



TÁMOP-4.1.1.F-14/1/KONV-2015-0006

SZTE Mérnöki Kar Műszaki Intézet, Duális és moduláris képzésfejlesztés alprogram (1a)

„A rezgésdiagnosztika gyakorlati alkalmazása”

# DIAGNOSZTIKA SZÉLES ÉS KESKENYSÁVÚ ELEMZÉS

Forgács Endre  
Szuchy Péter

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG  
KORMÁNYA

Európai Unió  
Európai Szociális  
Alap



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

# DIAGNOSZTIKA (A HIBÁK ÉS KIFEJLŐDÉSÜK AZONOSÍTÁSA )

- FFT SPEKTRUM

Általános hibák diagnózisa

- KEPSTRUM

Hajtómű hibák oldalsáv és felharmonikus „család”-jainak (felharmonikus sorozatának) diagnózisa.

- ENVELOPE SPECTRUM

Ismétlődő hatások észlelése és diagnosztizálása:

Gördülőcsapágy hibák.

- SZÉLES SÁVÚ ÉRZÉKELÉS ÉS RENDEZÉS

- KESKENY SÁVÚ DIAGNÓZIS

- Megjegyzés:

A gyártó által a gépre ajánlott karbantartási eljárás/sok nem kérdőjelezhető/tők meg.

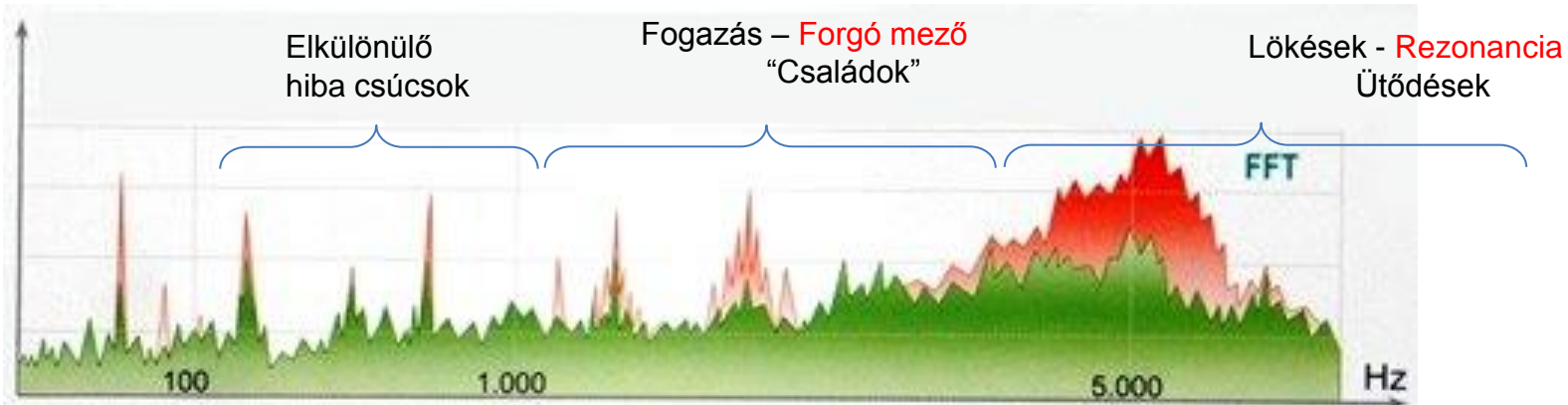
# AZ ADATOK MEGJELENÍTÉSE

- A grafikus kijelzés különböző eszközökkel segíti a specifikus jel összetevők azonosítását, úgy mint: felharmonikusok, oldalsávok, nem szinkron jelek.
- A megjelenítések is kombinálható, különböző átfedésekkel: pl. vízesés diagram.
- Ezek a megjelenítések és ábrák a diagnosztikai eszközökön is használhatók.
- A beszámolóí, jelentési funkciók, előzetes tünet, jelenség elemzések és automatikus diagnózis képességek kifejlesztése optimált formában könnyítik meg az információ szétosztását.

# AZ ELLENŐRZÉS ÉS A DIAGNÓZIS FOLYAMATA

- Ha a rezgéseket a gép jó állapotban előzetesen ellenőrzik, akkor bármilyen változás is lesz, a frekvencia spektrum elemzésével a kifejlődő problémát azonosítani, jelezni és diagnosztizálni lehet.
- Gyakran alkalmaznak folyamatosan összegzett vagy szint monitorozást.
- A bonyolult esetek meghatározására, vagy hogy ha felmerül egy hiba, vagy csak annak gyanúja, akkor a fejlettebb spektrum feldolgozást alkalmazzák .
- Minél nagyobb a sávszélesség, annál nehezebb a hiba azonosítsa, azonban a jobb felbontás sokkal több időt igényel a feldolgozásra, különösen alacsony frekvenciákon.
- A rezgés elemzés kombinálható más megelőző karbantartási módszerekkel (olaj elemzés, infravörös termográfia).

# AZ ELLENŐRZÉS ÉS A DIAGNÓZIS FOLYAMATA



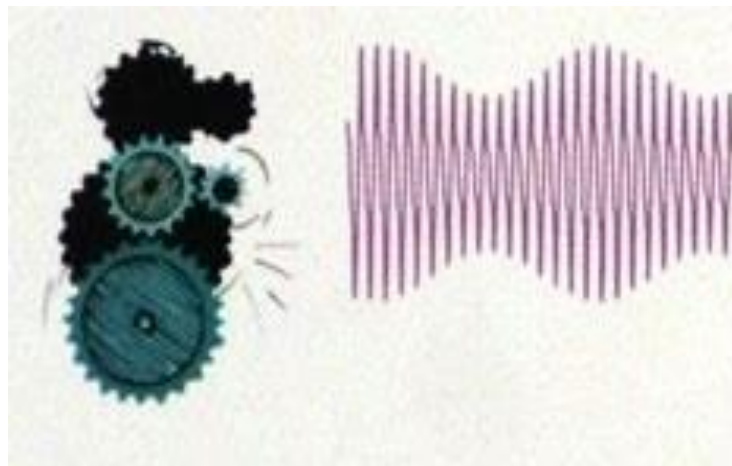
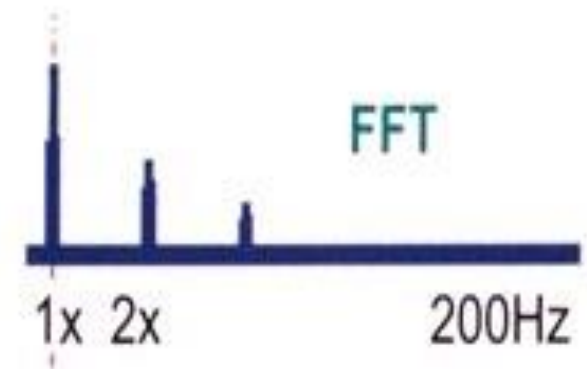
Érzékelés	Szélessávú sebesség mm/s	Szélessávú gyorsulás mm/s <sup>2</sup>
Rendezés	Teljes Spektrumokat CPB (állandó százaléku sávszélesség - logaritmus X skála) mm/s	
Elemzés	FFT Spectrum mm/s	FFT Spectrum m/s <sup>2</sup>
	Envelop m/s <sup>2</sup>	← m/s <sup>2</sup>
	Kepstrum dB	← m/s <sup>2</sup>

# AZ ELLENŐRZÉS ÉS A DIAGNÓZIS FOLYAMATA



Felharmonikusok:

- Kiegyensúlyozatlanság
- Egytengelyűtlen-ség

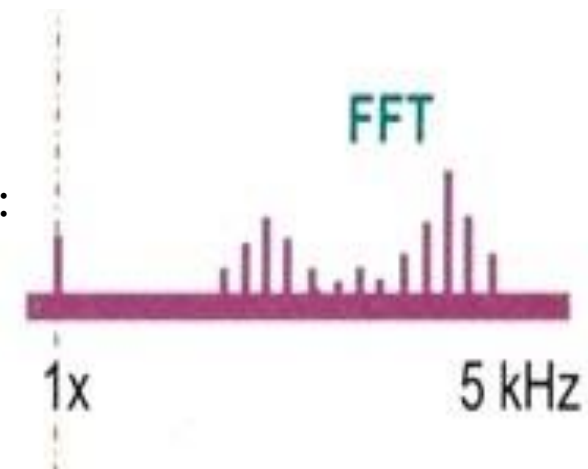


Amplitudó moduláció:

- Külpontosság

Frekvencia moduláció:

- Csavarodás
- Hajlékony fog



Időjel

Spektrum

# AZ ELLENŐRZÉS ÉS A DIAGNÓZIS FOLYAMATA



Véletlen szerű:

- Kenés
- Csapágy hibák
- Szerelési hibák
- Folyadékrendszer gerjesztése



Idő jel

Lüktetés:

- Gördülőelem kopás
- Súrlódás
- Felrakódás, kosz
- Fog hibák



# AZ ELLENŐRZÉS ÉS A DIAGNÓZIS FOLYAMATA

Az összegzett szint bármilyen változása a viselkedésben riasztást adhat.

A dinamikus mérés legalább két eszköz beszerzését indokolja, alacsony frekvenciájú (rms, rezgés sebesség, mm/s), a másik a magas frekvenciájú (rms, rezgés gyorsulás,  $m/s^2$ , vagy a csapágy csúcs tényező).

A mérési idő rövid, a globális (átfogó) értékek, kismennyiségű információt kell tárolni, az eredmény könnyen megismételhető.

A CPB spektrum (állandó % sávú), amely a teljes frekvenciatartományban megfelel az egyre növekvő, kiszélesedő hibákhoz (csúcs, a frekvencia család és ütés/rezonancia). Ez megerősíti a riasztási helyzetet, és lehetővé teszi, a kezdeti diagnózist, hogy mi történt.



# AZ ELLENŐRZÉS ÉS A DIAGNÓZIS FOLYAMATA

Az FFT-spektrumot (gyors Fourier Transform) a mechanikus alkatrészek kinematikus jellemző csúcsai azonosítására használják az alacsony és közepes frekvenciákon. Az alap összetevőket, forgás ( $x$  RPM, RPM  $x$  fogak száma), valamint a sok felharmonikust fel lehet használni diagnosztizálására.

Az envelop elemzés a kis gyakoriságú pálya-gördülőelem ütésekre koncentrál, mint például a csapágy magas frekvenciákon észlelt rendellenességei.

Ha az FFT elemzés nem elegendő a Kepstrumot, a "Spektrum Spektrumát" használják, hogy az ismételt frekvencia modulációt kiemelje pl. a fogazat hibák diagnózisa.

# GÉPEK SZABVÁNYOS ÉRTÉKELÉSI HATÁRAI

Mindaddig, amíg a gép viselkedése ismeretlen, és nincsenek saját tapasztalatok és adatok, a ténylegesen mért értékeket össze lehet hasonlítani a szabványos határokkal. Számos szabvány és norma létezik, mint például az ISO, API ajánlások. A legsokoldalúbbak a következők:

Csapágyrezgés: ISO 10816

Tengely rezgés: ISO 7919

Például (ISO 10816-3, 2. csoport):

Közepes méretű gépek névleges teljesítménye 15-300 kW közötti, 160-315 mm közötti tengely magasságú villamos gépek

Értékelési sáv:

A: Újonnan üzembehelyezett gépek rezgése

B: Korlátozás nélkül folyamatosan működő gépek

C: Csak korlátozott ideig működtethető gépek

D: Veszélyes szintű rezgés is előfordulhat, ami károsíthatja a gépet

# GÉPEK SZABVÁNYOS ÉRTÉKELÉSI HATÁRAI

Alapzat rugalmassága	Értékelési sáv	Elmozdulás $\mu\text{m}$ (rms)	Sebesség $\text{mm/s}$ (rms)
Merev	A	22	1,4
	B	45	2,8
	C	71	4,5
	D		
Rugalmas	A	37	2,3
	B	71	4,5
	C	113	7,1
	D		

Értékelési sáv:

A: Újonnan üzembehelyezett gépek rezgése

B: Korlátozás nélkül folyamatosan működő gépek

C: Csak korlátozott ideig működtethető gépek

D: Veszélyes szintű rezgés is előfordulhat, ami károsíthatja a gépet

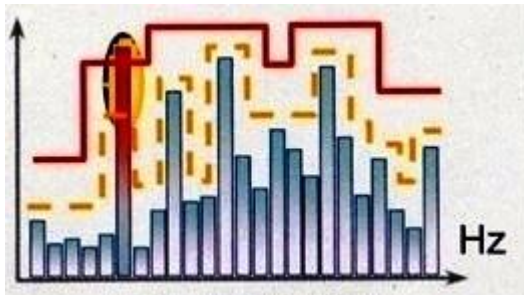
# RIASZTÁSI MÓDOK

A monitoring rendszer követelményeitől függ. A riasztások megjelentetésének különböző eszközei, útjai a figyelmeztető fények, a jelzők, az egyéni azonosító (ID) hívása, kürt, relék működtetése, biztonsági útjelzés és PLC Működtetés. Ezek akkor működnek, amikor a határérték átlépi a:

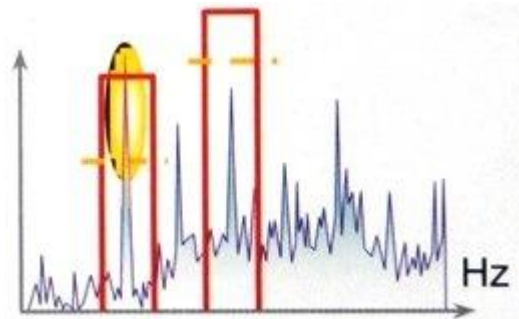
- Riasztás és a veszély szintjét,
- Körvonal alakját,
- Egyes sávriasztást,
- Egy folyamat paraméter vagy állapot változó vizsgált értékét.

