

Debreceni Egyetem

Műszaki Kar

Műszaki Alaptárgyi Tanszék



Rezgés- és zajspektrum kapcsolatának vizsgálata, rezgésdiagnosztikai eszközökkel

Készítette: **Tóth Gellért**

környezetmérnök szakos hallgató

Belső konzulens: Dr. Kocsis Imre

Külső konzulens: Homolya György

Tanszékvezető: Dr. Kocsis Imre

Debrecen, 2011.

Bevezetés	5
1. Fejezet: Rezgéstani ismeretek.....	6
1.1. A rezgés és típusai.....	6
1.1.1. A rezgés fogalma	6
1.1.2. A rezgések legfontosabb jellemzői	7
1.1.3. A rezgések kategóriái.....	8
1.2. Rezgések összegződése	11
1.2.1. Egyirányú rezgések összegződése	12
1.2.2. Egymásra merőleges irányú rezgések.....	14
1.3. Csillapított és gerjesztett rezgések	15
1.3.1. Harmonikus rezgés csillapítással	15
1.3.2. Gerjesztett rezgés csillapítás nélkül.....	16
1.3.3. Gerjesztett rezgés csillapítással	16
2. Fejezet: A rezgésvizsgálat alapjai.....	17
2.1. A rezgés amplitúdó és frekvencia skálái.....	17
2.2. Analóg-digitális jelátalakítás.....	18
2.3. Spektrumkép létrehozása	19
3. Fejezet: Rezgések forrásai	19
3.1. Kiegyensúlyozatlanság.....	19
3.1.1. Statikus kiegyensúlyozatlanság	20
3.1.2. Nyomaték kiegyensúlyozatlanság.....	20
3.1.3. Általános dinamikai kiegyensúlyozatlanság	20
3.2. Tengely-beállítási hibák	21
3.2.1. Szöghiba.....	21
3.2.2. Párhuzamossági hiba.....	21
3.3. Tengelygörbülés.....	21
3.4. Excentrikus forgórész.....	21
3.5. Tengely rezonanciák	22
3.6. Mechanikai lazaságok	22
3.6.1. „A” típus	22
3.6.2. „B” típus	22
3.6.3. „C” típus	22

3.7.	Géplábbal kapcsolatos hibák.....	23
3.8.	Gördülőcsapágysak tönkremenetele	23
3.8.1.	Csapágysak rezgése.....	23
3.8.2.	Gördülőcsapágysak tönkremenetelének folyamata	25
3.9.	Fogaskerek meghibásodás.....	26
3.9.1.	Fogkopás	26
3.9.2.	Fogaskerek ütés, kotyogás	27
3.9.3.	Túlterhelés	27
3.9.4.	Fogaskerek szöghibája	27
3.9.5.	Fogtörés	27
3.10.	Hidraulikus és aerodinamikus erők által gerjesztett rezgések	27
3.11.	Szíjhajtásból eredő rezgések.....	28
3.11.1.	Laza, kopott, rosszul párosított szíjak	28
3.11.2.	Szík és fogazott tárcsa szöghibák.....	28
3.11.3.	Excentrikus szíjtárcsák.....	28
3.11.4.	Rezonanciák a szíjon.....	28
4.	Fejezet: Mérési módszerek	29
4.1.	Lökésimpulzus módszer (SPM-Shock Puls Method)	29
4.1.1.	dBm/dBc mérés.....	30
4.1.2.	LR/HR eljárás	31
4.1.3.	SPM spektrum.....	32
4.2.	Rezgésmérés módszer	33
4.2.1.	ISO 2372 alkalmazása	33
4.2.2.	ISO 10816 alkalmazása	34
4.2.3.	EVAM (Evaluated Vibration Analysis Method)	35
4.2.4.	Fázisszög mérés	36
4.3.	Egyéb alkalmazások a Leonova műszerben.....	37
5.	Rezgésmérés és kiértékelés a gyakorlatban	37
5.1.	Mérés előkészítése és a mérés.....	37
5.1.1.	A mérőpad.....	37
5.1.2.	Mérő pontok beállítása, a mérés	39
5.2.	Az eredmények kiértékelése	40
5.2.1.	Az 1. csapágyon mért adatok kiértékelése.....	40

5.2.2. A 2. csapágó állapota	45
5.2.3. Rezgés mértéke a 3. csapágóon	46
6. Összegzés.....	47
Irodalomjegyzék	48
1. Melléklet	49
2. Melléklet	58
3. Melléklet	61

Bevezetés

A műszaki diagnosztikai módszerekkel a gépek, berendezések vizsgálata működés közben végezhető, így a gépek állapotának felmérése miatt nem kell leállnia a termelésnek. A vizsgálati idő gyakorisága szabadon megválasztható, így nyomon lehet követni a kopási, meghibásodási folyamatokat. Az iparban a gépek állapotának rendszeres vizsgálata elengedhetetlen a költségtakarékos üzemeltetés szempontjából. Nem mindegy, hogy egy gyárnak hirtelen kell-e megszakítani a gyártási műveleteit egy váratlan meghibásodás miatt, vagy előre be tudják tervezni a karbantartási műveleteket, ami a vállalatnak anyagi szempontból kulcsfontosságú.

Jelenleg a korszerű rezgésdiagnosztikai berendezések, módszerek online mérést is lehetővé tesznek, így a gép állapotát a nap huszonnégy órájában figyelemmel lehet kísérni. További előnye, hogy nem szükséges a személyes jelenlét a mérés helyszínén, valamint olyan esetekben, amikor a körülmények olyanok, hogy az emberi egészségre veszélyt jelenthet. Napjaink diagnosztikai berendezései modern kommunikációs rendszerekkel vannak felszerelve, ezért képesek e-mail vagy sms értesítést küldeni, ha a vizsgált paraméterek drasztikusan megváltoznak, és az értékek elérik a figyelmeztetési szintet.

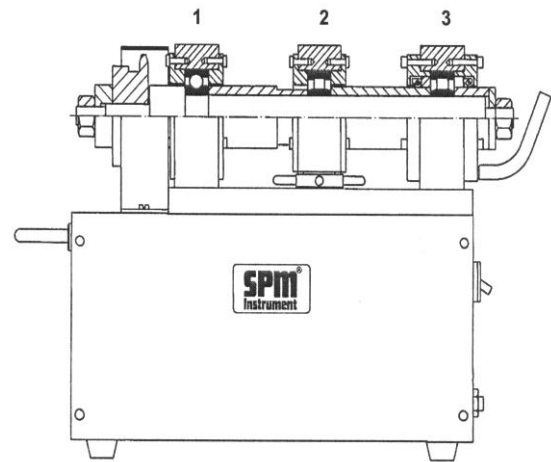
A környezetmérnöki gyakorlatban is fontos szerepe van a gépek karbantartásának. Például egy vízmű telepen elengedhetetlen a berendezések hibátlan működése. Egy komolyabb meghibásodás nagymértékű környezeti károkat okozhat vagy korlátozhatja az ivóvíz ellátást.

A Debreceni Egyetem Műszaki Karának rendelkezésére áll egy jól felszerelt diagnosztikai labor. Zajmérésre, hő térkép készítésére és elemzésére, rezgések vizsgálatára és analízisére alkalmas berendezések, valamint mérőpadok, próbapadok biztosítják a magas szintű képzés lehetőségét. Méréseimet az SPM Instrument AB által gyártott Leonova™ *Infinity* (későbbiekben csak Leonova) mérőműszerrel, valamint egy az SPM cég által forgalmazott mérőpadon végzem. A mért eredmények feldolgozásához az SPM kiértékelő programját, a Condmaster Nova 2010-es verzióját használom.

Köszönettel tartozok Homolya Györgynek, valamint belső konzulensemnek Dr. Kocsis Imrének, akik mind az elméleti anyag elsajátításában, mind a gyakorlati alkalmazás megismerésében nagyon sokat segítettek.



1. ábra: Leonova™Infinity mérőműszer
(<http://truemeas.com/MyImages/Leonova.jpg>,
2011. november 15. 19:32)



2. ábra: Rig DEM 20/21-es próbapad
(a Rig DEM 20/21-es próbapad műszaki adatlapjából)

A vizsgálati terv 2011 őszén fogalmazódott meg, melynek keretében egy üzem forgó alkatrészeket tartalmazó berendezéseinek állapotvizsgálatát végezzük. Ismert szimptómák, gépállapot hibák felismerése, valamint új szimptómák feltárása a célkitűzésünk. 2012 folyamán a Debreceni Vízmű Zrt. telephelyein fogunk méréseket végezni, ahol nagyteljesítményű szivattyúk (pl.: FLYGT 3355. CP. MT szivattyú), kompresszorok (pl.: RKR-ROBOX SRB 41 kompresszor) és gázmotorok (pl.: JENBACHER 208 típusú, 808 kW hőteljesítménnyel) üzemelnek.

A dolgozatban tárgyalom a méréstechnikát és az ezt megalapozó elméleti hátteret, valamint bemutatom ezek gyakorlati alkalmazását az SPM mérőpadon.

1. Fejezet: Rezgéstani ismeretek

1.1. A rezgés és típusai

1.1.1. 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. Egy test rezgőmozgásának teljes leírásához hat egyedi mozgás kombinációjára van szükség. Ezek: transzlációs vagy haladó mozgás a tér három (x,y,z) irányába, valamint rotációs vagy forgó mozgás az

x,y,z tengelyek körül. Tehát a test mozgását ez a hat komponens eredője határozza meg, és azt mondjuk, hogy ez a test hat szabadsági fokkal rendelkezik.

Előfordul, hogy egy test mozgása korlátozva van, és nem érvényesül mind a 6 komponens az eredő mozgásban. Ilyenkor eredő elmozdulást létrehozó mozgások számával egyezik meg a rendszer szabadságfoka. Például a lift mozgása egy szabadságfokkal rendelkezik, mert egy egyenes mentén halad. ([1] és [4] alapján.)

1.1.2. A rezgések legfontosabb jellemzői

A rezgés körfrekvenciája, frekvenciája:

$$\omega = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi}{T} \text{ (1/sec)}$$

$$f = \frac{1}{T} \text{ (Hz = 1/sec)}$$

A rezgés A amplitúdója meghatározható, mint a rezgés elmozdulása, a sebessége vagy a gyorsulása.

A rezgés φ fázisszögét definiálhatjuk úgy, mint egy rezgőmozgást végző pont pozícióját egy adott pillanatban, egy fix kezdőponthoz viszonyítva fokban vagy radiánban megadva.

Rezgésdiagnosztikában gyakran használják a lineáris amplitúdó helyett az 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 periodikus folyamat energiatartalommal arányos jellemző:

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

Rezgés amplitúdójának átlaga:

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

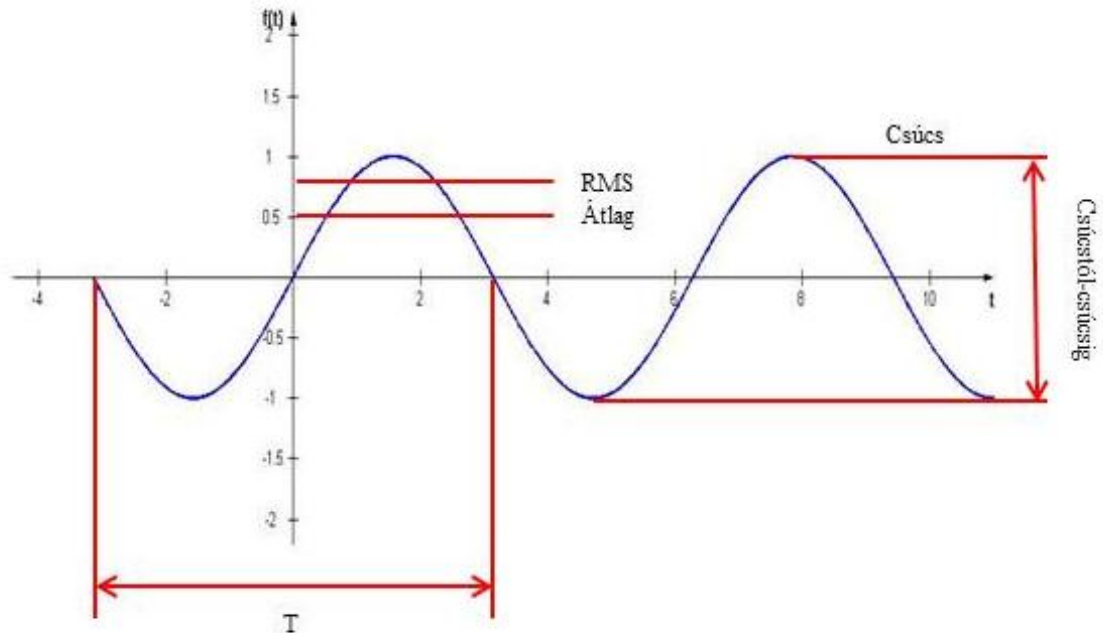
A pozitív és negatív csúcs amplitúdók abszolút értékeinek az összege adja az A_{PTP} csúcstól-csúsig amplitúdó értéket (Peak to Peak):

$$A_{PTP} = |A| + |-A|$$

További jellemzők:

$$\text{Formatényező} = \frac{A_{\text{eff}}}{A_{\text{lin}}}$$

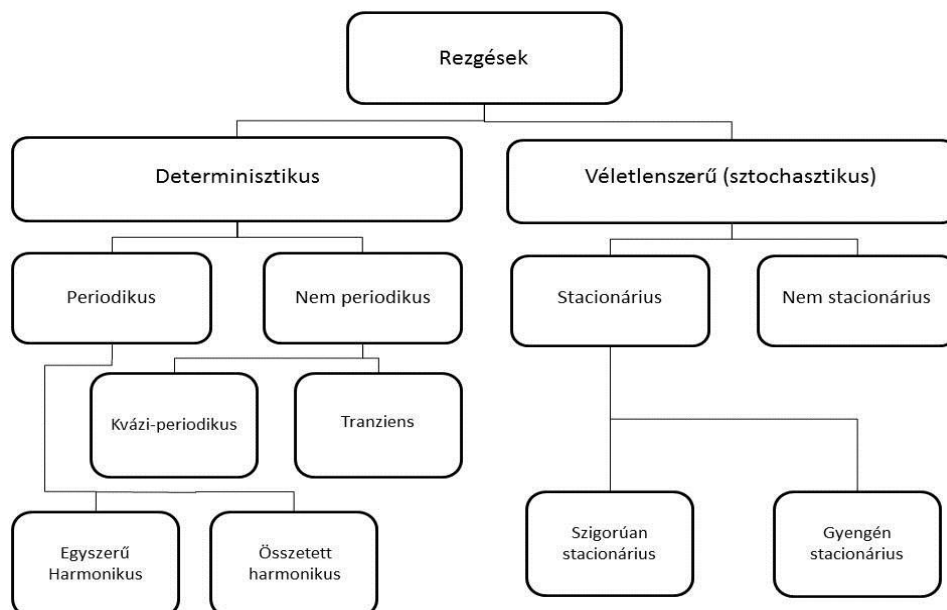
$$\text{Sisaktényező (csúcs tényező)} = \frac{A}{A_{\text{eff}}}$$



1.1. ábra: Rezgések jellemzői

([1] [2] [3] [7] alapján.)

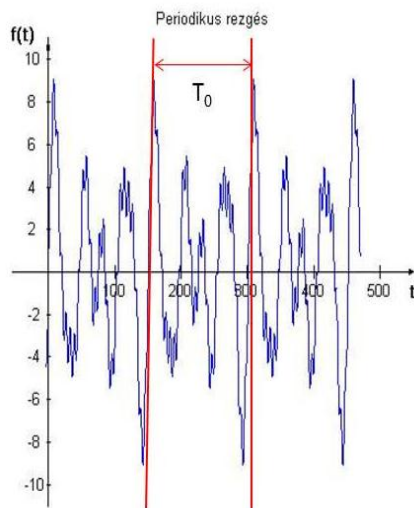
1.1.3. A rezgések kategóriái



1.2. ábra: „Rezgés fa”

A rezgések, folyamatok lehetnek determinisztikusak vagy sztochasztikusak, attól függően, hogy a jelenségek értékeinek időbeli változását meg tudjuk-e mondani vagy nem.

