ún. *rövid idejű Fourier transzformáció* (Short-time Fourier transform, STFT), melynek során a jelet olyan keskeny időszavokra osztjuk (szegmentáljuk), ahol stacionáriusnak tekinthető, és ezeken végezzük el a Fourier transzformációt. A lokalizálást ún. ablakfüggvények alkalmazásával végezzük, melyek lényegében csak rövid időintervallumon különböznek nullától.



3.19 ábra: Lokalizáció a rövid idejű Fourier transzformáció esetén.

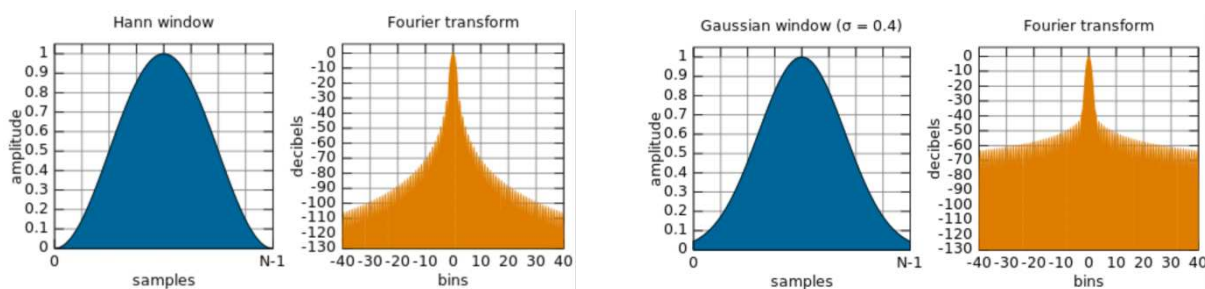
Folytonos idejű STFT során egy ablakfüggvénnyel való megszorítás után Fourier transzformáljuk a függvényt, ezzel időben lokalizálva a számolást.

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

ahol a $w(t)$ ablakfüggvény leggyakrabban a Hann vagy a Gauss ablakfüggvény. A 3.20 ábra mutatja Hann és a Gauss ablakfüggvényeket és ezek Fourier transzformáltját.

$$w(n) = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \cos \frac{2\pi n}{N-1}\right)$$

$$w(n) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{n - \frac{N-1}{2}}{\sigma \cdot \frac{N-1}{2}} \right)^2}, \quad \sigma \leq \frac{1}{2}$$



3.20 ábra. A Hann és a Gauss ablakfüggvények és ezek Fourier transzformáltja.

forrás: [6]

Az ablakfüggvényt eltolva az időtengely mentén kétdimenziós reprezentáció formájában tekinthetjük át az időbeli változást.

$X(\tau, \omega)$ tehát az $x(t) \cdot w(t - \tau)$ függvény Fourier transzformáltja. Komplex függvény, amely reprezentálja az amplitúdót és a fázist az idő- és a frekvenciatartományban.

A diszkrét idejű STFT formulája

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

ahol $x[n]$ a diszkrét idejű jel, $w[n]$ az ablakfüggvény.

Az amplitúdó négyzete $(\tau, \omega) \rightarrow |X(\tau, \omega)|^2$ adja a spektrogramot.

3.6. példa

Négy koszinusz jel összekapcsolása

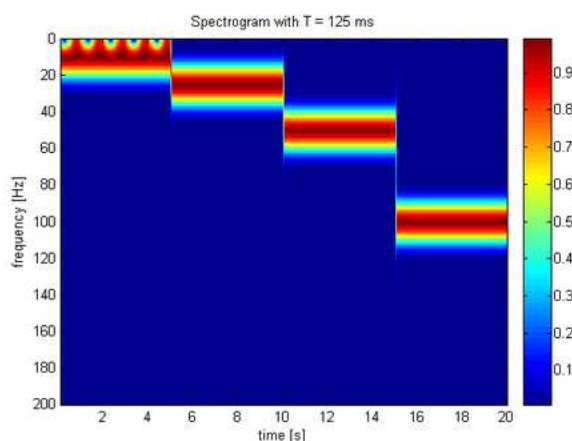
$$x(t) = \begin{cases} \cos(2\pi \cdot 10t), & \text{ha } 0 \leq t < 5 \\ \cos(2\pi \cdot 25t), & \text{ha } 5 \leq t < 10 \\ \cos(2\pi \cdot 50t), & \text{ha } 10 \leq t < 15 \\ \cos(2\pi \cdot 100t), & \text{ha } 15 \leq t < 20 \end{cases}$$

400 Hz-es mintavételezéssel az alábbi 0,125 s-os ablakkal a 3.21 ábrán látható spektrogram adódik.

A STFT invertálható, az eredeti jel visszakapható az STFT-ből:

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

A STFT korlátja, hogy fix felbontást eredményez. Választani kell a jó idő-, vagy a jó frekvenciafelbontás között. A széles ablak (széles sávú felbontás) jobb frekvenciafelbontást eredményez, de az időfelbontás gyenge, és fordítva keskeny ablak (keskeny sávú felbontás) esetén az időfelbontás részletes, a frekvenciafelbontás nem.



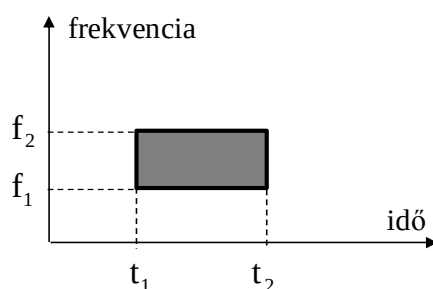
3.21 ábra: Spektrogram.

forrás: [7]

Ezt a problémát orvosolja a wavelet transzformáció, ami jó időfelbontást produkál nagyfrekvenciás jelenségek elemzésekor, és jó frekvenciafelbontást az alacsony frekvenciások esetén.

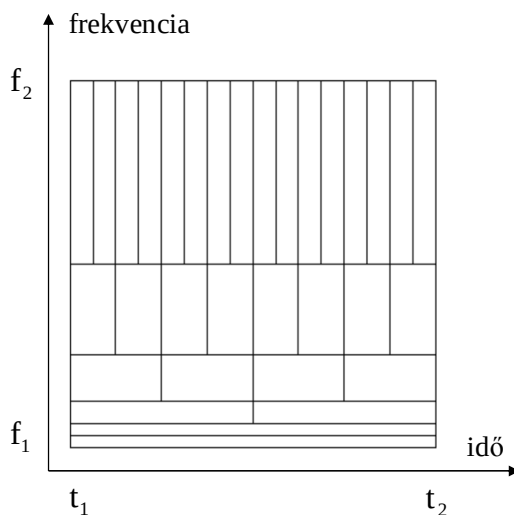
3.7 Wavelet transzformáció

Az idő és frekvencia szerinti együttes vizsgálat hatékony lehetőségét a waveletek alkalmazása teremti meg. A wavelet analízis lényegében a Fourier transzformáció időben és frekvenciában lokalizált változata, ami rögzített idő és frekvenciatartományban szolgáltat információt a jelről. Egy $[t_1, t_2]$ időintervallumhoz és $[f_1, f_2]$ frekvenciatartományhoz tartozó eredmény az ún. fázistérben jeleníthető meg az 3.22 ábra szerint.



3.22 ábra: Fázistér.

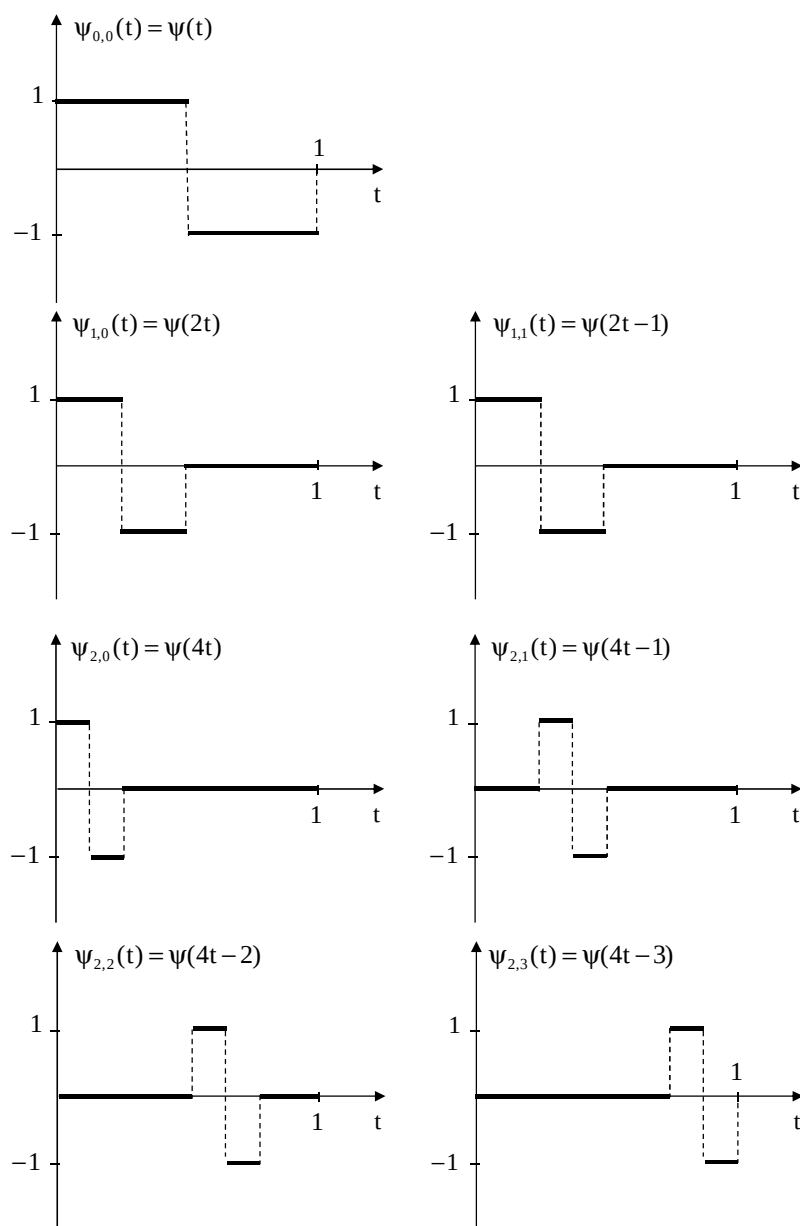
A diszkrét wavelet transzformációk esetén a bázisfüggvények a fázistér egy-egy tartományához tartoznak, így a 3.23 ábrán látható felosztással érzékeltethető a bázisfüggvények választása.



3.23 ábra: A bázisfüggvényeknek megfelelő tartomány a fázistérben.

A wavelet transzformáció az idő- és a frekvenciatartománybeli leírás közt van abban az értelemben, hogy frekvenciát azonosít úgy, hogy az időbeliség is látszik. Az idő-, illetve a frekvenciatartománybeli leírás a waveletekkel való leírás két szélsőséges esetének tekinthető végtelen idő-, illetve végtelen frekvenciatartománnyal.

A műszaki diagnosztikában a wavelet transzformáció célja az, hogy a jelben lokalizált hullámszerű formákat, ún. waveleteket azonosítsunk, melyek összefüggésbe hozhatók rövid idejű, impulzusszerű kiváltó hatásokkal.



3.24 ábra: Haar wavelet rendszer néhány függvénye.

Számos waveletet definiáltak. Az, hogy adott problémára melyiket célszerű alkalmazni a jeltől és az elemzés céljától is függ. Az „eredeti” és egyben a legegyszerűbb wavelet a Haar wavelet, mely a Haar-rendszeren alapszik. Ez a $\phi(t) = \begin{cases} 1, & \text{ha } 0 \leq t \leq 1 \\ 0 & \text{egyébként} \end{cases}$ ún. skála függvénnyel a $\psi(t) = \phi(2t) - \phi(2t - 1)$ formulával származtatható:

$$\psi(t) = \begin{cases} 1, & \text{ha } 0 \leq t < \frac{1}{2} \\ -1, & \text{ha } \frac{1}{2} \leq t < 1 \\ 0 & \text{egyébként} \end{cases}$$

A felbontás alapja az eltolásokkal és átskálázásokkal („nyújtásokkal”) előálló

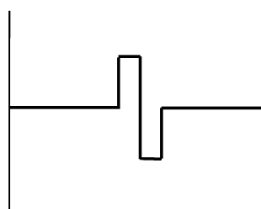
$$\psi_{m,n}(t) = 2^{-\frac{m}{2}} \cdot \psi(2^{-m} \cdot t - n), \quad m, n \in \mathbb{Z}$$

ortonormált rendszer. Ennek néhány elemét mutatja a 3.24 ábra.

A leggyakrabban használt wavelet a *Mexikói kalap* elnevezésű, melynek alapfüggvényét (anyafüggvényét) a következő formula definiálja

$$\psi(t) = (1 - t^2) \cdot e^{-\frac{t^2}{2}}.$$

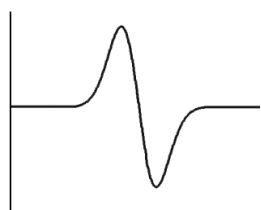
Ez a függvény az $e^{-\frac{t^2}{2}}$ Gauss függvény második deriváltjának -1-szerese (az $\frac{1}{\sqrt{\pi}}$ normáló szorzó nélkül). A Gauss függvény bármelyik deriváltja alkalmazható waveletként, de általában csak az első és a második derivált használatos (3.25. ábra).



Haar wavelet



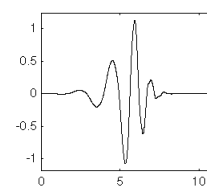
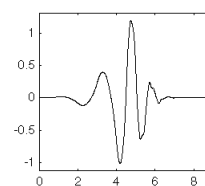
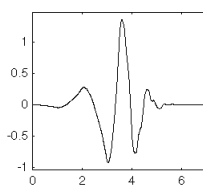
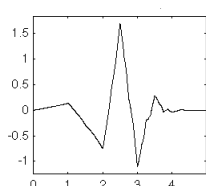
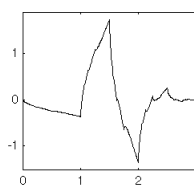
Mexikói kalap wavelet
(a Gauss függvény második deriváltja)



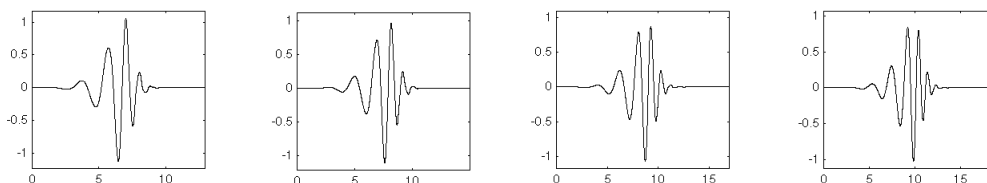
Gauss wavelet
(a Gauss függvény első deriváltja)



Morlet wavelet
(valós rész)



Daubechies waveletek (db2-6)

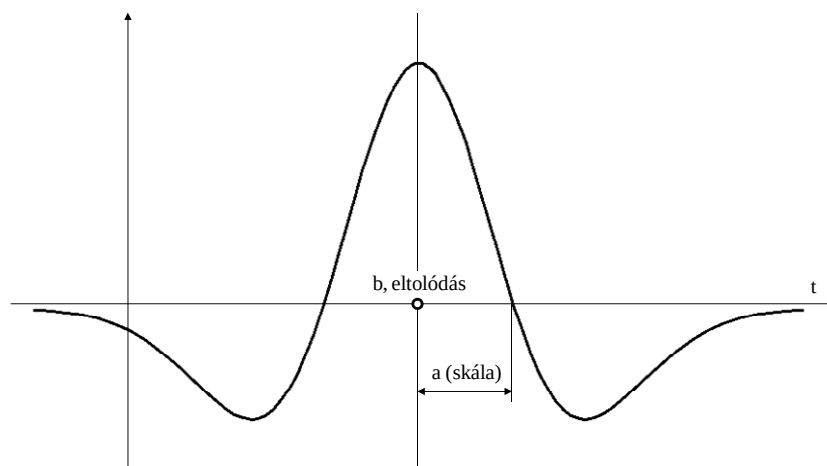


Daubechies waveletek (db7-10)

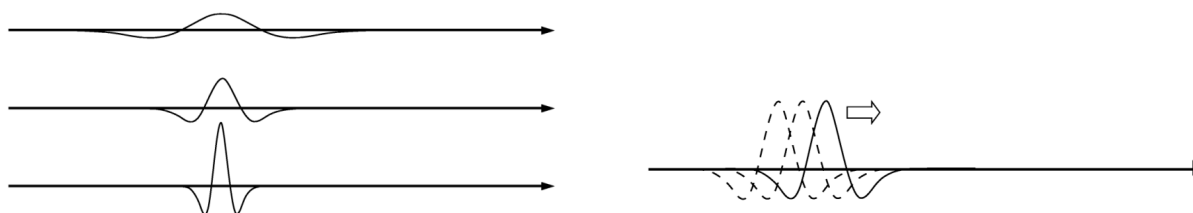
3.25 ábra: Néhány gyakran alkalmazott wavelet.

forrás: [8]

Az elemzés során az ún. anya (elemző) wavelet két paraméterét változtatjuk. Az a paraméter a függvény „szélességét” határozza meg, a b paraméter a wavelet pozícióját rögzíti az idő tengelyen.



3.26 ábra: Az a és a b paraméter jelentése a Mexikói kalap wavelet esetén.



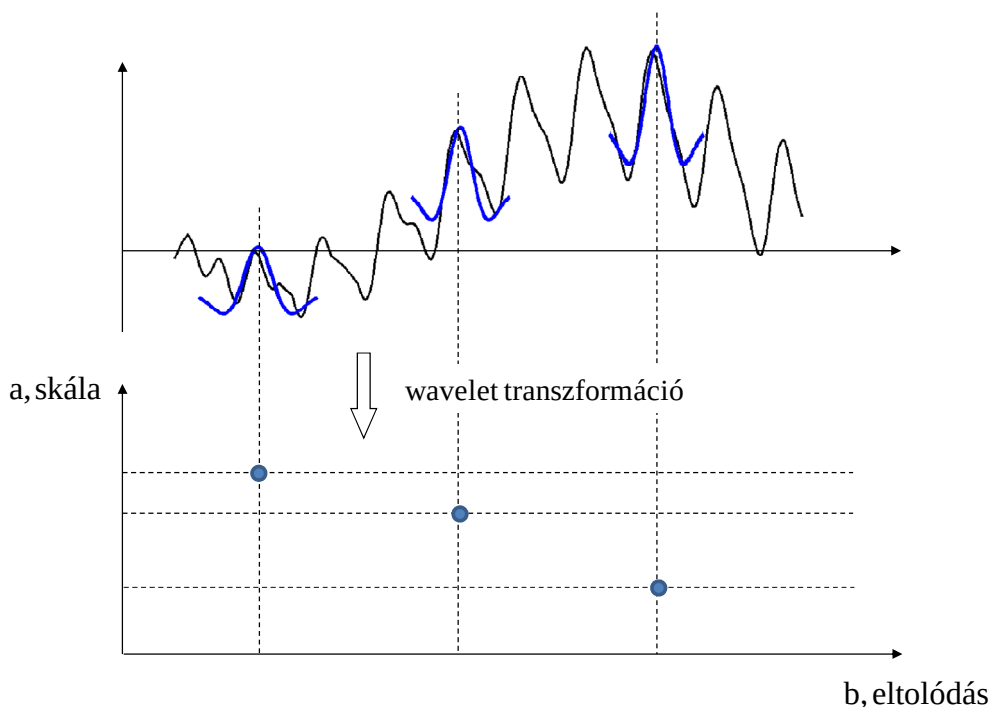
3.27 ábra: Az a és a b paraméter változtatásának hatása a Mexikói kalap wavelet esetén.

Az (a, b) paraméterpárhoz tartozó Mexikói kalap wavelet formulája

$$\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) = \left(1 - \left(\frac{t-b}{a}\right)^2\right) \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-b}{a}\right)^2}.$$

Egy waveletnek megfelelő jelrészlet azonosítása a jel és a wavelet konvolúciójának kiszámításával történik. A konvolúciós integrál értéke mutatja az egyezés mértékét.

Folytonos wavelet transzformálthoz jutunk, ha elvégezzük a számítást minden a -ra és b -re egy tartományban. Mivel a gyakorlatban mintavételezett jelekkel dolgozunk és diszkrét transzformációt alkalmazunk, a felbontásban diszkrét a és b értékek jelennek meg, továbbá a $(\Delta t, \Delta f)$ párban a tartományok hossza nem csökkenthető tetszőlegesen.



3.28 ábra: Wavelet transzformáció.

Egy folytonos $x(t)$ jel wavelet transzformáltja:

$$T(a, b) = w(a) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt,$$

ahol $w(a)$ a súlyfüggvény. Általában $w(a) = \frac{1}{\sqrt{a}}$.

Így a folytonos wavelet transzformáció formulája

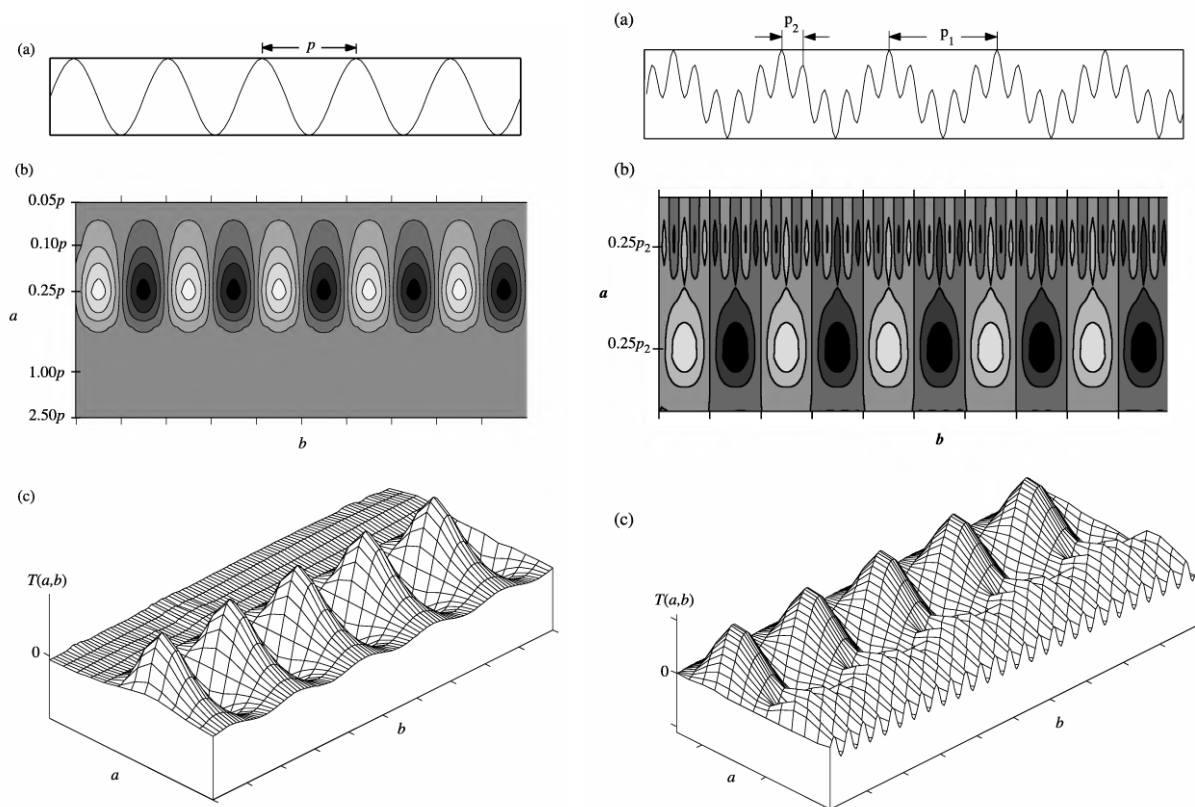
$$T(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt.$$

Jelölés: $\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$, ezzel $T(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \bar{\psi}_{a,b}(t) dt$, illetve $T(a, b) = \langle x, \psi_{a,b} \rangle$.

Szélesebb wavelet szűkebb energiaspektrumot jelent, mert az idő növekedése a frekvencia csökkenésével jár, a fordítottan arányos a waveletet jellemző frekvencia értékekkel.

A wavelet transzformáció matematikai mikroszkópnak is tekinthető, a b paraméter azt jelzi, hogy hol vizsgálódunk, az a paraméter pedig azt, hogy mekkora a nagyítás.

A 3.29 ábra a szinusz függvény transzformáltját mutatja. Az a érték a periódus negyede. A 3.30 ábrán két szinusz függvény összegének transzformáltja látható. Az ábrán jól érzékelhető a transzformáció szétválasztó képessége.

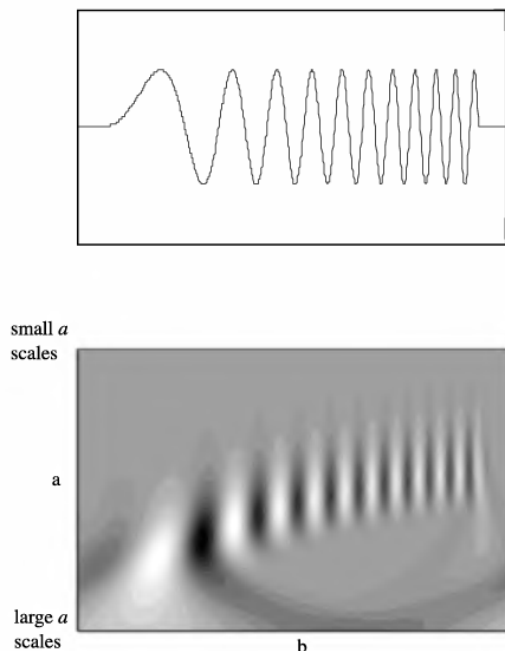


3.29 ábra: A szinusz függvény és két szinusz függvény összegének transzformáltja.

forrás: [1]

Az 3.30 ábra a $\sin(x^2)$ függvény transzformáltját mutatja. Jellegzetes kép rajzolódik ki az egyes összetevők esetén.

A wavelet transzformáció jól használható a jelvéletlenszerű hatások felismerésére, mert az ezekhez tartozó hatása jelben megjelenő mintázat elkülönül. A wavelet transzformáció alkalmas a folytonossági szakadások (élet) detektálására is. Az 3.31 ábra mutatja a szakadás miatt előálló képet.



3.30 ábra: A $\sin(x^2)$ függvény transzformáltja.

forrás: [1]

Felvetődik a kérdés, hogy egy ψ függvény mikor lehet wavelet. Ehhez három kritériumnak kell teljesülnie:

1. Az energia értéke legyen véges, azaz

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty,$$

2. A ψ függvény

$$\hat{\psi}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) \cdot e^{-i2\pi f t} dt$$

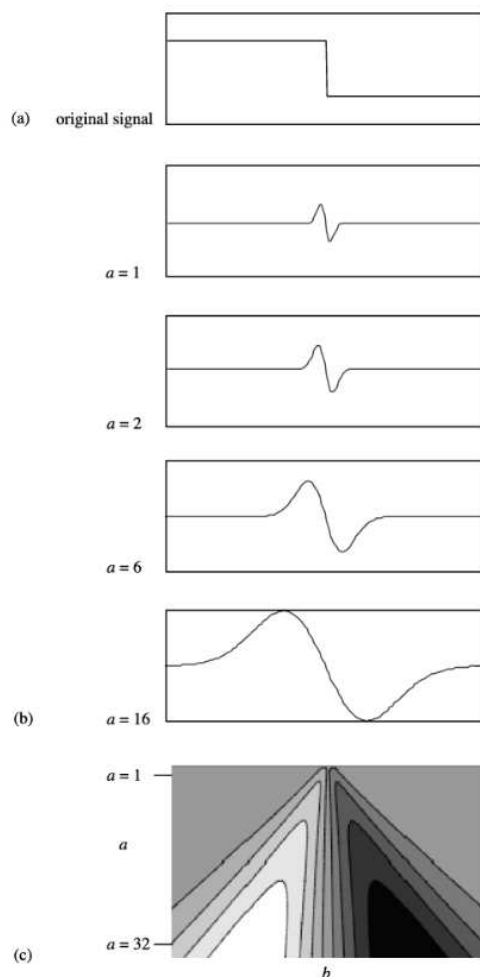
Fourier transzformáltjára teljesülnie kell, hogy

$$C_g = \hat{\psi}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(f)|^2}{f} df < \infty.$$

(Ebből következik, hogy $\hat{\psi}(0) = 0$, azaz nincs 0 frekvenciás komponens, más szóval a ψ átlaga 0. Ez a megengedési feltétel. Például a Mexikói kalap alapfüggvény esetén $C_g = \pi$.)

3. Komplex wavelet függvény esetén követelmény még, hogy a Fourier transzformált valós és negatív frekvenciáktól mentes legyen.

A megengedési feltételnek eleget tevő waveletek valójában sávszűrők, mivel csak bizonyos frekvenciákat „engednek át”.



3.31 ábra: Él detektálása.

forrás: [1]

Az inverz wavelet transzformációval visszaállítható az eredeti jel:

$$x(t) = \frac{1}{C_g} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} T(a, b) \cdot \psi_{a,b}(t) \cdot \frac{1}{a^2} da db.$$

Valamely $0 < a^*$ -tól integrálva szűrést lehet alkalmazni: a nagyfrekvenciás tagok kikerülnek.

A wavelet transzformáció és a Fourier transzformáció kapcsolata

$$T(a, b) = \sqrt{a} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \hat{x}(f) \cdot \overline{\hat{\psi}(af)} \cdot e^{-i \cdot 2\pi f \cdot b} df$$

ami az inverz Fourier transzformáció képletével egyezik.

Ez fontos abból a szempontból, hogy az FFT számolási technika alkalmazható a wavelet transzformáció végrehajtására.



Ráadásul $\hat{\psi}_{a,b}(f)$ általában ismert analitikus alakban. Csak az eredeti jel $\hat{x}(f)$ Fourier transzformáltja szükséges.

Komplex waveletek

Komplex wavelet alkalmazásával külön vizsgálható a jel amplitúdója és fázisa.

A leggyakrabban használt transzformáció a Morlet waveleten alapul, melynek alapfüggvénye

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} \cdot \left(e^{i \cdot 2\pi f_0 \cdot t} - e^{-\frac{(2\pi f_0)^2}{2}} \right) \cdot e^{-\frac{t^2}{2}}$$

ahol f_0 a wavelet középfrekvenciája.

Ez a függvény úgy áll elő, hogy a Mexikói kalap függvényt Fourier transzformáljuk, eltüntetjük a negatív frekvenciákhoz tartozó tagokat, majd visszatranszformáljuk.

A $e^{-\frac{(2\pi f_0)^2}{2}}$ tag $f_0 \gg 0$ esetén elhanyagolható, így a Morlet wavelet alapfüggvényét a gyakorlatban az egyszerűbb

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} \cdot e^{i \cdot 2\pi f_0 \cdot t} \cdot e^{-\frac{t^2}{2}}$$

általánosan pedig

$$\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} \cdot e^{i \cdot 2\pi f_0 \cdot \frac{t-b}{a}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-b}{a}\right)^2}$$

alakban használjuk. A három tényező szerepe: $\frac{1}{\sqrt[4]{\pi}}$ normálás, $e^{i \cdot 2\pi f_0 \cdot t}$ komplex szinuszos függvény, $e^{-\frac{t^2}{2}}$ Gauss féle haranggörbe. A függvény egy komplex hullám Gauss burkolóval.

Morlet wavelet transzformáltja

$$\hat{\psi}(t) = \sqrt[4]{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot e^{i \cdot 2\pi f_0 \cdot t} \cdot e^{-\frac{(2\pi f - 2\pi f_0)^2}{2}}.$$

A Morlet wavelet transzformáció hasonló a rövid idejű Fourier transzformációhoz azzal a lényeges különbséggel, hogy itt az ablak és a függvény egyaránt skálázható.

A wavelet transzformáció időben lokalizálni tudja a nagyfrekvenciás ingadozásokat.

3.8 Diszkrét Wavelet transzformáció

A gyakorlatban diszkrét véges idejű jelekkel találkozunk. A diszkrétizálás egyik lehetősége:

$$\psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \cdot \psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right)$$

ahol $a_0 > 1$, $b_0 > 0$, $m, n \in \mathbb{Z}$. Itt a $\Delta b = b_0 a_0^m$ lépésköz arányos az a_0^m wavelet skálával.

Egy folytonos $x(t)$ jelnek a $\psi_{m,n}$ wavelettel képzett transzformáltja

$$T_{m,n}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \cdot \psi\left(\frac{1}{a_0^m} \cdot t - nb_0\right) dt,$$

avagy $T_{m,n} = \langle x, \psi_{m,n} \rangle$. A $T_{m,n}$ számokat *wavelet együtthatóknak* nevezzük.



ahol $a_0 = 2$, $b_0 = 1$ esetben kapjuk a diadikus skálát

$$\psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \cdot \psi\left(\frac{t - n \cdot 2^m}{2^m}\right).$$

Ezek a függvények ortonormált rendszert alkotnak:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi_{m,n}(t) \cdot \psi_{p,q}(t) dt = \begin{cases} 1, & \text{ha } m = p, n = q \\ 0 & \text{egyébként} \end{cases}$$

Ez a rendszer alkalmas gyors számolásra. Ezzel a diszkrét wavelet transzformáció

$$T_{m,n} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{m,n}(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{2^m}} \cdot \psi\left(\frac{t - n \cdot 2^m}{2^m}\right) dt.$$

Inverze:

$$x(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} T_{m,n} \cdot \psi_{m,n}(t),$$

avagy $x(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \langle x(t), \psi_{m,n}(t) \rangle \cdot \psi_{m,n}(t)$.

A $T_{m,n}$ együtthatókat a $\langle x, \psi_{m,n} \rangle$ belső szorzatokon keresztül származtatjuk, az inverz végtelen összeg formájú.

Az energia $\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} |T_{m,n}|^2$.

FELHASZNÁLT SZAKIRODALOM

- [1] ADDISON, P.S., *The Illustrated Wavelet Transform Handbook*, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2002.
- [2] CSATÁR Györgyné, MÁTÉ László: *Sorok, függvénysorok*, Műegyetemi Kiadó, 2005.
- [3] Condmaster Nova 2010 állapotfelügyeleti rendszer
- [4] SHREVE, D.H.: *Signal processing for effective vibration analysis*, IRD Mechanalysis, Inc, Colombus, Ohio, 1995.
- [5] <http://www.spmhd.com/case> (letöltés: 2015.06.26.)
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/Window_function (letöltés: 2015.06.26.)
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Short-time_Fourier_transform (letöltés: 2015.06.26.)
- [8] http://radio.feld.cvut.cz/matlab/toolbox/wavelet/ch01_31a.html (letöltés: 2015.06.26.)



4 JELFELDOLGOZÁSI MÓDSZEREK ÁTTEKINTÉSE

A következő fejezetekben gépészmérnöki szempontból megközelítve áttekintésre kerülnek a különböző műszaki diagnosztikai és akusztikai módszerek. Az itt leírtak az előző fejezetben bemutatásra került matematikai és jelfeldolgozási alapokra épülnek. A gépek különböző, korlátozott számú gépelemekből épülnek fel, amelyek élettartama, meghibásodása a karbantartási stratégia részeként folyamatosan diagnosztizálható. A gép értéke és működési körülménye határozza meg, hogy mely paraméterek bírnak kitüntetett szereppel, amelyeket mérni, elemzni kell. A funkció szempontjából fontosabb egységek online állapotvizsgálatot igényelnek, a kevésbé jelentősek offline diagnosztika keretében, időszakos felülvizsgálat keretében üzemeltethetők. Rendszerszinten beszélhetünk gépek és gépelemek állapotvizsgálatáról. A gépek komplexitásuk függvényében több részegységből épülnek fel, minden részegységet külön-külön is diagnosztizálhatunk. Jelen jegyzet módszertani fejezete főleg a zaj- és rezgésdiagnosztikára fókuszál. Meg kell említeni, hogy kiegészítő diagnosztikának fontos szerepet tölt be a termográfia, vagyis a hőkamerás állapotvizsgálat.

Az összes gépelem közül a csapágyak a gépek meghatározó elemei, amelyek meghibásodása a gép üzemzavarához, hirtelen termelés kieséshez vezethet. Meghatározó jelentőségű ezért, hogy az esetleges üzem közbeni meghibásodások időben diagnosztizálásra kerüljenek. A vizsgálat hasonló jelentőséggel bír a fogaskerekek meghibásodása terén, amelyek a csapágyakkal együtt a hajtóművek fő komponensei. Az összetett hajtóművek részei a gépjárműveknek, légi járműveknek, vasúti járműveknek, szerszámgépeknek és számos összetett gépnek.

A csapágyak meghibásodásai eredhetnek gyártásból vagy üzemelésből. A gyártás alatt előforduló hibák a csapágygyűrűk köralakhibáiból és felületi érdességi hibákból, illetve szerelési hibákból erednek túlnyomó többségben, detektálásukra több eredményes módszer ismert.

Az üzemelés közben fennálló hibák a csapágy anyagát érintő kifáradási folyamatokból származtatható. A dinamikus erőhatások a csapágy anyagában ismétlődő feszültséget keltenek, amelyek mikropedéseket okoznak. Gördülőcsapágyak esetében a repedéseken áthaladó görgők a felület kipattogzódásához vezetnek, és súlyos lokális hibákat eredményeznek.

A csapágydiagnosztika számos megközelítést alkalmazhat, mint a rezgésdiagnosztikát, termovíziós vizsgálatokat, olaj szennyeződés elemzést, jelen fejezet a rezgésdiagnosztikán nyugvó és hozzá kapcsolódó jelfeldolgozási folyamatokkal foglalkozik.

A csapágyhibák rövid időtartamú tranziens impulzusokat keltenek, amelyeket zajjal terhelt környezetből kell kivonatolni, ahol a jel-zaj arány értéke alacsony. Zavaró tényezőkként említhető például a környező gépek és gépelemek rezgései, a környezeti rezgések és egyéb külső hatások.

Megkülönböztethetünk időtartománybeli, frekvenciatartománybeli, és idő-frekvenciatartománybeli méréseket. Az időtartománybeli mérések statisztikai adatok feldolgozásán alapulnak, a frekvenciatartománybeli mérések során a FFT gyors-Fourier transzformáció széles körben elterjedt. A rezgésmérés legtöbbször rezgés gyorsulás mérő szenzorral történik, amely csavaros, mágneses, vagy ragasztásos módon kerül szilárdan



rögzítésre a csapágyház terhelt zónáján. A mérés legtöbbször három, egymásra merőleges irányból, akár egyidejűleg történik. Az automatikus hibafelismerést a gépi tanulási módszerek könnyítik meg, a továbbiakban bemutatásra kerülnek a mesterséges neurális hálók (ANN) és a tartóvektorgépek módszer (SVM) is, majd a gyakorlati gépdiagnosztikán belül a zaj- és rezgésmérési módszerek.

4.1 Időtartománybeli gépvizsgálatok

A gépállapotvizsgálat egyik központi eleme a gördülőcsapágyak állapotának vizsgálata, mivel minden forgó gépben kiemelt fontossággal bírnak. A gördülőcsapágyak élettartama kifáradási jelenségekkel van összefüggésben, amely során a csapágygyűrűn, a gördülőelemeken a felületi repedések következtében kipattogzódás lép fel. A kísérletek vagy fárasztó vizsgálattal történnek, amely során a csapágyat tönkremenetelig járatják, vagy mesterségesen generált hibák okozta válaszeleket elemzik, amely alapján mélyebb diagnosztikai elemzések végezhetők. Az utóbbi vizsgálathoz roncsolásmentesen bontható csapágyakat kell alkalmazni. Jelen vizsgálataink körébe tartozó csapágyak a mesterséges hiba előidézését követően ismételt működésképes állapotba hozhatók.

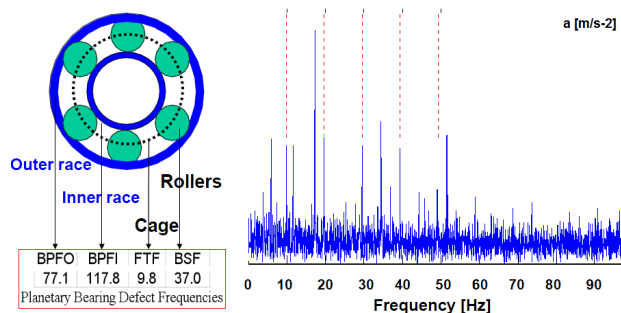
A fárasztóvizsgálatok során a rezgés értékek trendszerű változását mérik, illetve a hőmérsékletet, a kenőanyag összetétel változást. A folyamat hosszú ideig tart, a csapágy túlterhelésével, növelt fordulatszámmal, kenőanyag megvonásával a tönkremenetel gyorsítható, szimulált körülmények közötti mérések végezhetők.

A legegyszerűbb csapágy rezgésdiagnosztikai módszer, amikor a rezgésparaméterek mérése során a mért értékek statisztikai jellemzői kerülnek meghatározásra. Ilyen értékek a négyzetes középérték (RMS), és a csúcstényező (Crest factor), a valószínűségi változók sűrűségfüggvénye, és továbbá a variancia, kurtózis, a ferdeség (skewness) és a lapultsági együttható. A hibátlan csapágyak rezgésgyorsulásának valószínűség sűrűségfüggvénye normál eloszlású (Gauss-eloszlás). A hibás csapágyé más valószínűség sűrűségfüggvénnyel rendelkezik. A rezgésértékek további statisztikai momentumai is hatékonyan felhasználhatók állapotfelülgyelet, diagnosztika és prognózis céljára. A hibátlan csapágyak mérések szerinti Kurtózis értéke hozzávetőlegesen 3. A 3-asnál nagyobb érték a lehetségesen előálló meghibásodás indikátora [1]. A módszer lokális hibáknál, mint a pontszerű kipattogzódás hatékonyan működik, viszont hátránya, hogy nem lokális jellegű hibáknál, vagyis a gyűrűmenti kiterjedt meghibásodások esetében a Kurtózis értéke megmarad a 3 érték körül, amely alapján félrediaosztizálható a hibás csapágy állapota, a kezdeti meghibásodások sem minden esetben detektálhatók, ezért az ipari gyakorlatban a kurtózisfigyelés széles körben nem terjedt el. [2, 3]

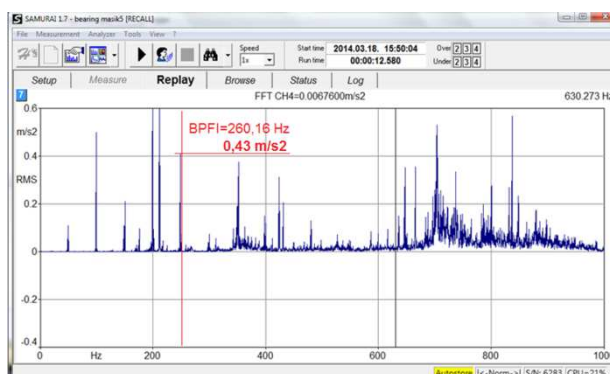
4.2 Frekvenciatartománybeli gépvizsgálatok

A legáltalánosabban használt módszerként megmarad a gyors Fourier transzformáció (FFT) arra, hogy az időtartományból (4.1 ábra) a frekvenciatartományba (4.2 ábra) átlépve a csapágyak és egyéb gépek, gépelemek hibafrekvenciái diagnosztizálhatók legyenek. A csapágyak elemzésénél maradv, ismerve a fordulatszámot, a csapágy típusát, így geometriai paramétereit, meghatározott összefüggések segítségével kiszámítható a belső gyűrű- külső gyűrű- gördülőelem- és kosárhibákból eredő hibafrekvenciák, amelyek a

rezgésspektrumban jól körülhatárolható csúcsokként jelentkeznek. A digitális jelprocesszorok (DSP), FPGA és ASIC áramkörök széles körű elterjedése a méréstechnikában tovább támogatja az Fourier transzformációkon alapuló diagnosztikai módszereket.



4.1 ábra: Csapágyhibák transzformációja frekvenciatartományba



4.2 ábra: Csapágy frekvencia hibaspektrum

4.3 Idő- és frekvenciatartománybeli gépvizsgálatok

A hagyományos idő- és frekvenciatartománybeli vizsgálatokon túlmenően az ipari gyakorlatban gyakran felmerülő igény, hogy zajjal terhelt környezetben is hatékony jelfeldolgozást és rezgésdiagnosztikát lehessen végezni egyszerre idő- és frekvenciatartományban. A módszer előnye, hogy egyidejűleg teszi lehetővé az időtartomány és a frekvenciatartomány megjelenítését.

Zajforrásnak minősül a vizsgált gépelem környezetében lévő egyéb gépelemek és gépek rezgései, a hajtóművek esetében a csapágyrezgések vizsgálatát a fogaskerékhibák és a tengelybeállításból eredő hibák, valamint a környezeti rezgések nehezítik. A wavelet transzformáció alkalmas arra, hogy a zajos környezetben is hatékonyan támogassa a jelfeldolgozást. Jelen fejezet áttekinti a wavelet transzformáció alkalmazási lehetőségét a csapágydiagnosztikában, majd változó felbontású elemzés (MRA) segítségével méréseket mutat be egy csapágy tesztpadon, ahol előzetesen mesterségesen keltett csapágy belső gyűrűk kerülnek diagnosztizálásra Daubechies 4 és Morlet waveletek segítségével.