A riasztási szint meghatározása a rendszer beállítás érzékeny eleme.

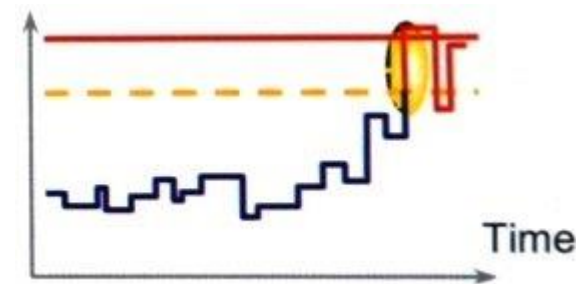
# RIASZTÁSI MÓDOK



Szint vonalak a spektrumban



Egyes sávok a spektrumban



A skaláris ellenőrzés

Ha a jelenlegi szint egyszerű összehasonlítása az előző értékhez nem elegendő, más módszer az előnyös:

- Szabványok és a gyártó által ajánlott értékek használata.
- Az egyenértékű vagy azzal azonos gépek kinematikai és a lehetséges tönkremeneteli módok tanulmányozásával, és az idővel szerzett tapasztalatok összehasonlításával.

# ELEKTROMOS HIBÁK

## Villamos gép aszimmetriák

Az elektromos motor tengelyére az elektromos pólus a hálózati frekvencia (Európában  $f_L = 50$  Hz) szimmetrikus hatása miatt egy körülfordulás alatt kétszer hat. Így az elektromos eredetű a hibák, amelyek a rezgési spektrumban jelennek meg, a hálózati frekvencia kétszeresei, vagyis a pólus áthaladási frekvencia,  $2 \times f_L = 100$  Hz.

A mágneseesen indukált erő az áram négyzetével arányos, így nagyban befolyásolja a teljesítményt, és változik, valamint a terheléssel a villamos gép rezgés viselkedése is változik.

## Villamosmotor forgórész zavarok

A frekvencia spektrumban  $2 \times f_L$  frekvencia oldalsáv távolság kötöttség van. A pólusáthaladás frekvencia (100 Hz) körül slip frekvencia távolsággal oldalsáv jelenik meg, amely a zoom funkció használatával nagyon jól látható.

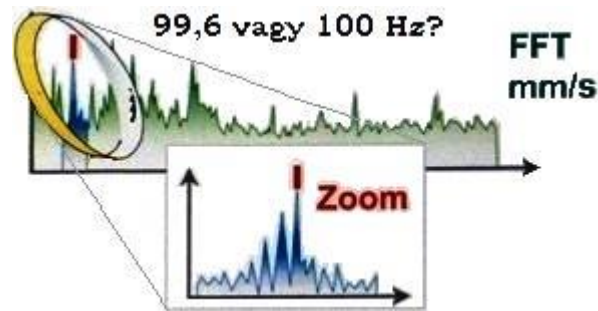
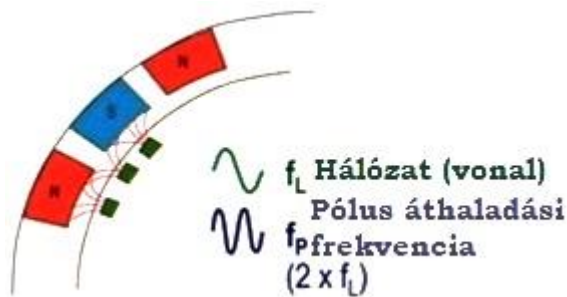
Az 50 Hz ( $f_L$ ) jelenléte a spektrumban viszonylag ritka, és növekedése különösen a szivárgási áramra mutat.

- $F_{\text{rúd}}$  forgórész = forgórészrudak száma x RPM
- $F_{\text{rés}}$  áthaladás = Rés szám x RPM
- $F_{\text{Pólus}}$  áthaladás =  $F_{\text{slip}}$  x Pólusok száma

# ELEKTROMOS HIBÁK

## Villamosmotor forgórész zavarok

A zoom hasznos, például megkülönböztethető a 100 Hz a forgási felharmonikustól (amely a csúszás miatt nem pontosan FL többszöröse). A sebességet ellenőrizni lehet vagy a sebesség mérésével egy tachométerrel vagy meghatározva a spektrumban a hajtótengely felharmonikusa révén.

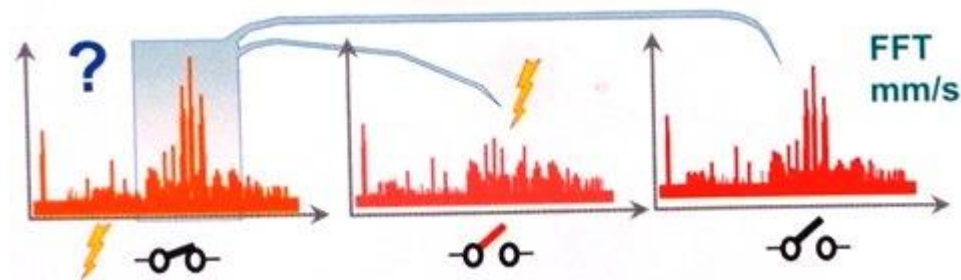


Hálózati frekvencia vagy pólus áthaladási frekvencia?

# ELEKTROMOS HIBÁK

## Villamosmotor forgórész zavarok

Az elektromos hiba a ki és bekapcsolás utáni közvetlen spektrumelemzéssel azonosítható be. Az elektromos hiba jele azonnal eltűnik, míg a mechanikai rezgések fokozatosan csökkennek a tehetetlenség miatt hosszú ideig lassuló tengelynek köszönhetően.



Be- és kikapcsolás utáni frekvencia



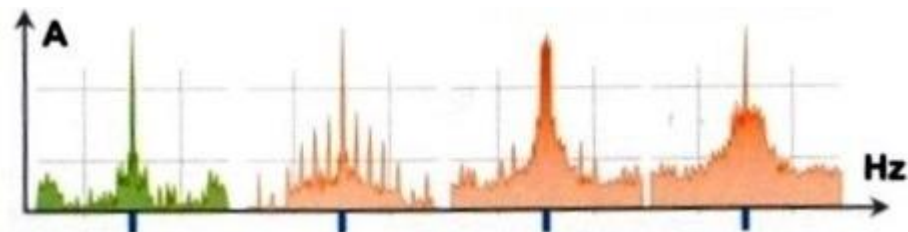
# ELEKTROMOS HIBÁK

## Villamosmotor forgórész zavarok

A vezetékben folyó áramot spektrálisan lehet elemezni a kapcsoló fölött elhelyezett, ampermérő vezetékkel.

Az oldalsáv jelenség léte annak a jele, hogy az elektromos hiba(k) növekszik.

Áram FFT zoom



47 50 52  
Normal

47 50 52  
Hibás  
kondenzát  
or

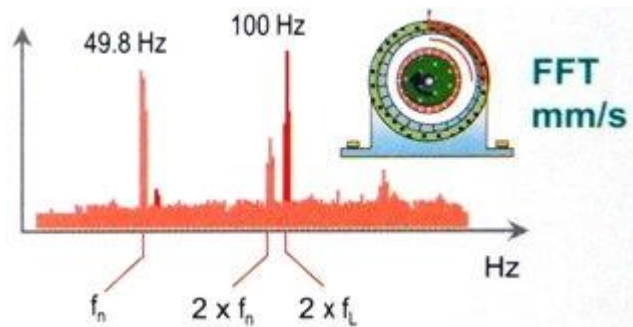
47 50 52  
Hálózat  
hiba

47 50 52  
Inverter  
hiba

Elektromos hibák

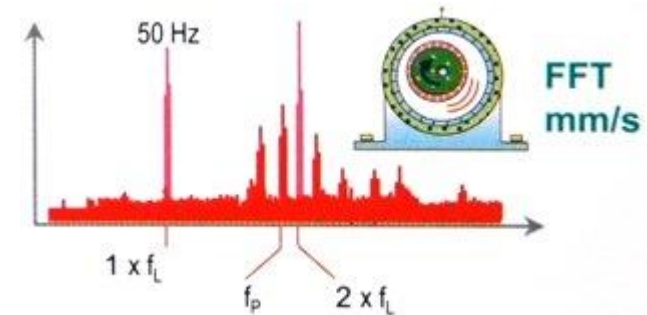
# ELEKTROMOS HIBÁK

Az állórész külpontossága



- Lazaság, gyenge állórész alátámasztás.
- Rövidzáras állórész-lemezek.
- 2. Felharmonikus  $f_L$  (100 Hz).

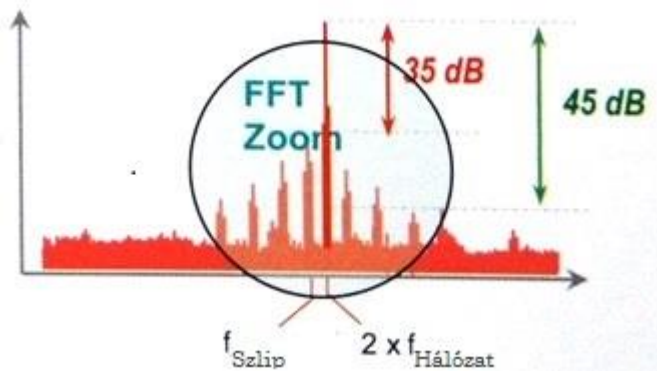
A forgórész külpontossága (statikus)



- $2 \times f_L$  (100Hz).
- $f_{\text{polus}}$  Pólus Elhagyási Frekvencia oldalsávozza a  $2 \times f_L$ -t

# ELEKTROMOS HIBÁK

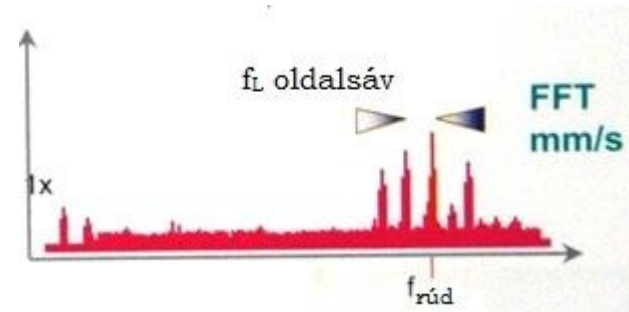
Törött forgórészrudak



Repedezett, kopott, laza, rövidzártas kötések:

- $f_{\text{slip}}$  oldalsáv az 1x, 2x, 3x, stb. körül.
- $< -35$  dB = **nagymérvű**.
- $-45$  dB = normális.

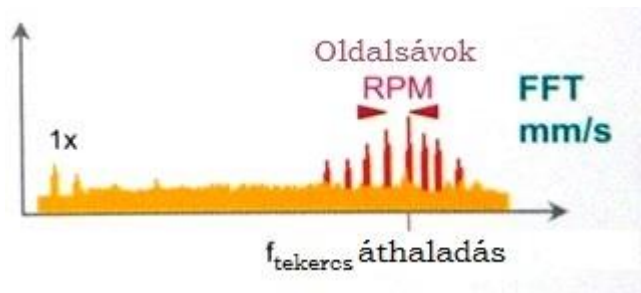
A levált forgórészrudak szintén oldalsáv határolást okoznak



A levált/törött forgórészrudak szintén  $f_L$  oldalsáv határolást okoznak,  $f_{\text{rúd}}$  forgórész (**RBPF**) és  $2 \times$  RBPF körül.