Determinisztikus rezgések



1.3. ábra: Periodikus rezgés

Determinisztikusak azok a rezgések, amelyeknek jellemzőinek az időbeli változását az alapösszefüggések és a kezdeti feltételek ismeretében egyértelműen meg tudjuk határozni. Periodicitás alapján tovább oszthatóak periodikus illetve nem periodikus rezgésekre.

Periodikus rezgések:

Az f periodikus rezgés függvénye, a következő módon írható fel:

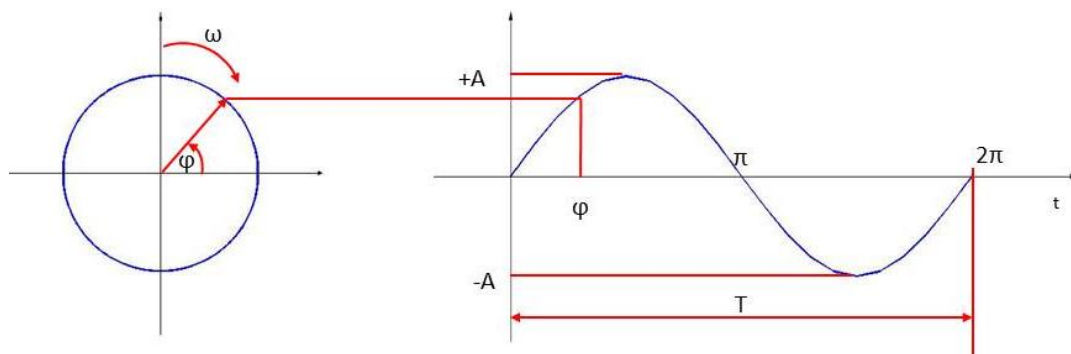
$$f(t) = f(t + n \cdot T_0)$$

Ahol T_0 a periódus idő, az $n \in \mathbb{Z}$. Az $f(t)$ függvény kifejezi, hogy a mozgás alakja megismétlődik és az ismétlődés a végtelenségig folytatódik. (1.3. ábra)

Harmonikus rezgés a periodikus rezgés egy részesete. A rezgés egyetlen frekvenciával jellemezhető szinusz hullámmal írható le.

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

Az A amplitúdó, 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:



1.4. ábra: Forgó vektor vetülete

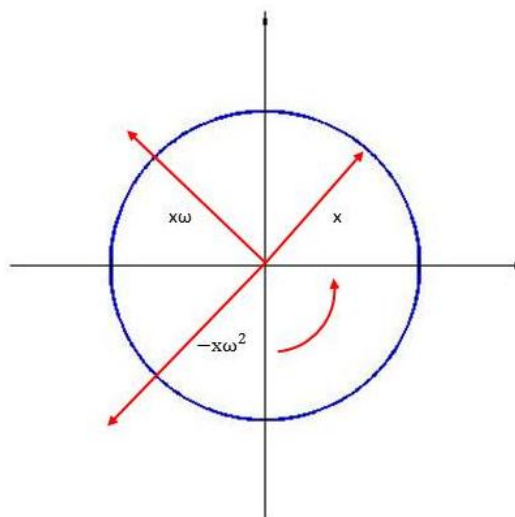
Ha x -el jelöljük a kitérést, akkor a harmonikus rezgés felírható a következő alakban:

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

Az x_0 a maximális kitérés, a t_0 időpillanatban a kitérés mértéke 0-val egyenlő. A rezgés sebességét megkapjuk, ha vesszük az előbbi függvény idő szerinti első deriváltját, gyorsulását pedig a második deriválttal írhatjuk le:

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

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



1.5. ábra: Rezgés vektoros ábrázolása

Az elmozduláshoz képes a sebesség $\pi/2$ -vel a gyorsulás π -vel siet. Az általános periodikus vagy összetett harmonikus rezgések csoportjába tartoznak a nem-szinuszos

periodikus rezgések. Ezt a folyamatot végtelen nagy számú különböző amplitúdóval és fázissal rendelkező komponensek összegeként lehet leírni. Ennek alapján az általános periodikus rezgés, egy T_0 periódusidejű alaprezgésből és az f_0 alaphfrekvencia egészszámszámú többszöröseiből álló harmonikusokból tevődik össze.

Az általános periodikus és harmonikus rezgéseknél a spektrum előállításához meg kell adni az A_k amplitúdókat és az φ_k fázisértékeket az $f=f_k$ pontokban.

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

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

Nem periodikus rezgések:

Kvázi-periodikus és tranziens jelenségek abban különböznek az általános periodikus jelenségektől, hogy az alaprezgés mellett a harmonikusok nem az alaphfrekvencia egész számú többszöröseivel megegyező frekvencián rezegnek.

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

Annak következtében, hogy az f_k frekvencia nem az alaphfrekvencia egész számú többszöröseként áll elő, a spektrumnak időfüggő jellege lesz.

Tranziens vagy átmeneti rezgéseket rendszerint valamilyen determinisztikus gerjesztések okozzák. Ilyen folyamat például a csillapított rezgés. A tranziens folyamatok spektruma folyamatos képet mutat, nem pedig diszkrétet, mint a periodikus rezgés esetében.

Sztochasztikus rezgések

A sztochasztikus jelenségek vizsgálatának alapja az eloszlás sűrűség. 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. Mivel a fázis ingadozik, egyszerűbb a teljesítménysűrűség spektrumot használni.

1.2. Rezgések összegződése

Ha egy rendszer valamely pontja két vagy több rezgést végez egyszerre, akkor az eltérés irányát, mértékét az egyes vektorok kitérés vektorainak összege adja meg, azaz

szuperponálódnak. Azokkal az esetekkel foglalkozok részletesebben, ahol a két rezgés egyirányú vagy merőleges egymásra.

Ha a szuperpozíció olyan, hogy a rezgő test a hat különböző rezgést leíró mozgás közül csak egyet végez, akkor egy szabadságfokú rezgésről beszélünk. Példa elehet egy tömeg-rugó rendszer vagy egy inga lengése, ami egy síkban mozog.

Az egyszerű tömeg-rugó rendszer az m tömegű testet a nyugalmi pontból x távolságra való eltávolítása és a k rugómerevség ismeretében felírható a következő alakban:

$$F = -k \cdot x$$

$$m \cdot \ddot{x} + k \cdot x = 0$$

Ebben az esetben a rendszer nem tartalmaz se kényszer erőt se csillapítást.

A differenciálegyenlet megoldása:

$$x = C_1 \cdot \sin\left(t \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}\right) + C_2 \cdot \cos\left(t \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}\right), C_1 \text{ és } C_2 \text{ tetszőleges konstansok}$$

A $t=0$, $x=x_0$, $\dot{x} = 0$ kezdeti feltételekből azt kapjuk, hogy

$$x = x_0 \cdot \cos\left(t \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}\right).$$

Az egyenlet egy csillapítatlan rezgést ír le, aminek a periódusideje és körfrekvenciája:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

1.2.1. Egyirányú rezgések összegződése

A rezgések frekvenciája alapján három különböző esetet különböztethetünk meg.

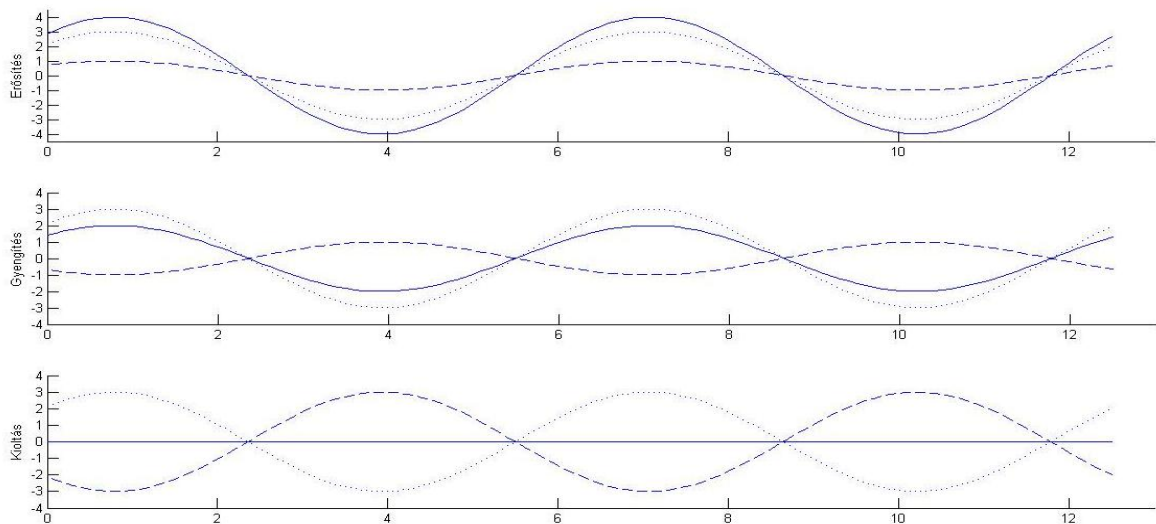
Egyenlő frekvenciák esete

Ha két egyirányú és azonos frekvenciájú rezgés eredőjét állítjuk elő, akkor az így kapott rezgés az összetevőkkel azonos irányú és frekvenciájú lesz.

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

Ha a fázisok megegyeznek:

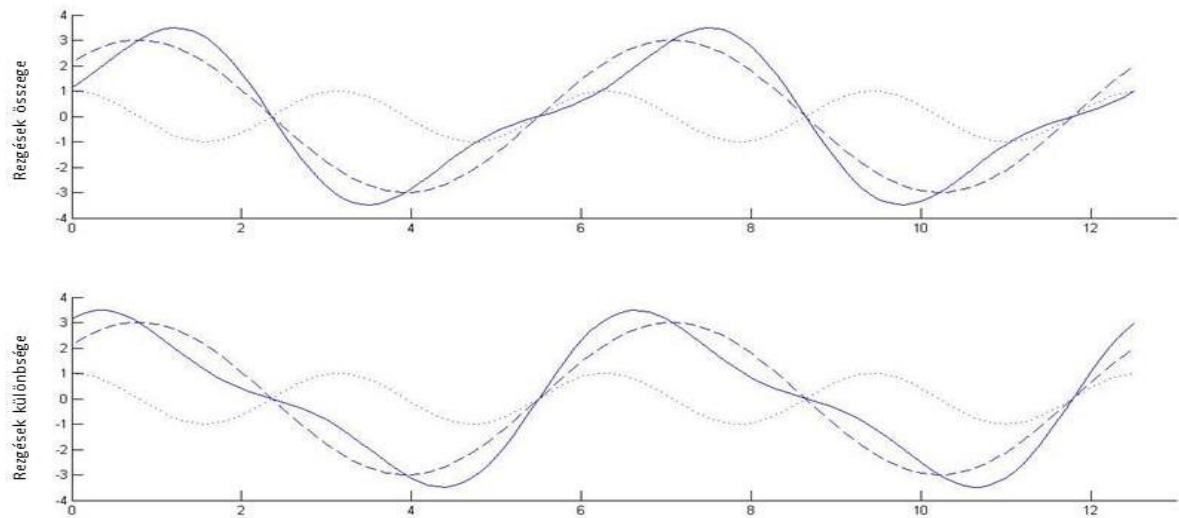
- Erősítés: $A_1 + A_2 = A$
- Gyengítés: $A_1 - A_2 = A$
- Kioltás: $A_1 = -A_2$, $A = 0$



1.6. ábra: Egyirányú rezgések összegzése azonos frekvenciák esetén (Szaggatott vonallal az alkotó rezgések, folytonos vonallal az eredő látható.)

Különböző frekvenciák esete

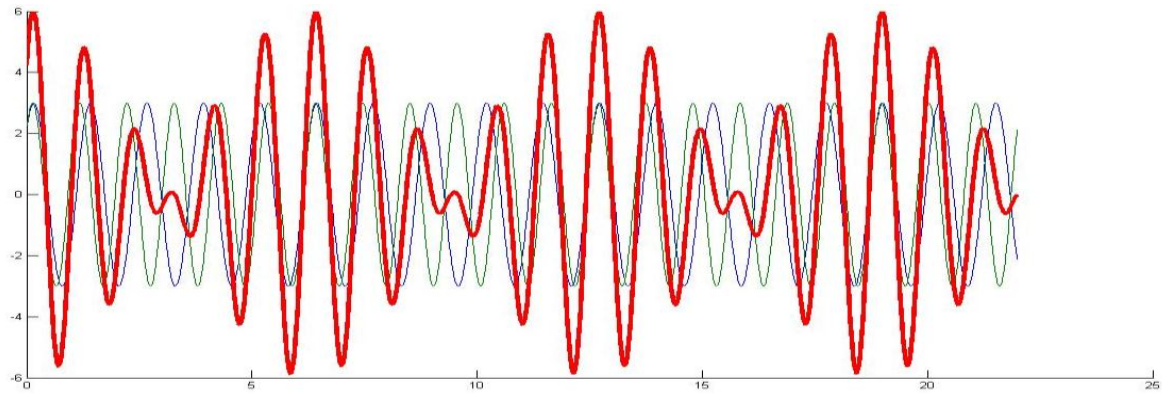
Ha az alkotó rezgések frekvenciái különbözőek, akkor az eredő rezgés nem harmonikus és többnyire nem periodikus. Csak abban az esetben, ha körfrekvenciák aránya (ω_1/ω_2) racionális szám.



1.7. ábra: Egyirányú rezgések összegzése különböző frekvenciák esetén (Folytonos vonallal az eredő rezgés, szaggatottal a komponensek vannak ábrázolva.)

Egymáshoz közeli frekvenciák esete

Ha az frekvenciák közel azonosak és az amplitúdók megegyeznek, a következő ábrát kapjuk:



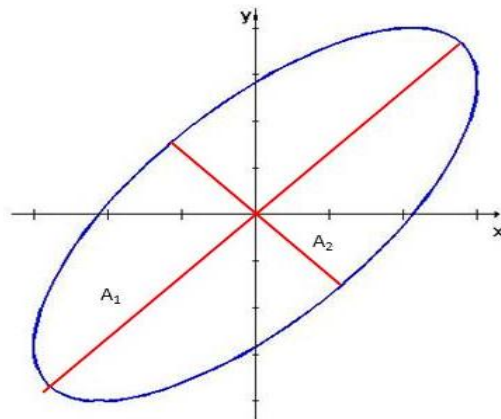
1.8. ábra: Lebegés

Az eredő rezgést le lehetne fedni egy burkoló görbével, aminek a frekvenciája az összetevők frekvenciájának a különbsége. A két harmonikus rezgés így hol kioltja, hogy erősíti egymást. Ezt a jelenséget lebegésnek hívjuk.

1.2.2. Egymásra merőleges irányú rezgések

A rezgések frekvenciája közötti viszony szerint két esetet szoktak megkülönböztetni:

Egyenlő frekvenciák esete

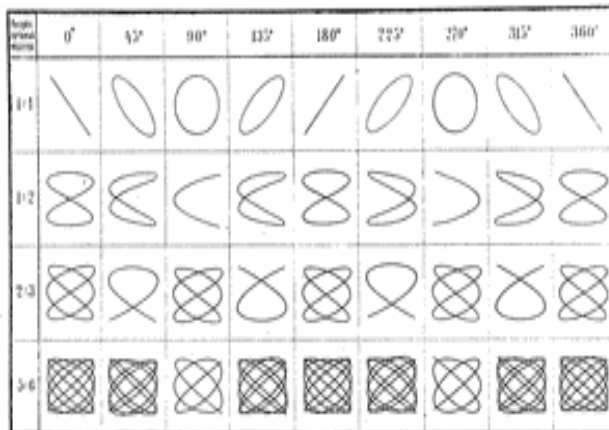


Ha az összetevők frekvenciája megegyezik, akkor elliptikus pályát ír le az eredő rezgés. Az ellipszis nagyságát és helyzetét az A_1 és A_2 amplitúdók, valamint a φ_1 és φ_2 fázisszögek különbsége határozza meg.

