

Debreceni Egyetem
Műszaki Kar
Környezet- és vegyészmérnöki Tanszék



Rezgésdiagnosztika, mint a környezetmérnöki preventív tevékenység eszköze

Készítette: **Tóth Gellért**
környezetmérnök szakos hallgató

Belső konzulens: Dr. Kocsis Imre

Külső konzulens: Homolya György

Tanszékvezető: Dr. Bodnár Ildikó

Debrecen, 2012. november

BEVEZETÉS	4
1 FEJEZET: A REZGÉS	6
1.1 A rezgés fogalma	6
1.1 Rezgések típusai ([1], [3], [7] alapján)	7
1.1.1 Csillapítatlan rezgések.....	7
1.1.2 Csillapított rezgések	10
1.2 Rezgések összegzése ([1], [3] alapján)	12
1.2.1 Egyirányú rezgések összegzése	13
1.2.2 Egyásra merőleges irányú rezgések összegződése	15
1.3 Periodikus rezgések jellemző mennyiségei ([3], [11] alapján).....	16
2 FEJEZET: ANALÓG-DIGITÁLIS JELÁTALAKÍTÁS	19
2.1 A bináris kódhoz vezető út: Érzékelők ([11] alapján)	20
2.1.1 Elmozdulás-érzékelők	20
2.1.2 Sebességérzékelők	20
2.1.3 Gyorsulásérzékelők	20
2.1.4 SPM lökésimpulzus érzékelő	21
2.2 Spektrumkép létrehozása.....	22
2.2.1 Áttérés időjelből frekvencia spektrumra	22
2.2.2 Mérési pontosság, FFT felbontás	22
2.3 Frekvencia analízis White-féle szabályai ([1] alapján).....	23
3 FEJEZET: REZGÉSMÉRÉS ALAPJAI	24
3.1 A méréshez szükséges adatok ([11] alapján)	24
3.1.1 Objektív gépadatok	24
3.1.2 Szubjektív adatok	24
3.2 Mérőpontok kijelölésének fő szempontjai ([11] alapján)	25
3.3 Mérőpont beállítása a Condmaster Nova programban.....	26
3.4 Rezgés és csapágyállapot mérési módszerek az SPM Leonova Infinity-vel ([8], [9], [10] alapján)	26
3.4.1 Lökésimpulzus módszer (SPM - Shock Puls Method).....	27
3.4.2 Rezgésmérés módszerei.....	29

3.4.3	Egyéb alkalmazások a Leonova műszerben	33
4	FEJEZET: MÉRÉSI EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA	34
4.1	SPM Rig Dem 20/21-es próbapad	34
4.1.1	Mérési eredmények kiértékelés.....	35
4.2	Centrifugák mérése a Debreceni Vízmű szennyvíztelepén	37
4.2.1	A szennyvíztisztító telep jellemzői	37
4.2.2	Alkalmazott gépészeti berendezések.....	38
4.2.3	Felmerülő kockázatok	39
4.2.4	Izapsűrítő és-víztelenítő centrifugákon végzett mérések.....	41
4.2.5	A mérésekből levonható következtetések	42
4.3	Ivóvíz kitermelő telepen végzett mérések	45
4.3.1	Szivattyúk és a kijelölt mérési pontok bemutatása.....	46
4.4	A mérési eredményekből levonható következtetések	47
4.4.1	Négyes szivattyú mérési eredményei	47
4.4.2	A hármas szivattyú mérési eredményei	49
	ÖSSZEGZÉS.....	51
	IRODALOMJEGYZÉK.....	53
	1. MELLÉKLET	55
	2. MELLÉKLET	56
	3. MELLÉKLET	57
	4. MELLÉKLET	68
	5. MELLÉKLET	71
	6. MELLÉKLET	81

Bevezetés

A műszaki diagnosztika a gépészeti berendezések üzemelés közben végzett állapotfelmérését jelenti, különböző jól mérhető paraméterek segítségével (pl.: rezgés, hőmérséklet, vezetőképesség, zaj, stb.).

Alkalmazásának célja:

- Berendezések várható élettartalmának meghatározása.
- A gépezet állapotának folyamatos, rendszeres nyomon követése.
- A berendezés megfelelő üzemelése paramétereinek meghatározása.
- A hatóságok elvárásainak való megfelelés.

A műszaki diagnosztika napjainkban rohamosan fejlődő tudományág, melynek egyik oka a gazdasági helyzet bizonytalansága. Különböző termelő tevékenységet folytató vállalatok számára fontos szempont, hogy a kiadásait lehető legalacsonyabban tartsák. Ennek következtében a termelésben alkalmazott berendezéseik állapotának megóvására törekszenek. A különböző diagnosztikai eljárások lehetővé teszik, hogy a gépek állapotát nyomonkövessék, így elkerülhetőek legyenek a hirtelen meghibásodások, valamint az ebből adódó termelés kiesések. A karbantartási munkálatok előre tervezhetőek, valamint a jelentősebb meghibásodások elkerülhetőek. A vállalat számára egy előre tervezett javítás, felújítás sokkal kedvezőbb anyagilag, mint egy súlyos meghibásodásból adódó komplett berendezés lecserélése.

Napjainkban a környezetvédelem egyre inkább előtérbe kerül, úgy a mindennapi életünk során, mint az iparban. Sok esetben azt tapasztalhatjuk, hogy a környezetvédelem az egyes környezeti elemekben megjelenő anyagok koncentrációját vizsgálja, ami a környezetterhelés, illetve ha a megengedett határértéket átlépi az adott szennyező koncentrációja, a környezetszennyezés következménye. Ennek észlelését követően a kármentesítés a következő lépés a környezet károsodásának minimalizálása érdekében. Ez a gyakorlat költséges és a környezet szempontjából előnytelen.

Sokkal célszerűbb a megelőzés hangsúlyosabbá tétele a környezetvédelemben. Például számos esetben az ipari tevékenységből adódó környezeti katasztrófák megelőzhetőek lennének megfelelő műszaki diagnosztikai rendszer alkalmazásával. Ugyanígy az egyes szennyezők kibocsátási koncentrációjának változását előre lehetne jelezni az alkalmazott berendezések üzemelési paramétereinek nyomon követésével.

Ennek köszönhetően a beavatkozást még az előtt meg lehetne kezdeni, hogy a szennyező elérné a kritikus koncentrációt.

Ilyem megközelítésből látható, hogy a műszaki diagnosztika egyes ágazatai nem csak gazdasági szempontból elengedhetetlenek a vállalatok számára, hanem a környezet megóvásának eszközévé is válhat. Ezért mondhatjuk, hogy a műszaki diagnosztika a környezetmérnöki preventív tevékenység részét képezheti.

A rezgésdiagnosztikai méréseket a Debreceni Vízmű Zrt. telephelyein, különböző berendezések végeztem. A méréshez Debreceni Egyetem Műszaki Kar Diagnosztika laboratóriumának SPM Leonova™Infinity hordozható mérőműszert használtam. A dolgozatban hivatkozás nélkül feltüntetett függvény ábrákat a MATLAB szoftver segítségével készítettem el.



1. ábra: SPM Leonova™Infinity hordozható mérőműszer

Köszönöm **Dr. Kocsis Imrének** (belső konzulensemnek) a folyamatos segítségnyújtását, **Homolya Györgynek** (az SPM Instrument Budapest Kft vezérigazgatójának) az önzetlen támogatását, továbbá **Fülöp Zoltánnak**, (a Debreceni Vízmű Zrt. Szennyvíztisztító Üzem környezetvédelmi mérnökének), hogy lehetővé tette számomra a szakmai gyakorlat teljesítését és a mérések elvégzését a telephelyen, valamint, **Ecsedy Árpádnak** (a Debreceni Vízmű Zrt. Víztermelő Telepek karbantartás vezetőjének), hogy engedélyezte és segítette a szivattyúk mérését.

1 Fejezet: A rezgés

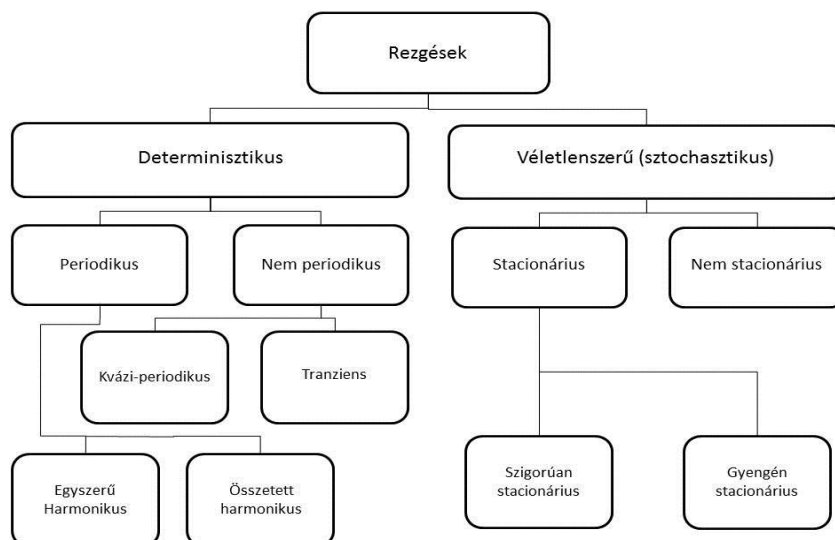
1.1 A rezgés fogalma

Az MSZ ISO 2041-1995 szerint a rezgés: „Mechanikai rendszer helyzetének, vagy mozgásának leírására alkalmas mennyiség változása az idő függvényében; a változás felváltva hol kisebb, hol nagyobb egy bizonyos átlag-, vagy referenciaértéknél”. Egyszerűbben megfogalmazva a rezgés egy oszcilláció, vagy ismétlődő mozgás egy egyensúlyi pont körül.

Forgó alkatrészeket tartalmazó berendezések üzemelése közben különböző rezgések gerjesztődnek. Ezek a rezgések nem láthatóak (abban az esetben látható, ha a meghibásodás oly mértékű, hogy az egész berendezés bele rezeg) és tapintással nem lehet meghatározni, hogy az a gépezet rezgése milyen mértékű. Ezért szükség volt egy eljárás kifejlesztésére, ami a mechanikai rezgések átalakítja egy megfelelően mérhető és kiértékelhető formába. Ezt a rezgések elektromos jellé történő konvertálásával oldották meg (analóg-digitális jelátalakítás). Ennek kivitelezéséhez érzékelőket kellett kifejleszteni, aminek a bemeneti jele a mechanikai rezgés és a kimeneteli adat egy elektromos jel. Ennek az elektromos jelnek tartalmaznia kell, hogy a berendezés milyen gyorsan mozog, ezt a frekvencia értéke írja le, és hogy mennyire mozog, ezt az adatot pedig a rezgés amplitúdója tartalmazza. A jel kiértékelése során a frekvencia fogja meghatározni, hogy mi a berendezés problémája és az amplitúdó mutatja meg, hogy ez a probléma milyen mértékben van jelen.

1.1 Rezgések típusai ([1], [3], [7] alapján)

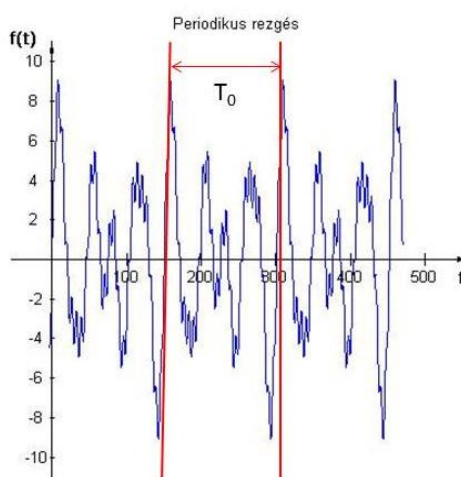
1.1.1 Csillapítatlan rezgések



1.1. ábra: A rezgések típusai

A rezgéseket alapvetően két nagy csoportba sorolhatjuk. Lehetnek determinisztikus (paraméterei a gerjesztő hatásból meghatározhatóak) és sztochasztikus (véletlenszerű) rezgések.

Determinisztikus a rezgés, hogyha az alapösszefüggések és a kezdeti értékek ismeretében, a rezgés tulajdonságai bármely időpillanatban meghatározhatóak. A legjelentősebb ide tartozó csoport a periodikus rezgések csoportja.



1.2. ábra: Periodikus rezgés

Periodikus rezgések:

Ha egy rezgés periodikus, akkor a következő egyenlőség írható fel:

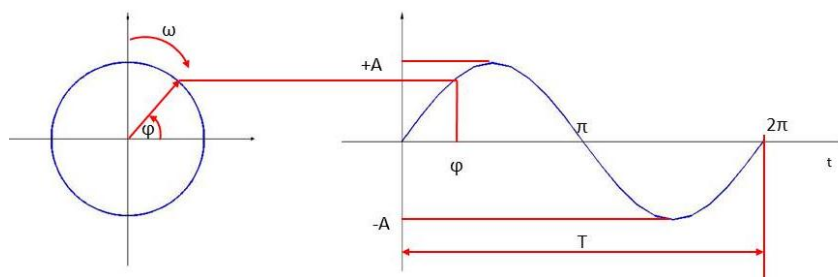
$$f(t) = f(t + n \cdot T_0)$$

Ahol T_0 a periódusidő, az $n \in \mathbb{Z}$. A periodikus rezgések esetén feltételezzük, hogy a mozgás korlátlan ideig tart (1.2. ábra).

Harmonikus rezgés a periodikus rezgés egy speciális esete. Minden harmonikus rezgés periodikus, de nem minden periodikus rezgés harmonikus. Az ilyen rezgéseket szinusz függvénnyel lehet leírni.

$$f(t) = A \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

Az A amplitúdó, az ω_0 körfrekvencia és a φ_0 fázisszög ismeretében az $f(t)$ függvény minden időpillanatban egyértelműen meghatározott. Ez a rezgés előállítható egy A hosszúságú, ω szögsebességgel forgó vektor vetületeként:



1.3. ábra: Forgó vektor vetületeként előállított harmonikus rezgés

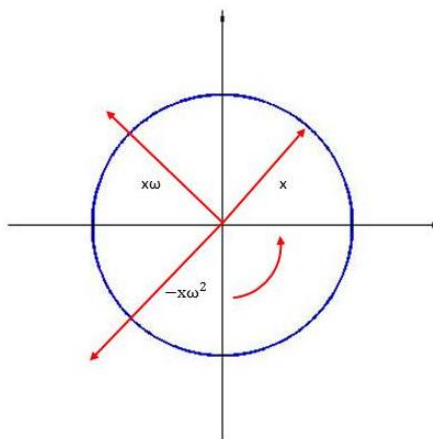
A harmonikus rezgés felírható a következő alakban is:

$$x(t) = x_0 \cdot \sin(\omega t)$$

Az x a kitérés, x_0 a maximális kitérés, a t_0 időpillanatban a kitérés értéke 0. A rezgés sebessége és gyorsulása a fenti függvény első és második deriváltjaként írható le:

$$\frac{dx}{dt} = \dot{x}(t) = x_0 \omega \cdot \cos(\omega t) = x_0 \omega \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \ddot{x}(t) = -x_0 \omega^2 \cdot \sin(\omega t) = x_0 \omega^2 \cdot \sin(\omega t - \pi)$$



1.4. ábra: Rezgés kitérése, sebessége, gyorsulása

Az általános periodikus vagy összetett harmonikus rezgések csoportjába tartoznak a nem-szinuszos periodikus rezgések. Ezeket különböző amplitúdóval, fázissal és körfrekvenciával rendelkező szinuszos rezgések (általában végtelen tagú) összegeként lehet felírni. Ennek alapján egy T_0 periódusidejű általános rezgés egy T_0 periodikus idejű alaprezgésből és ennek felharmonikusaiból tevődik össze. A felharmonikusok frekvenciái az f_0 alapfrekvencia egészszámu többszörösei (1.2. ábra).

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{+\infty} A_k \cdot \cos(\omega_k t + \varphi_k)$$

$$\omega_k = k \cdot \omega_0 = k \cdot 2\pi \cdot f_0 = k \cdot \frac{2\pi}{T_0}, \quad (k \in \mathbb{Z})$$

Nem periodikus rezgések:

Ebbe a csoportba tartoznak a kvázi-periodikus és a tranziens rezgések, amik abban különböznek a periodikus rezgésektől, hogy jelen vannak olyan harmonikusok, melyek frekvenciái nem az alapfrekvencia egészszámu többszörösei.

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{+\infty} A_k \cdot \sin(\omega_k t + \varphi_k), \quad (k \notin \mathbb{Z})$$

A tranziens folyamatok közé tartozik például a csillapított rezgés. A tranziens folyamatok spektruma folytonos, szemben a periodikus rezgések diszkrét spektrumával.

Sztochasztikus rezgések

A véletlenszerű rezgések összetevői széles frekvencia tartományt fednek le. Ezek a rezgések nem megismétlődő jelek, gyakran úgy is nevezik, hogy zajok.

A sztochasztikus jelenségek vizsgálatának alapja, a vizsgált mennyiség eloszlásához tartozó sűrűség függvény. Meg szokták határozni az amplitúdó eloszlás lineáris és négyzetes középértékét, valamint az eloszlás szórásnégyzetét. Egy folyamat akkor

stacioner, ha az említett értékek idő függetlenek. Nem stacionárius folyamatok matematikai leírása nagyon bonyolult.

A sztochasztikus jelek spektruma folytonos. Leírásukra a teljesítménysűrűség spektrumot célszerű használni.

1.1.2 Csillapított rezgések

1.1.2.1 Harmonikus rezgés csillapítással

Egy csillapítatlan rezgés elméletileg végtelen sokáig tart. Valóságban ilyen nem létezik, minden rezgés elhal egy idő után, ezért a klasszikus tömeg-rugó rendszerre felírható egyenletet ki kell egészíteni a csillapításból adódó a $c\dot{x}$ taggal, ahol c a csillapítási tényező:

$$m \cdot \ddot{x}(t) + c \cdot \dot{x}(t) + k \cdot x(t) = 0$$

Az egyenlet megoldását e^{st} alakban kell keresni, ahol a t az időt, s pedig egy ismeretlen konstans jelöl. Így a következő egyenletet kapjuk:

$$(m \cdot s^2 + c \cdot s + k) \cdot e^{st} = 0$$

Az s szerinti másodfokú egyenlet megoldása:

$$x = C_1 \cdot e^{s_1 t} + C_2 \cdot e^{s_2 t}$$

$$s_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}}$$

Az s értéke lehet valós és komplex szám is. Ennek megfelelően külön kell vizsgálni a két esetet. Abban az esetben, ha az s valós szám, akkor a gyökjel alatti kifejezés pozitív. Ekkor az s értéke negatív lesz (mert a gyökjel alatti érték kisebb, mint $\frac{c}{2m}$). Ez egy csökkenő exponenciális függvény képét eredményezi. Ebben az esetben nem alakul ki igazi rezgés, csak egy egyensúlyi helyzetbe való visszatérés. Ennek az az oka, hogy a csillapítás túl nagy. Ha a c kisebb, akkor az $s_{1,2}$, akkor komplex értéket ad. Kritikus csillapítás az a csillapítás ahol a fordulat létrejön.

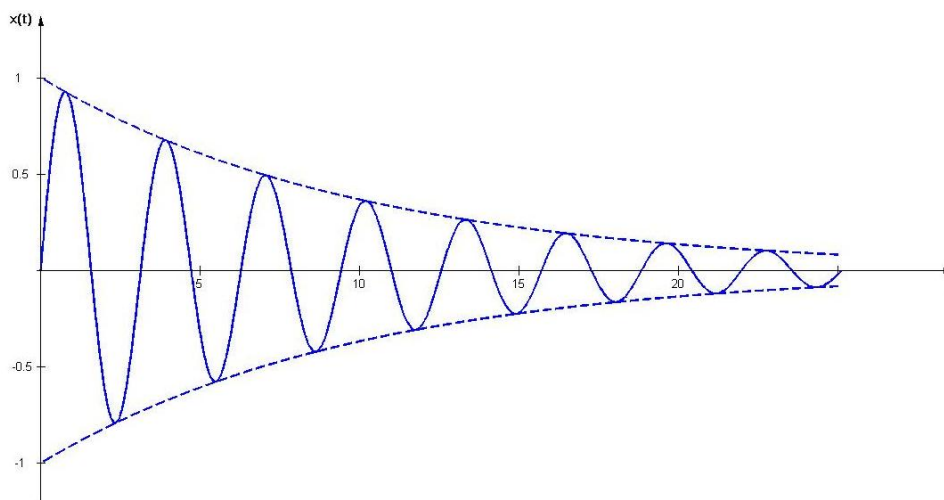
$$c_{kr} = 2m \cdot \omega_n$$

A fenti összefüggésben ω_n a nem csillapított harmonikus rezgés sajátfrekvenciája. A fenti egyenlet végső megoldása:

$$x = e^{-\frac{c}{2m}t} \cdot (C_1' \cos(\omega_d \cdot t) + C_2' \sin(\omega_d \cdot t))$$

$$\omega_d = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2}$$

Itt a ω_d a csillapított harmonikus rezgés sajátfrekvenciáját fejezi ki, és ebben az esetben a rezgést egy csillapodó szinusz görbével lehet ábrázolni (ami szinuszgörbe és csökkenő exponenciális görbe szorzataként áll elő). Azt, hogy a rezgő rendszer mikor tér vissza nyugalmi helyzetébe, a csillapítási tényező befolyásolja.



1.5. ábra: Csillapított harmonikus rezgés

A csillapított rezgés periódusideje:

$$\tau_d = \frac{2\pi}{\omega_d}$$

1.1.2.2 Kényszerrezgés

A kényszerrezgések esetében a rendszerre egy külső gerjesztő erő hat. Ha a csillapítás elhanyagolható, akkor a gerjesztett rendszer a következő differenciál egyenlettel írható le:

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = P_0 \cdot \sin \omega t$$

Az általános megoldás tartalmaz egy csillapítatlan szabadrezgést (első két tag), illetve egy csillapítatlan kényszerrezgést (harmadik tag).

$$x = C_1 \cdot \sin(\omega_n t) + C_2 \cdot \cos(\omega_n t) + \frac{X_{st}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \cdot \sin(\omega t)$$

Ha a gerjesztő frekvencia (ω) nagyon közel esik a rezgő rendszer természetes frekvenciához (ω_n), akkor a 3. tag nevezője közelít a 0-hoz. Ebben az esetben a rezgés amplitúdója $\omega \rightarrow \omega_n$ esetén az $\frac{1}{1-x^2}$ alakú függvényhez hasonlóan alakul. Csillapítatlan esetben a tört nevezőjében $\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)$ az $\frac{\omega}{\omega_n}$ kifejezés értéke nem lehet egyelő egygyel,

mert úgy az amplitúdó értéke végtelen nagyra nőne. Ezt a jelenséget rezonanciának nevezzük és a sajátfrekvenciát rezonancia frekvenciának hívjuk.

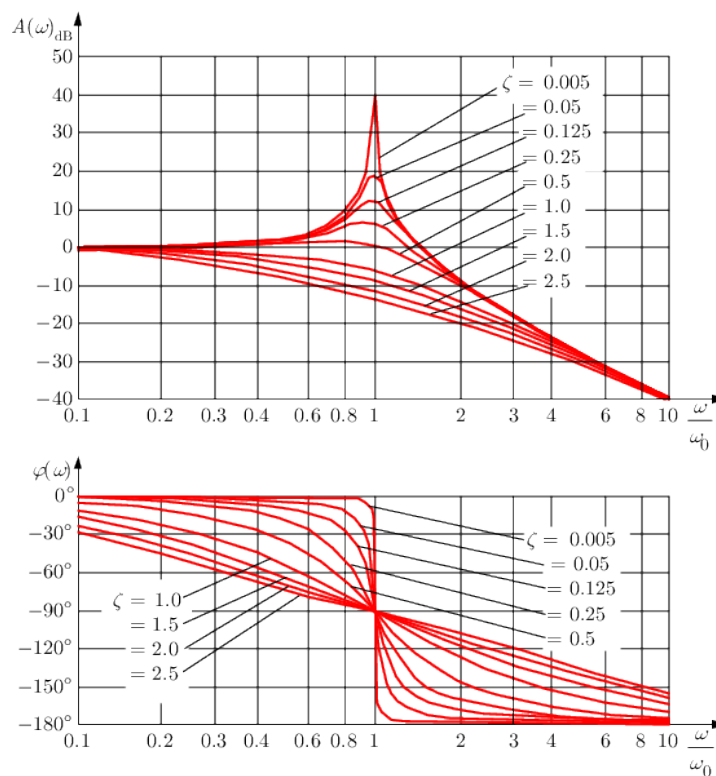
Ha a kényszerrezgéshez hozzáadunk egy csillapítási tényezőt, akkor a következő differenciálegyenletet írhatjuk fel:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = P_0 \cdot \sin \omega t$$

Az egyenlet megoldása a csillapított harmonikus rezgésre felírt, illetve egy partikuláris összegeként adható meg:

$$x(t) = e^{-\frac{c}{2m}t} \cdot (C_1 \cdot \sin(\omega t) + C_2 \cdot \cos(\omega t)) + X_p$$

Az x_p az egyenlet úgynevezett partikuláris megoldása. Azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a relatív amplitúdó ($A = \frac{x}{x_{st}}$ ahol x_{st} a kényszererő hatására létrejövő statikus kitérés) és a fáziseltolás (φ) mértéke függ a relatív frekvenciától ($\frac{\omega}{\omega_n}$) és a relatív csillapítástól ($\zeta = \frac{c}{c_k}$) is. Ezt szemlélteti az úgynevezett Bode diagram.



