



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”

REZGÉSDIAGNOSZTIKA ALAPJAI

Forgács Endre
Szuchy Péter

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

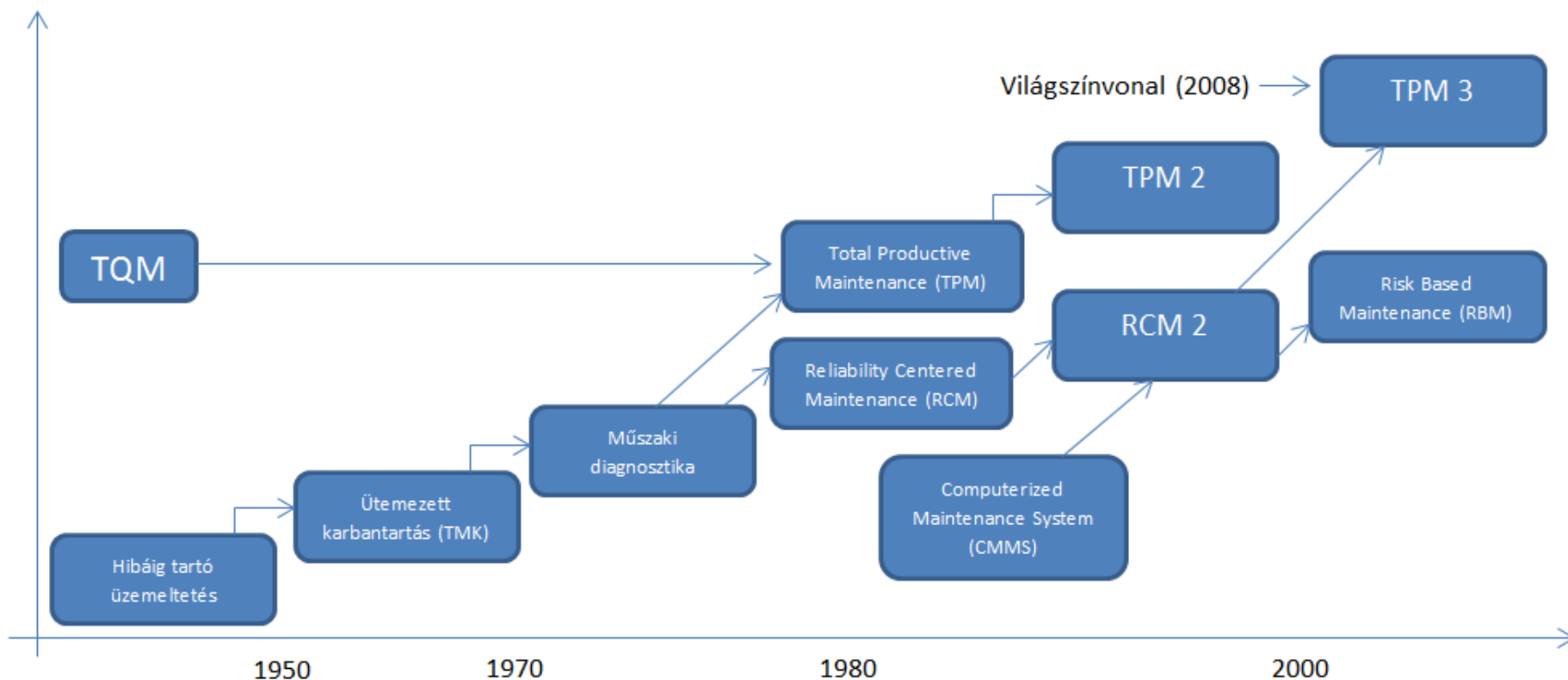
Európai Unió
Európai Szociális
Alap



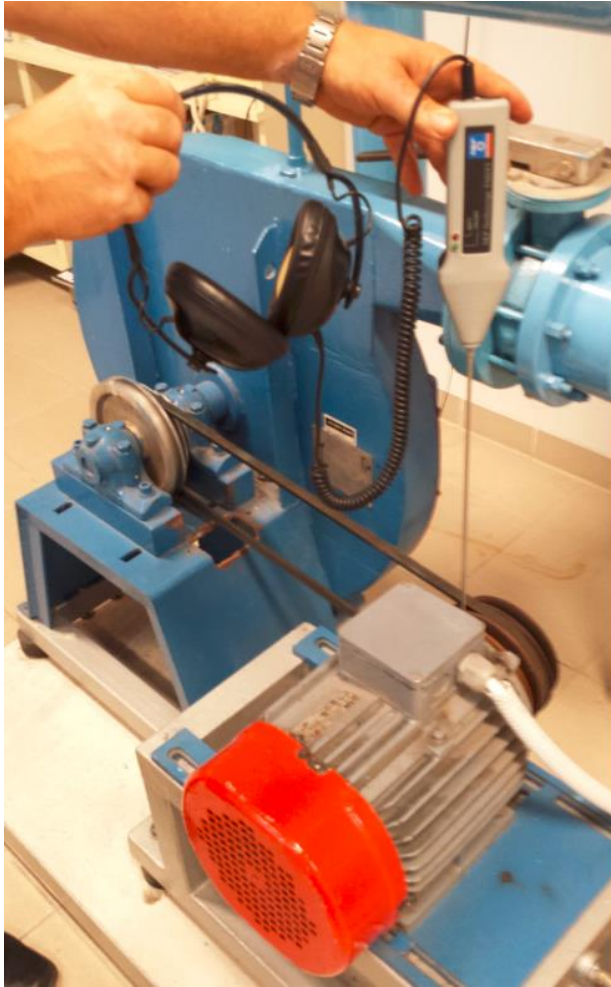
BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

BEVEZETÉS – KARBANTARTÁS FEJLŐDÉSE

A gépek üzemeltetése és karbantartása óriási fejlődésen ment keresztül az elmúlt pár évtized alatt. Az 50-es évek elején még a hibáig tartó üzemeltetés volt gyakorlatban, melyet a jól ismert tervszerű megelőző karbantartás (TMK) követett. Ez a technika mind a mai napig megtalálható bizonyos helyeken, viszont a technológia fejlődésével megjelent a Műszaki Diagnosztika, mely különböző elméletekkel megfűszerezve töretlen fejlődésen ment keresztül nem utolsósorban a számítástechnológia robbanásszerű változásának köszönhetően.



BEVEZETÉS - GÉPÁLLAPOT MÉRÉSE



Napjainkban az az elv terjedt el, hogy mielőtt szétszedném a gépet, mérek. Mivel egy gép leállása idő- és így pénzveszteséggel jár, elemi érdekünk, hogy leállítás nélkül szerezzünk információkat a gép belsejéből.

Még a legegyszerűbb géphez is találunk olyan állapotjellemzőket, melyek mérésével következtetni tudunk a gépben lezajló folyamatokra. A kiválasztandó jellemzők lehetnek:

- hőmérséklet
- rezgés (zaj)
- nyomásjellemzők
- olajösszetevők, stb.

A gépállapot mérése párhuzamosan fejlődik a számítástechnikával. Ez mind az érzékelőkre, mind az adatfeldolgozásra igaz. Manapság már teljes érzékelő és feldolgozórendszerek egy kézben elférnek, megfizethetők. Ennek következtében terjednek a folyamatos állapotfigyelő rendszerek (offline – online rendszerek), melyekkel gyorsan juthatunk precíz információkhoz.

BEVEZETÉS - MŰSZAKI DIAGNOSZTIKA

A Műszaki Diagnosztika manapság már számos műszaki eljárást magában foglal, melyek közül a legfontosabbak a következők:

- Akusztikai vizsgálatok
- Endoszkópia
- Olajvizsgálat
- Rezgésdiagnosztika
- Repedésvizsgálat
- Roncsolásmentes anyagvizsgálatok
- Szivárgás detektálás
- Termográfia



GÉPEK ÜZEMELTETÉSE 1.

A gépek állapotának időbeli lefutását általában „kádgörbékkel” írjuk le. A gépek beüzemelését követően, a bejáratási időszakban a későbbi normális üzemmenetnél mért értékeknél magasabb állapotjelek tapasztalhatók, melyek viszonylag rövid futásidőt követően lecsökkennek az alkatrészek összekopásának köszönhetően. Az állapotjelekből következtethetünk a hiba bekövetkezésének valószínűségére.