# ELEKTROMOS HIBÁK

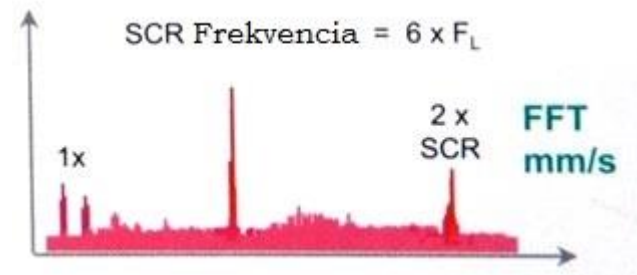
Egyenáramú motor, Szinkronmotor



Az állórész tekercselés kopás:

- RPM oldalsáv a tekercs áthaladási frekvencia körüli

Egyenáramú motor - vezérelt egyenirányítóval

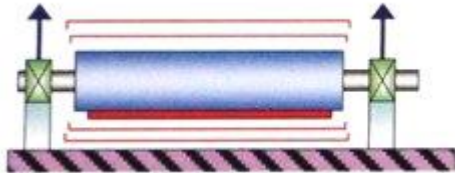


A növekedés az SCR (vezérelt egyenirányító) frekvenciája miatt lehet:

- SCR szabályozó hibás.
- Kopott érintkezők.
- Szakadt tekercselés.

# JELENSÉGEK ÉS HIBÁK

Statikus kiegyensúlyozatlanság

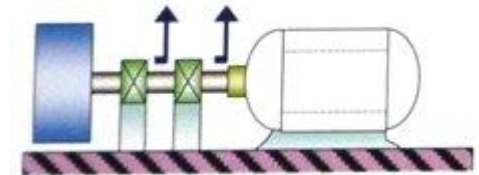


Kiegyensúlyozatlanság

Dinamikus kiegyensúlyozatlanság



Kinyúló forgórész kiegyensúlyozatlanság



Rezgés: Radiális

Frekvencia: 1 x forgási sebesség, alap harmonikus (1 x RPM)

- Azonos fázisban van az alátámasztó csapágyakon.
- Elsősorban radiális rezgés.

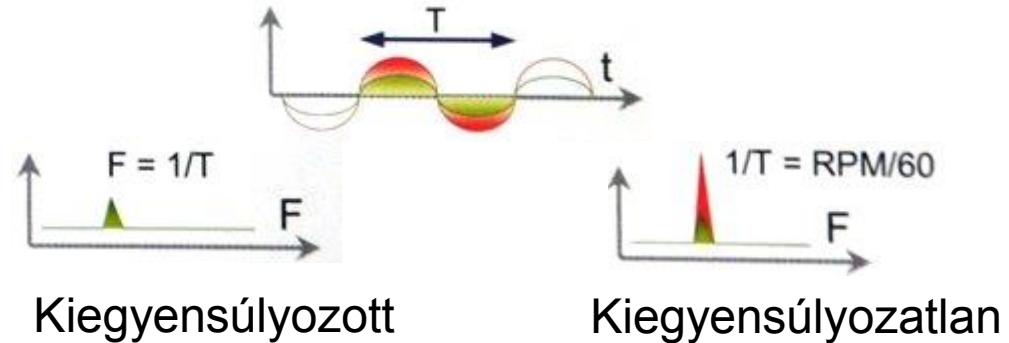
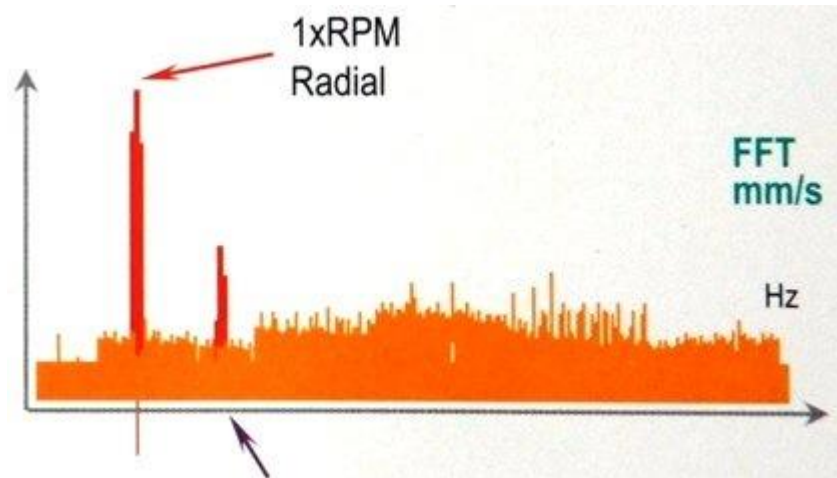
- 180° fáziseltolódás az alátámasztó csapágyak között.
- Elsősorban radiális rezgés.

- Gyakran ugyanabban az időben mind a statikus, mind a dinamikus tünetek jelentkeznek.
- Általában a vízszintes a domináns.

# JELENSÉGEK ÉS HIBÁK

## Kiegyensúlyozatlanság

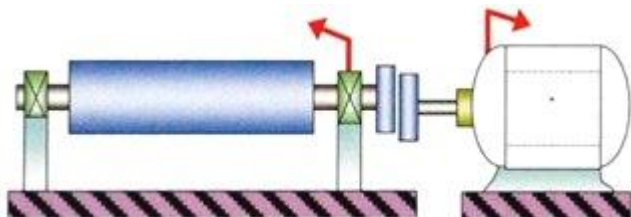
A meghatározó kiegyensúlyozatlanság felharmonikusokat idézhet elő



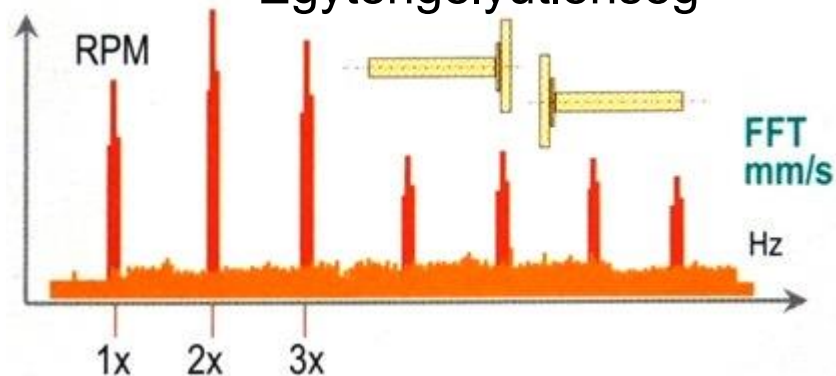
- A forgórész nincs kiegyensúlyozva, amikor a tömeg középpont eltér a forgás középpontjától.
- Kiegyensúlyozatlanság leggyakoribb oka a forgó tengely hibája, nagy energiájú (sebesség négyzetével arányos).
- A kiegyensúlyozatlanság rezgése legfőképpen sugárirányban jelenik meg - a forgási sebességen (1 x RPM).
- A kiegyensúlyozatlanság korrekciója tömeg kiegyenlítéssel történik, szabványosított tűréssel.

# JELENSÉGEK ÉS HIBÁK

## Párhuzamos egytengelyűtlenség, Eltolódott tengelyek



## Egytengelyűtlenség

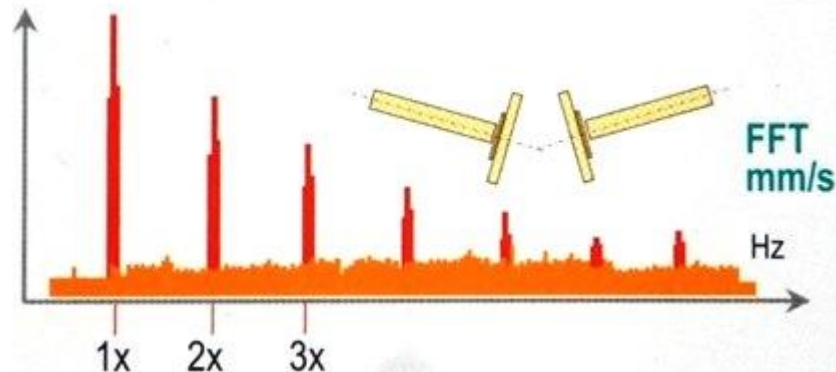
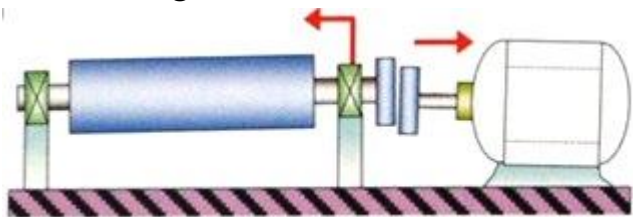


Rezgés: radiális és axiális

Frekvencia: a forgási sebesség felharmonikusai (1, 2, 3, 4 x RPM)

- Radiális rezgés 180°-os fázisban a tengelykapcsoló két oldalán, általában a 2. harmonikus a domináns.
- Egytengelyűtlenségről akkor beszélünk, amikor a tengelyek közt szög vagy párhuzamos eltérés van.
- Ezek a tengelykapcsolóknál jelentkeznek és magasabb radiális és általában axiális rezgést is okoz.

## Szögbeállítási hiba

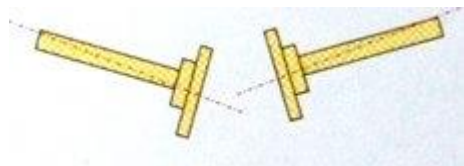


Axiális rezgés ellentétes fázisban, megjelennek a 2., 3., 4. ... Felharmonikusok

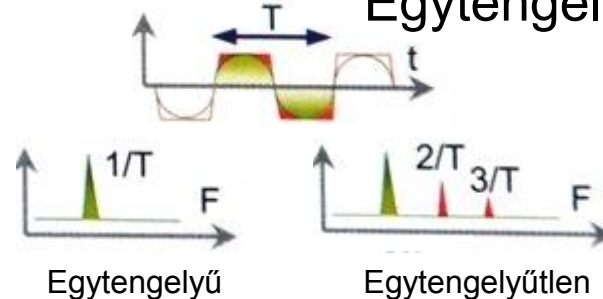
- Ha felharmonikus jelek vannak, a forgórész és a tengelykapcsoló közötti kapcsolat fázis vizsgálata tudja az egytengelyűtlenséget és a kiegyensúlyozatlanságot megkülönböztetni. Az egytengelyűtlenség a csapágyakra nagy erőket juttathat.
- Végül az elkerülhetetlen csapágyromlás figyelhető meg: a kopás előrehaladtával a 2. harmonikus csökken, míg a 3. növekszik.

# JELENSÉGEK ÉS HIBÁK

Kitérő tengely



Egytengelyűtlenség

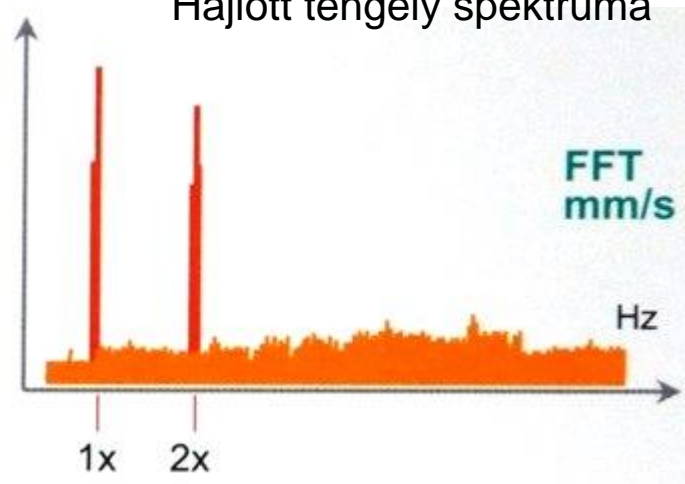


A kitérő tengely mind a két egytengelyűtlenség típust kombinációja.

Hajlott tengely



Hajlott tengely spektruma



A spektrum a kiegyensúlyozatlansághoz hasonlít.