1.6. ábra: Amplitúdó és fáziseltolás alakulásának szemléltetése Bode diagrammon

(Forrás: <http://www.atp.ruhr-uni-bochum.de/rt1/syscontrol/img685.gif>, 2012. október 30. 00:34)

1.2 Rezgések összegzése ([1], [3] alapján)

A valóságban a rezgések nem önmagukban vannak jelen, hanem a felharmonikusok és egyéb rezgések összegeként. Ebben a részben csak az egyirányú és a merőleges irányú rezgések összegződéséről lesz szó.

1.2.1 Egyirányú rezgések összegzése

Ezen belül három különböző esetet különböztetünk meg attól függően, hogy a rezgések frekvenciái hogyan viszonyulnak egymáshoz:

- A frekvenciák megegyeznek.
- A frekvenciák eltérőek.
- A frekvenciák közel azonosak.

Az egyszerű rezgések összegzésének vizsgálatához célszerű megnézni, hogy az egyes paraméterek megváltoztatása hogyan hat a függvény képre.

$$f(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi), \quad \omega = \frac{2\pi}{T},$$

Az A az amplitúdó, az ω a körfrekvencia (ami helyett gyakran a $f = \frac{\omega}{2\pi}$ frekvenciát használjuk), φ a fáziseltolás.

1.2.1.1 Azonos frekvenciájú rezgések

Ha két egyirányú, azonos frekvenciájú rezgést adunk össze, akkor az összegük a komponensekkel megegyező irányú és frekvenciájú harmonikus rezgés lesz.

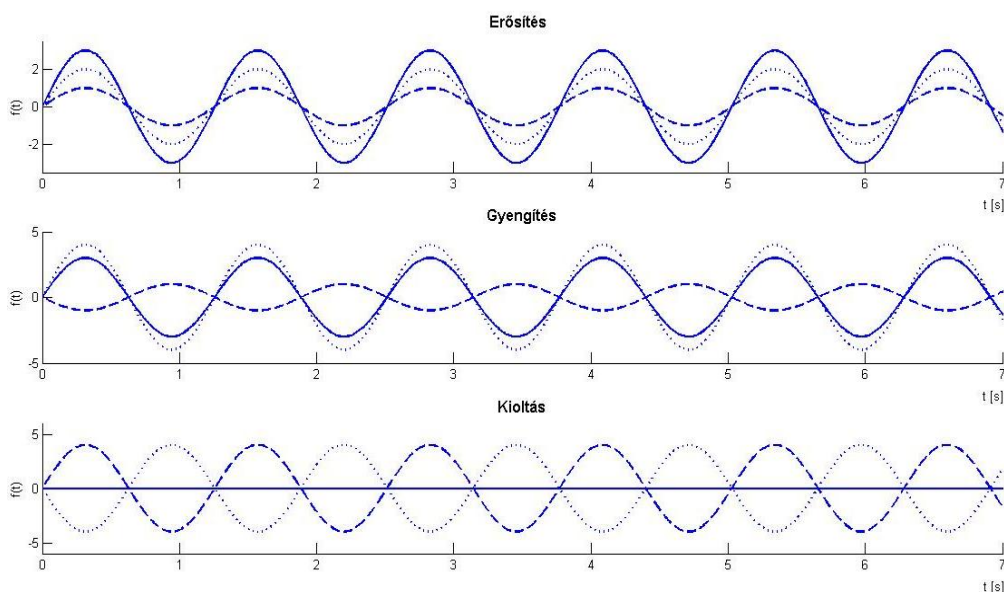
$$A_1 \cdot \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \cdot \sin(\omega t + \varphi_2) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

Abban az esetben, ha a fázisok is megegyeznek, akkor a rezgések szuperpozíciója a következő lesz különféle amplitúdó értékek mellett:

Erősítés: $A_1 + A_2 = A$

Gyengítés: $A_1 - A_2 = A$

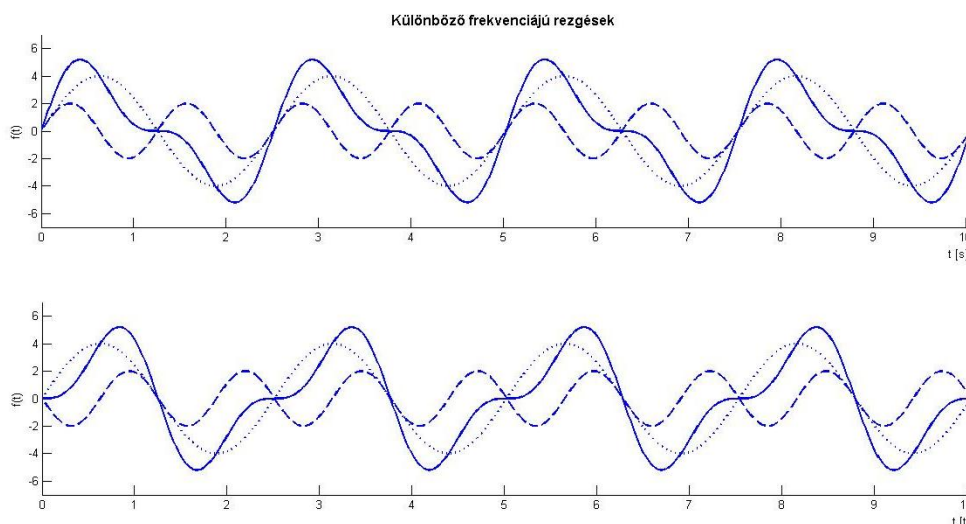
Kioltás: $A_1 = -A_2$



1.7. ábra: Azonos frekvenciájú és fázisú rezgések összege. (A szaggatott vonallal ábrázolt rezgések az alkotó rezgések, a folytonos vonallal jelölt pedig az erdőrezgés.)

1.2.1.2 Különböző frekvenciájú rezgések

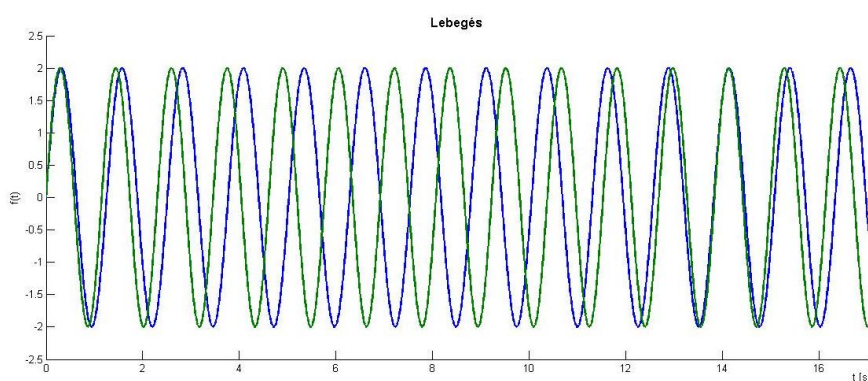
A különböző frekvenciájú harmonikus rezgések eredője nem lesz harmonikus, és csak abban az esetben lesz periodikus, ha az $\frac{\omega_1}{\omega_2}$ hányados racionális szám. Ha a frekvenciák és az amplitúdók különbözőek, a fázisok azonosak, akkor a következő ábrával lehet szemléltetni a rezgések összegződését, illetve kivonódását:



1.8. ábra: Különböző frekvenciájú, de azonos fázisú rezgések összege és különbsége. (A szaggatott vonallal ábrázolt rezgések az alkotó rezgések, a folytonos vonallal jelölt pedig az eredőrezgés.)

1.2.1.3 Közel azonos frekvenciájú rezgések

Ha a két rezgés frekvenciája közel azonos, akkor abban a speciális esetben, ha az amplitúdók és a fázisok is megegyeznek, a két komponens hol kioltja, hol erősíti egymást. Ezt a jelenséget lebegésnek nevezzük.



1.9. ábra: Lebegést előállító komponensek külön-külön ábrázolva.

Az eredő amplitúdója lefedhető két ellentétes amplitúdójú harmonikus burkológörbével.

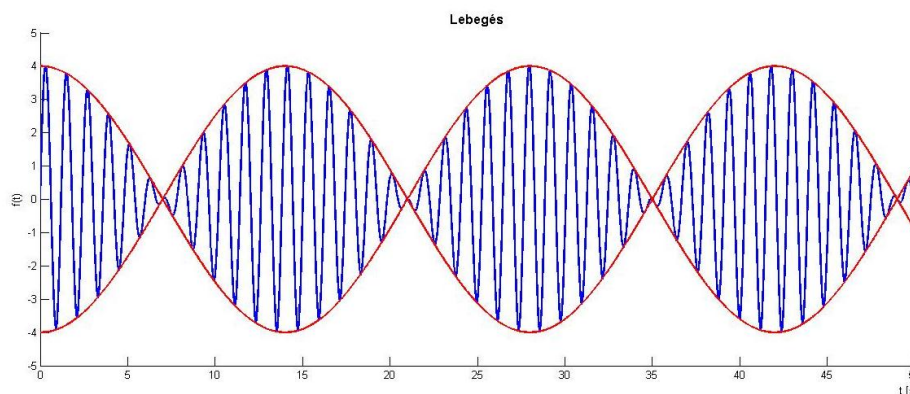
$$f(t) = A \cdot \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + A \cdot \sin(\omega_2 t + \varphi_2) =$$

$$= 2A \cdot \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} \cdot t\right) \cdot \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \cdot t\right)$$

A burkológörbék a következő függvényekkel írhatók le:

$$2A \cdot \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} \cdot t\right), -2A \cdot \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} \cdot t\right)$$

A lebegés frekvenciája a két összetevő frekvenciájának a különbsége.



1.10. ábra: Lebegés burkológörbékkel

A lebegés gyakran előfordul gépek, villamos berendezések, áramkörök működtetésénél.

1.2.2 Egymásra merőleges irányú rezgések összegződése

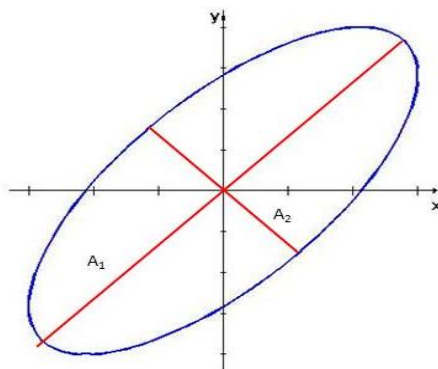
Az ilyen típusú rezgések tovább csoportosíthatóak a szerint, hogy a rezgések frekvenciái:

- megegyezők,
- vagy eltérők.

1.2.2.1 A rezgések frekvenciái megegyeznek

Ha az összetevők frekvenciája megegyezik, akkor elliptikus pályát ír le az eredő rezgés. Az ellipszis nagyságát és helyzetét az A_1 és A_2 amplitúdók, valamint a φ_1 és φ_2 fázisszögek különbsége határozza meg.

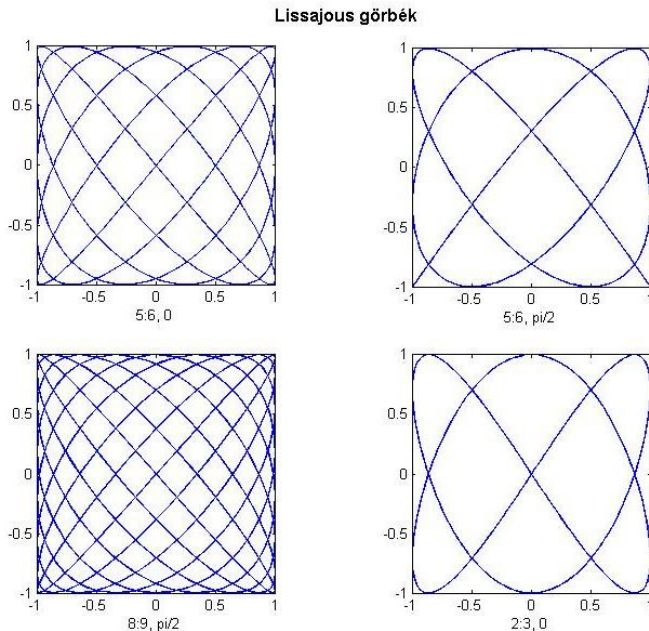
$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} - \frac{2xy}{A_1 A_2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) = \sin^2(\varphi_1 - \varphi_2)$$



1.11. ábra: Az egymásra merőleges és azonos frekvenciájú rezgések összegződésének az eredményét, ha ábrázoljuk, akkor ellipszist kapunk.

1.2.2.2 A rezgések frekvenciái különbözőek

Ha a rezgések frekvenciái különböznek, akkor az úgynevezett Lissajous görbék állnak elő. A görbék alakja a fázisok különbségétől és a körfrekvenciák arányától ($\frac{\omega_1}{\omega_2}$) függ. Ha a hányados racionális szám, akkor a görbék záródnak, de a hányados nem racionális szám, akkor nem záródnak.



1.12. ábra: Lissajous görbék

1.3 Periodikus rezgések jellemző mennyiségei ([3], [11] alapján)

A rezgések jellemzésére használt három legfontosabb mennyisége a frekvencia, amplitúdó és a fázisszög.

- A frekvencia a periódusidő reciprokaként adható meg, de gyakran a körfrekvenciát használják a frekvencia kifejezésére. A berendezések vizsgálata során a spektrumban megjelenő frekvencia hordozza a meghibásodás forrására vonatkozó információt.

$$f = \frac{1}{T}, \quad \omega = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi}{T} \quad (\text{Hz} = 1/\text{s})$$

- A rezgés amplitúdója megadható elmozdulás, sebesség vagy gyorsulásban kifejezve. Egy berendezés rezgésének az amplitúdója a jelentkező meghibásodás mértékére vonatkozó információt szolgáltat a kiértékelő számára. Összefüggés az egyes amplitúdók között:

- Kitérés: $x(t) = A \cdot \sin(\omega t)$
- Sebesség: $v(t) = \frac{dx}{dt} = A\omega \cdot \cos(\omega t) = A\omega \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$
- Gyorsulás: $a(t) = \frac{dv}{dt} = -A\omega^2 \cdot \sin(\omega t) = A\omega^2 \cdot \sin(\omega t + \pi)$

Az elmozduláshoz képest a sebesség egy negyed, a gyorsulás pedig egy fél periódussal előre siet.

- A harmadik lényeges mennyiség a rezgés fázisszöge. Az értékét mindig egy referenciaponthoz viszonyítjuk az eltelt idő függvényében. Fázisszög mérésére összetett rezgések elemzésekor szoktak kiemelt figyelmet fordítani.

Továbbá a rezgésdiagnosztikában gyakran használnak átlag értékeket és egyéb mutató számokat a részletes amplitúdó-idő függvény helyett:

- A periodikus folyamat energiatartalommal arányos jellemzőjét:

$$\overline{f^2(t)} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T f^2(t) dt$$

- RMS értéket (Root Mean Square). Ez az effektív rezgésérték:

$$A_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T f^2(t) dt} = A_{\text{pe}} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = A_{\text{pe}} \cdot 0,707$$

- Rezgés amplitúdó nagyságának az átlagát (számtani közepét):

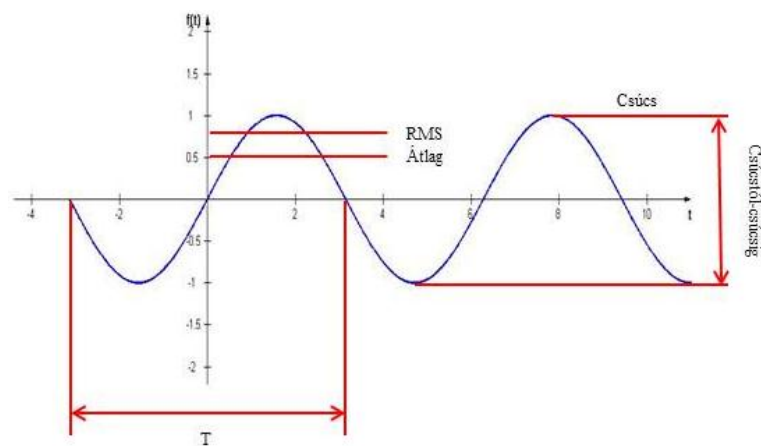
$$A_{\text{átl.}} = \overline{f(t)} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T |f(t)| dt$$

- A pozitív és negatív csúcs amplitúdók abszolút értékeinek az összegét, ami az APTP, csúcstól-csúcsig amplitúdó értéket adja (Peak to Peak):

$$A_{\text{PTP}} = |A_{\text{pe}}| + |-A_{\text{pe}}|$$

- Formatényező, sisaktényező:

$$\frac{A_{\text{eff}}}{A_{\text{átl.}}}, \frac{A}{A_{\text{eff}}}$$



1.13. ábra: Rezgések jellemzői

2 Fejezet: Analóg-digitális jelátalakítás

A rezgésdiagnosztika a mechanikai rezgések villamos jelekké való alakításán, és a kapott villamos jelek elemzésén alapul. A rezgések analóg jelek, melyekből mintavételezéssel és amplitúdó kvantálással diszkrét idejű és értékű jelek állíthatók elő. Analóg jelek azok, amelyek folytonos függvényekkel írhatók le. A jelben lévő komponensek frekvenciáit tartalmazó frekvencia spektrumot az időjel Fourier-transzformációjával kapjuk.

A rezgések elemzésében fontos szerepe van az időtartománybeli és a frekvenciatartománybeli vizsgálatoknak is. Az időtartománybeli és a frekvenciatartománybeli jel információtartalma elvileg megegyezik. A gyakorlatban pedig, a jelfeldolgozás pontosságától függően számolni kell bizonyos mértékű hiba megjelenésével a digitalizált jelben.

Manapság a digitális eszközök kerültek előtérbe, melyek az eredeti analóg jelből mintavételezéssel nyert digitális jellel dolgoznak. Az analóg jel digitalizálásának számos előnye van, de megvannak a hátráltatói is.

Főbb előnyei:

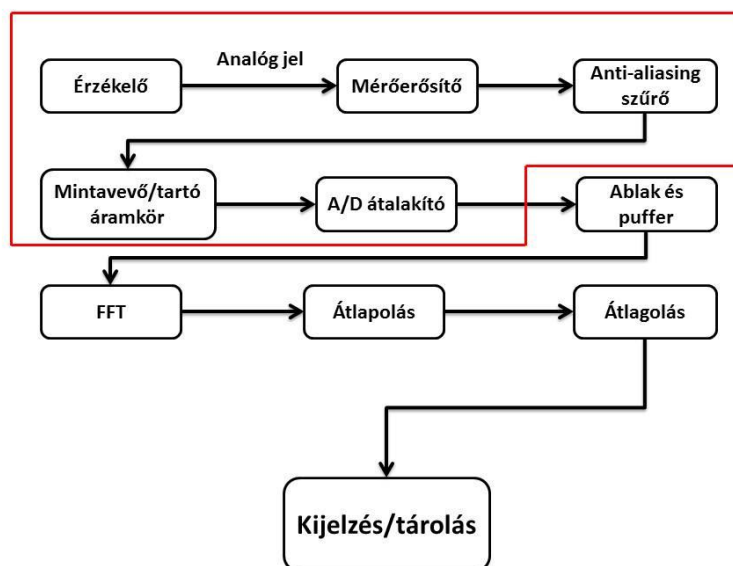
- Nagy jel-zaj viszony (Az információt hordozó jel szintjéhez képest a zajszint nagyon alacsony).
- Korlátlan másolási lehetőség minőségromlás nélkül.
- Nincs jeltorzulás.
- Lineáris frekvencia kiment.
- A digitalizált jelből az egyenfeszültségű jelkomponens visszaállítható.

Fő hátrányai:

- A digitális jel már kis mennyiségű adatvesztésre is érzékeny.
- A digitális jelfeldolgozáshoz szükséges áramkörök összetettek.

([3] alapján)

Az analóg jel digitalizálása több lépésből áll. Ezt szemlélteti a következő ábra:



2.1. ábra: Analóg jel digitalizálásának lépései

2.1 A bináris kódhoz vezető út: Érzékelők ([11] alapján)

Az analógjel digitalizálásának egyik legfontosabb lépése a megfelelő érzékelő kiválasztása. A fizikai jelet az érzékelő villamos jellé alakítja. A rezgésérzékelőknek több fajtája különböztethető meg. Ezeket három fő csoportba lehet sorolni.

2.1.1 Elmozdulás-érzékelők

A rezgésdiagnosztikában leggyakrabban alkalmazott elmozdulás-érzékelő az „Eddy szonda”. Ezt a típusú érzékelőt a mérendő berendezéstől függetlenül kell rögzíteni, mert a villamos jelet a berendezés és az érzékelő közötti kapacitásváltozás szolgáltatja.

2.1.2 Sebességérzékelők

Az érzékelőben egy tekercs és a kilengő mágnes egymáshoz viszonyított relatív elmozdulása a rezgés sebességgel arányos áramot indukál a tekercsben. Hátrány, hogy érzékeny a hőmérsékletváltozásra, és a mérési tartománya alacsony, 10-1000 Hz közötti.

2.1.3 Gyorsulásérzékelők

Ez a típusú érzékelő a legelterjedtebb az ipari alkalmazásban. A mérendő berendezéshez kell rögzíteni. mágnessel vagy csavarkötéssel, illetve tapintószonda

esetén kézzel tartva. A működésnek az alapját a piezoelektromos¹ kristály adja. A rezgés a szeizmikus tömeg tehetetlensége miatt erőt fejt ki a kristályra és az indukálódó feszültség arányos lesz a rezgésgyorsulással. A gyorsulás függvény egyszeri, illetve kétszeri integrálásával a rezgés és elmozdulás amplitúdó előállítható. Az érzékelőkre jellemzőek a dinamika tartomány, az érzékenység, irányérzékenység, frekvencia válsz. Az általam használt rezgésérzékelő adatlapját az 1. melléklet tartalmazza.

2.1.4 SPM lökésimpulzus érzékelő

A lökésimpulzus hullámok tranziens jelek, amik intenzitása, alakja közvetlenül meghatározza a károsodás milyenségét és mértékét (kenés állapot, gördülő felület állapota).

Ebben az esetben is egy piezoelektromos gyorsulásérzékelőről van szó. Ugyanakkor nagy különbség, hogy amíg a rezgésmérésnél az érzékelőt úgy hangolják, hogy a sajátfrekvenciája a mérési frekvencia tartományon kívül essen (lineáris frekvencia tartományt használnak), az ütésimpulzus mérésre alkalmas érzékelők sajátfrekvenciája úgy van hangolva (mechanikailag és elektromosan), hogy pont a tranziens hullámok rezonanciafrekvenciájával egybe essen. Ez körülbelül a 32 kHz-es tartománynak felel meg. A lökésimpulzus-átalakító egységnyit tömege a saját 32 kHz-es frekvenciáján fog rezegni.

A lökésimpulzusok a rendszerben keletkező többi rezgéssel összehasonlítva alig befolyásolják a keletkezett spektrumképet. Mivel az érzékelőt az impulzusok a saját frekvenciáján mérik, így az egy, nagy amplitúdójú rezgéssel válaszol, aminek a frekvenciája nagyobb lesz, mint a rezgő alkatrészek frekvenciája, ennek köszönhetően a zavaró jeleket ki lehet szűrni.

Az érzékelő által küldött jel amplitúdója függ a lökésimpulzus energiájától, sebességétől. Azonos üzemi viszonyok mellett magasabb fordulatszámon nagyobb a lökés szint, de a csapágy forgási sebessége függ annak méretétől, ezért szükség van az adatok előzetes betáplálására. Az általam használt ütésimpulzus érzékelő adatait a 2. számú melléklet tartalmazza. ([9] alapján)

A digitalizálás további lépései részletesebben a 4. mellékletben találhatók.

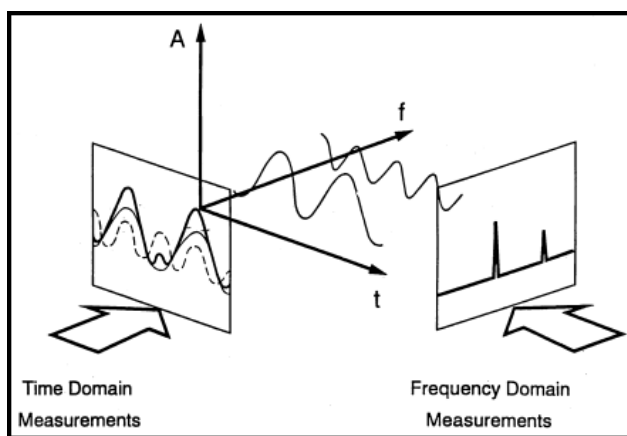
¹ A piezoelektromos kristály, egy szilícium kristály, amit ha váltakozó erő ér akkor az erővel arányos feszültséget generál.

2.2 Spektrumkép létrehozása

2.2.1 Áttérés időjelből frekvencia spektrumra

Az információt hordozó folytonos időjel alkalmazása a kiértékelés elvégzésére nem megoldható, mert nem leolvashatóak a számunkra fontos információkat hordozó frekvencia értékek, valamint a rezgések egymásra gyakorolt hatása miatt a jelben nagyon nehezen lehet vagy lehetetlen elkülöníteni az egyes komponenseket.

A digitalizált diszkrét időjelből a Diszkrét Fourier-Transzformáció (DFT) alkalmazásával kaphatunk diszkrét frekvencia spektrumképet, amely már elkülönítve tartalmazza az egyes frekvencia értékeket. Ennek a hátránya, hogy egyszerre a processzornak túl sok műveletet kéne elvégeznie, ahhoz hogy rendelkezésünkre bocsássa a frekvencia spektrumot. Ezért a gyakorlatban a gyors Fourier-Transzformációt (FFT-Fast Fourier-Transform) alkalmazzák. Ez a DFT gyors és hatékony alkalmazására kidolgozott algoritmus. A gyors Fourier transzformációban az adatok csoportokra bontva kerülnek feldolgozásra, emiatt a digitális időjelek számának kettő hatványának kell lennie.



2.2. ábra: Kapcsolat az időjel és a frekvencia spektrum között.