Csapágyhibák és vizsgálata STFT módszerrel és wavelet transzformációval

A jelek időben változóak, és bár a Fourier-integrál a jel frekvenciatartalmának nagyon jó reprezentációját adja, viszont nem nyújt információt arról, hogyan változik az adott frekvencia komponens az időben. Időbeli lokalizációt a jel ablakozásával, azaz ablakfüggvénnyel – ablakozó függvénnyel – $g(t)$ való szorzásával érhetünk el. Az időben lokalizált függvény Fourier-transzformációját a szakirodalomban ablakozott Fourier-transzformációnak – Short Time Fourier Transformation (STFT) – nevezik.

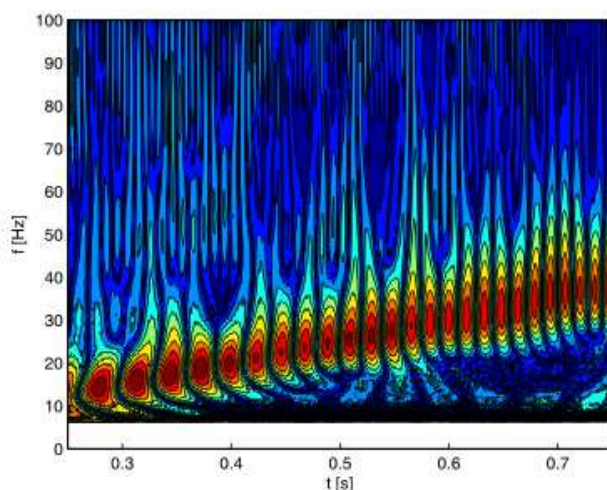
A wavelet transzformáció hasznos gyenge jelek vizsgálatára zajjal terhelt környezetben. Kutatók tanulmányaikban [4] a „Daubechies 4” alkalmazási lehetőségeit vizsgálták a diszkrét wavelet transzformációban (DWT) alkalmazva, olyan csapágyakon, amelyeket előzetesen szikraforgácsolás segítségével károsítottak.

A szinkronizált időszori átlagolás (Time Synchronous Averaging) kisebb hatékonysággal rendelkezik, mint a wavelet analízis vagy a burkológörbe módszer [3], a CWT eljárásokhoz Morlet- waveletet, a wavelet packet eljáráshoz „Daubechies 9” waveletet használtak.

Egyes kutatók [8,9] a csapágyrezgés impulzus válasz függvényének jellemzőin alapuló wavelet függvényt alkalmaztak, mely alkalmas lehet belső gyűrű meghibásodásának kimutatására. Hibátlan és a meghibásodott csapágy megkülönböztetésére, elő állítják a rezgés jelek adott skalaparaméter melletti energia spektrumát az impulzus válasz wavelet és a Morlet-wavelet alkalmazásával.

Az idő -frekvencia felbontások (Time-frequency Distribution - TFD) lineáris vagy kvadratikus eloszlások csoportjába sorolhatók. A lineáris idő -frekvencia eloszlások osztályába tartozik az ablakozott Fourier-transzformáció (STFT) és a wavelet-transzformáció (WT). Mind a két eljárás időben és frekvenciában jól koncentrált elemi függvényekre bontja fel a vizsgálandó jelet. A kvadratikus TFD a jel energiáját két változó az idő és a frekvencia függvényében vizsgálja. A spektrogram (SP) azaz a STFT (4.3 ábra) abszolút értékének négyzete, a scalogram (SC) azaz a WT abszolút értékének négyzete és a Wigner-Ville eloszlás mind ilyen tulajdonsággal rendelkezik. [10]

A wavelet a frekvencia-idő síkot (a jel `fázisterét') cellákra bontja. Ebben a térben a szokásos idő- és frekvenciatartománybeli ábrázolás egy olyan speciális felbontásként fogható fel, amikor az adott cella egyik irányban végtelen kiterjedésű lesz (pontosabban lefedi a teljes megfigyelt spektrumot, ill. az egész megfigyelési időt).



4.3 ábra: Idő-frekvenciatartomány grafikon

4.4 Mérési módszerek és a változó felbontású elemzés (MRA)

A csapágyak mesterséges hiba okozta hibajelek diagnosztizálására, mérési céllal, kísérleti jelleggel a Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszékén csapágy vizsgáló tesztpad épült, az 4.4 ábra szerinti kivitelben. A tesztpad 5 különböző típusú csapágy vizsgálatát teszi lehetővé változtatható fordulatszám mellett. A jelenlegi mérések során használt mérőeszközök és szoftverek listája az alábbi.



4.4 ábra: Csapágyvizsgáló tesztpad

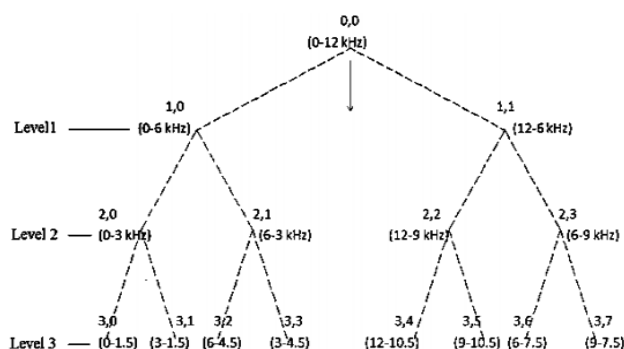
Jelen vizsgálat során 6206 típusú csapágy belső gyűrűjén lézeres megmunkáló géppel kis mértékű mesterséges hiba került kialakításra. A hiba geometriai mérései szerint 658 μm átlagos átmérővel és 257 μm átlagos mélységgel rendelkezik, amelyen a gördülőelemek forgás közben áthaladnak és a rezgésspektrumban fellépő belső gyűrű hibát generálnak. A geometriai méréseket segítette a rendelkezésre álló Olympus BX61 típusú optikai mikroszkóp. A belső gyűrű hibafrekvencia (BPFI) 2880 1/ min névleges motorfordulatszám mellett került kiszámításra, amely 260,16 Hz-re adódott, ismerve a csapágy típusát, kapcsolódószöget, fordulatszámot, gördülőelemek számát és a vonatkozó csapágygyűrű átmérőt. A külső gyűrű hibafrekvencia (BPFO, ball passing frequency outer race), a kosár

hibafrekvencia (FTF fundamental train frequency), a gördülőelem hibafrekvencia (BSF ball spin frequency) hasonló módon kiszámításra került a kapcsolószög, fordulatszám, és a gyűrűátmérők, gördülő elemek számának ismeretében. BPFO=171,84 Hz, FTF=19,2 Hz, BSF=112,32 Hz.

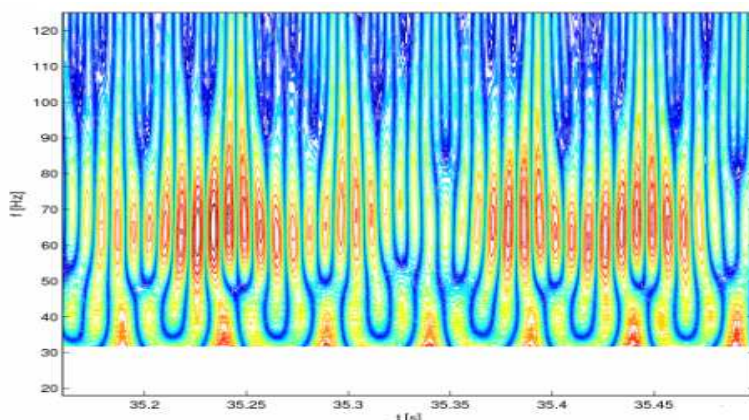
A Matlab programcsomag hatékony eszköze a wavelet transzformációnak, amelyben számos jelfeldolgozási módszer meegtalálható.

A mérés-adatgyűjtési célra a National Instruments Labview szoftver [8] került alkalmazásra. A NI a mérésadatgyűjtő kártyáit szoftveresen támogató programcsomagokat fejleszt, melyekkel a mérés-adatgyűjtés és jelfeldolgozás egy rendszeren belül elvégezhető. Ez a szoftver inkább alkalmazott kutatási feladatok céljára megfelelő. A hangsúly ebben az esetben a mérési adatokgyűjtésén, különböző eszközök kommunikációján, adatok feldolgozásán és megjelenítésén van. A LabWindows/CVI és LabVIEW szoftverekhez megvásárolható a Signal Processing Toolkit nevű kiegészítés. Ez tartalmaz többek között Wavelet transzformációs eljárásokat is. A National Instruments LabVIEW grafikus programozói környezete széles körben alkalmazható az egyedi célmérések esetében. A rendszer nagy előnye, hogy a programozás alapszintű elsajátítása kevés időráfordítást igényel. Jól használható olyan esetekben, amikor valamilyen egyedi dolgot kell lemérnünk, vagy speciális érzékelők jelét kell feldolgoznunk. A LabVIEW-ban a grafikus programozás mellett lehetőség van szöveges alapú programozási nyelven megírt kódok futtatására a Code Interface Node (CIN) felhasználásával. A LabWindows/CVI integrált fejlesztői környezete segítségével gyorsan fejleszthetünk mérési, tesztelési, vezérlési vagy szabályozási feladatokat ellátó alkalmazást. A programot ebben az esetben ANSI C nyelven kell megírni. [8]

Egy jel DWT szerinti felbontása többlépcsős folyamat. A jelet (S) átvezetve egy megfelelően kiválasztott, frekvencia-sávban szeparált szűrő csoporton, az felbontható „alacsony frekvenciás” közelítés- és „nagyfrekvenciás” részlet jelkomponensekre, a 4.5 ábra szerint. A mérési jel wavelet transzformációt követő képe, belső gyűrű hibás csapágy esetén a 4.6 ábrán látható.



4.5 ábra: A változó felbontású elemzés frekvencia szerinti felbontása



4.6 ábra: A belső gyűrű hibával rendelkező csapágy wavelet transzformáció után nyert spektruma

A csapágyak nagy jelentőséggel rendelkeznek, mint a gépek alapvető gépeleme, amely meghibásodása súlyos következményekkel járhat, ezért a megfelelő módszerekkel történő diagnosztizálásuk elengedhetetlen.

A wavelet transzformáció kifejezetten alkalmas arra, hogy zajjal terhelt környezetben is hatékonyan diagnosztizálja a csapágyak esetleges meghibásodásait.

A „Daubechies 4” és a Morlet waveletek hasznosak diagnosztikai vizsgálatokra.

Összehasonlítva a Fourier transzformációval, a wavelet transzformáció egyidejűleg alkalmas az idő és a frekvenciatartományok megjelenítésére.

A mérésekhez tesztpad készült, amely alkalmas a csapágyak belső gyűrű, külső gyűrű és gördülőelem hibáinak vizsgálatára. A hibák előzetesen, mesterséges úton kerültek kialakításra jelen vizsgálat során a csapágy belső gyűrűn.

A mérések változó felbontású elemzés módszerrel történtek, ahol a vizsgált frekvenciatartományt módszeresen kisebb intervallumokra bontottuk fel.

A méréseknél zajjal terhelt környezetet modelleztünk, amely során módosításra került a tengelykapcsoló egytengelyűsége, amely a csapágyhibák spektrumát az egytengelyűsége jellemző hibaspektrummal, mint zajjal terhelte.

FELHASZNÁLT SZAKIRODALOM

- [1] DYER, STEWART RM.: *Detection of rolling element bearing damage by statistical vibration analysis*. Trans ASME, J Mech Design, 1978. 100(2):229–35.
- [2] GUSTAFSSON: *Detection of damage in assembled rolling element bearings*. ASLE Preprint 61-AM 3B-1. 16th ASLE, Philadelphia, PA, 1961. 39pp.
- [3] MATHEW J, ALFREDSON RJ: *The condition monitoring of rolling element bearings using vibration analysis*. Trans ASME, J Vibr, Acoust, Stress Reliab Design 1984; 106:447–53.



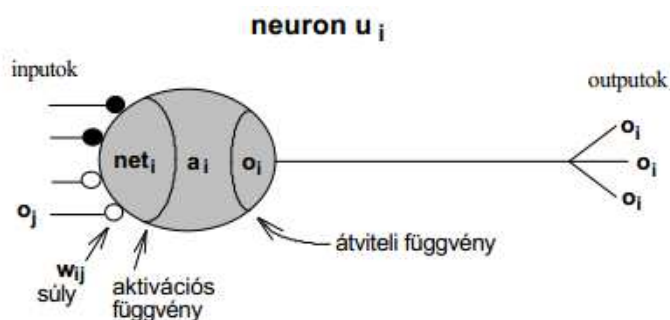
- [4] N.G. NIKOLAOU, A.I. ANTONIADIS: *Demodulation of vibration signals generated by defects in rolling element bearings using complex shifted Morlet wavelets*. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 16., 2002, pp. 677-694.
- [5] SCHAEFFLER (UK) LTD.: *How to detect bearing failures using vibration*. 18. May. 2007.
- [6] S. ERICSSON, N. GRIP, E. JOHANSSON, L.-E. PERSSON, R. SJÖBERG, J.-O. STRÖMBERG: *Towards automatic detection of local bearing defects in rotating machines*. Mechanical Systems and Signal Processing 19, 2005, pp. 509-535.
- [7] SPM INSTRUMENT BUDAPEST KFT.: *Az SPM Módszer*. <http://www.spminstrument.hu/index.php?lid=0&gcf=24&sid=1> (letöltés: 2015.06.22.)
- [8] TÓTH L., SZARKA T.: *Labwindows/CVI-ban fejlesztett wavelet transzformációs modul alkalmazása Labview környezetben*. Multidiszciplináris tudományok, 3. kötet, 2013, 2. sz. pp. 215.-224.
- [9] TÓTH L.: *Tranziens és kváziperiodikus folyamatok analízise az idő –frekvencia tartományban*. Doktori értekezés. Miskolci Egyetem, 2011.
- [10] CLARENCE W. DE SILVA: *Vibration and Shock Handbook*. 2005.
- [11] NATIONAL INSTRUMENTS: *Labview felhasználások*

5 GÉPI TANULÁSI MÓDSZEREK A MŰSZAKI DIAGNOSZTIKÁBAN

5.1 Mesterséges neurális hálók alkalmazása a diagnosztikában

A diagnosztikai rendszerek között fokozott jelentősége van a gépi tanuláson alapuló rendszereknek, mint a mesterséges neurális hálók (Artificial Neural Networks – ANNs) és az SVM rendszerek, amelyek betaníthatók a hibajelenségek automatikus felismerésére. Az emberi gondolkodáshoz közel állóak a Fuzzy logikán alapuló hálózatok. A neuronokból álló hálózatokat nevezzük neurális hálózatoknak. Megvalósításuk szerint lehetnek hardver, szoftver, vagy a kettő kombinációja.

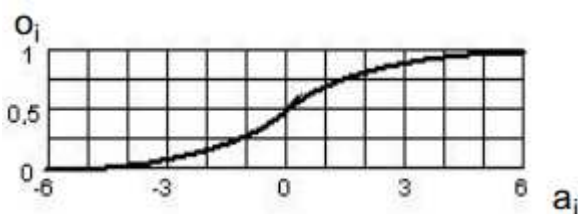
Bemeneti réteg: azok a neuronok (5.1 ábra) találhatóak itt, amelyek a bemeneti jel továbbítását végzik a hálózat felé. Rejtett réteg: a feldolgozást végző neuronok tartoznak ide. Egy hálózatban belül több rejtett réteg is lehet. Kimeneti réteg: az itt található neuronok a külvilág felé továbbítják az információt. A feladatuk ugyanaz, mint a rejtett rétegbeli neuronoké.



5.1 ábra: Az elemi neuron súlyokkal, aktivációs- és átviteli függvénnyel

Forrás: [2]

Az átviteli függvény leggyakrabban sigmoid függvény (5.2 ábra) generálja az aktivációs potenciálból a kimenő jelet. Az átviteli függvény leggyakrabban szigmoid alakú. A függvénynek köszönhetően a neuron bizonyos aktivációs potenciált elérve ad outputot.



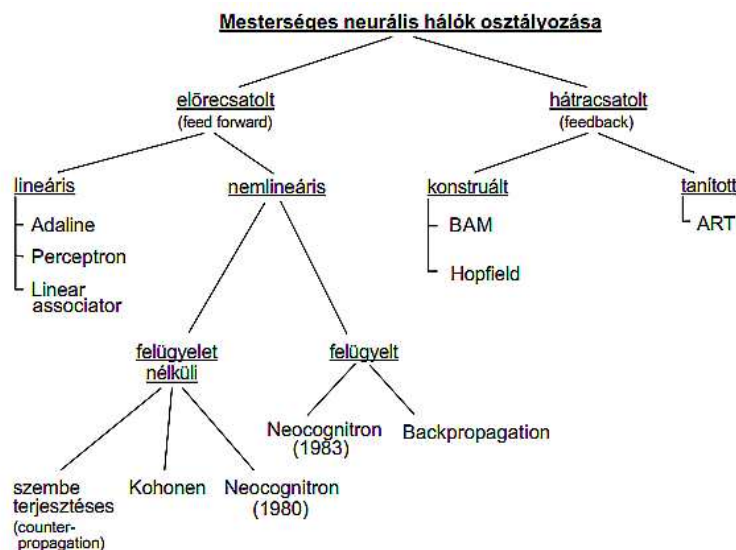
5.2 ábra: Sigmoid függvény

Forrás: [2]

A mesterséges neurális hálózatok az alábbi tulajdonságokkal rendelkeznek.

- Tanulási képesség jellemzi
- Általánosítóképesség és önszervezés jellemzi működésüket
- Zajos és hiányos adatok elfogadására is alkalmas
- Gyors működést tesznek lehetővé
- Komplikált viszonylatok kezelése
- Nagy mennyiségű adatok elemzésére is képesek
- Nagyfokú rugalmasságot valósítanak meg

Neurális hálók egy lehetséges csoportosítását a 5.3 ábra mutatja be.



5.3 ábra: A mesterséges neurális hálózatok lehetséges csoportosítása

Forrás: [1]

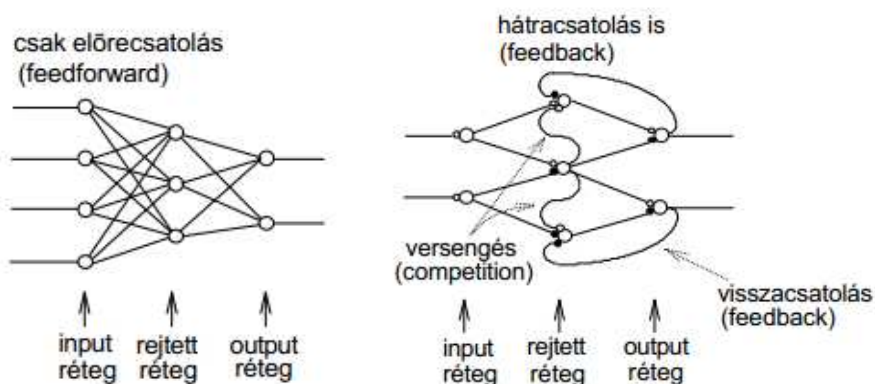
A neurális hálók (ANN) lehetnek ellenőrzött tanítású hálózatok, mint az RBF (Radial Basis Function) hálózatok, PNN (Probabilistic Neural Network) hálózatok, GRNN (Generalized Regression Neural Network) hálózatok, Előrecsatolt hálózati struktúrák FIR szűrőkkel, vagy késleltetett bemenetekkel. Nem ellenőrzött tanítású hálózatok például a Kohonen hálózat (SOM), Adaptív rezonancia elmélet (ART, Adaptive Resonancia Theory).

Az analitikus tanítású hálózatok a Boltzmann gépek, Mean-field hálózatok, Hopfield hálózatok, CNN hálózat.

Felügyelt tanulást valósítanak meg a Perceptron, Back-propagation, Adaline, Madaline, Boltzmann-gép. Felügyelet nélküli tanulást produkálnak: a kétirányú asszociatív memória BAM (Bidirectional Associative Memory, Kosko, 1987), az említett Hopfield hálózatok, szembe terjesztés (counter propagation) modellek.

A felügyelt tanulás lehet hiba-javító tanulás (error correction): az output réteg egyes neuronjainál vizsgált - az elvárt és a valós értékek különbségeként adódó - értékek alapján a súlymátrix kapcsolatait módosítja, sztochasztikus tanulás (stochastic learning): a súlymátrix random változtatása után meghatározza a hálózat ún. energiaértékét. Ha a változás hatására az energia csökkent, akkor a változást elfogadja, egyébként pedig csak akkor, ha a változás megfelel egy előre választott valószínűségi eloszlásnak, megerősítő tanulás (reinforcement learning), ahol a megfelelően végrehajtott akciónál a súlyok megerősödnek, egyébként gyengülnek, az akció jóságát az outputvektorból képzett skalár jelzi.

A neurális hálózatok topológiája (5.4 ábra) szerint a Back-propagation, visszafelé terjesztés tanulási elv, amely az ún. delta szabály variációja. A többrétegű előrecsatolt háló súlyait olyan módon állítja be, hogy a számított kimenet és az elvárt kimenet eltérését felhasználva a kapcsolati súlyokat olyan irányba módosítja kismértékben, hogy az input következő bemutatásakor az eltérés csökkenjen.



5.4 ábra: A mesterséges neurális hálózatok topológiája

Forrás: [1]

Az előreccsatolt hálók működése időfüggetlen, a jelek áthaladnak a hálón a bemeneti réteg irányából a kimeneti réteg felé. A hálóban több rejtett réteg is lehet. A kimenet a bemenet, a neuronok átviteli jellemzőinek és a súlymátrixnak a függvénye. A hátracsatolt, vagy visszacsatolt hálók működése eltérő, a bemenet egy vélhetően konvergens folyamatot indít el, amelyben a jelek előrefelé és visszafelé is haladnak. A adott időpillanatban számított jelek megjelenhetnek a korábbi rétegek bemenetén egy későbbi időpillanatban. A mesterséges neurális hálózatok tervezésénél és betanításánál az alábbi szempontokra kell figyelemmel lenni, amelyet a jelen fejezethez tartozó neurális hálózat felépítésénél is figyelembe vettünk.

A hálózat méretének megválasztása: nemdefiniált egyértelmű összefüggés arra vonatkozóan, hogy egyes rétegeken belül milyen számú neuron használata szükséges az adott feladat végrehajtásához. Az egyik alapelv szerint nagyobb neuronszámú hálózatból kiindulva csökkentik annak méretét, a másik szerint egy kisebb hálózat növelésével próbál eljutni az alkalmas és szükséges méretű hálózat felépítéséig.

A kezdeti súlyok megállapítása: kiindulási súlyokat a neurális hálózatra vonatkozóan a probléma előzetes ismerete alapján érdemes meghatározni. Gyakran viszont az erre vonatkozó információk hiányosak, ezért véletlenszerű kezdeti súlyok kerülnek alkalmazásra, a tanítás sikertelensége esetén más súlyok alkalmazása válik szükségessé.

A tanító lépések száma: a tanító lépések száma előzetesen nem definiálható, szem előtt kell tartani, hogy a hálózat túltanulhatja magát, ami az általánosítóképességet nagymértékben csökkentheti.

A betanított hálózat értékelése: a betanított hálózat értékelése a hálózat ismeretlen adatokra adott válaszfüggvénye és hibája alapján lehetséges. Amennyiben a hiba elfogadható, a tanítási folyamat eredményesnek tekinthető.

A tanító mintahalmaz: a neurális háló betanításához szükséges minták száma függ a feladattól, de legtöbbször azonban kevés számú minta áll rendelkezésre. A tanító mintakészletet több részre szokták osztani, a tanító készletet használjuk a tanításra, míg a kiértékelő mintakészletet a tanítás kiértékelésére. A hálózat általánosítóképessége általában



lehetővé teszi, hogy a tanító és kiértékelő mintákra is helyes választ ad. A kiértékelő mintakészlet felhasználása is lehetséges a tanítás során. Kevés adat esetén a csoportok elemeit cseréljük (cross validation), és minden mintát felhasználunk tanításra és kiértékelésre egyaránt.

A tanulási aránytényező definiálása: a tanulás konvergenciája gyorsabb, ha az aránytényező nagyobb, viszont egyes esetekben divergenciát is eredményezhet. Kisebb aránytényező választása esetén a konvergencia lassabb, de a minimumhely megtalálása pontosabban lehetséges. Javasolt a lépésenként változó aránytényező adaptív alkalmazása.

A Levenberg-Marquardt eljárás egy hibrid eljárás. A módszer átmenetet biztosít a legmeredekebb lejtő és a Newton/LMS algoritmus között, így próbálva egy optimális eljárást biztosítani. Ugyanis mind a két eredeti eljárásnak megvan az optimális felhasználási feladata, és a kettő keverésével új feladatokat is le tudunk fedni. A kettő keverését egy lépésfüggő Lambda együttható határozza meg. Ez a súlytényező, hogy melyik eljárás eredményét vegyük inkább figyelembe. Ha 1-hez közeli az értéke, akkor a legmeredekebb lejtő módszerét, ha 0-hoz akkor pedig a Newton módszert.

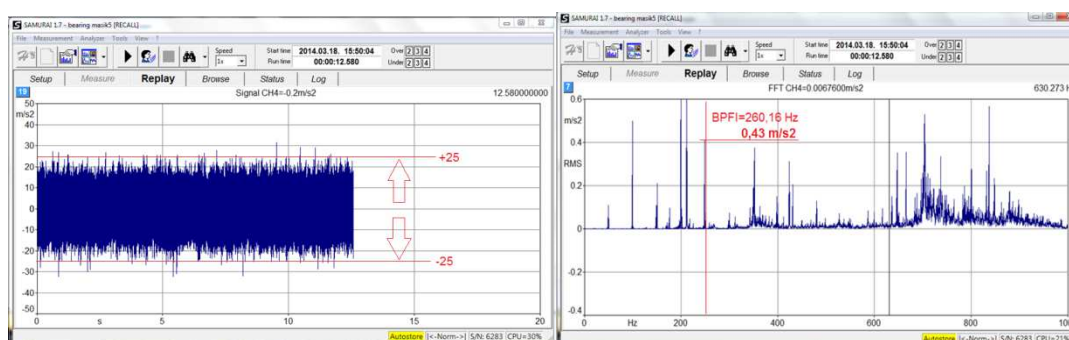
A neurális hálóstruktúrák két fő csoportja: a hurokmentes vagy előrecsatolt hálók (feed-forward network) és a visszacsatolt vagy rekurrens hálók (recurrent network). Az előrecsatolt háló a pillanatnyi bemenet függvényét reprezentálja, azaz nincs semmilyen más belső állapota, csak maguk a súlyok. A rekurrens háló viszont a kimeneteit visszacsatolja a bemeneteire. Ez azt jelenti, hogy a háló aktivációs szintjei dinamikus rendszert alkotnak, elérhetnek stabil állapotot, de mutathatnak oszcillációt, sőt kaotikus viselkedést is. Ezenfelül a háló egy adott bemenetre adott válasza a kezdeti állapotától függ, amely a korábbi bemenetektől függhet. Ennélfogva a rekurrens hálók (ellentétben az előrecsatolt hálókkal) rövid távú memóriát is biztosíthatnak. Ezáltal érdekesebbé válnak mint agymodellek, de egyben nehezebben is érthetők. Ez a rész az előrecsatolt hálókra koncentrál, a fejezet végén néhány hivatkozást adunk, segítve a rekurrens hálók további tanulmányozását.

A neurális hálót osztályozásra vagy regresszióra használhatjuk. Ha folytonos kimenete van a hálónak (pl. szigmoid egységekkel), akkor logikai osztályozás esetén hagyományosan egy kimeneti egységet használunk, és ha ennek aktivációs értéke 0,5 feletti, azt az egyik, ha 0,5 alatti, akkor a másik osztályba tartozásként interpretáljuk. Egy k osztályos osztályozási feladatnál feloszthatjuk az egyetlen kimeneti egység értéktartományát k részre, de megszokottabb, hogy ehelyett k elkülönült kimeneti egységet használjunk, ahol mindegyiknek az aktivációs értéke a bemenet adott osztályba tartozásának valószínűségét reprezentálja. Az előrecsatolt hálókat rendszerint rétegekbe (layer) szervezzük oly módon, hogy minden egyes egység csak a közvetlenül megelőző réteg egységeitől kap bemeneti jelet. A következő két alfejezetben egyrészt az egyrétegű hálózatokkal foglalkozunk, amelyeknek nincsenek rejtett egységei, másrészt a többrétegű hálókkal, amelyek egy vagy több rejtett réteggel rendelkeznek.

A csapágyak mesterséges hiba okozta hibajelek diagnosztizálására, mérési céllal, kísérleti jelleggel a Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszékén csapágy vizsgáló tesztpad lett használva. A tesztpad 5 különböző típusú csapágy vizsgálatát teszi lehetővé változtatható fordulatszám mellett.

A belső gyűrű hibafrekvencia (BPFI) 2880 1/ min névleges motorfordulatszám mellett került kiszámításra, amely 260,16 Hz-re adódott, ismerve a csapágó típusát, kapcsolódószöget, fordulatszámot, gördülőelemek számát és a vonatkozó csapágógyűrű átmérőt. A 5.5 ábra mutatja az időtartománybeli mérések rezgésképét és ennek gyors Fourier transzformáltja látható, ahol 260, 16 Hz környékén jól kivehető rezgéscsúcs tapasztalható, amely a belső gyűrű hibára utal.

A külső gyűrű hibafrekvencia (BPFO, ball passing frequency outer race), a kosár hibafrekvencia (FTF fundamental train frequency), a gördülőelem hibafrekvencia (BSF ball spin frequency) hasonló módon kiszámításra került a kapcsolószög, fordulatszám, és a gyűrűátmérők, gördülő elemek számának ismeretében. BPFO= 171,84 Hz, FTF= 19,2 Hz, BSF=112,32 Hz.



5.5 ábra: Az időtartománybeli rezgéskép (balra), frekvenciaspektrum FFT transzformációt követően a 6206 típusú csapágónál

A neurális háló (ANN) 6 bemeneti paraméterrel és 3 kimenetivel rendelkezik, amelyek a lehetséges hibaállapot (lazaság, gyűrűhiba, gördülőelem hiba) indikátorai, ennek megfelelően a jó csapágó +1, a rossz csapágó -1 minősítést kap. Egy előre definiált topológiával és architektúrával rendelkező neurális hálózat került betanításra MATLAB Neural Network Toolbox segítségével. Felügyelt, ellenőrzött tanulást alkalmaztam, ahol ismertek a kimeneti targetek. Szakirodalmi kutatásaim szerint javasolt a Levenberg-Marquart backpropagation algoritmus, mint a Newton gradiens módszer alternatíva, mivel az a leggyorsabb.

A neurális háló 6 bemeneti paramétere: 3 időtartománybeli paraméter: maximális rezgés gyorsulás amplitúdó (A_{MAX} , amplitude), kurtózis (K, kurtosis), csúcstényező (CF, crest factor) 3 frekvenciatartománybeli paraméter: külsőgyűrű hibafrekvencia jel amplitúdó értéke (X_{BPFO}), belsőgyűrű hibafrekvencia jel amplitúdó értéke (X_{BPFI}), gördülőelem hibafrekvencia jel amplitúdó értéke (X_{BSF}).

A neurális háló 3 kimeneti paramétere: lazaság, gyűrűhiba (külső- vagy belsőgyűrű), gördülőelem hiba.

Az idő- és frekvenciatartománybeli paraméterekkel a neurális háló betanításra került és a validálást követően a diagnosztikai rendszer hatékonyságát az 5.1 táblázat összegzi, benne a tipikus hibákkal, amelyek a csapágó adott elemeinek meghibásodására jellemző.



5.1 Táblázat: A csapágyhibákra utaló tünetek és a neurális háló hatékonysága

Hiba típusa	Hiba-frekvencia	Neurális háló hatékonyság	Tünetek
Hibátlan állapot	F_s , BPFO, BPFI	-----	F_s , BPFO, BPFI szintjei alacsonyak erősen határolt oldalsávok nélkül.
Lazaság	F_s	92,3%	Az F_s amplitúdó értékei növekednek és az oldalsávok megjelennek.
Gyűrű hiba	BPFI, BPFO	86,7%	A BPFI, BPFO frekvenciákon, illetve felharmonikusokon amplitúdó nő.
Gördülő elem hiba	2*BSF, BPFI, BPFO	94,8 %	2*BSF, BPFI, BPFO hibafrekvenciákon jelentkező jel amplitúdó nő.

Tehát összegezve, lehetséges az időtartománybeli, a frekvenciatartománybeli és az idő-frekvenciatartománybeli vizsgálat, továbbá az STFT módszer, az SPM módszer. A gépi tanuláson, a mesterséges intelligencián alapuló diagnosztikai rendszerek a gépek, gépelemek, csapágyak állapotvizsgálatát megkönnyíti. A mesterséges neurális hálók működése a rendszer betanításán alapul, amely ennek eredményeképpen képes az automatikus hibafelismerésre. A jelenlegi mérési sorozatban a Matlab Neural Network Toolboxal épített neurális háló 6 bemeneti paraméterrel és 3 kimenetivel rendelkezik, amelyek a lehetséges hibaállapot (lazaság, gyűrűhiba, gördülőelem hiba) indikátorai, ennek alapján képes diagnosztizálni. A validáláshoz használt próbapad alkalmazásával mintegy 90 % körüli hibafelismerési hatékonyság elérhető volt.

5.2 Hilbert Huang transzformáció és EMD módszer

A Hilbert Huang transzformáció (HHT) jeleket ún. IMF (intrinsic mode functions) alakítja és azonnali frekvencia adathalmazt eredményez. Jól alkalmazható a gépészmérnöki gyakorlatban gyakran előforduló nem állandó és nemlineáris jelek feldolgozásához. Összehasonlítva a Fourier transzformációval, inkább tapasztalati algoritmuson alapuló módszer, mint elméleti módszer. A HHT módszer /Huang et al./ a NASA alkalmazásokban fordult elő először, mint az empirikus mód dekompozíció (EMD) és a Hilbert spektrumelemzés (HSA) eredménye.

A HHT módszert gyakran alkalmazzák gépek és gépalkatrészek hibafeltárására. A módszer hátránya, hogy kis sáv szélességű jeleket nehezen képes szétválasztani. [4]



5.3 TARTÓVEKTORGÉPEK MÓDSZER (SVM)

Absztrakt: Az SVM (Support Vector Machine) módszert eredetileg osztályozásra fejlesztették ki, de egy ε érzéketlenségű veszteségfüggvény alkalmazásával regressziós feladatok megoldására is alkalmas. Használata széles körben elterjedt, osztályozásra vagy regresszióra visszavezethető műszaki problémák megoldására is használják. Az eredeti alapfeladatban az osztályozó optimális hipersík meghatározása kvadrátikus programozási feladat megoldásával történik. A módszer kifejlesztésekor a számítástechnika fejlettségét tekintve a feladat végrehajtása időigényes és nagy memóriakapacitás igényű volt, ezért különböző módokat fejlesztettek ki a kvadrátikus programozás hatékonyabb megoldására. Ilyenek voltak például az ún. szeletelési (chunking) eljárások és a dekompozíciós módszerek, különös tekintettel a legelterjedtebben használt SMO (Sequential Minimal Optimization) eljárás. A módok másik típusa magát a kvadrátikus programozást helyettesíti valamilyen más optimalizálási megoldással, például az SSVM (Smooth Support Vector Machine) egy egyszerű gradiens módszerekkel megoldható optimalizálási feladatot használ, vagy a legkisebb négyzetek elvén alapuló LS-SVM (Least Squares Support Vector Machine), melynek megoldása egy lineáris egyenletrendszer eredményeként áll elő. Ebben a munkában műszaki optimalizációs feladatokat oldunk meg ezen módok saját fejlesztésű implementációinak alkalmazásával, végül a kapott eredmények illetve tapasztalatok alapján összehasonlítjuk és vizsgáljuk a különböző feladatok különböző módokkal történő megoldásának lehetőségeit és korlátait.

A gépi tanulás módszereinek alkalmazása széles körben elterjedt a különböző tudományterületeken, így a műszaki tudományok terén, műszaki problémák megoldásában is egyre sűrűbben alkalmazzák. Azok a feladatok, melyek visszavezethetők osztályozási alapfeladatra, megoldhatók a gépi tanulás egyik speciális módszerével az SVM (Support Vector Machine) módszerrel [5]. Ennek a módszernek az alkalmazási lehetőségét tovább szélesíti az, hogy a függvényközelítés (regresszió) egy ε érzéketlenségű veszteségfüggvény alkalmazásával felírható egy olyan osztályozási feladatként, ahol a helyes osztályozás hibája nulla, míg a margón belülre kerülő, illetve a rosszul osztályozott pontokat gyengítő változók (ξ , slack variables) bevezetésével büntetjük [6].

Az SVM alapelve, hogy a különböző osztályokba tartozó pontokat egy hipersíkkal választja el egymástól és a pontokat aszerint osztályozza, hogy azok a hipersík melyik oldalára esnek. Egy pont halmazt többféle síkkal is szeparálhatunk. Az SVM módszer megoldásakor azt az optimális hipersíkot keressük, melynek a legnagyobb a margója, mert a széles margóval rendelkező döntési rendszerek jobban általánosítanak, ezáltal pontosabban osztályozzák azokat a pontokat, melyekkel a tanulási folyamat során még nem találkoztak. A margó a hipersík és a hipersíkhoz legközelebb eső pont közötti távolság. Ezt kell maximálnunk, így a hipersíkkeresési feladat egy konvex optimalizálási probléma, melyet kvadrátikus programozással oldhatunk meg.

Az SVM háttere

Az elmélet megalkotásakor a számítógépek kapacitása sebesség és memóriakapacitás tekintetében sem voltak olyan fejlettek, mint napjainkban, így egy ilyen feladat megoldása

nagyszámú tanulóhalmaz esetén rendkívül sok időt és memóriát igényelt. Ennek áthidalására a kvadratikus programozás egyszerűsítésére, illetve megkerülésére különböző módszereket fejlesztettek ki. A kvadratikus programozás memóriaigényének csökkentését segíti az úgynevezett szeletelési (chunking) eljárás [7], mely az eredeti feladatot kisebb méretű részfeladatok megoldásával helyettesíti. Ennek továbbfejlesztése Osuna algoritmus [8], mely azonos méretű részfeladatokra bontja az eredeti problémát. A legelterjedtebb módszer, mely lényegében már kiváltja a kvadratikus programozást az SMO (Sequential Minimal Optimization) eljárás [9], mely minden lépésben pontosan két változó analitikus módszerekkel történő optimalizálását hajtja végre.

A módosítottak másik irányvonala a kvadratikus programozás helyettesítése más optimalizálási módszer alkalmazásával. Az SSVM (Smooth Support Vector Machine) [6], az eredeti feladatot egy olyan optimalizálási feladatként írja fel, mely megoldható egy egyszerű gradiens módszerrel. A legelterjedtebb ilyen módosítás a négyzetes hibára optimalizált LS-SVM (Least Squares Support Vector Machine) [11], mely a feltételeket egyenlőségek formájában írja fel, így az eredmény egy lineáris egyenletrendszer megoldásával állítható elő.

Az eredeti SVM osztályozó

Lineáris osztályozás esetén a keresett hipersík egy lineáris függvény, melynek egyenlete:

$$w^T x + b = 0$$

ahol:

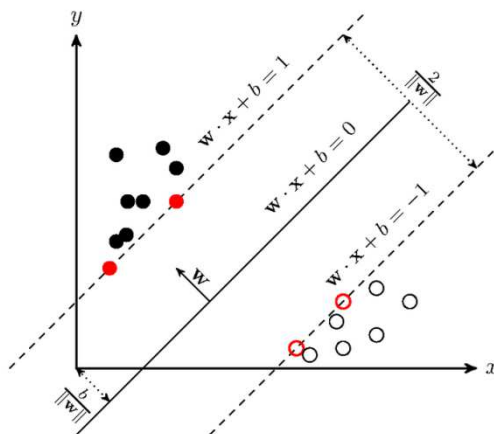
w^T – a súlyvektor transzponáltja;

x – egy jellemzővektor;

b – az eltolás érték.

A margó nagysága az alábbi módon számítható:

$$M = (X_{+1} - X_{-1}) * n = (X_{+1} - X_{-1}) * \frac{w}{\|w\|} = \frac{2}{\|w\|}$$



5.6 ábra: SVM elve



Forrás: [12]

Ez a margó akkor lesz maximális, ha a súlyvektor normája minimális, tehát az optimális súlyvektor meghatározásához az alábbi feladatot kell megoldanunk:

$$\min \frac{1}{2} w^T w$$

az alábbi feltétel teljesülése mellett:

$$y_i (w^T x_i + b) \geq 1 \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

ahol:

y_i – a tanulópontok osztálycímkéje;

n – a tanulópontok száma.

Ennek a feltételes szélsőérték-keresési feladatnak a megoldását Lagrange egyenlet segítségével adhatjuk meg. A megfelelő deriváltak eredményét behelyettesítve a Lagrange egyenletbe kapjuk a duális alakot:

$$\max \sum_{i=0}^n a_i - \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j y_i y_j x_i^T x_j$$

az alábbi feltételek mellett:

$$\sum_{i=0}^n a_i y_i = 0 \quad \text{és} \quad a_i \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

ahol a_i -k a Lagrange multiplikátorok. A feladatot kvadratikus programozással megoldva kapjuk meg az optimális Lagrange multiplikátorokat, melyek nagy része általában nullával egyenlő. Emiatt a megoldás kialakításában a tanulópontoknak csak egy része fog részt venni azok a pontok, melyekhez nem nulla értékű Lagrange együtthatók tartoznak. Ezeket a pontokat nevezzük tartóvektoroknak (support vectors). A tartóvektorok felhasználásával az optimális súlyvektor

$$w^* = \sum_{i \in SV} a_i y_i x_i$$

ahol SV a tartóvektorok indexeit tartalmazó halmaz; az optimális eltolás érték pedig bármelyik tartóvektor felhasználásával a

$$b^* = y - w^{*T} x$$

összefüggésekkel számítható. Az optimális eredményeket felhasználva a kétosztályos lineáris osztályozó gép válasza egy tetszőleges z pontra az alábbi alakban írható fel:

$$y(z) = \text{sgn} \left(\sum_{i \in SV} w^{*T} z + b \right)$$

Ha a tanulópontok lineárisan nem szeparálhatók hiba nélkül, akkor az osztályozást úgy lehet végrehajtani, hogy az osztályozás margóját ún. lágy margóként kezeljük, azaz



megengedjük, hogy tanulópontok a margón belülre, illetve rossz oldalra is kerülhessenek. Ebben az esetben ξ_i gyengítő változók (slack variables) bevezetésével az

$$y_i(w^T x_i + b) \geq 1 - \xi_i \quad \text{és} \quad \xi_i \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

feltételek teljesülését követeljük meg. Az optimális hipersík meghatározását ekkor úgy kell elvégezni, hogy a hibásan osztályozott pontok száma minimális legyen, ezért a primál alak

$$\min \frac{1}{2} \cdot w^T \cdot w + C \cdot \sum_{i=1}^n \xi_i$$

alakra változik, ahol C a két tag közötti kompromisszumot beállító tényező (büntető paraméter). A duál alak ebben az esetben is megegyezik a korábban megadottal, csupán az együtthatókra vonatkozó feltétel második része kiegészül egy C felső korláttal. A lágy margó az osztályozó választását sem befolyásolja, az eredmény megegyezik a lineáris osztályozó választásával.

A megoldandó példáinkban a feladat a bemeneti térben még lágy margó alkalmazásával sem oldható meg lineárisan. A lehetséges megoldáshoz keresnünk kell egy olyan többnyire magasabb dimenziójú teret, melyben a pontok lineárisan szeparálhatóak. Ehhez egy

$x \rightarrow \varphi(x)$ nem lineáris transzformációval a pontokat ebbe a térbe (tulajdonságok tere) kell transzformálni, és a szeparáló sík keresését ebben a térben kell elvégezni. Így az osztályozó válasza a tulajdonságok terében az alábbi alakban írható fel

$$y(z) = \text{sgn} \left(\sum_{i \in SV} \alpha_i y_i \varphi(x_i) \varphi(z) + b^* \right)$$

A megfelelő transzformációs függvény meghatározása azonban nehéz feladat, sőt bizonyos esetekben szinte lehetetlen. Itt alkalmazható az ún. kernel trükk (kernel trick) [8], azaz ezt a belső szorzatot helyettesíthetjük egy olyan megfelelően választott magfüggvénnyel (kernel függvénnyel), mely a kernel térben generálja ezt a belső szorzatot. Így az osztályozó kerneltérbeli válasza:

$$y(z) = \text{sgn} \left(\sum_{i \in SV} \alpha_i y_i K(x_i, z) + b^* \right)$$

Egy függvényt akkor tekintünk kernel függvénynek, ha kielégíti a Mercer tétel feltételeit. Kernel függvényekből számtalan létezik, sőt különböző műveletekkel az alapfüggvényekből további érvényes kernel függvények származtathatók. Példáinkban a leggyakrabban használt Gauss kernelt a radiális bázisfüggvényt (RBF, Radial Basis Function) fogjuk használni, melynek alakja:

$$K(x_i, x) = \exp(-\gamma \|x_i - x\|^2)$$

Az LS-SVM osztályozó módszer



Az LS-SVM optimalizálandó feladata a lágy margójú osztályozás alakjához hasonlít azzal a különbséggel, hogy az ε veszteségfüggvényt egy négyzetes veszteségfüggvényre cseréli [7]. A primál feladat alakja tehát:

$$\min \frac{1}{2} w^T w + C \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n e_i^2$$

$$y_i(w^T \varphi(x_i) + b) = 1 - e_i \quad (i = 1, \dots, n)$$

feltétel mellett. A megfelelő deriváltak Lagrange egyenletbe történő behelyettesítése után kapjuk meg a kvadratikus programozást kiváltó lineáris egyenletrendszert az alábbi alakban:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} & 0 & 0 & -\mathbf{Z}^T \\ 0 & 0 & 0 & -\mathbf{Y}^T \\ 0 & 0 & C\mathbf{I} & -\mathbf{I} \\ \mathbf{Z} & \mathbf{Y} & \mathbf{I} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{w} \\ b \\ \mathbf{e} \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

melyből $\mathbf{w}$ és $\mathbf{e}$ kiküszöbölésével az alábbi egyszerűbb alak jön létre:

$$\begin{bmatrix} 0 & \mathbf{Y}^T \\ \mathbf{Y} & \mathbf{\Omega} + C^{-1}\mathbf{I} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

ahol:

$$\Omega_{ij} = y_i y_j \varphi(x_i)^T \varphi(x_j) = y_i y_j K(x_i, x_j)$$

$$\mathbf{Y} = [y_1, \dots, y_n]$$

$$\mathbf{1} = [1, \dots, 1]$$

$$\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_n]$$

$\mathbf{I}$ = n elemű egységmátrix

Az LS-SVM osztályozó válasza megegyezik a kvadratikus osztályozó válaszával. Fontos különbség viszont, hogy az eredeti SVM ún. ritkasági tulajdonságának köszönhetően a Lagrange multiplikátorok nagy része nulla, így a válasz megadásában csak a tanulópontok egy része vesz részt, addig az LS-SVM esetén az egyenlőség miatt nincsenek nullaértékű együtthatók, így a válasz megadásában az összes tanulópont részt vesz. Nagyszámú tanulópont halmaz esetén ez a válaszadás idejét nagymértékben megnövelheti.