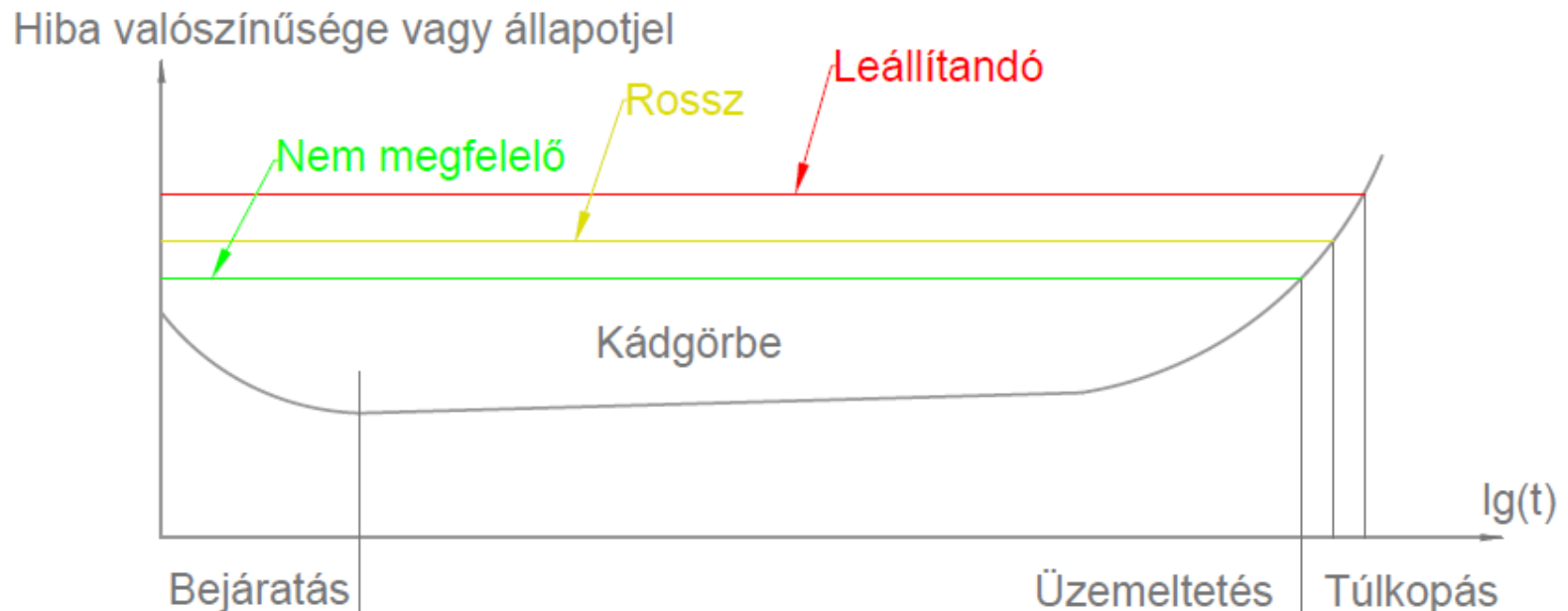
Hosszabb használat során a normális üzemmenetet jelző állapotjelek a fizikai elhasználódásnak köszönhetően fokozatosan felerősödnek. Ennek oka, hogy az egymással kölcsönhatásban lévő felületek közötti illesztések megnőnek, idővel túréren kívül kerülnek, megközelítik a tönkremeneteli állapotot.

Hiba valószínűsége vagy állapotjel



GÉPEK ÜZEMELTETÉSE 2.

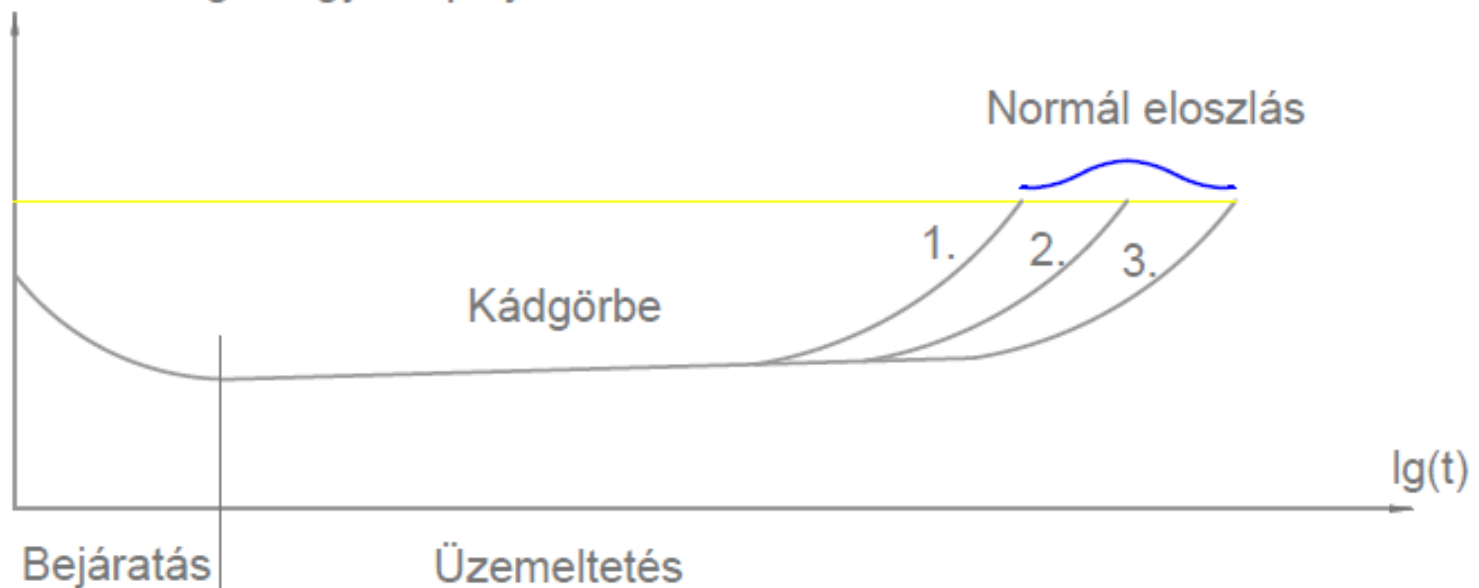
Az üzemeltetés során kétségtelenül elrjünk egyszer azt a jelszintet, ahol a gép már nem mőködik megfelelıen. Ez a mőködési probléma az elvart teljesítményben fog jelentkezni (pl. egy robbanómotor esetében magasabb fogyasztás, alacsonyabb teljesítmény és megnövekedett károsanyag-kibocsátás). Amennyiben tovább mőködtetjük, túlkopás jelensége következik be. Ennek is különbözı fokozati vannak, egy ideig még lehet rossz üzemi állapot mellett is mőködtetni a gépet, viszont elıbb-utóbb be fog következni az az állapot, amikor már nem üzemeltethetı tovább a szerkezet. A leállítást számos feltétel megkövetelheti, ezek lehetnek akár jogszabályi elıírások (munkabiztonsági, tőz-, környezetvédelmi), akár saját elvárásaink.



GÉPEK ÜZEMELTETÉSE 3.

Az alkatrész vagy egység élettartamának is van tűrése. Amikor az élettartamot a mérnök meghatározza, akkor természetesen csak egy átlagos értéket fog megjelölni. Azt, hogy az adott alkatrész ténylegesen mikor válik használhatatlanná, számos tényező befolyásolja, kezdve a gyártási pontatlanságoktól az üzemeltetés feltételein keresztül az alkatrészek egymásra hatásáig. Azonos állapotjel értékekhez eltérő futásértékek tartoznak. Az állapotjelből nem tudunk következtetni az adott alkatrész-típus átlagos élettartamára. Nagy mennyiségű alkatrész életciklus adataiból viszont kirajzolható a normál eloszlással leírható várható élettartam.

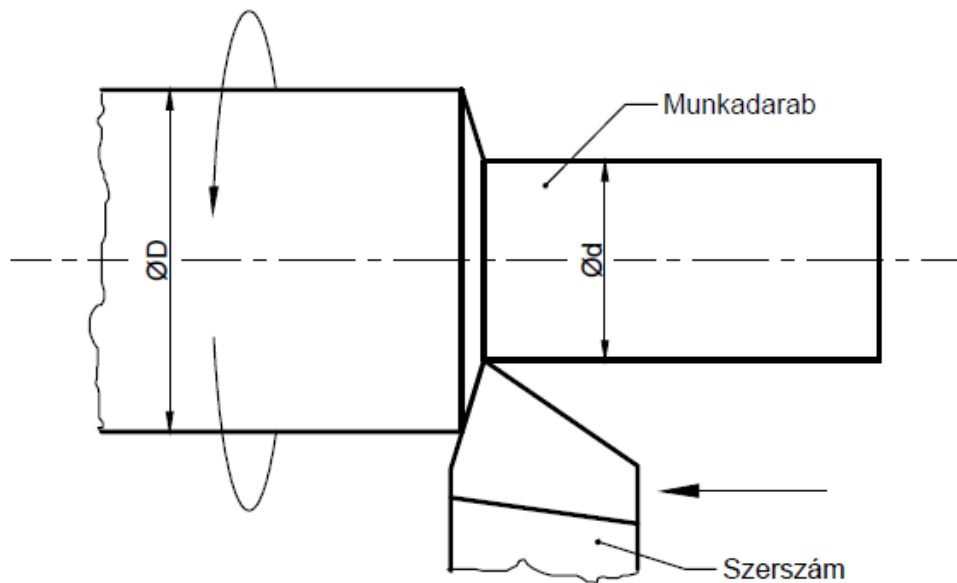
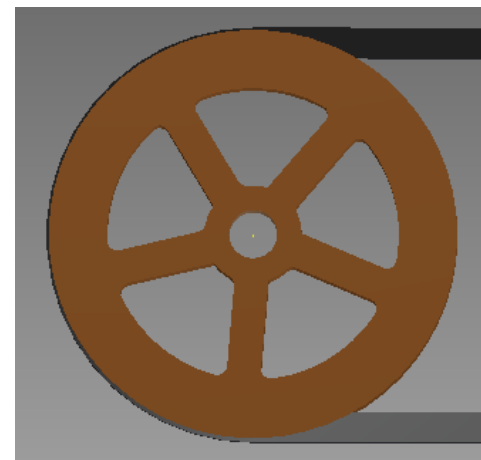
Hiba valószínűsége vagy állapotjel



A FORGÓ MOZGÁS VIZSGÁLATA

A természetben ritka jelenségnek számít a forgó mozgás, mely annyira elterjedt a gépek körében, inkább a lengő mozgás dominál.