(Forrás: <http://masters.donntu.edu.ua/2008/elt/naftulin/library/picture101.gif>, 2012. november 15. 10:59)

Az FFT-hez szükséges ismeretek részletes bemutatását az 3. számú melléklet tartalmazza.

2.2.2 Mérési pontosság, FFT felbontás

A spektrumkép maximális frekvenciájának és az FFT sávok darabszámának a hányadosa a spektrumkép felbontását adja meg. Ha nagyobb felbontást szeretnénk elérni állandó frekvenciasáv mellett, az FFT vonalszámát kell növelnünk. Ha a vizsgálandó jel

várható legmagasabb frekvenciája jóval kisebb, mint a spektrumsáv frekvenciája, akkor a spektrumsáv felső frekvenciájának csökkentésével érhetünk el felbontás növelést.

A frekvencia felbontást zoomolással is javítani lehet. Kétféle zoomolást lehet megkülönböztetni. Amikor az FFT elvégzése előtt állítjuk be a zoomolást, akkor valóságos zoomolásról beszélünk, ha FFT után zoomolunk, akkor csak képernyőhöz nagyítjuk ki. Ezt nevezik látszólagos zoomolásnak. ([3] alapján)

2.3 Frekvencia analízis White-féle szabályai ([1] alapján)

Ha megkaptuk a folyamatos időjel diszkrét frekvencia spektrumát, akkor az analízis elvégzése során betartandó szabályok, melyek a Fourier-analízis következményei, a következők:

1. Szabály: A szinuszos időjelnek a spektrumképe elméletileg egyetlen jel, ami a szinuszos jel frekvenciájával egyezik meg.
2. Szabály: Időben periodikus jelek spektruma harmonikusokat is tartalmaz.
3. Szabály: Egy impulzus jel, illetve véletlenszerű zaj spektruma szélessávú és folytonos.
4. Szabály: Az amplitúdó és frekvencia moduláció a spektrumképben oldalsávokat eredményez.
5. Szabály: A lebegés nem eredményez oldalsávokat a spektrumképben.

3 Fejezet: Rezgésmérés alapjai

3.1 A méréshez szükséges adatok ([11] alapján)

Az alkalmazott berendezéseket rangsorolni kell a szerint, hogy a termelési folyamatban milyen szerepet töltenek be. Meg kell határozni azokat a kulcsfontosságú gépeket, amelyek meghibásodása a termelési folyamat szempontjából kritikus. Az egyes berendezésekhez meg kell határozni a mérési ciklusokat.

Ahhoz, hogy az analízis lehető legpontosabb legyen, a berendezések műszaki paramétereinek ismeretére van szükség. Az adatokat két csoportba lehet sorolni. Beszélhetünk objektív és szubjektív információkról.

3.1.1 Objektív gépadatok

- Gép gyártója, típusa, üzemóra állása, utolsó karbantartási időpontja.
- Elérhető rajzok, a berendezés lehető legalaposabb megismerés végett.
- A gép alapozása.
- Hajtómotor teljesítménye, fordulatszáma, csapágyadatok, motor típusa.
- Erőátadás jellege, iránya.
- Tengelykapcsoló típusa, megengedhető szöghibája.
- Szíjhajtás adatai.
- Hajtott egység típusa (szivattyú, ventilátor, hajtómű, stb.) fordulatszáma, csapágyazása.
- Hajtómű esetén fogszámok, csapágyazás.
- Hidraulikus, pneumatikus gépeknél lapátszám.
- A hajtó és hajtott rész kenési adatai.

3.1.2 Szubjektív adatok

A mérés során, a mérési körülmények felméréséből sok esetben fontos következtetéseket lehet levonni. Ezek a megfigyelésen alapulnak. Egyrészt a mérést végző személy tapasztalataiból, másrészt a karbantartó személyzet tapasztalataiból tevődnek össze.

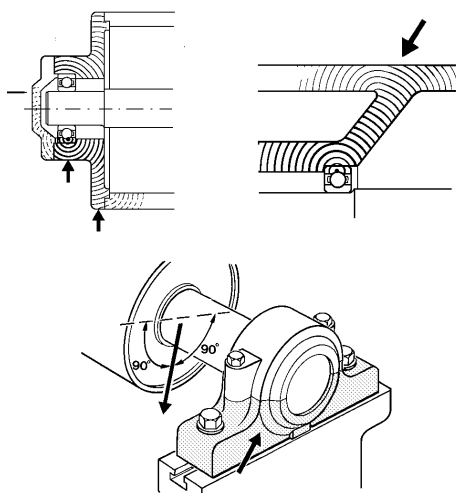
- A mérés helyszínén az üzemeltetés, karbantartás színvonalára utaló jelek, a mérendő gép környezete.

- Karbantartó mennyire ismeri az adott berendezést, milyen információi vannak korábbi meghibásodásokról, karbantartási műveletekről.
- A helyszínen megállapítható nem megfelelő üzemelésre utaló jelek: a berendezésen látható külső sérülés, kenőanyag szivárgása, előregedett gumibakok, fémreszelék a berendezés körül, nem megfelelő géptalp rögzítés, stb.

3.2 Mérőpontok kijelölésének fő szempontjai ([11] alapján)

A berendezés paramétereinek megismerését követően ki kell jelölni a megfelelő mérőpontokat. A kijelölés során körültekintően kell eljárni, ugyan is a rezgések nagymértékben irányfüggők. Arra kell törekedni, hogy lehetőség szerint axiális, vertikális, horizontális irányból is elvégezzük a méréseket. A kijelölt pontokat külön azonosítóval célszerű megjelölni.

Arra kell törekedni a mérési pontok kijelölése során, hogy azok a csapágyazások közelében legyenek. Figyelembe kell venni, hogy különböző alkatrészek egymásra felfekvő határfelületein, akár 80 %-ot is veszíthet a jel az energiatartalmából egy határátlépés során. Több határátlépés során a gyengülési arány $0,2^n$, ahol az n a rezgés forrása és az érzékelő közötti felületek száma. A mérőpont kiválasztásnak három főbb szempontja van:



3.1. ábra csapágyméréskor betartandó fő szempontok.

(Forrás: [9] pp. 5.)

A mérési pontokat úgy kell kijelölni, hogy:

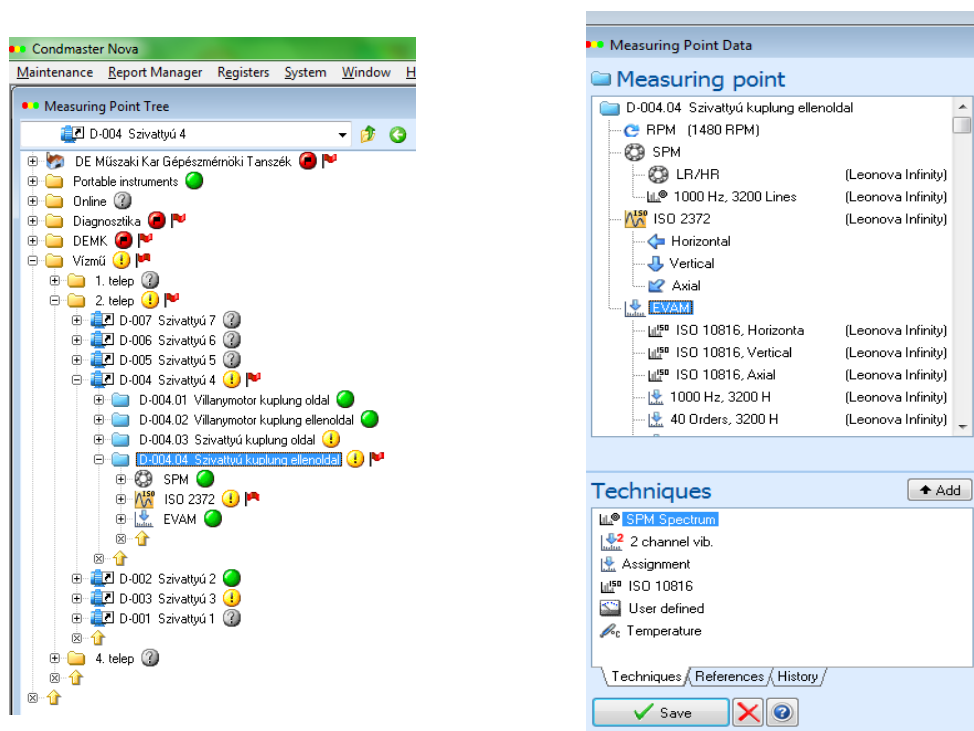
1. A csapágy és az érzékelő között a távolság a lehető legkisebb legyen.
2. A jel csak egyszer lépjen át az anyaghatáron, a csapágy és a csapágyház között.
3. A mérési pontot a csapágy terhelési zónájában kell kijelölni.

A mérés megkezdése előtt a mérőpontot célszerű megtisztítani a szennyeződésektől, illetve ha vastagabb festékréteg fedi a mérőpontot célszerű drótkefével, vagy reszelővel

megtisztítani, ugyanis a nem megfelelően előkészített felület meghamisíthatja a mérési eredményeket.

3.3 Mérőpont beállítása a Condmaster Nova programban

Ha meghatároztuk a mérendő berendezéseket, és kiválasztottuk a megfelelő mérőpontokat a berendezésen, akkor a mérőműszer szoftverében meg kell adni a paramétereket, illetve ki kell választani a megfelelő mérési módszert (Mérési módszerekről bővebben a következő fejezetben.). A mérés végeztével a mérési eredményeket fel kell tölteni a Condmaster programba és a szoftver segítségével a kiértékelés elvégezhető.



3.2. ábra: Mérőpontok és mérési módszerek beállítása a Condmaster Nova programban

3.4 Rezgés és csapágyállapot mérési módszerek az SPM Leonova Infinity-vel ([8], [9], [10] alapján)

Az általam használt SPM Leonova Infinity mérőműszerrel különböző mérési módszerek közül lehet választani, így a berendezést különböző szempontok szerint lehet vizsgálni.

3.4.1 Lökésimpulzus módszer (SPM - Shock Puls Method)

A csapágyak állapotának figyelésére szolgáló módszer. A lökésimpulzus hullámok tranziens jelek, amik intenzitása és gyakorisága közvetlenül meghatározza a károsodás milyenségét és mértékét (kenés állapot, gördülő felület állapota).

3.4.1.1 dBm/dBc mérés

Ez a módszer az úgynevezett „eredeti” SPM módszer, amit a gördülő csapágyak gyors, könnyű és egyszerű diagnosztizálására fejlesztettek ki.

A mérő berendezés által számlált ütésimpulzus gyakoriság alapján három értéket különböztetünk meg:

- Az úgynevezett szőnyeg szint (carpet level) kb. 200 beérkező impulzust tartalmaz másodpercenként. Jelölése: dBc
- A maximum szint a 2 másodperc alatt beérkező legnagyobb amplitúdójú ütésimpulzusokat tartalmazza. Jelölése: dBm
- A kettő különbsége a delta értéket adja (dBm-dBc).

A kezelő beállíthat egy csúcserőértéket a mérési küszöb emelésével mindaddig, amíg nem regisztrál jelet a mérőponton jelet. Az ütésimpulzust decibel skálán méri a műszer az amplitúdó értékek nagy intervallumon való mozgása miatt.

Az ütésimpulzus amplitúdó három alap tényezőtől függ:

- Forgás sebességétől (függ a csapágy méretétől és a fordulatszámától).
- Kenő film vastagságától, minőségétől.
- A csapágy felületének mechanikai állapotától (érdesség, terhelés, felületi sérülések).

A pontos mérés érdekében meg kell adni a csapágy tengelyátmérőjét, és fordulatszámát, ha a fordulatszám nem ismert, akkor külön mérésre van szükség. A program az általunk megadott adatok alapján meghatározza az állapotskála kezdeti értékéhez tartozó ütésimpulzus szintet.

A kiértékelés tapasztalati úton meghatározott szempontok szerint történik. A maximális érték alapján elhelyezhető a csapágy az állapotjelző skálán (zöld-sárga-piros tartomány az állapottól függően). A szőnyeg érték magasságából és a delta érték nagyságából lehet következtetni a csapágy kenetségi állapotára, arra hogy a csapágy jól van-e beszerelve, valamint az egytengelyűsége.

3.4.1.2 LR/HR eljárás

Ez a módszer az előzőnek egy tovább fejlesztett változata. Lehetőséget nyújt a kenőanyag állapot még precízebb analizisére, valamint számítási formulákat tartalmaz az optimális kenőanyag meghatározására, ugyanis a rossz vagy nem megfelelő minőségű kenőanyag gyakran a csapágyak meghibásodásának okozója.

A rezgés átalakító és a mérési eljárás megegyezik az előzőekben leírtakkal, de itt a beérkező ütésimpulzus gyakorisága szerint két másik kategóriát különböztetünk meg:

- HR (high rate): megközelítőleg 1000 impulzus másodpercenként.
- LR (low rate): körülbelül 40 beérkező impulzus másodpercenként.

A HR és LR értékek decibel rezgés értékeket jelentenek (decibel shock value- dBsv).

A LR/HR mérési módszernek több adatra van szüksége a csapágyról, mint a másik eljárásnak. A csapágy tengelyátmérőjén, és a fordulatszámon kívül szükség van a csapágy típusára, egyéb méreteire, ezért célszerűbb a csapágy ISO számát megadni. Az ISO szám kikereshető a Condmasterben (a kiértékelő szoftverben) lévő csapágykatalógusból.

Az elvégzett mérés után a műszer a következő eredményeket mutatja:

- A csapágy állapotra vonatkozó általános állapot (CODE No.).
 - CODE A: Csapágy állapota jó.
 - CODE B: Kenési elégtelenségre utal.
 - CODE C: Csapágy kenése nem megfelelő, fenn áll a károsodás veszélye.
 - CODE D: Csapágy már károsodást szenvedett.
- Kapunk egy értéket a kenőanyag állapotára vonatkozóan (LUB No.). A 0 érték azt jelenti, hogy a csapágy „szárazon” fut. Az számok a kenő film vastagságával együtt nőnek.
- A harmadik érték a csapágy futófelületének állapotát jellemzi (COND No.). A 30 közeli érték már a csapágy sérülését és futófelületének kopását jelzi. Ez az érték a sérülés fokozódásával együtt nő.

A kiértékelő program részét képezi a Lubmaster, ami a kenési állapot értékelését végzi. A rezgés érték és a kenőanyag típusának, viszkozitásának, működési és terhelési hőmérsékletének ismeretében meghatározza a mért állapotnak megfelelő várható működési élettartamot. Ezen kívül meghatározza, hogy milyen hatással bír a csapágy működésére a kenőanyag típusának és viszkozitásának változása.

Az LR/HR eljárás pontossága növelhető a kalibrációs tényező (COMP No.) meghatározásával. Különösen érdekes olyan csapágyaknál, ahol nem tudunk megfelelő mérőpontot választani, vagy a csapágy minimális terhelés mellett üzemel. A csapágykatalógus adatai és a kenőanyag tulajdonsága alapján a Leonova kiszámolja a normális rezgésszintet a jó állapotú csapágyra vonatkozóan és korrigálja a túlságosan alacsony rezgés jeleket a kiértékelés előtt.

3.4.1.3 SPM spektrum

A spektrum célja a magas értékű ütésimpulzusok forrásainak ellenőrzése. A csapágyban keletkező károsodások jellegzetes rezgésképpel jelentkeznek a spektrumban. A dBm/dBc és az LR/HR mérés először egy állapot visszajelzést nyújt számunkra zöld, sárga, piros tartomány valamelyikében. Második érték a frekvencia spektrum, amit az egyes meghibásodások által keltett rezgésekkel (szimptómákkal) hasonlítunk össze. A szimptómákat a Condmaster program tartalmazza csapágytípusokra és meghibásodásokra vonatkozóan. A spektrumvonalak amplitúdója túl sok tényezőtől függ, ezért megfelelő indikátorokat kellett kiválasztani. Erre a célra a dBm vagy a HR érték attól függően, hogy melyik spektrumot vizsgáljuk.

Az amplitúdóra vonatkozó egy egység az SPM spektrumban a rezgés eloszlás egység (SD-Shock Distribution unit). Minden egyes spektrum be van skálázva, úgy hogy a teljes RMS értéke az összes spektrumvonalnak 100 SD. Egy másik lehetőség a rezgés szint egység (SL- Shock Level unit) használata, ami az RMS értéke a frekvencia komponensekhez tartozó amplitudóknak, decibelben.

A hibák megfelelő felismeréséhez elengedhetetlen a csapágy adatainak ismerete, valamint a fordulatszám mérése. A csapágy ISO száma alapján kikereshető a csapágykatalógusból a vizsgálandó alkatrész. Így a csapágy minden méréshez fontos paramétere kellő pontossággal kerül betáplálásra.

Kiértékeléskor a felhasználó választhat a szimptómák közül, attól függően, hogy melyik terület meghibásodására gyanakszik. Ha a rezgés spektrumára tisztán ráillik a tünet, akkor megbizonyosodhat a rezgést okozó hibáról.

3.4.2 Rezgésmérés módszerei

Rezgésméréskor minden lehetséges irányban mérni kell (horizontális, vertikális, axiális irány). A dokumentálhatóság és a reprezentálhatóság érdekében minden mérési pontot azonosítóval kell ellátni. Ezeket a pontokat közvetlenül a csapágyháznál vagy a

jel keletkezésénél kell kialakítani lehetőség szerint. A méréspontok kijelölésének feltételei megegyeznek az ütésimpulzus mérésnél leírtakkal.

Egyes mérőpontok frekvencia értékéhez hozzá kell rendelni a szabványban meghatározott jó, kielégítő, nem kielégítő és elfogadhatatlan értékeket, amiket mm/s-ban adnak meg. A rezgésmérési gyakorlatban az ISO 2370-es és az ISO 10816-os szabványt alkalmazzák.

3.4.2.1 ISO 2372 alkalmazása

A Leonova rezgésmérő készülék egy alapfunkciója a szabvány szerinti mérés. A szabvány jellemzői a következők:

- A gépek állapot analízis alapja a szélessávú frekvencia tartományhoz (10-1000 Hz) rendelt rezgés sebesség RMS értéke.
- A gépeket a szabvány hat rezgéscsoportba sorolja.
- A táblázat az összes géposztály szerint tartalmazza a határértékeket, különbséget téve a megfelelő (zöld), a nem kielégítő (sárga) és az elfogadhatatlan (piros) gépállapotok között.
- A mérést három irányban, horizontálisan, vertikálisan, valamint axiálisan kell elvégezni. A legnagyobb visszatérő érték határozza meg a gép állapotát.
- Az állapotosztályok közötti átlépési szintet a program automatikusan megadja, amikor a megfelelő géposztályt kiválasztjuk a mérési pont beállításakor.

([5] alapján)

Limits	Class I	Class II	Class III	Class IV	Class V	Class VI	mm/s ² RMS
71							100
45							50
28							20
18							10
11							5
7,1							2
4,5							1
2,8							0,5
1,8							
1,1							
0,7							
0,5							
0,3							

3.3. ábra: Táblázat a berendezések csapágy állapotának értékeléséhez

(Forrás: <http://www.spminstrument.com/data/pdf/td/TD225B.pdf>, 2011.11.16. 13:11)

3.4.2.2 ISO 10816 alkalmazása

Ez a szabvány 2372-es egy átdolgozott, kibővített verziója. Az ISO 10816 az ISO 2372-től a következőkben tér el:

- Az alsó frekvencia tartományt rugalmasan kezeli 2-10 Hz között a gép minőségétől függően.
- Az RMS érték lehet sebesség, gyorsaság és elmozdulás. Ha kettő vagy több, ezek közül a paraméterek közül meg van mérve, akkor a rezgés súlyosságát a legnagyobb visszatérő effektív érték határozza meg. Egyes gépek esetén az ISO 10816 „csúcstól-csúcsig” (peak-to-peak) értéken alapuló kiértékelést is tud.
- Ebben a szabványban az egyes gép kategóriákon belül további kategorizálásra van lehetőség.

([6] alapján)

A Leonova mérő műszer 1600 vonalas spektrumot biztosít a precíz kiértékeléshez.

Table 3. ISO 10816 Chart

Vibration Velocity IPS (RMS)	Group 4 Integrated Driver		Group 3 External Driver		Group 2 Motors 160 ≤ H < 315 mm		Group 1 Motors H ≥ 315 mm	
	Rigid	Flexible	Rigid	Flexible	Rigid	Flexible	Rigid	Flexible
0.71								
0.43								
0.28								
0.18								
0.14								
0.11								
0.09								
0.06								
0.03								

3.4. ábra: Géposztályok és rezgésre vonatkozó határértékeik az ISO 10816-ban

(Forrás: http://www.reliabilitydirect.com/images/ISO_10816.gif, 2011. november 16. 13:18)

3.4.2.3 EVAM (Evaluated Vibration Analysis Method)

Az EVAM a mért rezgések kiértékelésére szolgáló program rész a Condmaster-ben. A módszer generál három, a gép állapotának megfelelő adatot:

- Állapotjellemzőket, amik mért és számított értékek. Ezek alapján jellemzik a gép rezgéseit különböző szempontok szerint.
- Rezgés frekvencia spektrum kiemelkedő vonalainak mintázatára illeszthető szimptómák segítenek a kiértékelésben.
- Az előző kettő alapján meghatározott állapot kódot, (zöld, sárga, piros) és az állapotot jelző értéket szolgáltatja számunkra a program.

Minden mérési pontnál a felhasználó egyénileg kiválaszthatja és beállíthatja a gép állapotának figyelésére leginkább alkalmas adatokat. A lehetőségek tartalmazzák:

- burkoló görbét
- egyidejű átlagolást
- figyelmeztetési szintek beállítását

Állapot paraméterek

- ✓ VEL: a rezgésebbesség a mért frekvenciákon. Ez az 1000 Hz alatti frekvencia tartományban nagyobb pontossággal használható.
- ✓ ACC: rezgésgyorsulás a teljes frekvencia tartományban alkalmazható, kimondottan 1000 Hz felett.
- ✓ CREST: Csúcsstényező, a csúcsértékek és az effektív rezgésebbesség hányadosa, a normálértéke 1,4-3 között mozog (szinusz vonal 1,414 csúcsstényezővel rendelkezik).
- ✓ SKEW (skewness): a rezgésebbesség harmadik statisztikai eleme. Kifejezi a szimmetrikus jelek csoportosulását a középérték körül. Tökéletes szimmetria esetén 0, növekvő aszimmetria esetén az eltávolodástól függően pozitív irányba nő vagy negatív irányba csökken az érték.
- ✓ KURT (kurtosis): a rezgésebbesség negyedik statisztikai összetevője. A középérték köré csoportosuló tranziens rezgéseket írja le. Az érték akkor nő, ha a jel szűnik.
- ✓ NL1-NL4 (nois level): megmutatja a zajszintet 0-1000 Hz-es tartomány négy részében (NL1: 0-250 Hz, NL2: 250-500 Hz stb.).

Spektrumelemzés

A könnyebb kiértékelés végett az EVAM a spektrummintázat szerint előre meghatározott szimptómákat tartalmaz. A tünetet a spektrumra illesztve láthatjuk. A meghibásodott berendezés rezgéseinek frekvenciáihoz tartozó RMS értékek összegét, mint egy szimptóma paramétert megjelenít a kiértékelő program.

A Condmaster-ben be lehet állítani figyelmeztetési szintet minden aktív paraméterhez. Az összegyűjtött mérési eredmények alapján meghatározható a paraméterek figyelmeztetési értékei.

3.4.2.4 Fázisszög mérés

A fázis, az idő eltolódását fejezi ki elfordulás fokban. A mérőműszer kiszámolja a jel időkésedelmét a tachométeren áthaladás és a frekvencia komponens csúcsa között a rezgésérzékelőtől indulva, fordulatszámban kifejezve. A kapott érték egy relatív szög, nem pedig abszolút érték, mert nincs kompenzációs tényező a fáziskésésre vonatkozóan a jelátalakítóban vagy az elektromost áramkörben.

Két csatornás rezgésmérés

Ennek a funkciónak az alkalmazása vagy az EVAM-ot tartalmazó mérés keretében vagy az „FFT szimptomákkal” mérés keretében lehetséges. Az utóbbi megkívánja az idő szignál mérését is, ahhoz hogy kijelezze és mentse az időtartományt. Ez a típusú mérés lehetővé teszi a felhasználó számára, hogy tanulmányozza a berendezés rezgéseit egyszerre két irányból történő mérés esetén, így megfigyelhető a két irányból mért rezgések közötti fázisszög különbség. Egy elosztó kábellel kell csatlakoztatni a két rezgésérzékelőt a műszerrel.

A mérést követően a mérőműszer és a Condmaster program is megjeleníti a rezgésgyorsulás, sebesség, elmozdulás RMS értékét mind a két csatornára vonatkozóan. Három különböző grafikus megjelenítést tesz lehetővé:

- A két rezgés együttes spektrumát.
- A rezgések egymáshoz viszonyított fázisszög eltérését.
- Időjel grafikus megjelenítését

A két rezgés különböző (piros és kék) színnel van feltüntetve az ábrákon az egyszerűbb kiértékelés végett.

3.4.3 Egyéb alkalmazások a Leonova műszerben

A műszerrel lehetőség van felfutás/lefutás (Run up/Coast down) teszt elvégzésére, valamint kalapácsütés teszt (Bump test) alkalmazására. Az előbbi eljárás a gép sajátfrekvenciájának meghatározására alkalmas a felfutási és lefutási időszak vizsgálatával. A kalapácsütés tesztet arra lehet használni, hogy megismerjük a berendezés sajátfrekvenciáit álló, nem üzemelő állapotban.

Leonova műszerben lehetőség van arra, hogy megvizsgáljuk a forgó tengelyek bolyongását, valamint a kiegyensúlyozást igénylő berendezés balanszírozásához nyújt segítséget.