FELHASZNÁLT SZAKIRODALOM

- [1] CIHAN H. DAGLI: *Artificial Neural Networks for Intelligent Manufacturing*. Chapman & Hall, New York, 1994. p470.
- [2] HORVÁTH Gábor: *Neurális hálózatok és műszaki alkalmazásai*. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1998.
- [3] ALTRICHTER-HORVÁTH: *Neurális hálózatok*. Panem Kiadó. 2006.



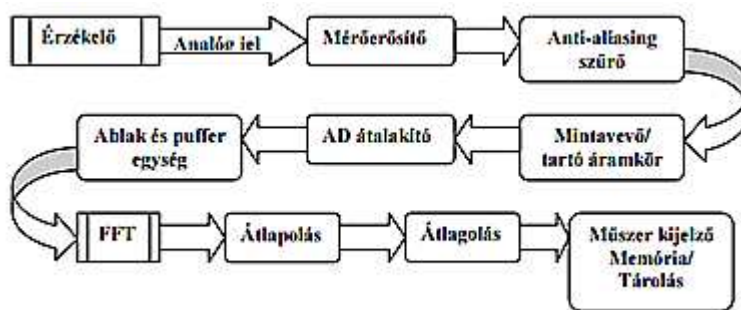
- [4] NORDEN E HUANG: *Hilbert-Huang Transform and Its Applications*. University of Alberta, 2005
- [5] CORINA CORTES and VLADIMIR VAPNIK: *Support-Vector Networks*. Machine Learning 20, 1995.
- [6] VLADIMIR VAPNIK ET AL: *Support Vector Regression Machines, Neural Information Processing Systems 9*. 1997, pp. 155-161.
- [7] BOSER et al.: *A training algorithm for optimal margin classifiers*. Fift Annual Workshop on Computational Learning Theory, 1992.
- [8] OSUNA and GIROSI: *Reducing run-time complexity is SVMs*. Advances in Kernel Methods- Support Vector Learning, 1999. pp. 271-284.
- [9] JOHN C. PLATT: *Fast Training of Support Vector Machines using Sequential Minimal Optimization*. Advances in Kernel Methpods- Support Vector Learning, 1999, pp. 185-208.
- [10] YUH-JYE LEE and O.L. MANGASAIN: *SSVM: A Smooth Support Vector Machine for Classification*. Computational Optimization and Aplications 20, 2001. pp. 5-22.
- [11] JOHAN SUYKENS ET AL.: *Least Squares Support Vector Machines*. World Scientific 2002.
- [12] SIMON HAYKIN: *Neural Networks and Learning Machines*. Pearson Edition Ltd. 2009, pp. 268-296.

6 REZGÉSMÉRÉS A DIAGNOSZTIKÁBAN

A rezgésmérés a műszaki diagnosztikában széleskörűen alkalmazott módszer.

Az alábbiakban bemutatásra kerülnek a rezgésméréssel összefüggő mérési és adatfeldolgozási módszerek.

A folyamatábráról (6.1 ábra) látható, hogy a vizsgált analóg jel milyen átalakításokon megy keresztül.



6.1 ábra: A rezgésmérés folyamatábrája

Forrás: [1]

- Analóg jel bemenet
- Anti-aliasing szűrés
- A/D átalakítás
- Átfedések
- Ablakolás
- FFT transzformáció
- Átlagolás
- Adatok megjelenítése és mentése

A mintavételezett analóg jelet egy digitális műszerbe vezetik, ami számos felhasználói funkciót dolgoz fel. A felhasználói igényektől és a mért analóg jelek természetes egységeitől függően közvetlenül is feldolgozhatók, vagy matematikai integrátorokba irányíthatók a rezgésmérés más egységeibe történő átalakítás céljából. A digitális mérőlánc elemei között találjuk az analóg mérés technikából ismert DC/AC csatolást, az előerősítőt/mérőerősítőt és a mérési tartományokat meghatározó osztókat. A legtöbb hordozható műszer FFT (Gyors Fourier Transzformáció) feldolgozást végez, amely az időben változó bemenő minták átlagolásának felvételét és saját frekvenciakomponensekre osztását végzi. A szóban forgó frekvenciától függően a vizsgálni kívánt jeleket felül-, illetve alul áteresztő szűrők sorozatával lehet meghatározni. [1]

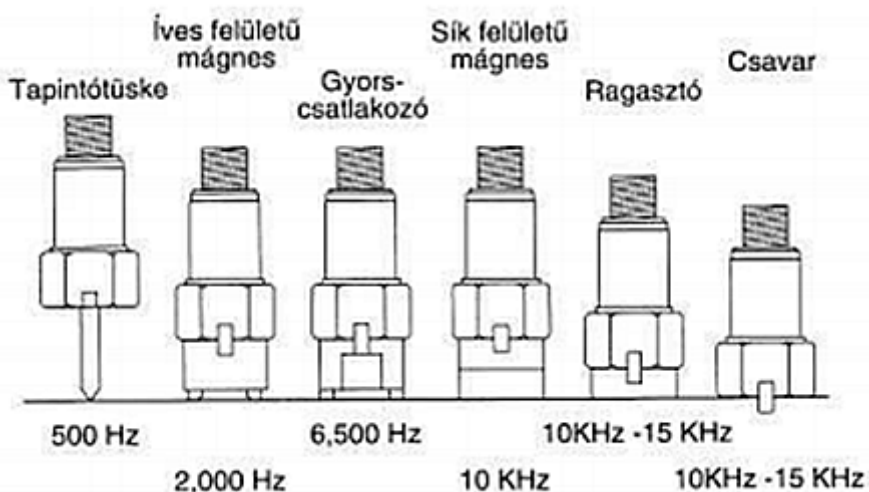
6.1 Rezgésérzékelők

A rezgésérzékelők a jel bizonyos fizikai paraméterét mérik, mint a kitérést, sebességet vagy a gyorsulást. A bemenő analóg jel hatására a kimeneten villamos feszültség keletkezik, amelyet erősíteni és kondicionálni kell.

A rezgés kitérés szenzorok mechanikus, elektromos vagy optikai alapon működnek. A gyakorlatban általában a rezgés sebesség vagy rezgés gyorsulás érzékelő szenzorokat alkalmazzák. A sebesség érzékelő szenzorok általában nagy tömegűek (500-600 g), vagyis nagy tehetlenségük miatt alkalmatlanok gyorsan változó jelek érzékelésére. Tipikus frekvenciatartományuk 10-1000 Hz.

A rezgés gyorsulás érzékelők többnyire piezoelektromos elven működnek. Mivel kis tömegűek, ezért kis tehetlenségük miatt képesek gyorsan változó jelek érzékelésére is. Széles frekvenciatartomány átfogására képesek, nagy dinamikatartomány, alacsony zaj (magas SNR-Signal-to-Noise Ratio) jellemzi őket. Hirtelen hőmérsékletingadozásra és környezeti hatásokra nem érzékenyek.

Az érzékelők esetében fontos, hogy megfelelően rögzítésre kerüljön a mérendő gép felületére. Növekvő frekvencia egyre fixebb rögzítést igényel, a frekvencia szerinti függőségre mutat be példát a 6.2 ábra.



6.2 ábra: A rezgésérzékelő szenzorok rögzítése a mérendő frekvencia függvényében

Forrás: [1]

6.2 Lökésimpulzus módszer -SPM

Az SPM diagnosztikai módszert gördülőcsapágyak károsodásának vizsgálatára fejlesztették ki. A gördülőelemek és a gördülőpálya érintkezésekor az anyagban lökeshullámok terjednek tovább, amelyek intenzitásából következtetéseket lehet levonni a csapágy állapotára vonatkozóan.



Magas frekvencia tartomány a szerkezeti rezonanciára jellemző szakasz. Itt érzékelhetők a működésből származó lökésimpulzus jelek. Az érzékelő 32 KHz rezonanciafrekvenciára van hangolva. A tartomány legjellegzetesebb rezgésdiagnosztikai módszere az ütésimpulzus módszer (SPM).

Az elemi ütközés során mindkét testben mechanikai lökeshullám keletkezik, amelynek csúcsértékét csak az ütközési sebesség határozza meg, és nem befolyásolja ezt az ütköző testek tömege és alakja. A tapasztalatok azt mutatják, hogy az üzemi állapot és a lökeshullámok nagysága között jól definiálható összefüggés áll fenn, amely két fogalommal írható le. Az egyik ezek közül a dBC-vel jelölt ún. szőnyegérték, a másik a dBM-mel jelölt ún. maximális érték.

A dBC szőnyegérték a felületi érdesség hatására alakul ki. Mivel a felület végtelen számú felületelemre bontható, így a sok kicsiny impulzus külön-külön már nem érzékelhető, csak az általuk meghatározott felület létezik. A dBM maximális, vagy csúcsértéket a durva sérülések, vagy a nagy felületi egyenetlenségek, okozzák. Maga a dBM nem más, mint a mért legmagasabb lökésimpulzus érték.

Az üzemállapot megítéléséhez szükség van egy összehasonlítási alapra, ami nem más, mint egy, a mérendővel azonos típusú kifogástalan állapotú gépen mért ütésimpulzus. Ezt induló csillapítási értéknek nevezik, jele dBi. A gép állapotára egy olyan jellemző értéket állapíthatunk meg, amely az aktuális mért értékből az induló csillapítási érték levonásával keletkezik, és amelynek neve: normalizált lökeshullám érték.

A sérülés kialakulásának legbiztosabb jele sokkal inkább a folyamatosan növekvő lökeshullám értékek sorozata, mint az egyszeri leolvasásnál mért magas érték, így a méréseket célszerű rendszeres időközönként végezni, amelyből mérési trend és hibaprognózis is felállítható.[10]

6.3 „SEE” technológia és akusztikus emissziós vizsgálatok

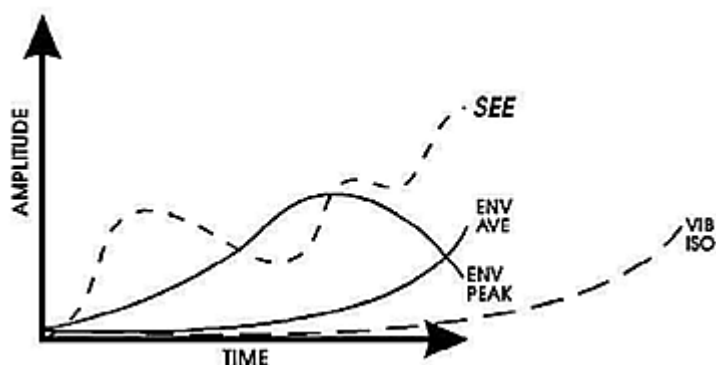
Az iparban gyakran használatos az Spectral Emitted Energy (SEE) módszer, amelyet az SKF cég fejlesztett ki és az SPM módszerhez hasonlóan gördülőcsapágyak vizsgálatára alkalmaznak, mint akusztikus emissziós módszert.[10] Ultrahang tartománybeli vizsgálat, amely a csapágy üzemi fordulatszámától független mérést tesz lehetővé, alkalmazásával a csapágyak futó felületén kialakult repedéseket és töréseket lehet kimutatni. Fém-fém érintkezés esetén, az akusztikus emisszióhoz hasonlóan, az anyagban lökeshullámok keletkeznek, amelyeket detektálni lehet.

A fémes érintkezés a kenőanyag hiánya, vagy nem megfelelő minősége miatt következik be, ekkor a felületi sérülésekből minden egyes átgördülés folyamán a kopás miatt anyagrészek távoznak, amely a kenőanyagba jut és növeli a súrlódást, az adhéziós kopást, fokozza a rezgést. A fém-fémes érintkezés a felületi érdességi csúcsok között helyi túlhevülés is fellép, emiatt egy rövid időre a két érintkező pont összeheged. Mindez csak pillanatszerűen történik meg, hiszen ahogy a csapágy elfordul, az ideiglenes varrat elszakad, tehát adhéziós kopások sorozata lép fel. Az összehegedt részecskék szétszakadása magas frekvenciájú jeleket gerjeszt, melyek a 200-300 kHz közötti ún. akusztikus emissziós tartományban figyelhetők meg.

Kenőanyag állapotfigyeléssel és cserével a SEE érték csökkenhet. Mivel a SEE érték lassan fokozódik gyakran azonosíthatók a SEE spektrumban a csapágy jellegzetes frekvenciái. A meghibásodás előrehaladtával, olyan sok szennyezőanyag, vagy annyira durva mechanikai felületi hibák keletkeznek, hogy mikro hegedések már nem jönnek létre, a SEE érték pedig kissé csökken. A 6.1 táblázat a megengedhető SEE overall értékek riasztási szintjeit foglalja össze, a 6.3 ábrán pedig egy gördülő csapágy hibára utaló SEE rezgés spektrumot kísérhetünk figyelemmel, melynek méréstechnikai előállítása az Envelop mérésekhez hasonló szűrők alkalmazásával történik. [11]

6.1 táblázat: SEE határértékek [1]

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



6.3 ábra: SEE amplitúdó időbeli változása

Forrás: [1]

Célszerű a diagnosztikai módszereket kombinálva alkalmazni, egyidejűleg figyelik a rezgéssebesség vagy gyorsulás és az SEE értékeit, az automatikus riasztási szintek mindhárom mérési eljárásra be vannak állítva. Az intelligens rezgés-diagnosztikai szakértő program pedig figyeli a spektrumképet, és az előre beállított jellegzetes csapágyfrekvenciákat azonosítja, a hibaküszöb értéke javítási beavatkozási utasítást ad.

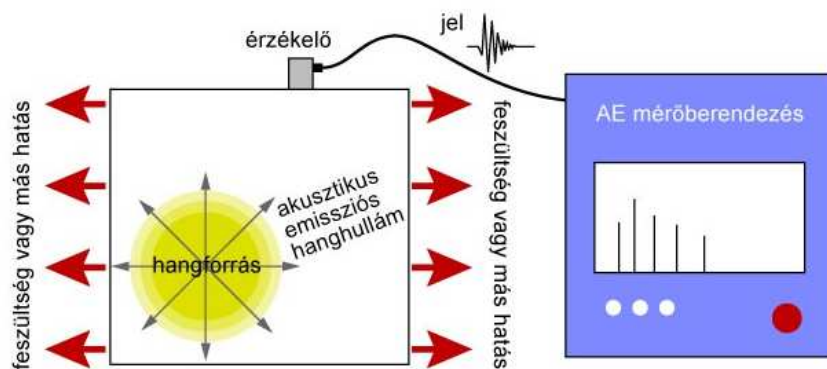
6.4 Akusztikus emisszió

J. Kaiser nevéhez köthető az akusztikus emisszió (AE) és a kapcsolódó Kaiser-effektus, amely szerint, ha az anyagot már terhelés érte, akkor újabb terheléskor csak akkor bocsát ki újra AE eseményeket, ha a terhelés felülmúlja a megelőző terhelési állapotot.

Fontos az események időjeleinek rögzítésére, azok spektrumanalízissel, korszerű információtechnológiai osztályozására és elemzésére.

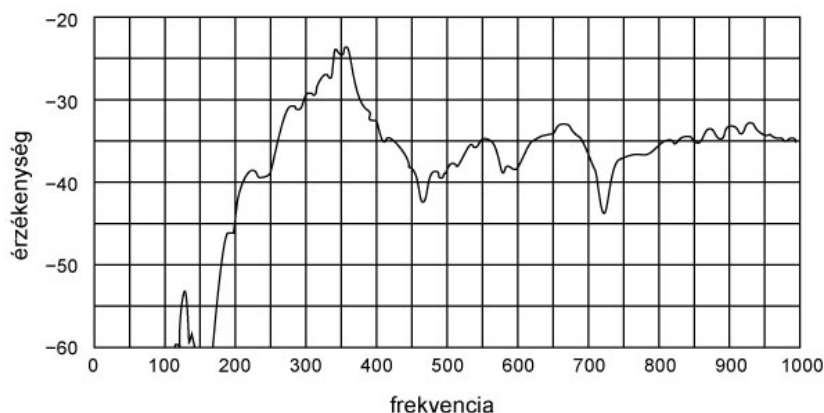
Az akusztikus emissziós mérések során az észlelt jelek forrásának azonosítása körülményes, mivel az anyag belsejében keletkező rezgések amplitúdója, fázisa és spektruma változik (szóródás, elhajlás, törés, visszaverődés, csillapodás). Az érzékelőhöz eljutó hullámot a piezoelektromos érzékelő - rezonanciája folytán - csillapított szinuszhullámmá transzformálja, és ez az elektromos jelalak is torzul az erősítés, jelfeldolgozás során.

Az ipari műszaki diagnosztikában az AE vizsgálatokat sikerrel alkalmazhatjuk csapágyak korai meghibásodási (például felületi mikrorepedések terjedési vizsgálata kifáradás, fretting kopás miatt) jelenségeinek felismerésére, ugyanis a korai csapágyhibák gyakran néhány száz KHz frekvenciájú hibajelet generálnak. Később, ahogy a hiba kezd előrehaladni, úgy a kibocsátott frekvencia is csökken és már SEE technológiával, majd SPM méréssel, később hagyományos rezgésméréssel is kimutathatóvá válik. Végül a meghibásodás már az emberi fül által is hallható lesz, amely súlyos meghibásodásra utal és gyakran az alkatrész javítás nélküli cseréjét igényli, vagy gépjavítás szemszögéből nézve az alkatrész teljeskörű felújítását. Ezért fontos a hiba korai diagnosztizálása és ezzel a nagy összegű meghibásodások megelőzése, a karbantartás megfelelő alkalmazása. A mérés tömbvázlata a 6.4 ábrán látható.



6.4 ábra: Az akusztikus emisszió mérés tömbvázlata

Forrás: [12]



6.5 ábra: Az akusztikus emissziószenzor tipikus átviteli frekvenciamenete

Forrás: [12]

Fontos, hogy olyan AE szenzort válasszunk, amely megfelelő frekvenciaátviteli tartománnyal rendelkezik. (6.5 ábra) Általában 100-400 KHz és 100-900 KHz mérési tartománnyal rendelkeznek a szenzorok. Ahhoz, hogy egy ilyen jelet rögzítsünk, nagyfrekvenciás mintavételezésre lenne szükségünk. Mivel a rezonancia és maga a kibocsátás a 100 vagy több száz kHz-es tartományban van, ezért az adekvát mintavételezés a MHz-es vagy több tíz (száz) megahertzes tartományban lenne. Ma forradalmi változás előtt áll az AE, mivel a számítástechnika fejlődése lehetővé tette, hogy akár GHz sebességű mintavételezést is végezzünk. A jel mintavételezése, tárolása után lehetséges olyan gépi tanulási módszerek (pl. neurális hálók, SVM) alkalmazása, amelyek automatikus hibafelismerést tesznek lehetővé és így egy szakértői rendszer részeként működhetnek.

6.5 Jellegzetes hibafrekvenciák

Mivel az ipari gyakorlatban legköltséghatékonyabban a rezgésmérés alkalmazható, valamint széleskörben elterjedt módszer, röviden tekintsük át, hogy az egyes gépelemek illetve géphibák milyen jellegzetes hibákat és hibafrekvenciákat produkálnak, ezek milyen okokra vezethetők vissza és milyen határértékek alatt elfogadhatóak a hibaértékek.

Csapágy

A csapágyak közül kiemelt jelentőségűek a gördülőcsapágyak. A debreceni FAG Ipari Kft. üze me kúpgörgős csapágyak gyártása terén kiemelkedő, a termékek például gépjármű sebességváltóművekbe kerülnek beépítésre. A csapágyhibák helyes megértéséhez támaszkodni kell a gépelemek ismereteinkre, ismétlésképpen tekintsük át a csapágy részeit a 6.6 ábra szerint.

A csapágy hibái eredhetnek a gyártásból, amennyiben gyártástechnológiai megközelítésből vizsgáljuk a problémakört. Itt meg kell említeni az alábbi hibákat: külső- és belső gyűrű mérethibák, görgő mérethiba, esztergálási hibák, beköszörülés, felületi minőségi hiba, ovalitás hiba, hiányzó görgő, fordított görgő, hőkezelési hiba, konzerválási hiba, helytelen gyártási kezelésből eredő hibák.

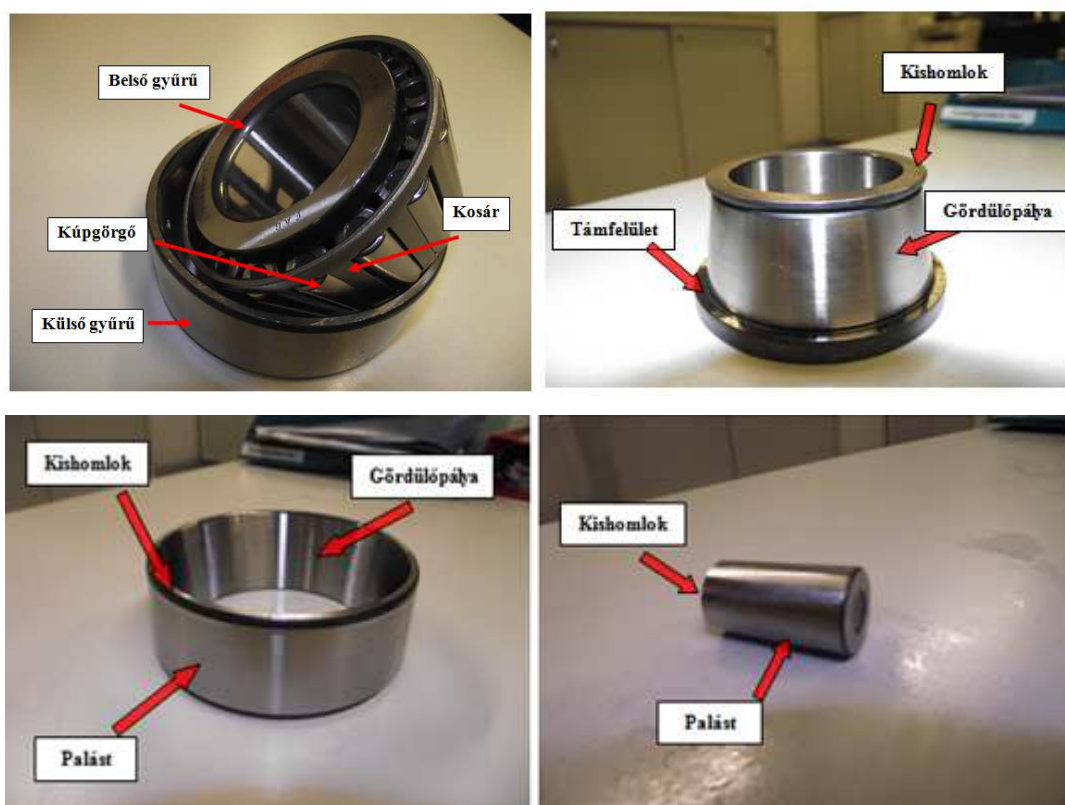
Jelen jegyzet nem részletezi a gyártásból eredő hibák műszaki diagnosztizálását, hanem a hibák másik csoportjára, az üzemeltetésből eredő hibákra koncentrál, ilyen a csapácskopás,

a kifáradás, gyűrűk kipikkelyesedése, repedés, azok diagnosztizálására, amely a karbantartás szerves részét képezi.

Csapágyak esetében lehetőségünk van a pontos hibafrekvenciák számolására, amelyek igénylik az adott csapágy katalógusaiban definiált pontos paramétereit.

A gyakorlati diagnosztikában megfelelnek a közelítő képletek, amelyek segítségével, kis hibával számíthatók a tipikus csapágy hibafrekvenciák.

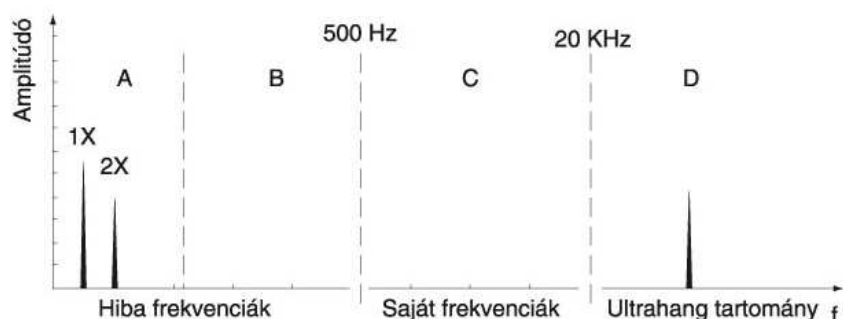
Csapágy külső gyűrű hibafrekvencia	$BPFO=0,4 \cdot z \cdot f_h$ [Hz]
Csapágy belső gyűrű hibafrekvencia	$BPFO=0,6 \cdot z \cdot f_h$ [Hz]
Csapágy gördülőelem hibafrekvencia	$BPFO=0,23 \cdot z \cdot f_h$ [Hz]
Csapágy kosár hibafrekvencia	$BPFO=0,4 \cdot f_h$ [Hz]



6.6 ábra: A kúpgörgős csapágy részei és megnevezése

Forrás: [16]

A csapágykopás első megjelenése (6.7 ábra) az ultrahang tartományban jelentkezik. Érzékeny ultrahang detektáló műszerrel a nagyon kisméretű, még kezdődő csapágykopást is ki lehet mutatni, és nagy biztonsággal lehet azonosítani.

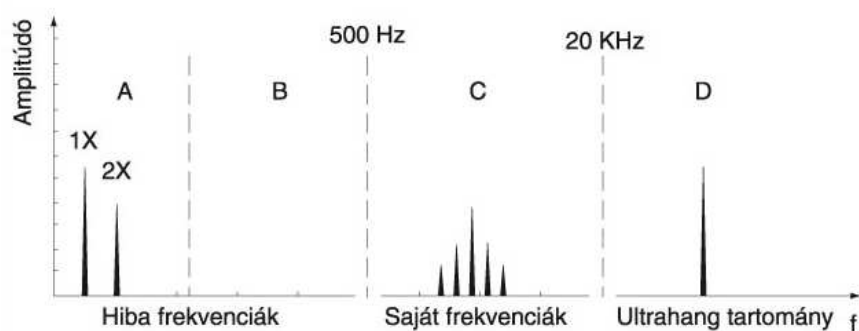


6.7 ábra: A csapágyhiba frekvenciák a meghibásodás 1. stádiumában

Forrás: [4]

Anyagfáradás lép fel a hiba fejlődésének második stádiumában (6.8 ábra) amikor az apró üregek jelennek meg a csapágy alkotóelemein. A csapágy működése alatt, amint a gördülő elemek áthaladnak a hibákon, szélessávú amplitúdómodulált gerjesztés jelenik meg a csapágyban, ami a csapágy komponenseinek sajátfrekvenciáit gerjeszti. Ezek a sajátfrekvenciás csúcsok növekedését okozzák az 500 Hz – 20 kHz tartományban. A hiba fejlődésével, súlyosságának növekedésével megjelennek az oldalsáv frekvenciák az amplitúdó moduláció következtében. Ennek oka az, hogy a csapágygolyók (görgők) periodikusan áthaladnak a terhelési zónán, a gerjesztő erő ciklikusan változik az időben.

Az ultrahang tartományban végzett mérések eredménye az előző stádium adatainak akár kétszerese is lehet.

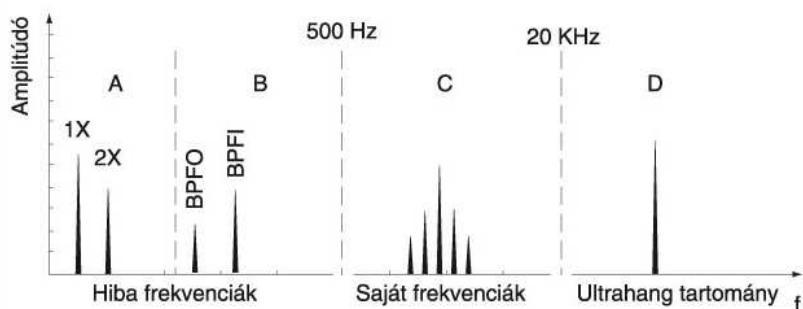


6.8 ábra: A csapágyhiba frekvenciák a meghibásodás 2. stádiumában

Forrás: [4]

A harmadik stádiumban (6.9 ábra) a csapágy hibafrekvenciák megjelennek az 500 Hz alatti tartományban tipikusan a forgási frekvencia (1X) nem egész számú többszöröseinél. A csapágykopás nyomai is megjelennek a csapágykomponenseken, miután szétszerelik a csapágyat.

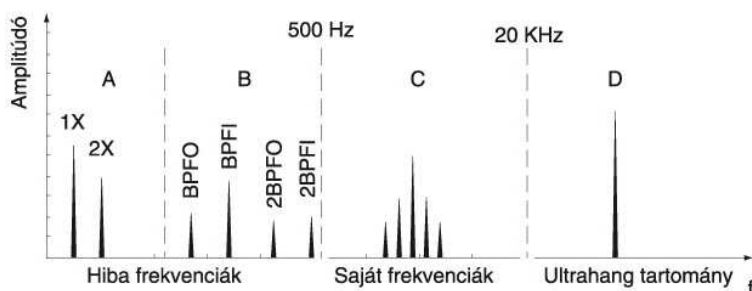
Az ultrahang tartományban a mérések ismét növekedést mutatnak az előző stádiumhoz képest.



6.9 ábra: A csapágyhiba frekvenciák a meghibásodás 3. stádiumában

Forrás: [4]

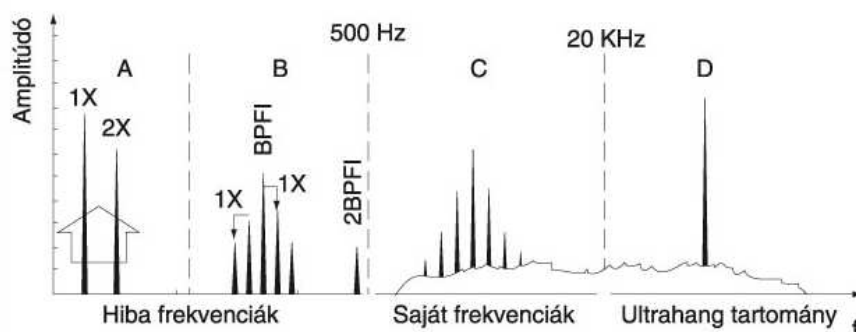
A negyedik stádiumában (6.10 ábra) megjelennek a csapágy hibafrekvenciák felharmonikusai, maradék élettartama csökken, hallható akusztikai jelenségekkel társulva. A gyűrűk és a gördülő elemek kipikkelyesedése, alak- és méretdeformáció lép fel, az ultrahang tartományban tovább növekszik a spektrum energiaszintje.



6.10 ábra: A csapágyhiba frekvenciák a meghibásodás 4. stádiumában

Forrás: [4]

Az ötödik stádiumban (6.11 ábra) a jellemző csapágy hibafrekvenciák és felharmonikusai körül megjelennek az oldalsáv frekvenciák. A gyűrűkben és a gördülő elemeknél a felületi sérülések felerősödnek, a csapágy hőmérséklete növekszik, amelyet célszerű termoelemekkel monitorizni. Belső elemek kilazulása léphet fel, ami a forgási frekvencia és harmonikusainak amplitúdó-növekedéséhez vezet. A sajátfrekvenciák és az ultrahang tartomány jelei tovább növekszenek.

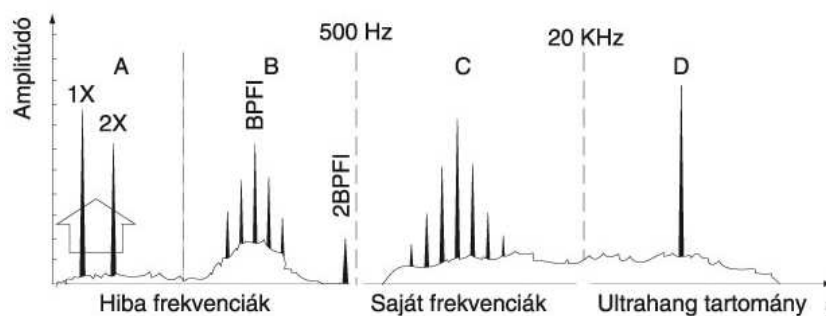


6.11 ábra: A csapágyhiba frekvenciák a meghibásodás 5. stádiumában

Forrás: [4]

A hibafejlődésnek ez a hatodik, végső stádiuma. (6.12 ábra) Az összes amplitúdó minden tartományban megnövekszik a túl nagy kopás következtében. A csapágy rezgésszintje túlzottan nagyra nő, számottevő hőmérséklet növekedés és akusztikai zaj lép fel. Ha tovább üzemeltetik, a kosár eltörik, a gördülőelemek kieshetnek, feltorlódnak, ütköznek és összeolvadhatnak. A gyűrűk és a tengely jelentősen sérülnek, a csapágy véglegesen tönkremegy.

A háttérzaj végül a jellemző hibafrekvencia csúcsait elnyeli, és a csapágy teljesen szétesik, amely eredményeképpen a tengely és a forgórész egyaránt károsodhat.



6.12 ábra: A csapágyhiba frekvenciák a meghibásodás 6. stádiumában

Forrás: [4]

Siklócsapágy hibák

Legjellemzőbb hiba a kenőanyag által gerjesztett hidraulikus instabilitás (oil whirl), olajrezonancia. Szubharmonikus frekvenciákon eredményez nagy amplitúdójú és energiatartalmú rezgéseket. Az olajfilm és a csapágy felülete között a nyomásgradiens növekedést mutat a tengely kerületén kialakuló olajék miatt. Keskeny, magas csúcsok jelennek meg 0,38X és 0,48X frekvenciák között. Olaj ütés (oil whip) jelensége lép fel, ha az olajfilm a forgórész sajátfrekvenciáját gerjeszti. Megoldást jelent a kenőanyag cirkuláció csökkentése vagy a rendszer mechanikai rugóállandójának növelése. Más jellegű hibák, mint a súrlódás vagy tengelybeállítási hibák többszörös felharmonikusokat is létrehozhatnak a spektrumban, amely alapján jól elkülöníthető jelenség. [4]



Kiegyensúlyozatlanság

A kiegyensúlyozatlanság forgó vagy alternáló mozgást végző elemek hibájára utal. Ez egyaránt lehet hibás méretezés, gyártás, szerelés vagy szakszerűtlen karbantartás következménye. Rendszerint radiális, ritkábban axiális irányú rezgésként is jelentkezhet. Frekvenciája megegyezik a kérdéses elem fordulatszámának megfelelő frekvenciával. Intenzitása, erőssége rendszerint jelentős. Szerelési hiba, deformálódott tengely. A szerelési hiba és a görbült (deformálódott) tengely hatása ugyancsak kiegyensúlyozatlanságban nyilvánul meg. Gyakran előforduló hibajelenség. Az egyszerű kiegyensúlyozatlanságtól abban tér el, hogy radiális és axiális rezgéseket is kelt, továbbá gyakran a forgási frekvencia két- vagy háromszorosán jelentkezik.

Impulzusszerű erőhatás

Az impulzusszerű erőhatásnak kitett elemek, mint például a szelepek által keltett rezgések az időegység alatt fellépő ütközéseknek megfelelően alakulnak. Jellemző a felharmonikusok megjelenése is.

Tengelykapcsolók

A helytelenül szerelt tengelykapcsolók a forgási frekvenciának megfelelő radiális, ritkábban axiális rezgésekben nyilvánul meg. Gyakori a második, harmadik felharmonikus megjelenése is. Amennyiben az axiális rezgés a radiális rezgés intenzitásának 50 %-át meghaladja, akkor valószínűleg hibás szerelés a közvetlen ok.

Fogaskerék hajtóművek

A fogaskerekek keltette hatások többnyire könnyen azonosíthatók, mert ezek a fordulatszám és a fogszám függvényében alakulnak. A jellegzetes frekvenciák a fogkapcsolódási frekvencia és az együtt járási frekvencia.

A fogaskerék kopás az egyik fő probléma, amely lehet adhéziós vagy abrációs kopás. A felületi mikrozrezgések miatt fretting kopás jelensége is jelen lehet. Offline monitoring keretében hasznos a kopáskép elemzés mikroszkóp alatt. A fogaskerék áttételi frekvencia a fogszám és az üzemi fordulatszám (1/s-ban) szorzata. Kopás esetén itt alakul ki, tehát 1X helyen, amplitúdónövekedés és oldalsáv megjelenés a spektrumban, ezzel azonosíthatjuk a jelenlévő kopást.

Gyakori a foghézag nem megfelelősség, amely szintén 1X körüli amplitúdót jelent keskenyebb oldalsávokkal. Sérült vagy törött fogak, excentrikus fogaskerék és a görbült tengely esetében általában egyoldalsávos SSB spektrum jelenik meg 1X frekvencián.

Szíjhajtások

Lánchajtásoknál a kapcsolódási-, a hajtási- és a hajtogatási frekvencia fokozott intenzitású megjelenése kopásra vagy hibás beállításra utal. Számítással történő meghatározásuknál a kapcsolt forgó tömegek tehetetlenségi nyomatékát is figyelembe kell venni.

Áramlás keltette rezgések

Minden szivattyú, ventilátor és kompresszor rendelkezik a lapát elhaladási frekvencián spektrum csúccsal, amelyet az üzemi fordulatszám határoz meg. Lapátsérülés esetén az



állórész fúvókái (diffúzor) és a lapát között a rés mérete változik, amely járulékos rezgéseket kelt, ezeket rezgésdiagnosztikai módszerekkel felderíthetjük.

A másik jelenség a kavitáció, amely rendkívül káros lehet a gépállapot szempontjából.

A kavitáció egy fizikai jelenség, mely akkor következik be, ha egy anyag folyadék fázisból hirtelen gáz fázisba megy át a nyomás esése következtében. Ha a folyadék sebessége hirtelen megnő, akkor az energiamegmaradás törvénye értelmében (Bernoulli törvénye) a nyomása leesik. A keletkező gőzbuborék – ha az áramlás mentén olyan helyre ér, ahol a nyomás nagyobb az ottani hőmérsékletéhez tartozó telítettgőz nyomásnál – hirtelen összeroskad, az egymásnak csattanó folyadékfelületek erős akusztikus lökeshullámot keltenek, ami egyrészt erős zajjal, rezgéssel, másrészt a környező szilárd testek eróziójával jár. A kavitáció nagyfrekvenciás rezgéseket kelt 36X és 40X tartományok között.[4]

A harmadik jelenség az áramlási és örvénylési turbulencia. A forgóörvénylés a ventilátorokban és a kompresszorokban jelent, problémát, 0,1X és 0,4X közötti szubharmonikus frekvenciatartományban jól elkülöníthető jelenség.

Dugattyús gépek

A dugattyús szivattyúk, kompresszorok és belsőégésű motorok tartoznak a körbe. Kétütemű motoroknál 1X frekvencián megjelenő csúcsok lépnek fel, míg a négyütemű 0,5X frekvencián. Nagyon magas energiatartalmú, gyakran 120-125 VdB értékkel lép fel, ezért a rezgésmérés körülményes, hiszen a nagy háttérrezgés által a finom hibákat nehéz diagnosztizálni. [4]

Villamos forgógépek

Az AC motorok egyfázisú vagy háromfázisú szinkron vagy aszinkron gépek.

Villamos forgógépek rezgései mágneses és aerodinamikus hatások következményei, amelyek még kifogástalan állapotban lévő gépeknél is megjelennek. Jellegzetes a hajtási-, valamint a hálózati frekvencia, illetve ez utóbbi kétszerese. Gyakran megtévesztőek, mert kiegyensúlyozatlanság vagy lazulás látszatát keltik. A hálózatról történő lekapcsolással viszont a rezgések megszűnnek.

Zárlatos vasmag: 100 Hz értéken jelentkező magas csúcsok a spektrumban

Laza áramszedők, fázisprobléma: 33 Hz-es oldalsáv frekvenciával rendelkező 100 Hz-es csúcs

Forgórész hődeformáció: radiális és tangenciális 1X csúcsok a spektrumban

Légrés excentrikusság: magas 1X és felharmonikusok (5-öd rendű felharmonikusig)

Laza forgórész rudak: 100 Hz-es forgórész frekvenciák a rúdelhaladási frekvencián

A villamos motorok diagnosztizálásukhoz hasznos a bejövő tápfeszültség oszcilloszkópos elemzése és spektrumanalizálása, mivel a mechanikai hibák kihatnak a mágneses térerősségre is, amely a váltakozóáramú spektrumban a normálistól eltérő intenzitásvektor értékeket produkál. A periodikus motoráram csökkenés motoráram amplitúdó modulációt hoz létre, oldalsávok jelennek meg az FFT spektrumban. Háromfázisú motor esetében elegendő, ha egy fázist mérünk lakatfogóval és nagy felbontású FFT spektrumanalizátorral a motor terhelt állapotában. [4]

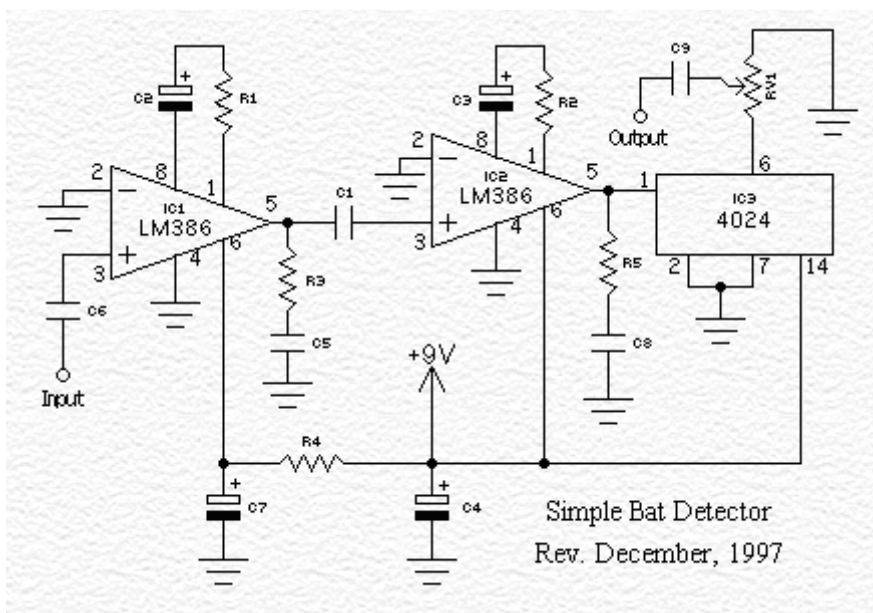
Transzformátorok

Transzformátorok esetében mindig megjelenik a mágneses eredetű 100 Hz-es rezgés esetleges felharmonikusaival együtt. Ezt jelentősen felerősíti a teljesítménytranszformátoroknál a hűtőburkolat, illetve a kényszerhűtés esetén beépített axiálventilátor. Egyéb rezgés csak valamilyen fellazulás következménye lehet, amely többnyire egyszerűen meg is szüntethető. Továbbá hasznos a 20 KHz feletti ultrahangelemzés, amellyel a nagyfrekvenciás káros jelenségek korai stádiumban kimutathatók.

Hidraulikus és pneumatikus rendszerek

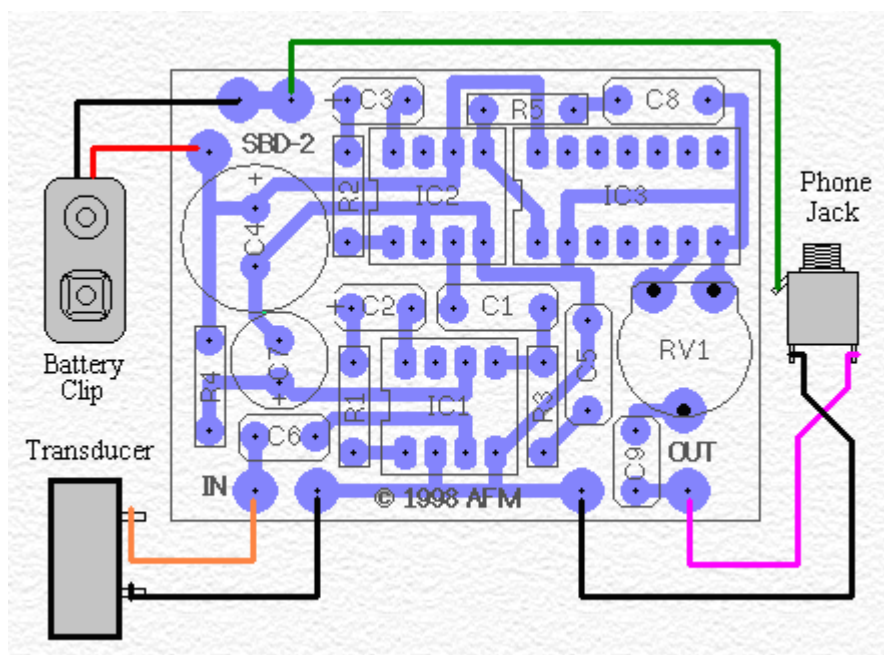
Hidraulikus és pneumatikus rendszerek rezgései kiegyensúlyozatlanságból, csapágyhibákból vagy helytelen szerelésből adódnak. Viszonylag gyakori lehet a kiegyensúlyozatlanság, amelyet a szállított közegből kiváló és a lapátokra lerakódó anyag okoz. Kiegyensúlyozatlanságra utal a hajtási frekvencián jelentkező intenzitás-növekedés, míg a működési frekvencia kiugrása szerkezeti hibát vagy fokozódó turbulenciát jelez. Pneumatikus rendszerek gyakran generálnak ultrahang tartományban hibafrekvenciákat.