- Axiális fázis vizsgálat teszi lehetővé, hogy megkülönböztessük az egytengelyűtlenséget a hajlott tengelytől.
- A hajlott tengelynél 1 x RPM a domináns, és a 180°-os fázis jelek azonosítják.



# JELENSÉGEK ÉS HIBÁK

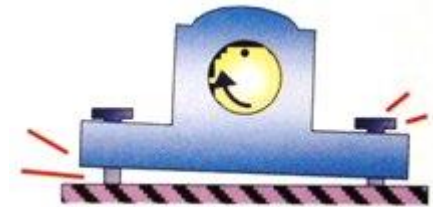
## Laza alkatrészek

A zörgést (gyenge rögzítés az alaphoz, puhaláb) ütés és forgómozgás eredményezi, függőlegesen gyakran meghatározó, egy - két ciklus a tengely egy fordulatra. Ezek erős jel -torzulást vagy csonkolást eredményeznek.

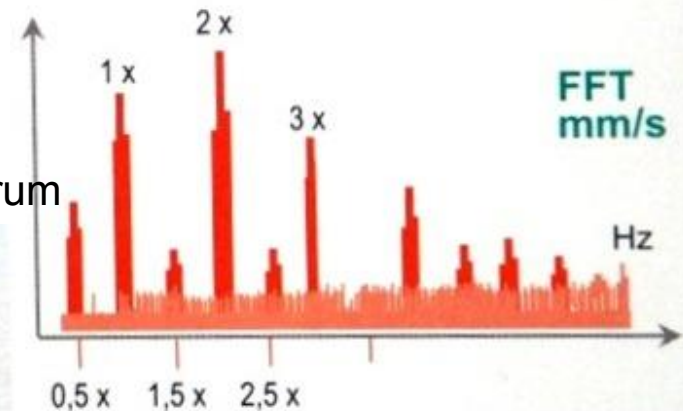
Abban az esetben, hogy ha laza a csapágy a tengelyen, számos felharmonikus jelentős növekedése figyelhető meg.

A szubharmonikusokat (fél, harmad, stb.) lazaság és a pattogás okozza. A szerkezetet a tengely minden második vagy harmadik fordulata gerjeszti.

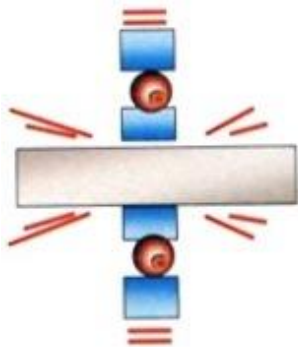
## Laza alap



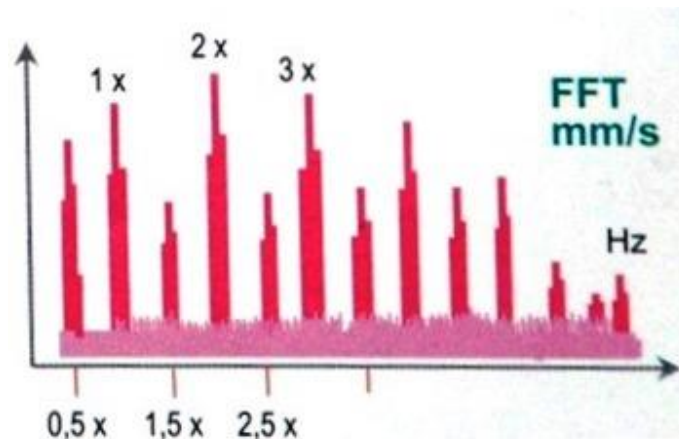
## Laza alapozás spektruma



## Laza tengely a csapágyban



## Laza tengely a csapágyban spektrum



- Laza alap: gyakran számos felharmonikus, néha szubharmonikus jellemzi..

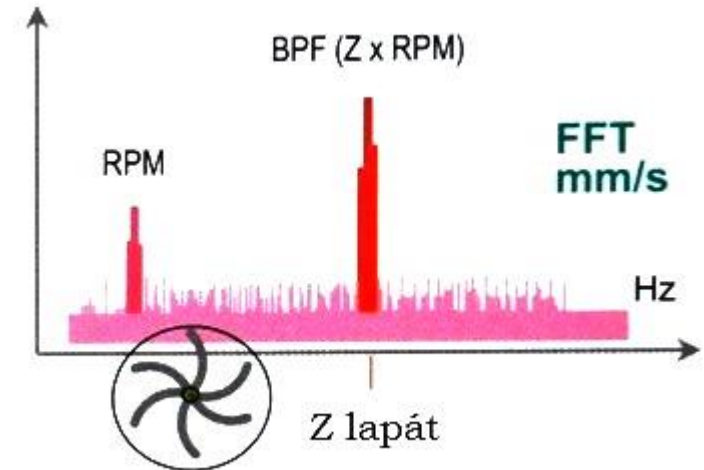
- Laza tengely a csapágyban: gyakori a szubharmonikus sorozat pl. 1/2, 1/3, ... 1/RPM

# JELENSÉGEK ÉS HIBÁK

## Ventilátorok - Szivattyúk lapátozása

Bármilyen (ventilátorral, szivattyúval ...) szállított közeg (levegő, víz ...) rezgést hoz létre, ami az áramlási sebesség és a szállító elem számának függvénye:

- **BPF (Blade / Vane Pass Frequency [Lapát / Lamella Elhegyási Frekvencia])** = lapátok száma x RPM.
- A rezgés szint a lapátozás szögétől függően változik.



# JELENSÉGEK ÉS HIBÁK

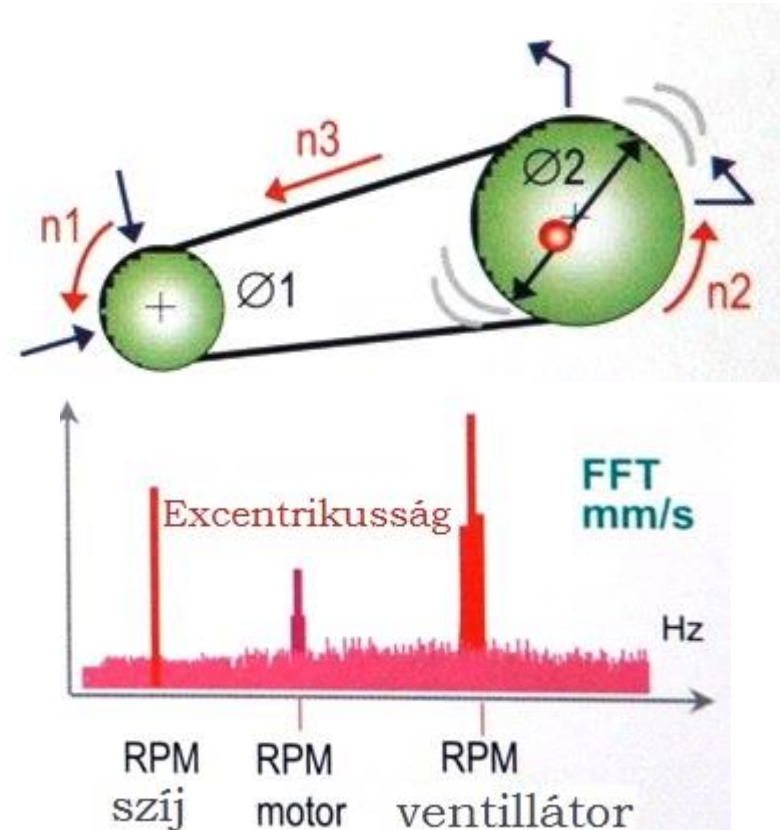
## Szíz hajtások

Az szíjfrequencia (**Primary Belt Frequency, PBF** [Alap Szíjfrequencia]) az alábbi összefüggés szerint számítható

$$n_3 = n_1 \times \pi \cdot \varnothing 1 / L_{\text{Szíz}} = n_2 \times \pi \cdot \varnothing 2 / L_{\text{Szíz}}$$

A szízrezgésekkel kapcsolatos szíz problémák:

- kopás, repedések, gyenge feszítés vagy a szíz anyagának, puha vagy kemény pontjai miatti csúszás.
- Nem ritka az, hogy a PBF domináns legyen, és egy nagy 2. harmonikus összetevővel is rendelkezünk. A rezgés radiális.
- Egytengelyűtlenség esetén, tárcsa/szíz 1 x RPM axiális komponenst is generál. A sima szíz a csapágy, a fogazott szíz a hajtómű rezgésmintát utánozza. A repedt szíz a repedéssel egyenértékű ütést okoz, és az alacsony szintű (oldalsó sáv) család sorozat az envelop spektrumban a szíz forgás frekvenciájának megfelelően látható lesz.



Szíjfrequencia (Primary Belt Frequency, PBF)

## Ütődések

Ha a különböző frekvenciák közel vannak egymáshoz, akkor öss zadódnak, azaz módosúlnak.

- A felvett vibrációs szint lassú változásával a lebegés jelensége nyilvánul meg.
- Ez a szivattyú 1/1 arányú szíjhajtásánál gyakori. Itt a sebességben csak a csúszás eredményez különbséget. A lebegési frekvencia a hajtó/hajtott frekvenciák közötti különbség.
- A nagy felbontású zoom-ot használva lehet a lebegést igazolni: az amplitúdó moduláció szinkronban van a maximális erősítéssel, akkor jelentkezik, amikor a két elsődleges frekvencia fázisban van.

# JELENSÉGEK ÉS HIBÁK

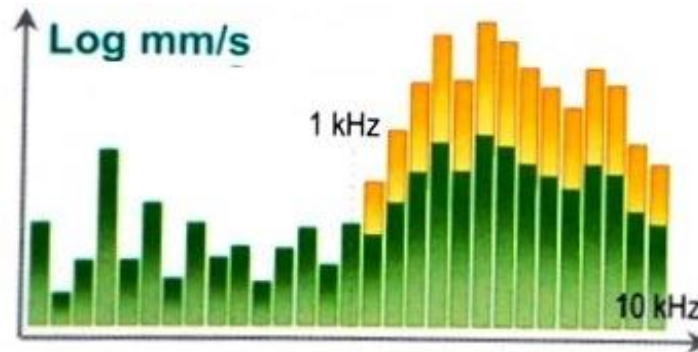
## Kavitáció a szivattyúban



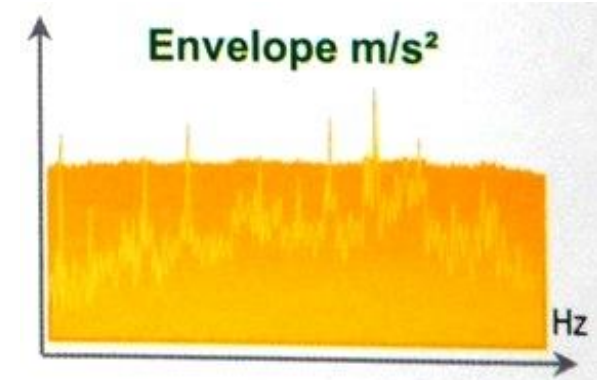
Bizonyos körülmények között (nyomásesés - gyorsuló folyadék), a szivattyúban helyileg a folyadék fölforrhat (gőz buborékok keletkeznek).

A mikroszkopikus buborékok ütköznek, és a szivattyú nagy nyomású oldalára nagyon gyorsan átjutva összeomlanak. Ezek éles ütés impulzusokhoz vezetnek és elég erősek ahhoz, hogy azon a helyen, ahol előfordulnak, a fém alkatrészeket roncsolják, ezért ez kavitációs kopáshoz vezet.