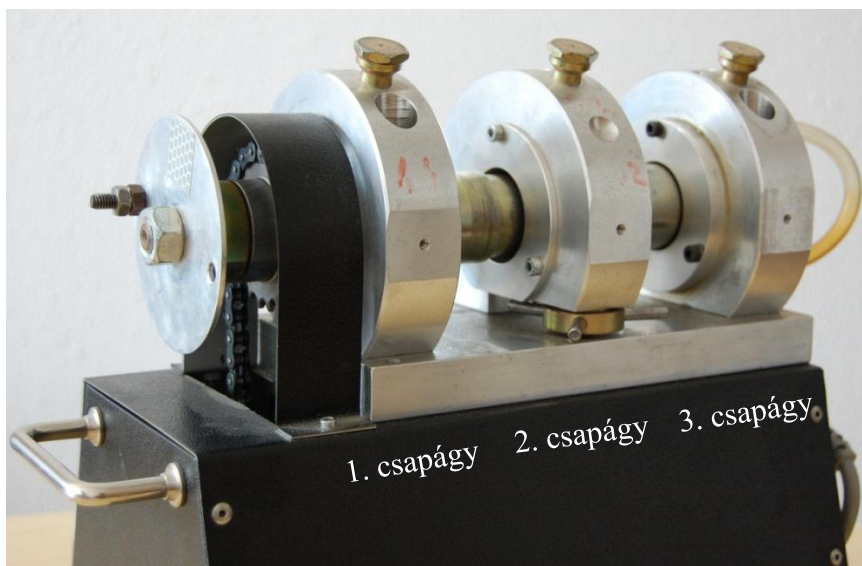
Lézeres kiegészítő egység csatlakozásával képes a műszer megvizsgálni az egytengelyűség problémáját.

4 Fejezet: Mérési eredmények bemutatása

Három különböző berendezés típuson végeztem méréseket. Az első berendezés egy kísérleti, tapasztalatszerzési célokat szolgáló próba pad volt. Majd ezt követően lehetőségem nyílt a Debreceni Vízmű Zrt. t szennyvíztelepén és ivóvíz kitermelő telephelyein is méréseket végezni. A szennyvíztelepen az iszapsűrítésre és víztelenítésre használt centrifugákat mértem. Az ivóvíz kitermelő telephelyeken az ivóvíz hálózatba betápláló szivattyúkon végeztem rezgés és csapágyállapot méréseket.

4.1 SPM Rig Dem 20/21-es próbapad

A rezgésdiagnosztikai vizsgálataimat az SPM Rig DEM 20/21-es próbapadon kezdtem. A próbapad gyakori meghibásodások szimulálására szolgál, mint például kiegyensúlyozatlanság, csapágy ház lazaság, csapágy kenetlenségi probléma.



4.1. ábra: SPM Rig DEM 20/21-es próbapad.

A próbapad villanymotorja, lánchajtással hajtja meg a tengelyt, amit három különböző csapágy van elhelyezve. A berendezés 1100 fordulat/perc, azaz 18,33 Hz-en üzemel. A csapágyak típusai balról jobbra haladva:

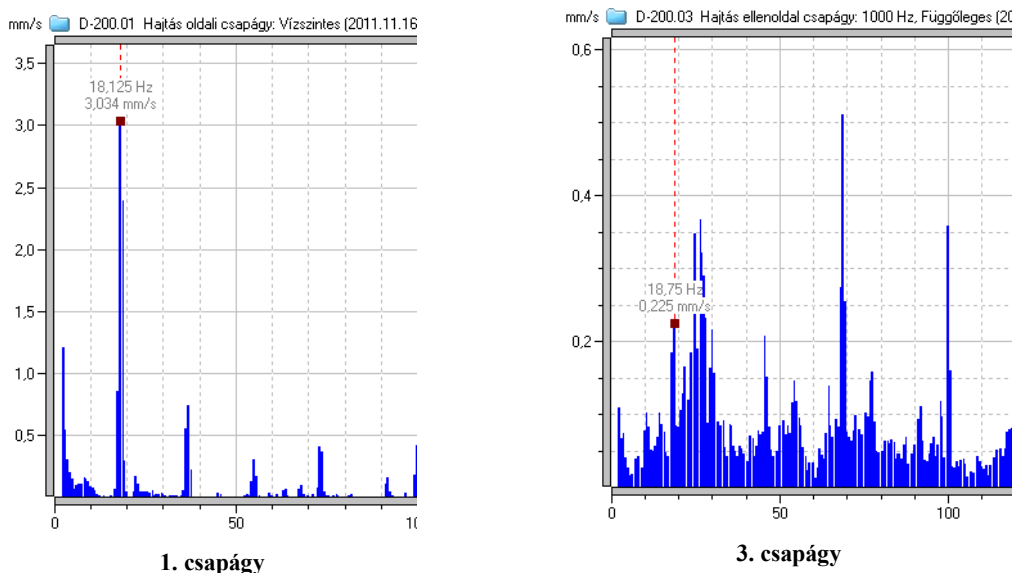
- Az első számmal jelzett csapágy közvetlenül a meghajtás mellett található. Ezen a helyen egy 6205-ös SKF golyóscsapágy dolgozik.
- Második, a középső csapágy, amiben a forgó elemek görgők. Ez egy NJ205E.TVP Timken típusú görgőscsapágy.
- Az utolsó (3.) csapágy szintén görgős, de ennek a kenése olajjal van megoldva. Típusa NU205 SKF görgőscsapágy.

A próbapadon a meghajtás felőli oldalon található alumínium korong és a raja elhelyezhető csavar célja a kiegyensúlyozatlansági probléma előidézése. A középső csapágyház alatt található csavar funkciója a csapágyház lazaságának változtatása. A hajtás ellenoldali csapágy esetében különböző kenőanyagok kipróbálására van lehetőség.

4.1.1 Mérési eredmények kiértékelés

4.1.1.1 Kiegyensúlyozatlansági probléma vizsgálata

A vizsgálatot először a csavar felhelyezése nélkül végeztem el. Megmértem az 1. és 3. csapágyat ISO 10816, ISO 2372 és EVAM szerint. Azt tapasztaltam, hogy a rezgésebesség értékek megfelelően alakultak, a szabvány szerinti besorolásnak eleget tettek. Ugyanakkor kiegyensúlyozatlansági problémára utaló spektrumkép (magasabb értékek a forgási frekvencián) mutatkozott az 1. csapágnál.

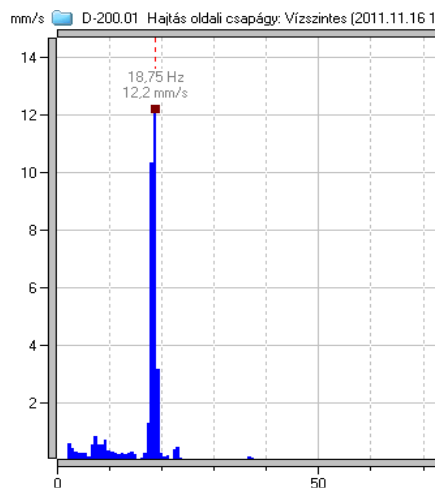


4.2. ábra: Csavar nélkül mért rezgésspektrumok képei

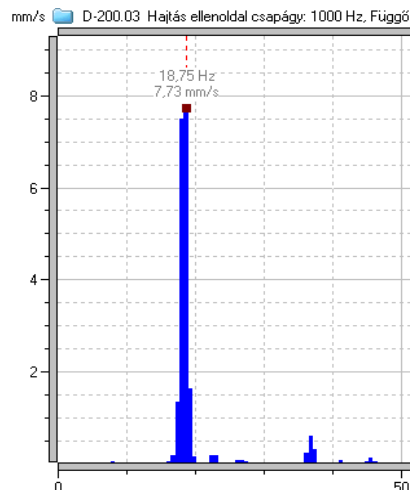
A fenti ábrákat megnézve, azt láthatjuk, hogy a 3. csapágyon mért eredmény, úgy tűnik, mintha 75 Hz környékén probléma jelentkezne. Ez abból adódik, hogy az y tengely maximális beosztása igen alacsony és valójában, amit látunk, az jelentéktelen rezgésebességgel jelentkezik.

Összehasonlítva a két ábrát azt tapasztaljuk, hogy a meghajtás felőli csapágyon mért rezgésérték jóval magasabb, mint a meghajtás ellenoldali csapágyon mért rezgésebesség. Ebből arra következtethetünk, hogy minél távolabb végezzük a mérést a probléma forrásától annál kisebb lesz annak az értéke.

A csavart elhelyezve az alumínium tárcsán, az előzetes elvárásnak megfelelően azt tapasztaltam, hogy mind a két csapágyon jelentősen megnövekedtek a rezgésértékek. Az ISO 10816-os szabvány szerinti besorolás értelmében, ebben az esetben a berendezés rezgése olyan mértékű, hogy azt ipari körülmények között azonnal le kellene állítani, mert további súlyos meghibásodásokhoz vezetne.



1. csapágý

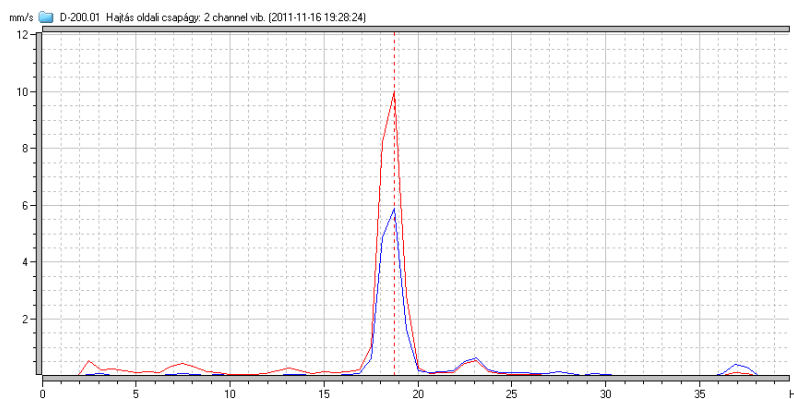


3. csapágý

4.3. ábra: Csavar felszerelése után mért rezgésspektrumok.

Látható, hogy a rezgésebesség értékek jelentősen megnövekedtek a kiegyensúlyozatlanság következtében a forgási frekvencián. A piros szaggatott vonal a kiegyensúlyozatlansági probléma szimptómáját jelöli, ami ebben az esetben pontosan illeszkedik a magas csúcsokra.

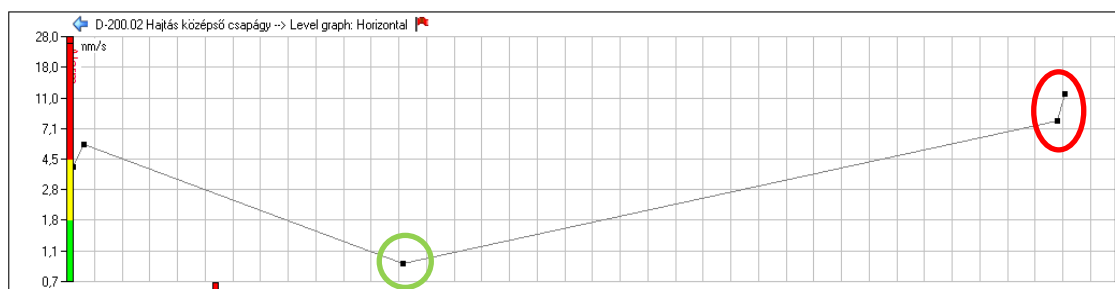
Kétcsatornás rezgésméréssel, mérve az tapasztaltam, hogy a spektrumban azonos fázisban vannak a horizontális és vertikális rezgésértékek. Valójában 90°-os fázisszög eltérés lenne, de mivel a az érzékelők 90°-os szöget zártak be egymással, így a spektrum igazolja, hogy a magas rezgésértékek azonos ponton jelentkeznek.



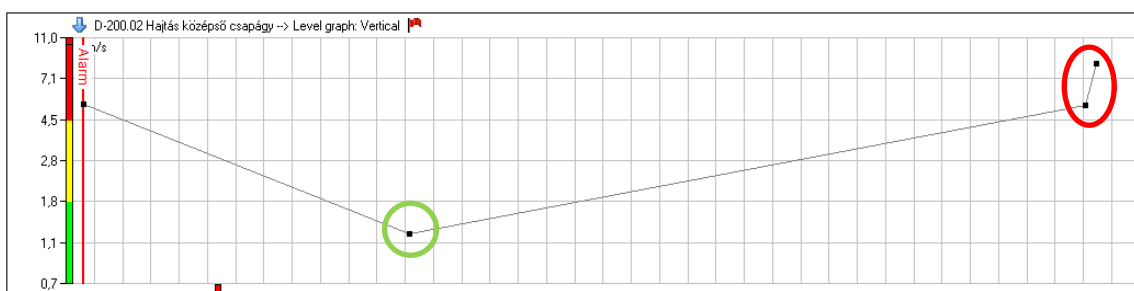
4.4. ábra: Kétcsatornás rezgésmérés
(piros: vízszintes irányú rezgés, kék függőleges irányú rezgés)

4.1.1.2 Középső csapágó vizsgálata

A 2. csapágón a csapágház különböző feszessége mellett végeztem méréseket. Az első mérés alkalmával a csapágház optimális feszessége mellett mértem ISO 2372 szerint. Azt tapasztaltam, hogy vízszintes és függőleges irányban is megfelelően kis rezgésebesség értékek adódtak, így „zöld” értékelést kaptak. Ez az alábbi ábrán zöld karikával van jelölve.



Horizontális irányú rezgések értékei



Vertikális irányú rezgések értékei

4.5. ábra: Középső csapágó rezgésértékei

A csapágó ház lazítását követően a rezgésértékek mind a két irányban ugrásszerűen megnöttek. További lazítást követően lehet látni bizonyos mértékű rezgésebesség emelkedést, de már nem olyan jelentős mértékűt, mint az első esetben. Az ábrán ezeket a megnövekedett szinteket a szabvány színekódjának megfelelően és is pirossal emeltem ki.

4.2 Centrifugák mérése a Debreceni Vízmű szennyvíztelepén

4.2.1 A szennyvíztisztító telep jellemzői

A Debreceni Vízmű szennyvíztisztító telepén 2009-ben bővítési beruházásba kezdtek az ISPA program keretén belül, amivel 2011 tavaszára végeztek. Ennek köszönhetően a szennyvíztisztító telep kapacitása száraz időszakban 60 000 m³/nap-ra növekedett.

Csapadék, zápos esetén, ha meghaladja a beérkező szennyvíz térfogatárama az 5 000 m³/óra értéket, akkor a homokfogón kialakított záporvíz buktatón kerül leválasztásra, majd a záporcsatornán keresztül két darab egyenként 15 000 m³ térfogatú csapadékvíz tározóba jut. Az esőzés elmúltával a tározóban levő szennyvíz visszavezetésre kerül a fogadóaknába, így biztosítva, hogy a befogadóba ne jusson tisztítatlan szennyvíz. Összességében a csapadékos időszak esetén a biológiai tisztítás kapacitása 120 000 m³/nap. A tisztított szennyvizet a Tóció csatornába vezetik, ami egy időszakos vízjárású vízfolyás.

	Nyers szennyvíz		Előüleptített szennyvíz	
	<i>g/m³</i>	<i>kg/nap</i>	<i>g/m³</i>	<i>kg/nap</i>
KOI_{kr}	1.283	77.000	834	50.050
BOI₅	675	40.500	472	28.350
NH₄-N	105	6.270	105	6.270
öP	16	982	13	883
Lebegő anyag	420	25.125	210	11.500

4.1. Táblázat: Összes nyers szennyvízterhelés

A szennyvíztisztítóból kikerülő szennyvíziszap a Lovász-zugi és Tóció-Kösely menti oxidációs tőrendszerekben kerül elhelyezésre. A Tiszántúli Környezetvédelmi, Természetvédelmi és Vízügyi Felügyelőség a 3639/592/2001 számú határozatában foglaltak szerint meg kell oldani a kiszáradt szennyvíziszap felporzását. Ezt a tisztított szennyvíz rátáplálásával valósítják meg. ([16] alapján)

4.2.2 Alkalmazott gépészeti berendezések

A telephelyen különböző nagy teljesítményű berendezéseket alkalmaznak, melyeknek a megfelelő színvonalú folyamatos üzemelése elengedhetetlen a szennyvíztisztítási műveletek során. Egy esetleges komoly meghibásodás következménye súlyos környezeti károkat okozhatna.

A szennyvíztisztítási technológiákban alkalmazott gépészeti berendezések nagy többsége forgó alkatrészeket tartalmaz. Általában az ilyen típusú berendezések esetén a csapágyazás a legérzékenyebb pontja a gépezetnek, ezen alkatrészek mennek tönkre a leghamarabb, ezért elengedhetetlen a rendszeres vagy időszakos vizsgálatuk. A vállalat számára a diagnosztika berendezések beruházása hosszú távon gazdaságilag kedvezőbb, mint esetlegesen bekövetkező tönkremenetelt követően a berendezés lecserélése.

Biztonsági okokból a szennyvíztelepnek minden kulcsfontosságú berendezésből van tartalék, arra az esetre, ha váratlan meghibásodás következne be. Ugyanakkor ezeknek a gépeknek is napra kész állapotban kell lenniük.

A szennyvíztisztító telepen használt főbb berendezések:

- **Iszapvíztelenítő centrifuga** (3 db): Hiller DT 54-422 ($Q_{\max}=45\text{m}^3/\text{óra}$) típusú centrifuga és végzi a víztelenítést. Maximális fordulatszám 3200 fordulat/perc. A dobot forgató motor 55 kW, a csigát forgató 18,5 kW teljesítményű.
- **Iszapsűrítő centrifuga** (3 db): 2 db Hiller DT 58-422 típusú centrifugán ($Q_{\max}=70\text{ m}^3/\text{óra}$), melynek maximális fordulatszáma 3100 fordulat/perc és a dobot forgató motor 90 kW, a csigát forgató motor 11 kW teljesítményű, valamint 1 db Hiller DT 54-422 ($Q_{\max}=45\text{m}^3/\text{óra}$) centrifugán történik a sűrítés.
- **Légbefúvó az új biológiai tisztító egységhez** (6+1 db): DELTA BLOWER Generation 5 (GM S-G5) típusú befúvó. A befújás teljesítménye $5418\text{ m}^3/\text{h}$, a motor teljesítménye 200 kW.
- **Gázmotorok:** Jenbacher típusú gázmotorokat alkalmaznak a keletkező biogáz elégetésére.
- Valamint a telephelyen különböző típusú és teljesítményű szivattyúkat használnak.

([16] alapján)

4.2.3 Felmerülő kockázatok

A szennyvíztisztítás során, a telepen a technológiából adódóan különböző kockázatokkal kell számolni.

- A szennyvíztelep kapacitását meghaladó mennyiségű szennyvíz beérkezése a telepre, melynek következtében a gyűjtőmedencéből kiönthet a szennyvíz.
- Számos különböző típusú szivattyúkat használnak a szennyvíz tovább juttatására a technológiai egységek között. Ezek meghibásodása a tisztítási folyamatokban zavart kelthetnek, valamint ha a nagyobb teljesítményű szivattyú hibásodik meg vagy áll le, akkor az adott medencében a szennyvíz túltöltődhet, majd kiönthet.
- A szennyvíz és az előkezelt víz a kezelési fázisok között csővezeték rendszeren keresztül közlekedik. A csővezeték rendszerben keletkezett sérülés a még szennyezett víz talajba jutását eredményezheti.
- A gépészeti berendezések meghatározott zaj és rezgés szint mellett működnek. A berendezések meghibásodása ezen szintek növekedéséhez vezethetnek, ami a

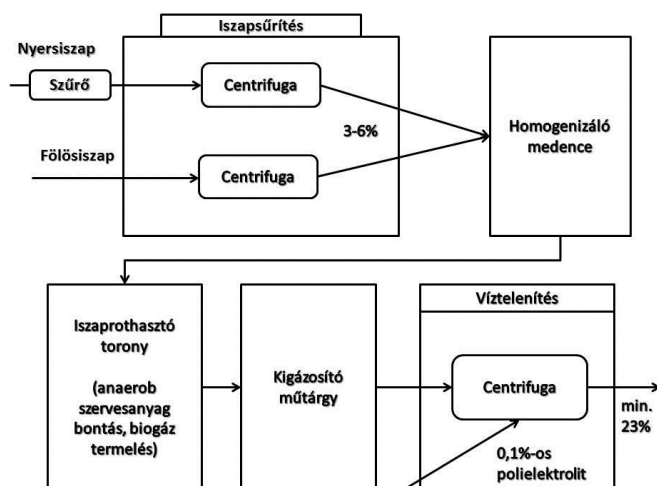
környezet számára túlzott zajterhelést jelenthet, illetve a megemelkedett rezgésszint következtében a telep műtárgyainak szerkezete gyengülhet.

- A szennyvíziszap sűrítő és víztelenítő centrifugáknak fontos szerepük van az iszapkezelési folyamatokban. Céljuk az iszap szárazanyag tartalmának növelése, amely meghatározza a további iszapkezelési eljárások hatékonyságát, valamint a tisztítás gazdaságosságát. A debreceni szennyvíztelepen folyamatos üzemű, csigás ürítésű ülepitő centrifugákat alkalmaznak. (6. Melléklet)

A nyers (előülepitőből elvezetett iszap) és a fölősiszapot (utóülepitőből elvezetett iszap) külön csővezetéken vezetik a centrifuga gépházba, ahol külön berendezéseken megy végbe az iszap sűrítése. A megkívánt szárazanyag tartalom 4-6%. A sűrített nyersiszap és fölősiszap a homogenizáló medencébe kerül, és a továbbiakban innen történik az iszap feladása az iszaprothasztó tornyokba. A rothasztókban a szervesanyag lebontása megy végbe anaerob körülmények között, baktériumok segítségével. Ezt követően a stabilizált iszap a kigázosító medencékbe jut, ahol folyamatos keverés segíti elő a kigázosítást. Az iszapvíztelenítő centrifugákra szivattyú adja fel a 2-3% szárazanyag tartalmú iszapot, amelyhez 0,1%-os polielektrolitot adagolnak a centrifugálás hatásfokának növelése céljából. Az így kapott iszap szárazanyag tartalma kb. 25%. A terméket konténerbe gyűjtik, majd a hulladékgazdálkodó vállalat, komposztálással végzi el a teljes ártalmatlanítást.

Látható, hogy a szennyvíziszap sűrítésének minősége egyrészt közvetlenül befolyásolja a tisztítási folyamatokat, másrészt a nem megfelelő tisztítás következtében a szennyvíziszapban maradó szennyezőanyagok, kórokozók (PCB, PAH, baktériumok, vírusok, nehézfémek stb.) a további hasznosítás során problémákat okozhatnak.

Ezen tényezők kivédése céljából a szennyvíztisztító telep túl van bebiztosítva. Minden berendezésből az szükségesnél többel rendelkeznek, az esetleges meghibásodások okozta veszélyek kivédése céljából! ([16] alapján)



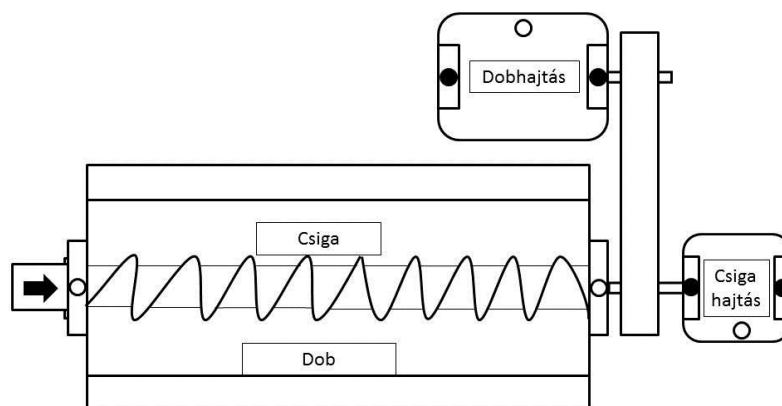
4.6. ábra: Iszapvonal a szennyvíztelepen

4.2.4 Iszapsűrítő és-víztelenítő centrifugákon végzett mérések



4.7. ábra: Sűrítő berendezések

A mérés menetét és a mérendő pontokat előre megterveztem a Condmaster szoftver segítségével. A centrifugákon ISO 10816 és ISO 2372 szerint rezgést, valamint csapágy állapotot mértem.



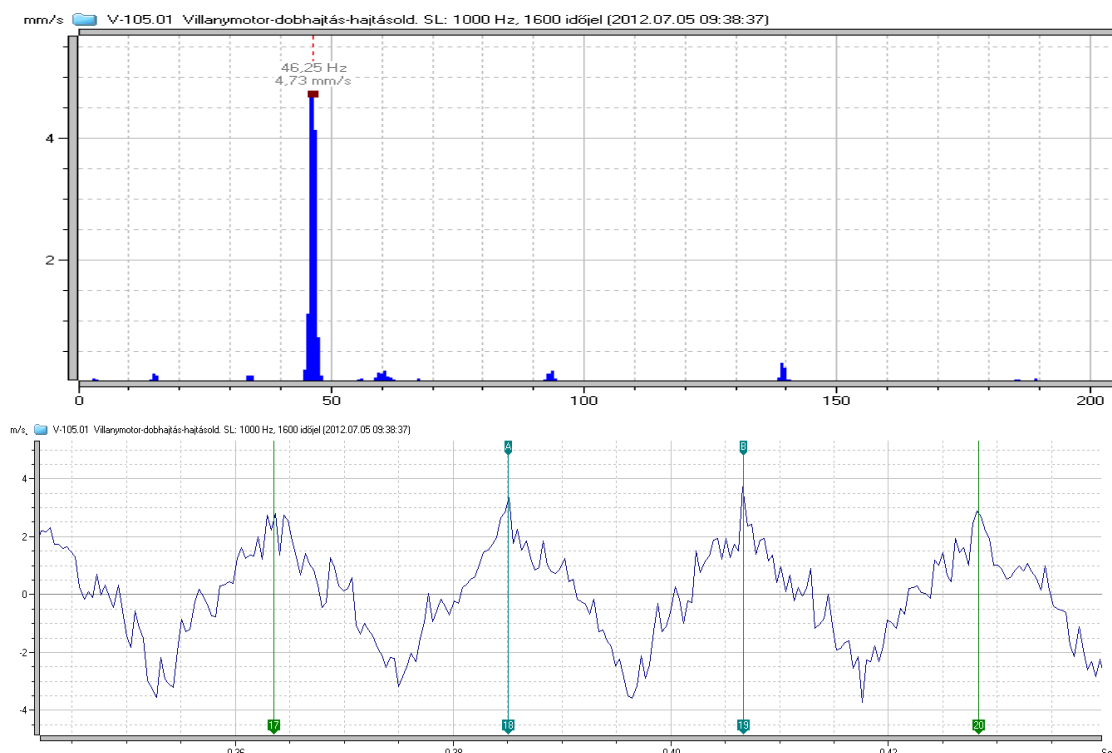
4.8. ábra: A centrifugán kialakított mérési pontok

Mérési pontok:

- A feketével jelölt pontokon csapágy állapot mérést végeztem az SPM módszerrel.
- A fehérrel jelölt pontokon a berendezés egyes elemeinek rezgésmérését végeztem el a szabványok szerint.