A mesterséges környezetben a forgó mozgást viszont kísérő jelenségek veszik körül, melyek mind az elméleti méretektől és az ideális környezeti feltételektől való eltéréseknek az eredményei. Ezek a pontatlanságok létrejönnek a gyártás, szerelés során, de okozhatja anyag-összetételi vagy -eloszlási hiba, stb. is. A tűrések meghatározzák az a megengedhető mértékű pontatlanságot.

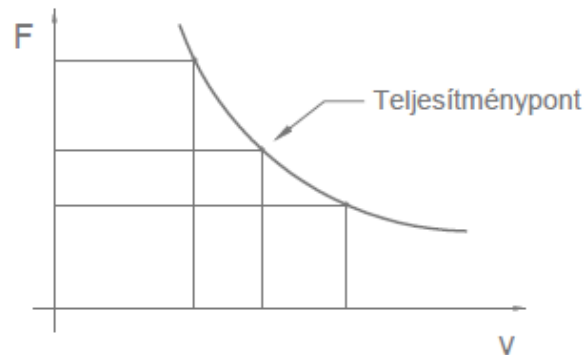


Például egy esztergált forgás-szimmetrikus test esetében biztosan számíthatunk excentricitásra a kerület mentén.

A rögzítéseknél egy adott irányra vetítve szinuszosan változó erők jelennek meg, amelyek matematikai leírása és kezelése igen kedvező számunkra.

A REZGÉSVIZSGÁLAT ALAPJA

A gépek üzemeltetése és fenntartása során tehát természetes módon jelent meg az az igény, hogy a gép állapotáról minél többet megismerve igyekezzünk megjósolni használatának időbeli korlátait. Már régóta ismert, hogy a gépen tapasztalható rezgések ismereteket rejtenek a gép állapotára vonatkozóan. Ehhez régen a sokat tapasztalt karbantartónak, mint az adott gép „házi orvosának” elég volt megérinteni és meghallgatni a „beteget”, hogy behatárolja a „betegséget”. A gép részegységeinek egymásra hatása rezgéseket gerjeszt, melyek észlelhetők, rendszerezhetők, felismerhetők. Felgyorsult világunkban egyszerűen nincs idő arra, hogy gép és ember között ilyen mély kapcsolat alakuljon ki, viszont a technika fejlődése lehetővé teszi, hogy többszöri gyors méréssel információhoz jussunk a gép belsejében zajló folyamatokról.



F – v ábra

Mi is az a GÉP? Egy olyan „mechanikai energia” átalakító és továbbító eszköz, amelynek kimeneti oldalán erő, sebesség, teljesítmény jelenik meg. A szerszámmal ellentétben bonyolult szerkezet, több mozgó **alkatrész** jellemzi és ezek kölcsönhatása teszi lehetővé a rezgésdiagnosztikai eszközök alkalmazását.

REZGÉSTANI ALAPFOGALMAK

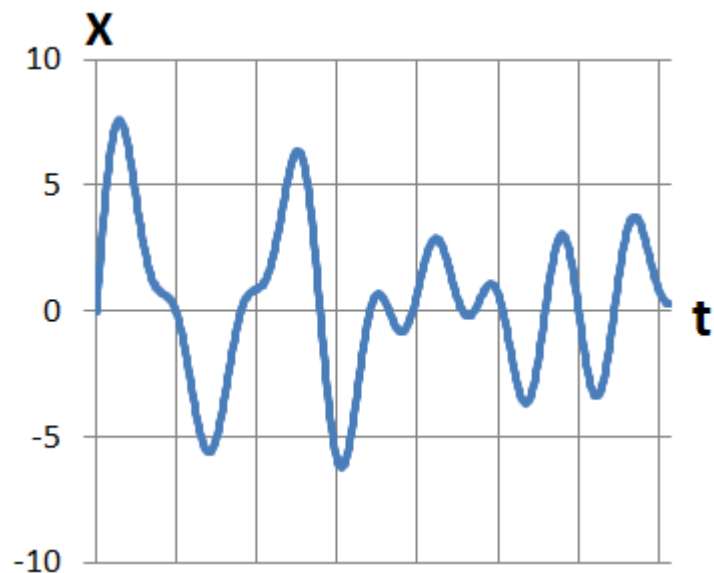
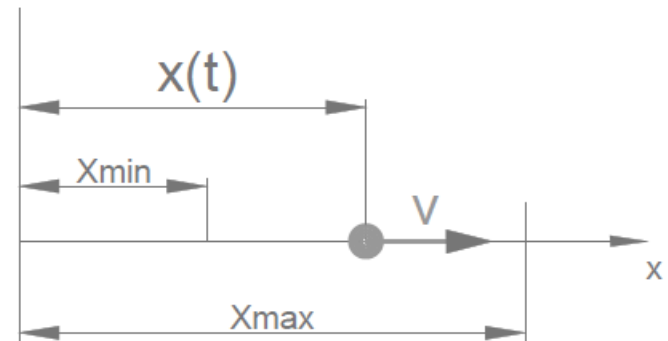
Nézzünk egy m tömegű anyagi pontot, mely az x tengely mentén egyenes vonalú mozgást végez. A mozgást az $x(t)$ helyzet-idő, $v(t)$ sebesség-idő, $a(t)$ gyorsulás-idő függvények írják le. A mozgás általános összefüggései:

$$x = x(t),$$

$$v = \frac{dx}{dt} = \dot{x},$$

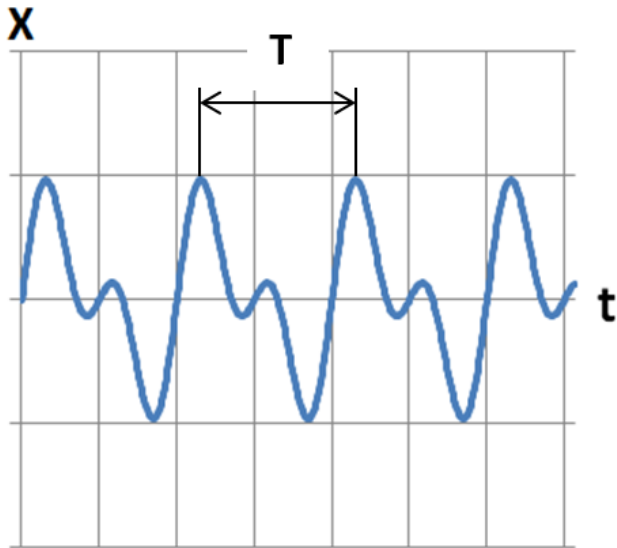
$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = \ddot{x}$$

Ez a mozgás akkor tekinthető rezgésnek, ha az x tengely menti mozgást leíró $x=x(t)$ függvény korlátos, és a $v(t)$ függvény a kinematikai vizsgálat kezdetétől számítva legalább kétszer előjelet vált. Egyszerűbben fogalmazva: rezgőmozgás alatt valamilyen egyensúlyi helyzetből kiinduló, szabályos vagy szabálytalan ütemű, egymást követően ellentétes értelmű kitéréseket végző mozgást értünk. [2]



REZGÉSTANI ALAPFOGALMAK

PERIODIKUS REZGÉS



Az x tengely mentén periodikus mozgást végző anyagi pont helyzet-idő függvénye.