Ultrahang elemzéshez használható egyszerű hordozható áramkör kapcsolási és beültetési NYÁK terve [15]:



6.13 ábra: Az ultrahang generátor kapcsolási rajza

Forrás: [15]



6.14 ábra: Az ultrahang generátor beültetési terve

Forrás: [15]

R1, R2 100 ohm	Gain állító ellenállások
R3, R5	Az erősítő áramkör stabilizálásért felelős, helye szabad lehet
R4 220 ohm	Tápfeszültség leválasztó az első erősítőfokozathoz
RV1 10K ohm	Hangerőszabályozó trimmer potméter
C1 .047 uf	Csatolókondenzátor az erősítőfokozatok között
C2, C3 10 uf	Erősítő szabályozó komponensek
LM 386	Integrált áramkör (IC)
C4 470 uf	Tápegységi szűrőkondenzátor
C5, C8 N/A	Az erősítő áramkör stabilizálásért felelős, helye szabad lehet
C6 .022 uf	Bejövő jel szűréséért felelős kondenzátor
C7 220 uf	Erősítőfokozat szűrőkondenzátor
C9 .022 uf	Kimenő jel szűréséért felelős kondenzátor

Az áramkör jól használható az ingyen letölthető akusztikai mérőszoftverekhez, oszcilloszkópokhoz és spektrumanalizátorokhoz, amelyek a következő fejezetben kerülnek bemutatásra. A kimenet közvetlenül csatlakoztatható a számítógép hangkártyára jack aljzat segítségével.



Ultrahang érzékelő szenzornak jól használhatók az alacsony árfekvésű piezomikrofonok 40 KHz-es -3 dB-es szinthez tartozó felső határfrekvenciával. Ügyeljünk arra, hogy a Shannon-féle mintavételezési törvény értelmében a szoftveren belül a mintavételezési frekvenciát mintegy 2-szer nagyobb legyen, mint a mérendő legnagyobb frekvencia, tehát a 96000 Hz javasolt, mint tipikus menüben is fellelhető beállítási érték.

Ezzel a módszerrel a méréseinket 20 Hz-től 40 KHz-ig kiterjeszthetjük minimális anyagi befektetéssel, ezáltal megvalósítható korai csapágyhibák detektálása (SEE-eljárás), villamos gépek, transzformátorok, pneumatikus hálózatok és rendszerek állapotfelügyelete.

Határértékek

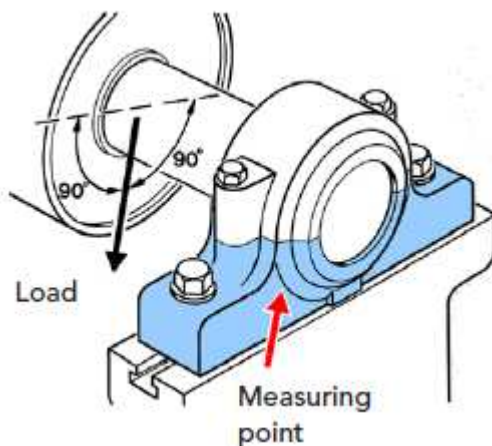
Gépészeti berendezések rezgésvizsgálatára vonatkozó legfontosabb előírás az ISO 2372 számú nemzetközi szabvány: „Általános előírások forgógépek rezgéseirősségének vizsgálatára és értékelésére”. E szabvány sorozatban vagy egyedi gyártásban készült, a 600 és 12 000 1 / min közötti fordulatszámú tartományban üzemelő gépekre érvényes, de nem alkalmazható kötelező érvénnyel a 600-as fordulatszámnál kisebb gépek esetében. Előírt az osztályozási feltétel és minősítési rendszer a rezgésekre való tekintettel. A szabvány ugyanakkor tárgyalja az egyes rezgésjellemzők értékelését, de magát a mérés kivitelezését is. Az ISO 10816 szabvány négy alapvető, teljesítmény szerinti géposztályban 10-1000 Hz tartományban terjed ki a rezgéssebesség határértékeire, az ipari gyakorlatban széleskörűen alkalmazott módszer.[13]

6.2 táblázat: ISO 10816 szabvány szerint előírt rezgés határértékek [14]

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

Mérési szabályok és javaslatok:

A mérési pontoknak a csapágyak terhelt zónájában (6.15 ábra) kell lennie, és ahol hulláminterferencia minimálisan lép fel.



6.15 ábra: A csapágyhibák helyesen megválasztott mérési pontjai a csapágyházon

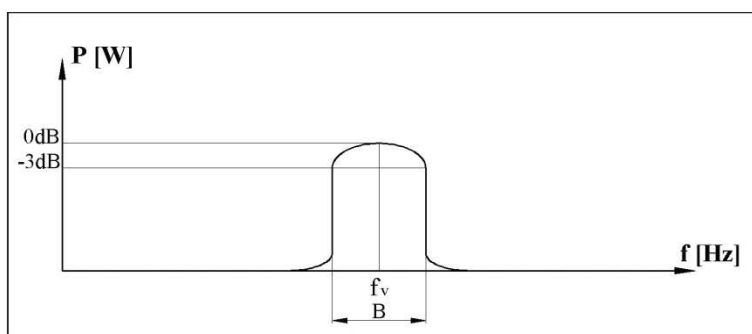
Forrás: [1]

A mérés közbeni ütésimpulzusokat egyéb gépelemek is kiválthatják a csapágyakon kívül. Biztosítani kell, hogy ezeknek hatása minimális legyen, valamint a csapágyakhoz minél közelebb eső pontokon kell a méréseket végrehajtani.

6.6 Amplitúdó moduláció a műszaki diagnosztikában

Az amplitúdómoduláció két időfüggvény szorzataként értelmezhető.

Először tekintsünk egy modulációs szempontból általános modulált jelet. Spektrális elvárásaink a modulált jelre:



6.16 ábra: A modulált jel és sávszélesség

Forrás: [17]

f_v vivőfrekvencián B sávszélességgel (sávhatárolt).

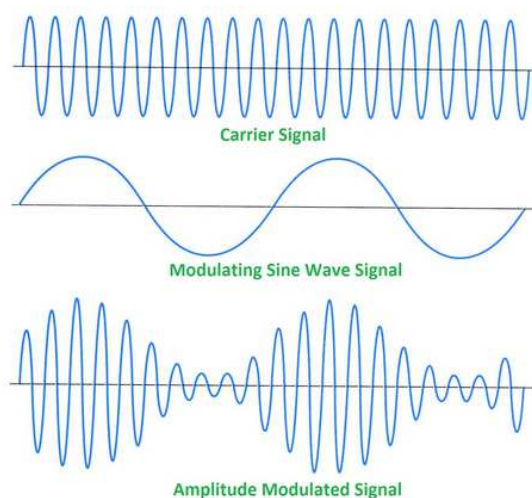
Az f_v a kisugározhatóságot és hullámterjedést, az f_v és B pedig a csatornamegosztást szolgálja.

Az amplitúdómoduláció (rövidítve: AM) a jelátvitelben az amplitúdó változtatása, mely ezáltal az átviendő információt hordozza.

Egy jelre több módon lehet az információt ráültetni, ennek egyik módja, ha a jel amplitúdóját változtatjuk (moduláljuk). Általában hangot vagy szélessávú jelet ültetnek rá egy sokkal nagyobb frekvenciájú vivő jelre (hordozóra). Az alacsonyabb frekvenciás jelet moduláló frekvenciának nevezzük, a magasabb frekvenciásat vivőnek. (6.17 ábra)

Elmondható, hogy a hasznos információt az oldalsáv frekvenciás csúcsok hordozzák és nem a vivő. Ezért fontos az oldalsávok vizsgálata, a vivő adott esetben elhagyható, ahogy az egyoldalsávú SSB moduláció leírásánál látható.

Az amplitúdómodulációnál a moduláció mértékét százalékban fejezik ki. Ha nincs moduláció, a százalék nulla; ha a modulációs csúcs nulla és maximum között ingadozik, 100%. Moduláció során mindig keverés áll elő, azaz a vivő jel és a moduláló jel összege és különbsége jön létre. Az SSB üzemmód is alapjában véve amplitúdómodulációval működik, csak a vivőt elnyomják, és az egyik oldalsávot levágják. A vivőt a vételi oldalon kell helyre állítani ahhoz, hogy a vett jel azonos legyen a leadottal. A moduláció: A vivőhullám a moduláció során felveszi az információt hordozó alapjel jellegzetességeit. Amplitúdó moduláció során a szinuszos vivő amplitúdóját változtatjuk az alapjel pillanatértékeivel arányosan.



6.17 ábra: A vivőhullám és a moduláló jel kapcsolata

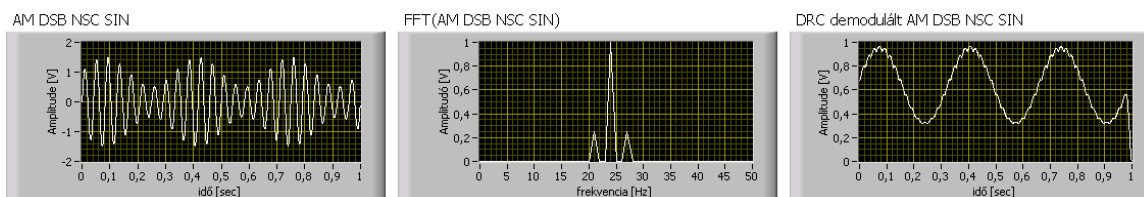
Forrás: [17]

Mivel ez a jelenség az AM-DSB esetében meghatározó jelentőséggel bír, ezért definiálták a modulációs mélységet:

$$m_{\text{DSB}} = \frac{U_m}{U_v},$$

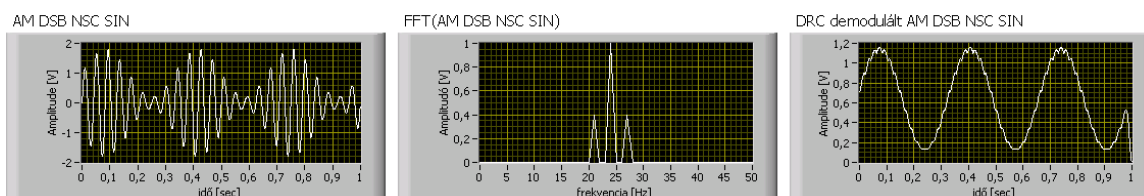
amit %-ban szokás kifejezni és értéke elvben (0...100%) tartományban lehet, de mint már említettük a kis értékek nem célszerűek.

50%-os modulációs mélység esetén egy szinuszos AM jelalak idő (bal) és frekvencia tartományban (közép), valamint a burkoló demodulátor kimenete (jobb).



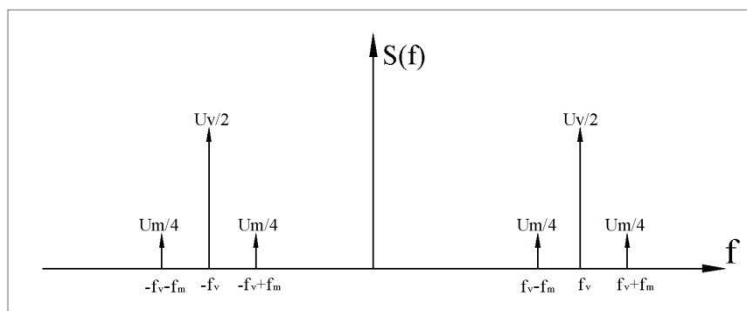
6.18 ábra: 50%-os modulációs mélység esetén egy szinuszos AM jelalak idő (bal) és frekvencia tartományban (közép), valamint a burkoló demodulátor kimenete (jobb)

Forrás: [17]



6.19 ábra: 80%-os modulációs mélység esetén egy szinuszos AM jelalak idő (bal) és frekvencia tartományban (közép), valamint a burkoló demodulátor kimenete (jobb)

Forrás: [17]

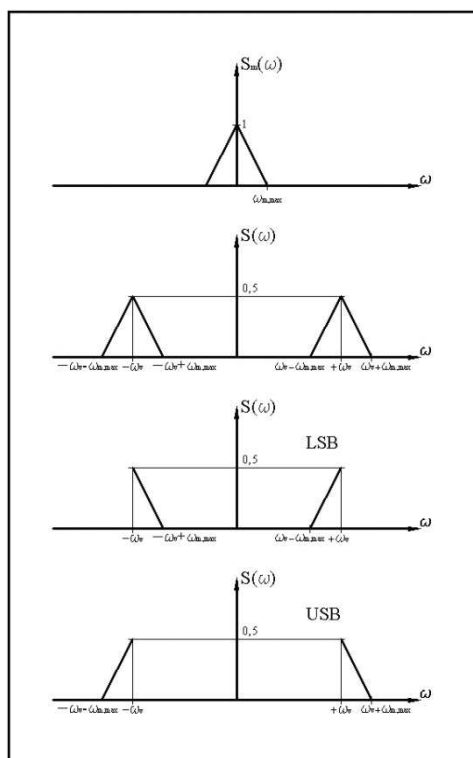


6.20 ábra: Szinuszos jellel modulált AM-DSB jel a frekvenciatartományban

Forrás: [17]

Egyoldalsávú moduláció (SSB)

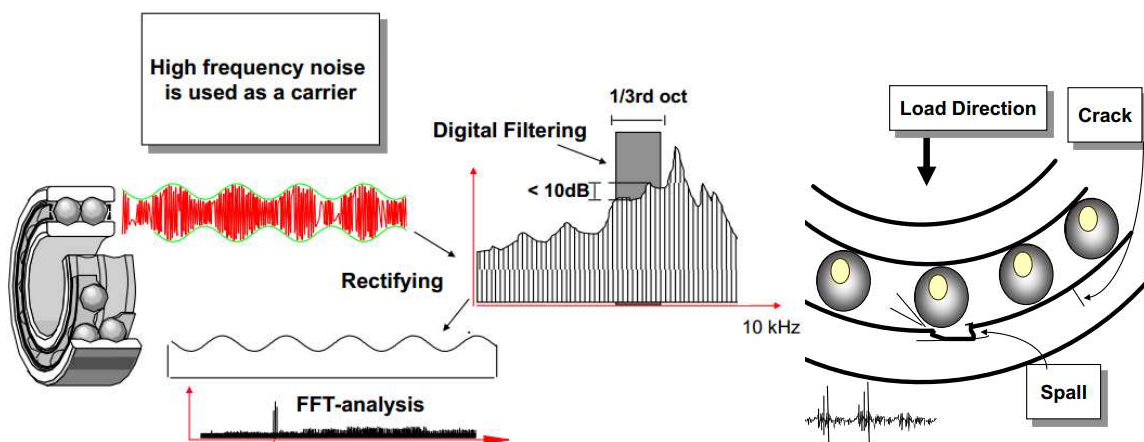
A frekvencia véges és értékes erőforrás. Emiatt fontos, hogy az adók sávfoglalása lehetőleg kicsi legyen. Mivel mindkét oldalsáv ugyanazt az információt hordozza, az egyik oldalsáv is elnyomható. Ezt az eljárást egyoldalsávú modulációnak (SSB) nevezik. Az moduláció hatására keletkezett frekvenciaösszetevőket oldalsávnak illetve oldalfrekvenciának nevezzük. Az alsó oldalsávot (lower side band) LSB, a felsőt (upper side band) USB rövidítéssel szokás jelölni.



6.21 ábra: Egyoldalsávós LSB és USB jelek megjelenése a spektrumban

Forrás: [17]

A gépelemek, mint csapágyak, fogaskerekék diagnosztizálása során a felületi hibák amplitúdómodulációt hoznak létre. Értelmszerűen a vivőhullámot a csapágyelemekre (gyűrű, gördülőelemek) jellemző határozza meg. A modulációs mélység nagyságát a hibák geometriai kiterjedése határozza meg. A spektrumban a jellemző frekvencia amplitúdó növekedése mellett az oldalsávok energiaspektruma is nő. Az amplitúdó demoduláció célja a moduláló jel és az általa hordozott információ visszaállítása az amplitúdómodulált jelből. Először az amplitúdómodulált jelet rektifikálni kell, amely során negatív-pozitív transzformációt hajtunk végre, ezzel megduplázzuk a hordozó időjel frekvenciáját. A moduláló burkológörbe hullámalak jelentősséggel bír, az angol nyelvű szakirodalmakban Envelope módszerként is ismert az eljárás.



6.22 ábra: Gördölőcsapágy hiba generált amplitúdómodulációs jel és feldolgozása

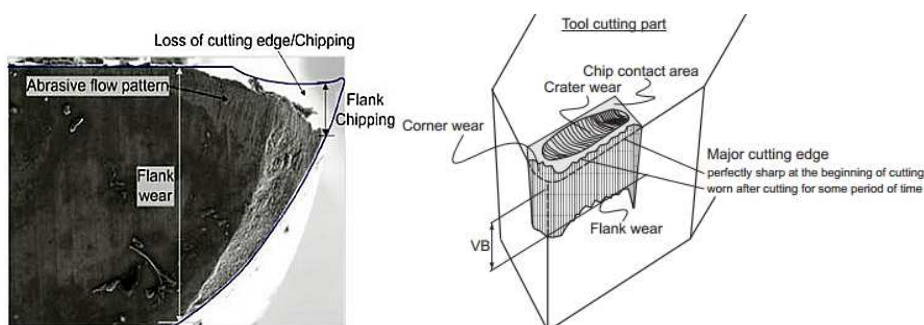
A rektifikált jelből aluláteresztő szűrővel ki kell szűrni a magas frekvenciás jelösszetevőket. Általában 2,5 KHz környékén megfelelő a szűrést végrehajtani. Ezáltal az SNR (jel-zaj viszony) növekedni fog, hiszen a spektrumból eltávoznak a nagy energiatartalmú alacsonyfrekvenciás szubharmonikus komponensek. A demodulált spektrumban már a szűrés következtében nem szerepelnek a gerjesztési frekvenciák és az oldalsáv csúcsok. A normál csapágyállapotot onnan ismerhetjük fel, hogy a demodulált spektrum mintegy 10 dB értékű háttérzajt mutat, amelynek értéke a csapágy károsodása folytán akár 30-40 dB értékig emelkedhet.

6.7 Szerszámkopás felügyelet

A gyártástechnológiában, különösképpen a forgácsoló megmunkálások során kiemelkedő jelentőségű a szerszámkopás felügyelete.

Ha a kopás mértéke túllépi a megengedett értéket, a munkadarab felületi minősége romlik, amely gyártási hibás, selejt munkadarabok előállításához vezethet. Gazdaságossági szempontból, a termelés tervezhetősége céljából figyelemmel kell kísérni, diagnosztizálni kell a megmunkáló szerszámokat is.

Az esetek 50%-ban abrázíós kopás lép fel, mintegy 20%-ban adhéziós kopás, 10%-ban a tribokémiai kopás lép fel, a maradék részt egyéb tönkremenetek okozzák és a szerszám jellegzetes kopásképeit hozza létre. (6.23 ábra)



6.23 ábra: A szerszámkopások jelentkezése a szerszámon

A szerszám éltartamot a Taylor egyenlet fejezi ki, amely egyszerűsített formában:

$$V_c * T^n = C$$

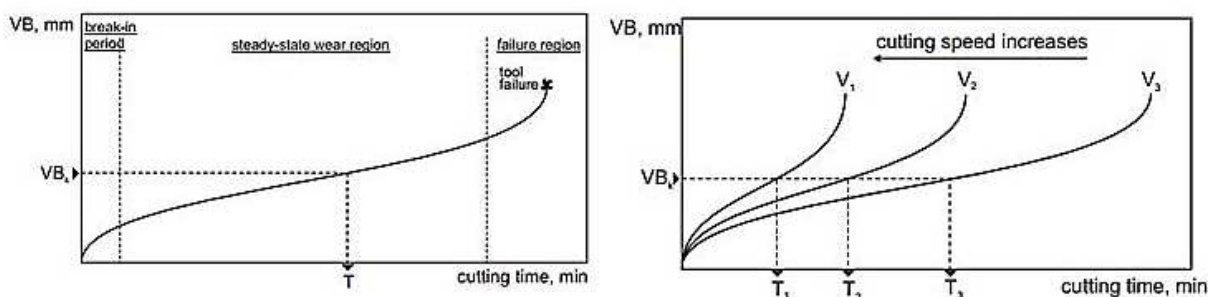
ahol C: szerszám éltartam [min], V_c : forgácsoló sebesség [m/min], T: forgácsolási idő [min]

A kiterjesztett Taylor egyenlet:

$$T = C * V^A * f^B * a_p^D * V_B^E$$

ahol C: szerszám éltartam [min], V_c : forgácsolási sebesség [m/min], T: forgácsolási idő [min], a_p : fogásmélység [mm], V_B hátkopás [mm], f: előtolás [mm/rev], A,B,C,D,E: Taylor algebrai paraméterek.

A V_B hátkopás mért értéke általánosan jellemzi a szerszámot, amely rezgésméréssel diagnosztizálható, geometriai mérése az ISO 3685 szerint történik. Időbeli lefolyását mutatja be a 6.24 ábra eltérő forgácsolósebességek esetében.



6.24 ábra: A szerszámkopás növekedése a forgácsolási idő függvényében

Forrás: [9]

Egyes kutatások szerint a rezgésspektrumban 1850, 3200 és 4800 Hz környékén jelentkezik rezgésamplitúdó növekedés.[8]

A rezgésvizsgálatot célszerű kiegészíteni zajvizsgálattal is, ugyanis 2750 és 3500 Hz között átlagosan 9-24 dB zajszintnövekedés figyelhető meg.

Természetesen a szerszámmonitoring esetében is beszélhetünk idő- és frekvenciatartománybeli vizsgálatokról. Az FFT gyors- Fourier transzformációt alkalmazhatjuk a frekvenciatérbe áttéréshez, illetve az STFT, wavelet transzformációk a gépdiagnosztikához hasonlóan itt is eredményesen alkalmazhatók.

A hazai egyetemek közül a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kar Gáértástudományi Intézet nagy szaktudással, hosszú évek óta eredményesen kutatja a szerszámkopás jelenségét.

A Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszék forgácsoló laboratóriumában került sor kísérleti szerszámkopás mérésre (6.25 ábra) esztergálás során. [9]



6.25 ábra: Szeszámkopás céljából zaj-és rezgésmérés esztergálás során

Esztergagép: Optimum D 280 x 700 G lathe

Szerszám: CNGA120408S01030A, ISO, CB7015

Munkadarab anyaga: ABNT 1038 (AISI 1038), Composition: C 0.93% – 1.05%, Si 0.15 – 0.35%, Mn 0.25 – 0.45%, Cr 1.35 – 1.60% Hardness: HRC62

Munkadarab átmérő/ hossz: 50 mm, forgácsolási hossz: 100 mm / forgácsolási sebesség: 150, 170, 200, 300 m/min / Előtolás: 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 mm/rev / Fogásmélység 1, 2, 3, 4 mm

Optikai hátkopásmérés: Olympus PX61 mikroszkóp segítségével

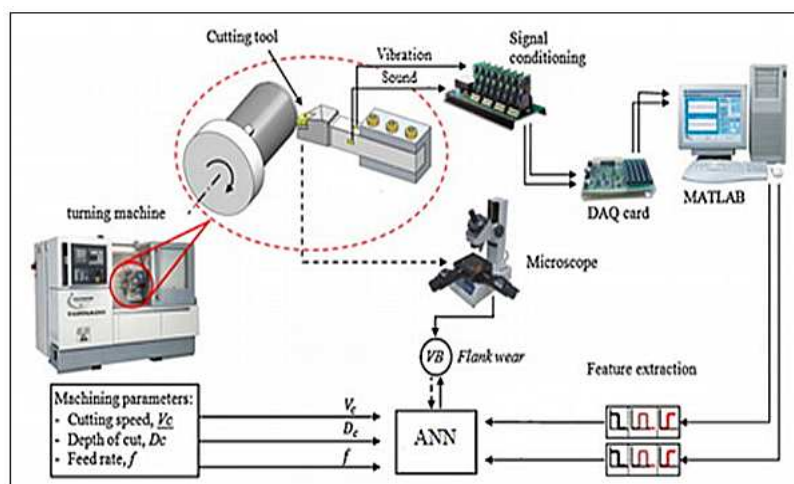
Rezgésmérő szenzor: PCB 603 C01 and Soundbook triaxiális rezgés gyorsulásmérő szenzor, mikrofon: kondenzátor gömbi karakterisztikával

Adatgyűjtő HW és SW: NI 9234 DAQ, Labview 2013

Opcionális rezgésmérés: Soundbook HW és SINUS SAMURAI SW

Ingyenes akusztikai SW: Audacity

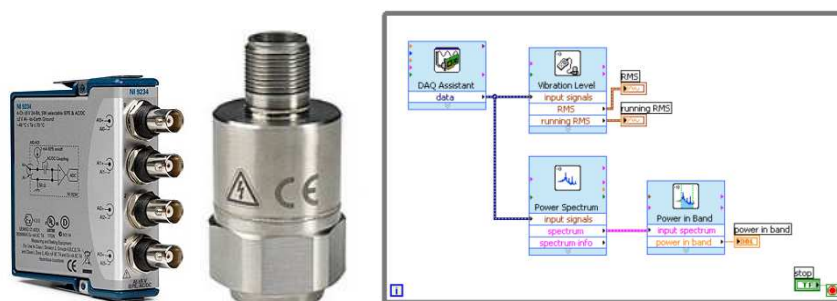
Mérés és jelfeldolgozás: Matlab és NI Labview szoftverekkel



6.26 ábra: Szerszámkopás céljából felállított zaj-és rezgésmérés tömbvázlat mesterséges neurális hálózat alkalmazásával

Forrás: [9]

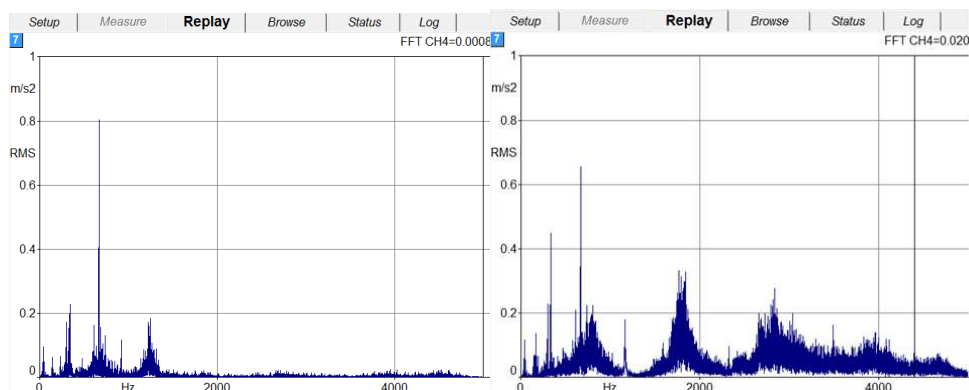
A mérés tömbvázlata (6.26 ábra) alapján látható, hogy a rezgésszenzorból a rezgésjelek jelkondicionálást követően az adatgyűjtő kártyába kerülnek, majd a Matlab rendszerben a hátkopás automatizált felügyeletére mesterséges neurális háló (ANN) került betanításra, a méréshez használt szenzor és Labview VI. (6.27 ábra)



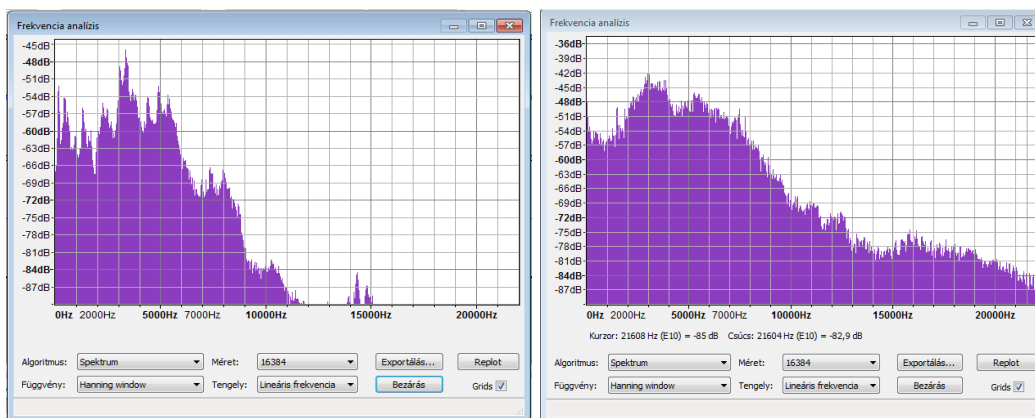
6.27 ábra: NI 9234 DAQ, PCB szenzor és NI Labview VI

Forrás: [9]

Jól megfigyelhető az frekvenciatartománybeli spektrumban (6.28 ábra), hogy a kopott szerszám 1800 Hz felett növekvő rezgésgyorsulás értéket produkált, amellyel a szerszám túlkopása diagnosztizálható. A kísérlet során a kopást $VB=0,4$ mm esetén határoztuk meg.



6.28 ábra: Rezgésspektrum új (balra) és kopott (jobbra) szerszám esetén /VB=0,4 mm/



6.29 ábra: Zajspektrum új (balra) és kopott (jobbra) szerszám esetén /VB=0,4 mm/

Érdekes kérdést vet fel, hogy a zajvizsgálat kiválthatja-e a rezgésmérést a szerszámdiagnosztikában. A mérések során felvételre kerül az új és a kopott szerszám zaja és a zajspektrum (6.29 ábra) FFT transzformációval előállítottuk. Megfigyelhető, hogy a kopott szerszám esetében a mintegy 5 KHz feletti hallható tartományban hangintenzitás növekedés következik be. Mivel a forgácsológépek az iparban általában nem laboratóriumi környezetben, hanem zajos környezetben vannak elhelyezve, a közvetlen testhangmérés, megfelelő rezgésszigetelő gépalapozást feltételezve, hatékonyabb, mint a léghangmérésen alapuló zajvizsgálat. Az utóbbi esetben ugyanis fokozottan kell gondoskodni a hasznos jelösszetevők szűréséről a zajjal terhelt spektrum miatt.

FELHASZNÁLT SZAKIRODALOM

- [1] SZABÓ József Zoltán: *Rezgésdiagnosztikai vizsgálatok és haditechnikai alkalmazhatóságuk kutatása*. PhD értekezés, 2011.
- [2] KÉGL Tibor-SZABÓ József Zoltán: *Műszaki diagnosztika*, Főiskolai jegyzet. Bánki Donát Műszaki Főiskola, 1993.
- [3] DÖMÖTÖR Ferenc: *Rezgésdiagnosztika I-II*. Dunaújváros, 2010.



- [4] NAGY István: *Műszaki diagnosztika 1. Gyakorlati diagnosztika. Állapotfüggő karbantartás/ Rezgésdiagnosztika*. Paks, 2006.
- [5] BIHARI Zoltán: *Külső csigakerekes görgős szabadonfutók elemzése*. PhD értekezés, Miskolci Egyetem, 2013.
- [6] FÜVESI Viktor: *Neurális hálózatokon alapuló modellezés és hibadiagnosztika villamos hajtások példáján keresztül*. PhD értekezés, Miskolci Egyetem, 2014.
- [7] SZTANKÓ Krisztián: *Forgó tengelyek rezgéscsillapítása diagnosztikai visszacsatolással*. PhD értekezés, Budapesti Műszaki Egyetem, 2006.
- [8] CLARENCE W. DE SILVA: *Vibration and Shock Handbook*, 2005.
- [9] DEAK, KOCSIS, VÁMOSI, KEVICZKI: *Tool Condition Monitoring using Machine Learning*. ISCAM Conference, Debrecen, 2014.
- [10] SPM Spectrum, SPM Academy (71713B jelű kiadvány)
- [11] SEEtechnológia:
http://www.skf.com/hu/services/skf_akademia/rezgesdiagnosztika_alapjai/index.html
(letöltés: 2015.06.24.)
- [12] http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0013_\roncsolasmentes_es_\roncsolasos_anyagdiagnosztikak/akusztikus_emisszio.html
(letöltés: 2015.06.24.)
- [13] <http://www.muszakiak.hu/tudastar/diagnosztika-anyagvizsgalat/rezgesdiagnosztika>
(letöltés: 2015.06.24.)
- [14] ISO 10816 szabvány : http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=50528
(letöltés: 2015.06.24.)
- [15] Ultrahang detektor: <http://home.earthlink.net/~bat-detector/SBD2.html> (letöltés: 2015.06.24.)
- [16] FAG belső dokumentáció
- [17] https://wiki.sch.bme.hu/images/8/82/Jelek2_Moduláció_elméleti_összefoglaló.pdf
(letöltés: 2015.06.24.)



7 MŰSZAKI AKUSZTIKAI MÉRÉSEK

7.1 Zajok csoportosítása

Az akusztika tárgya a 20 Hz és 20000 Hz közötti, az emberi fül számára érzékelhető rezgések vizsgálata.

A legegyszerűbb jel, a harmonikus függvénnyel jellemezhető szinuszjel. Ez egyrészt szabványos mérőjel is.

További szabványos mérőjelek: négyszögjel, háromszögjel, fűrészjel, $1/f$ jelek.

Néhány színeknek gyakorlati jelentőségük miatt külön nevet adtak. Ilyen a fehérzaj, szürke zaj és a rózsaszín zaj.

Fehérzaj

A fehérzaj olyan, hangtechnikában használatos véletlenszerű zaj, amire igaz az, hogy a teljes vizsgált frekvenciatartományban (emberi érzékelő esetén 20 Hz – 20 kHz) a hangnyomásszintje állandó.

Szürke zaj

A szürke zaj esetén egy jól meghatározott, szűk frekvenciatartományban folytonos hangnyomásszint van, míg az összes többi frekvencián nem mérhető hangnyomásszint.

Rózsaszín zaj

Rózsaszín zajnak nevezik az olyan zajt, melynek hangnyomásszintje a frekvenciával fordítva arányosan esik, és az olyat is, melynek a hangnyomásszintje a frekvencia négyzetével fordítottan arányosan esik.

A rózsaszín zaj a hangtechnikában egyértelmű jelentéssel bír: véletlenszerű zaj, amelynek a teljes vizsgált frekvenciatartományban (jellemzően 20 Hz – 20 kHz) a hangnyomásszintje oktávonként 3dB-lel csökken. Többek közt többutas, aktív hangrendszer beállítására használják.

Színes zajok

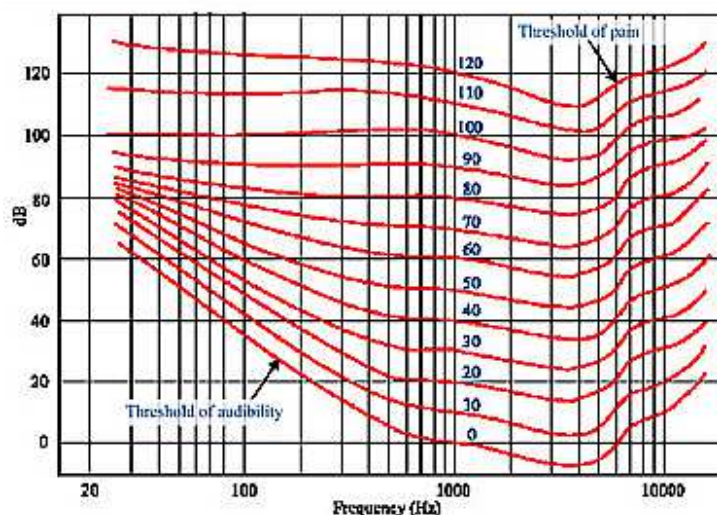
Az olyan zajokat, melyek frekvenciája határozottan nem állandó értékű, de gyakorlatilag jól meghatározható frekvenciasávba esik, színes zajoknak nevezik. A fehérzajtól eltérően nincs a különféle színes zajspektrumoknak általánosan elfogadott meghatározása.

Emiatt a többértelműség miatt a tudományos cikkek az $1/f$ zaj fogalmat olyan folyamatokra alkalmazzák, melyek zaj-teljesítménysűrűsége fordítottan arányos a frekvenciával.

A zajok a mérőjelekhez képest összetett spektrumképpel rendelkeznek:

A színek egy adott zaj vagy hang hangnyomásszint értékeinek a frekvencia függvényében történő ábrázolása. Megkülönböztetünk folytonos színekpet, amikor nagyjából minden frekvencián van valamekkora hangnyomásszint érték, és vonalas színekpet, amikor csak bizonyos frekvenciákon van hangnyomásszint.

Az azonos hangerősséget az ún. Fletcher-Munson görbék (7.1 ábra) ábrázolják.



7.1 ábra: Fletcher-Munson hangossági görbék

Forrás: [1]

7.2 A zajanalizátorok használt súlyozó görbék és üzemmódok

A zajanalizátorok különböző szűrési módokat tartalmaznak, amelyek arra szolgálnak, hogy a műszer a zajmérést, a hallásunk tulajdonságainak figyelembevételével végezze el. Az egyik ilyen tulajdonsága az, hogy az érzékenysége a középfrekvenciáktól az alacsony és magasabb frekvenciák felé haladva folyamatosan csökken. A másik az, hogy ez az érzékenység csökkenés egyre kisebb mértékű a hangnyomásszintek emelkedésével.

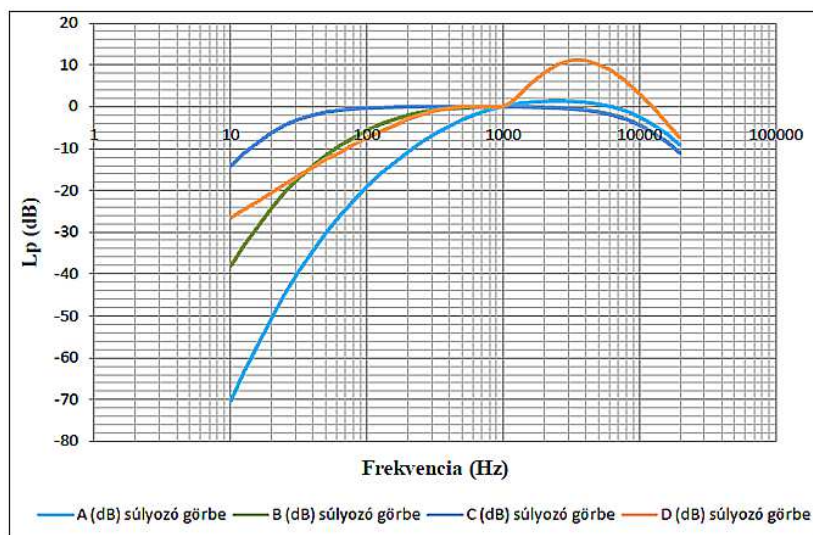
A műszer négy alapvető szűrési módja (7.2 ábra).

1. A lineáris, egy frekvenciasúlyozás nélküli műszer üzemmódot jelent, amely a mikrofonon mért hangnyomásszinteket változtatások nélkül, dB formában jelzi ki.
2. A következőkben leírt három szabványban meghatározott súlyozó görbék teszik lehetővé, hogy a műszer érzékenysége a hallásával azonos módon változzon a frekvencia függvényében. A görbék mindegyike tulajdonképpen egy-egy szűrő átviteli karakterisztikáját jelenti, amelyek közül az dB(A) súlyozó görbét szinte minden mérésnél használni kell. Ezen szűrő, a mélyfrekvenciák felé haladva egyre nagyobb csillapítással rendelkezik. Kis hangnyomásszintek esetén használhatóak.

A közepes hangnyomásszintek mérésénél dB(B) súlyozó görbét szokás használni. A görbe lefutása nem sokban tér el az előzőtől.

A harmadik súlyozó görbe, a nagy hangnyomásszintű, azonos hangosságú görbék közelítésére használatos, ezért ezt a görbét kimondottan nagyszintű zajok (Munkahelyi

zajok) mérésénél alkalmazzuk. A három súlyozó görbén kívül még létezik egy negyedik D (dB) is, amely kifejezetten nagyon nagy hangnyomásszintű zajok mérésére szolgál. Ez ritkán használatos, mert ilyen hangnyomásszintek ritkán fordulnak elő a hétköznapi életben.



7.2 ábra: Súlyozógörbék frekvenciamenete

Forrás: [1]

A zajanalizátorok másik nagyon fontos beállítási lehetősége a mérés átlagolási idejének a beállítása. Ezek a következők:

- Slow: 1 másodperces időintervallumokra végzi el az átlagolást.
- Fast: az átlagolást 125ms-os időtartományokra végzi. Ezt a beállítást lassan változó jelek esetében érdemes alkalmazni, mivel gyorsan változó jelek esetén a kijelzett értékek nehezen olvashatók le a gyors változás miatt.
- Impulse: 1 másodpercnél rövidebb jelek mérésre használható ez a 35ms-os időállandójú beállítási mód. Ebben a beállításban a műszer megjegyzi és kiírja a rövid jel ideje alatt mérhető legnagyobb hangnyomásszintet.

7.3 Mérőeszközök

Leggyakrabban kézi zajszintmérő (8.3 ábra) használatos dBA és dBC értékeléssel.

SL-100 típusú kézi zajszintmérő

Főbb jellemzők:

Mérési tartomány 30... 130 dB A/C szűrőkkel

Pontosság ± 2 dB (1 kHz)

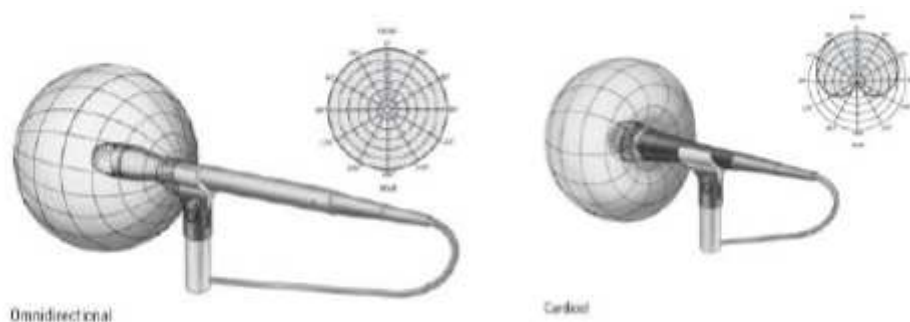


7.3 ábra: SL-100 kézi zajszintmérő

A mikrofonok paraméterei

A mérőmikrofonoknak gömbkarakterisztikával, nagy érzékenységgel kell rendelkezniük, a lehető leglineárisabb frekvenciamenettel, erre legyünk tekintettel kiválasztásnál. A kondenzátor mikrofonok fontosabb paraméterei:

- érzékenység
- iránykarakterisztika (7.4 ábra)
- maximális elviselhető hangnyomásszint
- frekvenciamenet
- kimeneti impedancia
- membrán mérete
- saját zaja
- tápforrás



7.4 ábra: Mikrofonok gömbi és kardoid karakterisztikával

Forrás: [1]

A mikrofonok kalibrálása

A mikrofonok adott feladathoz való alkalmassága a működési tartománya alapján dönthető el. Ezt a kalibrálási eljárás során megmért adott frekvenciához tartozó érzékenységből vagy adott amplitúdó szinthez tartozó nyomásérzékenység frekvenciamenetéből határozható meg.

A transzfer módszernél, egy adott frekvenciájú és hangnyomású eszközzel a kalibráció gyorsan és egyszerűen elvégezhető. Ezt a kisméretű elemes kalibráló készüléket, amely szabványos 94dB-es 1000Hz-es szinuszhangot bocsát ki pisztolfonnak nevezzük. (7.5 ábra)



7.5 ábra: Zajszintmérő mikrofon kalibrálása pisztolfonnal

Forrás: [1]

Munkahelyi zajmérés esetén mérendő és azokból számítandó értékek

A zajmérés környezetvédelmi, munkavédelmi szempontból is fontos a konkrét gépészmérnöki megközelítésen túlmenően. A munkahelyi zaj mérésénél, minden kijelölt mérési ponton, három értéket kell mérni. A modern zajanalizátorok már képesek ezek egyszerre történő mérésére és kijelzésére. Ahhoz, hogy a mért értékek tükrözzék a valóságot, a mérés idejét a zaj jellegének megfelelően kell megválasztani. Állandó zaj esetén rövid, változó zaj esetén minimum 10 perc mérési idő szükséges. A zajmérésre, a 7.6 ábrán látható példa.