## A kavitáció spektruma



## A kavitáció envelope spektruma



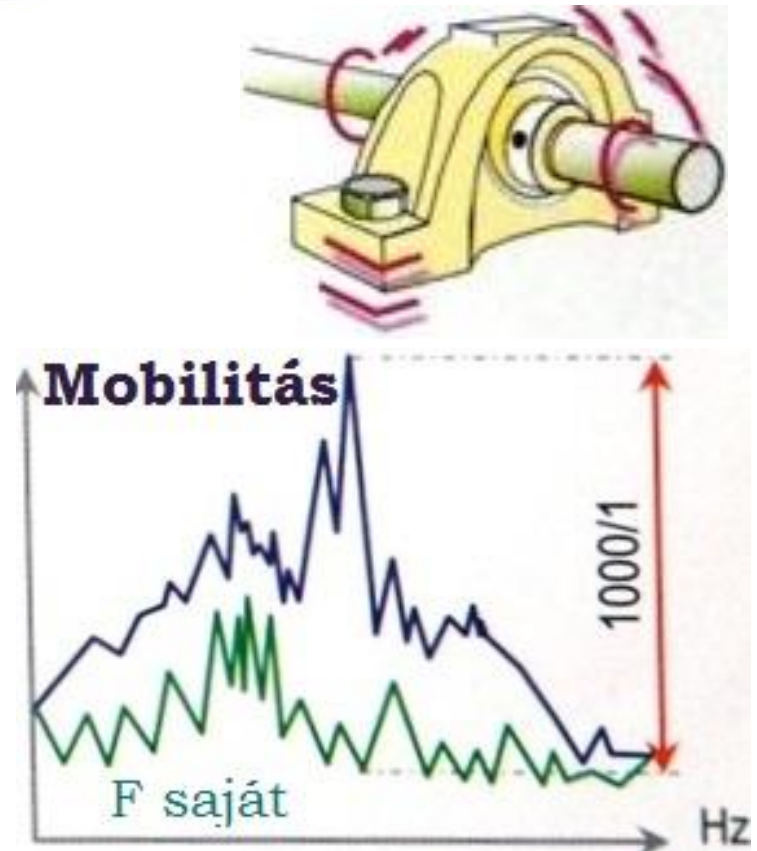
A buborékütközések is lökéshullámokat generálnak, amelyek átterjednek a szerkezetre. Nagyon rövid impulzusok:

- A spektrumban meglátszó rezonanciát gerjeszt.
- Különösen magas több kHz frekvenciát gerjeszt.
- A megnövekedett zajszint figyelhető meg az envelop spektrumban.

# JELENSÉGEK ÉS HIBÁK

## Rezonancia

- Rezonancia akkor jelentkezik, amikor a belső erők frekvenciája egybeesik a szerkezeti természetes frekvenciájával. Ez a jelenség akuttá válhat és a rendszert megsemmisítéséhez vezet, ha kevés a csillapítás.
- Amikor gyanú merül fel, a legnagyobb erősítés irányába vizsgálatot végeznek. A vibrációs fázisa  $180^\circ$ -al eltolódik amikor áthalad a rezonancia frekvencián. Szükség van egy konkrét kiválasztott struktúra elemzésre: "modális elemzés" (frekvencia elemzése gerjesztés hatására).
- A saját frekvencia megváltoztatható tömeg hozzáadásával vagy a szerkezeti csillapítás megváltoztatásával (a szerkezet merevségével). A sebesség változtatás is alternatíva lehet, a kinematikai frekvencia eltolásával ( $\pm 30\%$ -al kritikus sebességtől).



Rezonancia spektruma

# GÖRDÜLŐCSAPÁGYAK

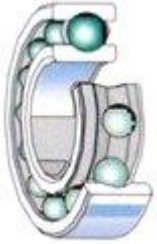


terhelés hatásvonalának szöge  
(röviden) hatásszög  $\beta$



A megjelenő fő csapágy hibákhoz 4 egyedi frekvenciaismétlést lehet kinematikailag számítani. Alternatív módon, a kinematikai adatokat a gyártótól lehet beszerezni (a megfelelő gördülőkör átmérő, gördülő elemek száma, gyakran még a számított frekvenciákat is). A kereskedelmi programok is léteznek, amelyek az ismétlési frekvenciákat a geometria és a sebesség alapján mutatják. Ezeket a frekvenciákat lehet ellenőrizni és azonosítani pl envelop felismerés.

# GÖRDÜLŐCSAPÁGYAK



terhelés hatásvonalának szöge  
(röviden) hatásszög  $\beta$



A hatások frekvenciája, azonosítható az envelopban (Hz): (feltételezve, hogy nincs csúszás)

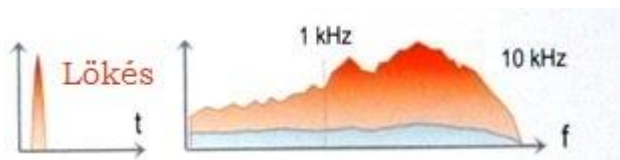
- $n$  = a gördülőelemek száma
- $f_r$  = forgási frekvencia - relatív sebesség  $r/s$  között a belső és külső pályák.
- A külső gyűrű hiba  $\rightarrow$  BPFO = (**ball pass frequency outer race**) külső gyűrűhiba áthaladási frekvencia  $= \frac{n}{2} f_r \left( 1 - \frac{DB}{DR} \cos \beta \right)$
- A belső gyűrű hiba  $\rightarrow$  BRFI = (**ball pass frequency inner race**) belső gyűrűhiba áthaladási frekvencia  $= \frac{n}{2} f_r \left( 1 + \frac{DB}{DR} \cos \beta \right)$
- A gördülő elem hiba  $\rightarrow$  BSF = (**ball spin frequency**) gördülő elemforgási frekvencia (mindkét pálya hornyot figyelembe kell venni)  $= f_r \frac{DR}{DB} \left[ 1 - \left( \frac{DB}{DR} \cos \beta \right)^2 \right]$
- A kosár hiba  $\rightarrow$  FTF = (**Fundamental Train Frequency**) kosár forgási frekvencia  $= \frac{1}{2} f_r \left( 1 - \frac{DB}{DR} \cos \beta \right)$
- $DR = \frac{D1 + D2}{2}$



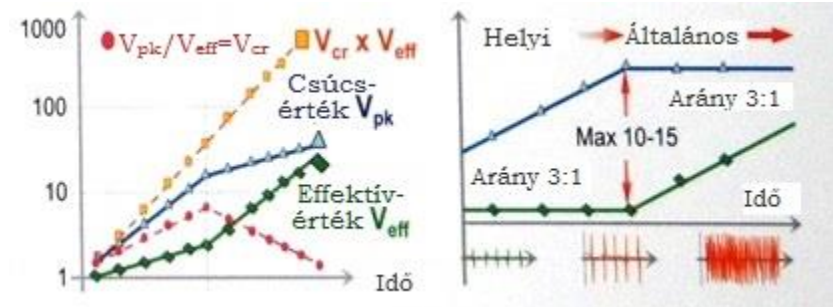


# GÖRDÜLŐCSAPÁGYAK

A csapágy hiba kezdetben alacsony szintű alacsony frekvenciájú lökés impulzus energiát okoz. Azonban magas frekvenciákon a rezonancia erősen gerjesztett. Minél rövidebb a hatás, a kilépő frekvenciák eloszlása annál szélesebb.



Lökés (ütés) frekvencia eloszlása



A csúcstényező hatása

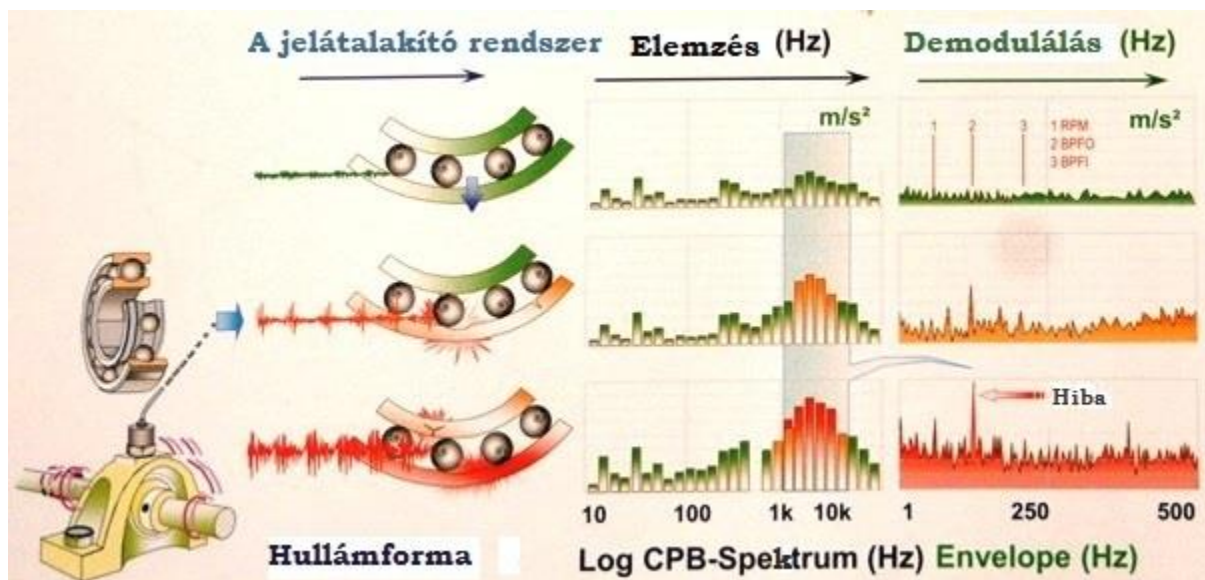
A csapágy hiba kezdetben alacsony szintű alacsony frekvenciájú lökés impulzus energiát okoz. Azonban magas frekvenciákon a rezonancia erősen gerjesztett. Minél rövidebb a hatás, a kilépő frekvenciák eloszlása annál szélesebb. Ióztati frekvencia vagy pólus áthaladási frekvencia?

A további diagnózis, a nagyfrekvenciás rezgés tartományban (csak a rezonancia alatt) is detektálható. Az eredményül kapott envelp spektrumban, az egyes hibák frekvenciái (BPFI, BPFO, BSF és FTF), és így a kár típusa egyértelműen azonosítható.



# GÖRDÜLŐCSAPÁGYAK

Az envelop spektrum igen korai szakaszában a hiba frekvenciák már láthatók, így a várható karbantartási (kenés, tengelybeállítás, kiegyensúlyozás ...) tevékenységet tervezni lehet.



Az elemzéshez a 700 Hz-es és a fölött a nagyfrekvenciás tartományban található rezonanciát is használják (a haladási (forgási) sebességtől és a gép felépítésétől függően). Vagy akár a 60 kHz fölötti frekvenciát is lehet hasznosítani.

A jelátalakító rendszer, a hullámforma, a spektrum (Hz) és az envelope spektrum (Hz)

- A túl széles frekvenciatartomány kiválasztása hátrányos. A túl nagy frekvenciatartomány, zajt is tartalmaz, amely nem kapcsolódik a csapágyak teljesítményéhez. A csapágy kinematikájától függően kijelzett tartománynak nagy frekvenciatartományban envelop és az alacsony frekvenciatartományban sebesség spektrumot kell kiválasztani. A felső határfrekvencia legalább kétszerese legyen a legnagyobb összetevőnek, azaz  $BPFI \times 2$ .



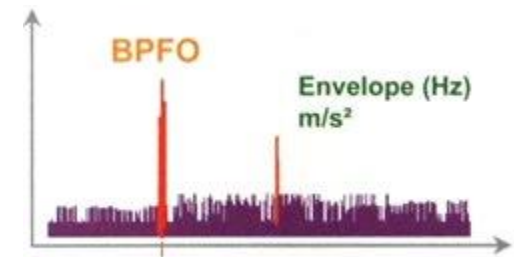
# GÖRDÜLŐCSAPÁGYAK

## Külsőgyűrű hibaáthaladási frekvencia

- Külsőgyűrű hibaáthaladási frekvencia (**B**all **P**ass **F**requency **O**uter **R**ace [BPFO]).
- Hónapok alatt alakul ki.

Az alapprofrekvenci fölött általában több BPFO felharmonikus van, (vagy BPF1, hogy ha a belső pálya rögzített).

- Amikor egy gördülőelem áthalad a külső pálya hibáján (repedésén, barázdáján ...) BPFO-t gerjesztett.
- A meghibásodási folyamat a külső pálya felületén gyakran a kisebb karcokkal vagy repedésekkel kezdődik azon a területen, ahol a terhelés maximális.



Külsőgyűrű hiba áthaladási gyakoriság [frekvencia] (BPFO)



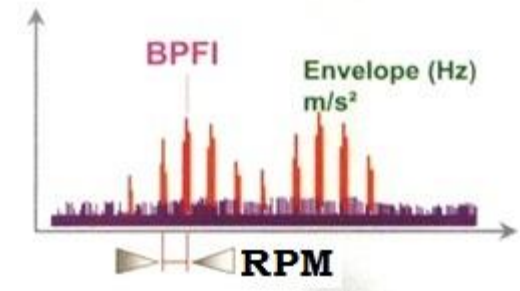
# GÖRDÜLŐCSAPÁGYAK

## Belsőgyűrű hibaáthaladási frekvencia

- Belsőgyűrű hibaáthaladási frekvencia (**B**all **P**ass **F**requency **I**nnner **R**ace [BPFI])
- Gyorsan, hetek alatt alakul ki.
- Oldalsáv (általában RPM többszöröseinél).