Ha ω a rezgés körfrekvenciája, φ a kezdeti fázisszög, akkor:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad f = \frac{\omega}{2\pi}, \quad \omega = 2\pi \cdot f$$

A gépészeti gyakorlatban a legtöbb rezgés periodikus, azaz az $x(t)$ függvényben azonos szakaszok ismétlődnek. A vizsgált tartományban létezik emiatt egy állandó T érték, amelyre a t bármely értékénél

$$x(t + T) = x(t)$$

T a periodikus rezgőmozgás periódusideje. [s]

A periódusidő reciprok értéke a frekvencia:

$$f = \frac{1}{T} \quad [\text{Hertz, Hz}]$$

A periodikus rezgőmozgás középhelyzete:

$$x_0 = \frac{1}{2}(x_{max} + x_{min})$$

Az x_0 -tól mért legnagyobb kitérés az amplitúdó:

$$A = \frac{1}{2}(x_{max} - x_{min})$$

A periodikus rezgőmozgások közül a szinusz/koszinusz függvényekkel leírhatók (harmonikus rezgőmozgások) számunkra a legfontosabbak, matematikailag könnyen kezelhetők. [2]

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

$$v(t) = \dot{x}(t) = -A\omega \cdot \sin(\omega t + \varphi) = A\omega \cdot \cos(\omega t + \varphi + \pi/2)$$

$$a(t) = \ddot{x}(t) = -A\omega^2 \cdot \cos(\omega t + \varphi) = A\omega^2 \cdot \cos(\omega t + \varphi + \pi)$$

REZGÉSTANI ALAPFOGALMAK

HARMONIKUS REZGŐMOZGÁSOK ÖSSZEADÁSA

A rezgések legtöbbször összetett rezgésként érzékelhetőek, amely több harmonikus rezgés eredőjeként jön létre. Nézzünk két azonos irányú rezgést, eltérő amplitúdóval és körfrekvenciával, φ fázisszög különbséggel [2]:

$$x_1(t) = A_1 \cos(\omega_1 t)$$

$$x_2(t) = A_2 \cos(\omega_2 t + \varphi)$$

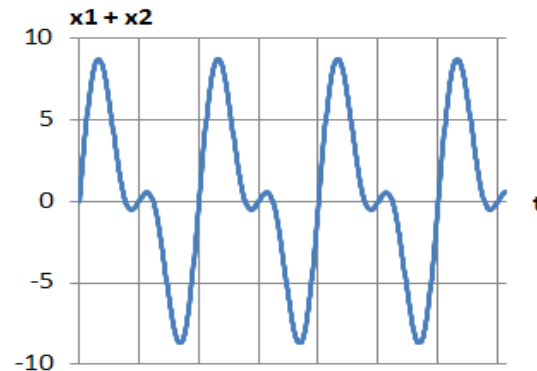
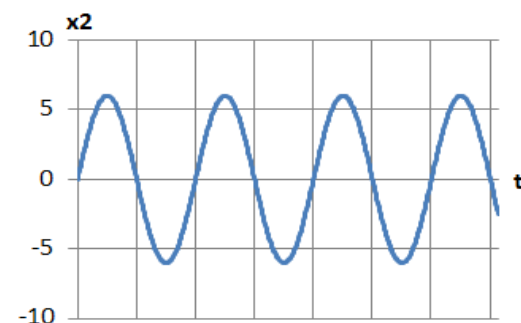
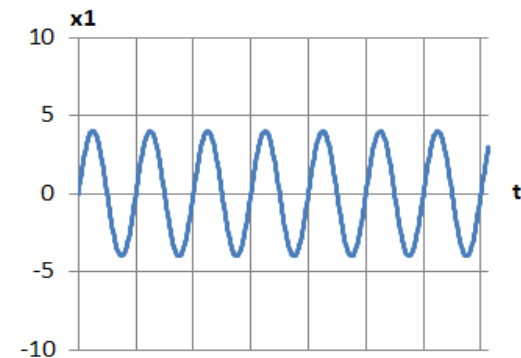
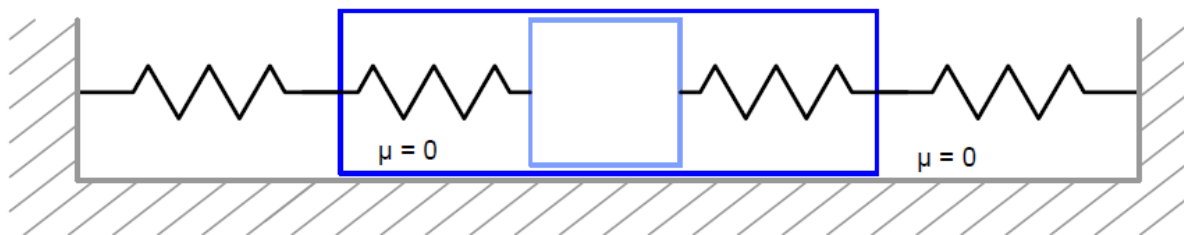
Ekkor: $\sum x(t) = A_1 \cos(\omega_1 t) + A_2 \cos(\omega_2 t + \varphi)$

$$A(t) = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos((\omega_2 - \omega_1)t + \varphi)}$$

Valamint a fázis-eltolódási szög:

$$\Psi(t) = \arctg \frac{A_2 \sin((\omega_2 - \omega_1)t + \varphi)}{A_1 + A_2 \cos((\omega_2 - \omega_1)t + \varphi)}$$

Példa azonos irányú rezgések összeadására:



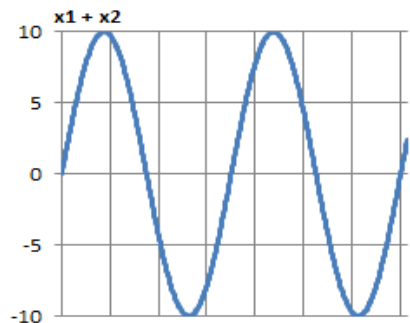
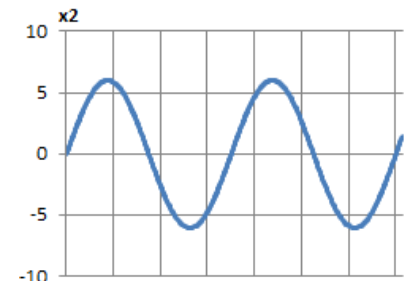
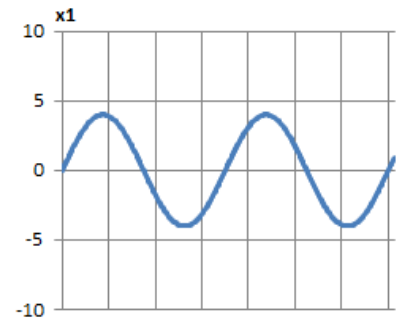
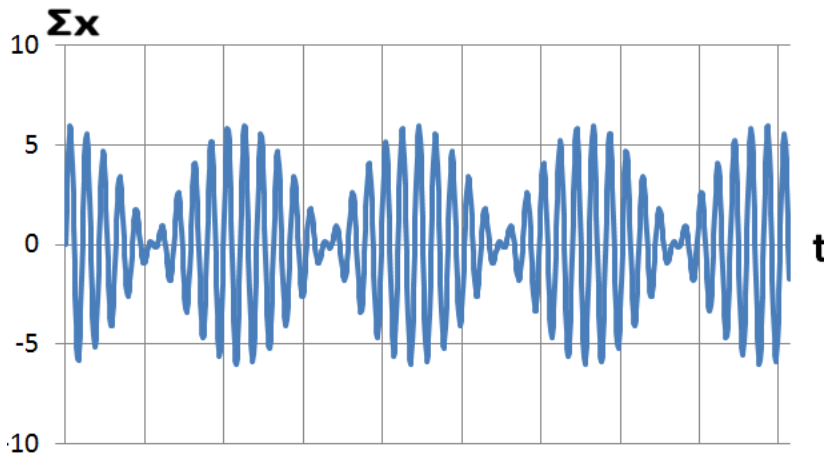
REZGÉSTANI ALAPFOGALMAK

HARMONIKUS REZGŐMOZGÁSOK ÖSSZEADÁSA

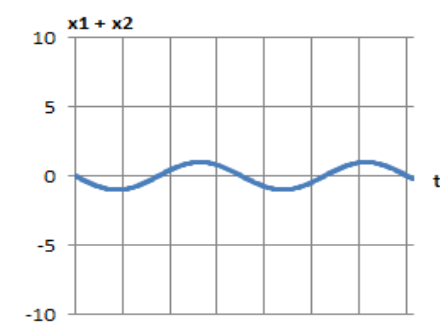
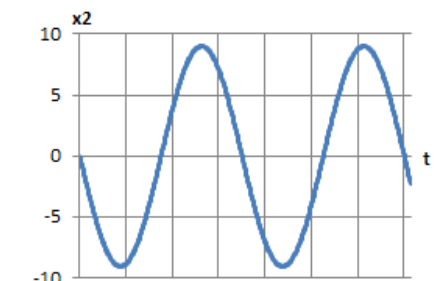
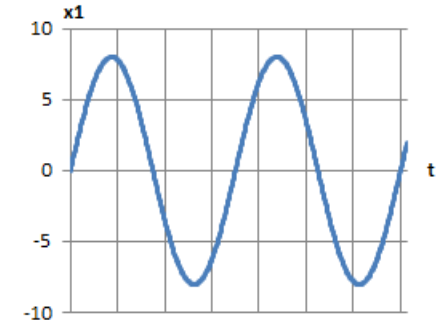
Megegyező szögsebességű harmonikus rezgések eredője:

- Erősítés: $A = A_1 + A_2$
ha $\varphi_1 = \varphi_2$
- Gyengítés: $A = A_1 - A_2$
ha $A_1 \neq A_2$, $\varphi_1 - \varphi_2 = \pi$
- Kioltás: $A = 0$
ha $A_1 = A_2$, $\varphi_1 - \varphi_2 = \pi$

Ha a rezgések körfrekvenciái között viszonylag csekély különbség van, akkor áll elő a **lebegés** jelensége. Pl. legyen $A_1 = A_2$, $\varphi_1 = \varphi_2$:



Erősítés

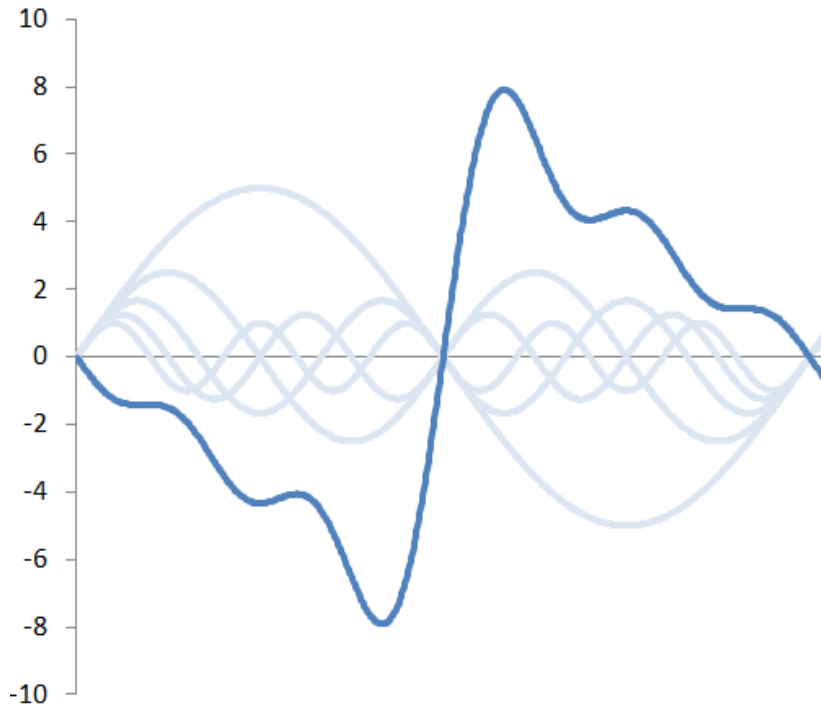


Gyengítés

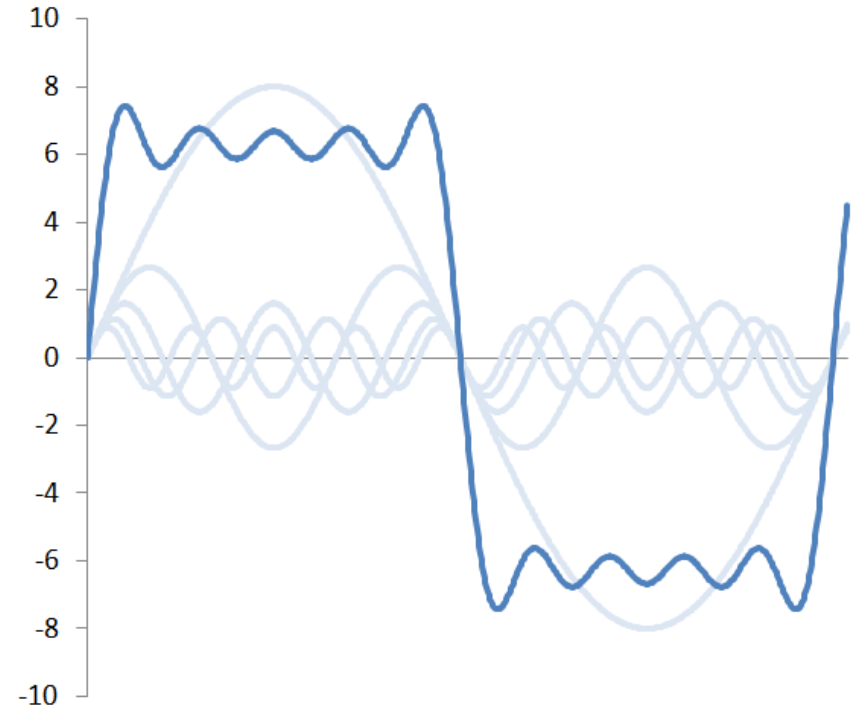
REZGÉSTANI ALAPFOGALMAK

HARMONIKUS REZGŐMOZGÁSOK ÖSSZEADÁSA

Mivel Fourier óta tudjuk, hogy minden 2π szerint periodikus függvény előállítható trigonometrikus sorok összetevőjeként, így minden periodikus rezgés megközelíthető harmonikus (szinuszos) összetevőkből. A fűrészfogjel és négyszögjel közelítő függvényei:



$$x(t) = -\frac{8A}{\pi^2} \left(\cos \omega t + \frac{1}{3^2} \cos 3\omega t + \frac{1}{5^2} \cos 5\omega t + \dots \right)$$



$$x(t) = \frac{4A}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right)$$

REZGÉSTANI ALAPOK – EGYSZABADSÁGFOKÚ REZGÉSEK

Egy lengőrendszer akkor egyszabadságfokú, ha az anyagi pont rezgése egy mozgásegyenlettel (másodrendű differenciál-egyenlettel) leírható. A legegyszerűbb modell egy m tömegű testből és egy s rugómerevségű rugóból áll. Ha a testre csak a rugóerő hat a kitérését követően, a rendszert magára hagyva egy állandó frekvenciájú, saját rezgéseket végző mozgást kapunk.

A dinamika alaptörvénye szerint:

$$m\ddot{x} + sx = 0$$

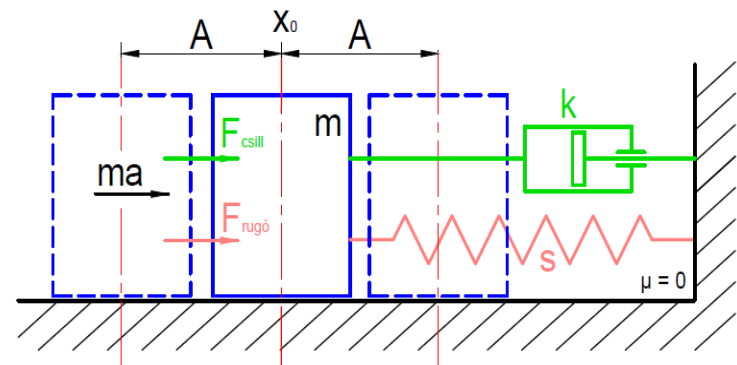
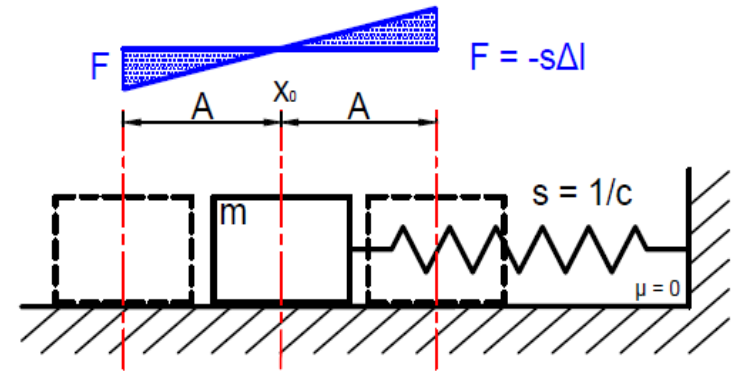
A rezgés saját körfrekvenciája: $\omega = \sqrt{\frac{s}{m}}$

Amennyiben a rugó mellett a környezet ellenállásával (pl. légellenállás, súrlódás) is számolnunk kell, úgy **csillapított** lengő rendszerről beszélünk. Legyen a csillapítás a test sebességével arányos, értelme azzal ellentétes: $F_{csill} = -kv$, ahol k a csillapítási tényező [Ns/m]. Így a nedves csillapítású szabad rezgés differenciál-egyenlete:

$$\ddot{x} + \frac{k}{m}\dot{x} + \omega^2 x = 0$$

$$x(t) = Ae^{-\beta t} \sin \delta t$$

Ahol $\beta = k/2m$ a csillapítási állandó, $\delta = \sqrt{\omega^2 - \beta^2}$ a csillapított szabad rezgés tényleges körfrekvenciája. [2]