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

1.9. ábra: Egymásra merőleges irányú rezgések összegződése egyenlő frekvenciák esetén

Különböző frekvenciák esete



1.10. ábra: Lissajous-görbék

(<http://www.sztnh.gov.hu/kiadv/ipsz/200002/rezges.gif>,
2011.11. 10. 17:23)

Ha az összevetőknek különbözőek a frekvenciáik, akkor az ún. Lissajous-görbék állnak elő. A görbék alakja a fázisszögek közötti különbségtől, valamint a körfrekvenciák arányától függ.

([1] [2] [3] alapján.)

1.3. Csillapított és gerjesztett rezgések

1.3.1. Harmonikus rezgés csillapítással

Három csillapító hatást különböztetünk meg:

- Coulomb súrlódást, ami a szilárd testek felületeinek egymáson való relatív elmozdulásából származó erő hatása. Nem függ a sebességtől a nagysága.
- Newtoni (viszkózus) súrlódásnál az erő a sebességgel arányosan változik.
- Sebesség egyéb hatványával arányos csillapítások (pl.: turbulens áramlások rendszerekben).

A csillapítással rendelkező harmonikus rezgés felírható a következő alakban:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0$$

Az elmozdulás második deriváltját tartalmazó tag a csillapító tényező, az első deriváltat tartalmazó a rugóerő. A c a rendszer csillapítási tényezője, a k arányossági együttható a rugó merevsége. Az egyenletet átrendezve:

$$x = C_1 \cdot e^{s_1 t} + C_2 e^{s_2 t}, \text{ az } s_1, s_2 \text{ konstansok}$$

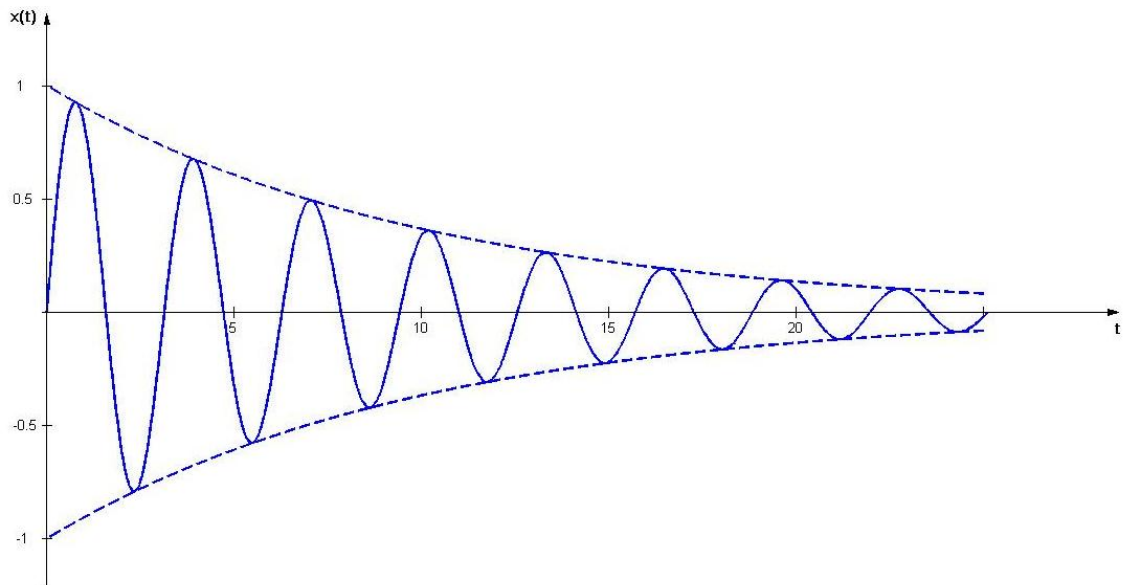
A C_1 és C_2 tetszőleges állandók, amik a másodrendű differenciálegyenlet megoldásából adódnak. A csillapítási tényező nagysága meghatározza a függvény képét:

- Ha a csillapítás nagyobb, mint a kritikus csillapítási tényező, akkor két csökkenő exponenciális görbét kapunk. A kitérés után a test az egyensúlyi helyzetbe áll vissza. Ekkor nem alakul ki rezgés.

- Ha a csillapítási tényező kisebb, mint a kritikus érték akkor egy „csillapodó” szinuszgörbét kapunk, ami csökkenő exponenciális görbe és egy szinusz görbe szorzata. Az elcsendesülés idejét és a görbe laposságát a csillapítási tényező határozza meg. Ennek a csillapodó harmonikus mozgásnak a sajátfrekvenciája (ω_d) és egyenlete:

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

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



1.11. ábra: Csillapított harmonikus rezgés

1.3.2. Gerjesztett rezgés csillapítás nélkül

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

Az egyenlet jobb oldalán levő kifejezés a harmonikus gerjesztés

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

A rezgés egy csillapítatlan szabadrezgésből és egy csillapítás mentes gerjesztett (piros színnel jelölt) rezgésből tevődik össze. Az egyenletben az ω_n a rezgés sajátfrekvenciája, az x_{st} a test statikus kitérése.

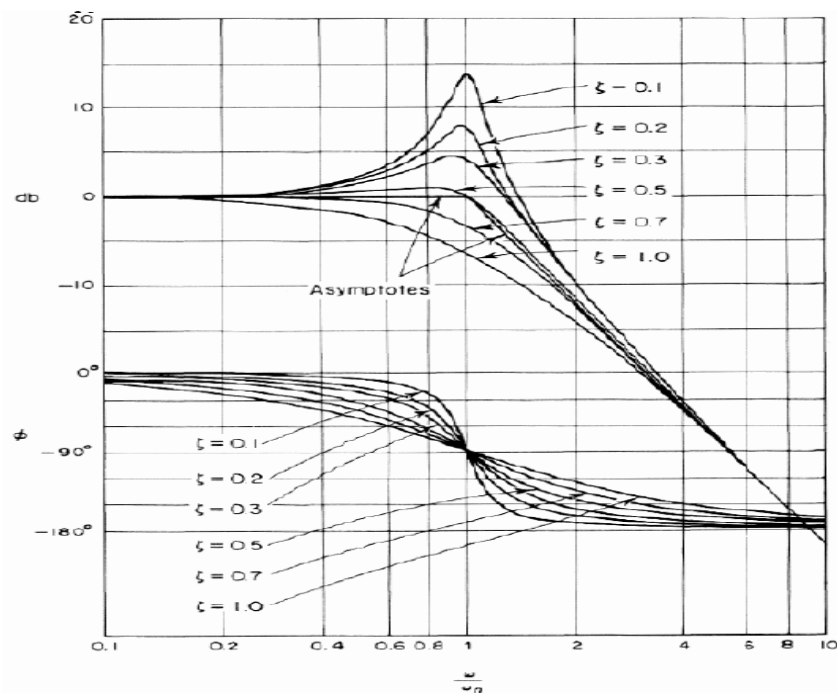
1.3.3. Gerjesztett rezgés csillapítással

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

Megoldása a következő alakban írható fel:

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

A kényszer frekvenciája és a rendszer saját frekvenciájának hányadosa a nagyítási tényezőt adja meg. Rezonancia akkor alakul ki, ha a hányados értéke 1. A frekvencia hányadosok szemléltetésére a Bode-diagram alkalmas:



1.12. ábra: Bode-diagram

(http://fourier.eng.hmc.edu/e101/lectures/rcl_c_bode_plot.gif , 2011.11.15. 20:46)

([1] alapján.)

2. Fejezet: A rezgésvizsgálat alapjai

2.1. A rezgés amplitúdó és frekvencia skálái

A rezgés amplitúdóját decibel skálán szokták jellemezni, mert nagy intervallumban változhat egy mérésen belül az értéke. A decibel skála logaritmikus, melyen egy állandó szintarány a skálán egy megadott távolságot jelent függetlenül a szintek abszolút értékétől.

$$X = \frac{x}{x_0}, \text{ dB } X = 20 \cdot \log \frac{x}{x_0}$$

Az x_0 egy referencia érték. Rezgéssebesség decibelben mért egysége a V_{dB} , a V_{ref} (referencia érték) SI rendszerben 10^{-9} m/s .

$$V_{dB} = 20 \cdot \log \frac{V}{10^{-9} \text{ m/s}}$$

Rezgésmérésben használnak még A_{dB} (gyorsulás szint) és D_{dB} (elmozdulás szint) skálát is.

A frekvencia skála egy lineáris skála. Ha a frekvencia tartomány felső határértéke kétszerese az alsónak, akkor a sávszélessége egy oktávnak számít. A spektrum jobb kiértékelhetősége érdekében szoktak az 1/3-os oktávsvág bontást is alkalmazni. Ebben az esetben a felső frekvencia az alsó érték $\sqrt[3]{2}$ szerese. ([1] [3] alapján.)

2.2. Analóg-digitális jelátalakítás

Az első lépés az időjel jel mintavételezése, ami egy analóg eljárás. A berendezésben ébredő rezgéseket a rezgés érzékelő a rezgéssel arányos feszültség formájában továbbítja egy mintavevő és tartó áramkörnek. Innen egy A/D konverterre megy a jel, ahol a feszültség értékek szám értékeket kapnak. Minél több bitben tárolódik az információ, annál pontosabb a mintavétel. Az analóg jel mintavételezését és adatszavakká kódolását nevezzük kvantálásnak. Így diszkrét mintákat kapunk, amik nem tartalmaznak információt a két mintavételezés közötti időből.

A mintavételezés alaptörvényének megteremtője Claude Shannon volt. A Shannon-tétel kimondja, hogy a vizsgált jelben lévő legnagyobb frekvenciánál a mintavételezési frekvenciát minimum kétszer nagyobbra kell választani, az információ megfelelő dekódolhatósága érdekében.

$$f_m > 2 \cdot f_{\max}, T_{\min} = \frac{1}{f_{\max}}$$

A mintavételezési szabály megsértése azt jelenti, hogy a szükségesnél kevesebb mintát vételezünk. Ekkor az „aliasing¹” jelenség áll elő. Ennek eredménye képen a spektrumban megjelennek olyan komponensek, amik az eredeti jelben nem voltak benne. A hiba elkerülése végett a bejövő jelet egy aluláteresztő analóg szűrőn (Anti-Aliasing szűrőn) kell átengedni. A mintavétel frekvenciája a gyakorlatban úgy van beállítva, hogy az a szűrő vágási frekvenciájának 2,56-szorosa legyen.

$$f_m = 2,56 \cdot f_{\text{vág}}$$

A digitális jel vizsgálatának alapvető szabályai:

- Az A/D konverterre bemenő jelet mindenképpen egy Anti-Aliasing szűrőn kell áteresztetni.
- Shannon-tételének szigorú betartása.

¹ Az aliasing az angolszász szakirodalomból származik. A mintavételezési szabály megsértésekor jelentkező hibát fejezi ki.

- A mintavételi frekvencia meghatározza a vizsgálható frekvencia tartományt.

([1] [2] alapján.)

2.3. Spektrumkép létrehozása

A digitalizált diszkrét időjelből a Diszkrét Fourier-Transzformáció (DFT) alkalmazásával kaphatunk diszkrét spektrumképet. 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. Gyorsasága egyrészt abban rejlik, hogy a digitális időjelek számának kettő hatványának kell lennie.

Az FFT-hez szükséges ismeretek részletes bemutatását az 1. számú melléklet tartalmazza. ([1] alapján.)

3. Fejezet: Rezgések forrásai

A rezgés és ütésimpulzus mérése során, különböző helyekről, irányokból érkeznek az adatok. Ezek alapján a szoftverben rezgésspektrumot kapunk. A hiba milyenségét az alaphfrekvencia 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.

3.1. 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.

3.1.1. Statikus kiegyensúlyozatlanság

Ebben az esetben a forgástengely és a forgástengely irányba eső tehetetlenségi főtengely párhuzamosak egymással. Köztük „e” távolság mérhető, melynek ismeretében a kialakuló centrifugális erő meghatározható. A statikus kiegyensúlyozatlanság állandó és mindig azonos fázisban van. Az amplitúdó a fordulatszám növekedéssel 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 csapágy között nem alakul ki fáziseltérés, viszont ugyanazon csapágyra eső vertikális és horizontális rezgések fázisszög 90° -os eltérést mutat.

3.1.2. 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 jelentkeznek. Két csapágy azonos irányban felvett rezgései között 180° eltérés figyelhető meg, ugyanakkor csapágyon belül mért radiális (horizontális, vertikális) rezgések között 90° az eltérés.

3.1.3. Általános dinamikai kiegyensúlyozatlanság

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

3.2. 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.

3.2.1. Szöghiba

Jellemzően magas az axiális rezgés, és a csapágyak 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.

3.2.2. Párhuzamossági hiba

Ez a hiba, hasonló módon jelentkezik, mint az előző. Különbség az, hogy ebben az esetben a csapágyak 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.

3.3. Tengelygörbülés

A csapágyak között 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.

3.4. Excentrikus forgórész

Excentrikusság akkor alakul ki ha, az elméleti forgástengely és az ékszj-tárcsa, fogaskerék, csapágy stb. geometriai középpontja között párhuzamos eltérés jelentkezik. Az excentrális 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.

3.5. 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.

3.6. Mechanikai lazaságok

Három jellegzetes esetet különböztethetünk meg.

3.6.1. „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.

3.6.2. „B” típus

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

3.6.3. „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 csapágy, a csapágy körbefordulása a tengelyen, siklócsapágy indokolatlanul nagy kimozdulása, stb.

3.7. 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 csapágyházban, a vázszerkezetben.

([11] alapján.)

3.8. Gördülőcsapágyak tönkremenetele

3.8.1. Csapágyak rezgései

A gördülő csapágyak működése közben keletkező rezgéseket két csoportba sorolhatjuk. Állandósult és tranziens rezgések.

Állandósult rezgések

A csapágyházon 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 csapágyon kívülről származnak.

A csapágyban keletkező állandósult rezgések forrása a csapágyház, a tengely és a csapágy geometriai pontatlanságából adódik, és ez határozza meg a frekvencia spektrumot. Az csapágyra vonatkozó alapfrekvenciák számítással meghatározhatók. A csapágy által keltett állandósult rezgések amplitúdója általában kicsi, és a fordulatszámától 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 csapágóban keringő kemény részecskékkel való ütközés ritkább jelenség, de nagyobb impulzust eredményez. Ezek forrása a gördülő felületeken kialakult szilárd részecskék benyomódása vagy kiszögellődése. Ez az ütésimpulzus képpen véletlenszerűséget mutat.
- A csapágóban 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 csapágók 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.)

3.8.2. 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.)

3.9. 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.

3.9.1. 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.

3.9.2. 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.

3.9.3. 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.

3.9.4. 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.

3.9.5. 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.)

3.10. Hidraulikus és aerodinamikusan erők által gerjesztett rezgések

Fluidumot szállító lapátos berendezések a szivattyúk, kompresszorok, ventilátorok. 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 ráakódva 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.)

3.11. Szíjhajtásból eredő rezgések

3.11.1. 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. Láncajtásnál a lánc áthaladási frekvencián jelentkeznek a problémák.

3.11.2. Szíj 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.

3.11.3. 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° .

3.11.4. 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.

([11] alapján.)

4. Fejezet: Mérési módszerek

Az általam alkalmazott mérőberendezés (Leonova) és a kiértékelő szoftver (Condmaster), alkalmas a következőkben említett mérési módszerekkel való mérésre és kiértékelésre.

4.1. Lökésimpulzus módszer (SPM-Shock Puls Method)

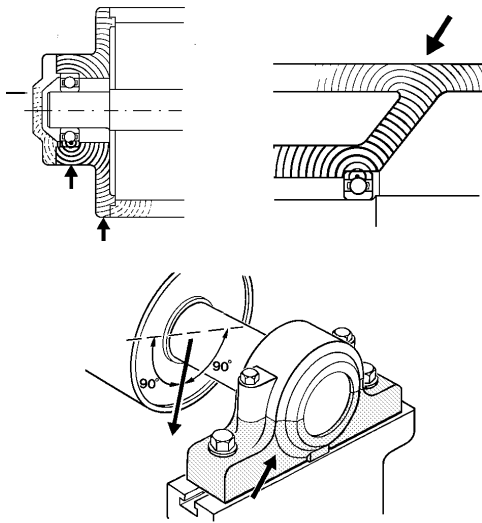
A csapágyak állapotának figyelésére szolgáló módszer. A lökésimpulzus hullámok tranziens jelek, amik intenzitása, alakja közvetlenül meghatározza a károsodás milyenségét és mértékét (kenés állapot, gördülő felület állapota).