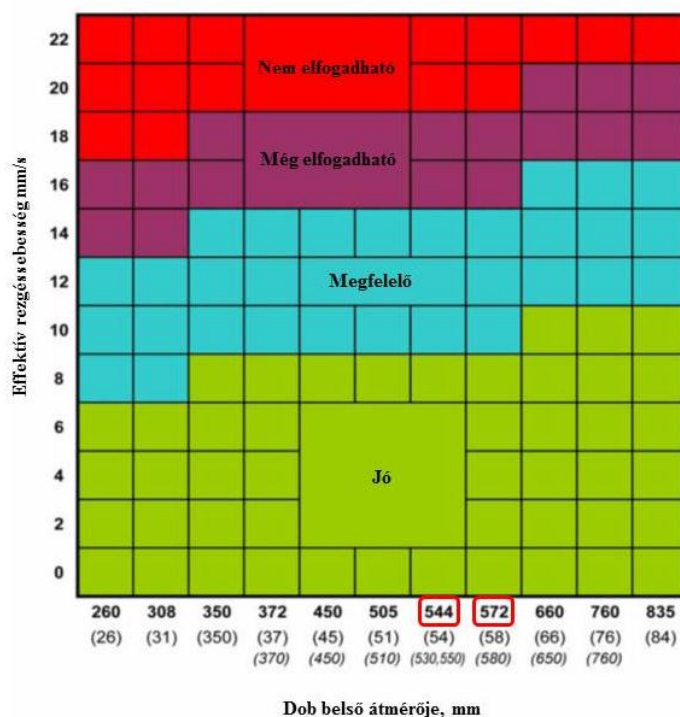
4.2.5 A mérésekből levonható következtetések

A centrifuga működési elvéből adódóan, a berendezés minden pontján észlelni lehetett a rezgésspektrumokban a dob forgási frekvenciáján kiugró rezgésebbesség értékeket. Ennek oka, hogy a berendezés belsejében az iszap eloszlása nem egyenletes. A spektrumkép jellege kiegyensúlyozatlanságot mutat. Ahogy az 5.11. ábrán is látható az időjel szépen adja a forgási frekvencián (Az ábrán bemutatott 1-es víztelenítő forgási frekvenciája 46,25 Hz) a „szinuszos” periodicitást.



4.9. ábra: Kiegyensúlyozatlanság tipikus spektruma és időjele.

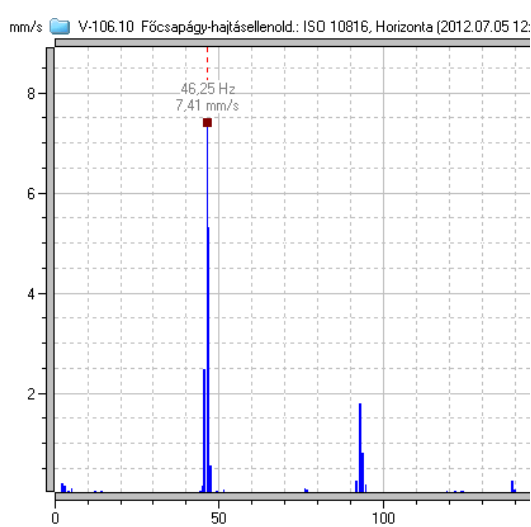
Ugyan az ISO 10816-os szabvány szerint a mér rezgésebbesség értékek a nem megfelelő kategóriába tartoznának, valójában a gép speciális funkciója miatt a magas értékek nem jelentenek problémát. A centrifugához meghatározták a rezgésebbesség tartományokat, amelyek táblázatba foglalva az üzemeltetési útmutató tartalmaz.



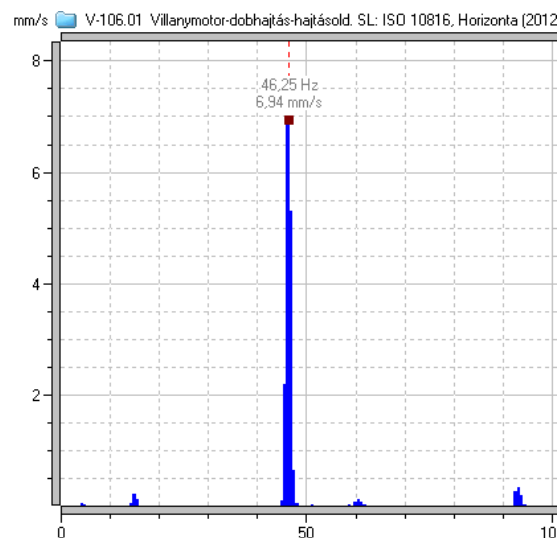
4.10. ábra: Megengedett rezgéssebességek a centrifugákon (Víztelenítő: 544, Sűrítő: 572)

(Forrás: Hiller, Üzemeltetési útmutató

DT580002-51-00HU)

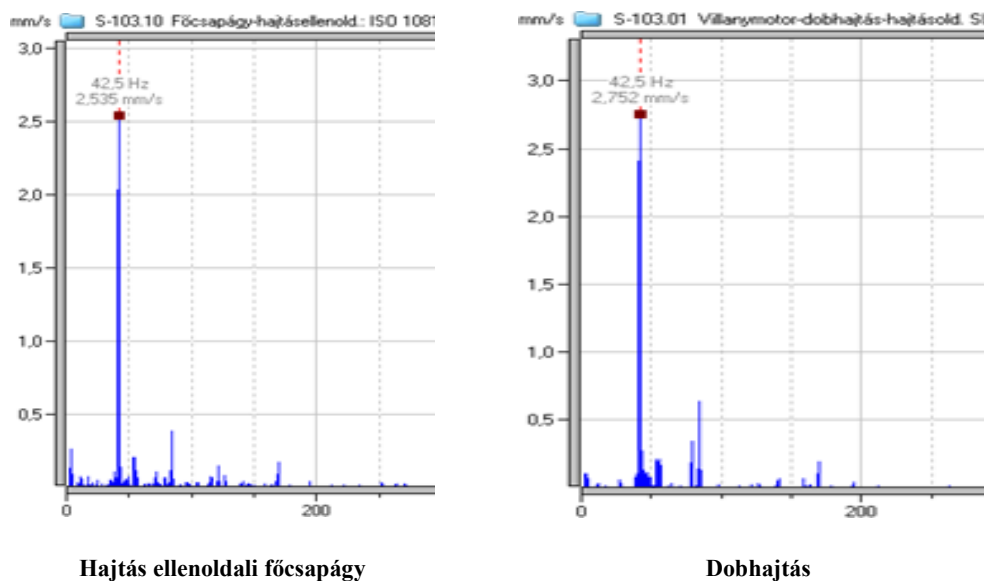


Hajtás ellenoldali főcsapágy



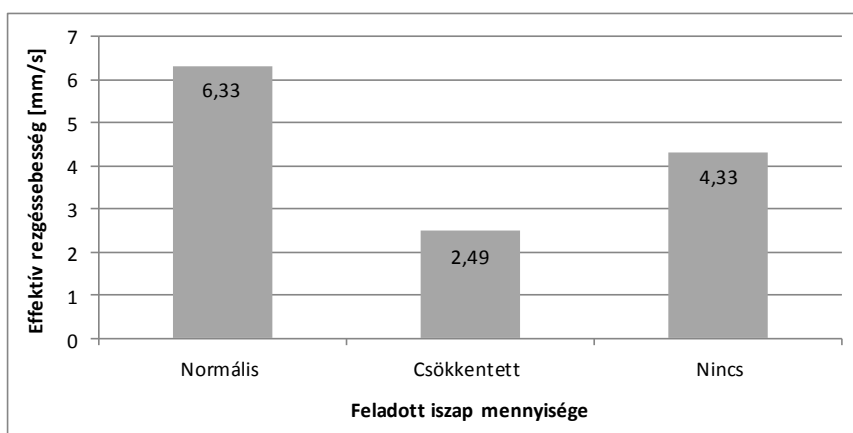
Dobhajtás

4.11. ábra: Rezgésértékek a víztelenítő centrifugán, horizontális irányból a forgási frekvencián (46,25 Hz))



4.12. ábra: Rezgésértékek sűrítőcentrifugán, horizontális irányból a forgási frekvencián (42,5 Hz).

Az 5.13.-es ábráról leolvasható, hogy a berendezés mind a két végén, azonos iszapfeladási mennyiségek mellett megközelítőleg azonos rezgésebesség értékek adódtak. Ugyanakkor megfigyelhető, hogy a feladott szennyvíziszap függvényében változik a rezgés.



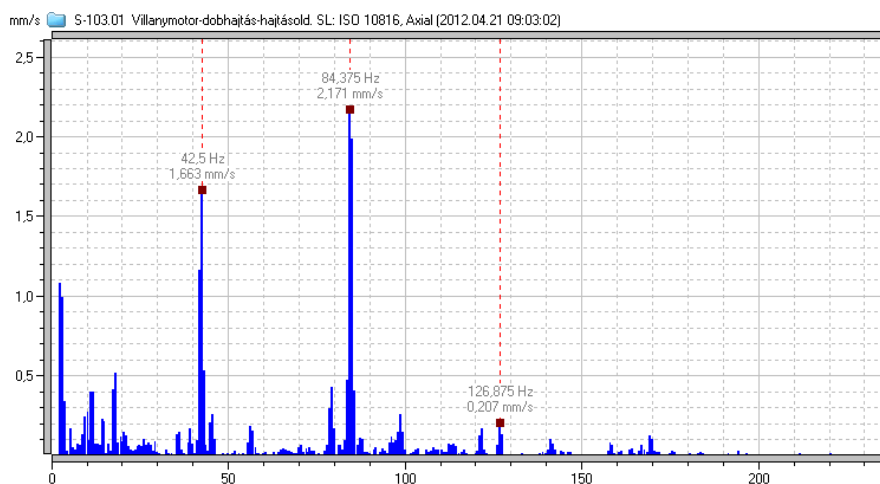
4.13. ábra: Horizontális irányú rezgések az iszapsűrítőn

A várt eredménnyel ellentétben az iszap mennyiségének csökkenése nem eredményezte a rezgések nagyságának azonos mértékű csökkenését. Ennek oka, hogy amikor csökkentett mennyiségű iszappal működött a centrifuga egyenletes iszapréteg tudott kialakulni a dob felületén, aminek a következtében a berendezés „kiegyensúlyozódott”. Feladás nélküli üzemben a magas rezgést az eredményezte, hogy a rendszerben maradt még olyan iszap amint, nem tudott kitermelni a centrifuga. Ez akkor jelent problémát, ha a berendezést hosszabb ideig nem üzemeltetik, és az iszap

beleszárad a rendszerbe. Ennek elkerülése érdekében minden leállítás előtt át kell vízzel mostani a centrifugát.

Mind az iszapsűrítő, mind az iszapvíztelenítő centrifugákon azonosan jelentkeztek a kiegyensúlyozatlanságra jellemző rezgésértékek, de jellemzően a víztelenítő centrifugán magasabb értékek mutatkoztak.

A mérést követően a rezgésebességek és a spektrumképek elemzése során az 1-es iszapsűrítő centrifuga esetében, a dobót meghajtó villanymotoron a rezgés spektrum alapján tengely-beállítási problémára, azon belül szöghibára lettem figyelmes. Az 5.14-es ábrán jól látható, hogy axiális irányból mérve a forgási frekvencián (42,5 Hz), valamint a kétszeres felharmonikusán tisztán elkülönülő sávok alakultak ki. Ezen kívül a háromszoros felharmonikus is feltűnik kis értékkel. Ezek összessége tipikusan szöghibára utal (a meghibásodás jellemzői az 5. mellékletben részletesebben).



4.14. ábra: Kis mértékű tengely-beállítási probléma az 1-es sűrítő hajtás felőli oldalán

A csapágyakon végzett mérések nem mutattak ki kialakulóban lévő vagy kialakult meghibásodást, illetve kenetlenségi problémát.

4.3 Ivóvíz kitermelő telepen végzett mérések

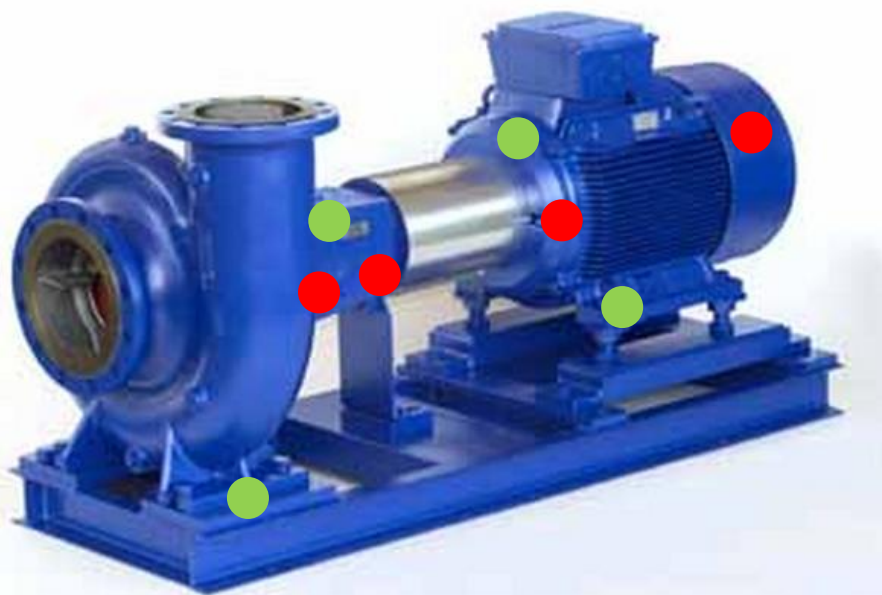
A Debreceni Vízmű Zrt. három telepen (1, 2, 4-es telepek) termel ki rétegvizet. A telephelyeken üzemben levő ivóvíz hálózatba betápláló szivattyúkon mértem rezgésértékeket. Az első méréssorozat alkalmával mind a 3 telepen végeztem méréseket. Telepenként 2-2 szivattyút vizsgáltam meg. A mérések célja a berendezések megismerés, információgyűjtés volt. A mérések során nem tapasztaltam magas rezgéseket, valamint a csapágyak is megfelelő állapotban voltak.

Ezt követően a második méréssorozatot a 2-es számú telephelyen végeztem el. Ez alkalommal három szivattyút mértem meg. Ebből egy frekvenciaváltóval üzemel (3.

szivattyú). Már a mérések elvégzése közben a mért értékek alapján látni lehetett, hogy keletkeztek magas értékek, melyeket a Condmaster szoftverben később ki is elemeztem.

4.3.1 Szivattyúk és a kijelölt mérési pontok bemutatása

A kettesszámú telepen üzemelő szivattyúk vízszintes elhelyezésű, centrifugál, vákuumszivattyúk (a forgó lapátok sugár irányban helyezkednek szivattyúházban). A meghajtást 90 kW-os Siemens, négyfázisú villanymotorok szolgáltatják. A meghajtott rész KSB Eta R típusú szivattyú. A villanymotor a teljesítményt tengelykapcsolón keresztül adja le a meghajtott résznek. A szivattyúkon rezgés és csapágyállapot mérést is végeztem. Rezgésmérést az ISO 2372, ISO 10816 és EVAM alapján, a csapágyállapotot LR/HR és SPM Spektrum szerint vizsgáltam. A kijelölt mérőpontokat az 5.15-ös ábrán szemléltetem.



4.15. ábra: A szivattyúkon kijelölt mérőpontok.

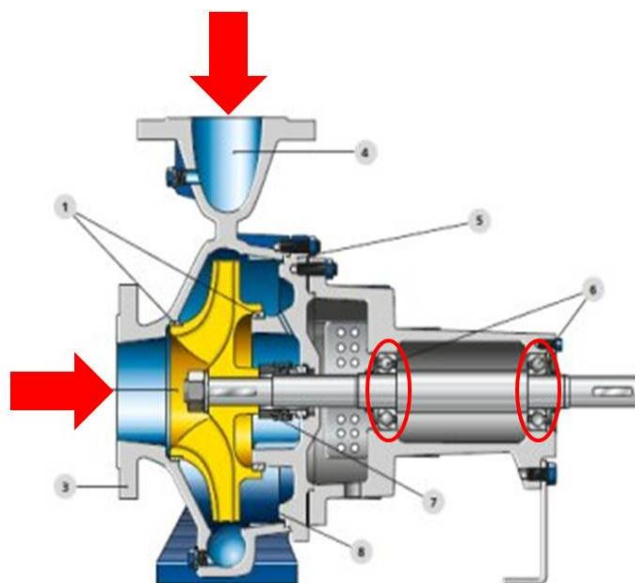
(Forrás: <http://www.ksb.com/linkableblob/ksb-en/11222-9252/lightboxLs/steel-mill-egypt-pic-lightboxLs.jpg>, 2012. november 14. 20:07)

A pirossal jelzett pontokon csapágyak találhatók, így ezeken a helyeken csapágyállapot mérést végeztem.

Csapágyak típusai:

- Villanymotor kuplung és kuplung ellenoldali csapágyak: SKF 6317 C3
- Szivattyú kuplung és kuplung ellenoldali csapágyak: SKF 6413 C3

A zölddel kijelölt területeken rezgésmérést végeztek vízszintes, függőleges és axiális irányból.



4.16. ábra: A szivattyú szívó és nyomó oldala, és a csapágyak elhelyezkedése.

(Forrás: http://www.waterworld.com/content/dam/etc/medialib/platform-7/waterworld/articles/print-articles/volume-27/issue-2/65408.res/_jcr_content/renditions/pennwell.web.400.303.gif, 2012. november 14. 20:49)

4.4 A mérési eredményekből levonható következtetések

Három szivattyú mérése során kettő esetében merültek fel az optimálisnál nagyobb értékek. A 4. szivattyúnál magas axiális irányú rezgéssebességet mértem, a 3. szivattyúnál pedig a villanymotor N és D (N – Not Drive, D – Drive) oldalon egyaránt megnövekedett LR/HR értékeket tapasztaltam.

4.4.1 Négyes szivattyú mérési eredményei

A meghajtott oldalon, axiális irányból mérve a korábbi mérésekhez képest jelentős rezgéssebesség növekedést mutatott a műszer. Például a kettesszámú szivattyún az azonos mérőponton, ISO 2372 szerint mért érték 0,64 mm/s, míg a négyes szivattyún 3,24 mm/s adódott.

Measuring Results: D-004.04 Szivattyú kuplung ellenoldal										
	Date/time	LR	HR	LUB	COND	CODE	COMP	ISO2372 H	ISO2372 V	ISO2372 A
!	2012.11.09 11:06:50									3,24
!	2012.11.09 11:00:33									3,14
!	2012.11.09 11:00:00									2,88
! 🚩	2012.11.09 10:59:09								0,90	3,13

4-es szivattyú

Measuring Results: D-002.04 Szivattyú kuplung ellenoldal

	Date/time	LR	HR	LUB	COND	CODE	COMP	ISO2372 H	ISO2372 V	ISO2372 A
●	2012.11.09 09:34:20									0,64
●	2012.11.09 09:33:23								0,48	0,59
●	2012.11.09 09:32:57								0,74	

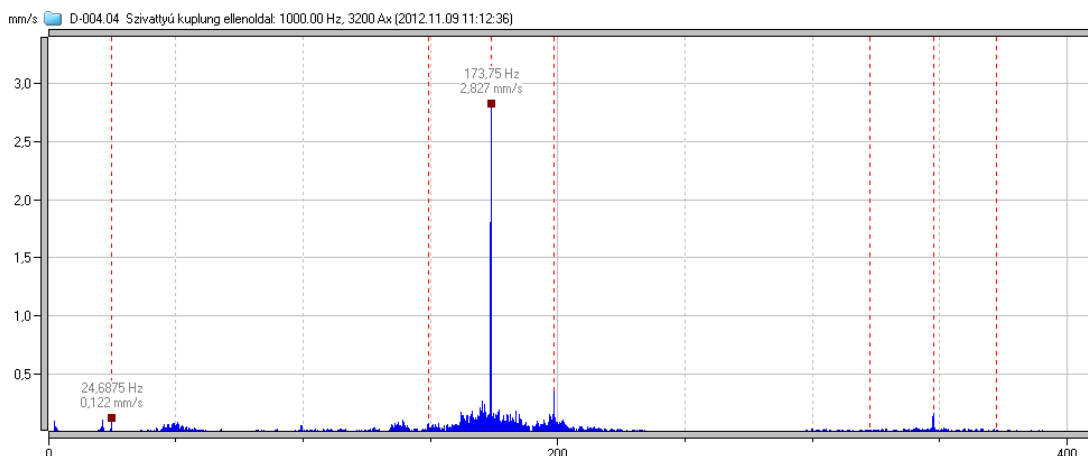
2-es szivattyú

4.17. ábra: ISO 2372 szerint mért axiális irányú rezgések a 4-es és a 2-es szivattyún.

A rezgésspektrumot megnézve azt tapasztaltam, hogy a berendezés lapát elhaladási frekvenciáján alakult ki magas rezgéssebesség érték. A lapát elhaladási frekvencia (VPF – Vane Pass Frequency) meghatározása:

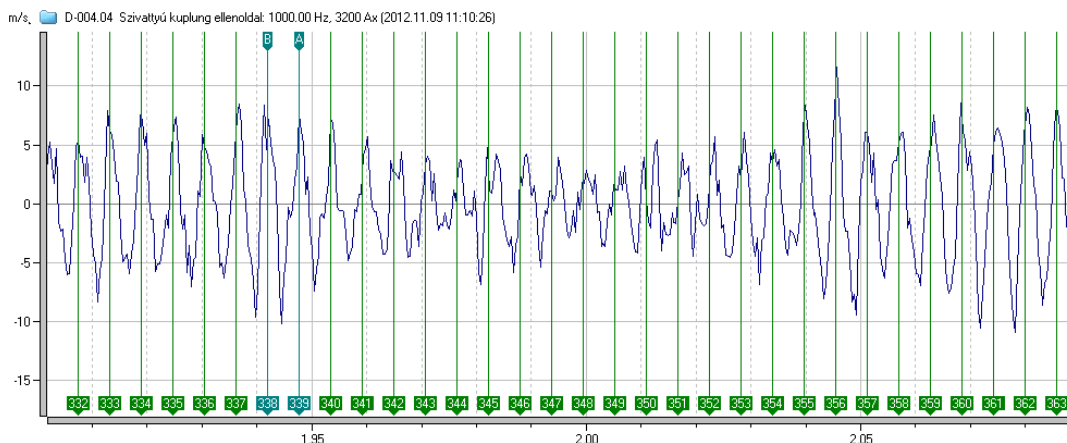
$$VPF = \frac{RPM}{60} \cdot N \text{ (Hz)}$$

Ahol az RPM (Rotation Per Minute) a fordulatszám (egy perc alatt), jelen esetben 1480 fordulat/perc, az N a szivattyú lapátkerekének a lapátszáma, amit ennél a típusú berendezésnél 7 db. A képletbe behelyettesítve azt kapjuk, hogy a lapát elhaladási frekvencia 172,67 Hz környékén keresendő.



4.18. ábra: Lapátkerek gerjesztette magas rezgéssebesség érték axiális irányból mérve.

A mérés időjelét megnézve és a periodicitást a lapát elhaladási frekvenciára állítva a következő szemléletes ábrához jutunk, ami igazolja a kiugró csúcsot a spektrumképben:



4.19. ábra: Részlet a 4. szivattyún mért időjélelőből (a zöld sávok a 173,75 Hz-es periódusokat jelzik).

A szakirodalom szerint, a vákuumszivattyúknál gyakran előfordulhat a VPF-en és felharmonikusain relatíve magas amplitúdó érték. Ennek oka egyrészt lehet tengelyferdeség, lerakódás a szivattyúba vagy szükségtelen oldalirányú kitérés, azonban a leggyakoribb esetben nem megfelelő üzemeltetés lehet a forrása. Az ilyen típusú berendezéseknek egy vízzárta van szükségük a megfelelő üzemeléshez, de túl sok víz generálhat magas amplitúdót a lapát elhaladási frekvencián. ([13] alapján).