REZGÉSTANI ALAPOK – GERJESZTETT REZGÉSEK

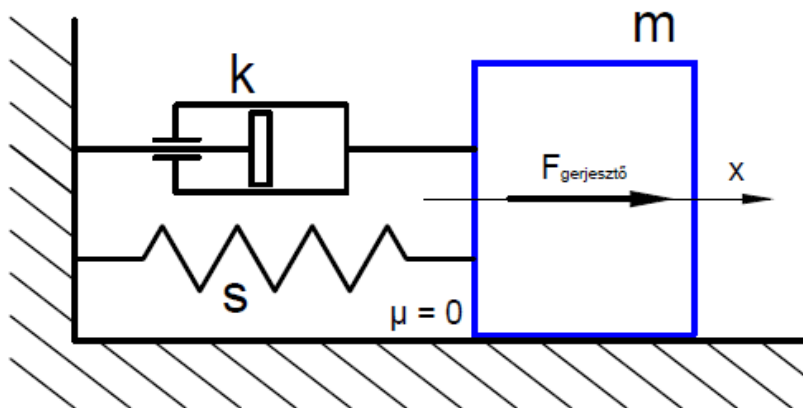
Ha a testen, vagy a rugón, vagy akár a csillapításon külső, aktív erők hatnak, kényszerített, vagy gerjesztett rezgésről beszélünk. Legyen a gerjesztés egy ciklikus $F(t) = F_0 \sin \omega_g t$ erő. Ekkor a rezgőrendszer mozgásegyenlete:

$$m\ddot{x} + k\dot{x} + sx = F_{gerjesztő} = F_0 \sin \omega_g t$$

A differenciál-egyenlet megoldása két részből áll:

$$x = x_1 + x_2 = Ae^{-\beta t} \sin \delta t + x_2$$

Ahol x_1 a homogén differenciál-egyenlet általános, x_2 pedig az inhomogén differenciál-egyenlet partikuláris megoldása. Ez a mozgás leírása szempontjából azt jelenti, hogy az x_1 szabad rezgésre az x_2 gerjesztett rezgés szuperponálódik. A kettő közül a gerjesztett rezgés a domináns, mivel a saját szabad rezgés idővel megszűnik. A megoldás levezetését mellőzve a következő eredményt kapjuk a **rezonancia** és a **fázis-eltolódási szög** függvényekre [2]:



$$|R| = \frac{x_0}{x_{st}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \rho^2)^2 + \rho^2 \eta^2}}$$

$$\alpha = \arctg \frac{\rho \eta}{1 - \rho^2}$$

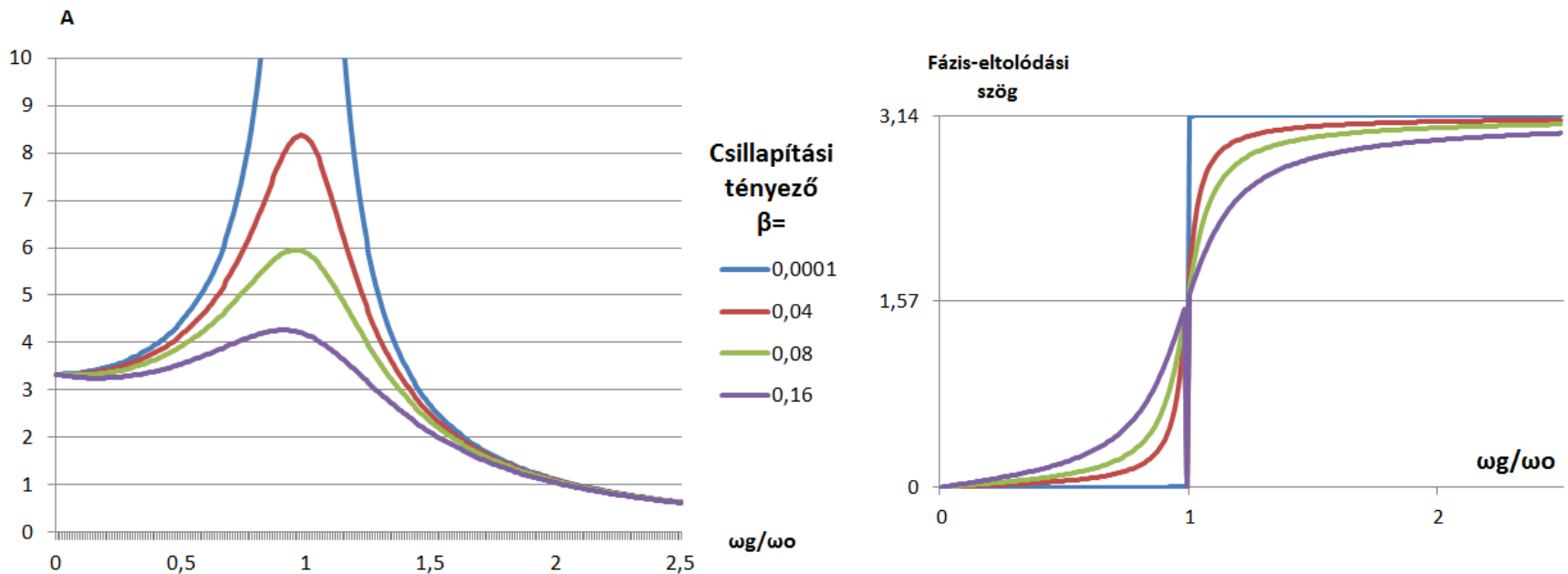
ahol x_0 a rezgés amplitúdója, x_{st} a gerjesztő erő amplitúdójának hatására létrejövő kitérés. Az egyenletbe a következő változókat vezettük be:

$$\rho = \frac{\omega_g}{\omega}, \quad \eta = \frac{k}{m\omega}$$

REZGÉSTANI ALAPOK – REZONANCIA

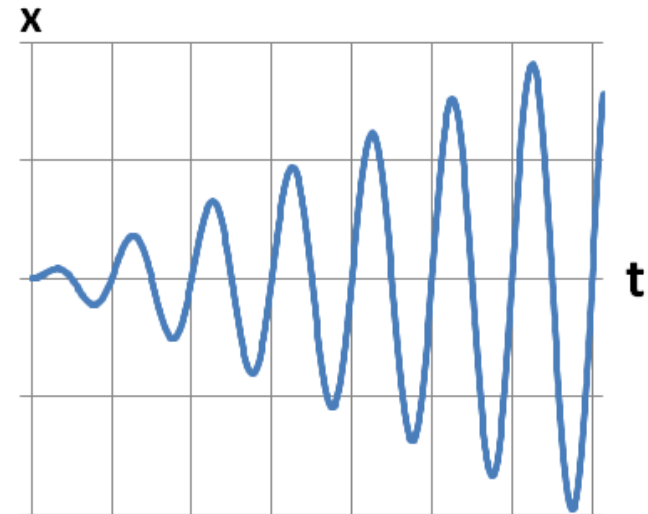
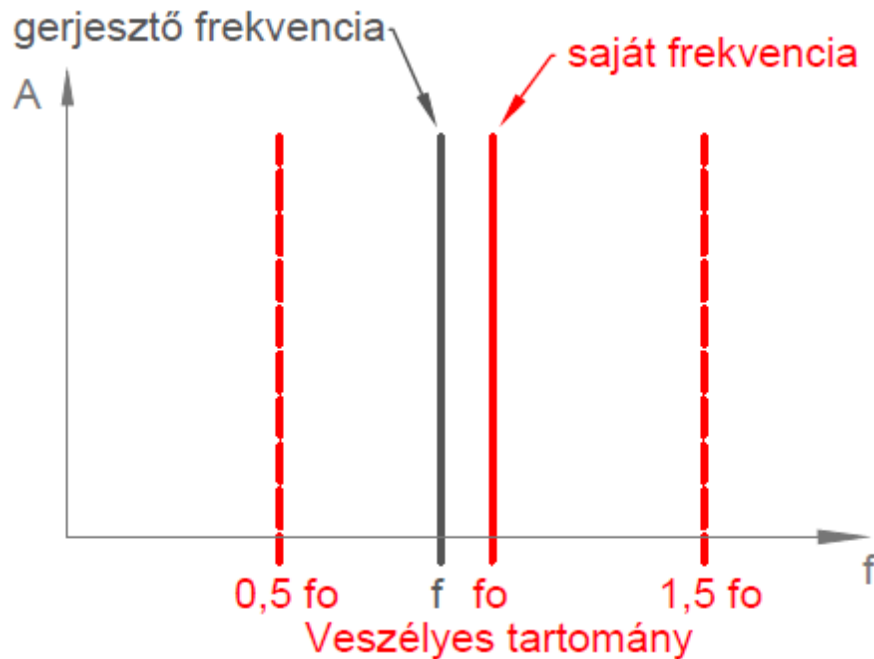
A rezonancia függvény diagramján látható, hogy a csillapítási tényező növelésével csökken a lengő tömeg legnagyobb kitérése. Ha a gerjesztés és a rezgés saját körfrekvenciája azonos, akkor a rezgő tömeg kitérései a legnagyobbak, csillapítás nélkül végtelen nagy értékeket vehetnek fel. Ez a rezonancia jelensége, amely különböző szerkezetekben túlterhelést vagy akár törést is okozhat. Amennyiben $\rho = \frac{\omega_g}{\omega} > 1$, a gerjesztés körfrekvenciájának növelésével a lengő test amplitúdója aszimptotikusan közeledik nullához.