A lökésimpulzus-átalakító a gyorsulás érzékelőben foglal helyet. Tartalmaz egy egységnyi tömegű elemet, ami piezoelektromos kristályhoz csatlakozik. Az érzékelőt ütés hatására az egységnyi tömeg a tehetetlensége miatt az ütésimpulzus amplitúdójával arányosan megüti a piezoelektromos kristályt, amin feszültség indukálódik. A rezgésmérésnél és az ütésimpulzus mérésnél ugyanazt az elvet használják. 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 egységnyi tömege a saját 32 kHz-es frekvenciáján fog rezegni. Az általam használt rezgés gyorsulás érzékelők adatait a 2. melléklet tartalmazza.

A lökésimpulzusok a rendszerben keletkező többi rezgéssel összehasonlítva alig befolyásolják a keletkezett spektrumképet. Mivel az érzékelőt az impulzusok a saját frekvenciáján érik, 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. ([8] [9] [10] alapján.)



4.1. ábra: Rezgésérzékelő elhelyezésének szempontjai

([9] pp. 5.)

A mérési pontokat úgy kell kijelölni, hogy:

- A csapágy és a mérési pont között a rezgés a lehető legrövidebb és legegyszerűbb úton érje el az érzékelőt.
- A jel útvonalába csak egy mechanikai érintkező felület álljon (csapágy és a csapágyház közötti).
- A mérési pontnak a csapágyház terhelési zónájába kell esnie.

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 egytengelyűsége. ([8] alapján.)

4.1.2. LR/HR eljárás

Ez a módszer az előzőnek egy tovább fejlesztett változata. Lehetőséget nyújt az kenőanyag állapot még precízebb analízisére, 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 fordulatszámokon 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 csapágy katalógusból.

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. ([8] [10] alapján.)

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 spektrum vonalak 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 spektrum vonalnak 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. ([8] alapján.)

4.2. Rezgésmérés módszer

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 két az ISO 2370-es és az ISO 10816-os szabványt alkalmazzák.

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] [8] 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							

4.2. ábra: Táblázat a berendezések csapágy állapotának értékeléséhez
(<http://www.spminstrument.com/data/pdf/td/TD225B.pdf>, 2011.11.16. 13:11)

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 „csúcsból-csúcsig” (peak-to-peak) értéken alapuló kiértékelést is tud.
- Ebben a szabványban az egyes gép kategóriákon belül további kategorizálásra van lehetőség.

A Leonova mérő műszer 1600 vonalas spektrumot biztosít a precíz kiértékeléshez. ([6] [8] alapján.)

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								

4.3. ábra: Géposztályok és rezgésre vonatkozó határértékeik az ISO 10816-ban
(http://www.reliabilitydirect.com/images/ISO_10816.gif, 2011. november 16. 13:18)

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:

- Állapot jellemzőket, 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 rezgéssebesség 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: Csúcstényező, a csúcserőértékek és az effektív rezgésebbesség hányadosa, a normálértéke 1,4-3 között mozog (szinusz vonal 1,414 csúcstényezővel 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 tartományban, négy csoport segítségével (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 illetve 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.

([8] alapján.)

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 elektromos áramkörben.

Két csatornás rezgésmérés

Ennek a funkciónak az alkalmazása vagy az EVAM-ot tartalmazó mérés keretében vagy az „FFT szimptómákkal” 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 kábelrel kell csatlakoztatni a két rezgésérzékelőt a műszerrel.

A mérést követően a mérőműszer és a Condmaster program is megjeleníti a rezgés gyorsulás, 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.

([8] alapján.)

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 rezgés válaszát álló, nem üzemelő állapotban.

Leonova műszer 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. ([8] alapján.)

5. Rezgésmérés és kiértékelés a gyakorlatban

5.1. Mérés előkészítése és a mérés

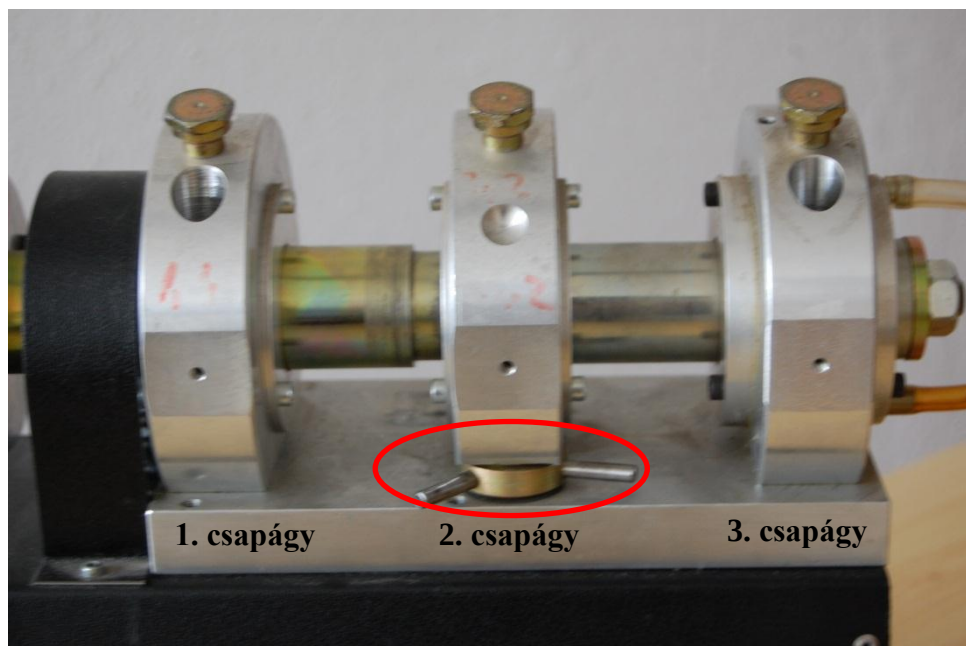
5.1.1. A mérőpad

Vizsgálataimat Rig DEM 20/21 próbapadon végeztem a Leonova műszerrel.



5.1. ábra: Próbapad és rezgésmérő

A próbapadon három különböző csapágó található. Láncon keresztül egy villanymotorral van a tengely meghajtva. Mind a három csapágó különböző tulajdonságokkal rendelkezik. (5.2. ábra)



5.2. ábra: Csapágók

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

A próbapad hálózati feszültségen 1100 rpm fordulatszámon üzemel.

A tesztpadon lehetőség van a csapágyak sérülésének, kenési állapotának mérésére, valamint a kiegyensúlyozottság előidézésére, amit az erre a célra felszerelt tárcsán elhelyezhető csavarral lehet változtatni (5.3. ábra). A második csapágyánál be lehet állítani a csapágyház feszességét (5.2. ábra). Így lehetőségen van a különböző beállítások mellett mérni a berendezésben ébredő rezgéseket. A kapott eredményeket a Condmaster-ben tudom összehasonlítani és ki értékelni a kapott spektrumképek alapján.

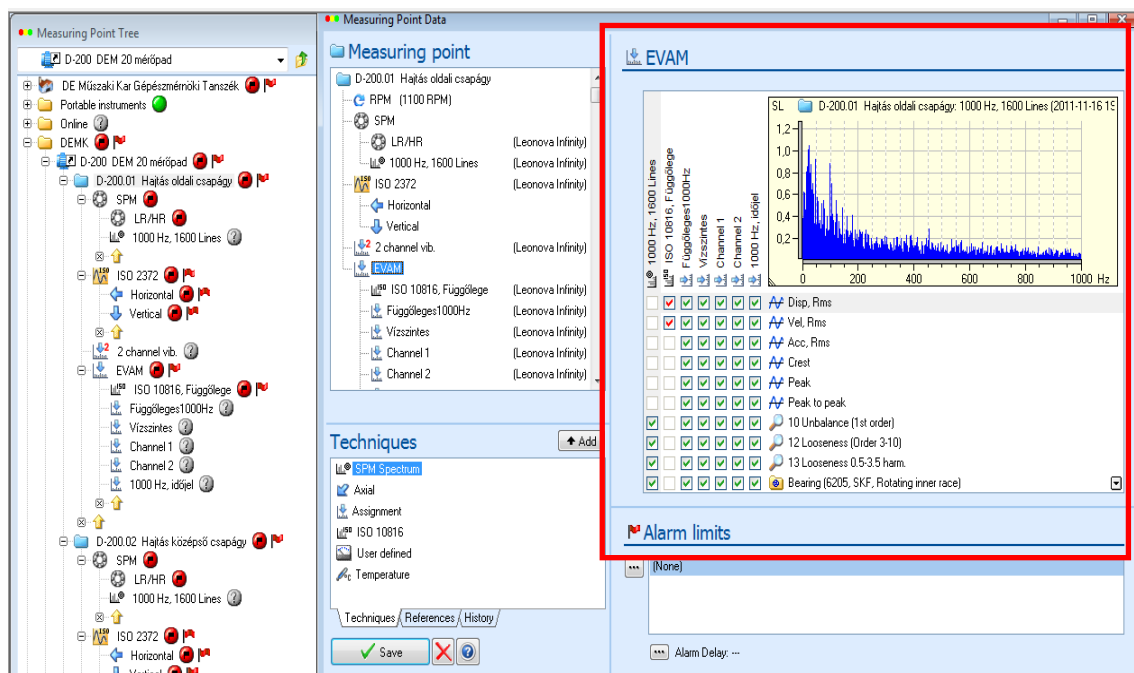
A mérések során három rezgésérzékelőt használtam. Két rezgésgyorsulás érzékelőt és egy ütésimpulzus érzékelőt (lásd 2. melléklet). Különböző rögzítési lehetőségek állnak rendelkezésre. A függőleges irányú rezgések mérésére használt érzékelőt menetes furatba csavartam, az ütésimpulzus érzékelőt hatlapfejű csavarra helyeztem rá (5.3. ábra). Vízszintes irányú rezgéseket egy az érzékelőre csavarozott szondával mértem, amit a csapágyházhoz kellett szorítani, mert nem volt lehetőség rögzíteni az érzékelőt a felületén.

5.1.2. Mérő pontok beállítása, a mérés

Az egyes mérőpontokat és tulajdonságait, valamint az egyes mérési technikákat előre össze lehet állítani a Condmaster programban. Ekkor kell megadni a csapágy típusát, a gép fordulatszámát, rezgésérzékelők típusait. Az 5.4. ábrán például az látható, hogy az EVAM funkció hozzáadásával lehetőségünk van kiválasztani a vizsgálandó szimptómákat. Minden mérőpontra külön-külön kell beállítani a vizsgálandó tüneteket, attól függően, hogy az adott ponton mit akarunk megvizsgálni.

Ha összeállítottuk a kívánt mérési sorozatot, akkor az adatokat fel kell tölteni a Leonova műszerre az adatátviteli kábelén keresztül. Ezt követően kezdődhet a tényleges mérés.

A műszer az általunk beállított sorrendben kínálja fel mérésre a mérési pontokat, de manuálisan is ki lehet választani, hogy mit mérjünk. Az aktuális mérésnek megfelelő érzékelőt fel kell helyezni a mérendő csapágyra majd teljesíteni az kiválasztott méréseket. Ha egy csapággal végzett a kezelő, akkor át kell szerelni az érzékelőket a következő mérési pontra.



5.4. ábra: Alkalmazott mérések az 1. csapágyon

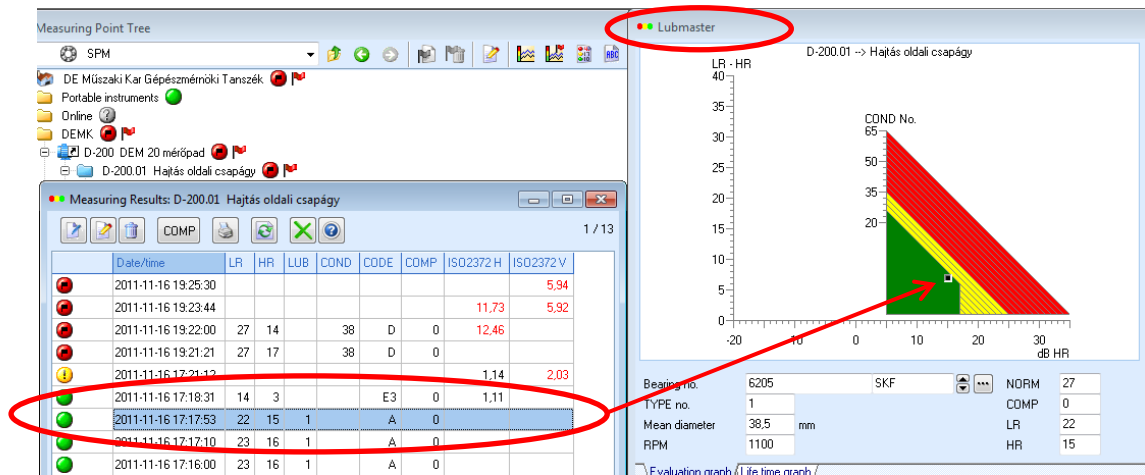
5.2. Az eredmények kiértékelése

A mérés végeztével a műszert hozzá kell kapcsolni a PC-hez és a Condmaster programba feltölthetők az adatok.

Vizsgálatom során mind három csapágyon végeztem méréseket. Meghatároztam a csapágyak általános és kenetségi állapotát. Egyes mérések között változtattam a kiegyensúlyozási viszonyokat, úgy hogy egy csavart helyeztem el az erre a célra felszerelt tárcsában a meghajtási oldalon. A második csapágyház lazaságának állításával különböző feltételek mellett tudtam ugyanazon csapágyon méréseket végezni.

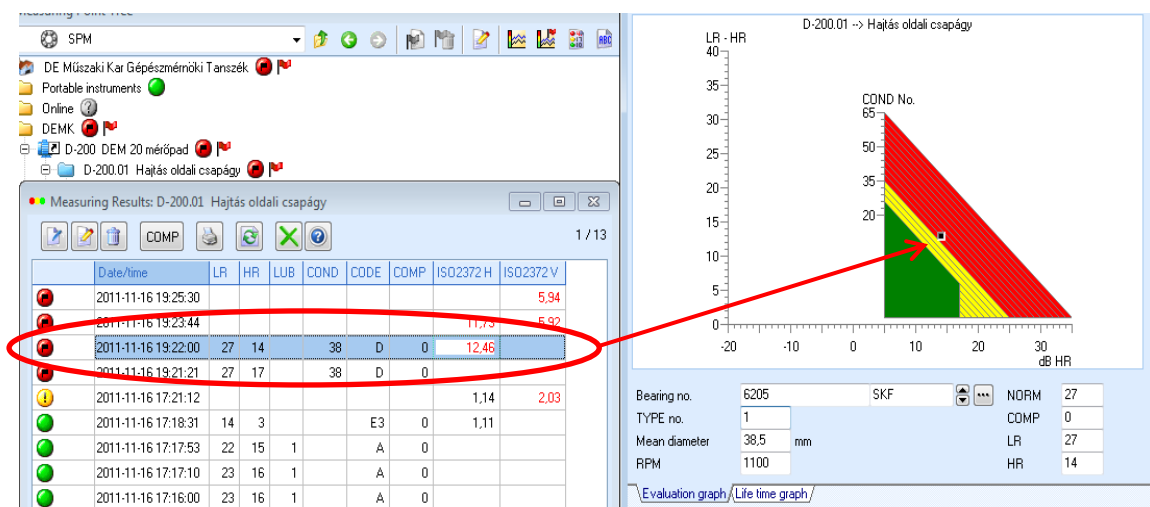
5.2.1. Az 1. csapágyon mért adatok kiértékelése

Ezen a csapágyon LR/HR, SPM spektrum, ISO 2372, EVAM (ISO 10816 alapján) és kétcsatornás méréseket végeztem. Első lépésben a kiegyensúlyozást szándékosan elrontó csavar nélkül mértem az adatokat. A csapágy állapotára zöld értéket kaptam, tehát az adott körülmények mellett a csapágy megfelelő állapotúnak számít (5.5. ábra). A Lubmaster-ben látható, hogy valójában a zöld tartomány szélén áll a csapágy. Ezen terhelés mellett a kenési viszonyok még kielégítőek, de komolyabb terhelés esetén ez kevés lehet.