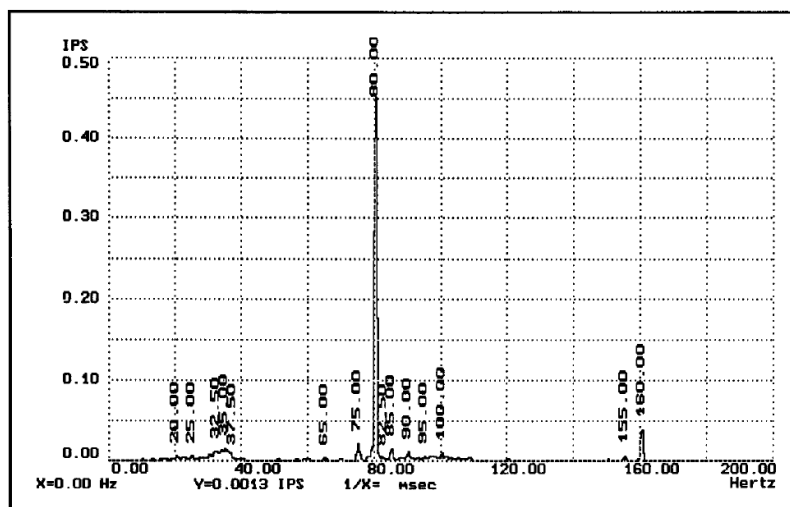


Fig. 4-43. Water in Vacuum Pump Generating Vane Pass Frequency.

4.20. ábra: Az áramló víz által generált spektrumkép vákuumszivattyú esetén

(Forrás: [13] p. 253/Fig. 4-43.)

4.4.2 A hármas szivattyú mérési eredményei

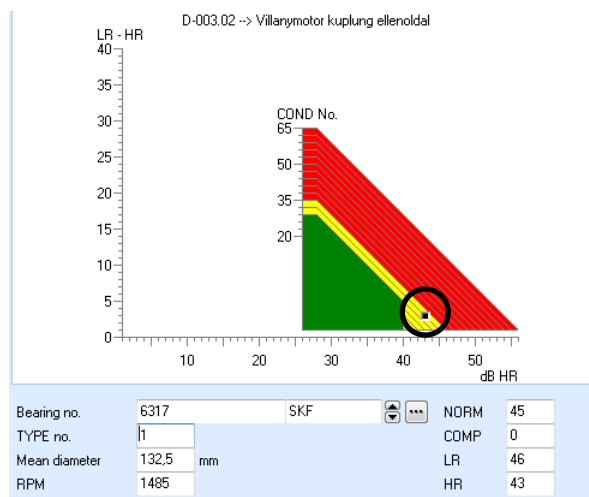
A hármas szivattyú abban tér el az előzőekben tárgyalt szivattyútól, hogy frekvenciaváltóval üzemel. A mérés elvégzésekor 42,4 Hz-en üzemelt (hálózati frekvencia 50 Hz) a villanymotor, ebből az aktuális fordulatszámra lehet következtetni, ami 1255 fordulat/perc volt.

A villanymotor csapágáinak elvégzett mérések „sárga értéket” adtak a csapágó állapotra (az SPM színek: zöld-jó, sárga-közepes, piros-rossz). Ez az értékelés a magas LR/HR értékekből adódott.

	Date/time	LR	HR	LUB	COND	CODE	COMP
!	2012.11.09 10:15:15	46	43	0	32	B	0
!	2012.11.09 10:14:51	45	40	0	29	B	0
!	2012.11.09 10:14:26	43	40	0	23	B	0
●	2012.11.09 10:14:03	38	33	3		A	0

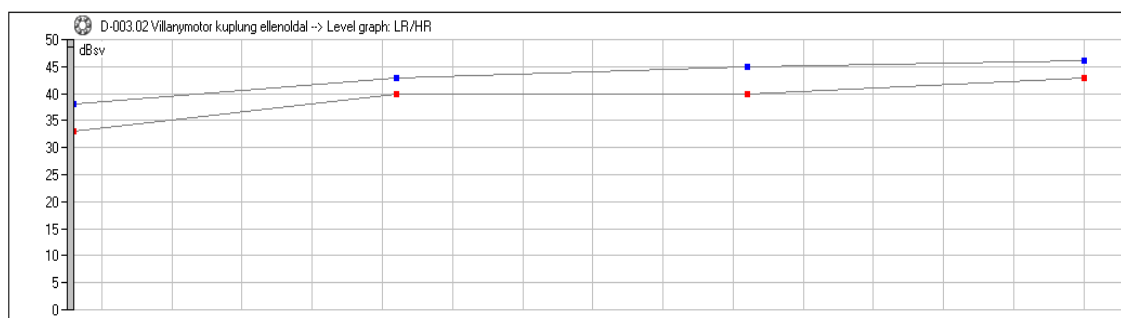
4.21. ábra: Megnövekedett LR/HR értékek a villanymotor kuplung ellenoldali csapágóján

Az SPM spektrumot megnézve nem találtam egyezést csapágó meghibásodásra utaló szimptómákkal, viszont a Lubmaster-ben a mérési eredményből látható, hogy a különböző gyakoriságú rezgések deltája kicsi volt.



4.22. ábra: Csapágó állapota a Lubmaster grafikonon megjelenítve

Ebből elégtelen kenésre lehet következtetni. Megnézve az értékek grafikus ábrázolását, látható, hogy az alacsony delta érték nem egyszeri jelenség, hanem a többszöri mérés során mindig közel azonos mértékben jelentkezett, ami megerősítette a Lubmaster grafikonjából levont következtetést.



4.23. ábra: Közel azonos LR-HR különbségek a megismételt mérések során. (Kék színnel az LR, piros színnel a HR rezgések vannak feltüntetve a grafikonon.)

Összegzés

A kialakult gazdasági viszonyok és a környezet megóvásának egyre hangsúlyosabbá válása olyan eszközök, módszerek bevezetését ösztönzi az iparban, amikkel egyszerre valósítható meg a gazdaságos és a környezet szempontjából biztonságos üzemeltetés.

Ilyenek a műszaki diagnosztikai eszközök, melyek lehetővé teszik a berendezések állapotának teljes körű felmérését, nyomon követését. A forgó alkatrészeket tartalmazó berendezések vizsgálatára elterjedt módszer a rezgésdiagnosztika. Az alapja, hogy a berendezések különböző alkatrészei által gerjesztett rezgések frekvenciái elkülöníthetők egymástól, a rezgések amplitúdója pedig információt hordoz az adott alkatrész állapotára vonatkozóan.

A rezgésdiagnosztikai vizsgálatokat az SPM Leonova Infinity kézi mérőműszerrel végeztem három különböző berendezés típuson.

Először egy próbapadon mértem, amin különböző jellegzetes meghibásodásokat lehet szimulálni, így megismerhettem a mérőpontok beállításának, a mérésnek és a kiértékelésnek a menetét.

Ezt követően a Debreceni Vízmű Zrt. Szennyvíztisztító Telepén alkalmazott iszapsűrítő és-víztelenítő centrifugák rezgését vizsgáltam meg. A próbapadon végzett mérésekből szerzett tapasztalatok segítségével be tudtam azonosítani a forgási frekvencián jelentkező kiugró értékről, hogy kiegyensúlyozatlansági hibára utal. Ugyanakkor a centrifugák működési módjából adódóan ez nem jelent problémát, de a megfelelő tisztítási műveletek elvégzésére kiemelt figyelmet kell fordítani.

A harmadik típusú berendezések a vízmű vízkitermelő telephelyein üzemelő, ivóvíz hálózatba betápláló centrifugál szivattyúk voltak. A 2.sz. telepen végzett mérések során két berendezés esetében (4. és 3 szivattyú) az előzetes tapasztalatokhoz képest magasabb értékeket mértem. A 4. szivattyún axiális irányból a lapát elhaladási frekvencián jelentkeztek magas rezgéssebesség értékek. Ebből arra lehet következtetni, hogy vagy a lapátkerékkel van probléma, vagy - ami valószínűbb -, hogy a víznyomás viszonyok nem megfelelőek. A hármas számú szivattyú villanymotorjának kuplung oldali és kuplung ellenoldali csapágynak magas LR/HR értékeket mértem kis különbséggel, ami a csapágynak nem megfelelő kenési állapotára utal.

A közeljövőben a szennyvíztelepen ismételt méréseket fogok végezni a centrifugákon, hogy még több adat álljon rendelkezésemre, illetve hogy nyomon követhessem a gépek állapotát.

A vízkitermelő telepeken üzemelő további szivattyúkon fogok méréseket végezni, hogy teljes legyen a szivattyúpark felmérése. A már mért berendezések közül a 4-es számú szivattyún különböző nyomásviszonyok mellett szükség van megismételt mérésekre, hogy kizárható legyen a lapátkerék meghibásodásának felvetődése, illetve ha megszűnik a magas rezgésérét, akkor az optimális üzemeltetési paraméterek meghatározhatóak. A 3-as szivattyú villanymotorjának csapágait be kell zsírozni, majd a zsírozást követően újra kell mérni, hogy meggyőződhetünk arról, hogy megszűnnek a magas értékek megfelelő kenés mellett.

Irodalomjegyzék

- [1] Dr. Nagy István: Állapotfüggő karbantartás Műszaki Diagnosztika I., Rezgésdiagnosztika - Delta-3N Kft. 2006. pp. 20.-129.
- [2] Műszaki diagnosztika. Lakatos István Dr. (Szerk.). Győr: Széchenyi István Egyetem, 2006. [elektronikus jegyzet (pdf)] pp. 83.-95.
- [3] Dr. Dömötör Ferenc: Rezgésdiagnosztika I. Főiskolai tankönyv - Dunaújvárosi Főiskola Kiadói Hivatala 2008. 4. fejezet pp. 71.-86., 7. fejezet pp. 170.-204.
- [4] Magyar Szabványügyi Testület: Rezgés és lökés. Rezgés és lökés. Fogalommeghatározások. MSZ ISO 2041:1995
- [5] International Organization for Standardization: ISO 2372:1974: Mechanical vibration of machines with operating speeds from 10 to 200 rev/s -- Basis for specifying evaluation standards.
- [6] International Organization for Standardization: ISO 10816-1:1995: Mechanical vibration -- Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts -- Part 1: General guidelines.
- [7] Dede Miklós – Demény András: [közread. a] Kossuth Lajos Tudományegyetem Természettudományi Kar, Kísérleti fizika 2. kötet, - Nemzeti Tankönyvkiadó 1992. pp. 3.-23.
- [8] SPM, Product Catalogue
<http://www.spminstrument.com/data/pdf/catalogues/71700B.pdf>,
(2011.11.17. 12:21) pp. 6.-20.
- [9] Homolya György: SPM (SHOCK PULSE METHOD) VAGY IS LÖKÉSIMPULZUS MÓDSZER (Egyetemi könyv kézirat), 2006. (SPM kiadvány alapján) pp. 0.-24.
- [10] SPM Instrument AB, Kiadvány: Az SPM módszer, Komplette eszköztár üzemelő gördülőcsapágyak üzemállapotának kiértékeléséhez, 1996.
- [11] ZRÍNYI MIKLÓS NEMZETVÉDELMI EGYETEM, BOLYAI JÁNOS KATONAI MŰSZAKI KAR, KATONAI MŰSZAKI DOKTORI ISKOLA, Szabó József Zoltán: Rezgésdiagnosztikai vizsgálatok és haditechnikai alkalmazhatóságuk kutatása, PhD Értekezés 2010. Budapest
- [12] Agilent Technologies: The Fundamentals of Signal Analysis: Application Note 243
- [13] James I. Taylor: The Vibration Analysis Handbook: A Practical Guide for Solving Rotating Machinery Problems (First Edition, Second Printing) pp. 1-68., 111-222.

- [14] International Organization for Standardization: ISO 13372:2004: Condition monitoring and diagnostics of machines – Vocabulary
- [15] International Organization for Standardization: ISO 13373-2:2005: Condition monitoring and diagnostics of machines -- Vibration condition monitoring -- Part 2: Processing, analysis and presentation of vibration data
- [16] Oláh Kálmán (Üzemvezető), Czakó Gábor (Technológiai vezető), Fülöp Zoltán (Környezetmérnök): Debrecen Megyei Jogú Város Szennyvíztisztító telepének Üzemeltetési szabályzata (2011)

1. melléklet

Rezgésérzékelő adatai:



Vibration Transducer

Type: SLD144B	Measuring point:
Serial number: S/N 1026091	Calibration date: 2010-07-01
Sensitivity: 10.71. mV/m/s ² =105.17mV/g	Operator: Viveca Jensen Carlen

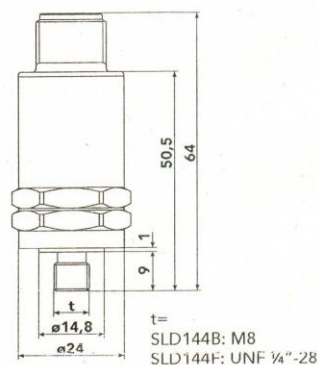


This transducer has been tested and calibrated to meet the SPM specification. The SPM standards are traceable to meet the national standards in the country of origin and the Bureau des Poids et Mesures.

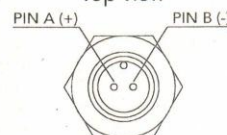
Technical Specification:

Typical main sensitivity:	100 mV/g
Transverse sensitivity:	max 10 %
Typical base strain sensitivity:	0.01 m/s ² /μ strain
Linear frequency range:	2 to 10000 Hz
Max peak acceleration:	600 m/s ²
Settling time:	3 sec
Bias Point:	11 - 13, typ 12 V
Temperature range:	-40 to +125 C (-40 to 260 F)
Power requirements:	12 - 24 V, 2 - 5 mA
Casing:	Stainless acid proof steel
Sealing:	IP 67
Torque limit:	10 Nm
Weight:	115 gram (4 oz)
Connector type:	2 pin, Mil style

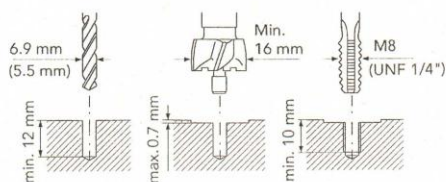
Side view



Top view



Installation Instruction



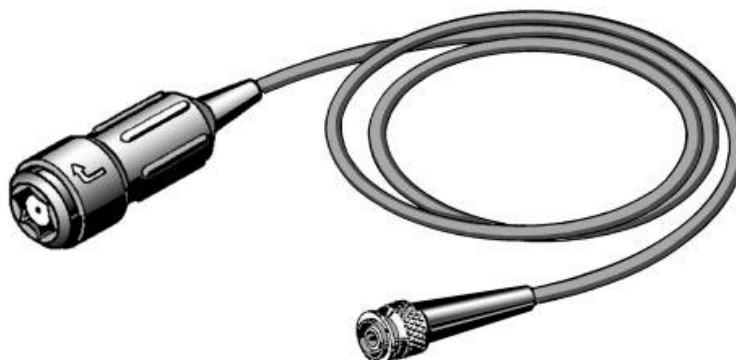
Tools	SPM 81027	Holder for counterbore
	SPM 81030	Pilot for UNF 1/4"
	SPM 81031	Pilot for M8
	SPM 81057	Counterbore, diam 20 mm

SPM Instrument AB, Box 504, SE-645 25 Strängnäs, Sweden
Tel +46 152 22500, Fax +46 152 15075, info@spminstrument.se, www.spminstrument.se, www.spminstrument.com
ISO 9001 certified, Copyright SPM 2006-05, 71779 B



2. melléklet

TRA-30-as ütésimpulzus érzékelő technikai adatai:



Technical data:

Measuring range:	Max. 100 dBsv
Design:	Sealed
Temperature range:	-30° to +70° C
Material, spanner:	Blacknited steel
Handle cover:	Urethan
Coaxial cable:	PVC, length 1.5 m
Connector:	TNC
Weight:	250 g

3. melléklet

Fast Fourier Transform (FFT)

([1], [3] alapján)

Periodikus jelek leírása

A $\{1, \sin(\omega_0 \cdot t) \cos(\omega_0 \cdot t) \sin(2\omega_0 \cdot t) \cos(2\omega_0 \cdot t) \sin(3\omega_0 \cdot t) \cos(3\omega_0 \cdot t) \dots\}$ függvényrendszer (trigonometrikus rendszer) elemeiből - nem túl szigorú követelmények mellett - a periodikus függvények (mechanikai rezgések, elektromos jelek) előállíthatók szinusz és koszinusz függvények lineáris kombinációjaként:

$$\begin{aligned} & a_0 \cdot 1 + a_1 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) + b_1 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) + \\ & + a_2 \cdot \cos(2\omega_0 \cdot t) + b_2 \cdot \sin(2\omega_0 \cdot t) + \\ & + a_3 \cdot \cos(3\omega_0 \cdot t) + b_3 \cdot \sin(3\omega_0 \cdot t) + \dots = \\ & = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cdot \cos(k\omega_0 \cdot t) + b_k \cdot \sin(k\omega_0 \cdot t)) \end{aligned}$$

Az ω_0 a rendszer alap körfrekvenciáját a $k \cdot \omega_0$ az alap körfrekvencia többszöröseit jelenti (ha a k egész szám, akkor az alapharmonikusairól beszélünk). Az $\omega_0 = 2\pi \cdot f_0$ összefüggés alapján az f_0 a rezgő rendszer alapharmonikus frekvenciája.

Egy T periódusú f függvény esetén az

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{T} \cdot \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} f(t) \, dt \\ a_k &= \frac{2}{T} \cdot \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} f(t) \cdot \cos(k\omega_0 \cdot t) \, dt, \, k = 1, 2, 3 \dots \\ b_k &= \frac{2}{T} \cdot \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} f(t) \cdot \sin(k\omega_0 \cdot t) \, dt, \, k = 1, 2, 3 \dots \end{aligned}$$

számokat Fourier együtthatóknak nevezzük.

Az $f(t)$ függvény Fourier együtthatóival képzett függványsort az f függvény Fourier sorának hívjuk. A fentiek szerint Fourier sor periodikus (végtelen) időjelekhez tartozik.

Igazolható, hogy páros függvény esetén, $(f(t)=f(-t))$ a b_k konstansok értéke 0, így a szinuszos tagok eltűnnek. Ha a függvény páratlan $(f(t)=-f(-t))$, akkor az a_k konstansok értéke 0-val egyenlő és a koszinuszos tagok tűnnek el.

A trigonometrikus függvények összefüggései alapján, a Fourier sor kifejezhető csak szinuszos vagy csak koszinuszos tagokkal, például:

$$a_k \cdot \cos(k\omega_0 \cdot t) + b_k \cdot \sin(k\omega_0 \cdot t) = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \cdot \sin\left(k\omega_0 \cdot t + \arctg \frac{a_k}{b_k}\right)$$

A fenti egyenlet alapján felírható:

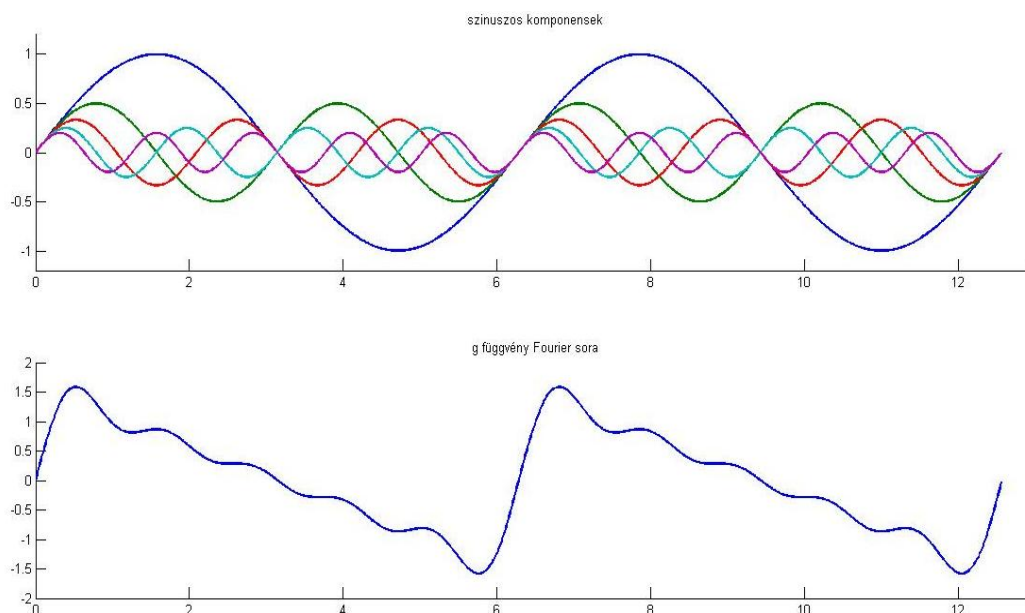
$$a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot (\sin(k\omega_0 \cdot t + \varphi_k))$$

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, k = 1, 2, 3, \dots \quad \varphi_k = \arctg \frac{a_k}{b_k}, k = 1, 2, 3, \dots$$

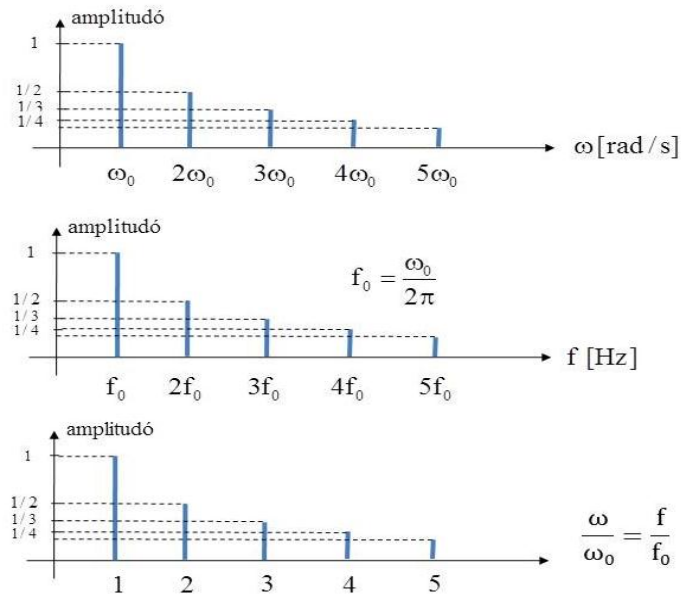
A $k\omega_0$ -hoz tartozó A_k amplitúdók alkotják a függvény vonalas spektrumát. A két vonal közötti távolság $\Delta f = \frac{1}{T}$, vagy $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$.

A következő példában a $g(t)$ függvénnyel szemléltetem, hogy a szinuszos hullámok hogyan adódnak össze és milyen a függvény spektruma (a Fourier sorában milyen együttthatók szerepelnek).

$$g(t) = 1 \cdot \sin(t) + \frac{1}{2} \cdot \sin(2t) + \frac{1}{3} \cdot \sin(3t) + \frac{1}{4} \cdot \sin(4t) + \frac{1}{5} \cdot \sin(5t)$$



1. ábra: A $g(t)$ függvény Fourier sorának képe


 2. ábra: A $g(t)$ függvény frekvencia spektrumai

A Fourier sor komplex együtthatókkal, komplex valós exponenciális függvények segítségével is felírható. Ehhez szükségünk van a szinusz, koszinusz és komplex változós exponenciális függvények közötti összefüggésekre:

$$\cos t = \frac{e^{it} + e^{-it}}{2}$$

$$\sin t = \frac{e^{it} - e^{-it}}{2i}$$

$$\begin{aligned} a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cdot \cos(k\omega_0 \cdot t) + b_k \cdot \sin(k\omega_0 \cdot t)) &= \\ = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{a_k - b_k \cdot i}{2} \right) \cdot e^{ik\omega_0 t} + \left(\frac{a_k + b_k \cdot i}{2} \right) \cdot e^{-ik\omega_0 t} &= \end{aligned}$$

$$= \hat{f}_0 + \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \hat{f}_k \cdot e^{ik\omega_0 t}$$

$$a_0 = \hat{f}_0 = \frac{1}{T} \cdot \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} f(t) dt$$

$$\hat{f}_k = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T f(t) \cdot e^{-ik\omega_0 t} dt, k = \dots -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots$$

Ha a $k=0$ akkor, az $\hat{f}_0 = 0$. Az $\hat{f}_k$ és $\hat{f}_{-k}$ együtthatók egymás komplex konjugáltjai és „szimmetrikusan” helyezkednek el, ezért $|\hat{f}_k| = |\hat{f}_{-k}|$.

Fourier-tétele szerint:

1. A periodikus függvénynek diszkrét spektruma van, amelyet a Fourier-együtthatók írnak le.
2. A páratlan függvényeknél az a_k együttható, páros függvényeknél a b_k együtthatók tűnnek el.

Nem periodikus jelek leírása

A Fourier sor kiterjesztése nem-periodikus jelek felbontására a Fourier integrál bevezetését igényli. Nem periodikus jelre való áttérés értelmezhető úgy, hogy a T periódus időt a végtelenhez közelítjük. Ennek következménye, hogy a vonalas spektrumkép vonalai között levő Δf frekvencia különbség (felbontás) a 0-hoz tart, így a vonalas helyett egy folytonos spektrum jön létre.

A folytonos, nem periodikus időjelből folytonos frekvencia spektrumot kapunk eredményül. Az f függvény Fourier integráltja:

$$f(t) = \int_{\omega=0}^{\infty} (a(\omega) \cdot \cos(\omega \cdot t) + b(\omega) \cdot \sin(\omega \cdot t)) d\omega$$

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

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

A $k \cdot \omega_0$ diszkrét körfrekvenciák helyett bármilyen valós ω körfrekvenciák előfordulhatnak.

Megjegyzés:

Az $a(\omega)$ és $b(\omega)$ függvények kiszámításához szükséges ismerni az f függvény értékeit az $]-\infty, \infty[$ intervallumon.