A fázis-eltolódási szög – a csillapítás mértékével bizonyos fokig befolyásolt lefutással – az $\frac{\omega_g}{\omega}$ hányados növekedésével egyre növekszik.



REZGÉSTANI ALAPOK - REZONANCIA

A gépeket a saját frekvenciához közeli gerjesztő frekvencián üzemeltetni veszélyes. Az ábrán látható, hogy a kitérések idővel egyre nagyobb értékeket vesznek fel, amihez természetesen egyre nagyobb energiaigény is társul.



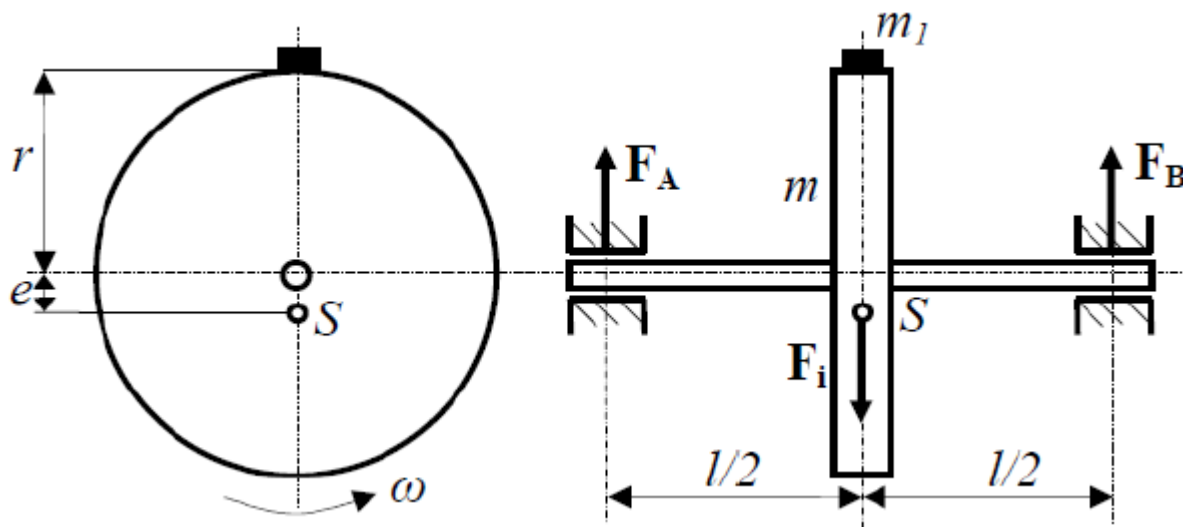
Ez viszont lehetőséget biztosít arra, hogy olyan gépeket is gond nélkül használjunk, amelyek saját frekvenciája alacsonyabb az üzemi szintű gerjesztő frekvenciánál, hiszen az indítást követően a rezonanciafrekvencián gyorsan áthaladva úgy tudjuk elérni az üzemi fordulatszámot, hogy közben a rendszernek nincs lehetősége nagy amplitúdók elérésére.

A REZGÉSEK KÁROSÍTÓ HATÁSAI ÉS AZ ELLENÜK TÖRTÉNŐ VÉDEKEZÉSEK

Ipari környezetben a rezgések legtöbbször olyan járulékos jelenségként lépnek fel, amelyek eredménye akár különféle károsodás is lehet, például:

- a gépszerkezetekben a változó vagy váltakozó igénybevételek fáradt törést is okozhatnak,
- a rezgések általában rontják az üzembiztonságot,
- Károsíthatják az emberi szervezetet [2].

Természetesen ezek mellett még számos egyéb oka lehet annak, hogy csökkentsük, vagy legjobb megoldásként kiküszöböljük a rezgéseket. A rezgések gyakran forgó mozgások statikus ill. dinamikus kiegyensúlyozatlanságából erednek.



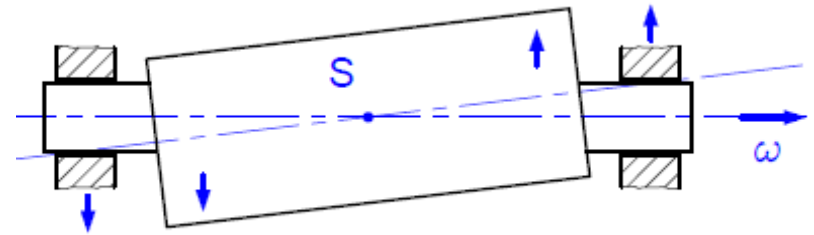
Statikus kiegyensúlyozatlanság

Az ábrán láthatóan a tárcsa súlypontja nincs a forgástengelyen, viszont a tengelyirányú tehetetlenségi főtengelye párhuzamos a forgástengellyel. A tárcsával együtt forog egy $F_i = me\omega^2$ tehetetlenségi erő. Ha a súlyponttal ellentétes oldalra egy $m_1 = em/r$ nagyságú tömeget rögzítünk, a tárcsa statikailag kiegyensúlyozottá válik. [2]

REZGÉSEK CSÖKKENTÉSE

Dinamikus kiegyensúlyozatlanság

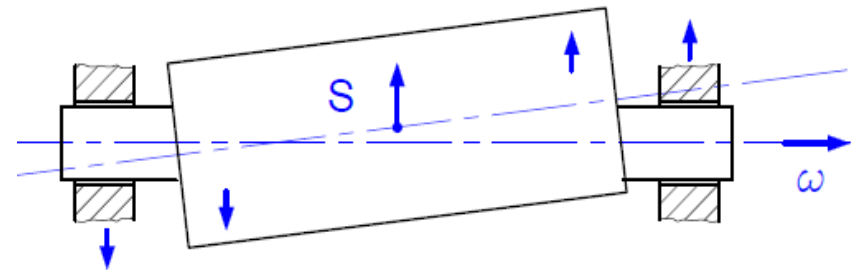
A tehetetlenségi fő tengely és a forgástengely nem párhuzamos, de a súlypontban metszik egymást. Ebben az esetben a centrifugális erők eredője egy erőpár. A dinamikus kiegyensúlyozás lényege a tehetetlenségi erők nyomatakának a kiegyenlítése, amelyet a csapágyaknál történő erőméréseket követően azonos tömegek páros felhelyezésével érnek el. A két tömeg által létrehozott erőpár nyomatéka eliminálja az eredetileg meglévő erőpár hatását. [2]



Páros (statikus és dinamikus) kiegyensúlyozatlanság

A tehetetlenségi fő tengely és a forgástengely kitérőek (nem párhuzamosak és nem metszik egymást) vagy súlyponton kívül metszik egymást. Ebben az esetben a statikai tehetetlenségi erő és a dinamikai erőpár együttes hatása érzékelhető.

A hiba kezelésekként eltérő tömegek kerülnek felhelyezésre az ellentétes oldalon.



REZGÉSEK CSÖKKENTÉSE SAJÁT FREKVENCIA VÁLTOZTATÁSA

Ha a rezgés okát nem lehet kiküszöbölni, akkor további lehetőséget biztosít a gerjesztési körfrekvencia és a saját körfrekvencia egymástól történő eltávolítása. Tegyük föl, hogy az m_1 tömegű, rugalmasan alátámasztott gépet $F_0 \sin \omega_g t$ gerjesztő erő tartja lengésben. Ekkor a lengés amplitúdója:

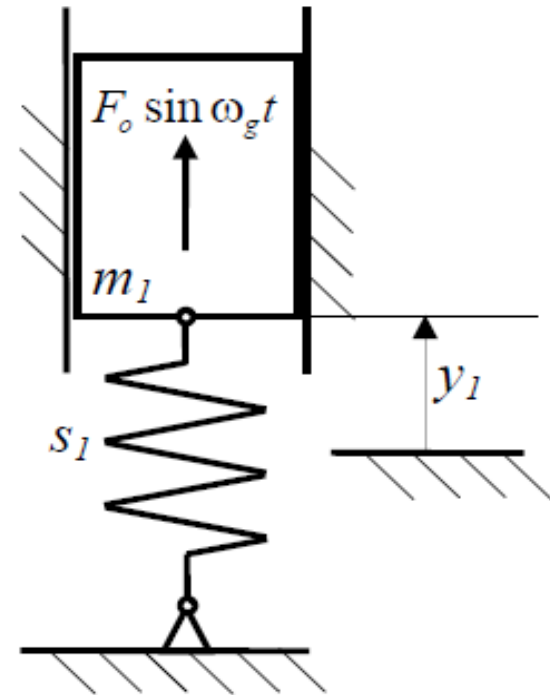
$$x_0 = \frac{F_0}{|s_1 - m_1 \omega_g^2|}$$

Amennyiben rezonancia közeli helyzet áll elő, azaz

$$\omega_g \approx \omega_1 = \sqrt{\frac{s_1}{m_1}},$$

úgy a kitérések jelentősen megnövekednek.