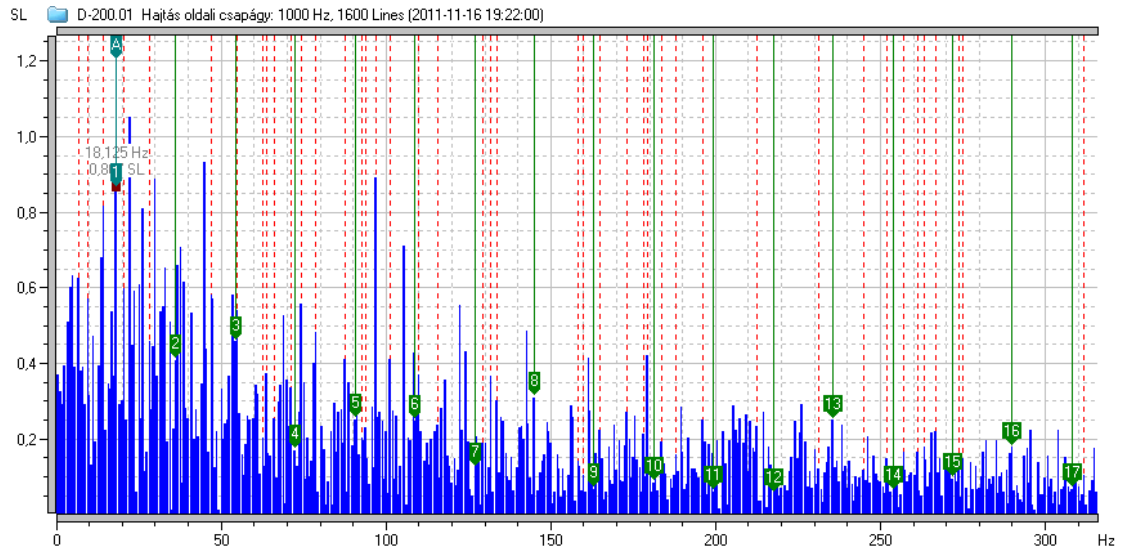


5.5. ábra: 1. csapágy csavar nélkül

A csavar felrakása után a csapágy állapota piros tartományba lépett. Az ütésimpulzus mérés nem mutatná ki a kiegyensúlyozatlanságból származó változásokat általános esetben. Nálam azért látszódik jelentősen, mert a csavar tömege olyan nagy, hogy az általa bejárt körpályán ütésimpulzus szerű jeleket hoz létre (5.6. ábra). Ugyan az LR és HR értékek különbsége alig növekedett, a COND szám 38 (a skála csúcserőke 65), míg az előző esetben 20 alatt volt.

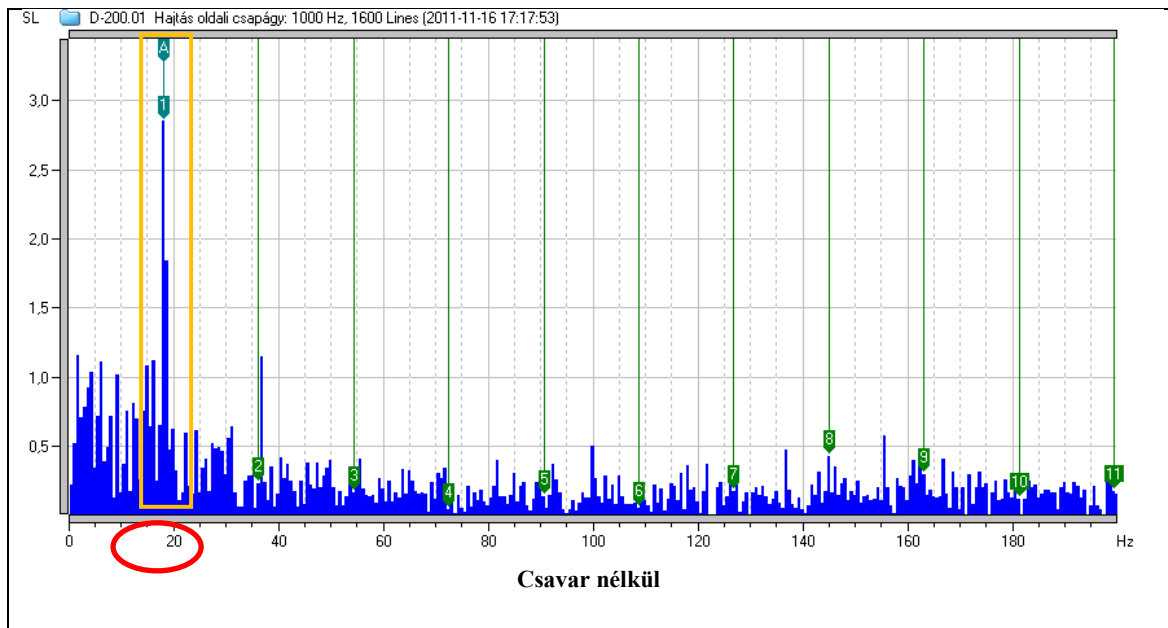


5.6. ábra: 1. csapágy csavarral

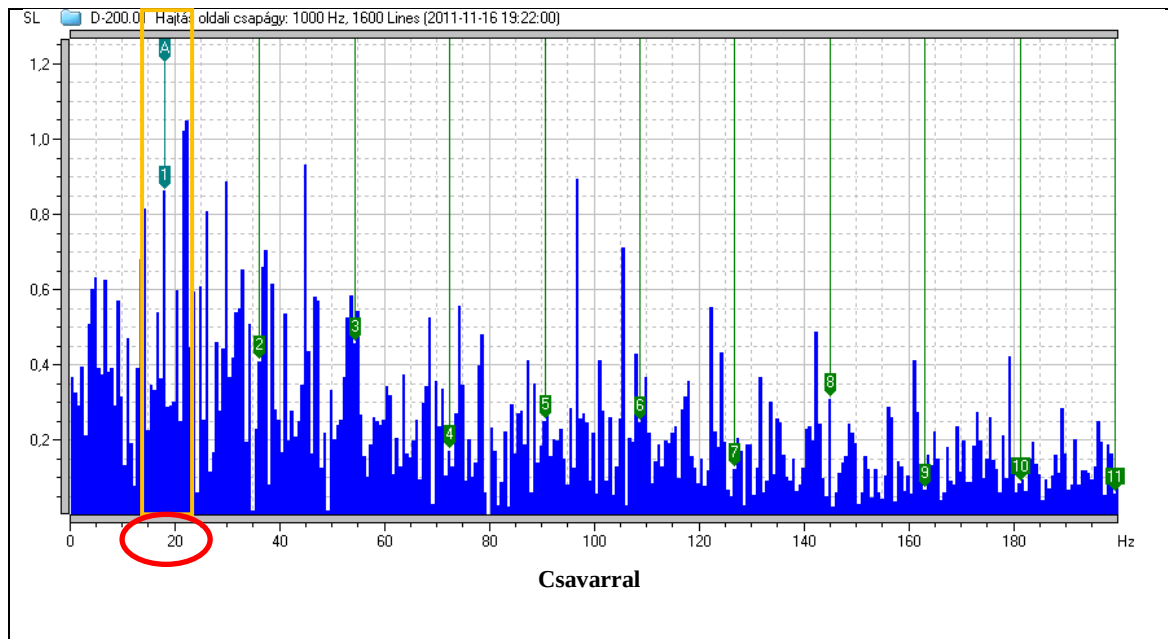


5.7. ábra: Szimptómák és felharmonikusok

Az SPM spektrum vizsgálata mind a két esetben kiegyensúlyozatlanságot mutatott a rezgésspektrummal ellentétben. Ez azért lehet, mert a tárcsa a kiegyensúlyozó csavar nélkül is generál ütésimpulzus szerű rezgéseket, amiket az ütésimpulzus érzékelő érzékel. A csavar elhelyezésével ez súlyosbodott (5.1. táblázat). Látható, hogy a forgási frekvencián (18,33 Hz) jelentkeztek a tünetek.

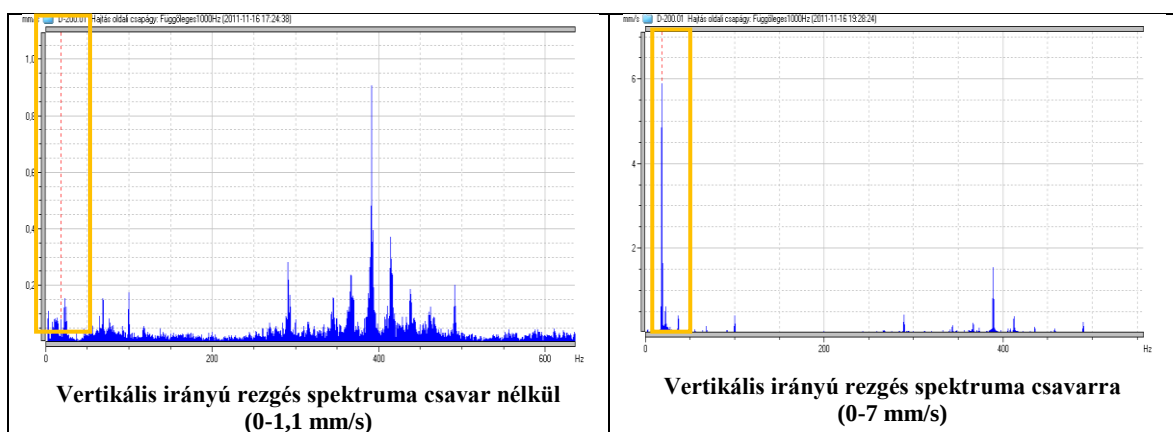


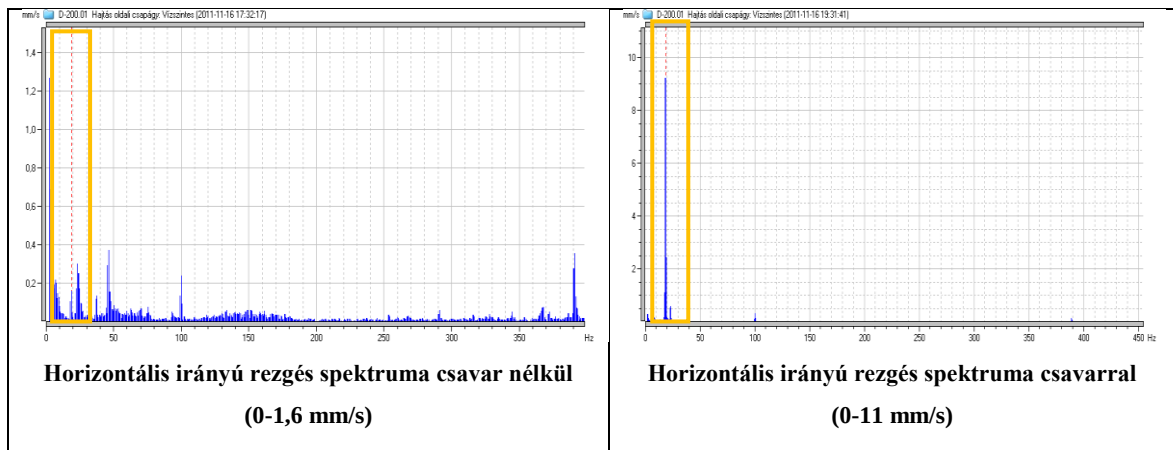
Csavar nélkül



5.1. táblázat: Balanszírozási hiba az SPM spektrumban

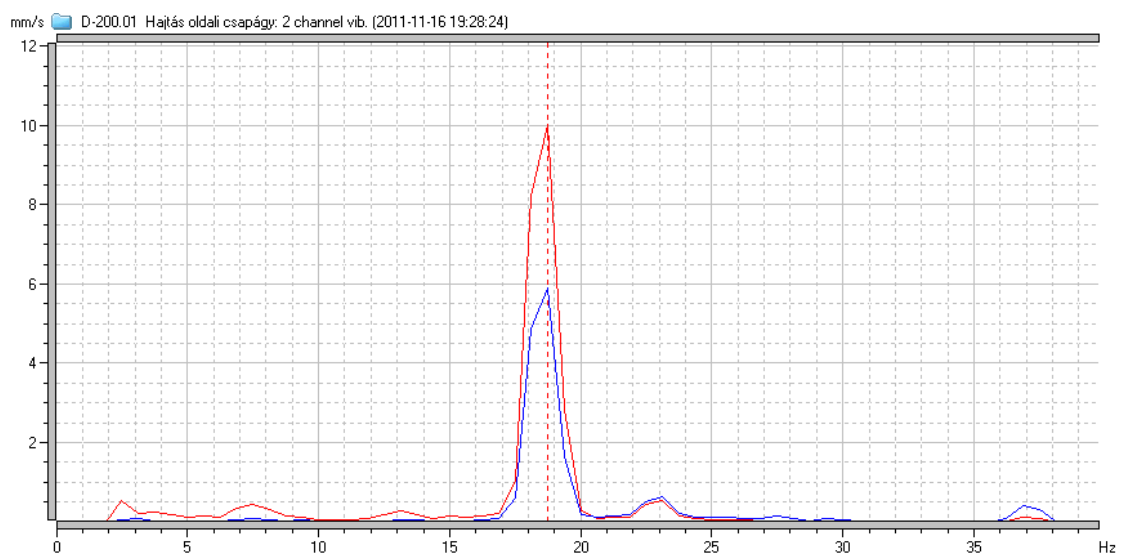
A rezgésebbesség mérése alapján látható, hogy amikor a csavar be volt csavarva kiugróan magas értékeket mutat a spektrum. Az 5.2. táblázat képeit a 3. mellékletben, nagyobb méretben is beillesztettem a jobb átláthatóság kedvéért. Csavar nélkül nem volt probléma a kiegyensúlyozással a rezgésspektrumban. Az ISO 10816 alapján, csavar nélkül a RMS rezgésebbességek átlagos értéke a függőleges irányba 2,06 mm/s volt, ami a jó, zöld tartományba tartozik. Ha a csavarral működött a csapág, akkor az RMS rezgésebbességek átlaga 6,25 mm/s volt, ami jóval nagyobb, az előbbi és az előírt 4,5 mm/s-os riasztási szintnél, így piros tartományba lépett.