A BPFI körül  $1 \times \text{RPM}$  és/vagy a forgó tengely által modulált felharmonikus oldalsávok lesznek (vagy BPFO, ha a belső gyűrű rögzítve van).

- A BPFI megjelenik, ha a belső pályahibán a gördülőelem áthalad.
- A belső pályahiba a forgással modulálódik, ez nagyszámú oldalsávot eredményez.



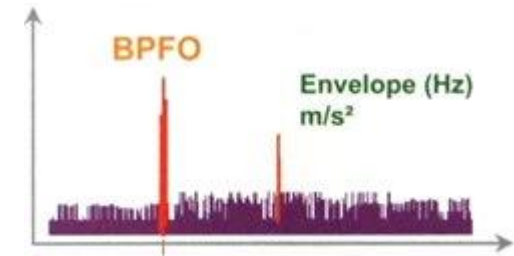
Belsőgyűrű hiba áthaladási gyakoriság [frekvencia] (BPFI)



# GÖRDÜLŐCSAPÁGYAK

## Gördülőelem hibaáthaladási frekvencia

- Gördülőelem forgási frekvencia (**B**all **S**pin **F**requency [BSF])
- Azonnali intézkedést igényel.
- Felharmonikusok köztes-harmonikusokkal kombinálva



A BSF gyakran lesz a kosár frekvenciával (FTF) oldalsávhatárolt.

Golyó (gördülő elem) forgási frekvencia (BSF)

- A BSF akkor jelenik meg, amikor a gördülő elem(ek) felszínén érzékelhető hiba található.
- A golyós-vagy görgőscsapágy hiba frekvencia a BSF jellemezhető (BSF általában két pályához viszonyítva), a hozzá tartozó felharmonikusokkal, amelyeknek amplitúdója összefügg a meghibásodások számával.



# GÖRDÜLŐCSAPÁGYAK

## Belsőgyűrű hibaáthaladási frekvencia

- A kosár hiba frekvencia (Vonzolási <kosár körülfutási> Alap Frekvencia [Fundamental Train Frequency – FTF]) 0,35 és 0,46 x RPM között található.
- A kosár hibát gyakran más hibák kísérik, mint pl. a golyó hiba oldalsávként jelenik meg.
- A hibák gyorsan tömkréteszik a kosarat, minélfogva a hiba gyakran csak a késői szakaszában észlelhető.
- Ez általában nem sok (nagy) energiát tartalmaz, ezért jó (nagy) kijelző felbontásra van szükség.



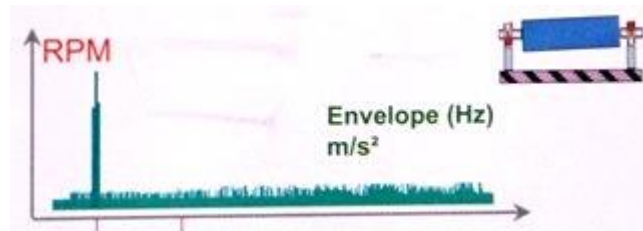
Kosár hiba



# GÖRDÜLŐCSAPÁGYAK

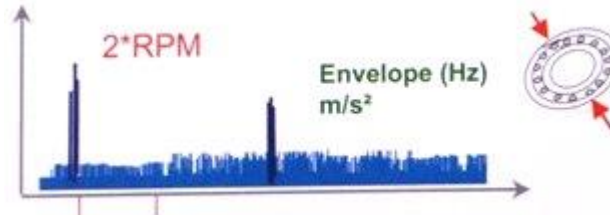
## Egyéb hibák megjelenése az envelop spektrumban

Forgórész egytengelyűtlenség  
Forgórész kiegyensúlyozatlanság



Egytengelyűtlenség és/vagy Kiegyensúlyozatlanság

Csapágó radiális feszültsége.



Csapágó sugárirányú rugalmassága

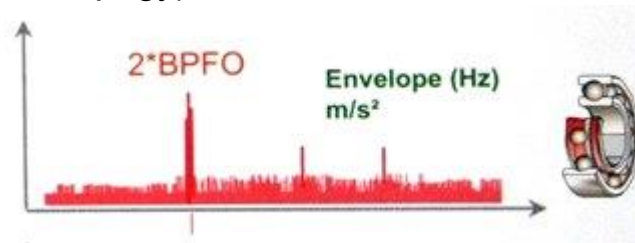
- A nagyfrekvenciás demodulált háttérzaj envelop elemzéssel.
- Egy klasszikus spektrumban másként jelenik meg: például egy egytengelyűtlenség, amit az FFT spektrumban harmonikus sorozat mutat meg az envelopban csak az alapvető haladási sebességet (RPM) mutatja.
- Az envelop elemzés során a csapágó egyéb kapcsolódó hibái, mint pl. a kenetlenség véletlenszerű ütései is kiderülhetnek.



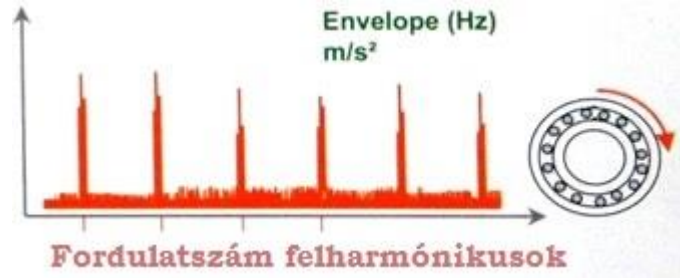
# GÖRDÜLŐCSAPÁGYAK

## Egyéb hibák megjelenése az envelop spektrumban

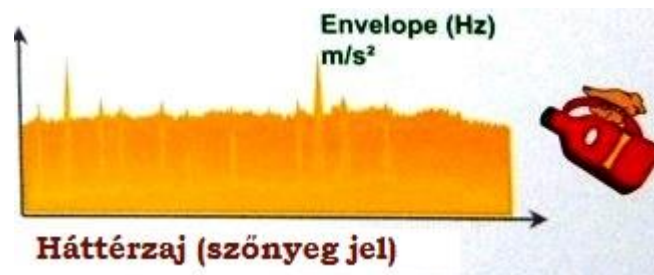
Ferde külsőgyűrű (ferdén fölhúzott csapágy)



CsapCsapágy elmozdulása (megcsúszása) a házbanagy radiális feszültsége.



Csapágy sugárirányú rugalmassága

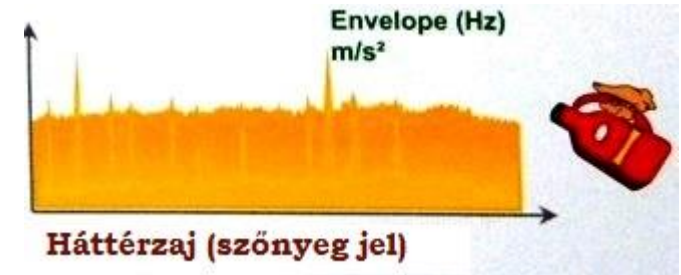
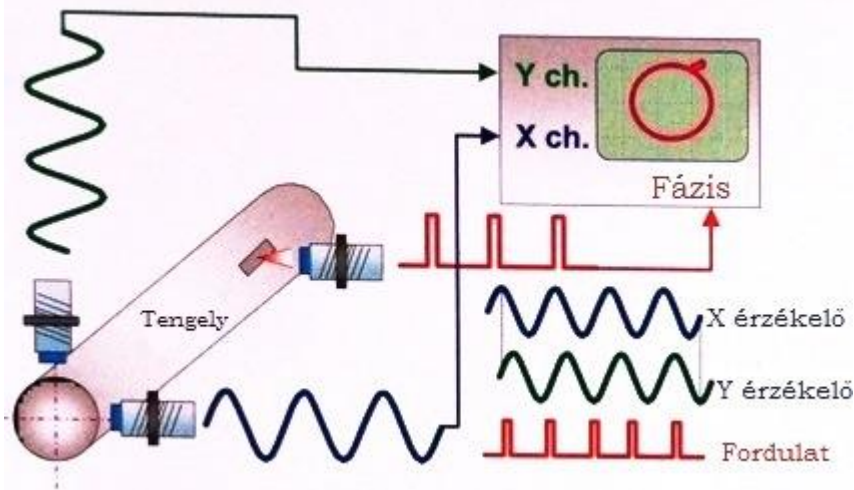






# SIKLÓCSAPÁGYAK

Turbo gépeknél mind a tengelyrezgésre, mind a tengelyirányú helyzetre állandó felügyeletet írnak elő. Gőzturbináknál a forgórész tengelyirányú túlnyúlása miatt, ezeken túlmenőekre is szükség lehet. A tengely pálya kimutatása és elemzése, a forgórész viselkedéséről, értékes adatokat szolgáltat.



## Tengelymozgás mérése

- A merőleges elmozdulás érzékelő pár egy periodikus hullámforma jelet hoz létre.
- A harmadik érzékelő fordulatonként indító (csúcs) fázis referencia jelet hoz létre.
- Ezek a jelenségek, amit egyébként nehéz felismerni, egy indítási és leállítási műveletet követhetnek.
- Az olajfilm a tengelyt támasztja alá, de instabillá válhat bizonyos körülmények között, pl. a terhelés és a viszkozitás dinamikus viselkedésekor. Ebben az esetben a forgattyús tengely körüli "örvények" vibrálni fognak, és külpontosságot okoznak.
- Az örvény előzetes jel nélkül jelenik meg, és ez nagyon romboló.



# SIKLÓCSAPÁGYAK

## Repedt tengely

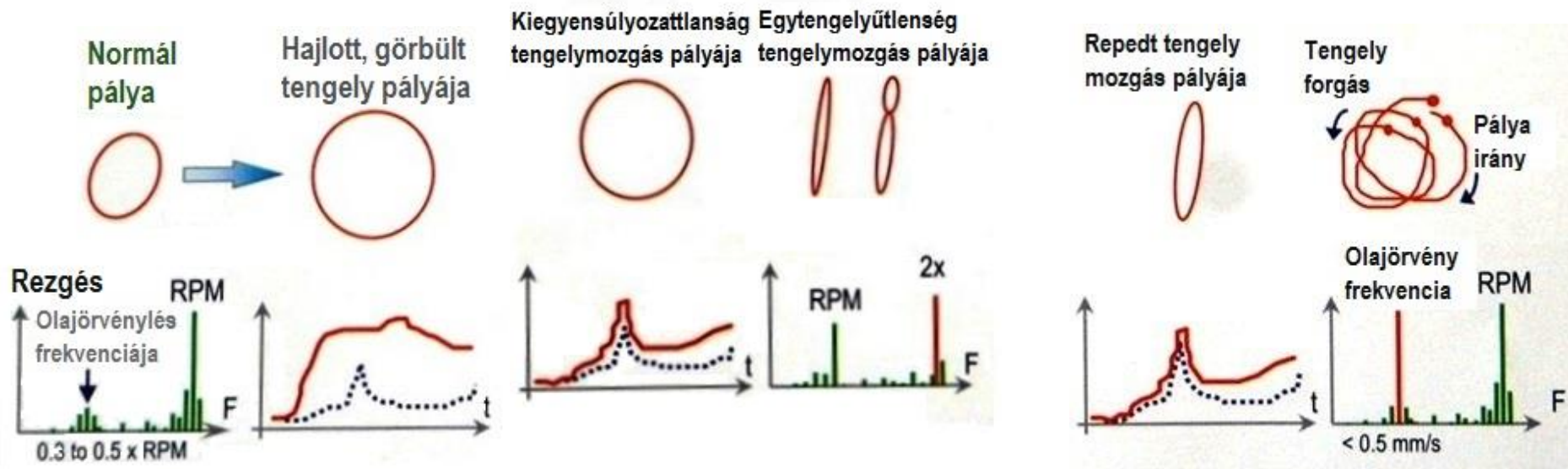
Ellenőrzéssel a tengelyek repedései kimutathatóak:

- A működési sebesség (RPM), az üzemi sebessége 1. és a 2. felharmonikusának amplitúdóján és fázisán.
- A rezonancián áthaladó amplitúdó és fázis értékkel.