A mérendő értékek a következők:

- A zajterhelés, amely a munkahelyen keletkező zaj egyenértékű A-hangnyomásszintjével (LAeq) egyenlő.

$$LEX, 8h = \frac{1}{2} \cdot \log \left(\frac{\tau}{T} \cdot 10^{0,1 \cdot LAeq} \right)$$

τ értékelési idő s-ban

$T = 28800$ s a megítélési idő



7.6 ábra: Gépjaj és környezeti zajterhelés mérése

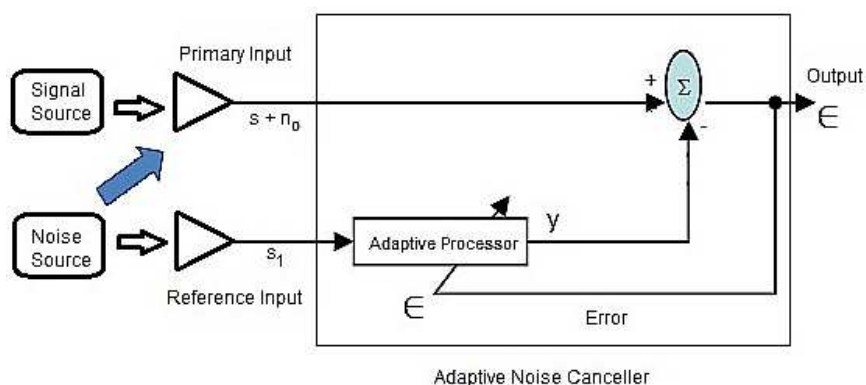
Forrás: [1]

7.4 Adaptív zajcsökkentés

Az adaptív zajcsökkentés (Adaptive Noise Cancellation, ANC) gyakran használatos módszer a csapágyak diagnosztikájában, ahol a csapágyat zajoskörnyezetben, vagyis alacsony SNR (signal-to-noise ratio) jel-zaj viszony mellett vizsgálják.

Az additív zajt nem lehet kiküszöbölni az elektronikai rendszerekből. A tervezés során természetesen törekszünk ezen zavaró jel szintjének minimalizálására. A vett jel minőségét a jellel egy időben megjelenő zaj rontja. A jelenség minősítésére a jel és a zaj teljesítményének az arányát vezették be mérőszámul. Jelölése SNR (Signal to Noise Ratio) vagy S/N.

Az ANC módszer (7.7 ábra) alapvetően két rezgésérzékelőt alkalmaz. Az egyik rezgésérzékelőt a vizsgálandó csapágy közelében a terhelt zónában helyezik el, a második érzékelőt pedig a külső zaj- és rezgésforrás közelében (például hajtómű közelében), amely káros hatással lehet a mérési eredményekre. A két mérés közötti matematikai összefüggést megállapítva a diagnosztika hatékonyabbá tehető. A folyamat egy adaptív processzort használ, amely a szabályozóköri foglalt helyet. [7]



7.7 ábra: Az adaptív zajcsökkentés elvi vázlata

Forrás: [8]



A műszaki diagnosztika a karbantartás és üzemeltetés egyik leghatékonyabb eszköze a költségek és kockázatok csökkentésére. A modern műszaki diagnosztikai vizsgálatok tárgyát különböző műszaki létesítmények, berendezések, gépek, eszközök, termékek vagy ipari folyamatok képezik. A műszaki diagnosztika célja - tárgyától függetlenül - a megbontás, roncsolás, lényegesebb beavatkozás nélkül végzett vizsgálatra alapozott hibafeltárás, hibaelemzés vagy a várható élettartam becslése a hibák kijavítása, kiküszöbölése, megelőzése, az üzembiztonság növelése, a leállási veszteségek csökkentése, valamint a karbantartás optimalizálása érdekében. A műszaki diagnosztikát, mint alapvető információs eszközt kapcsolják a karbantartás-szervezés tudományának olyan fogalmaihoz, mint az RCM, TPM, TQM. Az összetett gépek gyakori gépeleme a csapágy, amely állapotának diagnosztizálása kiemelkedő jelentőséggel bír. A hibák felderítéséhez gyakran alkalmazott módszer az időtartománybeli, a frekvenciatartománybeli, az idő-frekvenciatartománybeli vizsgálatok, a burkológörbe módszer. A diagnosztikát, a hozzá kapcsolódó döntéshozatalt, hogy az adott csapágy hibátlan vagy hibás állapotot képvisel gépi tanuláson alapuló rendszerek segítik. Jelen fejezet a mesterséges neurális hálók alkalmazási lehetőségét mutatja be a csapágydiagnosztikában, ahol hibás csapágyak idő- és frekvenciatartománybeli mért jeleivel történik neurális háló betanítása Matlab Neural Network Toolbox felhasználásával.

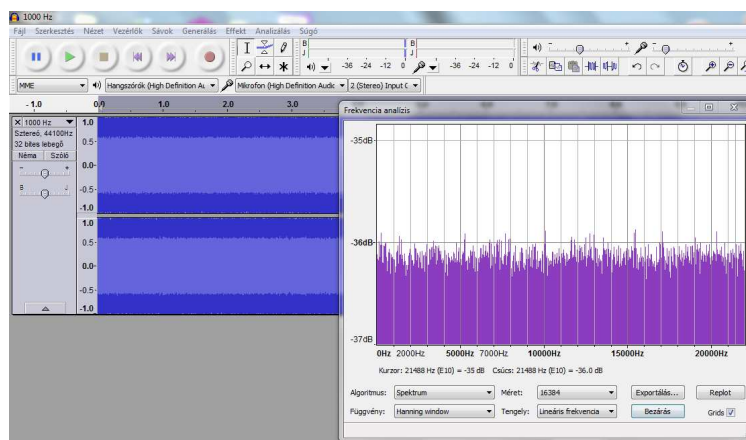
7.5 Akusztikai szoftverek

A *Matlab* szoftverhez különösen olyan műveletek esetén érdemes hozzá fordulni, amikor a szokványos wave editorral nem boldogulunk (pld. konvolúció, speciális szűrések, tömörítések stb.). A MATLAB-hoz sok helyen lehet letölteni ill. megvásárolni olyan toolbox-okat, amelyek előre megírt rutinokat alkalmaznak speciális feladatokra (pl. Signal Processing Toolbox).[2]

A legismertebb, közkedvelt ilyen program a *CoolEdit* ill. utódja az *Adobe Audition*. A CoolEdit és a CoolEdit Pro sokáig uralta a piacot, könnyen kezelhető, sokcsatornás wave-editor az összes szükséges funkcióval, spektrálanalízistől, jelszintézisen át, szűrésig és effektezésig. Rendelkezik multitrack szolgáltatással, mp3 exporttal, 96kHz/24 bites felbontással.[5]

A továbbiakban két ingyen letölthető szoftvert mutatunk be, amelyek jól használhatók műszaki akusztikai elemzésekhez.

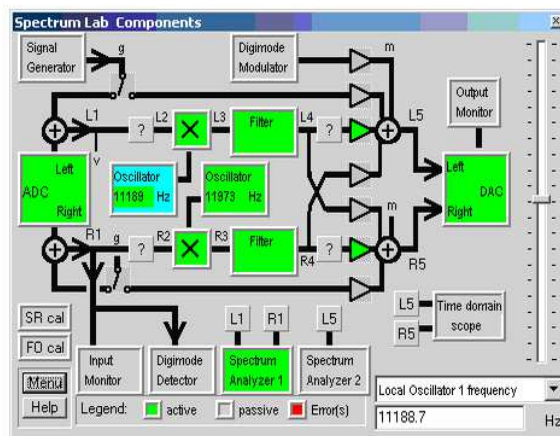
Az *Audacity* ingyenes hangszerkesztő (7.8 ábra) kiváló tulajdonságokkal rendelkezik: wav, mp3, ogg támogatás, 26 beépített effektus. Tetszőleges csatornákat használhatunk, ezeket vághatjuk és összeilleszthetjük, keverhetjük. Egyéb lehetőségek: spektrum- és frekvenciaanalízáló, valamint kiváló hangdigitalizáló.[4]



7.8 ábra: Audacity program kezelőfelülete

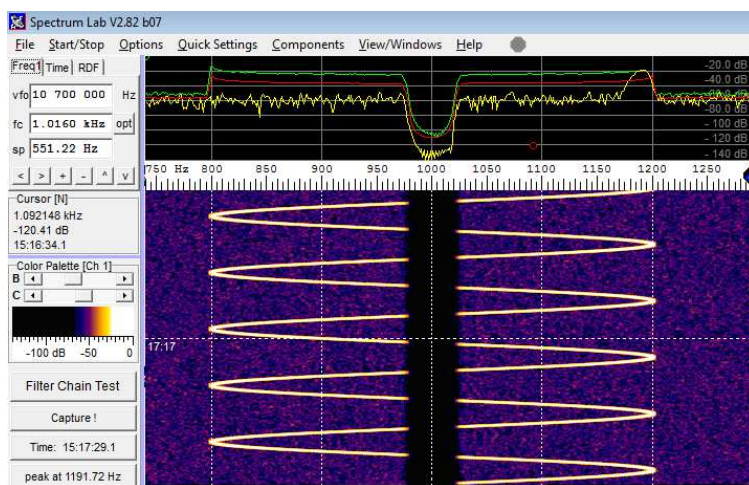
A *Spectrum Lab* (7.9 ábra) program ingyen letölthető, a DL4YHF hívójelű Wolfgang Büscher rádióamatőr által kifejlesztett szoftver.[3]

A/D átalakítás, Winamp plugin, frekvenciadiagram, spektrumanalízis, vízszintes diagram, hatékony FFT audio filterek, file logging, statisztikai értékek számolása, hanggenerátor (szinusz, háromszög, négyszögjelek), oszcilloszkóp funkció, 8-192 kS/second audio mintavételezési sebesség, 16 bit és 24 bit felbontás. 50/60 Hz-es hálózati brummszűrés.



7.9 ábra: A Spectrum Lab program kezelőfelülete

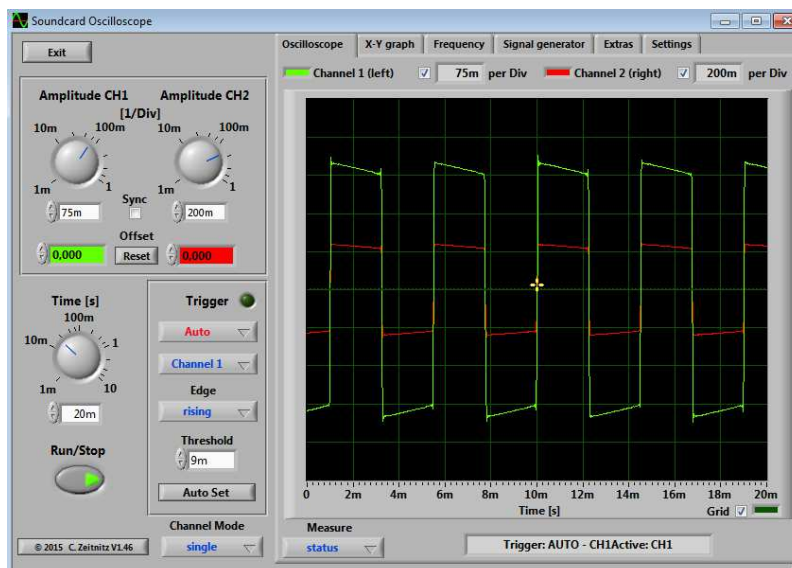
Forrás: [3]



7.10 ábra: A Spectrum Lab program kezelőfelülete

Forrás: [3]

A *Zeitnitz Oscilloscope* program (7.11 ábra) szintén ingyen letölthető jól használható, felhasználóbarát kezelőfelületű oszcilloszkóp program, amely spektrumanalizálást is lehetővé tesz 16 bit felbontással és 44,1 KHz mintevételezési frekvenciával 20 Hz és 20 KHz között. Külön-külön szabályozható csatornaerősítés, triggerelés jellemzi, a beépített jelgenerátor egyszerű és sweep üzemben működik.[6]



7.11 ábra: A Zeitnitz oszcilloszkóp program kezelőfelülete

Forrás: [6]



FELHASZNÁLT SZAKIRODALOM

- [1] ARNOLD P.G. PETERSON: *Handbook of Noise Measurement*. 9th edition, Massachusetts, USA, 2005.
- [2] MATLAB: <http://www.mathworks.com/products/matlab/> (letöltés: 2015.06.24.)
- [3] SPECTRUM LAB: DL4YHF's Ham Radio Homepage, <http://www.qsl.net/dl4yhf/> (letöltés: 2015.06.24.)
- [4] AUDACITY: <http://audacityteam.org/> (letöltés: 2015.06.24.)
- [5] ADOBE AUDITION: <http://adobe-audition.en.softonic.com/download> (letöltés: 2015.06.24.)
- [6] ZEITNITZ: http://www.zeitnitz.eu/scope_en (letöltés: 2015.06.24.)
- [7] M. AFZAL, R. POLIKAR, L. UDPA, S. UDPA: *Adaptive noise cancellation schemes for magnetic flux leakage signals obtained from gas pipeline inspection*. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2001.
- [8] G. ILIEV, N. KASABOV: *Adaptive filtering with averaging in noise cancellation for voice and speech recognition*. Department of Information Science, University of Otago, 2001.

8. GÉPI DIAGNOSZTIKÁK

8.1. A gyakorlatban használt diagnosztika fajták

8.1.1. Prés erő felügyelet

Prés gépeknél a túlterhelés miatti károsodás elkerülése érdekében be van építve egy prés erő felügyeleti egység, ami egy határérték feletti erőhatás esetén letiltja a gépet, nem engedi annak összetörését. Ez a rendszer a gép üzeme közben folyamatosan fut.



8.1 ábra: N101 görgőprésgép préserő felügyeleti rendszere

8.1.2. Fluidmanagement

A technológiai folyadékok rendszeresen ellenőrizve vannak a labor által, amivel a szennyezettség mértékét és idegen anyagok arányát (különböző olajfajták összekeveredését) szűrik ki.

8.1.3. Endoszkópos vizsgálat

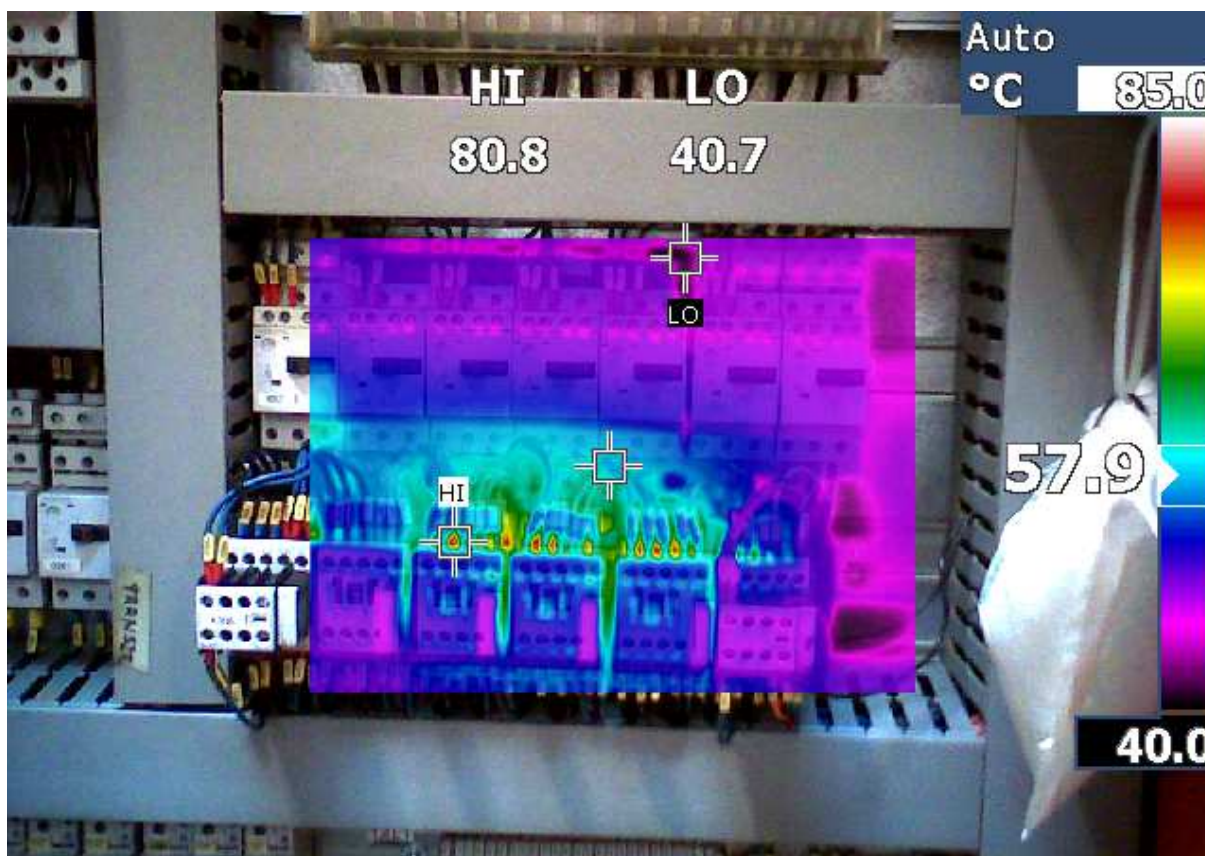
Nehezen hozzáférhető vagy az ellenőrzéshez nagy bontást igénylő alkatrészek állapota figyelhető meg endoszkópos vizsgálatával.

8.1.4. Szíj feszesség vizsgálata:

Szíjhajtások helyes szíj feszesség beállítását lehet ellenőrizni egy eszközzel, ami a megfelelő adatok (szíj fajtától függő méter tömeg és tengelytáv) megadása után a rezonanciából kiszámolja és Hz-ben kijelzi a szíjfrekvenciát. Helytelen beállítás esetén az előírt szíj feszesség így pontosan beállítható.

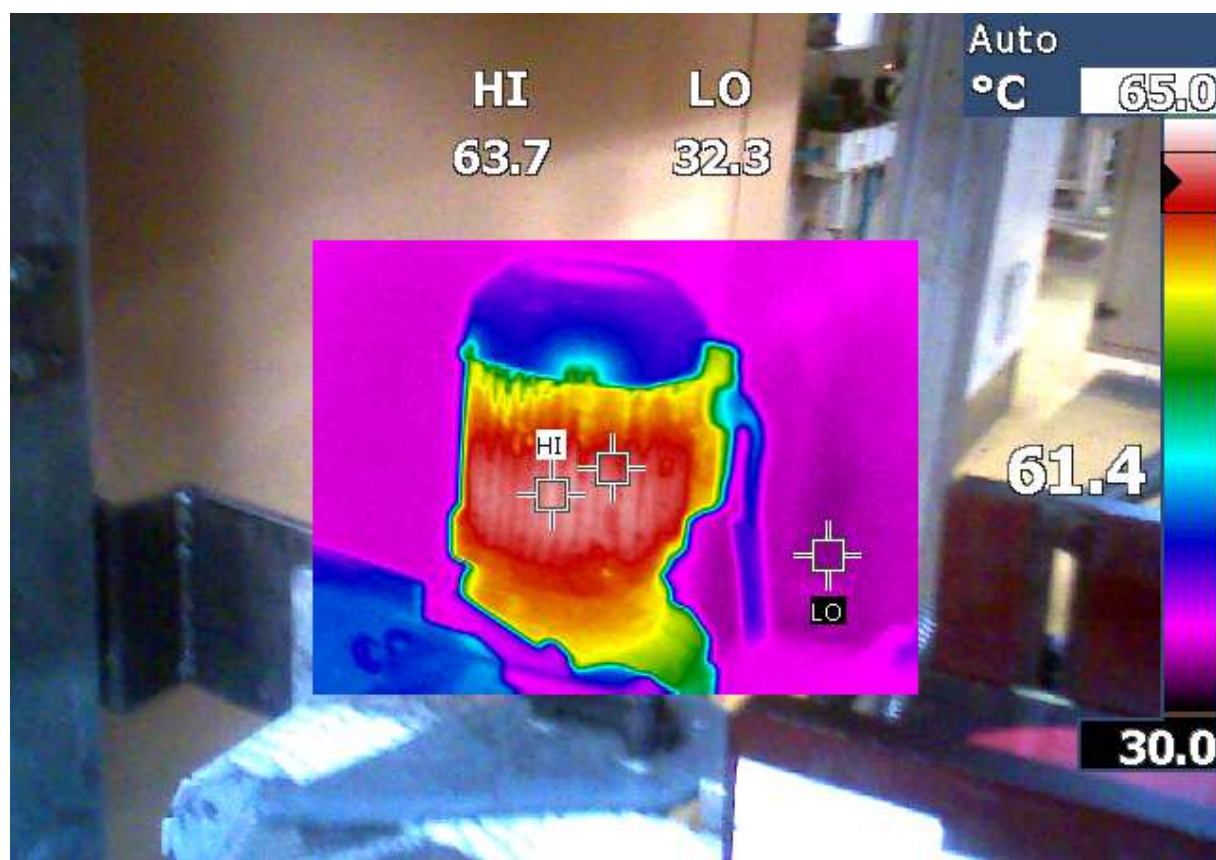
8.1.5. hőkamerás vizsgálat

Hőkamerás vizsgálatot első sorban villamos elemek esetében végzünk. A magas hőmérsékletből az elektromos szekrényekben zárlatra, helytelenül rögzített kábelsarukra és egyes elemek kezdődő meghibásodására tudunk következtetni.



8.2 ábra: IR111 NOVA 10/90 kapcsolószekrény –Mágnes kapcsoló (kontaktor)

Motorok esetében a magas hőmérsékletű hűtőborda az elégtelen hőleadásra, vagy a túlmelegedett forgó rész által a motor külső felületére átadott hőre utalhat.



8.3 ábra: IR109 AFE támfelület köszörű gép kihordó szalag motor

8.1.6. Rezgés diagnosztika

Rezgés méréssel ismerhető fel leghamarabb egy forgó, mozgó alkatrész kezdeti meghibásodása, ill. ezzel a módszerrel lehet a legpontosabban meghatározni, hogy egy gépegység melyik gépeleme károsodott.



9. REZGÉS DIAGNOSZTIKA

9.1. Rezgés diagnosztika fajták

2 fajtát különböztetünk meg:

- offline és
- online rezgés mérés

Alkalmazás:

- Offline:
Mérőkészülék: FAG Detector III (9.1.ábra)
Szoftvere: TrendLine V3.6
- Online:
Mérőkészülék: SmartCheck (9.2.ábra)
Szoftvere: SmartUtility V1.6.11

Az offline rezgés mérés során a TrendLine-ban előre, specifikusan a vizsgálandó gépelemhez létrehozott konfigurációt töltünk fel a rezgésmérő készülékre (Detector III). Majd a mérés után a mért adatokat visszatöltjük a TrendLine szoftverbe kielemezésre.

Az online rezgésmérés esetében viszont felszereljük az adott gépegységre a mérőszenzort (SmartCheck gyorsulásszenzor), kiépítjük neki az elektromos hálózatot, IP-cím kiosztással felcsatlakoztatjuk a LAN hálózatra, majd az ebből kapott jelet feldolgozzuk a SmartUtility csomag SmartWeb webes felületén. Részletesebb kielemezést viszont a SmartViewer-rel végezhetünk, ami azt jelenti, hogy a SmartWeb-ről átültetünk megadott időintervallumon belüli mérési eredményeket és különböző eszközökkel kielemezzük ezeket.

Mind offline, mind online rezgésmérésnél egy mérési pont időben többször (rendszeres időközönként) mérendő, aminek következtében egy trend állítható fel. Így visszamenőlegesen figyelhetjük az adott gépelem állapotának változását, megjósolva a várható tönkremenetelét.



9.1 ábra: FAG Detector III offline rezgésmérő és tartozékai

Forrás: [1]



9.2 ábra: SmartCheck online rezgésszenzor

Forrás: [3]



10. REZGÉSMÉRÉSI RENDSZEREK

10.1. Offline rezgésmérés

10.1.1. Általános ismertetés

Az FAG Detector III csomag a következőket tartalmazza:

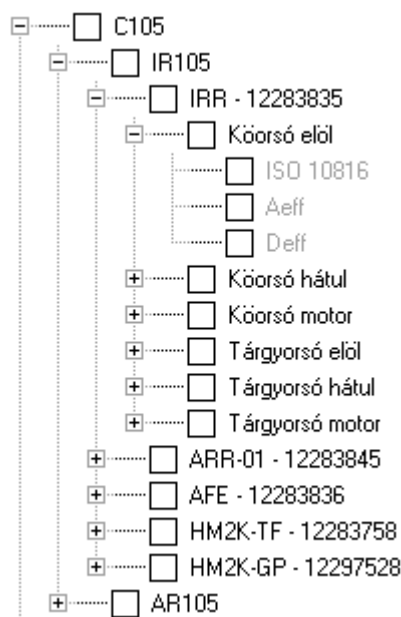
- FAG Detector III rezgésmérő készülék, Trendline szoftver
- Akkumulátor töltővel
- Gyorsulásszenzor mágneses adapterrel
- Hőmérsékletszenzor
- USB adapter soros porttal, ehhez adatkábel

Offline rezgésmérésnél nagyon fontos, hogy - a hiteles trend érdekében – minden méréskor azonos gépi paraméterek álljanak rendelkezésre (fordulatszám, terhelés), mert eltérő esetben nagy mértékű különbség lesz az egyes méréseknél.

A rezgésmérést mindig egy megfelelő konfigurációval kezdjük.

Ehhez elsődleges lépés egy egyértelműen felállított struktúra riasztási küszöbökkel:

- Az első 3 szint a mérési helyet írja le
- A 4. szint maga a mérési pont
- Az 5. szinten adjuk meg a mutatószámokat
(sebesség, gyorsulás, burkológörbe, hőmérséklet stb.)



10.1 ábra: Példa helyesen felállított struktúrára:

1. szint: gyártócella
2. szint: gyártósor
3. szint: gép megnevezés
4. szint: mérési pont
5. szint: mutatószámok

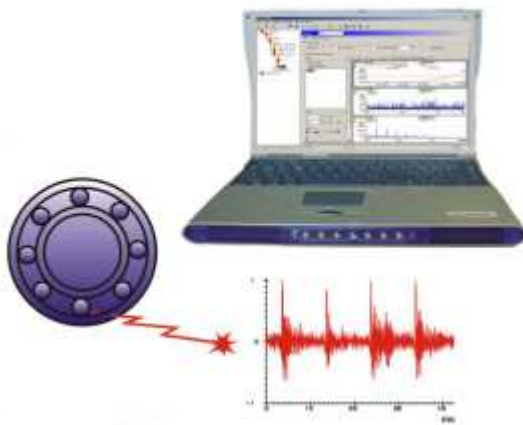
A struktúra elkészítése után következik maga a konfiguráció, majd ennek a feltöltése a Detector-ra és a mérések megkezdése. A mérések végeztével a mért adatokat visszatöltjük a Trendline-ba a kiértékeléshez.

Nagyon fontos: A mérési struktúrát előre átgondoltan kell meghatározni, mert áttöltés utáni módosítás esetén visszatöltéskor már egy-egy mért eredmény nem kerül fel, hiszen vagy nem létezik a mérési pont (törlés), vagy átnevezés miatt a Detector nem találja, és ez adatvesztéssel jár. (Nem beszélve a hibaüzenetekről.)

A struktúra és a konfiguráció a Detector készüléken is elkészíthető, de légyegesen egyszerűbb a Trendline programmal, és az adat kiértékelés is részletesebb, pontosabb lehetőségeket kínál.

10.1.2. A Trendline és az FAG Detector III funkciói

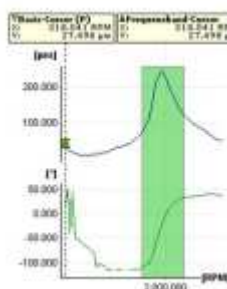
- Rezgésfelügyelet
 - mutatószámokénti trendábrázolással
 - Időjelekkel
 - Spektrumokkal



10.2 ábra: Csapágyhibára utaló időjel képe

Forrás: [1]

- Csapágyvizsgálat csapágyadatbázissal
- Hőmérsékletmérés
- Fordulatszám-mérés
- Rezonanciavizsgálat: mérés egy berendezés indításánál és leállításánál



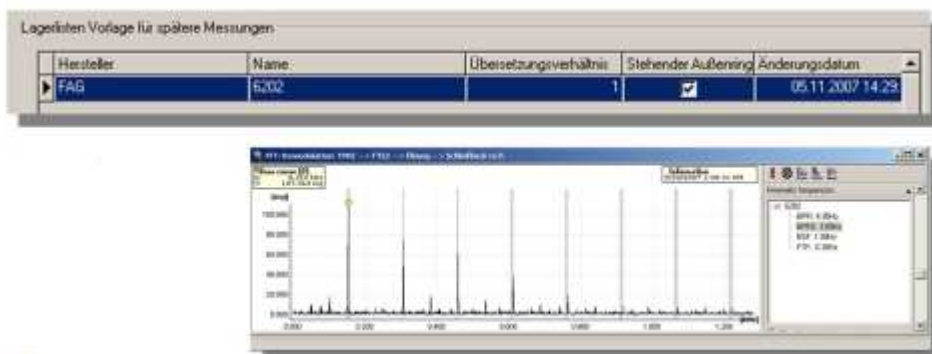
10.3 ábra: Rezonancia vizsgálat jelölt rezonancia tartománnyal

- Amplitúdó és fázis mérés
- Kiegyensúlyozatlanság mérés és kiegyensúlyozás
- Struktúra leképezés riasztási küszöbökkel
- Adatmentés

Datum	Ermittelte Drehzahl/ U/min	ISO 10816/ mm/s	Hauptalarm/ mm/s	Voralarm/ %	Aeff / mg
13.08.2014 12:55:23	1035,00	0,39	1,80	75,00	257,65
30.07.2014 12:35:48	1035,00	0,43	1,80	75,00	106,95
24.07.2014 14:12:04	1035,00	0,61	1,80	75,00	184,40
17.07.2014 13:01:12	1035,00	0,49	1,80	75,00	171,68
09.07.2014 12:44:42	1035,00	0,47	1,80	75,00	198,10
26.06.2014 14:48:11	1035,00	0,30	1,80	75,00	199,44

10.4 ábra: Struktúra riasztási küszöbökkel és az mért értékek táblázata

- Jelentés készítés
- Mért adatokhoz megjegyzés csatolás
- Igen hatékony vizuális segítség a csapágyadatbázis adataiból



10.5 ábra: A vizsgált csapágy kinematikus frekvenciáinak rávetítése a spektrum képre

Forrás: [2]

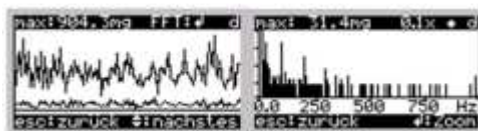
- Automatikus riasztási küszöb meghatározás
- Azonnali analízis, ami a Detector kijelzőjén rögtön a mérés után látható
- Mutatószám kijelzése az -előre konfigurált- riasztási küszöbnek megfelelően



10.6 ábra: Megfelelő és küszöb feletti mért érték kijelzése

Forrás: [1]

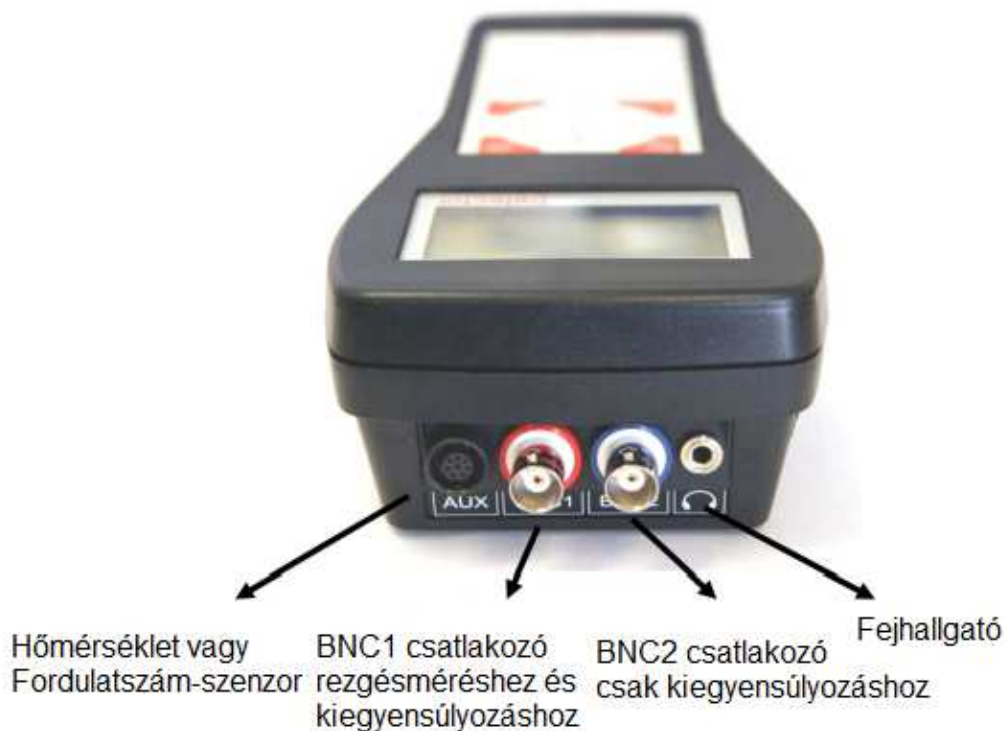
- Időjel és spektrum ábrázolás



10.7 ábra: Időjel és spektrum elnagyolt ábrázolása

Forrás: [1]

- Az FAG Detector III további opciói:
 - Egyedi (előkonfigurálást nem igénylő) mérések
 - ISO10816 (rezgés sebességének mérése)
 - Fejhallgatóval történő vizsgálat
 - Hőmérséklet mérés digitális kijelzővel rendelkező lézeres hőmérővel
 - Rendszer menü
 - Detector nyelv beállításai
 - LCD háttérvilágítás
 - Adattárolás menedzser
 - Akku töltöttség kijelzés
 - Automata kikapcsolási idő beállítás
- Csatlakozási pontok



10.8 ábra: FAG Detector III felülnézete

Forrás: [1]



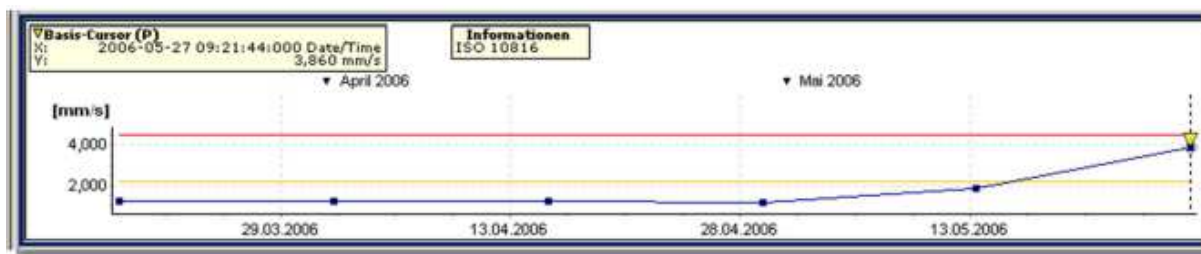
10.9 ábra: FAG Detector III alulnézete

Forrás: [1]

10.1.3. A Detector méréselmélete

Minden erő, ami egy gép forgó alkatrészein keresztül hat, maga a rezgés okozója, mint pl. kiegyensúlyozatlanság, egytengelyűség hiba, súrlódás, elektromos probléma stb.

A mért rezgés a ház „válasza” az erőre, amire a szenzort tesszük. Rezgésméréskor egy gyorsulásszenzor veszi át a rezgést és elektromos jellé alakítja. Sok információt kapunk a gép állapotáról az analízis során. Az analízist a Trendline szoftverrel végezzük és több mért érték egy trendet alkot. A trenden nyomon követhető a gép állapotának romlása.

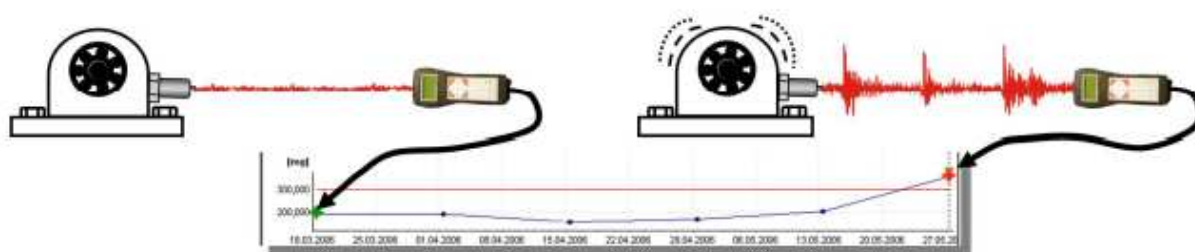


10.10 ábra: Trend ábrázolása a Trendline programban

Forrás: [1]

10.1.3.1. Egy trendlefutás jelentősége:

- Mérés azonos mérési és üzemi feltételek mellett
- A gépnek jó állapotban kell lennie az első mérés során, hogy ehhez az állapothoz képest vizsgálhassuk a változást.
- Növekvő vagy csökkenő trend esetén végezzük el az analízist, hogy megtaláljuk az okot.



10.11 ábra: Gép állapot romlás felügyelet egy trend segítségével

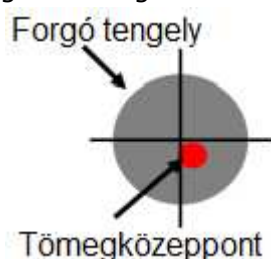
Forrás: [1]

10.1.3.2. Mutatószám típusok és gép hibák

Egy mérés alkalmával a FAG Detector III egyszerre 4 különböző mutatószámot tud kezelni. Többszöri mérés esetén minden mutatószámnak saját trendje lesz. A különböző mutatószám típusok különböző gépi problémára utalnak.

Ezek a géphibák lehetnek:

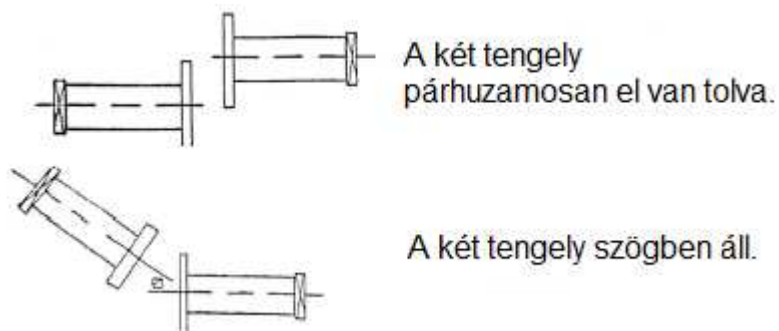
- Kiegyensúlyozatlanság: a forgó tengely tömegközéppontja nem a forgás központjában van, ezért ez centrifugális erőt generál.



10.12 ábra: Kiegyensúlyozatlanság

Forrás: [2]

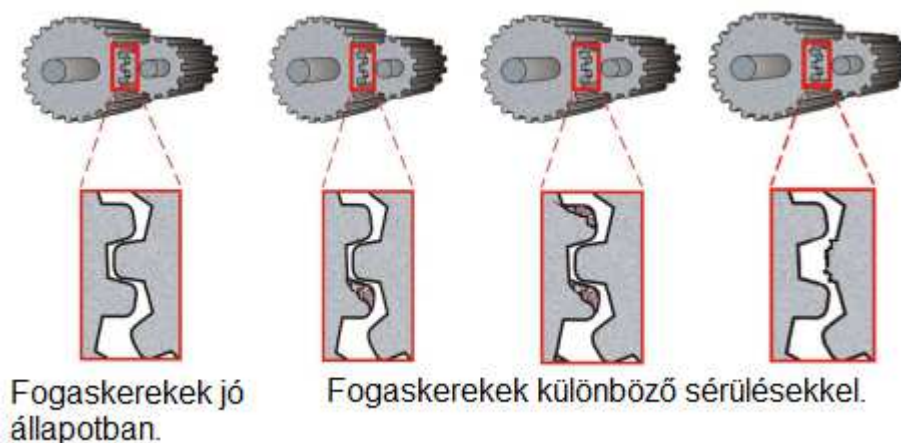
- Egytengelyűség hiba: A két összekötött tengely szimmetriatengelyei nem egy egyenesre esnek.



10.13 ábra: Egytengelyűségi hiba

Forrás: [2]

- Csapágyhibák: Külső gyűrű, belső gyűrű vagy gördülő elem sérülés
- Hajtómű hibák:



10.14 ábra: Fogaskerék hibák

Forrás: [2]

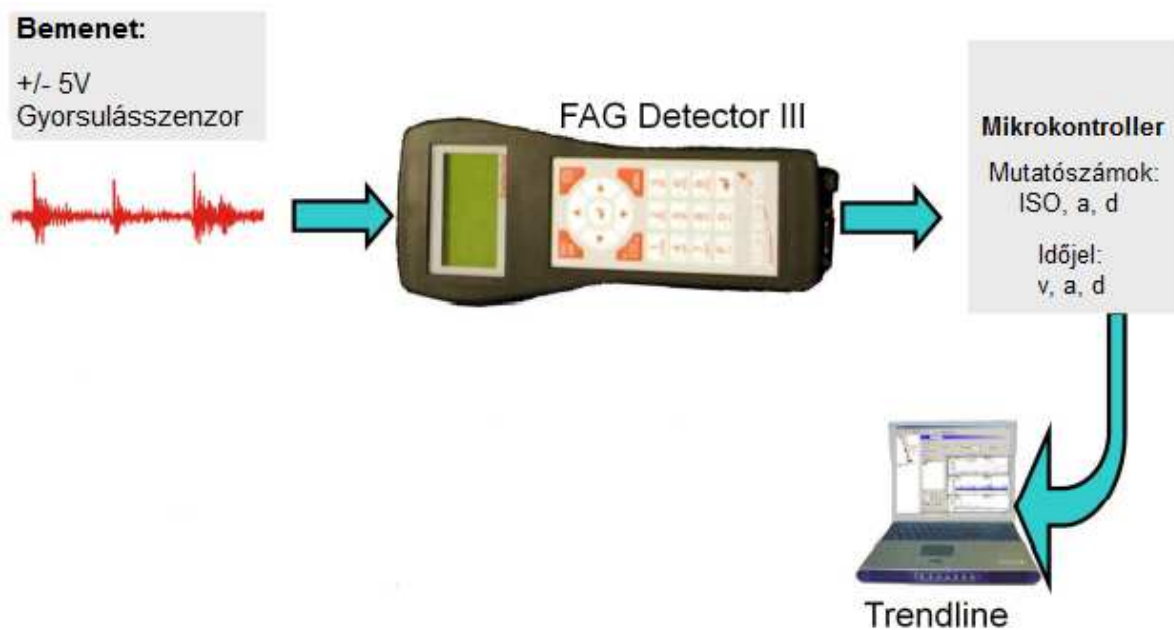
- Rezonancia: Ha egy gépi rezgés frekvenciája egybeesik az anyag saját frekvenciájával rezonancia jön létre.

10.1.3.3. Gépelemek – Mutatószámok:

Egy gépelemnek és ennek hibáinak a rezgésfelügyelet során releváns mutatószámai vannak:

- ISO (sebesség. A gyakorlatban használt: ISO 10816):
 - Tengelyek: kiegyensúlyozatlanság, egytengelyűség hiba
 - Csapágyak: előrehaladott károsodás
- a (gyorsulás)
 - Hajtómű hibák
 - Csapágyak: kezdődő vagy előrehaladott csapágykárosodás
 - Rezonancia.

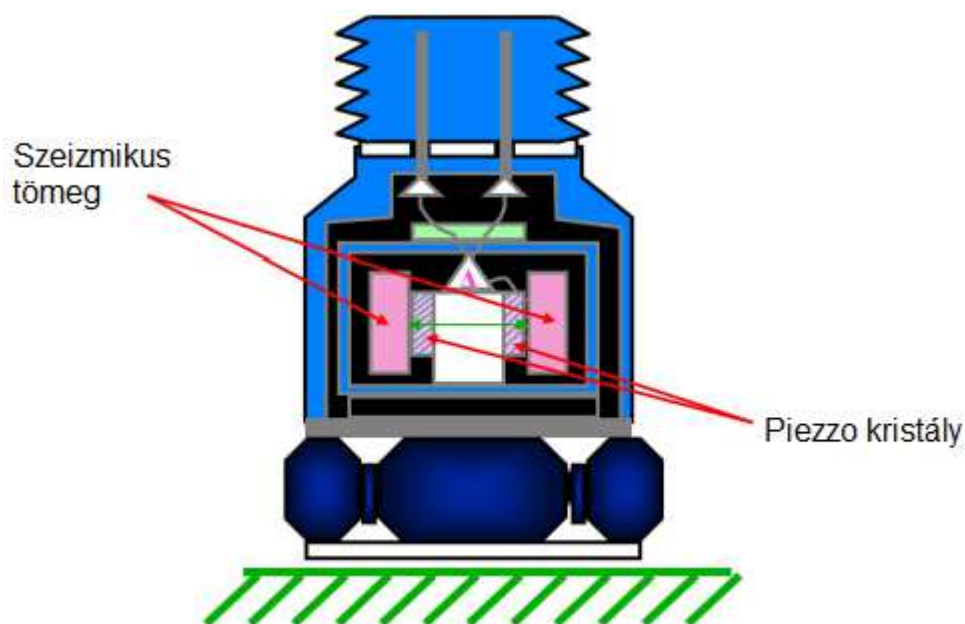
- d (burkológörbe)
Csapágyak: kezdődő károsodás
Hajtómű hibák



10.15 ábra: A jelfeldolgozás elmélete

Forrás: [1]

10.1.3.4. A gyorsulásszenzor



10.16 ábra: A szenzor felépítése

Forrás: [1]



A Detectorban egy standard ICP szenzor van előkonfigurálva. A kimeneti feszültsége 5V, kábelhossza max. 50 m. A szenzor voltban értelmezett kimeneti feszültsége arányos a g-ben mért gyorsulás jelhez. A szenzorérzékenység azt adja meg, hogy egy g gyorsulásnak hány volt felel meg. A standard szenzor érzékenysége: 100 mV/g.