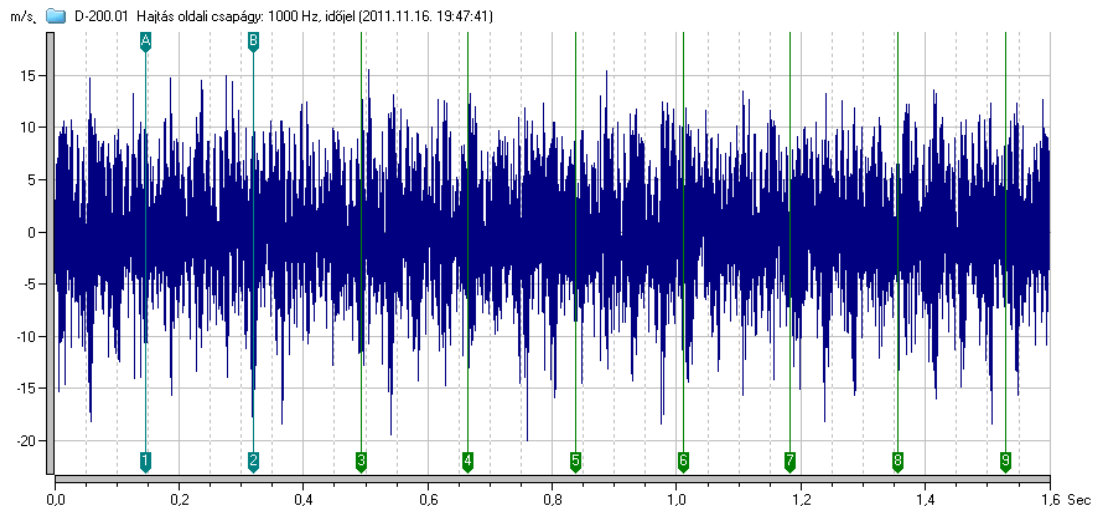
5.2. táblázat: Vertikális és horizontális irányú rezgések csavarral és csavar nélkül

Kétsatornás méréssel megnéztem, hogy a vertikális és horizontális rezgések egymáshoz képest milyen fázisban jelentkeznek. Azt tapasztaltam, hogy a köztük fellépő fázisszög különbség 0° volt, valamint a kiugróan magas rezgéssebesség érték a kiegyensúlyozatlanság miatt jelentkezett, amikor benne volt a gépben a csavar (5.8. ábra)

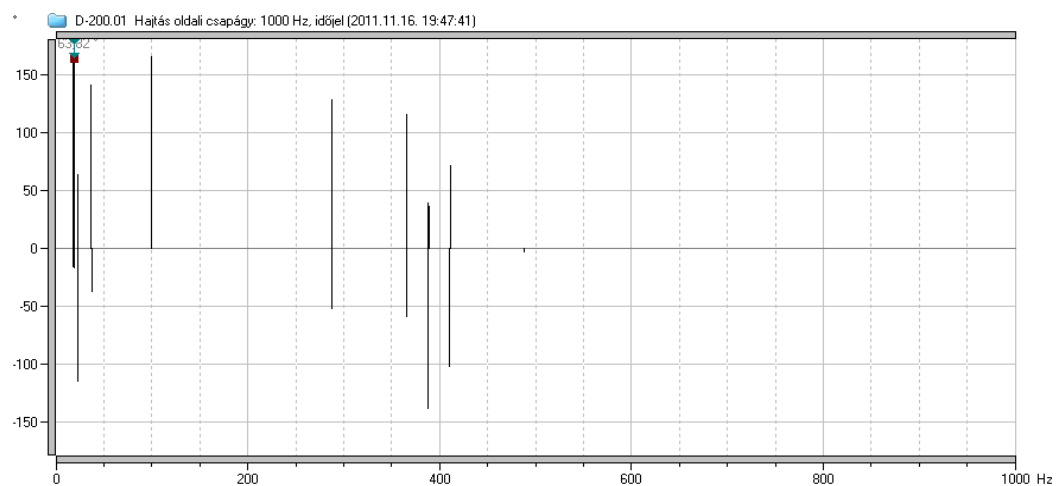


5.8. ábra: Kétsatornás mérés
(piros: vízszintes irányú rezgés, kék függőleges irányú rezgés)

Ezen a csapágyon időjel tartományban is végeztem, amikor be volt szerelve a csavar. A program ez alapján ki tudja kalkulálni a frekvencia spektrumot. Valamint fázis értékű spektrumot tud megjeleníteni.



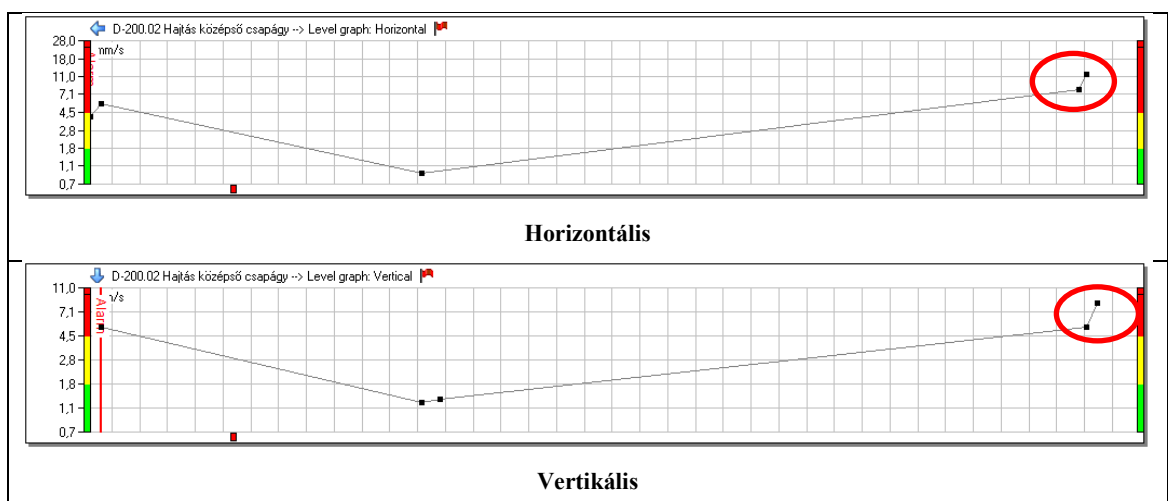
5.9. ábra: Időjel mérése



5.10. ábra: Fázis értékű spektrum

5.2.2. A 2. csapágy állapota

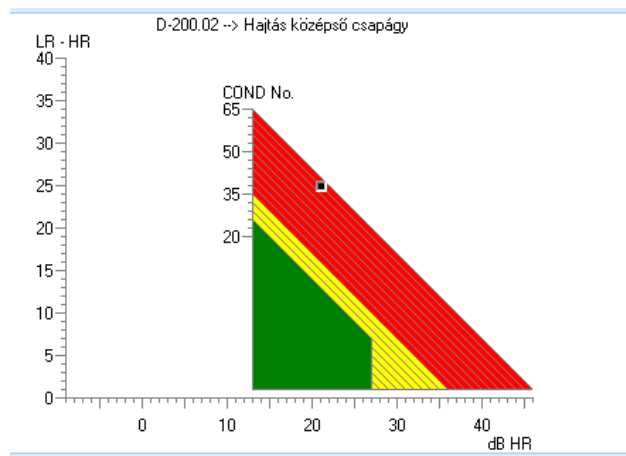
Itt ISO 2372 szerint mértem rezgéssebességet, valamint a csapágyállapotot az LR/HR méréssel vizsgáltam és az így kapott spektrum alapján értékeltem ki.



5.3. táblázat: Csapágház feszességének hatása a rezgéssebesség értékre

A csapágyszegését egymás után megmértem kétszer. Először a csapágyszegését optimálisra állítva, majd kilazítva. Az 5.3. táblázatban látható, hogy mind két esetben meghaladta a figyelmeztetési szintet a rezgésebesség értéke. Viszont az elsőhöz képest a második mérés értékei kiugróan magasak lettek.

Ennek az alkatrésznek az állapota minden mérés alkalmával a piros tartományba került, tehát ezt a gyakorlatban már le kellett volna cserélni. Az SPM spektrum alapján, a szimptomák közül a csapágyszegés frekvenciáján és azok felharmonikusain (FTF) találtam egyezést a szimptomákkal. Ez alapján a csapágyszegés sérülésére következtek.

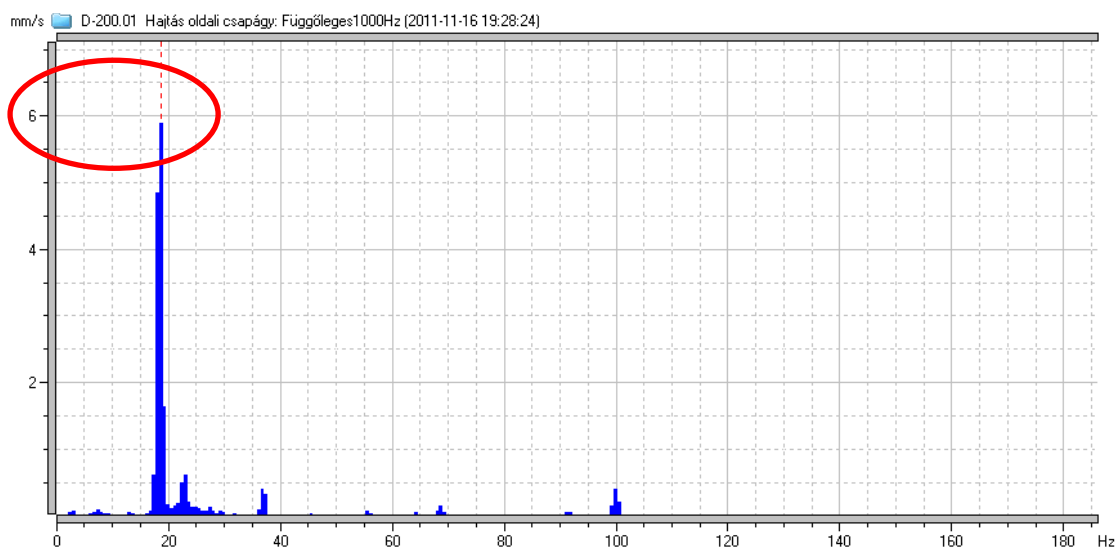


5.11. ábra: Kritikus csapágyszegés állapota

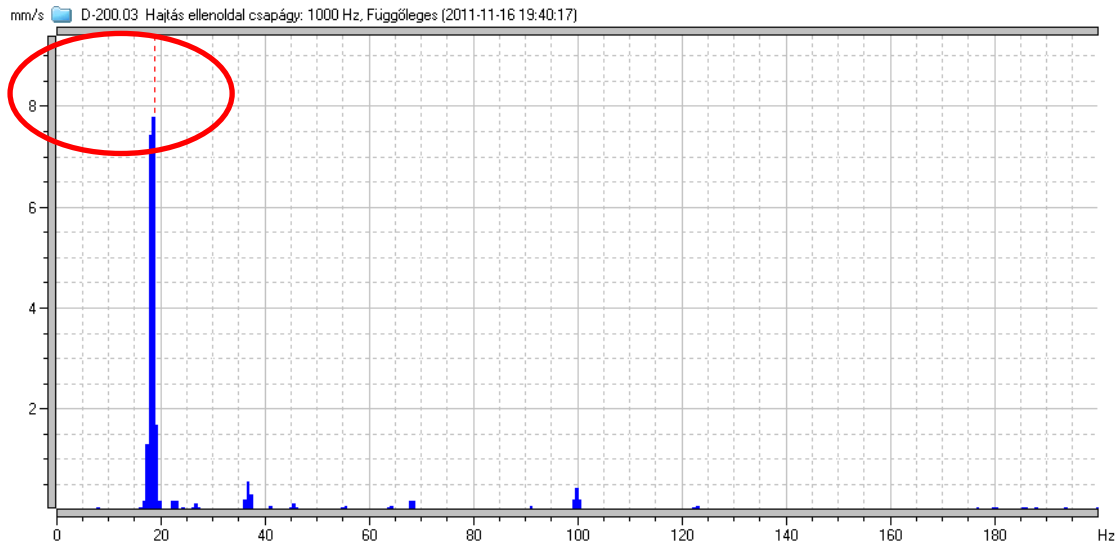
A Lubmaster-ben látható, hogy a csapágyszegés állapota elérte a kritikusnak minősülő tartományt a 25-ös delta érték és 62-es COND szám mellett (5.11. ábra).

5.2.3. Rezgés mértéke a 3. csapágyszegésen

A vártaknak megfelelően csavar jelenlétében a kiegyensúlyozatlanság problémája itt is jelentkezett. Ugyanakkor összehasonlítva az 1. csapágyszegésen mért rezgésebesség értékek kisebbek, mint a 3. csapágyszegésen mérték (5.12. és 5.13. ábra). Ennek okát jelenleg nem tudom, még de későbbiekben szeretnék utána járni alaposabban.



5.12. ábra: Rezgés gyorsulás mértéke csavarral az 1. csapágyon



5.13. ábra: Rezgés gyorsulás mértéke csavarral a 3. csapágyon

6. Összegzés

A rezgések különböző tulajdonságait nagyon sok tényező befolyásolja és gyakran nehéz különbséget tenni ezek között. A Condmaster ebben nyújt segítséget a gyártók által megadott, illetve a felhasználók által definiált, a szoftverben tárolt szimptómák rendkívül nagy tárházával.

Méréseim során elsősorban a kiegyensúlyozási viszonyok változását vizsgáltam, hogyan hatnak a berendezés csapágyaira. A várakozásnak megfelelően a csavar elhelyezése 30-40-szer nagyobb rezgéssebesség értéket eredményezett a frekvencia spektrumban. Érdekesnek találtam, hogy amikor a csapágy állapotát mértem LR/HR módszerrel, a kiegyensúlyozatlanságból eredő rezgések között lökésimpulzus-szerű komponensek is keletkeztek, amik megjelentek a kiértékeléskor az SPM spektrumban, ezzel befolyásolva a csapágy állapotának értékelését.

A közeljövőben szeretnék további vizsgálatokat végezni, a rezgések hatásait és a csapágy állapotát illetően. Továbbá az utolsó pontban ismertetett állapot magyarázatát szeretném megtalálni.

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: Mechanical vibration of machines with operating speeds from 10 to 200 rev/s -- Basis for specifying evaluation standards. ISO 2372:1974
- [6] International Organization for Standardization: Mechanical vibration -- Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts -- Part 1: General guidelines. ISO 10816-1:1995
- [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

1. Melléklet

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 elemeinek lineáris kombinációjával - nem túl szigorú követelmények mellett - a periodikus függvények (mechanikai rezgések, elektromos jelek) előállíthatók szinusz és koszinusz függvények összegeként.

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

A fenti függvénysor összegfüggvénye f . Az ω_0 a rendszer alap körfrekvenciáját a $k \cdot \omega_0$ az alap körfrekvencia többszöröseit jelenti (ha a k egész szám, akkor az alapfrekvencia felharmonikusairól beszélünk). Az $\omega_0 = 2\pi \cdot f_0$ összefüggés alapján az f_0 a rezgő rendszer alapfrekvenciája. Az a_0 , a_k , b_k , együtthatókat Fourier együtthatóknak nevezzük és a következőképpen számíthatók:

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

Az f függvény Fourier együtthatóival képzett függvénysort az f függvény Fourier sorának hívjuk. A Fourier sor periodikus, végtelen időjelekkel foglalkozik. Számítással 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:

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

A fenti egyenlet alapján felírható:

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

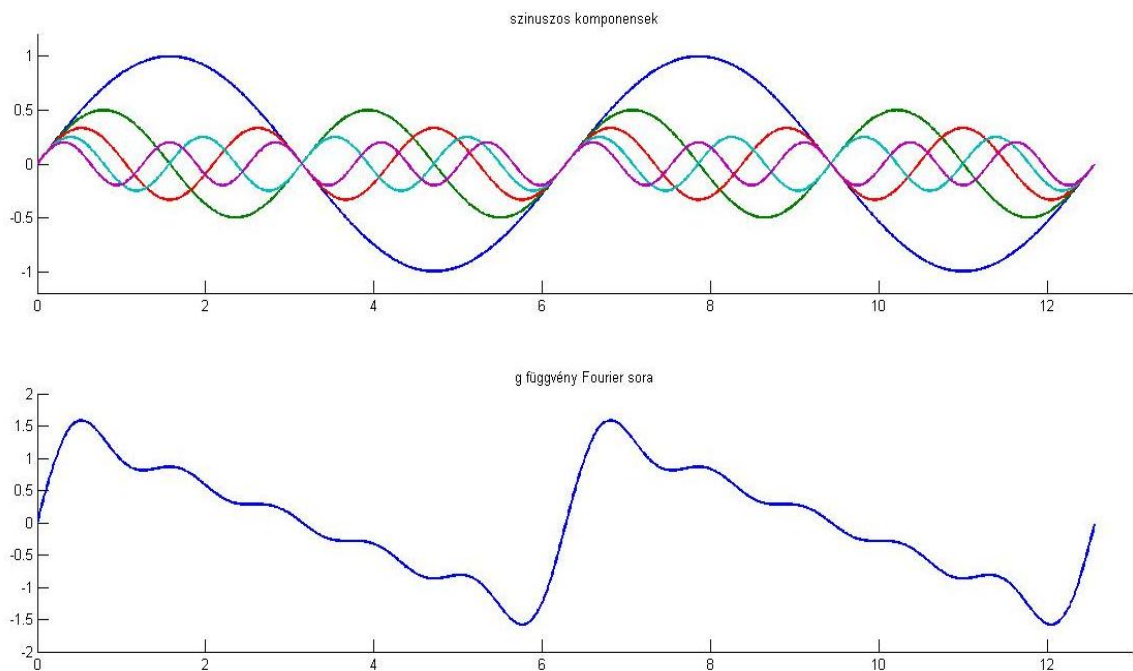
$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, k = 1, 2, 3, \dots$$

$$\varphi_k = \arctg \frac{a_k}{b_k}, k = 1, 2, 3, \dots$$

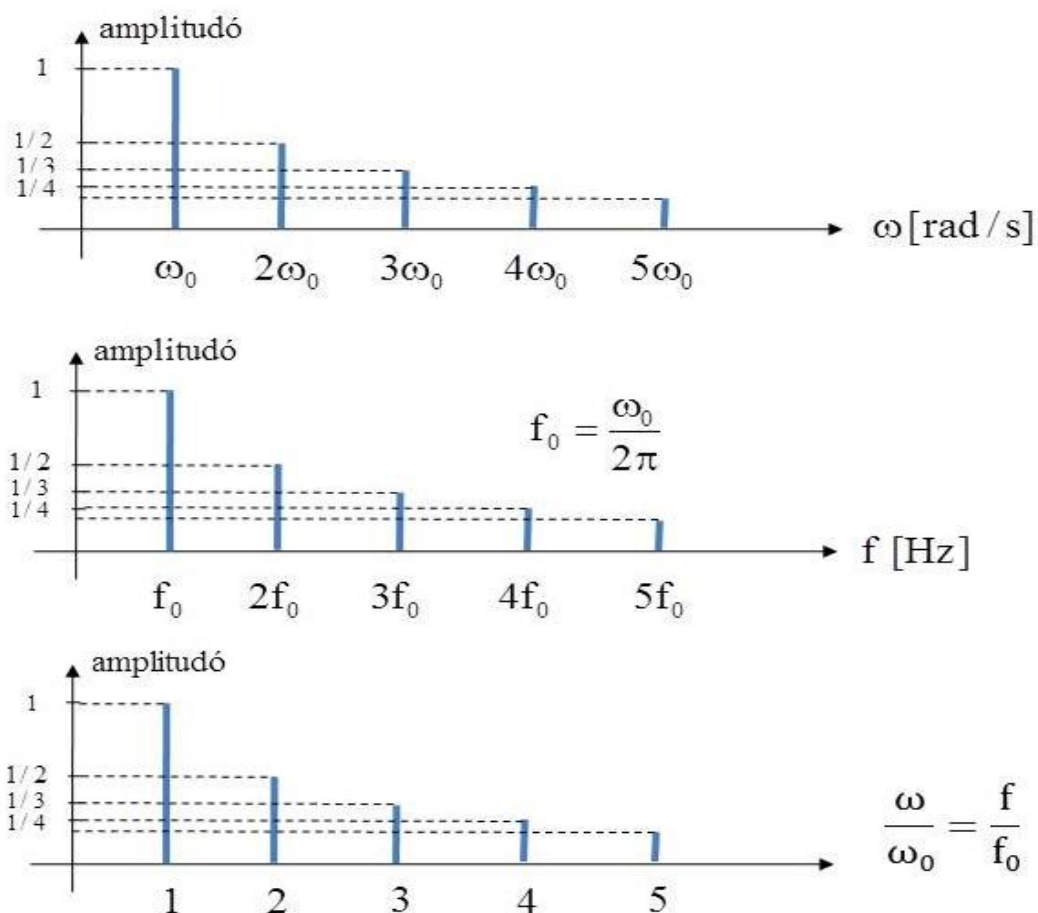
A $k\omega_0$ -hoz tartozó A_k amplitúdók alkotják a függvény vonalas spektrumát. A két vonal közötti távolság $\Delta f = \frac{1}{T}$, vagy $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$.

A következő példában szemléltetem, hogy a szinuszos hullámok hogyan adódnak össze és milyen a spektrumképe az $g(t)$ függvény Fourier sorának.

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



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 az exponenciális függvények közötti összefüggésekre:

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

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

$$\begin{aligned} & a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cdot \cos(k\omega_0 \cdot t) + b_k \cdot \sin(k\omega_0 \cdot t)) = \\ & = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{a_k - b_k \cdot i}{2} \right) \cdot e^{ik\omega_0 t} + \left(\frac{a_k + b_k \cdot i}{2} \right) \cdot e^{-ik\omega_0 t} = \\ & = \hat{f}_0 + \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \hat{f}_k \cdot e^{ik\omega_0 t} \end{aligned}$$

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

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 $|\hat{f}_k| = |\hat{f}_{-k}|$.

Nem periodikus függvények felírása:

A Fourier sor kiterjesztése, nem-periodikus jelek felbontására indokoltá teszi a Fourier integrál bevezetését. A folytonos időjelből egy 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 körfrekvencia helyett bármilyen valós ω körfrekvenciák előfordulhatnak.

Megjegyzések:

1. A nem-periodikus függvényeket végtelen hosszú periódusúnak tekintjük. Így a Fourier integrál formulája $T \rightarrow \infty$ határátmenettel adódik.
2. Az $a(\omega)$ és $b(\omega)$ értékek 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. Diszkrét időpontokban történik a mintavétel, és ezt diszkrét frekvencia spektrumot eredményez.

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

Ha Δt időközönként veszünk mintát, akkor $\Omega = \frac{2\pi}{\Delta t}$ periódus mutatkozik. a frekvenciatartományban.

$$\hat{f}(\omega) = \hat{f}(\omega + k \cdot \Omega)$$

A DTF szimmetrikus abban, ha idő- vagy frekvenciatartomány vonalas, akkor a másik tartomány periodikus és fordítva. A spektrumban az egyes diszkrét értékek periodikussága miatt, úgynevezett átlapolás léphet fel. Ezt sávkorlátozással lehet kiküszöbölni. A mintavétel során ügyelni kell a Shannon-tétel betartására.

A spektrum a folytonos időjel és egy tüimpulzus sorozat konvolúciójaként (szorzatuk integrálásával) jön létre. A T_F időintervallumot megfigyelési időnek vagy időablaknak nevezzük. A frekvencia vonalak minimális távolsága és a diszkrét mintavételi adatok száma meghatározható az időablak ismeretében:

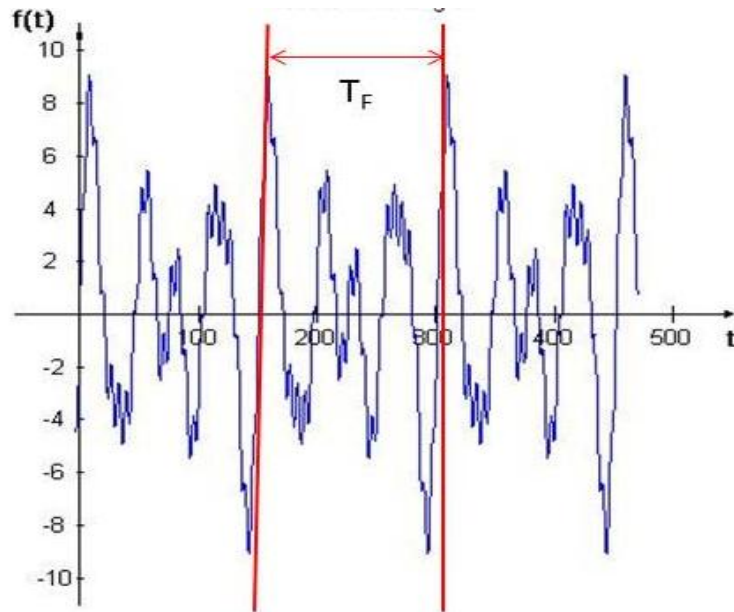
$$\Delta f = \frac{1}{T_F}, \Delta \omega = \frac{2\pi}{T_F}$$

$$N = \frac{T_F}{\Delta t}$$

A DFT gyakorlati alkalmazása a nagymennyiségű elvégzendő művelet miatt nem megvalósítható. Ezért egy DFT gyors és hatékony alkalmazására kidolgozott algoritmust használnak, az úgynevezett gyors Fourier transzformációt (FFT- Fast Fourier Transform). Gyorsasága egyrészt abban rejlik, hogy a digitális időjelek számának kettő hatványának kell lennie.

Időben korlátozott jelek:

Ilyen jelekre a Fourier transzformációt úgy lehet alkalmazni, hogy a jelet periodikussá kell tenni. Úgy lehet periodikussá tenni, hogy az időablakban mért rezgéképet tekintjük egy periódusnak. Ennek hátrány, hogy a spektrum hibát tartalmaz, amit ki kell küszöbölni.



3. ábra: Rezgés periodikussá alakítása

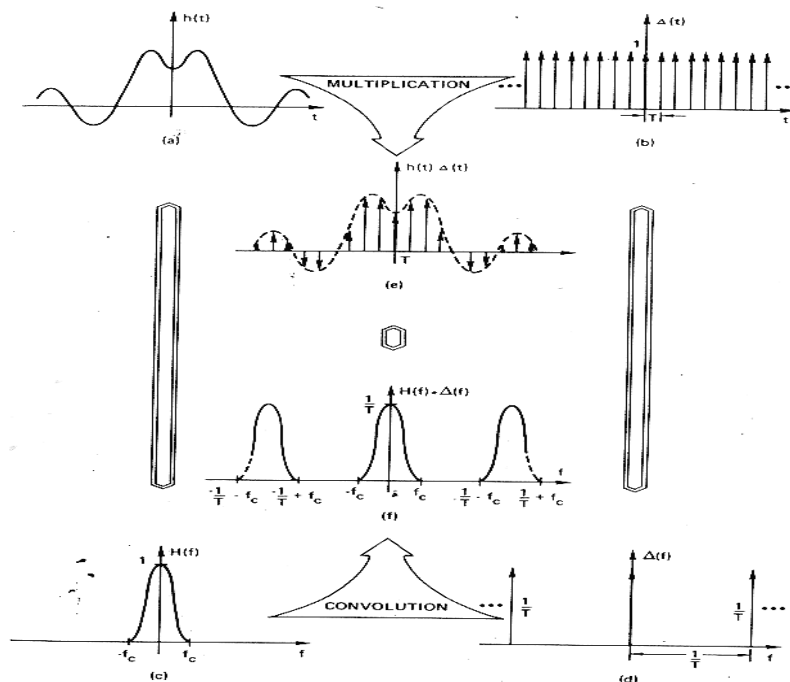


Figure 5-3. Graphical frequency convolution theorem development of the Fourier transform of a sampled waveform.

4. ábra: Frekvencia spektrum előállítás

(http://www-ssc.igpp.ucla.edu/personnel/russell/ESS265/Ch8/ess265_fig08.6.GIF, (2011.11.13. 21:42))

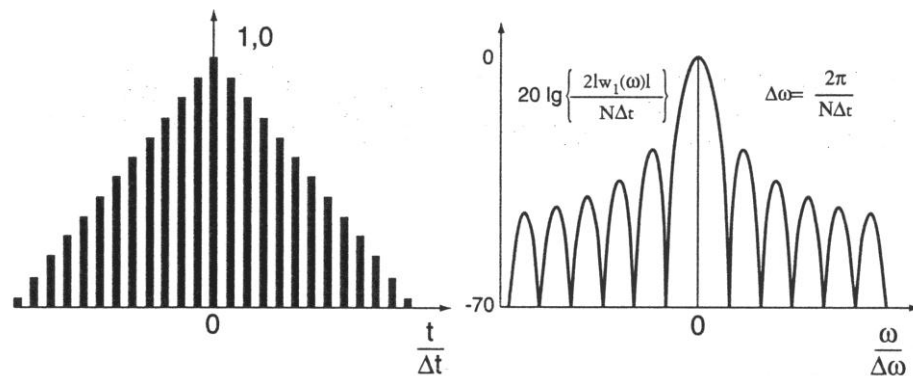
A fenti képen látható az látható, hogy a közös frekvencia spektrum megkapható az időablak Fourier transzformáltjának és a mintavételezett jel Fourier transzformáltjának konvolúciójával. Ami a folytonos időjel és az időablak- szorzatának Fourier transzformálását jelenti.

Akkor tudunk korrekt módon jelet mintavételezni, ha az értéke a mintavételi időtartam elején és végén is 0. Ennek elérése érdekében ablak függvényeket kell alkalmazni. A tökéletesen pontos mintavétel nem lehetséges, ezért adott frekvenciához tartozó amplitúdó érték a szomszédos spektrum vonalakhoz adódik, így az amplitúdója a valóságnál kisebbnek mutatkozik.

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

Az f függvény egy w ablak függvénnyel való szorzatát transzformáljuk. Ezt nevezik ablakolásnak. Leggyakrabban használt típusai:

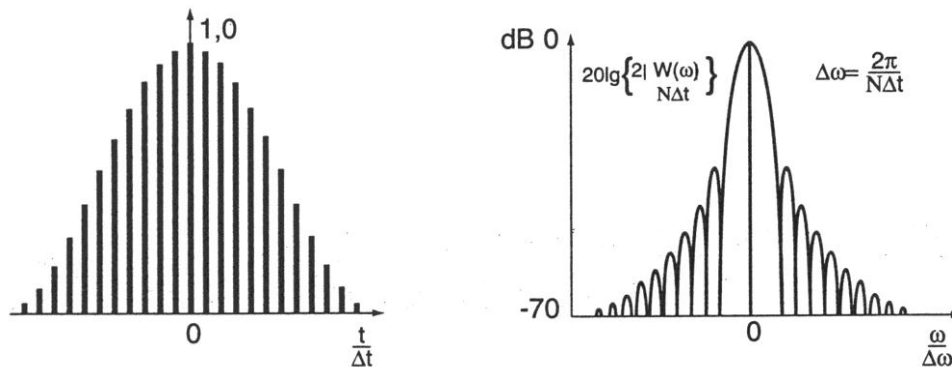
- Háromszög vagy Bartlet ablak



5. ábra: Bartlet alak

([1] p. 95.)

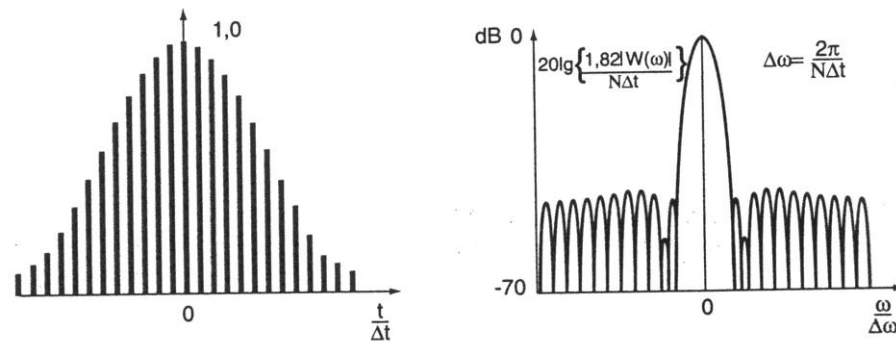
- Hann ablak (a rezgésdiagnosztikában ezt a típust használják a leginkább):



6. ábra: Hann ablak

([1] p. 96)

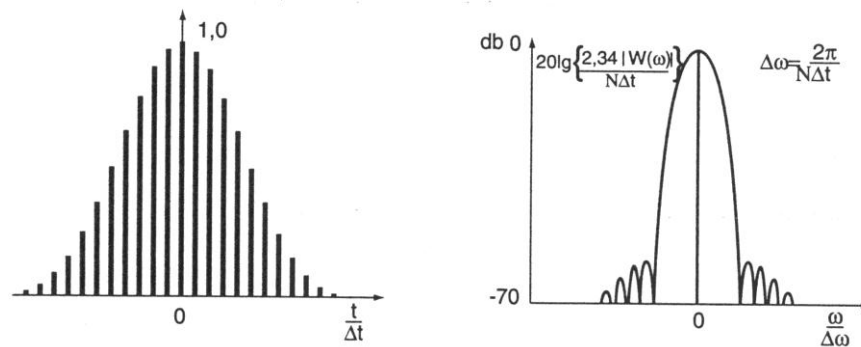
- Hamming ablak:



7. ábra: Hamming ablak

([1] p. 98.)