Fourier integrál komplex felírása:

$$\hat{f}(\omega) = \int_{t=-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-i\omega t} dt, \text{ Fourier transzformáció}$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{\omega=-\infty}^{\infty} \hat{f}(\omega) \cdot e^{i\omega t} d\omega, \text{ Inverz Fourier transzformáció}$$

Diszkrét Fourier Transzformáció (DFT):

Valóságos jelek vizsgálata során nincs lehetőségünk az f függvény értékeit ismerni az egész időtartományban, csak a mintavételi időpontokban. Továbbá a Fourier-transzformáció a vizsgált függvény minden értékének az ismeretét igényli, amit a gyakorlatban mintavételezéssel nem lehet megkapni. Ha a mintavételezés a diszkrét

$$t_n = n\Delta t \quad -\infty \leq n \leq +\infty$$

időpontokban történik, akkor az integrál az

$$\hat{f}(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} f(n \cdot \Delta t) \cdot e^{-i \cdot \omega \cdot n \cdot \Delta t} \cdot \Delta t$$

összegfüggvényre módosul. Itt a folytonos jel a mintavételezés következtében diszkrét idejű mintavételezett jelekre bomlik, és a spektrumfüggvény folytonos menetében ettől még nem történik változás.

Ha az eredetileg folytonos ω helyett bevezetünk egy diszkrét ω_M változót, akkor, az időben korlátozott lejszakasz Diszkrét Fourier Transzformáltját kapjuk.

$$\hat{f}(\omega_M) = \Delta t \cdot \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} f(n \cdot \Delta t) \cdot e^{-i \cdot M \cdot \Delta \omega \cdot n \cdot \Delta t}$$

$$\omega_M = M \cdot \Delta \omega \quad (\text{ahol } M \text{ a mintavételezés sorszámát jelenti})$$

Így a transzformált már nem a mintavételi tartomány által meghatározott tetszőleges frekvencia tartomány tetszőleges frekvenciájára definiált. Eredménye az, hogy az eredetileg folytonos spektrumkép kép diszkrét, egymástól független frekvencia értékeket fog tartalmazni.

A spektrumkép összetevőinek távolsága $\Delta \omega$ vagy Δf , a T_F időtartományt megfigyelési időnek (időablaknak), a Δt -t mintavételi időnek, N -t mintaszámnak, az $f_{\max}$ frekvenciát az analízis felső határfrekvenciájának nevezzük. Ezen paramétereket felhasználva a következő összefüggéseket írhatjuk fel:

$$\Delta \omega = \frac{2\pi}{N \cdot \Delta t}$$

Behelyettesítve a DFT-be a következőt kapjuk:

$$\hat{f}(\omega_M) = \Delta t \cdot \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} f(n \cdot \Delta t) \cdot e^{-i \cdot \frac{M \cdot 2\pi \cdot n}{N}}$$

$$f_{\max} = \frac{1}{2 \cdot \Delta t} \quad \Delta f = \frac{1}{N \cdot \Delta t}$$

$$T_F = N \cdot \Delta t \qquad \Delta f = \frac{1}{T_F}$$

Ezekből levonható következtetés, hogy ahhoz hogy magasabb frekvencia tartományt vizsgálhassunk gyorsabb mintavételezésre van szükség. A gyorsabb mintavételezés rövidebb megfigyelési időt eredményez, jobb felbontással.

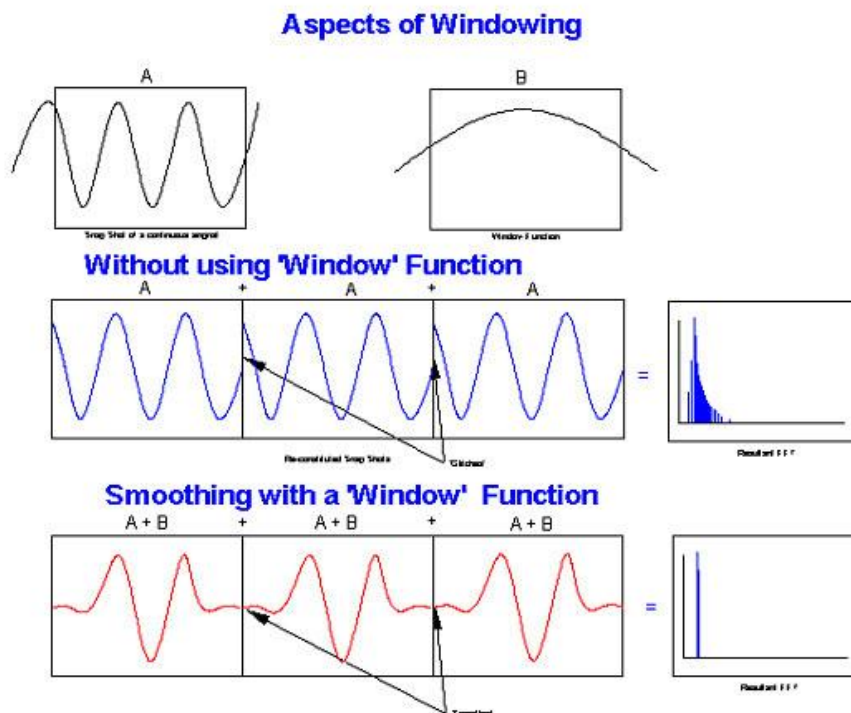
A DTF szimmetrikus abban, hogyha az időtartomány vonalas, akkor a frekvenciatartomány periodikus, és fordítva.

A DFT a nagymennyiségű elvégzendő művelet miatt, a gyakorlatban nem valósítható meg. A DFT helyett gyorsabb és hatékonyabb algoritmust használnak, ezt gyors Fourier transzformációnak nevezzük (FFT- Fast Fourier Transform). A gyors Fourier transzformációban az adatok csoportokra bontva kerülnek feldolgozásra, emiatt a digitális időjelek számának kettő hatványának kell lennie.

Az időben korlátozott jelek transzformálása

Ablakolás

Az FFT-ben a mintavételezett jel periodikus jelként van jelen, függetlenül attól, hogy az eredeti időjel periodikus-e valójában. Ennek a látszólagos periódusideje megegyezik a megfigyelési idővel. Ha a mintavételezett jel valóban periodikus, akkor a spektruma elméletileg pontosan előállítható, de ehhez az lenne szükséges, hogy a megfigyelés időtartama megegyezzen a jel periódusidejével. Ha ez nem teljesül, akkor a spektrumkép torzul. Vegyük példának az egyszerű szinuszos rezgést (2.6. ábra).



3. ábra: Az ablak függvény szerepe

(Forrás: http://www.helitune.com/var/plain/storage/images/media/images/a_spects_of_windowing__1/1351-1-eng-GB/a_spects_of_windowing.jpg (2012. november 11. 14:34))

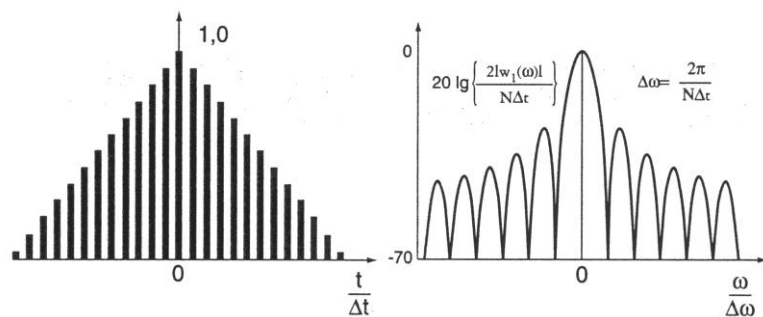
A kék színnel jelzett függvényképen látható, ha a mintavételezés kezdete és vége véletlenszerű, akkor az általunk várt egy sáv helyett a frekvencia „elfolyik”, így a spektrumkép használhatatlanná válik, mert a csúcértékhez közel eső tartományok elmosódnak. Ezt a jelenséget a szakirodalom leakage-nek nevezi. A megoldást az ablakfüggvények használata jelenti, melyekkel kezelhetők a mintavételezett időjel eleje és vége között jelentkező eltérésből adódó problémák. Az ablakfüggvények alkalmazása során az időjelet egy olyan függvénnyel kell „megszorozni” aminek az értéke az elején és a végén nulla. Ezt a műveletet nevezzük ablakolásnak, az alkalmazott függvényeket pedig ablakfüggvénynek. Fontos megjegyezni, hogy az ablakolással „meghamisítottuk” a bevitt jelet, tehát nem számíthatunk tökéletes spektrumképre.

$$\hat{f}(\omega) = \Delta t \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} f(n) \cdot w(n) \cdot e^{-i \cdot M \cdot \Delta \omega \cdot n \cdot \Delta t}, \quad (f(n \cdot \Delta t) \rightarrow f(n))$$

A folyamat szemléletesen úgy írható le, mintha az adott időjelet egy „ablakon” keresztül vennénk szemügyre.

Leggyakrabban használt ablakfüggvények típusai:

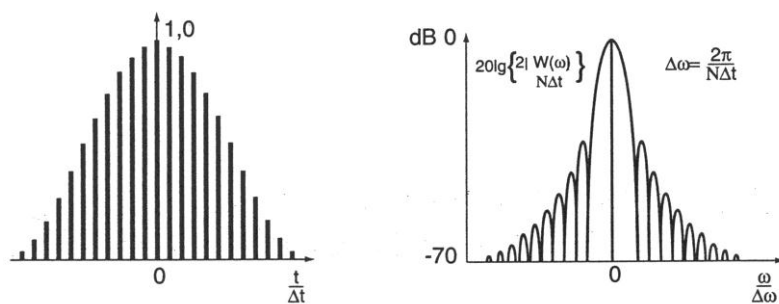
Háromszög vagy Bartlet ablak



4. ábra: Bartlett alak

(Forrás: [1], p. 95. VI/23. ábra)

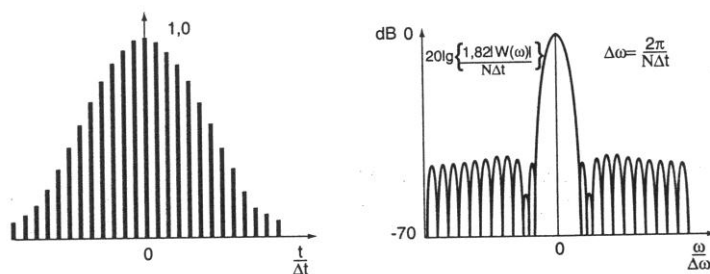
Hann ablak (a rezgésdiagnosztikában ezt a típust használják a leginkább):



5. ábra: Hann ablak

(Forrás: [1], p. 96. VI/24. ábra)

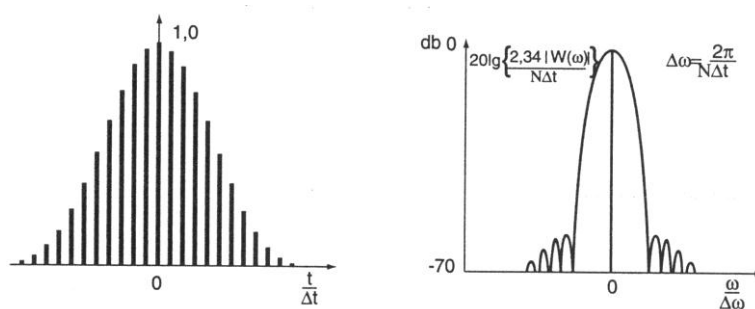
Hamming ablak:



6. ábra: Hamming ablak

(Forrás: [1], p. 98. VI/28. ábra)

Blackman ablak:

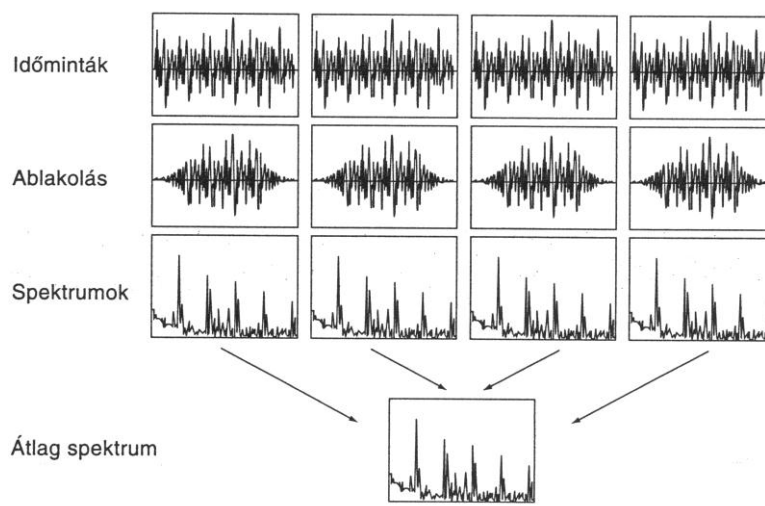


7. ábra: Blackman ablak

(Forrás: [1], p. 99. VI/29. ábra)

Átlagolás:

A mérendő jel csak ideális esetben van tisztán jelen. A valóságban különböző zajok jelennek meg benne, amik torzítják a jelet és így a spektrumképet is. Ahhoz hogy a véletlen zajok szerepét csökkentsék, spektrumlépek átlagolását alkalmazzanak a mérő műszerek. Ennek folyamatát láthatjuk a 2.12. ábrán.



8. ábra: Átlagolás

(Forrás: [1], p. 101. VI/30. ábra)

Kétféle átlagolási eljárást lehet megkülönböztetni.

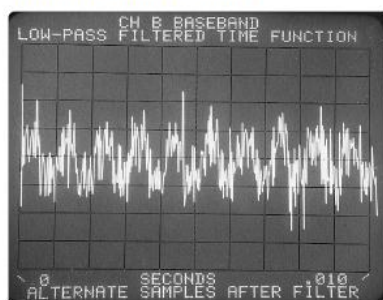
- RMS típusú átlagolás. Ez a típusú átlagolás a jel energia szintjének az átlagát adja meg a zajokkal együtt, viszont nem lehet a jel-zaj viszonyt növelni. Minél többször ismétljük, annál pontosabb közelítést ad a jel és zaj energiaszintjére.
- Lineáris átlagolás: A lineáris átlagolás alkalmazásával lehetőség van a jel-zaj viszony növelésére. Viszont csak akkor alkalmazható, ha található egy indító jel, ami szinkronban van a spektrum periodikus részével. A szinkronizáló jel jelenléte korlátozó tényező, de sok esetben elérhető. A szinkronizáló jel indítja

az időjel kezdetét minden esetben, így a bemeneti jelnek a periodikus része mindig ismétlődik, de a zaj váltakozik. Ha összeadjuk az így mintavételezett, időben korlátozott jeleket, és osztjuk a mintavétel számával, akkor a lineáris átlagot kapjuk. A periodikus jelek minden jelben ismétlődnek, ezért azok pontos értékét kapjuk, ugyanakkor a jelentkező zajok különbözőek minden jelben, ezért azok értéke a nullához tart. Tehát minél többször végezzük el az átlagolást, annál közelebb lesz a zajszint a nullához, és annál nagyobb lesz a jel-zaj viszony.

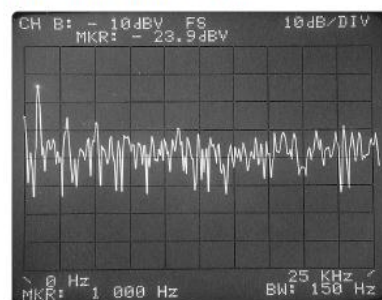
([12] alapján)

Linear averaging.

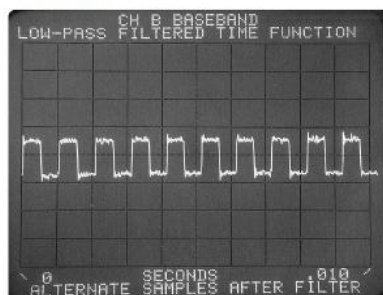
a) Single record, no averaging



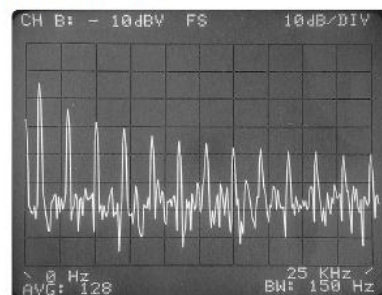
b) Single record, no averaging



c) 128 linear averages



d) 128 linear averages

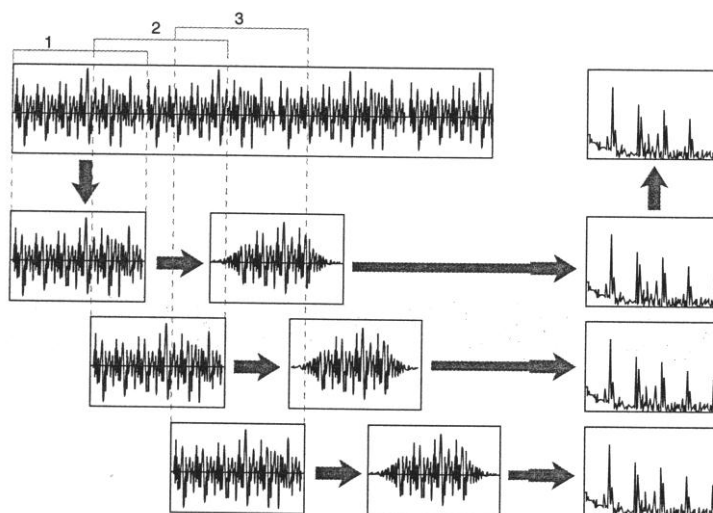


9. ábra: Lineáris átlagolás: A c. ábra az a. ábrán látható időjelnek az átlagolt formája, a jobb oldali ábrák pedig a frekvenciaspektrumokat szemléltetik.

(Forrás: [12] p. 44. Fig. 3.44)

Átlapolás:

A mintavételezést az FFT elemzés követi. Nagy teljesítményű processzorok esetén az FFT elvégzése sokkal gyorsabb, mint a mintavételezés folyamata, így a processzor addig üresjáratban van, ezt kihasználva a feldolgozás idejét lehet csökkenteni az úgynevezett átlapolással. Ennek a kiküszöbölésére használják az úgynevezett átlapolást. A folyamat lényege, hogy a régi mintát a processzor nem dobja el, hanem hozzá vesz egy részt az új mintából, és így végzi el az elemzést. Az átlapolást azért alkalmazzák, hogy a mérési időt lerövidítsék. ([12] alapján)



10. ábra: Átlapolás

(Forrás: [1], p. 102. VI/31. ábra)

4. melléklet

Az analóg jel digitalizálásának további lépései

([1], [2], [3], [12], [15] alapján)

Erősítő

A diagnosztikai adatgyűjtők erősítőt, átviteli csatornákat és bizonyos esetekben tárolóegységeket tartalmaznak. Ezeknek az átviteli csatornák generálhatnak olyan jeleket, amik zavarják az információt hordozó jelet. Ezek zajnak nevezzük. Az átviteli csatorna a jel-zaj viszsonnyal jellemezhető, ahol a jel alatt az átvinni kívánt hasznos jelet értjük.

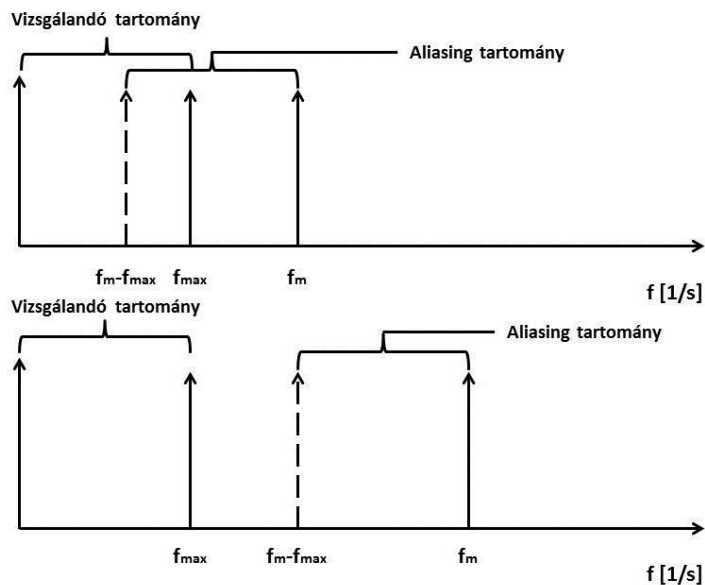
Anti-aliasing szűrő

Shannon² bebizonyította, hogy a mintavétellel nyert diszkrét mintákból álló impulzussorozat információ tartalma megegyezik az analóg, időben folytonos jel információtartalmával. Ahhoz, hogy ez teljesüljön, be kell tartani, az úgynevezett Shannon-tételt. Ez kimondja, hogy ahhoz, hogy a digitális jelből az eredeti időben folytonos jel veszteség nélkül visszaállítható legyen, a mintavételezést úgy kell elvégezni, hogy a mintavételi frekvencia a maximális mintavételezett frekvenciánál legalább kétszer nagyobb legyen.

$$f_m > 2 \cdot f_{\max}$$

Ha a mintavételi szabály nem teljesül, akkor a mintavételi frekvencia és a vizsgált jel maximális frekvenciájának különbsége (ez egyben egy adott frekvencia és egy frekvencia tartomány is, lásd 2.3. ábra.) a vizsgálandó frekvencia tartományba esik, akkor a jel eltorzul és többé már nem rekonstruálható. Ezt a jelenséget aliasing-nak vagy gyűrődési torzításnak nevezzük. A mintavételezés során minden esetben meghatározható a két frekvenciatartomány (mintavételezési tartomány és az aliasing tartomány). A cél ezen tartományok átfedésének elkerülése.

² Claude Elwood Shannon (1916-2001): amerikai matematikus és mérnök. Róla elnevezett törvény a digitális jelfeldolgozás alaptörvényévé vált.



1. ábra: Aliasing jelensége előfordul, ha a mintavételi frekvencia kisebb, mint a vizsgált jel maximális frekvenciájának kétszerese.

Előfordulhatnak véletlenszerűen kialakuló, kiugró frekvenciájú alkotók a mintavételezni kívánt jelben, és ilyenkor a mintavételi törvény betartása mellett is létrejöhet az aliasing jelenség (Ha az elvárt maximális frekvenciánál nagyobb frekvenciájú jel is előfordul.). Ilyen esetek kiküszöbölésére a mintavételezés és az A/D átalakító elé be kell illeszteni egy aluláteresztő szűrőt, amit anti-aliasing szűrőnek is szoktak nevezni. Az ideális szűrő pont a vizsgálandó frekvencia tartományt eresztene át veszteség nélkül és kizár minden olyan magasabb frekvenciájú összetevőt, ami aliasing-ot eredményezne, de a valóságban ez nem kivitelezhető. A gyakorlatban alkalmazott aluláteresztő szűrők esetében számolni kell egy átmeneti sávval. Ebbe a sávba beleeshetnek olyan magasabb frekvenciájú jelek, amik még mindig okozhatnak begyűrődést. Ennek elkerülése érdekében a mintavételi frekvenciát általában 2,5-4 szeresére kell állítani a beviteli jel legnagyobb frekvenciájának (Leggyakrabban 2,56 szorosa).

Mintavevő és –tartó áramkör

Az áramkör egy analóg kapcsolóból, tároló kondenzátorból és egy megfelelő pufferfokozatból tevődik össze. A mintavételező és-tartó áramkörök egyenlő időközönként mintát vesznek a mérendő feszültségből, és azt az értéket megtartják az analóg-digitális átalakítás időtartamára.

Ha az analóg kapcsoló zárva van, akkor a kimeneti feszültség a bemeneti feszültséggel együtt változik. Abban az esetben, ha nyit a kapcsoló, akkor a

tartókkondenzátorban tárolt töltés tartalmazza a nyitás előtti utolsó amplitúdó értékre vonatkozó információt. Azt az időtartamot, amíg a kapcsoló zárva van mintavételi időnek, azt az időt, amikor a kapcsoló nyitva van tartási időnek nevezik.

A/D átalakító

Az analóg-digitális átalakító feladata, hogy a mintavételezett analóg jelből az amplitúdónak megfelelő, bináris, digitális jelet hozzon létre. Az analóg bemenő jel digitális ábrázolásához rendelkezésre álló adatszavak száma a szavakat alkotó bitek számától függ (pl.: egy 4 biten kódoló A/D átalakító $2^4 = 16$ különböző adatszó ábrázolására képes). Az amplitúdó minták bináris kódszavakhoz való hozzárendelését kvantálásnak nevezzük. Az analóg jel digitalizálásában a mintavételi frekvencia mellett a kvantálás finomsága a legfontosabb paraméter. Minél pontosabban szeretnénk az eredeti analóg jelet leképezni (minél finomabb kvantálást szeretnénk elérni), annál több bitből kell, hogy álljanak a kódszavak. Ha a kvantálás nem elég finom, akkor előfordulhat, hogy az eredeti amplitúdó és a kvantálással nyert digitális érték eltérése túl nagy. Ebben az esetben az eredeti analóg jel rekonstrukciójában hiba keletkezik, ami zajként jelentkezik. Ezt a típusú zajt fehérzajnak vagy kvantálási zajnak nevezzük. A kvantálási zaj a kvantálási lépcsők számának növelésével, tehát a tároló bitek számának növelésével, így az adatszavak számának növelésével csökkenthető.

Az A/D átalakító a bemenő jel amplitúdójának számértékével megfelelő bináris kódszavat ad vissza. Ez nem tartalmaz még ilyen formában adatot a bemenő jel előjeléről. Ahhoz, hogy bipoláris jelek is kódolhatók váljanak, a digitális jelfeldolgozásban kettes komplement kódot alkalmaznak. Az A/D átalakítóból kilépő jelet forráskódnak, az egész folyamatot forráskódolásnak nevezik.