3.1.4. A mérés előtti konfiguráció

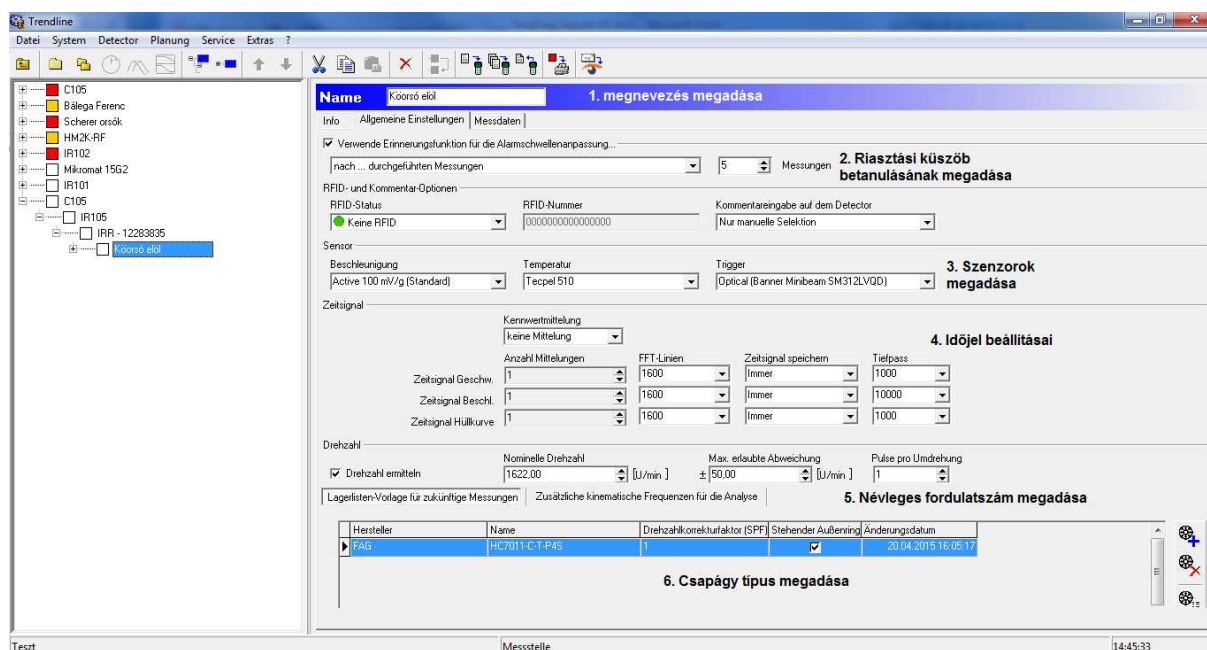
Ahhoz, hogy egy rezgésmérést el lehessen kezdeni a Trendline szoftverben egy konfigurációt kell létrehozni.

Az első 3 szinten a mérendő berendezést kell egyértelműen behatárolni. Lehetőség van kép és megjegyzés beszúrására is ezeken a szinteken. A megadott megnevezések átkerülnek a Detector-ra, ezek szerint lesznek a mérési helyek azonosítva, és a mérés során ezeket választjuk ki.

A 4-es szinten adjuk meg a mérési pontokat, az 5-ösön pedig a mutatószámokat. Az egyszerű kezelhetőség miatt gyárilag van a rendszerben egy standard konfiguráció, ami az állapot felügyelet széles skálájára alkalmazható, de ez csak olyan esetekben vehető igénybe, ahol a fordulatszám > 200 min⁻¹.

Miután megadtuk az első 3 szintet, a 4. szintet a következőknek megfelelően adjuk meg:

1. Mérési pont megnevezése
2. Riasztási küszöbérték automatikus beállításának lehetősége
3. Szenzorok típusának megadása
4. Időjelre vonatkozó beállítások
5. Fordulatszám megadás
6. Csapágyvizsgálat esetén csapágytípus kiválasztása



10.17 ábra: A Trendline konfigurációs ablaka



1. A mérési pont megnevezése egyértelműen megadja azt a pontot a gépben, ahol a mérést el kell végezni.
 2. Riasztási küszöb betanítása: a legördülő listából meg lehet adni, hogy megadott nap vagy megadott mérés szám után állítsa be a program automatikusan a küszöbértékeket.
 3. A gyorsulás, hőmérséklet, fordulatszám szenzorokat adjuk meg ebben a részben
 4. Időjelre vonatkozó beállítások. Ahhoz, hogy az analízis során megfelelő képet kapjunk egy egység állapotáról, fontos ezeknek az értékeknek a megfelelő megadása:
 - FFT vonalak száma: 1600 vagy 3200 adható meg. Ez a Spektrum felbontása.
 - Időjel mentés: soha, előriasztásnál, főriasztásnál, mindig. A program a mért értéket mindig menti, viszont az időjelet csak abban az esetben, amikor szükségünk van rá.
 - Alul áteresztő szűrő értékének megadása Hz-ben.
- A felbontás és a szűrő helyes megadása azért fontos, mert előfordulhat, hogy egy kiugró érték két ábrázolt frekvencia pont közé esik (kerítés effektus) , és emiatt nem látható az analízis során.
5. A névleges fordulatszámot és az ettől való maximális eltérést (tól-ig határt) is meg kell adni.
 6. Az előre letárolt csapágy adatbankból kiválaszthatjuk a csapágyat, aminek az analízis során a kinematikus frekvenciáit vetítjük a spektrumra.

Az 5. szinten állítjuk be a mutatószámokat:

- ISO10816, Vsel: sebesség diagram (effektív vagy szelektív tartomány megadással. Az ISO10816 a szabványos effektív sebesség mutatószáma)
- Aeff, Asel: gyorsulás diagram (effektív vagy szelektív tartomány megadással)
- Deff, Dsel: burkológörbe (demoduláció) diagram (effektív vagy szelektív tartomány megadással)
- Hőmérséklet
- „Crestfaktor”: A max. Peak (maximális csúcsmagasság) és az RMS (Root Mean Square) érték arányát adja meg. Egy szabályos szinusz jelnek a „crestfaktora” 1,4 (dimenzió nélküli arányszám). Ha egy Crestfaktor 3 fölé emelkedik a trend során, akkor arra következtethetünk, hogy egy löketszerű rezgés jelenik meg és erősödik, ami meghibásodáshoz vezethet.

Az offline rezgésmérést is időnként meg kell ismételni, hogy következtetni tudjunk a gép állapotára és a romlás mértékére. A mérések elvégzésének ajánlott intervallumai:

- kritikus gépelemek: rendszeresen / online
- Standard gépek: 2-4 hetente
- Segéd- és kiszolgálóberendezések: 2-4 havonta

A mérési intervallum nagy mértékben függ a gép fordulatszámától. Magasabb fordulatszám esetén gyakoribb mérés szükséges.

10.1.5. Egy rezgésmérés áttekintése

Egy sikeres gépállapot felmérés nagymértékben függ a gondos tervezéstől, egy jó konfigurációtól, ami az esetleges problémára van kihegyezve, és a mérés végrehajtásának hosszú időn keresztül tartó pontos ismétlődésétől.

- első lépés a mérési szisztéma felépítése

- a gépre vonatkozó konfiguráció létrehozása és áttöltése a Detector-ra
- a mutatószámok első mérése
- első trend áttekintés
- riasztási küszöbök beállítása

10.1.5.1. Mérési szisztéma:

A kiválasztott gép egy kúpgörgős csapágy belső gyűrűjének gördülópályáját köszörüli. Ez egy IRR 2S-105 típusú gép, aminek a köszörű- és tárgyorsójának állapotát fogjuk vizsgálni.

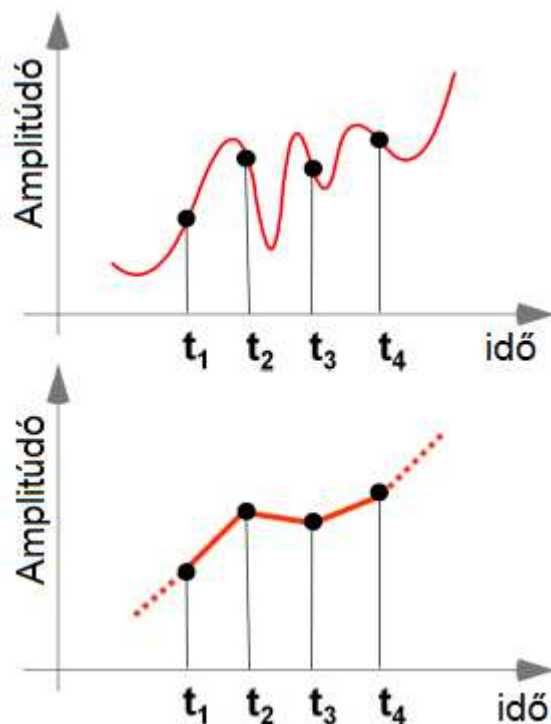
10.1.5.2. Konfiguráció:

A struktúra első 3 szintje a következő képen fog felépülni: a gyártó cella, a gyártó sor és maga a gép. A 4.szinten adjuk meg a mérési pontokat. Mind a köszörűorsó mind a tárgyorsó esetében 3-3 ponton fogunk mérni: A kőorsón az első és hátsó csapágyazásokat, valamint a meghajtó motort, a tárgyorsón is ugyanígy elöl, hátul és a tárgyorsó motort.

A mérési pontokat illetve mérés során a szenzort minden esetben a csapágyazásokhoz minél közelebb helyezzük el, figyelve a biztonságra és baleset megelőzésre.

A konfigurációnál legfontosabb a felbontás és az alul áteresztő szűrő értékének helyes megadása.

Az időjel függvényben, mivel analóg-digitális átalakításról van szó, egy helytelen beállítás esetén két érték közti információ elvész.

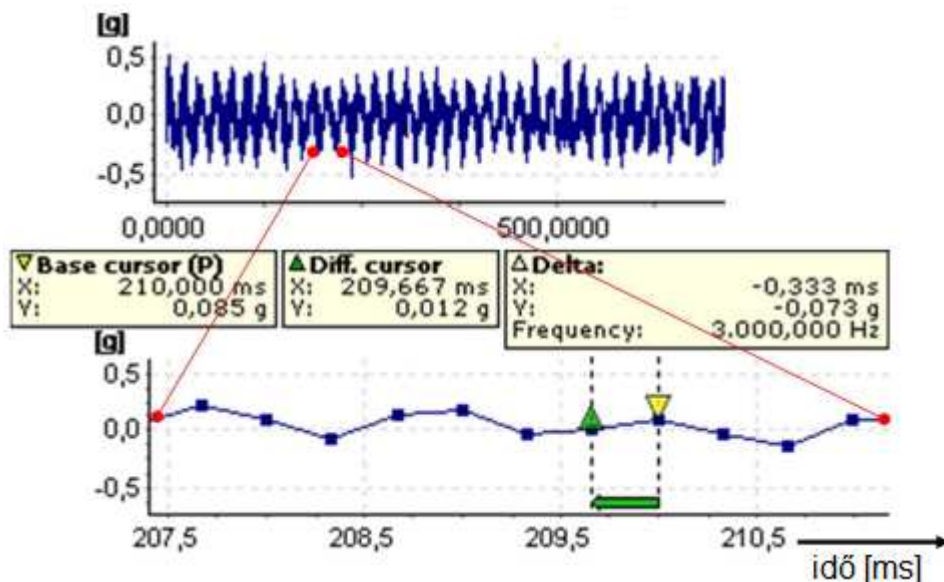


10.18 ábra: Időjel analóg-digitális átalakítása

Forrás: [1]

Egy időjel függvényben egy szakaszra zoomolva két szomszédos pont közti távolság lemérhető. Ezek diszkrét pontokként vannak ábrázolva. Az időjel felbontása (két

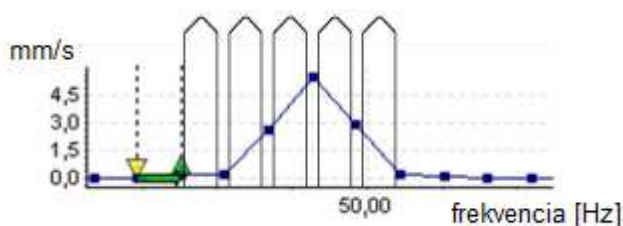
szomszédos pont közti távolsága) egyenlő az alul áteresztő szűrő 2,56-szorosának reciprokával.



10.19 ábra: Időjel függvény kinagyított képe

Forrás: [1]

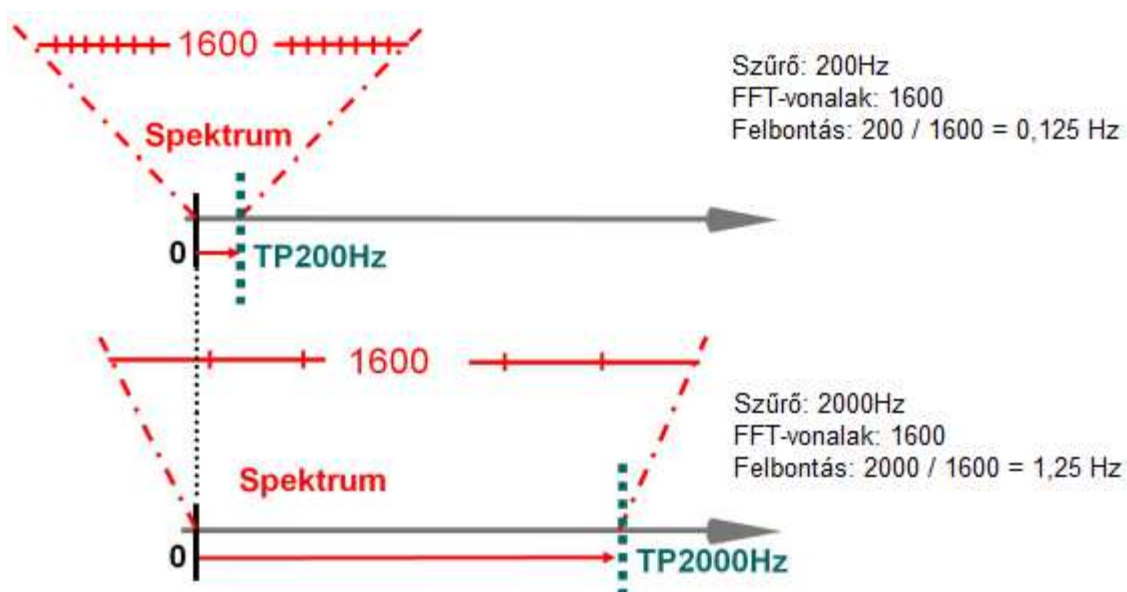
Hasonlóan van ábrázolva az időjel függvényből Fast Fourier transzformációval (FFT) előállított spektrum kép is. Itt a felbontás egyenlő az alul áteresztő szűrő és az úgynevezett FFT vonalak hányadosával. Az FFT vonalak száma (a spektrumban ábrázolt pontok száma) 1600 vagy 3200 lehet. Itt is, ahogy az időjelnél is két frekvenciaérték közti tartomány elvész. Ezt hívjuk kerítés effektusnak.



10.20 ábra: Kerítés effektus

Forrás: [1]

1600 FFT vonal alacsonyabb, 3200 FFT vonal magasabb felbontást eredményez, de ehhez megfelelően kell párosítani az alul áteresztő szűrő nagyságát is. Ugyanannyi FFT vonal magasabb szűrő érték esetén kisebb lesz a felbontás.



10.21 ábra: Felbontások összehasonlítása azonos FFT-vonalszám és különböző szűrő érték esetén

Forrás: [1]

Az FFT vonalak száma és az alul áteresztés értéke együttesen befolyásolja a mérés időtartamát. A következő táblázat a Trendline-ban rendelkezésre álló FFT-vonalak számához és szűrő értékekhez kiszámolt mérési idők és felbontások láthatók. Egy konfiguráció létrehozásakor el kell dönteni, hogy pontos, nagy felbontású vagy rövid ideig tartó mérésre lesz szükségünk.

	1600 FFT-vonal		3200 FFT-vonal	
Alul áteresztő szűrő frekvencia érték [Hz]	Spektrum felbontása [Hz]	A mérés időtartama [s]	Spektrum felbontása [Hz]	A mérés időtartama [s]
200	0,125	8	0,0625	16
500	0,3125	3,2	0,156	6,4
1000	0,625	1,6	0,3125	3,2
2000	1,25	0,8	0,625	1,6
5000	3,125	0,32	1,5625	0,64
10.000	6,25	0,16	3,125	0,32
20.000	12,5	0,08	6,25	0,16

10.22 ábra: Felbontások és mérési idők

Forrás: [1]

Ezek tudatában meghatározzuk a mérési ponton fellépő kinematikus frekvenciákat. Mivel az IRR köszörű gép köszörű- és tárgyorsóját fogjuk mérni, a kinematikus frekvenciák a csapágy frekvenciák lesznek. Ezek a kinematikus frekvenciák a csapágykatalógusban ill. a Trendline csapágyadatbázisában is szerepelnek. Az alábbi példán az IRR köszörűorsójába épített HC7011-C-T-P4S típusú ferdehatásvonalú mélyhornyú golyóscsapágy kinematikus frekvenciái szerepelnek.

Lagerinformationen			
Drehzahlkorrekturfaktor (SPF)		Stehender Außenring	
1		☒	
Hersteller:			
FAG			
Name:			
HC7011-C-T-P4S			
Kinematische Frequenzen:			
Innenring:	Außenring:	Wälzkörper:	Käfig:
14,1686	11,8314	5,3293	0,4551
Schließen			

10.23 ábra: A HC7011 típusú csapágy kinematikus frekvenciái

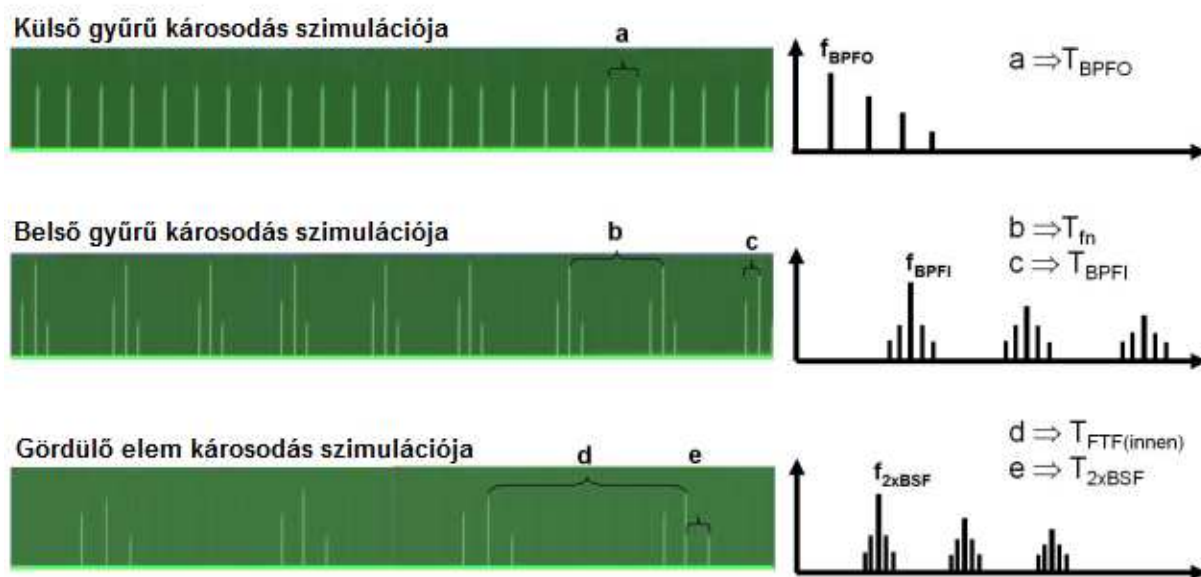
Egy csapágnak 4 féle kinematikus frekvenciát különböztetünk meg:

- BPFI: gördülő elem átgördülése a belső gyűrűn (belső gyűrű kinematikus frekvencia)
- BPFO: gördülő elem átgördülése a külső gyűrűn (külső gyűrű kinematikus frekvencia)
- BSF: gördülő elem átfordulása saját tengelye körül (gördülő elem kinematikus frekvenciája)
- FTF: Kosár kinematikus frekvenciája

Ezek az értékek álló külső gyűrű esetében a belső gyűrű egyszeri körülfordulása alatti két alkotóelem érintkezéseinek száma. Pl. a fent nevezett csapágy BPFI értéke: 14,1 azt jelenti, hogy egy összejelölt külső és belső gyűrű esetén, míg a belső megtesz egy teljes fordulatot, ennyiszer gördülnek át a gördülő elemek a belső gyűrű jelölésén, BPFO esetében pedig a külső gyűrű jelölésén. A BSF értéke azt jelenti, hogy egy ugyanilyen körülfordulás alatt egy gördülő elem (golyó, görgő) hányszor fordul át a saját tengelye körül. Az FTF esetében is ugyanígy járunk el: egy belsőgyűrű körülfordulás alatt hány kört tesz meg maga a kosár. A

példában jelzett csapágó FTF értéke 0,4. Ez azt jelenti, hogy a belső gyűrűnek több mint 2-szer körül kell fordulnia, míg a kosár megtesz egy teljes kört. Ezen értékek tudatában egy megadott fordulatszámhoz tartozó kinematikus frekvenciája egy csapágónak meghatározható.

Például: Az IRR köszörűorsó rezgésdiagnosztikáját 1622 min^{-1} -es fordulaton végezzük. Eszerint egy esetleges külső gyűrű károsodás esetén $11,8314 \cdot 1622 / 60 = 319,84 \text{ Hz}$ -en és ennek harmonikusain kiugró amplitúdókat kell látnunk a burkológörbe (d_{eff}) spektrumán.



10.24 ábra: Egy csapágó különböző elemeinek károsodásának szimulációi

Forrás: [1]

Természetesen a valóságban nem ilyen egyértelműen tagolt egy-egy elem károsodása, ezért ahhoz, hogy a burkológörbe (d) a különböző károsodások specifikációit mutassa, fontos a felbontás helyes beállítása. Az amplitúdó modulációt (amplitúdók különböző magasságát) a csapágó különböző terhelési zónái okozzák. A terheletlen zóna (csapágóhézag) a gördülő elem gyengébb kapcsolatban van a belső- / külső gyűrűvel. Így az átgördülésnél kisebb löketet generál. A terhelési zónán való átgördülés erősebb lökettel jár, mivel a terhelés magasabb és nincs csapágóhézag a gördülő elem és a belső- / külső gyűrű között.

Az ábrán jelölt távolságok:

a: a külső gyűrű károsodás löketeinek amplitúdói (a) nem moduláltak (löketszerű), így a burkológörbe spektrumában csak a külső gyűrű átgördülési frekvenciáját (f_{BPFO}) harmonikusokkal mutatja.

b, c: A belső gyűrű károsodás löketeinek amplitúdói (c) a forgó tengely fordulati frekvenciájával (b) moduláltak, így a burkológörbe spektrumán a belső gyűrű kinematikus frekvenciáját (f_{BPFI}) harmonikusokkal és a fordulati frekvencia (f_n) oldalvonalait harmonikusokkal mutatja.

d, e: A gördülőelem károsodás löketeinek amplitúdói (e) a kosár forgási frekvenciájával (d) moduláltak, így a spektrumban a gördülőelem frekvenciájának kétszeresét ($F_{2 \times BSF}$) harmonikusokkal és a kosárfrekvencia oldalvonalait (f_{FTF}) harmonikusokkal mutatja.

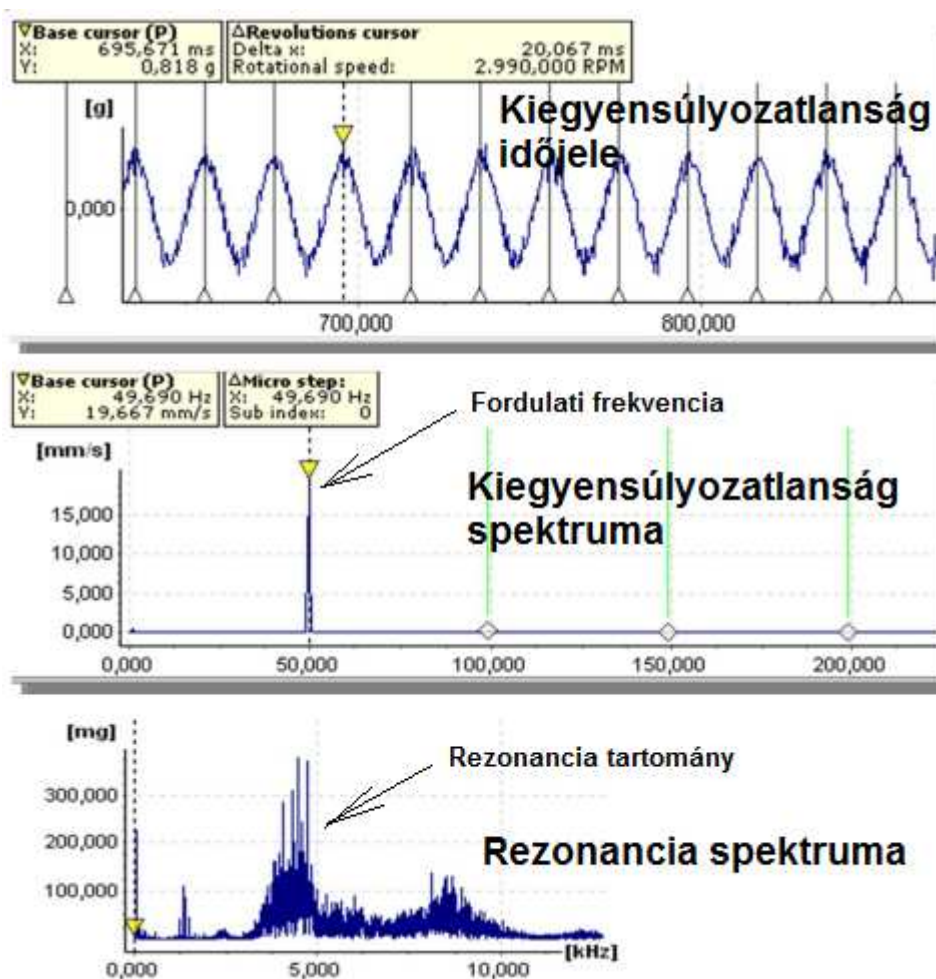
	Állapot	Nyers jel v / a	Burkológörbe jel d
Csapágy	Jó	Nincsenek átgördülési frekvenciák	Nincsenek átgördülési frekvenciák
	Kezdődő károsodás		Tagolt átgördülési frekvenciák A burkológörbe értékek (d) a trendben emelkednek
	Előrehaladott károsodás	Átgördülési frekvenciák harmonikusokkal a felső frekvenciatartományban	Esetleges d érték csökkenés a trendben, alapzajszint emelkedés és az átgördülési frekvenciák ellaposodása
	Végso károsodás	Alapzajszint emelkedés és az átgördülési frekvenciák ellaposodása	Magas alapzajszint (> 100 mg)

10.25 ábra: Egy csapágy állapot durva becslése

Forrás: [1]

A sebesség-, gyorsulás-, burkológörbejeleket és a trendeket egyenként és kombinációban is analizálni kell, hogy egy gép állapotát meg tudjuk állapítani.

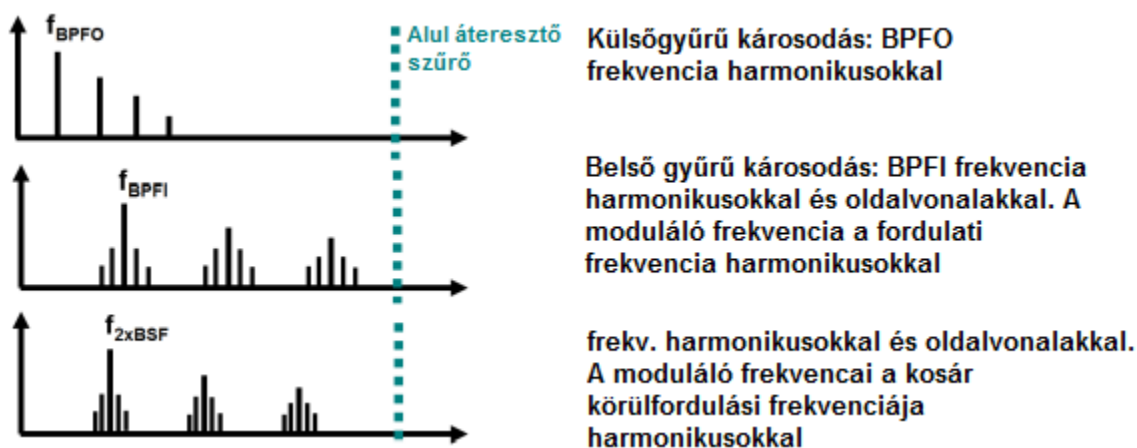
Egy mért, magasabb rezgésértékből nem következik egyértelműen, hogy csapágykárosodás van jelen. Felléphet (más egyebek mellett) kiegyensúlyozatlanság és rezonancia is. Kiegyensúlyozatlanság esetén az időjelen közel szinuszformát kapunk, a spektrumon pedig egy adott frekvencián, ami a fordulati frekvencia (f_n) egy kiugró nagyságú amplitúdót. Rezonancia akkor lép fel, ha egy gépelem forgásának frekvenciája az anyag saját frekvencia tartományába esik. A rezonancia tartomány helye a diagramban nem változik, ha változik a fordulatszám.



10.26 ábra: A kiegyensúlyozatlanság és rezonancia képe

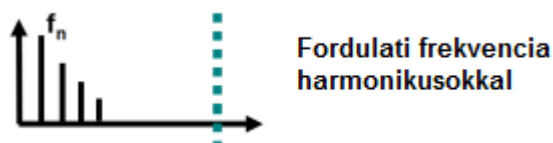
Forrás: [2]

Analízis során látott frekvencia képek:
Burkológörbe spektrum:



10.27 ábra: Kezdődő csapágykárosodás, álló külső gyűrű burkológörbe spektrumképei

Forrás: [2]



10.28 ábra: Tengelyütés

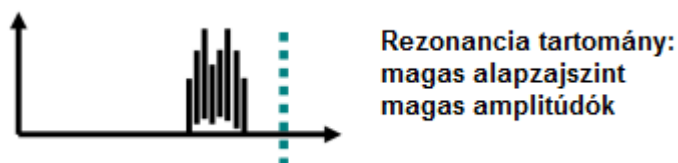
Forrás: [2]

Gyorsulás spektrum:



10.29 ábra: Előrehaladott csapágykárosodás spektrumképe a gyorsulás görbén

Forrás: [2]



10.30 ábra: Rezonancia

Forrás: [2]

Sebesség spektrum:



10.31 ábra: Kiegyensúlyozatlanság

Forrás: [2]



10.32 ábra: Végleges csapágykifutás

Forrás: [2]

Ezek tudatában elkészíthető a legmegfelelőbb konfiguráció. A létrehozott konfigurációt áttöltjük a Detector-ra. Előtte azonban érdemes megnézni, van-e már a Detector-on korábbi

mérés, mert az áttöltendővel felülírhatjuk. Ilyen esetben, el kell döntenünk, hogy felülírható-e, szükséges-e, és ha igen feltöltöttük-e már a Trendline-ba.

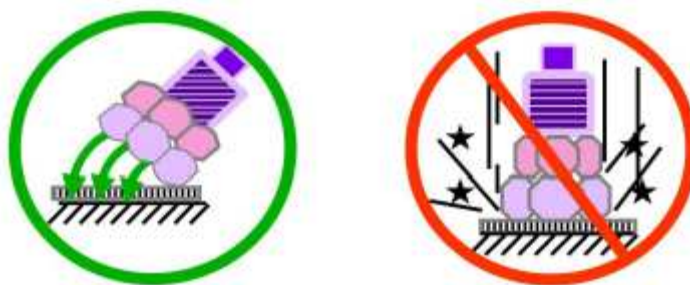
10.1.5.3. Mérés előtt:

- Megjelöljük a mérési pontot az ismételhetőség miatt.
- Megtisztítjuk a mérési pontot: távolítsuk el a lakkot, zsírt, köszörű iszapot.
- A mágneses adapterrel rögzítjük a szenzort a mérési pontra, figyelve, hogy stabil legyen, ne billegjen. Figyelni kell az óvatos felhelyezésre, ne csapódjon a felülethez a szenzor. Az ívelt felületek esetében az ún. kétsínes adaptert használjuk.



10.33 ábra: Kétsínes adapter

Forrás: [1]



10.34 ábra: Példa a helyes és helytelen felhelyezésre

Forrás: [1]

A felhelyezés is rezgést generál, ezért várni kell amíg lecseng, hogy ne befolyásolja a valódi mérendő rezgést. Az első, helyes esetben kb. 8 másodperc, a második, helytelen esetben kb. 20 másodperc a lecsengés ideje.

- A mérés során a kábelt lehetőleg ne mozgassuk.
- Mérés során a gép üzeme konstans kell maradjon: állandó fordulatszám, nincs adagolás, nincs szánmozgás, semmi olyan bezavaró tényező, ami a mérés eredményét befolyásolná.
- Ismétlődő mérésekkor a szenzort mindig ugyanarra a pontra tesszük.
- Minden mérést ugyanazon a fordulatszámon végzünk, mérés közben nincs nagy fordulatszám ingadozás.
- Minden mérésakor a terhelés állandó
- És természetesen a Detector-on kiválasztott mérési pontnak és a mért pontnak meg kell egyezniük.

Ezeket a pontokat minden mérésakor feltétlenül be kell tartani, hogy a többszöri mérés után az egyes értékek összehasonlíthatók legyenek.



3.1.5.4. A mérés

A mérés megkezdése előtt a szenzort felhelyezzük az első mérési pontra, majd a Detector-on a menüből kiválasztjuk az állapotfelügyeletet majd a mérési pontot. Elindítjuk a mérést.

A mérés több lépésből áll, amik automatikusan lefutnak:

- A szenzor inicializálása
- Erősítés / moduláció beállítása
- Maga a mérés

Ezután a kijelzőn megjelennek a mért értékek minden mutatószámhoz, ill. az időjelet és spektrumot is láthatjuk. Amennyiben a mérés sikeres volt (nem voltak zavaró tényezők), elmentjük a mérési eredményeket. Ha meg kell ismételni a mérést, a hibásat nem mentjük el. Mentéskor, ha már az adott mérési ponthoz tartoznak korábbi mérések, a készülék lehetőséget kínál a korábbi mérések törlésére (felülírás), az új mérés hozzáfűzésére a régiekhez ill. a mérés elvetésére. A Detector tárhelye is véges. Ha a konfigurációban az időjel tárolására mindig-et állítottunk nagyobb lesz egy-egy mérés mérete. Optimális megoldás, ha néhány mérés után, amikor már megismertük a gép jó állapotban mért rezgéseit, átállítjuk a konfigurációt, hogy csak főriasztásnál, vagy előriasztásnál mentsen időjelet, tárhelyet spórolva.

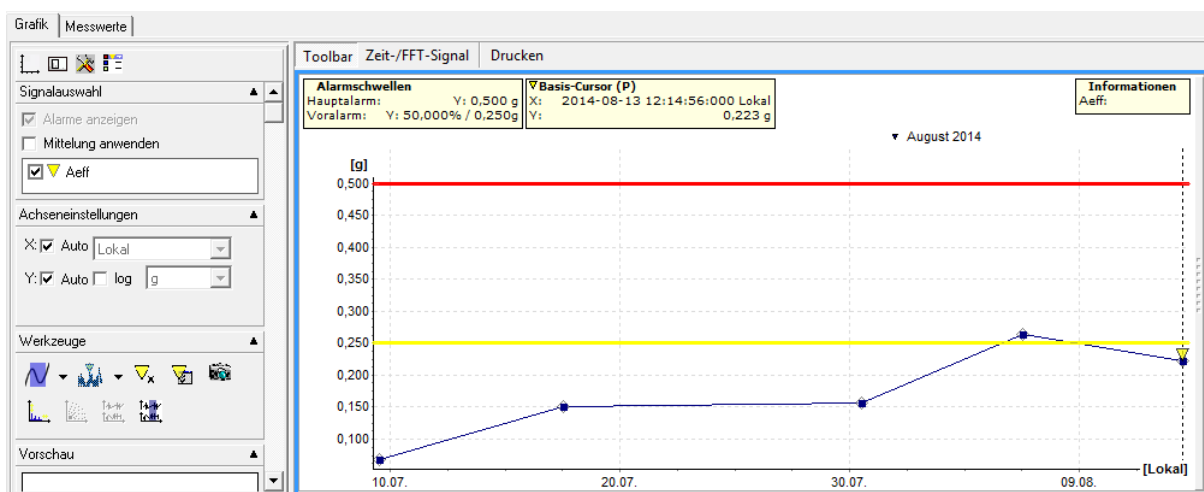
10.1.5.5. Mért adatok feltöltése a Trendline-ba, analízis

A feltöltött adatokat a mérési pont szintjén, a mért adatok fölön találjuk. Legfelül a legfrissebb. Az adatok dátummal és időponttal vannak mentve. A következő oszlopokban látjuk a fordulatszámot és az előzetesen, a struktúra létrehozásakor megadott mutatószámoknak a mért értékét, a fő riasztási küszöb értéket, és az ehhez százalékosan viszonyított előjelzési szintet. Ha egy mért érték meghaladja a riasztási szintet a cella háttérszíne sárgára vagy pirosra vált. Egy másik jelölési forma, a karakterek félkövér jelzése. Ez azt mutatja, hogy a méréskor nem csak a mutatószám értéke, hanem az időjele (természetesen spektrummal együtt) is mentve lett. Dupla kattintással megnyílnak az adott mérési időponthoz tartozó időjelek és spektrumok.

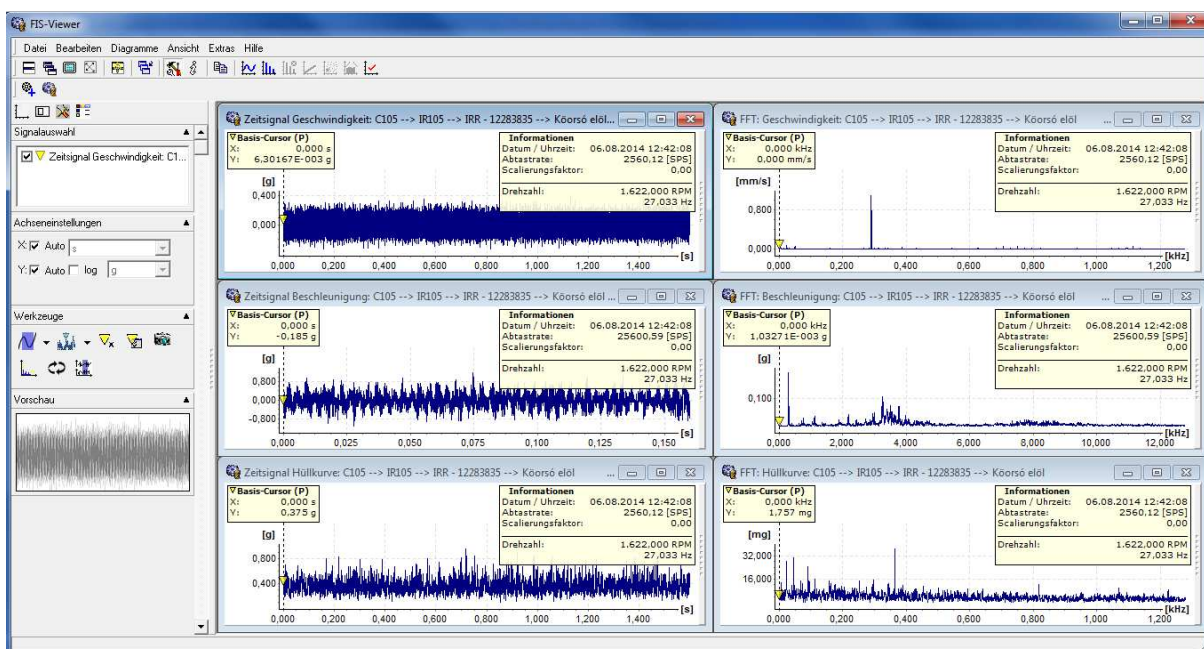
Grafik	Messwerte										
	Datum	Ermittelte Drehzahl/ U/min	ISO 10816/ mm/s	Hauptalarm/ mm/s	Voralarm/ %	Äeff/ mg	Hauptalarm/ mg	Voralarm/ %	Defi/ mg	Hauptalarm/ mg	Voralarm/ %
▶	13.08.2014 12:14:56	1622,00	0,74	1,80	75,00	222,66	500,00	50,00	98,55	500,00	50,00
	06.08.2014 12:42:08	1622,00	0,78	1,80	75,00	263,97	500,00	50,00	116,53	500,00	50,00
	30.07.2014 12:10:48	1622,00	0,95	1,80	75,00	155,27	500,00	50,00	91,17	500,00	50,00
	17.07.2014 12:20:15	1622,00	0,95	1,80	75,00	150,10	500,00	50,00	77,29	500,00	50,00
	09.07.2014 12:07:56	1622,00	0,37	1,80	75,00	67,13	500,00	50,00	30,39	500,00	50,00

10.35 ábra: Trendline-ba feltöltött adatok

Ha átkattintunk a grafik földre, a mérési eredményeket a trendben ábrázolva látjuk. Megadhatjuk a mutatószámokat (akár többet is), aminek a trendjét látni akarjuk.

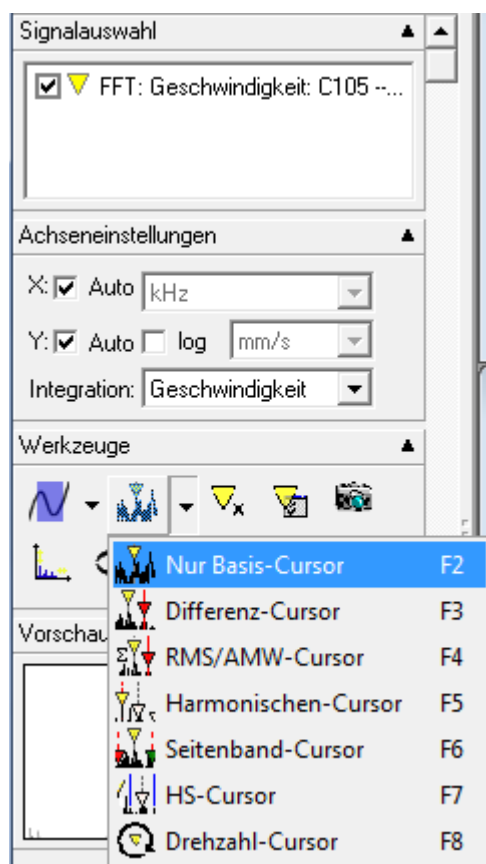


10.36 ábra: Trendline-ban ábrázolt trend



10.37 ábra: Időjel és spektrum ábrázolása a Trendline programban

A mért adatokra duplán kattintva megnyílik egy külön ablakban, a Trendline szoftverbe beépülő FIS-Viewer-be az adott méréshez tartozó mutatószámok időjele és spektruma. Az analízis során különböző eszközök állnak rendelkezésünkre a hibák feltárására, amit a bal oldalsó menüből érhetünk el.



10.38 ábra: A FIS-Viewer eszköztára

Ezekkel az eszközökkel tudunk mind az időjel, mind a spektrum függvényben zoomolni, a kurzort egy pontra helyezve a koordinátáját lekérdezni, két pont közti távolságot (idő vagy frekvencia) és amplitúdó különbséget mérni, egy frekvencia harmonikusait és oldalvonalait megjeleníteni.

10.1.5.6. Riasztási küszöbök beállítása

Legalább 5-10 mérésre van szükség, ahhoz, hogy egy riasztási szintet megközelítőleg jó értékre állítsunk. Ekkor az időjel tárolás még *mindig* -re van állítva a konfigurációban.

Egy állandóan üzemben lévő gépnél felrajzolt trend csak akkor mérvadó, ha a riasztási küszöbértékek helyesen vannak megadva. Több mérés után egyre jobban lehet finomítani a riasztási küszöbszinteket, hogy valóban csak egy kopásból, károsodásból származó hiba esetén jelezen.

Amíg a riasztási küszöbök nincsenek a trendhez illesztve, a struktúrában az egyes szintek mellett fehér négyzet látható, amint a riasztási szint megadása megtörténik, zöld, sárga vagy piros lesz a négyzet az adott mérési pont állapotától függően. A helyes riasztási szint meghatározásához, többször végig kell járni az egész procedúrát: konfigurációt a Detector-ra feltölteni, mérést elvégezni, adatokat visszatölteni a Trendline-ba, riasztási küszöböket módosítani.

Két szintet adunk meg, amit a mért érték, ha átlép, elő- vagy főriasztást kapunk. Ha a trendben az egyes mutatószámoknál emelkedés látható, egyre erősebb rezgése van az adott mérési pontnak. Ebből arra következtethetünk, hogy egyre nagyobb vagy esetleg újabb erőhatások érik a gépelemet.

Ezek a riasztások megjelennek mind azonnal a mérés után a Detector kijelzőjén, mind az adatfeltöltés után a Trendline-ban.