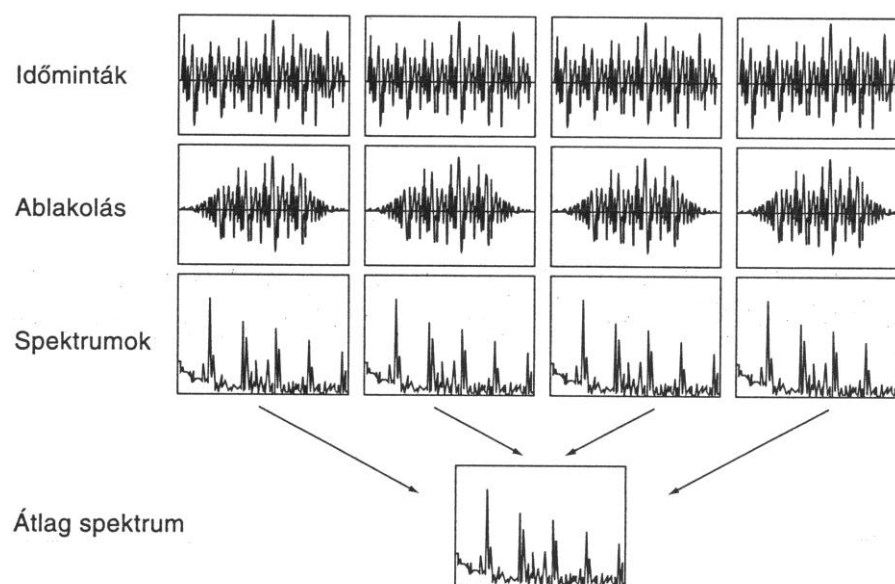
- Blackman ablak:



8. ábra: Blackman ablak

([1] p. 99.)

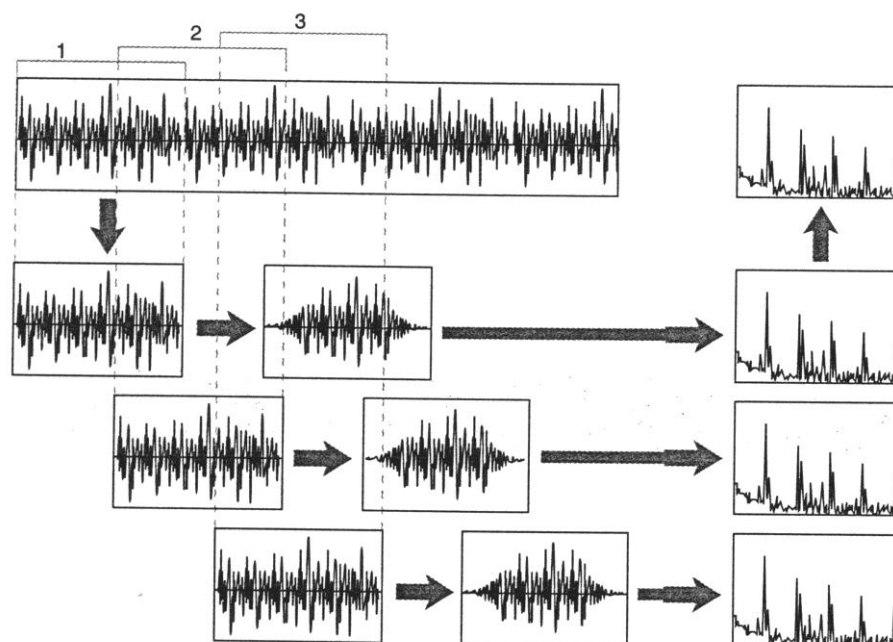
Ahhoz hogy a véletlen zajok szerepét csökkentsék, a spektrum átlagolást alkalmaznak a mérő műszerek.



9. ábra: Átlagolás

([1] p. 101.)

Az átlapolást azért alkalmazzák, hogy a mérési időt lerövidítsék. Így az N db mintából $N/2$ db vonalszámú spektrum állítható elő (pl.: egy 1024 diszkrét értéket tartalmazó mintából 512 vonalas spektrumot kapunk).



10. ábra: Átlapolás

([1] p. 102.)

([1] és [3] alapján.)

2. Melléklet

Rezgésérzékelők technikai adatai:

1. érzékelő:

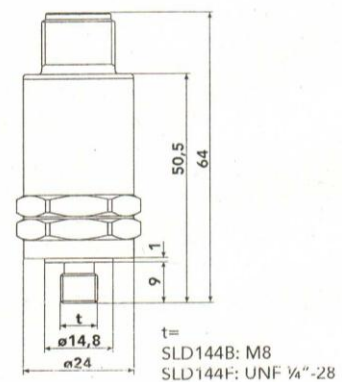
Type:	SLD144B	Measuring point:		
Serial number:	S/N 1026091	Calibration date:	2010-07-01	
Sensitivity:	10.71. mV/m/s ² =105.17mV/g	Operator:	Viveca Jensen Carlen	

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.

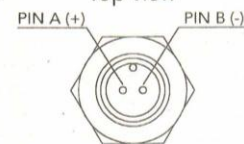
Technical Specification:

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

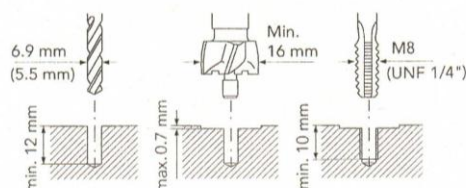
Side view



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

2. érzékelő:

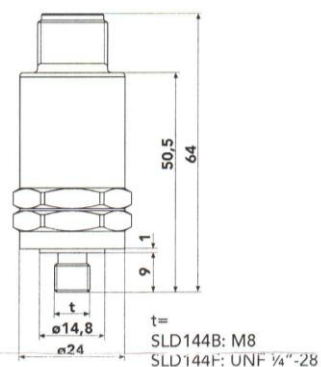
Type:	SLD144B	Measuring point:		
Serial number:	S/N 1026091	Calibration date:	2010-07-01	
Sensitivity:	10.71. mV/m/s ² =105.17mV/g	Operator:	Viveca Jensen Carlen	

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.

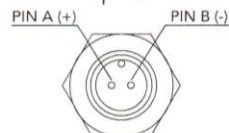
Technical Specification:

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

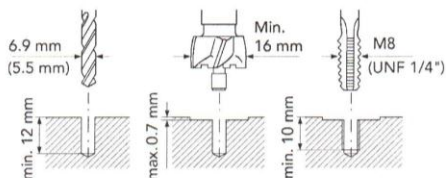
Side view



Top view

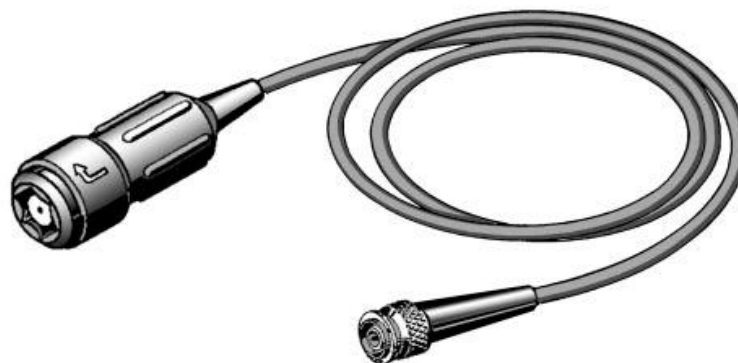


Installation Instruction



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

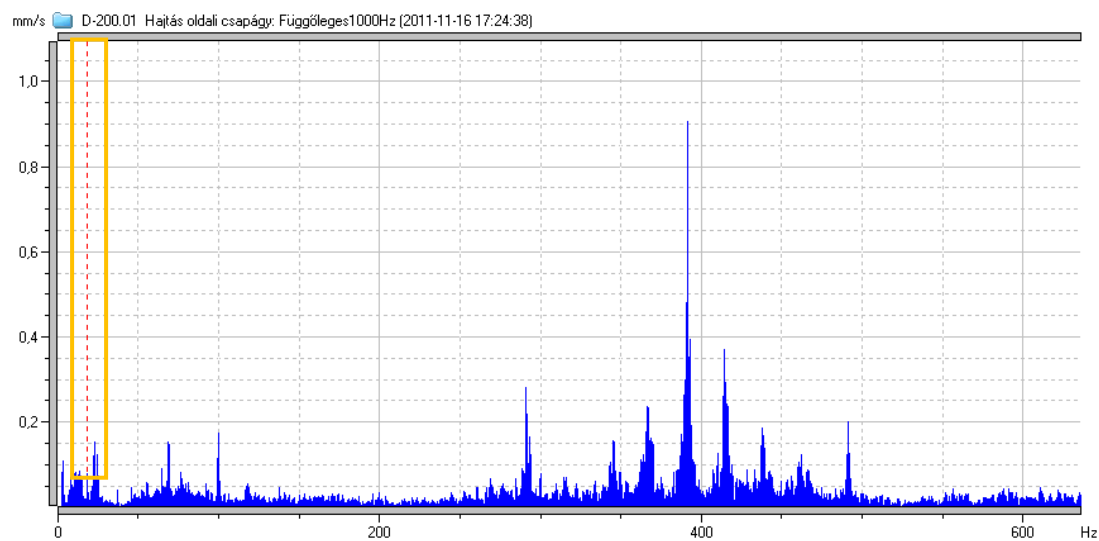
TRA-30-as ütésimpulzus érzékelő technikai adatai:



Technical data:

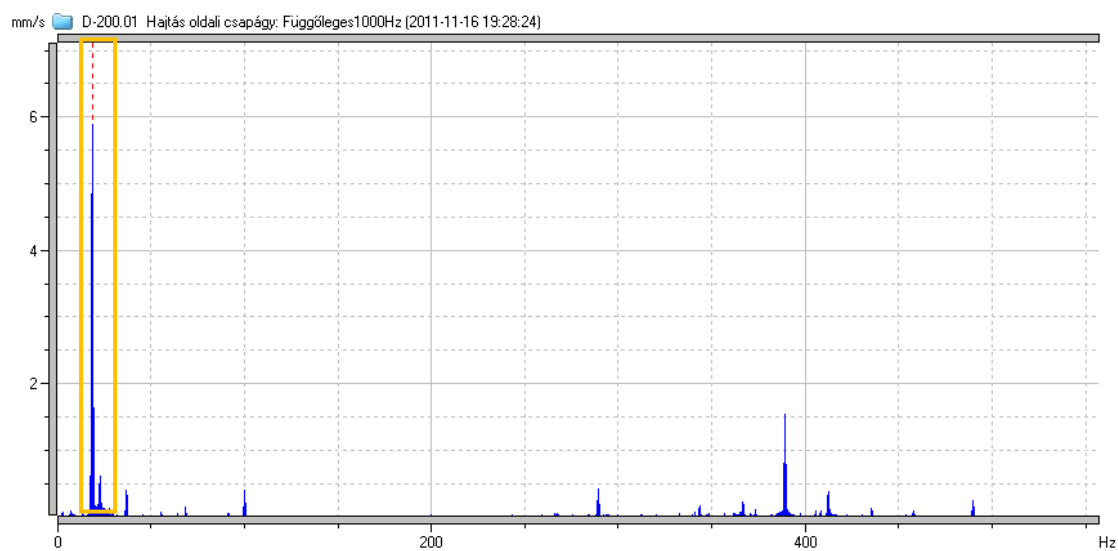
Measuring range:	Max. 100 dBsv
Design:	Sealed
Temperature range:	-30° to +70° C
Material, spanner:	Blacknited steel
Handle cover:	Urethan
Coaxial cable:	PVC, length 1.5 m
Connector:	TNC
Weight:	250 g

3. Melléklet



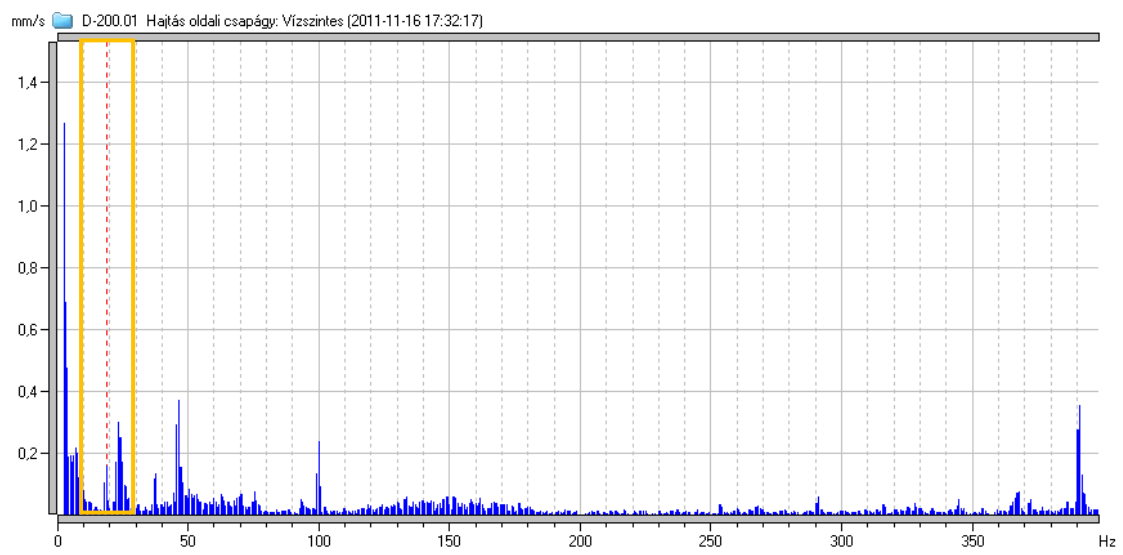
Vertikális irányú rezgés spektruma csavar nélkül

(0-1,1 mm/s)

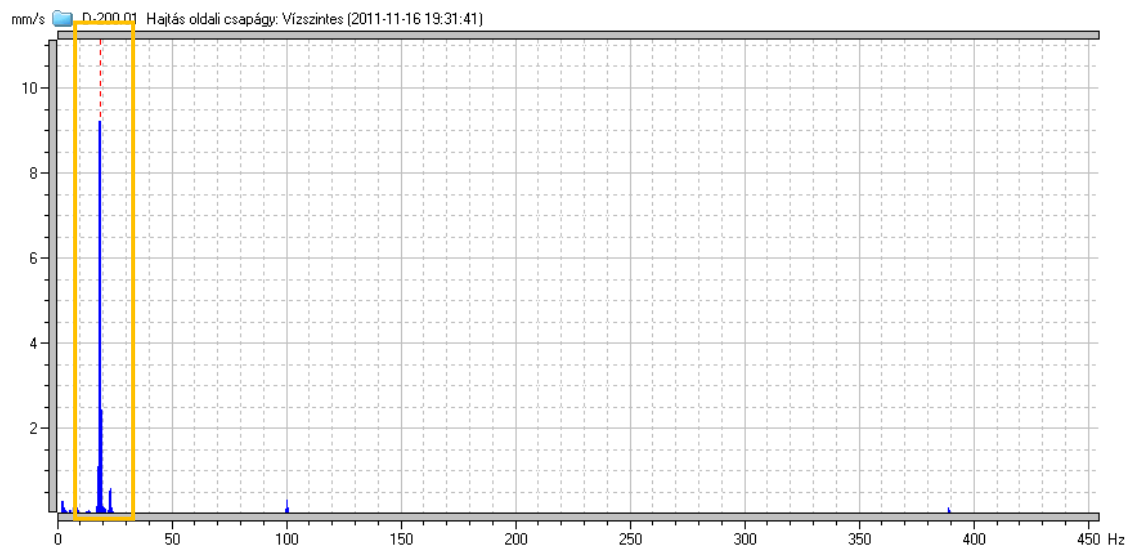


Vertikális irányú rezgés spektruma csavarra

(0-7 mm/s)



**Horizontális irányú rezgés spektruma csavar nélkül
(0-1,6 mm/s)**



**Horizontális irányú rezgés spektruma csavarral
(0-11 mm/s)**