5. melléklet

Forgó alkatrészt tartalmazó berendezések rezgéseinek forrásai

([11], [13] alapján)

A rezgés és ütésimpulzus mérése során, különböző helyekről, irányokból érkeznek az adatok. Ezek alapján a szoftverben rezgésspektrumot kapunk. A hiba milyenségét az alapfrekvencia és felharmonikusai határozzák meg, veszélyességét pedig az amplitúdó nagysága mutatja számunkra. Az iparban alkalmazott forgó alkatrészeket tartalmazó gépek esetében több száz lehet azoknak a hibáknak a száma, amelyek tönkretelhetnek egy berendezést. A spektrumban egyes hibák külön-külön, valamint keveredve jelennek meg. A hibák felismerésére a diagnosztikai szakemberek folyamatosan gyűjtik a különböző szimptómákat, amik egy-egy tipikus tönkremenetelt vagy hibát jeleznek.

Kiegyensúlyozatlanság

Ha a forgástengely és a tehetetlenségi főtengelye között nem megfelelő a viszony, akkor kiegyensúlyozatlanság lép fel. Ha azt akarjuk, hogy a test kiegyensúlyozottan forogjon, akkor a forgástengely kiválasztása nem lehet tetszőleges. Egy testnek legalább három tehetetlenségi főtengelye van, amik áthaladnak a test súlypontján. Ezek a tengelyek egymásra merőlegesek. A tehetetlenségi főtengelyek abban különböznek a többi tehetetlenségi tengelytől, hogy a rájuk nézve a síkra vett nyomatékok zérók. A testre kényszerített forgástengely általában nem esik egybe a tehetetlenségi főtengelyek egyikével sem. Kiegyensúlyozásnak a célja, hogy a forgástengely egybe essen legalább az egyik főtengellyel. A két tengely geometriai viszonya szerint különböző kiegyensúlyozatlansági állapotokat különböztethetünk meg egymástól.

Statikus kiegyensúlyozatlanság

Ebben az esetben a forgástengely és a forgástengely irányba eső tehetetlenségi főtengely párhuzamosak egymással. Közöttük „e” távolság mérhető, melynek ismeretében a kialakuló centrifugális erő meghatározható. A statikus kiegyensúlyozatlanság állandó és mindig azonos fázisban van. Az amplitúdó a fordulatszám növekedésével négyzetes összefüggésben áll (2-szeres fordulatszámon 4-szeres amplitúdó). A statikus kiegyensúlyozatlanság radiális irányban mérve 1-szeres

frekvencián mindig jelen van a spektrumban. A problémára következtetni lehet a rotor kialakításából, valamint a fázisszög mérés eredményéből. A két csapágó között nem alakul ki fáziseltérés, viszont ugyanazon csapágóra eső vertikális és horizontális rezgések fázisszög 90° -os eltérést mutat.

Nyomaték kiegyensúlyozatlanság

A tehetetlenségi főtengely és a forgástengely egy pontban, a súlypontban metszi egymást, de a két tengely egymással egy „ α ” szöget zár be. Ilyenkor nem lép fel centrifugális erő, de megforgatáskor nyomaték keletkezik. Itt is az 1-szeres frekvencia a domináns a spektrumban (fordulatszám és amplitúdó közötti összefüggés megegyezik a fentebb leírtakkal). A radiális irányú rezgés mellett axiális irányban is magas amplitúdójú rezgések jelentkezik. Két csapágó azonos irányban felvett rezgései között 180° eltérés figyelhető meg, ugyanakkor csapágón belül mért radiális (horizontális, vertikális) rezgések között 90° az eltérés.

Általános dinamikai kiegyensúlyozatlanság

Legáltalánosabb kiegyensúlyozatlansági eset a gyakorlati életben. A forgástengely és a tehetetlenségi főtengely kitérő helyzetűek. Csapágókat centrifugális erő és deviációs nyomaték terheli. A spektrumra jellemző az 1-szeres forgási frekvencián mért radiálisan és axiális magas amplitúdó. Két csapágó között a fázis eltolódás $0-180^\circ$ közé esik. Az egy csapágóra eső horizontális és vertikális fázisszög eltérés radiális irányban 90° .

Tengely-beállítási hibák

Egymással összekapcsolt gépek tengelyei különböző képen helyezkedhetnek el egymáshoz viszonyítva. Az ideális eset az egybeesés, de ennek tökéletes megvalósítása nem kivitelezhető. Kapcsolódó tengelyek egymáshoz viszonyítva lehetnek: egybeesőek, szöghibásak, párhuzamossági hibásak, kitérőek.

Szöghiba

Jellemzően magas az axiális rezgés, és a csapágók között axiális irányban 180° -os fázis különbség figyelhető meg. A szöghiba a spektrumban a forgási frekvencia 1-szeres, 2-szeres, sőt gyakran ezek egész számú többszöröseinél magas amplitúdó értékkel jelentkezik. Veszélyes mértékű eltérés esetén 1-szeres frekvencia több felharmonikusa megjelenik meg.

Párhuzamossági hiba

Ez a hiba, hasonló módon jelentkezik, mint az előző. Különbség az, hogy ebben az esetben a csapágók között fellépő 180° -os fázis eltérés radiális irányban mutatható ki.

A 2-szeres felharmonikus gyakran nagyobb érték tartozik, mint az 1-szereshez. Kritikus esetben 4-8-szoros harmonikusok is megjelennek magas nagy amplitúdóval. A spektrum milyenségét a tengelykapcsolók anyagi minősége nagyban befolyásolja.

Tengelygörbülés

A csapágycsoporthoz 180° -os eltéréssel mérhetőek axiális irányban magas amplitúdó értékek. Ha a tengely közepén hajlik meg, akkor a spektrumban 1-szeres forgási frekvencia, ha a tengelykapcsolónál van a görbület 2-szeres frekvencia értékekhez tartozó amplitúdók erősödnek meg.

Excentrikus forgórész

Excentrikusság akkor alakul ki ha, az elméleti forgástengely és az ékszíj-tárcsa, fogaskerék, csapágycsoport geometriai középpontja között párhuzamos eltérés jelentkezik. Az excentrikus forgórész 1-szeres fordulatszámának megfelelő frekvencián a rezgésbesség magasabb értéket mutat, ha a két forgórész középvonalát összekötő egyenes irányából mérjük, mint a többi irányból. Az egy csapágyon levő jelentkező horizontális és vertikális rezgések között 0° vagy 180° a fázis különbség.

Tengely rezonanciák

Rezonancia akkor lép fel, ha a tengely sajátfrekvenciájával megegyező frekvenciájú rezgés ébred a rendszerben. Ennek következtében a rezonanciafrekvencián az amplitúdó nagymértékben megnövekszik, ami a berendezés idő előtti tönkremeneteléhez vezet. A rezonancia frekvencián a fázis eltolódás 90° , ezt a frekvencia tartományt elhagyva pedig 180° is lehet. A nagy fázis különbség miatt a rezgések kiegyenlítése nehezen megoldható. Gyakorlatban a forgó rendszer rezonancia frekvenciáját felfutás-lefutás vizsgálattal (run up/coast down), valamint kalapácsütés teszttel (Bump test) lehet meghatározni. A kapott spektrumképen az a sajátfrekvencia, ahol a kiugró amplitúdó érték mellett fázisszög váltás is fellép.

Mechanikai lazaságok

Három jellegzetes esetet különböztethetünk meg.

„A” típus

Az alapozás, az alaplemez vagy a gép láb szerkezeti lazasága, gyengesége okozza. Ezt a hibát okozza az alap betonanyagának tönkremenetele, a rögzítő csavarok lazasága, vagy az alap, tartóváz szerkezetének deformálódása. Vertikális irányú méréseknél a

forgásfrekvencia 1-szeres tartománya nő meg, valamint a szerkezeti elemeken mért rezgések között 90° - 180° közötti eltérés jelentkezhet.

„B” típus

Jellemzően akkor keletkezik, ha a csapágó körüli szerkezeti elemek sérülnek, a csapágóházat rögzítő csavarok meglazulnak vagy fellazul a csapágó alapzata. Radiális irányban mérve a rezgéseket az alapfrekvencia 1-5-szörös tartományai is megjelennek.

„C” típus

Forrása a gépelemek közötti nem megfelelő illesztés. Nem lineáris váltakozó erők lépnek fel a rotor és a laza alkatrészek között. Ennek következtében a spektrumban számos felharmonikus, sőt alharmonikusok (1/2-szeres, 1/3-szoros illetve ezek többszörösei) is jelentkeznek. Ennek következtében a spektrum egy széles, szabálytalan zajszintet mutat. A forrása gyakran lehet rosszul szerelt csapágó, a csapágó körbefordulása a tengelyen, siklócsapágó indokolatlanul nagy kimozdulása, stb.

Géplábbal kapcsolatos hibák

Ha a géplábak vagy a szerkezet olyan mértékben hibásodott (torzul, csavarodott), hogy a tartócsavarokat kilazításával a lábak több mm-rel elemelkednek, akkor a jelenséget „puha lábnak” hívják. Ez befolyásolja a tengelybeállítások pontosságát. A spektrumon 1-szeres frekvenciatartományban nagy, magas amplitúdó értékkel jelentkezik. A szerkezet torzulása, a gépláb megrepedését okozza, aminek következtében nagymértékű erők, feszültségek keletkezhetnek a csapágóházban, a vázszerkezetben.

Gördülőcsapágókat tönkremenetele

Csapágók rezgései

A gördülő csapágók működése közben keletkező rezgéseket két csoportba sorolhatjuk. Állandósult és tranzienst rezgések.

Állandósult rezgések

A csapágóházon mért rezgések tartalmazzák a forgó rendszer összes saját frekvenciáját, valamint azok felharmonikusait. Az állandósult rezgések 10-10000 Hz tartományban, az energia spektrumban dominánsan jelentkeznek. Ezek a rezgések a csapágón kívülről származnak.

A csapágóban keletkező állandósult rezgések forrása a csapágóház, a tengely és a csapágó geometriai pontatlanságából adódik, és ez határozza meg a frekvencia spektrumot. Az csapágóra vonatkozó alapfrekvenciák számításal meghatározhatók. A

csapágy által keltett állandósult rezgések amplitúdója általában kicsi, és a fordulatszámtól való függésük miatt beleolvadnak a rendszer természetes frekvenciáiba. ([10] alapján.)

Tranziens rezgések

A tranziens rezgések a gördülő felületek egyenetlenségéből adódnak, és a felületi tökéletlenségek érintkezései mechanikai ütések, ütközéseket okoznak. Ezek ultrahang jellegű hullámot okoznak, amit ütésimpulzusnak nevezünk, és az csapágy szerkezetének anyagában tovább tudnak terjedni. Az ütésimpulzusok forrásai különbözőek lehetnek:

- Az alacsonyszintű ütésimpulzusok forrása a csapágy felületszerkezetének érdessége. Ezek kHz-es tartományban jelentkeznek.
- A csapágyban keringő kemény részecskékkel való ütközés ritkább jelenség, de nagyobb impulzust eredményez. Ezek forrása a gördülő felületeken kialakult szilárd részecskék benyomódása vagy kiszögelődése. Ez az ütésimpulzus képpen véletlenszerűséget mutat.
- A csapágyban keletkezett felületi sérülések (lepattogzások/pittingek, repedések, stb.) a kezdeti stádiumban rendszeres előfordulású ütésimpulzusokat hoznak létre. Gyakoriságukat számítással meg lehet határozni. Ahogy a csapágykárosodás egyre előrehaladottabb állapotba kerül, a szabályosság megbomlik, majd a kritikus szinten az ütésimpulzus véletlenszerű gyakorisággal és nagysággal jelentkezik.

Az ütésimpulzusok rugalmas hullámok, amik az ütközés/érintkezés-erő időösszefüggését mutatják. A rugalmas hullámfrontok hatnak a gyorsulásérzékelőre, ami az ütési sebesség négyzetével arányos tranziens amplitúdót érzékel, de ennek nagysága független a test tömegétől. A létrejövő ütközési sebességek a következőktől függenek:

- Gördülő csapágyak esetén az ütközési sebességeket a futófelület állapota határozza meg. Az idegen részecskék nagyobb ütközési sebességet okoznak, mint a bemélyedések. A kinyúlásokkal való ütközés sebessége függ a kitüremkedések magasságától, valamint a gördülő elem geometriai adottságaitól. Bemélyedés okozta ütésimpulzus sebességét a kráter mélysége, a terhelés mértéke és a gördülő elem milyensége nagymértékben befolyásolja. A golyók mélyebben tudnak behatolni a kráterbe, mint a görgők, ezért a görgők kevésbé érzékenyek az ilyen jellegű sérülésekre.

- A csapágyon belül éledő ütésimpulzus sebessége arányos a gördülési sebesség változásával. A fordulatszám bármely változásával négyzetesen arányos tranziens amplitúdót továbbít a rezgésérzékelő.
- A csapágy kenésének állapota nagyban befolyásolja a keletkező ütközések mértékét. A szárazon futás és a megfelelően kent állapot között háromszoros is lehet a tranziens amplitúdók különbsége. Csapágy vizsgálatoknál nagyon fontos szempont a gördülő elemek kenetségi állapotát. ([10] alapján.)

Gördülőcsapágyak tönkremenetelének folyamata

A csapágyak által keltett rezgések okozói lehetnek:

- Kiegyensúlyozatlanság
- Tengelykapcsoló hiba
- Tengely beállítási hiba
- Lazaság okozta rezgések
- Csapágykopás

A csapágyban keletkezett rezgéseket a terhelés irányában lehet a legjobban kimutatni. A csapágy élettartalmát többek között a fordulatszám, terhelés, kenési állapot, hőmérséklet, anyag minősége befolyásolja. Leggyakrabban a hibák a külső és belső gyűrűk, valamint a golyók, görgők felületének kopásából származnak. Csapágy vizsgálat szempontjából négy frekvencia tartományt különböztethetünk meg:

- A: ~100 Hz-ig (alacsony frekvencia tartomány). Ebben a tartományban főként kinetikai rezgések jelentkeznek. Normál érzékelőkkel kimutathatóak a hibafrekvenciák.
- B: ~100-1000 Hz-ig (közepes tartomány)
- C: ~1-100 kHz-ig (magas frekvencia tartomány). Csapágy szerkezeti rezonanciája ebbe a tartományba tehető. A csapágy működéséből fakadó lökésimpulzus jelek detektálhatóak.
- D: ~100-1000 kHz-ig (akusztikus emisszió tartomány). Futófelületen levő sérülések akusztikai emissziót okoznak.

A csapágy tönkremenetele 4 szakaszra bontható:

I. szakasz:

A csapágy meghibásodások első jelei (kenési elégtelenség) az akusztikus emisszió tartományban megjelennek kb. 250-300 kHz környékén. A kopás növekedésével a 20-60 kHz tartományban jelentkeznek rezgések.

II. szakasz:

A csapágy alkatrészek saját frekvenciáin, 500-2000 Hz-en észlelünk jeleket. Ez már a csapágy kisebb mértékű meghibásodására utal. Fontos, hogy ebben a tartományban a sajátfrekvencia alatt és felett oldalsávok jelennek meg a spektrumban, így meg lehet különböztetni a tartószerkezet romlás által gerjesztett rezgésektől.

III. szakasz:

Megjelennek a csapágyhiba frekvenciák és ezek felharmonikusai. A romlás következtében egyre több harmonikus jelentkezik, valamint a csapágy elemeinek sajátfrekvenciái megnőnek és megjelennek mellettük az oldalsávok. Ebben a szakaszban van szükség a csapágy cseréjére, ekkor a hiba frekvenciák már jól elkülönülnek.

IV. szakasz:

A forgási frekvencia 1-szeres tartományához tartozó amplitúdó megnő, valamint ezzel együtt a harmonikusok is. A spektrum kiterjed egy széles, szabálytalan sávra, egy átfogó zajszintet alkotva. Leginkább a rezgésgyorsulás spektrum mutatja ezt a képet.

A rezgések 10 kHz-ig terjedő tartományában lehet megfigyelni bizonyos meghibásodásokra jellemző frekvenciákat:

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

([11] alapján.)

Fogaskerék meghibásodás

A fogaskerek jellegzetes spektrummal rendelkeznek. A hiba nélküli fogaskerék fordulatszámának és az áttételnek megfelelő frekvenciák mellett a spektrumban megjelennek az úgynevezett fogkapcsolási (GMF) frekvenciák, illetve ezek alacsony amplitúdójú harmonikusai. A GMF frekvenciákra jellemző, hogy körülöttük oldalsáv frekvenciák jelentkezik.

Fogkopás

A kopott fogaskerék sajátfrekvenciájával és a fordulatszámával megegyező oldalsávok jelentkezik a spektrumban. A GMF frekvencia nem mindig változik meg,

de általában megnő az oldalsávok száma és ezek amplitúdója is. Ezen kívül magasak a 2-szeres, 3-szoros GMF frekvencián jelentkező értékek.

Fogaskerék ütés, kotyogás

Ha a GMF körüli oldalsávok magas amplitúdóval és egymástól viszonylag nagy távolsággal jelentkeznek, akkor a fogaskerék illeszkedésének lazaságára lehet következtetni. A fordulatszám 1-szeres frekvenciáján nagy amplitúdó jelentkezik, ami a fogaskerék ütéséből származik.

Túlterhelés

A GMF frekvenciák érzékenyek a túlterhelésre, ugyanakkor magas fogkapcsolási frekvencia amplitúdók nem egyértelműen utalnak túlzott igénybevételre. A vizsgálatot lehetőleg maximális terhelés mellett kell végezni.

Fogaskerek szöghibája

Leggyakrabban a 2-szeres forgási frekvencián jelentkezik vagy magas GMF harmonikusokat hoz létre a fogaskerék fordulatszámának megfelelő oldalsáv frekvenciákban. A GMF amplitúdó szerez valamint 3-szoros frekvencia tartományban kiugróan magas lehet. Fontos jellemző, hogy a fogkapcsolási frekvencia két oldalán jelentkező oldalsávok nem szimmetrikusak.

Fogtörés

Ez a hiba a fogaskerék forgási frekvenciájának 1-szeres tartományában mutatkozik meg, de a frekvencia spektrumban nem mutat jelentősen kiugró értéket, ezért a fogtörés jelenségét időtartományban szokták vizsgálni. Az időjelben az ütközési csúcsok nagysága 10-20-szor nagyobb, mint a frekvencia tartományban.

([11] alapján.)

Hidraulikus és aerodinamikus erők által gerjesztett rezgések

Fluidumot szállító lapátos berendezések a szivattyúk, kompresszorok, ventillátorok. A lapátnak van egy úgynevezett lapát áthaladási frekvenciája (BPF), amit a lapszám és a fordulatszám szorzatából lehet meghatározni. A BPF frekvenciához tartozó magas amplitúdó, a gép forgókereke és az álló rész közötti légrés hibájára utal. További hibákat jelez, ha a lapát áthaladási frekvenciája egybe esik a rendszer valamelyik sajátfrekvenciájával.

Turbulens áramlás a spektrumban szabálytalan, alacsony csúcsokat okoz. Ha a turbulencia nagymértékű, akkor a magasabb frekvenciákon keletkező szabálytalan rezgéssáv a jellemző.

Szivattyúban létrejövő kavitáció esetén, magas frekvencián a BPF harmonikusokra ráarakódva szabálytalan rezgéskép alakul ki. A kavitáció megjelenése hangjelenséggel jár, ami hasonló ahhoz, mint amikor homok kerül a szivattyúban. Ez a jelenség nem állandó hibaként mutatkozik, de a korrodálódás veszélyét hordozza magában. ([11] alapján.)

Szíjhajtásból eredő rezgések

Laza, kopott, rosszul párosított szíjak

A frekvencia spektrumban a szíjhajtásra jellemző értékek alacsonyabb frekvencia tartományban jelentkeznek, mint a hajtó és hajtott gép forgásából származóak. Kopás, fellazulás esetén a szíjfrekvencia 3-4 harmonikusa megjelenik, ezek közül legtöbb esetben a 2-szeres frekvencián levő csúcs kimagasló. Lánchajtásnál a lánc áthaladási frekvencián jelentkeznek a problémák.

Szíz és fogazott tárcsa szöghibák

Tárcsák szöghibáit axiális irányból mérve vehetjük észre, ilyenkor a forgási frekvencia 1-szeres frekvencia tartományában magas értékeket tapasztalhatunk. Teljesen biztos diagnózist fázisszög méréssel határozhatunk meg.

Excentrikus szíjtárcsák

Ez a hiba a tárcsa forgási frekvenciájának 1-szeres értékénél jelentkezik magas amplitúdóval. Méréskor az érzékelőt a szíjtárcsák középvonalán átmenő egyenes irányába kell felhelyezni, mert ebben az irányban a legnagyobb a rezgés. Mind a hajtó, mind a hajtott oldalon mérni kell a csapágyakat. Ebben az esetben is szükség van a fázisszög mérésre, hogy biztosan meg tudjuk ítélni a berendezés állapotát. Excentricitás akkor lép fel, ha az előbb említett rezgésértékek mellett az egy-egy csapágyon mért horizontális és vertikális értékének fázisszög eltolódása 0° vagy 180° .

Rezonanciák a szíjon

Rezonancia akkor jelentkezik, ha a gép tengelyének forgási frekvenciája és a szíj sajátfrekvenciája egybe esik vagy megközelítik egymást. Működés során a laza ágba kisebb sajátfrekvencia jelentkezik, míg a húzott ágba nagyobb.

Váltakozó áramú villamos motorok jellemző rezgései

(A) állórész excentrikusság, rövidzárlat, fellazult állórész, laza vasmag

A váltakozó áramú aszinkron motorok mérésekor a hálózati frekvencia (Európában 50 Hz) kétszeresen jelentkeznek magas értékek, ha a motor állórésze a meghibásodás

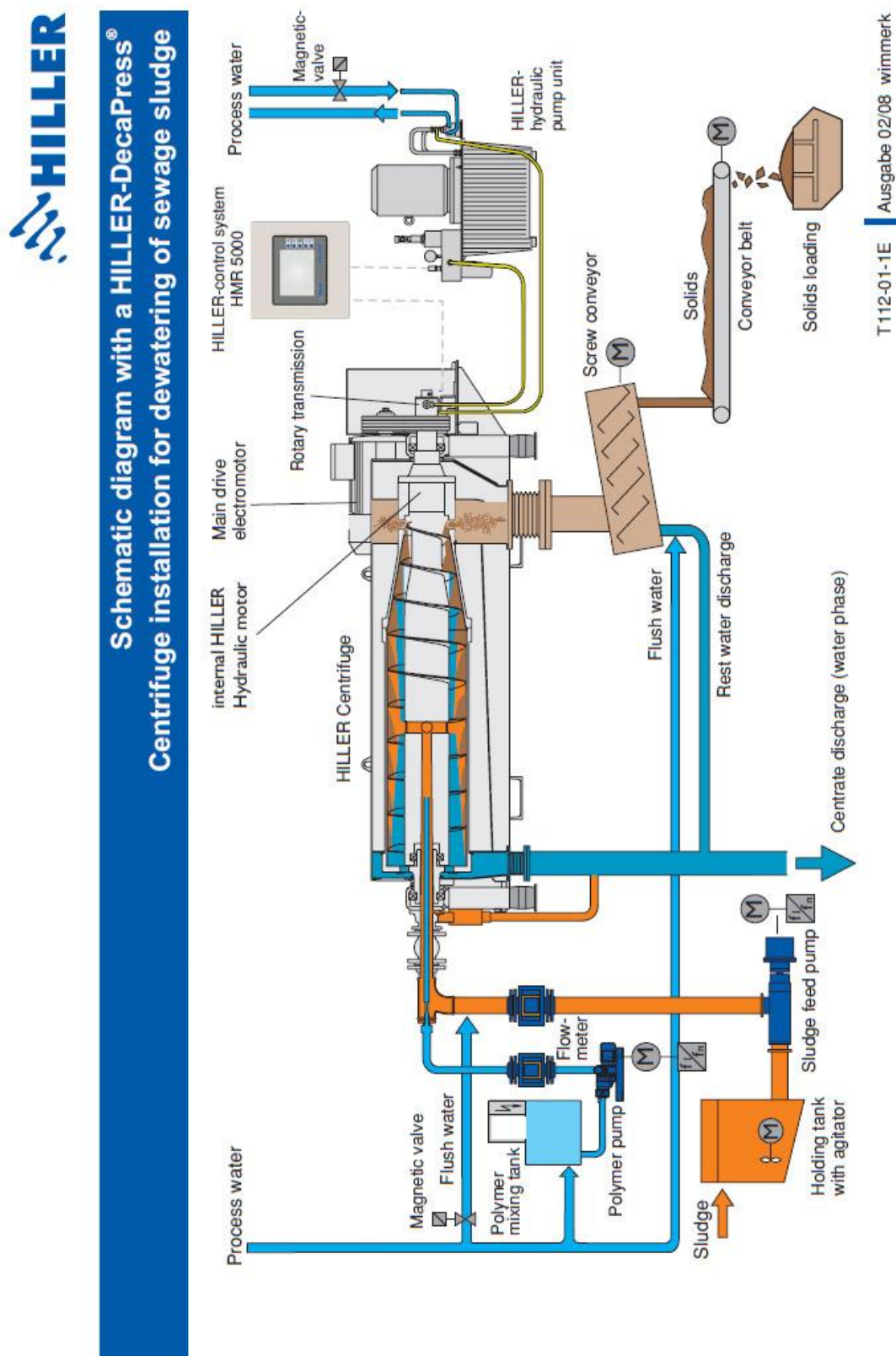
forrása. Az állórész excentricitása miatt állandó mértékű légrés változás alakul ki az álló és a forgó rész között.

(B) Forgórész excentrikussága

Ha a forgórész excentrikus, akkor egy körbe forgó, folyamatosan változó légrés jön létre az álló és a forgó rész között, ami lüktető rezgést okoz. A spektrumban a kétszeres hálózati frekvencia és a kétszeres forgási frekvencia között jelentkezik. Továbbá a kétszeres hálózati frekvencia környezetében a pólus áthaladási frekvenciával azonos oldalsáv frekvenciák jelennek meg.

6. melléklet

Iszapcentrifuga sematikus ábrája:



Forrás: <http://www.hillerzentri.de/New/en/media.html#>, 2012.11.15. 16:06