Sugárirányú repedés

## Pálya nyomvonal, a tengelymozgás alakja



Olaj örvény és görbület Kiegyensúlyozatlanság és Egytengelyűtlenség

Repedés és Olajörvény

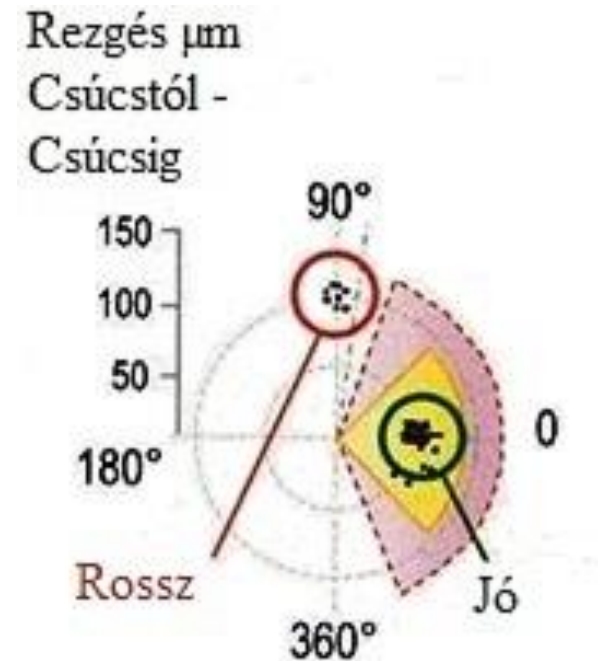


# SIKLÓCSAPÁGYAK

## Repedt lapátózás észlelése:

A működési sebesség (forgás) rezgés amplitúdójának és fázisának figyelésével a turbinalapátok repedései is kimutathatók:

- A nagy sebességgel forgó lapátózás repedése megszakítja a belső feszültségek szimmetrikus eloszlását, és ez a változás a fázis és amplitúdó értékében egy mérhető változást okoz.



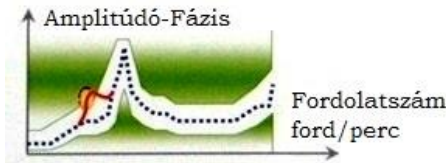
Repedt lapátózás észlelése



# SIKLÓCSAPÁGYAK

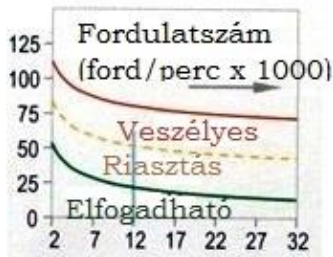
Tengely és siklócsapágy hibáinak észlelése:

Felfutás és kifutás (10 felharmonikusok tartomány) alatt a rezgés-vektor, amplitúdó és/vagy fázis "profil" nyomon követésekor ez figyelhető meg.

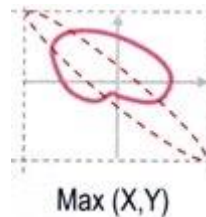


Felfutás és kifutás "profilja"

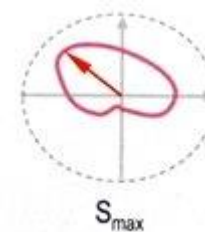
A tengely pályájának egyéb szabványosított jellemző határértékei mérhetők, mint például az  $S_{max}$ , vagy a maximális X-Y érték.



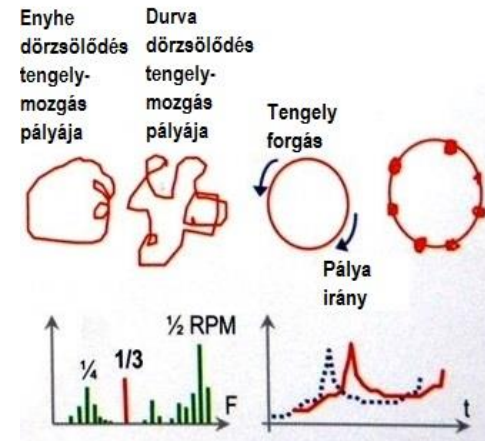
$S_{max}$  ( $\mu\text{m}$ ) mért értékei turbinákon



A rezgésvektor "profilja"



Pálya nyomvonal, a tengelymozgás alakja



Forgórész dörzsölődés

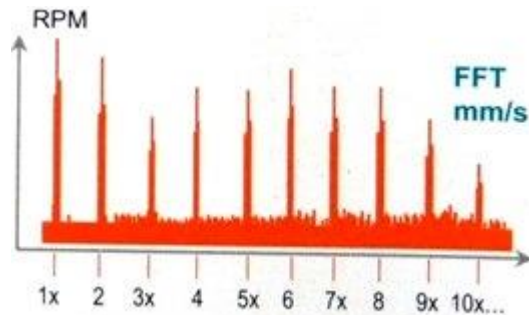


# SIKLÓCSAPÁGYAK

Kopás, lazaság

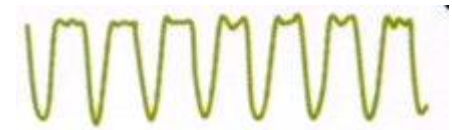
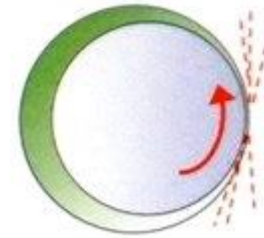


- Fordulatszám felharmónikus sorozatot hoz létre, többnyire radiális, al-és inter harmonikust.

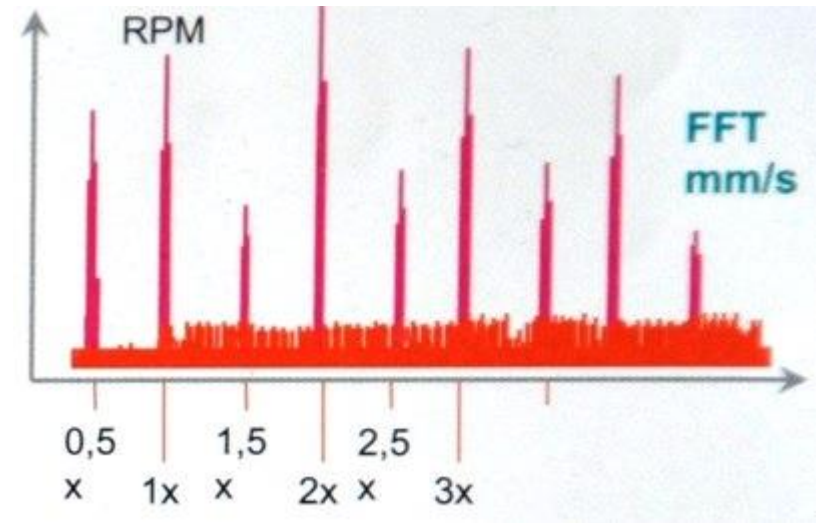


Kopás, lazaság

Dörzsölődés



Levágott (csonkolt) hullámforma



Dörzsölődés

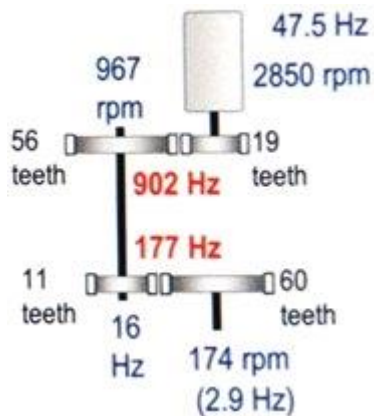
- A jelenség a lazaságra hasonlít.
- 1/2, 1/3 stb. szubharmónikus.
- Erős harmonikus jelsorozat (csonkolt jel).

# ERŐÁTVITELI RENDSZEREK (HAJTÓMŰVEK) ÉS FOGASKEREKEK

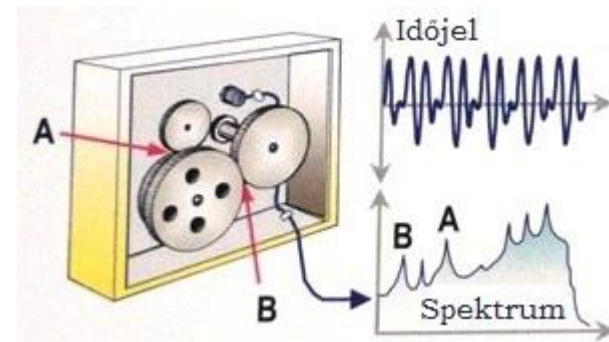
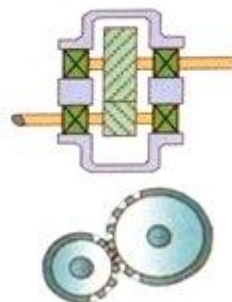


## Fogaskerek

- Minden pár fogaskerék fogkapcsolódási frekvenciája  $F_{TM}$  (Tooth Mesh Frequency), a következő:  
a fogaskerék fogszáma x tengely frekvencia (Hz = fordulat másodpercenként).



Számítási példa egy összekapcsolódó fogaskerékpár fogkapcsolódási frekvenciájára:



Fogkapcsolódás időjele és spektruma

- Motor;
- 1. áttétel:  
rpm.
- 2. áttétel:

$$2850 \text{ rpm} / 60 = 47,5 \text{ Hz}$$

$$Z = 19/56 = 0,34. 0,34 \times 2850 = 967$$

$$47,5 \times 0,34 = 16,1 \text{ Hz}$$

$$F_{TM1} = 19 \times 47,5 = 56 \times 16,1 = 902,5 \text{ Hz}$$

$$Z = 11/60 = 0,18. 0,18 \times 967 = 174 \text{ rpm.}$$

$$16 \times 0,18 = 2,9 \text{ Hz}$$

$$F_{TM2} = 11 \times 16,1 = 60 \times 2,9 = 177,2 \text{ Hz}$$

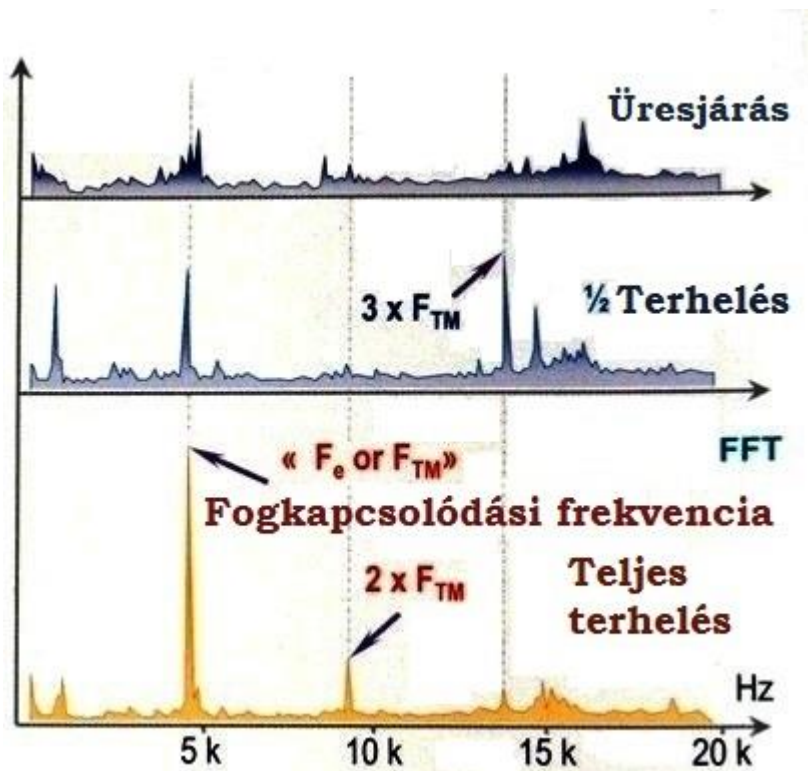


# ERŐÁTVITELI RENDSZEREK (HAJTÓMŰVEK) ÉS FOGASKEREKEK

## Fogaskerekek normális rezgése

A sebességváltó a mechanikai teljesítményt továbbítja. A rezgési spektrum összetett, a különböző forrásokból sok frekvencia és felharmonikus található.

- Terhelés alatt a fogak a változó terhelés hatására hajlító igénybevételnek vannak kitéve.
- A hajtómű kopása egyenetlen, a hibák szétoszlanak.
- Helyi hibák, pl. csorbult fogak, stb.