10.39 ábra: Állapot jelzések

Forrás: [1]

A riasztási szinteket először nem lehet tudni és beállítani. Első mérés során legalább háromszor kell mérni egymás után, hogy az egyes értékekből mérvadó következtetést vonhassunk le. A riasztási szint beállítását majd csak 5-10 mérés, de legkésőbb 3 hónap után kell állítanunk. Egy helyességi ellenőrzés illetve másodszori beállítás (finomítás) minden esetben ajánlott. Kétféleképpen történhet a riasztási szint beállítása: manuálisan vagy automatikusan. Automatikus beállítás esetén a mérési pont konfigurációjában adjuk meg, hogy hány mérés vagy hány nap után „tanulja be” a program a riasztási küszöböket.

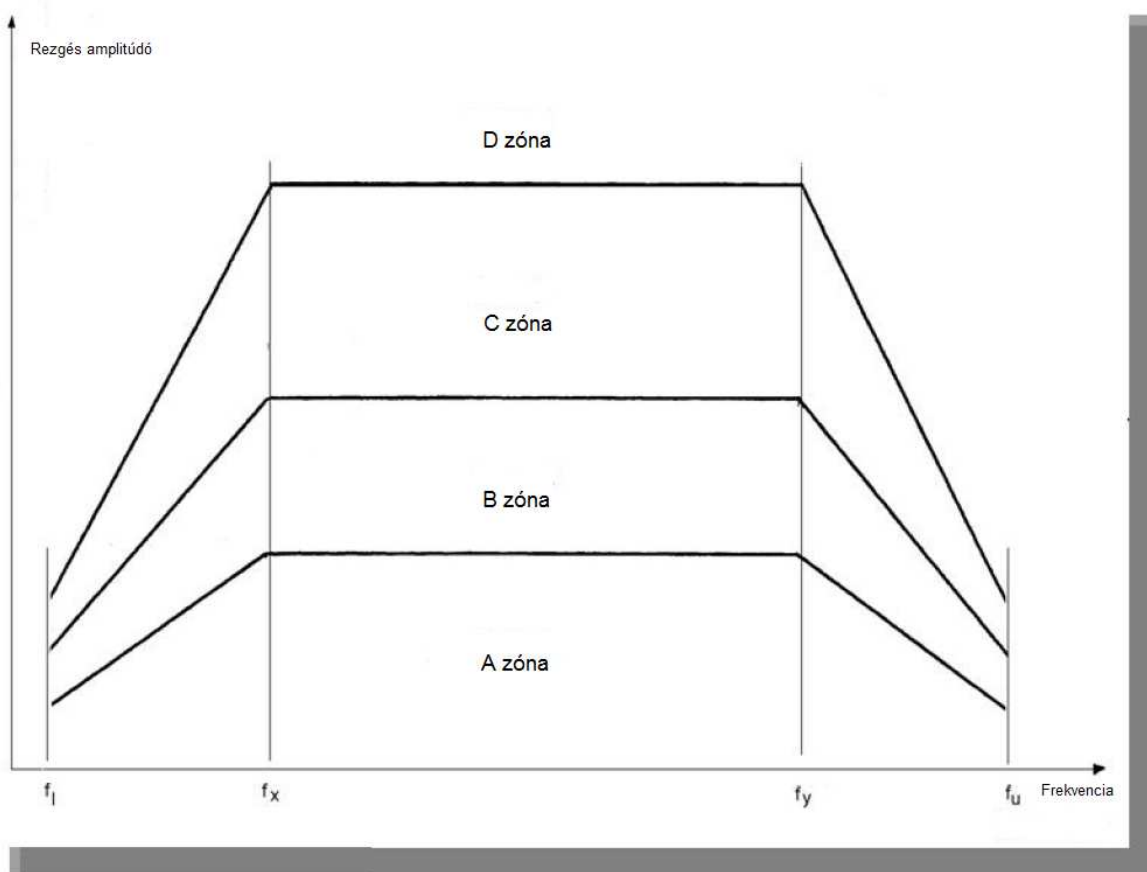
10.40 ábra: Automatikus betanítás

Manuálisan viszont a mutató számok szintjén adhatjuk meg a riasztási értékeket.

Name	
ISO 10816	
Allgemeine Einstellungen	Messdaten
Alarm	
Hauptalarm	Letzter Hauptalarm
1,80 mm/s	0,00 mm/s
Voralarm	Letzter Voralarm
75,00 %	0,00 mm/s

10.41 ábra: Manuális betanítás

Szabvány szerint csak az ISO10816 (effektív sebesség függvény) határozza meg a riasztási szinteket, de ez is módosítható utólag a tapasztalati értékek szerint.



10.42 ábra: ISO 10816 által megadott állapotzónák

Forrás: [1]

Az egyes zónák jelentése:

- A zóna: tipikusan egy új gép
- B zóna: a gépállapot megfelelő folyamatos üzemeltetéshez

- C zóna: a gép állapota már nem felel meg egy hosszabb, folyamatos üzemeltetéshez, csak korlátozott üzemidőtartam lehetséges
- D zóna: veszélyeztetett gépállapot, a meghibásodás bármikor bekövetkezhet.

Ezek a zónák különböző géposztályok esetében máshova esnek. A gépeket 4 osztályba soroljuk:

- I osztály: motorok és gépek elemei, amik jó állapota a gép működésének feltétele. Tipikusan a meghajtó motorok 15 kW teljesítményig.
- II osztály: közepesen nagy gépek 15 és 75 kW teljesítmény közt speciális gépágy alap nélkül és 300 kW-ig speciális gépágy alappal.
- III osztály: nagy meghajtó gépek és más olyan gép, aminek nagy forgató tömege van, merev és nehéz gépalapra állítva, ami a mért rezgés irányában merev alátámasztást biztosít.
- IV osztály: nagy meghajtó gépek és más olyan gép, aminek nagy forgató tömege van, olyan gépalapra állítva, ami a mért rezgés irányában lazább alátámasztást biztosít. (pl. nagy sebességű generátor fajták és gázturbinák 10 MW teljesítmény felett).

RMS mm/s	I	II	III	IV
0.28	A	A	A	A
0.45				
0.71				
1.12	B	B	B	B
1.8				
2.8	C	C	C	C
4.5				
7.1	D	D	D	D
11.2				
18				
28				
45				

10.43 ábra: ISO szerint megadott értékhatárok géposztályonként

Forrás: [1]

Abban az esetben, ha egy mérés után a Detector riasztást jelez, ajánlott a következő lépések elvégzése, hogy megbizonyosodjunk róla, hogy megalapozott a riasztás:

- A mérést újból el kell végezni és az új mérést hozzáfűzni a korábbihoz (nem felülírni a korábbi).
- A korábbi mérések száma, amikhez a riasztási szint illesztve lett, elegendő?
- Megfelelő a riasztási szint értékének megadása?
- A gép valóban normál üzemállapotban volt a mérés során? Meg kell győződni a gép terheléséről és fordulatszámáról.
- A mérés helye és iránya a konfigurált mérési ponttal megegyező?

Ha valóban megalapozott a riasztás, meg kell ismerjünk a gép történetét, mi történt, mi változott a legutóbbi mérés óta, és analízist kell végeznünk.

Riasztási státuszok színek kódjai a Trendline struktúrában:

- fehér négyzet: nincs riasztási küszöb beállítva
- zöld négyzet: riasztási küszöb beállítva, de a mért érték nem haladja meg
- sárga négyzet: előriasztás lépett fel
- piros négyzet: főriasztás lépett fel

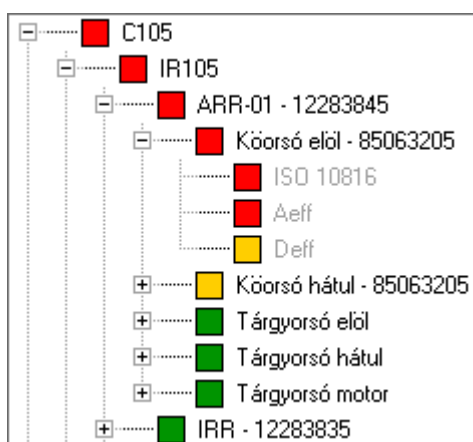
A riasztási szint színek kódja mindig a legutolsó mérés értékéről ad visszajelzést. Tehát ha volt egy riasztás, de utána gépjavítás történt, és a következő mérés során már határérték alatti értéket mérünk, a struktúrában a szín újra zöld lesz.

Name Támhenger billeno hátul					
Info Allgemeine Einstellungen Messdaten					
Grafik Messwerte					
Datum	Ermittelte Drehzahl/ U/min	ISO 10816/ mm/s	Hauptalarm/ mm/s	Voralarm/ %	
13.08.2014 12:58:18	1035,00	1,22	1,80	75,00	
30.07.2014 12:37:26	1035,00	2,15	1,80	75,00	
24.07.2014 14:10:26	1035,00	1,41	1,80	75,00	
17.07.2014 13:04:36	1035,00	1,23	1,80	75,00	
09.07.2014 12:47:46	1035,00	1,26	1,80	75,00	
26.06.2014 14:50:54	1035,00	0,46	1,80	75,00	

 Támhenger billeno hátul

10.44 ábra: A mérési pont színek kódja a legutolsó mért érték szerint

A struktúrában az egyes szintek aszerint lesznek ábrázolva, ami az adott szint alatti szint legmagasabb színek kódja. Ahogy az alábbi ábrán is látszik, az ARR-01 típusú gép köszörű orsóján mért sebesség (ISO) és gyorsulás érték is meghaladta a főriasztási küszöböt, hiába a többi mérési pont jelzés alatti, a gép szintje, emiatt a gyártó sori szint és a gyártó cella szintje is piros jelzést kapott.



10.45 ábra: Riasztási színekódok a struktúrában

Ez a riasztási színekód (a fehér és a zöld kivételével) az adattáblázatban az adott mutató számnál is megjelenik. Emellett tájékoztatást kapunk, hogy egy méréshez lett-e mentve időjel és spektrum. A félkövérrel írt sorokhoz tartozik időjel, a normál karaktervastagságúakhoz viszont csak a kiszámított RMS (Root Main Square) érték tartozik.

Anzahl Mittelungen	FFT-Linien	Zeitsignal speichern	Tiefpass
Zeitsignal Geschw. 1	1600	Bei Hauptalarm	1000

Datum	Ermittelte Drehzahl/ U/min	ISO 10816/ mm/s	Hauptalarm/ mm/s	Voralarm/ %
13.08.2014 12:59:56	925,00	6,17	1,80	75,00
30.07.2014 12:43:22	925,00	6,51	1,80	75,00
24.07.2014 14:16:39	925,00	1,75	1,80	75,00
17.07.2014 13:06:06	925,00	6,38	1,80	75,00
09.07.2014 12:50:05	925,00	8,06	1,80	75,00
09.07.2014 12:49:07	925,00	7,41	1,80	75,00
26.06.2014 14:51:57	925,00	0,95	1,80	75,00

10.46 ábra: Példa egy csak főriasztásnál mentett időjel beállításra

10.1.6. Rezgésmérés különböző géphibák esetén

10.1.6.1. Kiegyensúlyozatlanság

A konfigurációt itt is, mint minden más esetben úgy kell létrehozni, hogy az adott géphibának jellemzőit lássuk az időjelen és a spektrumon. Helyes konfiguráció esetén ha valóban fennáll a gyanított géphiba, akkor ennek speciális jellemzőit fogjuk látni az analízis során.

Kiegyensúlyozatlanságnál a specifikus frekvencia a fordulati frekvencia.

A tipikus jellemzők: az időjel szinusz formájú, a spektrumban a csúcspont a fordulati frekvenciára esik.



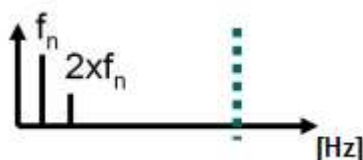
10.47 ábra: Kiegyensúlyozatlanság jellemző spektrumképe

Forrás: [2]

10.1.6.2. Elhajlott tengely

Specifikus frekvenciák: axiális irányban mért fordulati frekvencia

Tipikus jellemzők: fordulati és kétszeres fordulati frekvencia axiális irányban mérve.



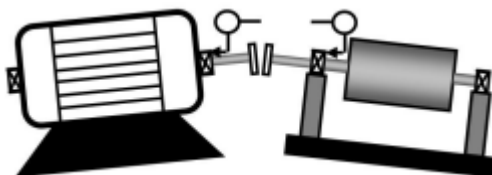
10.48 ábra: Elhajlott tengely jellemző spektrumképe

Forrás: [2]

10.1.6.3. Tengelykapcsolók (egytengelyűségi hibák)

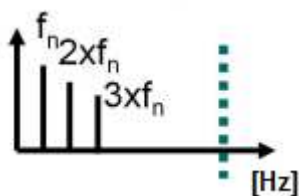
Két hibatípus lehetséges: szögeltérés és párhuzam eltérés

Szögeltérés esetén:



10.49 ábra: Szögeltérési hiba

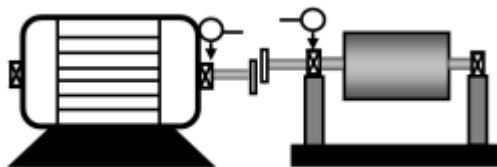
Forrás: [2]



10.50 ábra: Szögeltérési hiba spektrumképe

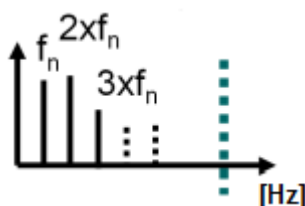
Forrás: [2]

Párhuzam eltérés esetén:



10.51 ábra: Párhuzamhiba

Forrás: [2]



10.52 ábra: Párhuzamhiba spektrumképe

Forrás: [2]

Tengelykapcsoló konfiguráció:

Specifikus frekvenciák: fordulati frekvencia és ezek harmonikusai

Tipikus jellemzők:

Szögeltérésnél:

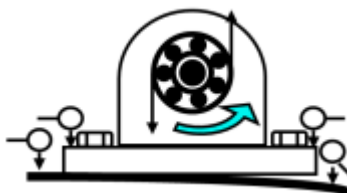
Spektrum: magas axiális rezgés az egyszeres és kétszeres fordulati frekvencián

Párhuzamhibánál:

Spektrum: magas radiális rezgés az egyszeres és kétszeres fordulati frekvencián, a kétszeres fordulati frekvencia dominál, de nagyobb mértékű hiba esetén többszörös harmonikusok is megjelennek.

10.1.6.4. Laza vagy elégtelen rögzítettség

1. Hibatípus: Egyenetlen gépágy vagy gépegység talp



10.53 ábra: Egyenetlen gépágy

Forrás: [2]

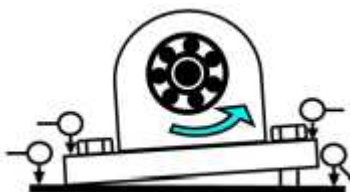
Spektrum: jelentős különbségek horizontális és vertikális irányban



10.54 ábra: Egyenetlen gépágy spektrumképe

Forrás: [2]

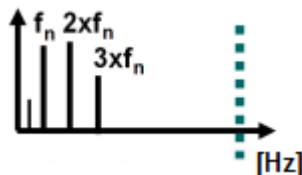
2. Hibatípus: Laza rögzítettség



10.55 ábra: Laza rögzítettség

Forrás: [2]

Spektrum: jelentős különbségek horizontális és vertikális irányban



10.56 ábra: Laza rögzítettség spektrumképe

Forrás: [2]

3. hibatípus: Alkatrészek laza illesztése (A gépelem lazán illesztve a tengelyre, laza csapágyazás, túl nagy csapágyhézag, lazán illesztett szíjtárcsa)

Spektrum: a sebesség- / gyorsulásfüggvényben sok harmonikus jelenik meg, akár a fordulati frekvencia felénél, harmadánál is. Jelentős amplitúdó különbségek az egyes mérések között.



10.57 ábra: Lazán illesztett alkatrészek spektrumképe

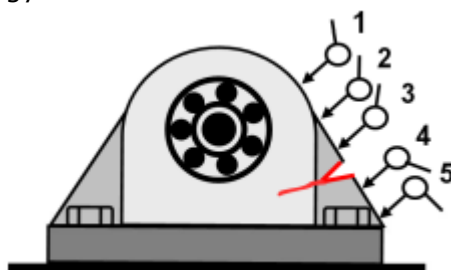
Forrás: [2]



10.58 ábra: Laza szíjtárcsa valós spektrumképe

Forrás: [2]

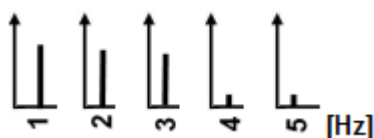
4. Hibatípus: Repedés a csapágyházon



10.59 ábra: Repedés a csapágyházon

Forrás: [2]

Spektrum: fordulati frekvencia harmonikusaival. Különböző pontokon mérve nagy különbségek figyelhetők meg. Az amplitúdó csúcsok a fordulati frekvenciára esnek, de különböző mérési pontokon mért nagyságuk a repedés helyétől függően különböznek.



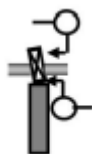
10.60 ábra: Csapágyház repedés spektrumképei

Specifikus frekvenciák: fordulati frekvencia és ennek harmonikusai.

Tipikus jellemzők: Időjelben „W” vagy „M” forma fordulhat elő.

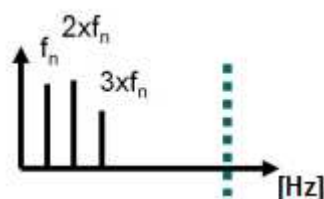
5. Hibatípus: csapágyak további problémái

Csapágyszerelési hiba



10.61 ábra: Csapágyyszerelési hiba

Forrás: [2]

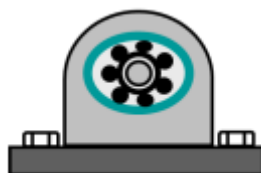


10.62 ábra: Csapágszerelési hiba sebesség/gyorsulás spektrumképe

Forrás: [2]

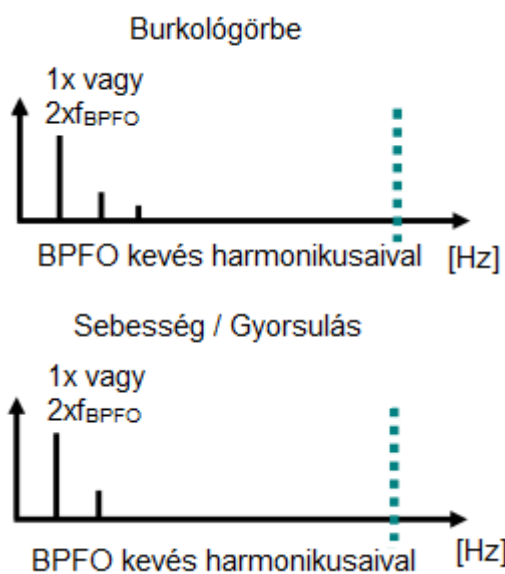
Spektrum: axiálisan mérve a sebesség / gyorsulás függvényben fordulati frekvencia és ennek harmonikusai, de egyenetlen amplitúdó nagysággal.

Csapágyház kör alakhibája, külső gyűrű deformáció



10.63 ábra: Csapágyház hiba

Forrás: [2]

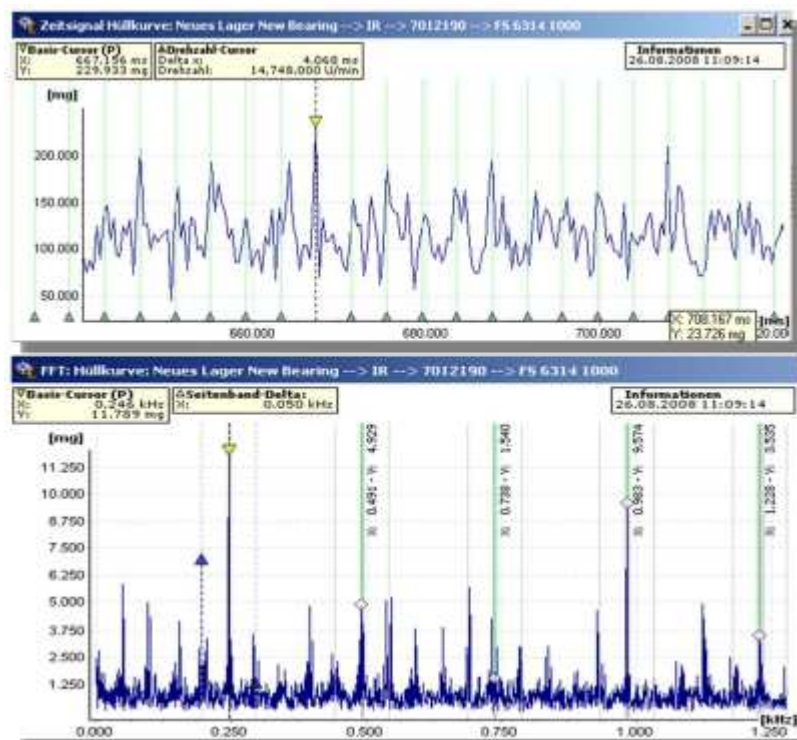


10.64 ábra: Csapágyház hiba spektrum képei

Forrás: [2]

Egy új csapágy befutása

Spektrum: BPFI harmonikusokkal és a fordulati frekvenciával megegyező oldalvonalakkal. A spektrum képe hasonló egy belső gyűrű károsodás spektrumképhez, de kisebb amplitúdóval, és a harmonikusok és oldalvonalak közti amplitúdó különbség is kisebb.



10.65 ábra: Új csapágy burkológörbe időjele és spektruma

Forrás: [2]

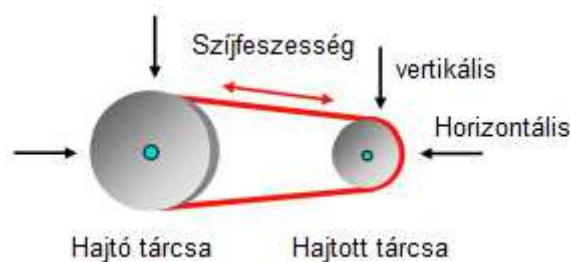
Konfiguráció csapágyak további problémáira:

Specifikus frekvenciák: kinematikus átgördülési frekvenciák és harmonikusai , fordulati frekvencia és harmonikusai

Tipikus jellemzők:

- kinematikus átgördülési frekvenciák és harmonikusai
- a hiba helyétől függően akár oldalvonalakkal is
- a károsodás előrehaladtától függően lesznek láthatók a jellemzők a különböző jelfeldolgozási spektrumokban (sebesség/gyorsulás, burkológörbe).

10.1.6.5. Szíjhajtás



10.66 ábra: Szíjhajtás

Forrás: [2]

Mérési irányok: szíjkesztéssel párhuzamosan, vízszintes irányban és merőleges irányban, függőlegesen.

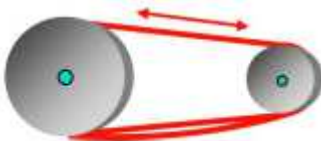
A szíjhatások kinematikus frekvenciája a szíjfrekvencia: FBF

$$FBF = (n \cdot \text{szíjtárcsa fordulati frekvencia} \cdot \text{szíjtárcsa átmérő}) / \text{szíjhossz}$$

Az FBF kisebb, mint a tengelyek (hajtó és hajtott) fordulati frekvenciája.

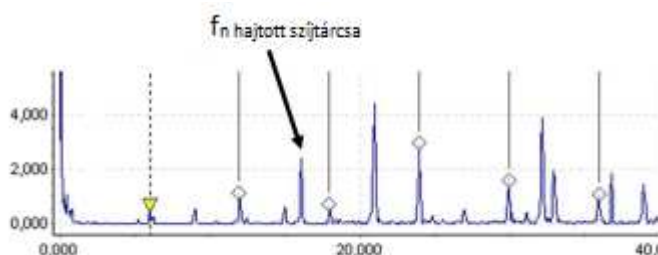
Szíjhajtások hibatípusai:

1. Nem megfelelően beállított szíjkesztés, kopott szíj,



10.67 ábra: Nem megfelelő szíjkesztés

Forrás: [2]



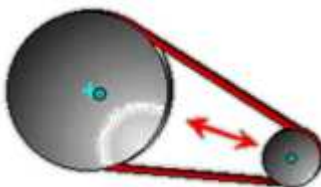
10.68 ábra: Szíjkesztés hiba spektrumképe

Forrás: [2]

Spektrum: a szíjhajtásra merőleges és axiális irányban mért rezgésnél tagolt, kis amplitúdók. Szíjknál párhuzamos irányban FBF szíjfrekvencia.

Időjel: Egy szíjtárcsa fordulati frekvenciája és az FBF harmonikusa szorosan együtt jelentkezik és kilengést okoz.

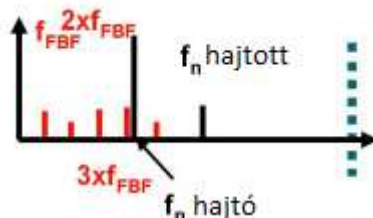
2. Excentricitás a szíjtárcsán



10.69 ábra: Szíjtárcsa excentricitás

Forrás: [2]

Oka: szíjtárcsa szennyeződés vagy kopás a szíjtárcsa futó pályáján.



10.70 ábra: Szíjtárcsa excentricitás spektrumképe

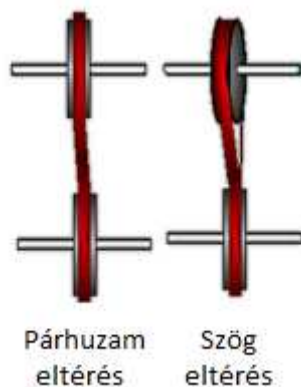
Forrás: [2]

Spektrum: magas amplitúdó az excentrikus szíjtárcsa egyszeres fordulati frekvenciáján

Rezgés: merőleges és axiális irányban mérve tagolt, kis amplitúdók.

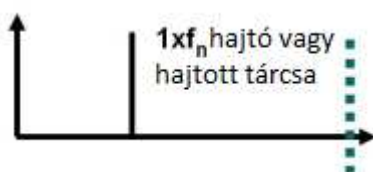
Időjel: Egy szíjtárcsa fordulati frekvenciája és az FBF harmonikusa szorosan együtt jelentkezik és kilengést okoz.

3. Párhuzamfutási hiba



10.71 ábra: Párhuzamfutási hiba

Forrás: [2]

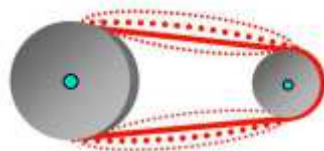


10.72 ábra: Párhuzamfutás hiba spektrumképe

Forrás: [2]

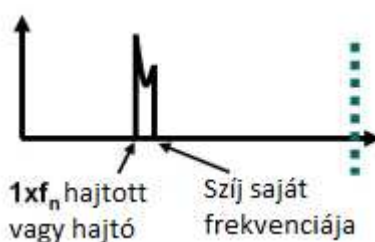
Spektrum: axiális irányban mérve az amplitúdó csúcs a hajtó vagy hajtott tárcsa egyszeres fordulati frekvenciájára esik.

4. Szíj rezonancia



10.73 ábra: Szíj rezonancia

Forrás: [2]



10.74 ábra: Szíj rezonancia spektrumképe

Forrás: [2]

Spektrum: Egy szíjtárcsa fordulati frekvenciája és a szíj sajátfrekvenciája egymás mellett közel állhat vagy akár egybe is eshet. A szíj saját frekvenciája változhat a szíjfeszítés változtatásával.

Konfiguráció szíjhajtásra:

Specifikus frekvenciák: szíjfrekvencia és harmonikusai, hajtott és hajtó szíjtárcsa fordulati frekvenciája.

Tipikus jellemzők: kétszeres és négyszeres FBF amplitúdója gyakran magasabb, mint az egyszeres FBF (szíjfrekvencia)

Különböző amplitúdók jelennek meg attól függően, hogy párhuzamos vagy merőleges a mérés iránya.

10.1.6.6. Fogaskerék hajtómű

Hajtómű hibák: helyi sérülés (elkopott vagy hiányzó fog), excentricitás és nagy foghézag, párhuzamhiba, gyártási hiba, csapágyazás sérülése.

Egy hajtómű tipikus frekvenciája: ZEF (fogérintési frekvencia)

$$ZEF = z_1 \cdot f_{n1} = z_2 \cdot f_{n2}, \text{ ahol}$$

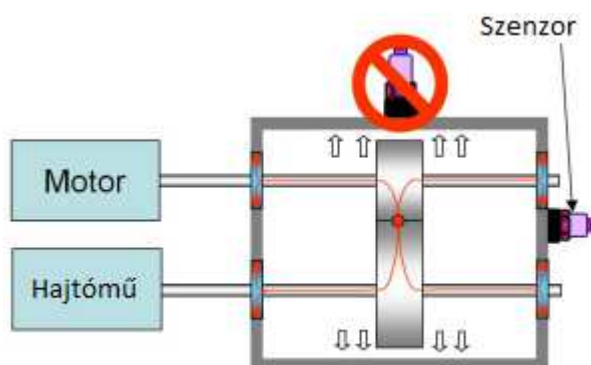
z : fogszám

f_n : fordulati frekvencia

Oldalvonal frekvenciák: f_{n1} vagy f_{n2}

Többlépcsős áttételű fogaskerék hajtóművek esetében minden egyes áttételnél számolni kell a ZEF értéket (fogérintési frekvenciát) illetve minden tengely fordulatszámát.

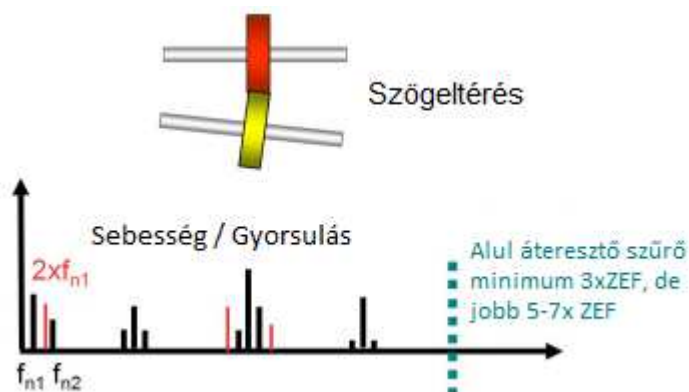
Felügyelt frekvenciák: ZEF oldalvonalakkal, csapágy átgördülési frekvenciák, fordulati frekvenciák.



10.75 ábra: Szenzor elhelyezése a hajtómű házon

Forrás: [2]

1. Szögeltérési hiba



10.76 ábra: Szögeltérési hiba sebesség és gyorsulás spektrumképe

Forrás: [2]

A kétszeres és háromszoros ZEF amplitúdója magasabb, mint az egyszeres ZEF. Az oldalvonalak $2xf_n$ mértékűek is lehetnek és az oldalvonalak amplitúdója jobb és bal oldalt eltérő magasságúak is lehetnek.



10.77 ábra: Szögeltérési hiba burkológörbe spektrumképe

Forrás: [2]

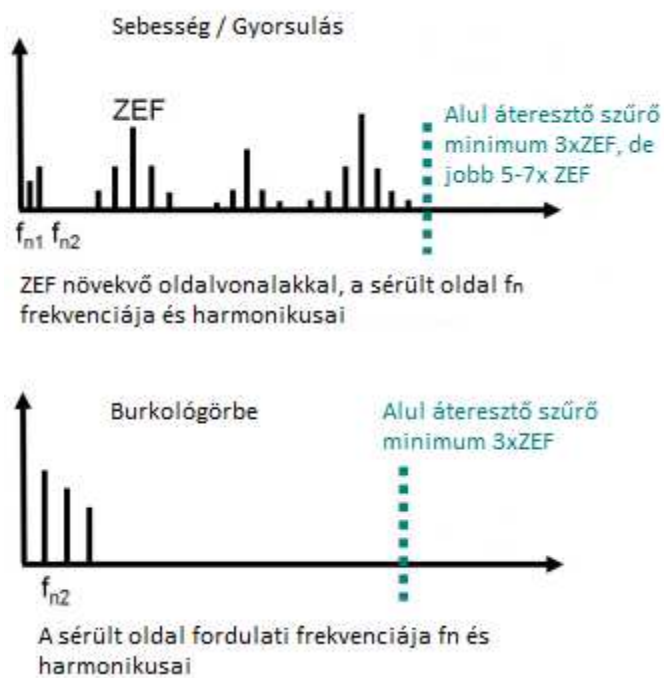
Vigyázni kell analízis során, mert ezek a spektrumképek nem biztos, hogy fogaskerekek szöghibáiból következnek. Rezonancia, tengelykapcsoló hiba, vagy túl puha talapzat is hasonló képet mutathat.

2. Egy fog sérülés



10.78 ábra: Egy fog sérülés

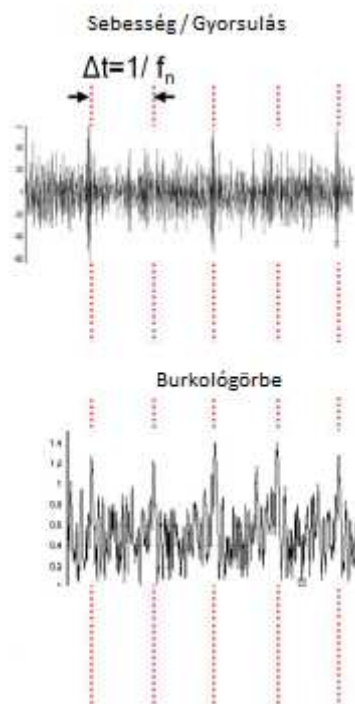
Forrás: [2]



10.79 ábra: Egy fog sérülés spektrumképe

Forrás: [2]

Löketimpulzusok f_n távolsággal



10.80 ábra: Egy fog sérülés időjelképe

Forrás: [2]

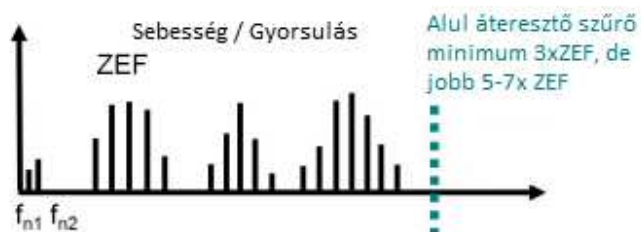
Ha egy (csak egy) fog sérült, a fogérintési frekvenciát és a sérült fogaskerék fordulati frekvenciáját oldalvonalakként látjuk. Ha két különböző kerületi sebességű (átmérőjű) fogaskerékről van szó, pontosan megállapítható, hogy a kettő közül melyik sérült.

3. Több fog sérülés

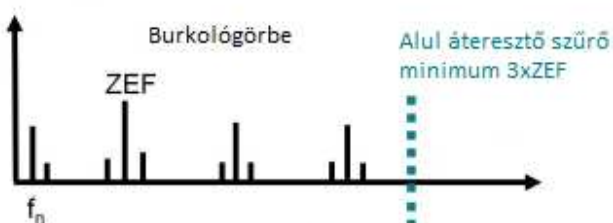


10.81 ábra: Több fog sérülés

Forrás: [2]



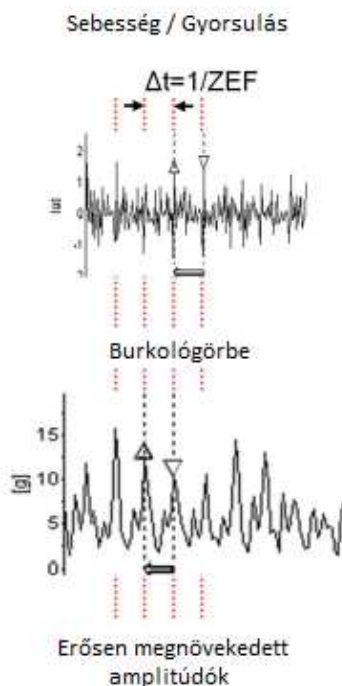
ZEF magas oldalvonalakkal, f_n sérült oldali frekvencia és harmonikusai, ZEF az oldalvonalakhoz képest alacsonyak lehetnek, teljesen körbefutó sérülés esetén a ZEF egész számú osztása a fogszám egész számú osztásaként is jelentkezhet.



Fordulati frekvencia f_n a sérült oldal harmonikusaival, ZEF harmonikusokkal és a sérült oldal f_n oldalvonalakkal.

10.82 ábra: Több fog sérülés spektrumképe

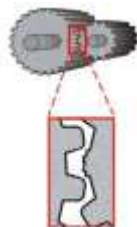
Forrás: [2]



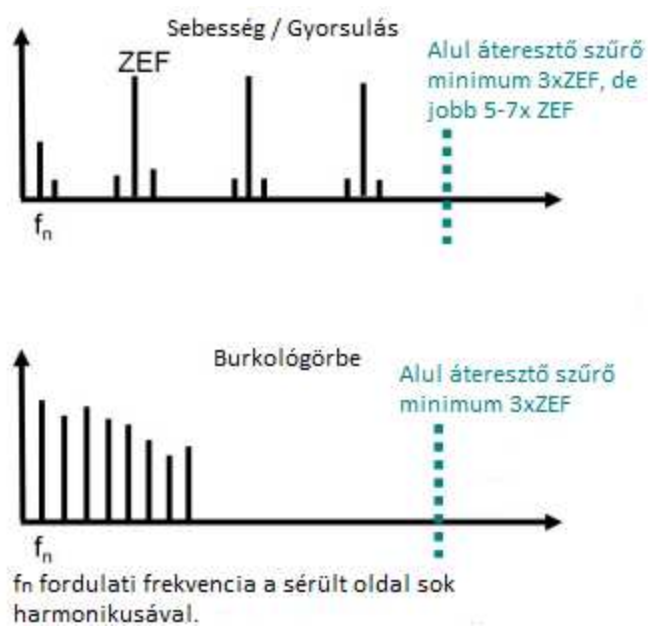
10.83: ábra: Több fog sérülés időjelképe

Forrás: [2]

4. Törött fog



10.84 ábra: Törött fog



10.85 ábra: Törött fog spektrumképe

Forrás: [2]



10.86 ábra: Törött fog időjelképe

Forrás: [2]

Konfiguráció fogaskerekes hajtóműre:

Specifikus frekvenciák: tengelyek fordulati frekvenciái, csapágyazás átgördülési frekvenciái, az egyes kapcsolatok fogérintési frekvenciája.

Tipikus jellemzők: Csapágy: a csapágyaknál leírva. Fogak: ZEF és harmonikusai a ZEF hétszereséig fordulati frekvencia mértékű oldalvonalakkal.

A spektrumban a jellemzők a károsodás előrehaladtától függően látszanak.

	Állapot	v / a függvény	d burkológörbe
Hajtómű	jó	A ZEF oldalvonal csúcs aránya nem emelkedik	
	kezdődő károsodás	A ZEF oldalvonal csúcs aránya emelkedik	A sérült oldal fordulati frekvenciája és harmonikusai
	előrehaladott vagy végső meghibásodás	Az oldalvonalak, a harmonikusok száma és a trend emelkedik	ZEF csúcsok és oldalvonalak harmonikusokkal. Trend emelkedik

10.87 ábra: Hajtómű állapot táblázata

Forrás: [2]

10.2. Online rezgésmérés

Az online rezgésmérés nagy mértékben hasonlít az offline-hoz. A konfiguráció szinte teljes egészében megegyezik a Trendline-nál tanultakkal. Az online rezgésmérés mérő szenzora az FAGSmartCheck gyorsulásszenzor, a feldolgozó program a SmartUtility különféle kiegészítő programokkal.



10. 88 ábra: A SmartUtility kezdő felülete

Forrás: [3]

10.2.1. A SmartUtility bemutatása

A program nyelve, ahogy a Trendline-é is német. A főbb funkciók a következők:

„Geräte öffnen” – szenzor megnyitása IP cím alapján

„Daten herunterladen” – szenzor méréseit lehet letölteni visszamenőleg (webes felület)

„Daten analysieren” – szenzor visszamenőleges mért adatainak letöltésére szolgál, de nem webes felületen jelenik meg, hanem egy beépülő program nyílik meg, ahol több lehetőség van analizálásra.

„Geräteeinstellungen bearbeiten” – a szenzor beállításainak módosítására szolgál

Ezek a főbb funkciók, de a „Weitere Aktionen” menüponttal több egyéb funkció is elérhető.

10.2.2. A szenzor bemutatása



10. 89 ábra: A szenzor és kezelőelemei

Forrás: [3]

Összesen 4 LED van a szenzoron:

- Státusz jelző: zöld / sárga / piros
- nyomógomb megnyomás jelző: zöld
- Ethernet csatlakozás visszajelző: kék
- RS485 csatlakozás visszajelző: kék

A szenzorba a gyorsulás szenzoron kívül egy hőmérséklet szenzor is van beépítve.

A szenzor tulajdonságai:

- rezgésszenzor:

tartomány: ± 50 g

Piezzo-szenzor 0,8 Hz – 10 kHz

szenzorérzékenység: 25 mV/g

ellátás: 2,5 V DC

- hőmérsékletszenzor

tartomány: - 20 °C-tól 70°C-ig.

felbontás: 1 °C

pontosság: 2 °C

- Be-/kimenetek

2 analóg bemenet (0-10/24V 0/4-20mA) a fordulatszámjel, terhelés, áramerősség stb. feldolgozására

1 digitális bemenet (0-30V) pl. a fordulatszámjelhez vagy a gép be- vagy kikapcsolt állapotához.

1 analóg kimenet (0-10V 0/4-20mA) pl. riasztási állapot jelzéshez

1 kapcsolt kimenet (max. 28V max. 1A) riasztás kiadásához szirénára vagy fényjelzésre (ezek az eszközök nincsenek benne az alapsomagban)

- ellátás:

áramellátás: 8 pólusú 10V – 24V

RS485

Ethernet: 4 pólusú 100 Mb/s

Mivel a szenzor ethernet kábelén keresztül kommunikál egy PC-vel vagy egy hálózattal, IP cím kiosztás szükséges. Feltétel, hogy a számítógép és a szenzor egy tartományban legyen.

Kezelés: ahhoz, hogy a nyomógombok használhatóak legyenek, a billentyűzárát fel kell oldani. Ezt úgy lehet megtenni, hogy a RESET gomb megnyomása után 2 másodpercen belül a TEACH gombot is lenyomjuk, A két gomb közti LED a sikeres feloldáskor felvillan. 2 perc után a billentyűk automatikusan visszazáródnak.

A gombok funkciói:

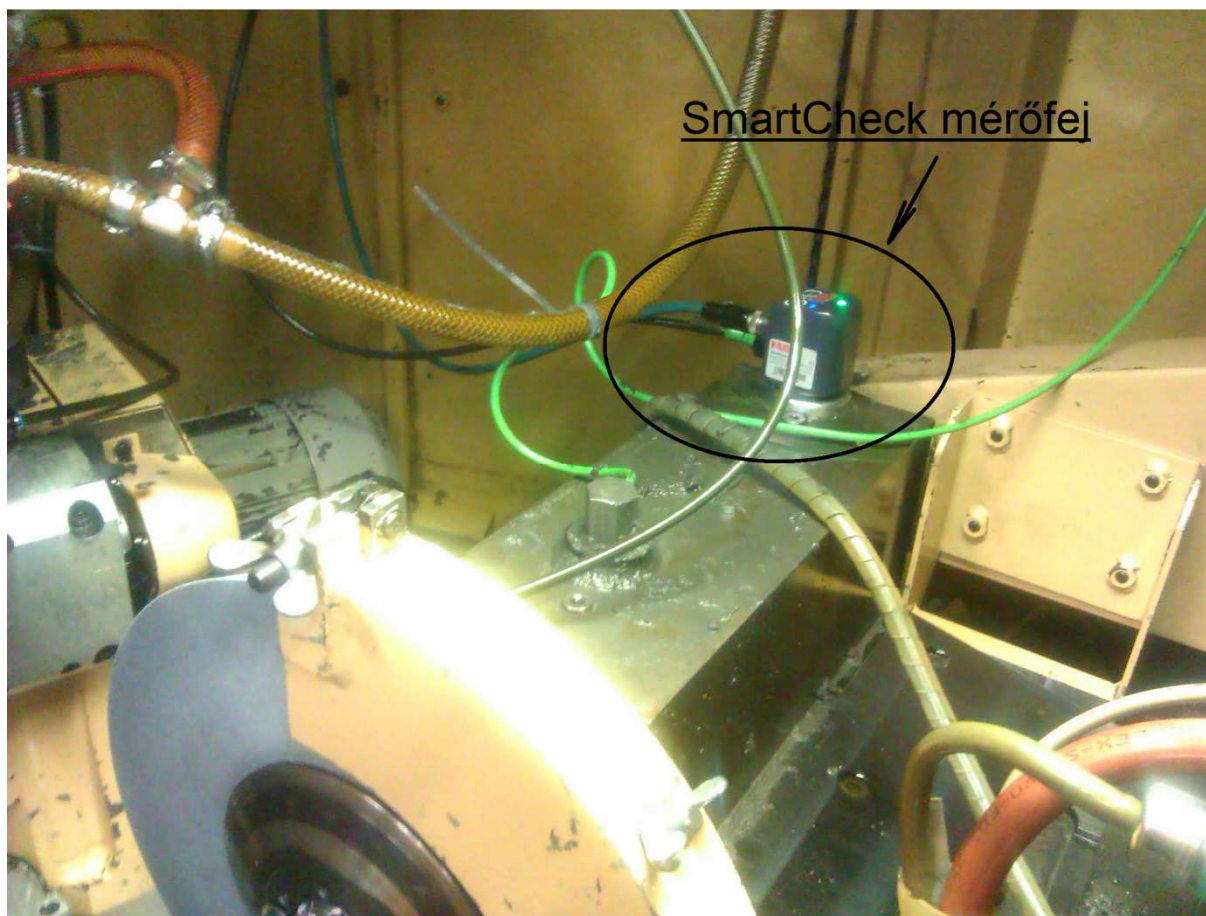
RESET: 10 másodpercnél hosszabb nyomva tartás esetén újraindul a készülék

2 másodpercnél hosszabb nyomva tartáskor az aktuális riasztás visszaáll (nem lesz tovább riasztási státuszban a készülék)

TEACH: 5 másodpercnél hosszabb nyomva tartás esetén a tanulási mód elindul

A szenzor felszerelése:

2 módon szerelhetünk fel egy szenzort egy mérési pontra: vagy egy M6-os furatot fúrunk a mérendő gépegységre és csavarral rögzítjük a szenzort, vagy egy kétsínes adaptert alkalmazva rögzítjük a mérendő ponton. Természetesen mindkét esetben tiszta felületet kell biztosítanunk.