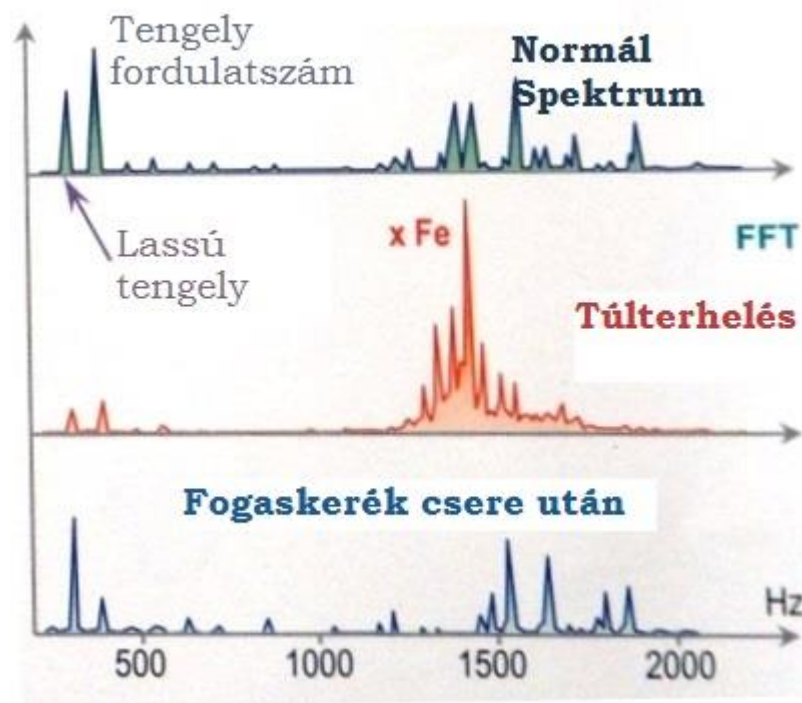
Az amplitúdó változása a terheléssel



# ERŐÁTVITELI RENDSZEREK (HAJTÓMŰVEK) ÉS FOGASKEREKEK

## Fogaskerek normális rezgése

- Az  $F_{TM}$  kapcsolat frekvencia jelenléte (szintén ismert, mint  $F_e$  a fogkapcsolódási frekvencia) normális és a hajtómű kialakításának köszönhető. Az alacsony  $F_{TM}$  oldalsávok gyakoriak a fogak egymáshoz kapcsolódásának eredményeként.
- Azonos terhelés összehasonlító mérése: az amplitúdó a fogaskerek és a terhelési körülmények állapotától függ.
- A frekvencia vagy amplitúdó moduláció felerősíti a hibát, és ezt felfedi az oldalsáv pár (azonos távolságra) a vivőfrekvencia és  $F_{TM}$  felharmonikusainak mindkét oldalán.
- Az oldalsávok alakja a hibától függ, alapértelmezés szerint a fogaskerék-tengely frekvencia modulációja.
- A frekvenciatartomány elemzése szükséges, beleértve  $F_e$  többszöröseit is, a frekvencia családok megfigyelésére.
- Egy komplex spektrumban a kepsztrumot az ismétlődő frekvencia családok szintjének megmutására használják.



Fogkapcsolódási frekvencia

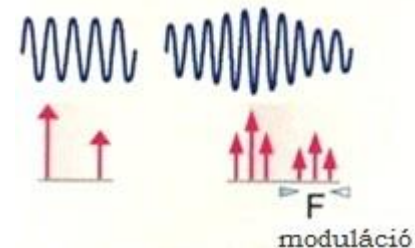




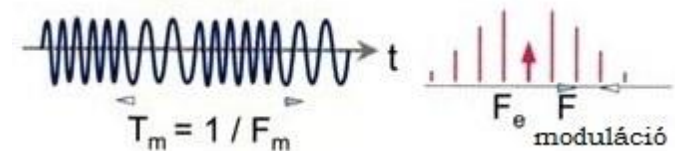
# ERŐÁTVITELI RENDSZEREK (HAJTÓMŰVEK) ÉS FOGASKEREKEK

## Terhelés és egytengelyűtlenség

- Az  $F_{TM}$  2. és 3. felharmonikus növekvő mértékű megfigyelésével a kopást lehet diagnosztizálni (az 1. harmonikus nem reagál olyan gyorsan, mint a 2. és 3. amit a gyengébb fogak hatása szabályoz).
- A sérülés mértékének értékelésére a nagy amplitúdójú jel, mint pl. az  $F_{TM}$  elengedhetetlen.
- Hiba kiterjedése: excentrikus kerék, nyomaték ingadozás, erőszint, kifutás, egytengelyűtlen fogaskerék, amelyek az  $F_e$  felharmonikusaihoz szorosan elhelyezkedő erős oldalsávot eredményez.
- A terhelés gyakran megelőzi az egytengelyűtlenséget.
- Az alap  $F_e$ -t a kopott fogaskerék is erősíti.
- Rosszul beállított fogaskerekek az  $F_e$  felharmonikusait felerősítik az 1 vagy 2 x rpm oldalsáv kíséretében.



Amplitúdó moduláció



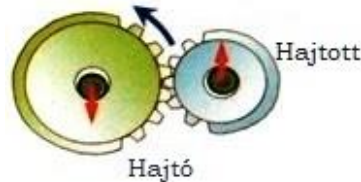
Frekvencia moduláció és az oldalsáv határolás



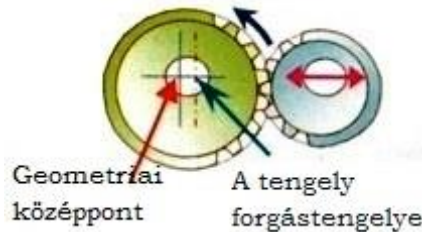
# ERŐÁTVITELI RENDSZEREK (HAJTÓMŰVEK) ÉS FOGASKEREKEK

## Helyi hibák

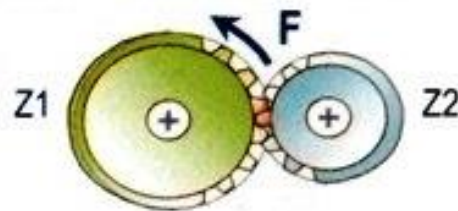
- Egy fog helyi hibát okoz minden alkalommal ismételt rövid impulzust adva. Ez az egész  $F_{TM}$  felharmonikusoknál alacsony és szétterülő oldalsávokat eredményezve.
- A törött fog az 1 x RPM-et felerősíti és ez félreértelmezhető, mert olyan, mint a kiegyensúlyozatlanság.
- A fogprofil lepattogzást az  $F_{TM}$  2. és a 3. felharmonikus frekvenciái jelzik. A pontos frekvenciát nem lehet előre megmondani. A hatása nyilvánvaló lehet az envelopban vagy kepstrumban.



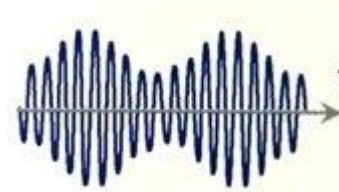
A forgatónyomaték hatása



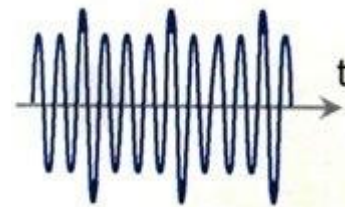
Excentricitás ütő hatása



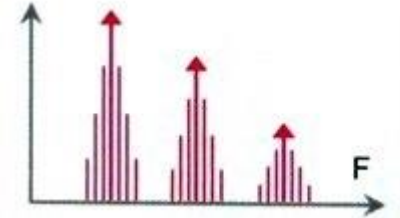
Találkozási frekvencia



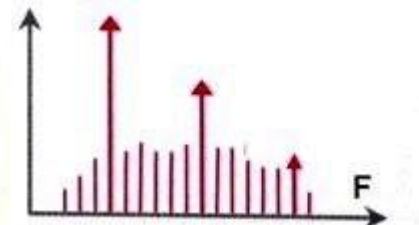
Kiterjedt hiba



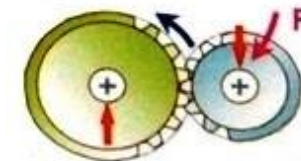
Helyi hiba



Az oldalsávok — elkülönültek/magasan



Az oldalsávok - szétterjedtek/alacsony



Tengelymozgás pályája

Erő szintek

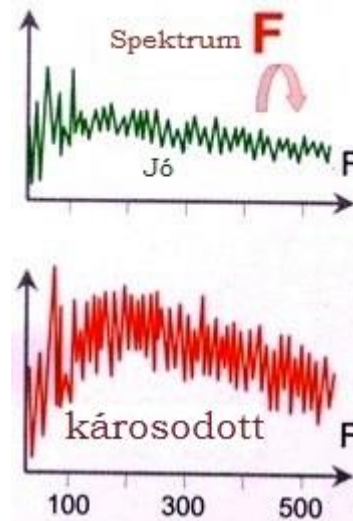
- Egybeesés frekvenciája =  $F_e / (\text{LCM } Z1, Z2)$



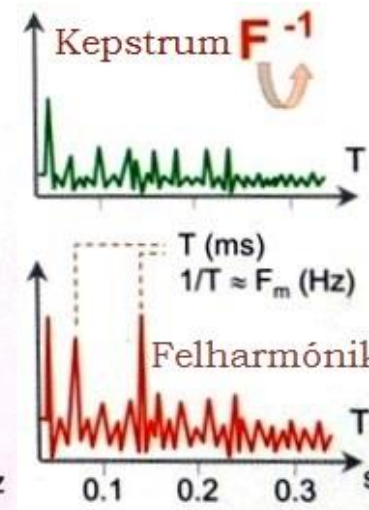
# ERŐÁTVITELI RENDSZEREK (HAJTÓMŰVEK) ÉS FOCÁSKÉPEZÉS

## Kepstrum

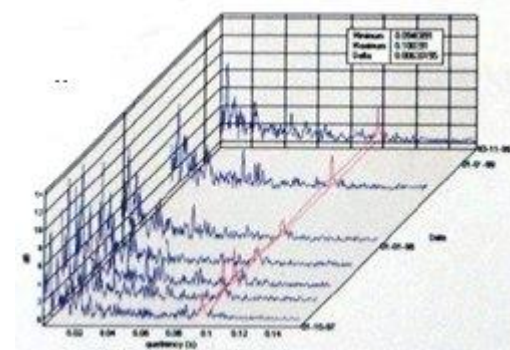
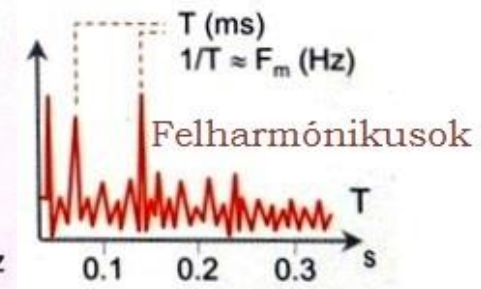
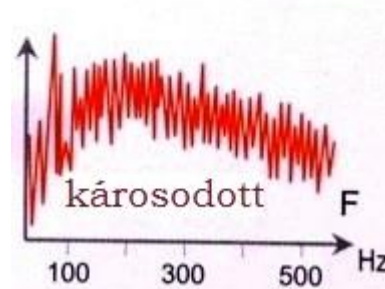
- Amikor több frekvencia család van jelen ugyanabban az időben, nehéz meghatározni a mintából, a hibához melyik járult a leginkább hozzá. A moduláció eredetének az azonosítását, gyakran a Kepstrum jeleníti: ez a spektrum spektruma. (Megjegyzés: Mivel itt is spektrumelemzésről van szó, és hogy a kettőt meg lehessen különböztetni, a használatos szakkifejezések első szótagjának betűsorrendjének megcserélésével új szakkifejezéseket hoztak létre, ami utal az eredetre. Így a következő szakszó párok jöttek létre [magyaros átírásban]: **spektrum** – **kepstrum**, **frekvencia** – **kvefrenca**, **amplitúdó** – **maplitúdó**, **fázis** – **záfis**, **harmónikus** – **rahmónikus**)
- A vízszintes tengelyen a kvefrenca (T s-ban), a szintje az egyes „felharmónikusok” számától és amplitúdó függ (relatív teljesítmény) a sorok ugyanannak a családnak a spektrum.
- A kvefrenca amelynek mértékét (dB beosztással) növekszik, az a jellemző, a tengely, ahol a hiba található ( $F_m = 1/T$ ), a származás tartalmazza a modulációt és oldalsávot.



Frekvencia



Kvefrenca



Kepstrum vízszintes diagram

# KÖSZÖNÖM A FIGYELMET!

**SZÉCHENYI**  2020



MAGYARORSZÁG  
KORMÁNYA

Európai Unió  
Európai Szociális  
Alap



**BEFEKTETÉS A JÖVŐBE**