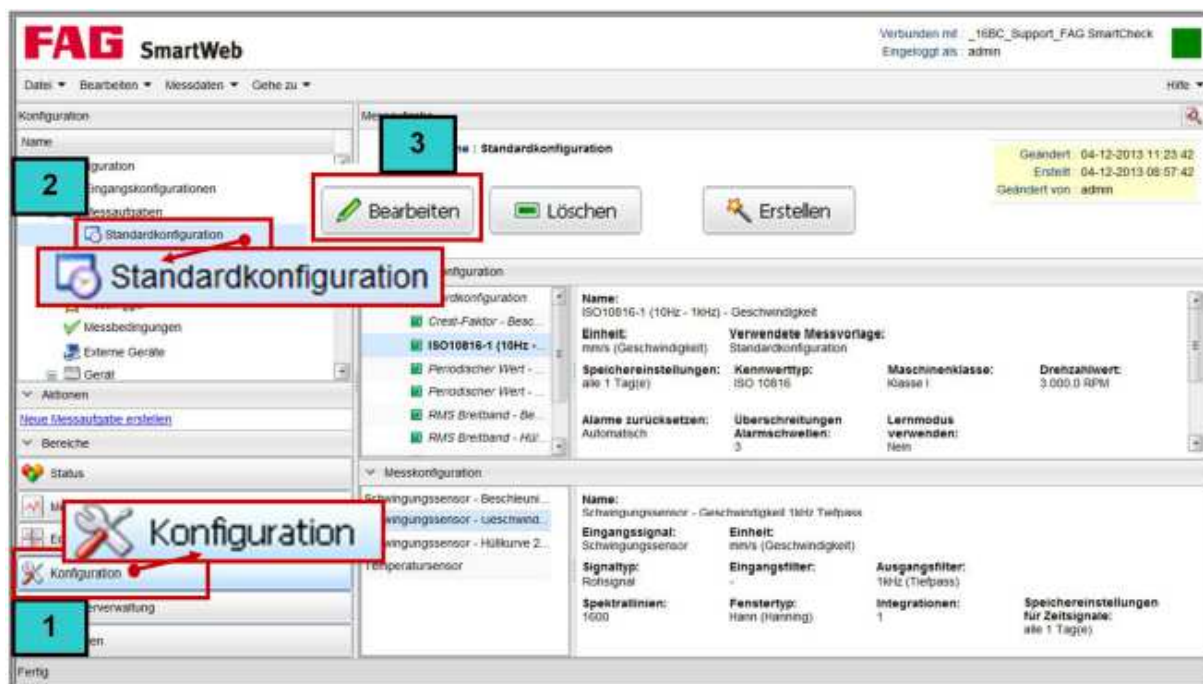


10.90 ábra: Felszerelt SmartCheck szenzor egy támfelület köszörű gép köszörű orsójára

10.2.3. A SmartCheck használata

10.2.3.1. A SmartWeb

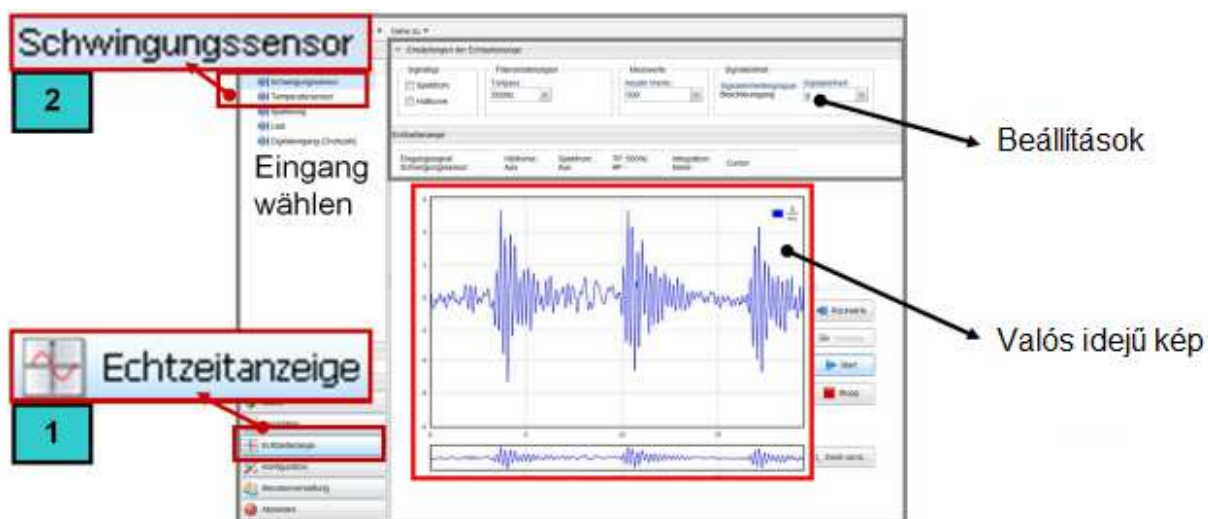
Miután minden szükséges ellátást biztosítottunk a szenzornak, és IP-címmel összekapcsoltuk a hálózattal, a SmartUtility indítását követően megnyitjuk a szenzort („Geräte öffnen”). Ha több szenzort (különböző mérési pontokon) alkalmazunk, akkor a listából kiválaszthatjuk, amelyik adataira éppen szükségünk van. Megadjuk a mappa elérési útját ahová a konfigurációt és a mért adatokat mentjük. Miután ezzel is végeztünk, megjelenik a webes felület, ahol az aktuális státuszt, mért értékeket, konfigurációs beállításokat stb. látjuk (SmartWEB felület). A későbbiekben a böngészőben egy új lap megnyitásakor a címsorba a szenzor IP címét megadva már azonnal a megadott szenzor SmartWEB felületére jutunk. A SmartWeb felületen lehetőségünk van a szenzor ill. a mérési pont konfigurálására, viszont a Trendline-nál megszokott felbontás és alul áteresztő szűrő megadása helyett ezeket egy konfigurációs aszisztens segítségével állíthatjuk be.



10.91 ábra: Standard konfigurációs ablak

Forrás: [3]

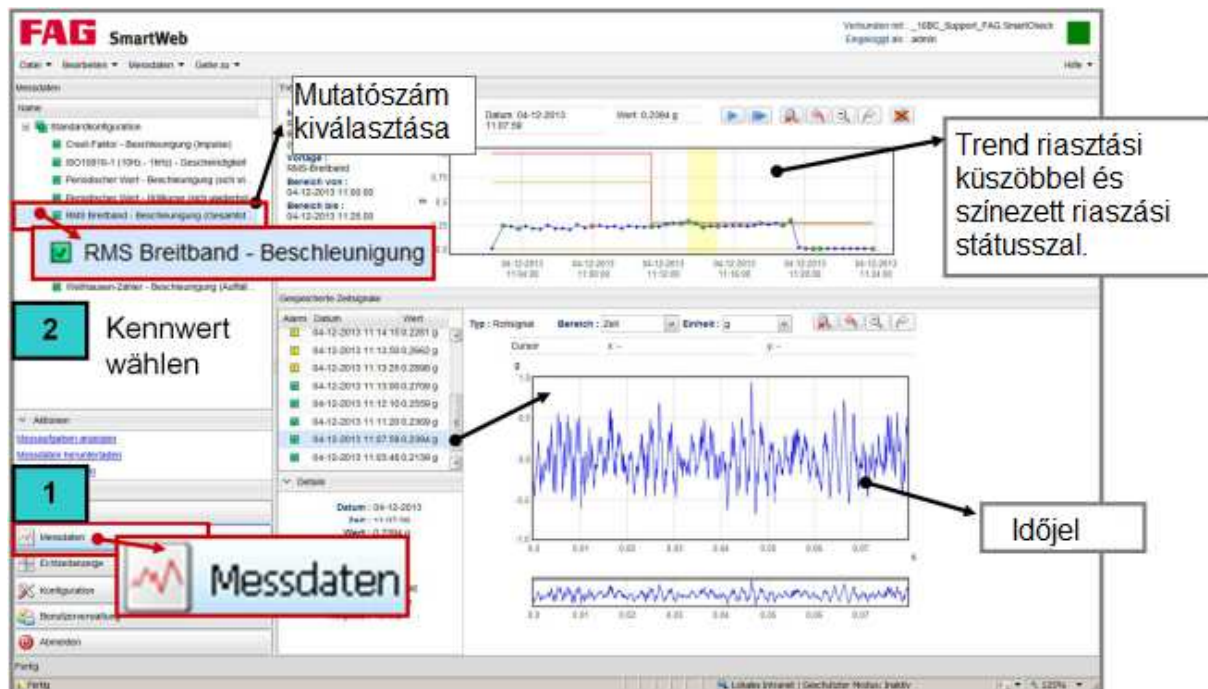
A SmartWeb felületen lehetőség van a rezgés, hőmérséklet, terhelés stb. valós idejű megjelenítésére is.



10.92 ábra: Valós idejű megjelenítés

Forrás: [3]

A „Messdaten” menüpont alatt egy mérési időponthoz tartozó adatok, időjel és spektrum nyitható meg.

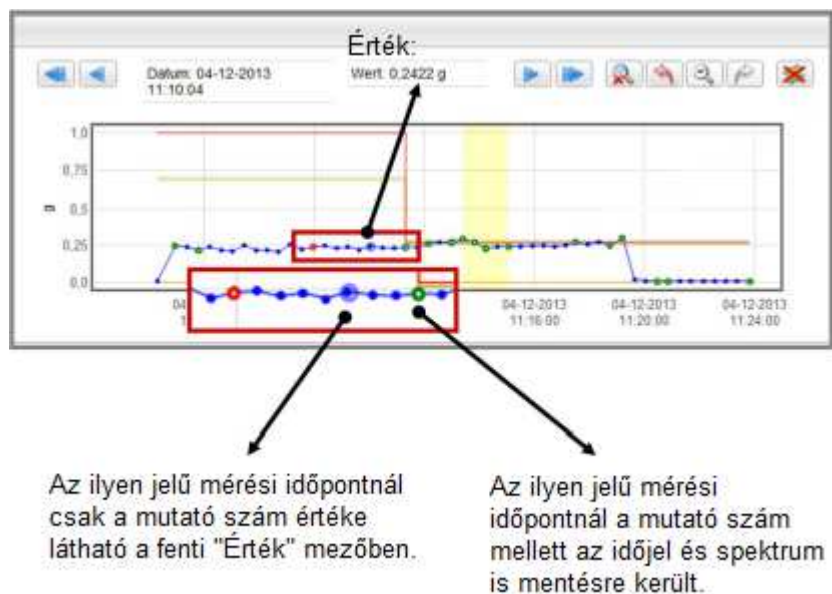


10.93 ábra: Mérési adatok megjelenítése

Forrás: [3]

Egy mutatószám megjelenítésekor az időpontok mellett a visszamenőleges trendet is láthatjuk.

Egy mérési időponthoz a mutatószám mellé nem biztos, hogy tartozik időjel és spektrum is. Ez konfiguráció függő. Lehetőség van riasztási szinthez vagy a mérések számához kötni az időjel-spektrum tárolást. A trendben ez a mérési időpontokat jelző pontokon is látszik.

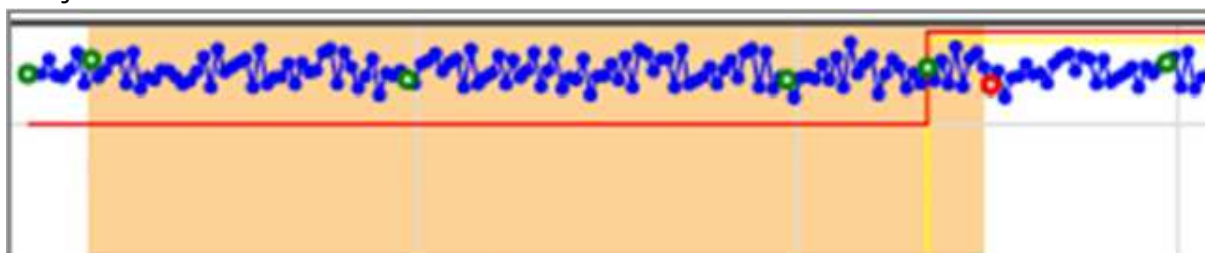


10.94 ábra: Trend ábrázolás SmartWeb-en

Forrás: [3]

10.2.3.2. Riasztási szintek és a betanítási mód

Néhány mérés után az alapesetben beállított riasztási küszöbök módosíthatók. Ennek egyik módja, hogy a trend képen a riasztási küszöb beállítása gombra kattintva előjön egy ablak, ahol a riasztási szintek eltolhatók. A másik módja az automatikus tanulási mód. Ezt a konfigurációban állíthatjuk be, ahol meg kell adni, hogy hány mérés után állítsa be a program automatikusan a riasztási szinteket. A másik lehetőség az automatikus tanulási mód aktiválásra a szenzoron lévő TEACH gomb használata. 10 másodpercnél hosszabb ideig nyomva tartva elindul a tanulási mód, amit a szenzoron lévő LED villogása jelez. A betanulási folyamat elkészülte után a trendben a riasztási szint már a módosított értékeket mutatja.



10.95 ábra: Riasztási szintek változása a tanulási mód után

Forrás: [3]

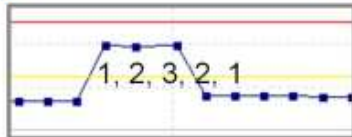
Ha a mérések során a mért érték egy riasztási szintet (előjelzés vagy főjelzés) átlép, még nem változik azonnal a státusz sárgára vagy pirosra. Egy számláló értéket kell megadni a konfigurációban. Ez az érték azt mutatja, hogy hány egymás utáni riasztási szint feletti mért eredmény után állítsa a státuszt a jelzés értéknek megfelelően. Ennek azért van jelentősége, mert egy kiugró érték még nem jelent egyértelműen géphibát. A mérés időpontjában egy befolyásoló tényező miatt is lehet egy kiugró érték. Ha a mért érték újra riasztási küszöb alatt lesz, a számláló nem nullázódik le, hanem visszaszámol. A következő ábra egy 5-re állított számláló példáját mutatja.



A riasztási küszöböt átlépve a számláló el kezd számolni, miután eléri az 5-öt, a mutatószám státusza megváltozik.



Amint a mért érték riasztási szint alá kerül, a számláló vissza felé számol, amíg újra szint fölötti nem lesz a érték.



Mivel a számláló nem érte el az 5-öt, nincs státusz módosulás.

10.96 ábra: A riasztás számláló működése

Forrás: [3]

A riasztást több féleképpen is jelzi a rendszer. A státusz sávon visszamenőlegesen látjuk a státusz fokának változásait. Emellett a szenzor LED-je is jelez a riasztási szintnek megfelelően. És a trenden is láthatjuk, hogyan változott a státusz.



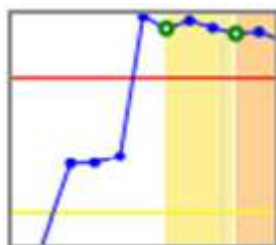
10.97 ábra: Státusz sáv

Forrás: [3]



10.98 ábra: Szenzor LED fényjelzései

Forrás: [3]

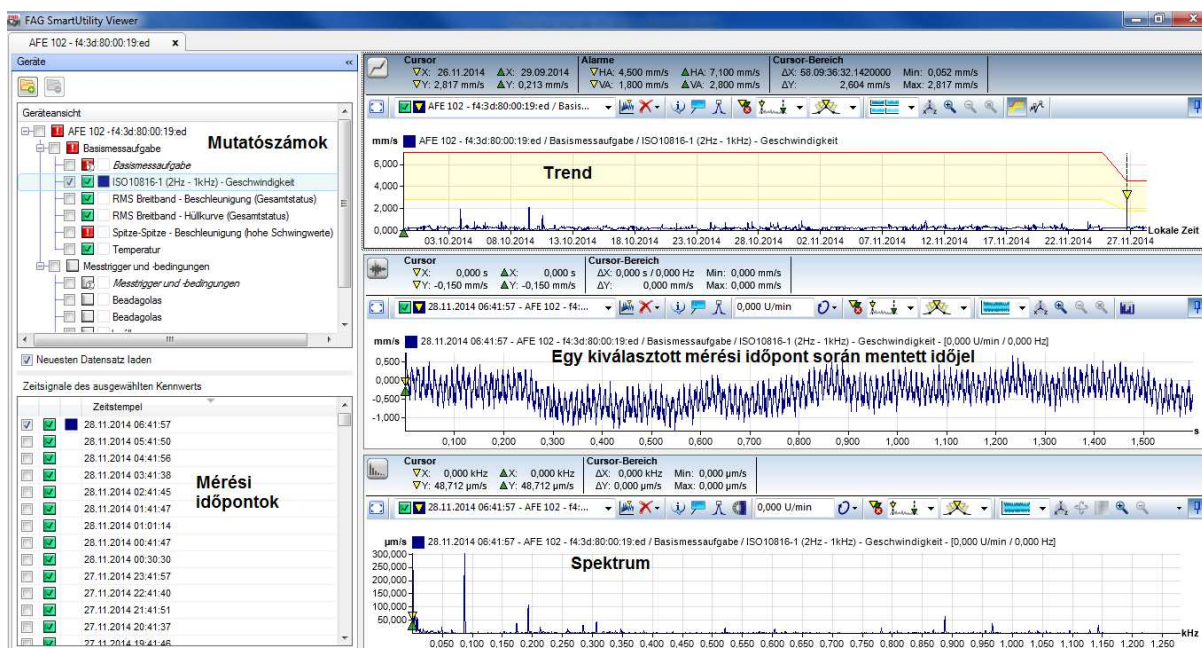


10.99 ábra: Trend színjelölései

Forrás: [3]

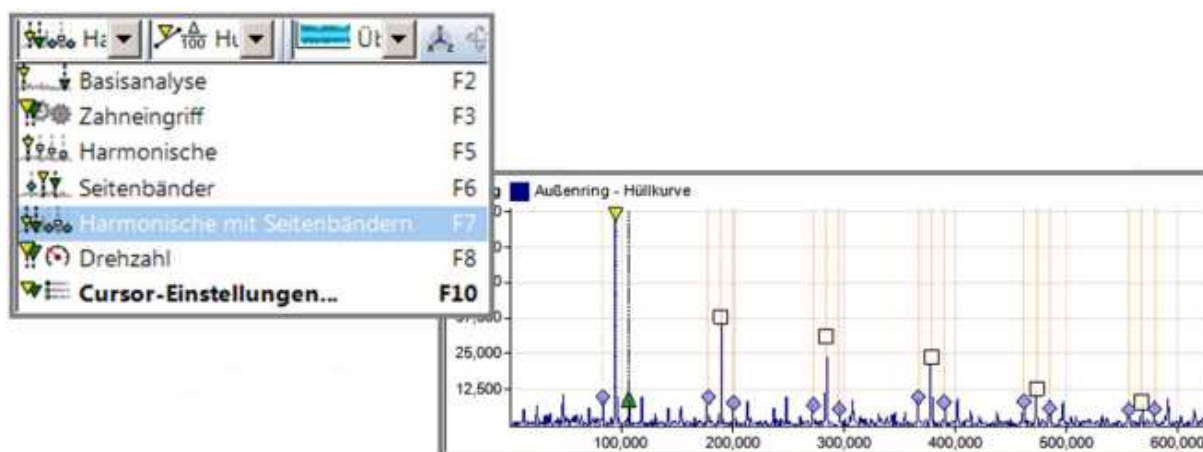
10.2.3.3. SmartViewer

Riasztást követően intézkedni kell a gép meghibásodásának elkerülése érdekében. Ehhez egy analízisre van szükség, amit a SmartViewer-rel végezhetünk a leghatékonyabban. Ez a SmartUtility-be beépülő program, ami kifejezetten időjel és spektrum analízisre szolgál. Az analízist a Detectornál tanult módon végezzük.



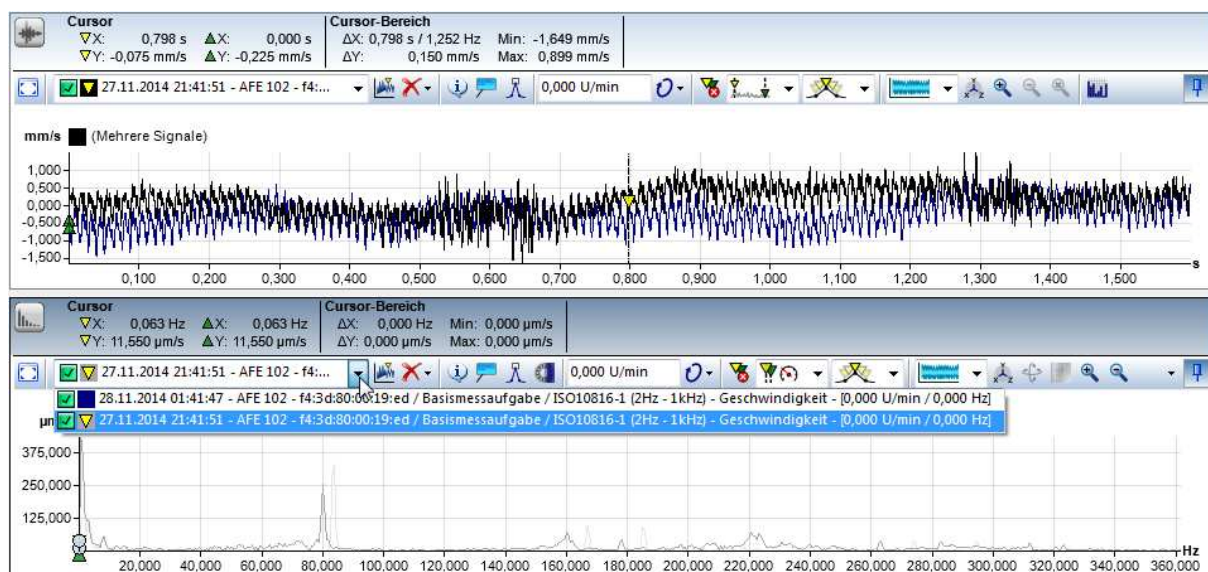
10.100 ábra: SmartViewer

A Detectornál látott eszközök a Viewerben is rendelkezésre állnak.



10.101 ábra: Példa egy spektrumra illesztett harmonikus és oldalonkurzor

Analízis során lehetőség van több mérési eredmény összehasonlítására, akár úgy, hogy egy diagramba egymásra illesztve ábrázoljuk.



10.102 ábra: Két mérés egymásra illesztése

10.2.3.4. A SmartCheck konfigurációja

A konfigurációt, miután a szenzort megnyitottuk a SmartUtility-vel, a SmartWeb-en végezzük.

A konfiguráció itt sokkal specifikusabb, mint a Trendline esetében, előre elkészített sémák állnak rendelkezésünkre, a vizsgált gépelem fajtájától függően.

Csapágyvizsgálat konfigurálásakor a konfiguráció segéd a csapágy kinematikus frekvenciáira konfigurálja a mutatószámokat.



The screenshot shows the 'Kennwertkonfiguration' (Characteristic Value Configuration) window for a bearing (Lager 6202). The window is divided into two main sections. The left section contains a list of configuration options, with 'Innenring - Hüllkurve' selected. The right section displays the configuration details for the selected option, including the name, unit, application type, and measurement template. The configuration details are as follows:

Name:	Einheit:	Lager:	Anwendungsart:	Verwendete Messvorlage:
Innenring - Hüllkurve	g (Beschleunigung)	6202 (FAG)	Stehender Innenring	Wälzlager
Speichereinstellungen:	alle 12 Stunde(n)	Kennwerttyp:	Spektral-RMS	
Normierte Fenster (bezogen auf 1 Hz / 60 RPM):				
Obere/Untere	Fenster 1	Fenster 2	Fenster 3	Fenster 4
Untere	3,7512	6,4524	13,154	17,855
Obere	6,246	11,442	16,638	21,834
Alarme zurücksetzen:	Überschreitungen	Lernmodus verwenden:		
Automatisch	Alarmschwellen:	Ja		

10.103 ábra: Mutatószám konfiguráció csapágyra

Forrás: [4]

Konfiguráció során több tényezőt is meg kell adni. Az első a bemeneti konfiguráció, ezután jön a mérési feladat megadása. A mérési feladat konfigurációjakor adjuk meg a gép osztályt, a fordulatszámot (ha nem használunk fordulatszám szenzort), azt hogy mikor legyen időjel és spektrum mentés, csapágy típus megadás és előzetes riasztási szint megadás. A legutolsó a kimeneti konfiguráció.

1. Geräteeinstellungen anpassen

Szenzorbeállítás



Wie zum Beispiel :

[Gerätename](#), [Systemzeit](#), [NTP-Server](#), [Tasten-/LED-Einstellungen](#), [Netzwerkeinstellungen](#)

Készülék, rendszeridő, szerver, nyomógomb és LED, hálózati beállítások

2. Eingangskonfigurationen bearbeiten

Bemeneti konfiguráció



Oder bearbeiten Sie :

[Schwingungssensor](#), [Temperatursensor](#), [Drehzahl](#), [Last](#), [Feste Drehzahl \(3000 RPM\)](#)

Rezgés-, hőmérséklet-, fordulatszám szenzor és terhelés konfiguráció

3. Messaufgaben erstellen

Mérési feladat létrehozása



Oder bearbeiten Sie bestehende Messaufgaben :

[Basismessaufgabe](#)

Alap mérési feladat

4. Ausgangskonfigurationen erstellen

Kimeneti konfiguráció



Oder bearbeiten Sie bestehende Ausgangskonfigurationen :

[Gesamalarmstatus](#)

Riasztási státusz konfigurálása

10.104 ábra: Konfiguráció varázsló kezdőképe

A konfiguráció varázslóban lépésről lépésre megadhatjuk a szükséges paramétereket. A szenzor beállítása után a bemenetek beállításait kell megadni, majd a mérési feladat konfiguráció következik. A támfelület köszörű gép köszörűorsójára szerelt szenzorral a csapágyazást akarjuk vizsgálni. A következőkben erre a mérési pontra készítjük el a konfigurációt. Az orsóban 4 db HSS7011 típusú csapágy van beépítve.

Name ▲	Hersteller	BPFI	BPFO	BSF	FTF (...)
HSS7011	FAG	14,1686	11,8314	5,3293	0,4551

10.105 ábra: HSS7011 csapágy kinematikus frekvenciái

Bemenet konfiguráció: a gép vezérléséből leveszünk egy analóg feszültség jelet, ami az automata folyamat adagolás fázisát feszültség formában adja vissza. Megadjuk a kapcsolási szintet és a hiszterézist. Mivel a mérés akkor hiteles, ha azonos terhelésen mérünk, tehát nem köszörülés, nem kővágás stb. közben. Olyan időpontot választunk, amikor a gép automata üzemben van és a kőorsó hátul van üresjáratban pl. adagoláskor.

Eingangskonfiguration bearbeiten

FAG SmartWeb

Name :
Beállítói üzem

Einheitengruppe :
Keine Einheit

Signal-/Sensoreinheit :
-

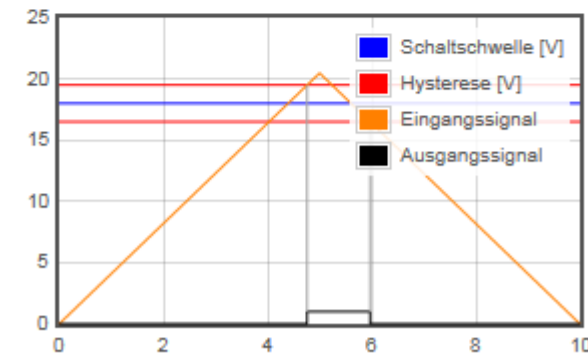
Abtaste :
25.600 Hz

☐ Invertiert

Pulse pro Umdrehung :
1

Schaltswelle [V] :
18,0

Hysteres [V] :
3,0



OK Abbrechen

10.106 ábra: Bemenet beállítás

A mérési feltétel beállítása: Az előző lépésben definiáltunk egy bemeneti csatornát, ami a vezérlésből egy analóg feszültség jel alapján figyeli az automata üzem közben azt a lépést, amikor a mérést el lehet végezni. Ezt a bemenetet adjuk meg a mérési feltétel beállításánál. A bemeneti csatorna egy 1-es (mérés végezhető) vagy 0-s (mérés nem végezhető) értékkel tér vissza. Egy mentési periódus is megadható, ami alapján visszakövethető, hogy mely időpontban állt rendelkezésre a méréshez szükséges feltétel. A mi esetünkben ez a visszatekintés nem fontos, hiszen csapágy rezgés vizsgálat során a rezgésértékek trendjét figyeljük, nem pedig a munka ütemeket.

Messbedingung bearbeiten

FAG SmartWeb

Name :
Beállítói

Eingangskanal :
Beállítói üzem

Einheit :
- (Keine Einheit)

Berechnungsart :
Gleichanteil

Messwerte[1-17500] :
20

Unterer Grenzwert [0,0-0,99] :
0,0

Oberer Grenzwert [0,01-1,0] :
1,0

Speicherperiode :
5 Minute(n)

OK Abbrechen

10.107 ábra: Mérési feltétel megadása

A mérési feladat konfigurációt 5 lépésben végezzük a varázsló segítségével:

Schritte

- 1: Bauteil auswählen
- 2: Details zum Wälzlager angeben
- 3: Speichereinstellungen / Trigger und Bedingungen
- 4: Zusatzsignale
- 5: Alarmer einstellen

10.108 ábra: Lépések



1. Gépelem kiválasztása: gördülő csapágó

Bauteilvorlage :
Wälzlager
Beschreibung :
Bauteilvorlage für Wälzlager

10.109 ábra: 1. lépés

2. Gördülő csapágó adatai: típus: HSS7011, külső gyűrű áll, fordulatszám definiálás 12.000 min^{-1} .

Name des Wälzlagers :
HSS7011
Lagertyp :
HSS7011-C-T-P4S (FAG)
Feststehender Lagerring :
☒ Außenring
☐ Innenring
Schwingungssignal :
Schwingungssensor
Drehzahlssignal :
Körsó fordulatszám

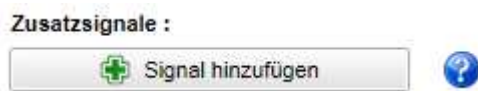
10.110 ábra: 2. lépés

3. Érték és időjel tárolás: 30 percenként mér, de csak óránként ment a mért értékhez időjelet. Lehetőség van mind a mérés, mind az időjel tárolás esetében az „immer”, azaz mindig kiválasztására is. A legsűrűbb mintavétel 50 másodperc, tehát a mindig esetében 50 másodpercenként mér egyet. De ebben az esetben nekünk most elég, ha fél óránként mér és minden második méréshez van időjel is. Normál használat esetén (ha nincs karambol) a csapágó kifutás nem egyik percről a másikra történik.

Speichereinstellungen für Trends :
30 Minute(n)
Speichereinstellungen für Zeitsignale :
1 Stunde(n)
Immer
Nie
Minute(n)
Stunde(n)
Tag(e)
Trigger und Zeittr
Zeittr
Zeitbedingung
Messtrigger
Messbedingungen

10.111 ábra: 3. lépés

4. Itt lehet megadni egy esetleg plusz szenzor (nem csak rezgés) bejövő jelét, ha szükséges. Ebben az esetben nem szükséges.



10.112 ábra: 4. lépés

5. Riasztási küszöbök megadása: utolsó lépésben a riasztási határértékeket (elő és fő riasztás) adhatjuk meg. De javasolt – amíg nincsenek tapasztalati értékeink – az alapbeállítások megtartása és a későbbiekben egy manuális vagy egy automatikus (betanulási mód) riasztási szint módosítást elvégezni.

Variable Alarmschwellen :

☐ Alarmschwellen abhängig von anderen Signalen ändern



Alarmerücksetzen :

☒ Automatisch ☐ Manuell



Alarmeinstellungen :

☐ Gleiche Alarmeinstellungen für alle Kennwerte



☒ Alarmeinstellungen für jeden einzelnen Kennwert

1. Alarmeinstellungen für "ISO10816-1 (2Hz - 1kHz) - Geschwindigkeit"

Hauptalarm : 4,5 mm/s Voralarm : 1,8 mm/s (40%)

Signal immer größer als : 0,0 mm/s ☐ Lernmodus verwenden



2. Alarmeinstellungen für "RMS Breitband - Beschleunigung (Gesamtstatus)"

Hauptalarm : 1,0 g Voralarm : 0,7 g (70%)

Signal immer größer als : 0,0 g ☒ Lernmodus verwenden



3. Alarmeinstellungen für "RMS Breitband - Hüllkurve (Gesamtstatus)"

Hauptalarm : 1,0 g Voralarm : 0,7 g (70%)

Signal immer größer als : 0,0 g ☒ Lernmodus verwenden



10.113 ábra: 5. lépés

Ezek után már a korábban megismert módokon nyomon követhető a gép állapota, rezgésértékei.

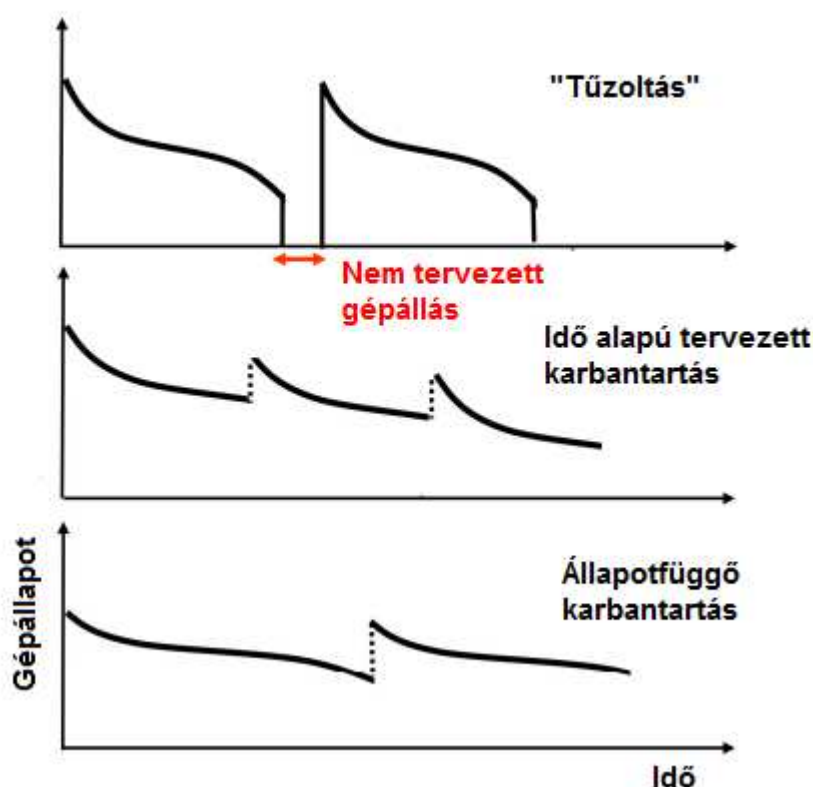
11. A REZGÉSDIAGNOSZTIKA GYAKORLATI JELENTŐSÉGE

11.1. Karbantartási stratégiák

Alapvetően megkülönböztetünk 3 féle karbantartási stratégiát:

- Váratlan meghibásodásokra épülő karbantartás: akkor lesz javítva a gép, amikor végképp meghibásodik és megáll. Ez hosszú termelés kiesést okoz, amivel nem lehet tervezni, és egy meghibásodásból más károk is adódhatnak.
- Idő alapú karbantartás: Adott időközönként adott alkatrészek cseréje, függetlenül attól, hogy milyen állapotban vannak. Ez a fajta stratégia ugyan csökkenti a váratlan meghibásodás esélyét, de feleslegesen kieső idővel és indokolatlanul magas költségekkel jár.
- Állapot orientált karbantartás (előretekinthető karbantartás): ismert a gép állapota, így tervezhető a szükséges javítás időpontja és költsége is.

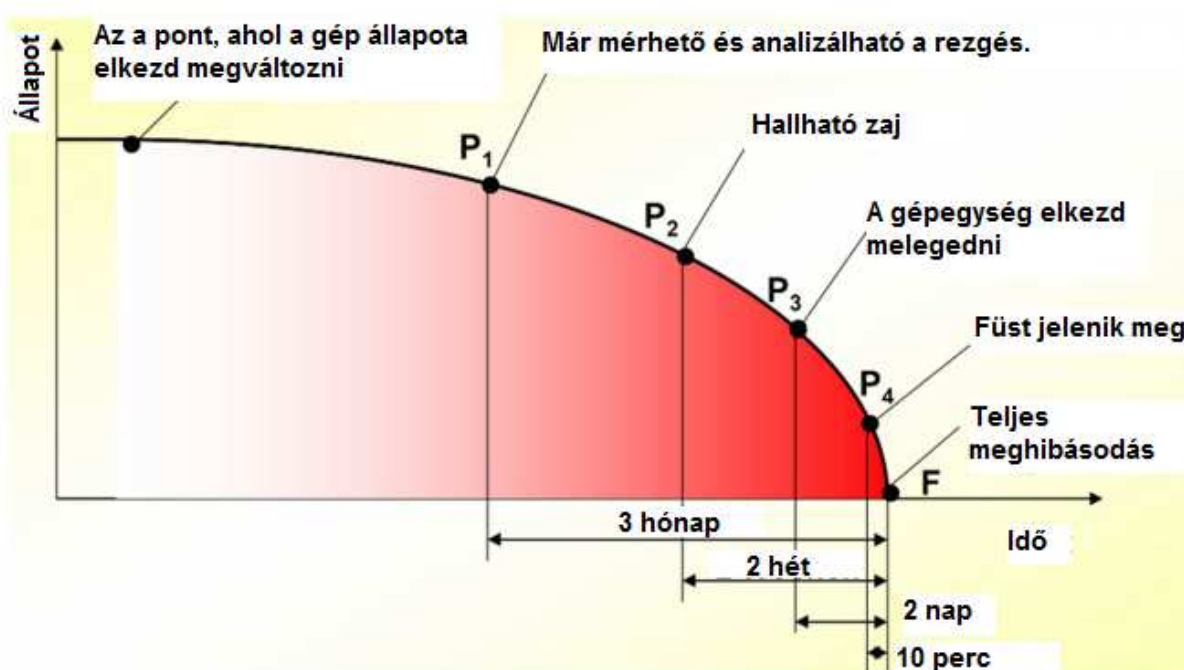
Karbantartási stratégiák



11.1 ábra: Karbantartási stratégiák

Forrás: [1]

Egy gép állapotának romlásáról több árulkodó jelet is mutat. A leghatékonyabb a rezgésdiagnosztika. Ez egy durva becslés alapján a végleges meghibásodás előtt kb. 3 hónappal előre jelzi, hogy a gép vagy a gépegység meg fog hibásodni.



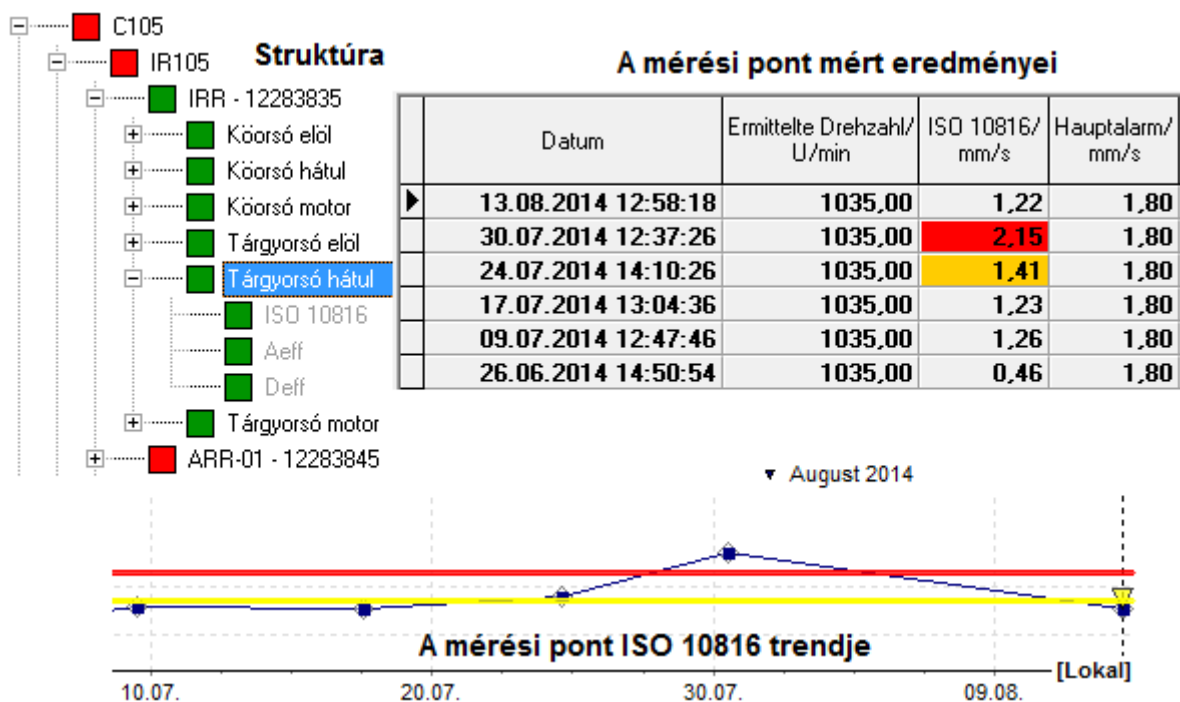
11.2 ábra: A gép állapotának romlása

Forrás: [1]

11.2. A rezgésmérésekből levont következtetések

11.2.1. Offline rezgésmérés

Az IRR-en végzett időszakos mérésekből és ezek analíziséből a tárgyorsó csapágyainak meghibásodását lehetett kimutatni. Csapágyazás után az értékek újra a riasztási küszöb alá estek.

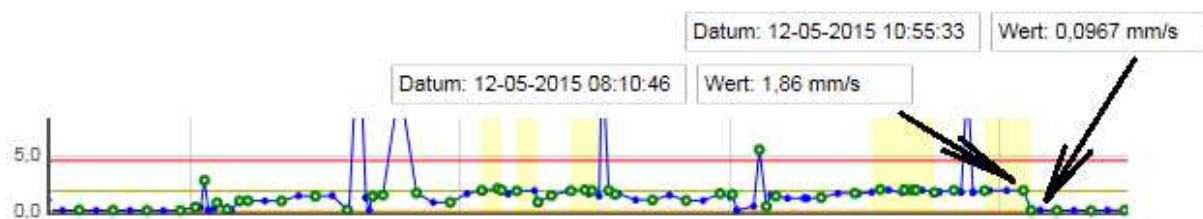


11.3 ábra: IRR tárgyorsó hátsó mérési pontjának értékei és trendje

11.2.2. Online rezgésmérés

Hasonló eredményt értünk el az AFE támfelület köszörű esetében is.

A köszörűorsó csapágyazásának hosszabb figyelemmel kísérése során az látható a trendben, hogy a rezgésértékek elkezdtek növekedni. Miután javítás történt (orsócsapágyazás) a mérések újra normális értéket mutattak. (Természetesen időnként megjelenik egy-egy kiugró érték, szán mozgás, külső behatás, mérés közben következő folyamat kezdődött stb. miatt, de ez a trendet tekintve nem mérvadó.)



11.4 ábra: AFE köszörű orsó online felügyelete

11.2.3. Következtetés

Hosszú távon, amikor már van elegendő tapasztalati értékünk, tudjuk, hogy egy gépegység normál körülmények között üzemeltetve milyen időközönként hibásodhat meg, és mikor lesz esedékes a javítása. Ha egy adott kritikus gépegységről beszélünk, és meg tudjuk határozni a következő javítás időpontját, előre fel tudunk készülni alkatrészszel, személyzettel és a javítás időpontját is könnyebb leegyeztetni előre a termeléssel.



Egy projekt keretein belül egy orsódiagnosztikai tesztpad is készült a karbantartás műhelybe, mivel a legkritikusabb egység maga a köszörű orsó. A tesztpadon két ponton, elöl és hátul az orsón mérjük a rezgést, ezenkívül csapágyhőmérsékletet, terhelést és a felvett áramot. A tesztpadon azonnal látjuk az orsó állapotát, döntést tudunk hozni, hogy szükséges-e a javítása, ill. egy javított orsó állapotát is meg tudjuk határozni.

Mivel egy gépegység (csapágyazás, szíjhajtás, fogaskerék hajtómű stb.) kezdődő meghibásodása leghamarabb egy rezgésdiagnosztikai analízissel fedezhető fel, így ez kulcsfontosságú eljárás mind a termelő gépek, mind az orsódiagnosztikai tesztpad esetében.



FELHASZNÁLT SZAKIRODALOM

- [1] FAG Industrial Service: FAG Detector III Einsteigerschulung Herzogenrath, Németország
- [2] FAG Industrial Service: FAG Detector III Maschinendiagnose Herzogenrath, Németország
- [3] FAG Industrial Service: FAG SmartCheck Einführende Produktschulung Herzogenrath, Németország
- [4] FAG Industrial Service: FAG SmartCheck Grundlagen Schwingungsanalyse / Weiterführende Produktschulung Herzogenrath, Németország