Amennyiben a gerjesztési frekvencia nem változtatható, megoldást jelenthet a rendszer tömegeinek és/vagy tehetetlenségi nyomatékainak módosítása, illetve a rugalmas elemek merevségének változtatása. [2]



Rugalmasan alátámasztott gép mechanikai modellje. [2]

REZGÉSEK CSÖKKENTÉSE DINAMIKUS LENGÉSCSÖKKENTÉS

Ha sem az m_1 tömeg, sem az alátámasztás s_1 rugómerevsége nem változtatható, akkor a kitérések elszabadulása ellen a dinamikus lengéscsillapítás jöhet szóba. Ez nem jelent mást, mint a mellékelt ábra szerinti elrendezésben egy m_2 tömegű test és egy s_2 rugómerevségű rugó rendszerhez csatolását.

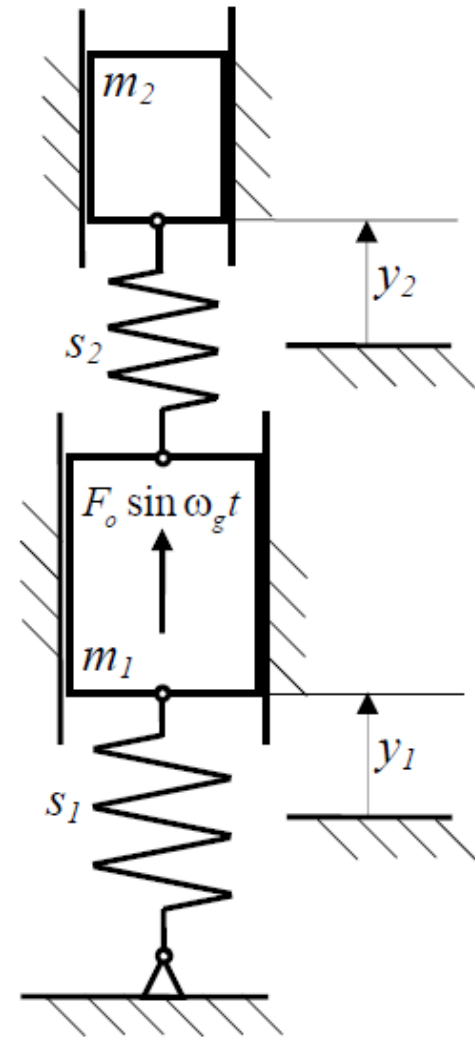
Mellőzve a rendszerre felírható másodfokú differenciálrendszer megoldásának levezetését, a következő eredményeket kell figyelembe vennünk:

A csatolt tömeg nagyságát és a rugómerevséget alakítsuk úgy, hogy

$$\omega_1 = \omega_2, \text{ vagyis } \frac{s_1}{m_1} = \frac{s_2}{m_2}$$

Ez megvalósítható kis tömeg és alacsony rugómerevség megválasztásával.

A dinamikus lengéscsökkentés sajnos gerjesztési körfrekvencia érzékeny, ennek változására vagy több gerjesztési körfrekvenciára nem feltétlenül hatásos. Bonyolíthatja a helyzetet, hogy itt már két különböző körfrekvencián állhat elő rezonancia jelensége.[2]



REZGÉSMÉRÉS - A JEL, JELFELDOLGOZÁS

Ahhoz, hogy a rezgésekkel érdemben foglalkozni tudjunk, szükség van a rezgést leíró jellemzők mérésére, azaz adott fizikai mennyiség változásával együtt változó másik fizikai mennyiség változásának érzékelésére.

Edison szénmikrofonja kiváló példa, hogyan lehet analóg rezgéseket elektromos jellé alakítani. A hanghullámok rezgése mozgatja a membránt, mely változtatja a szénpor térfogatát, ezzel az ellenállását is, s így a rajta átfolyó áram erősségét is. Másik nagyszerű találmánya a fonográf, ami a lemez barázdáinak hatására kelt rezgéseket a membránon, amit a tölcsér felerősített és hallhatóvá tesz.

A rezgéseket tehát különböző eszközökkel feldolgozható jellé alakítjuk, majd elemezzük. A rezgés korábban megismert jellemzőin túl milyen értékek érdekelnek még minket?

Átlagértékek:

$$\text{Normál átlag: } x_{\text{átlag}} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt$$

Root Mean Square (négyzetes középérték):

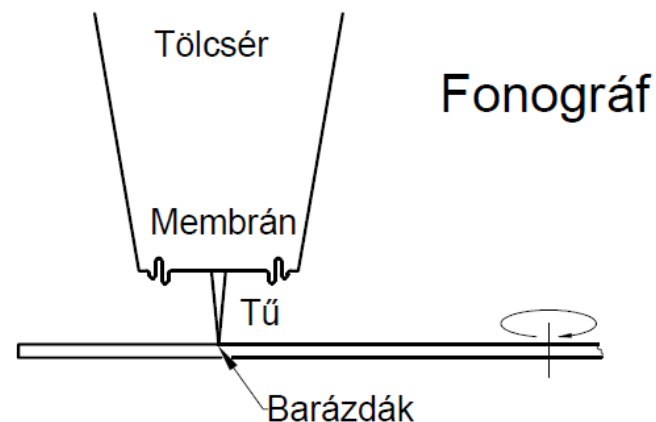
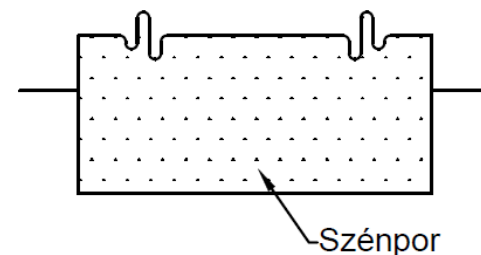
$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

Rezgés amplitúdó:

Pozitív – negatív amplitúdó

Peak-to-peak (csúcstól csúcsig) A_{PTP}

Szénmikrofon



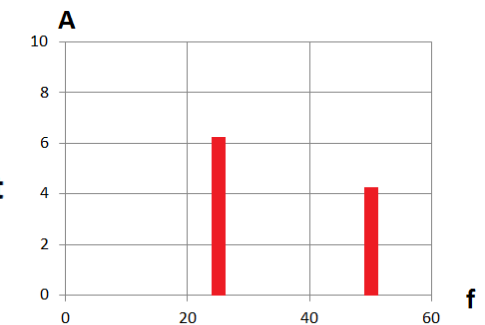
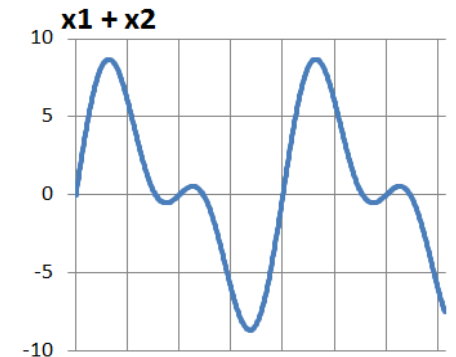
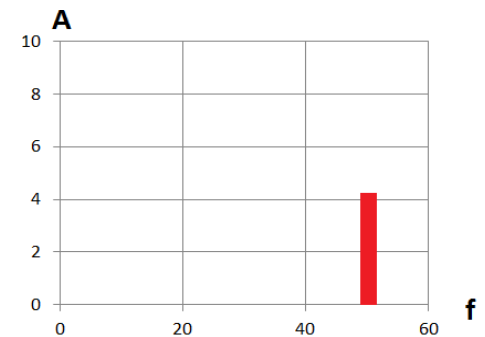
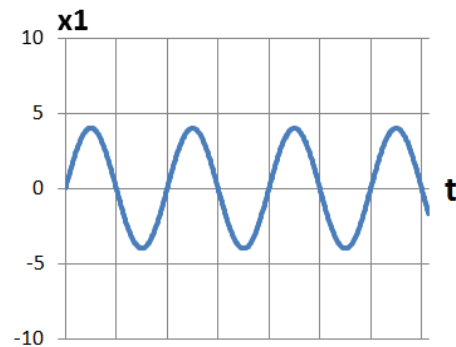
JELFELDOLGOZÁS- FOURIER ANALIZÁTOR

Ahogy azt a rezgés elméleténél ismertté vált, minden periodikus rezgés megközelíthető elemi harmonikus rezgésekkel. Ezt a műveletet a rezgésdiagnosztikában leggyakrabban a Fourier analízátor (Fast Fourier Transformation (FFT) spectrum analyzer) végzi. Bemeneti jelként érkezik a vizsgált gépről egy összetett rezgés idő-amplitúdó $[A(t)]$ formában, melyet az analízátor összetevőikre bont, s a kimeneti oldalon frekvencia-amplitúdó $[A(f)]$ formában jelenít meg.

A Fourier analízátor csak meghatározott, véges számú összetevőt keres meg. A spektrum analízálásához különböző szűrőket használ, melyek szélességét a célnak megfelelően kell kiválasztani.

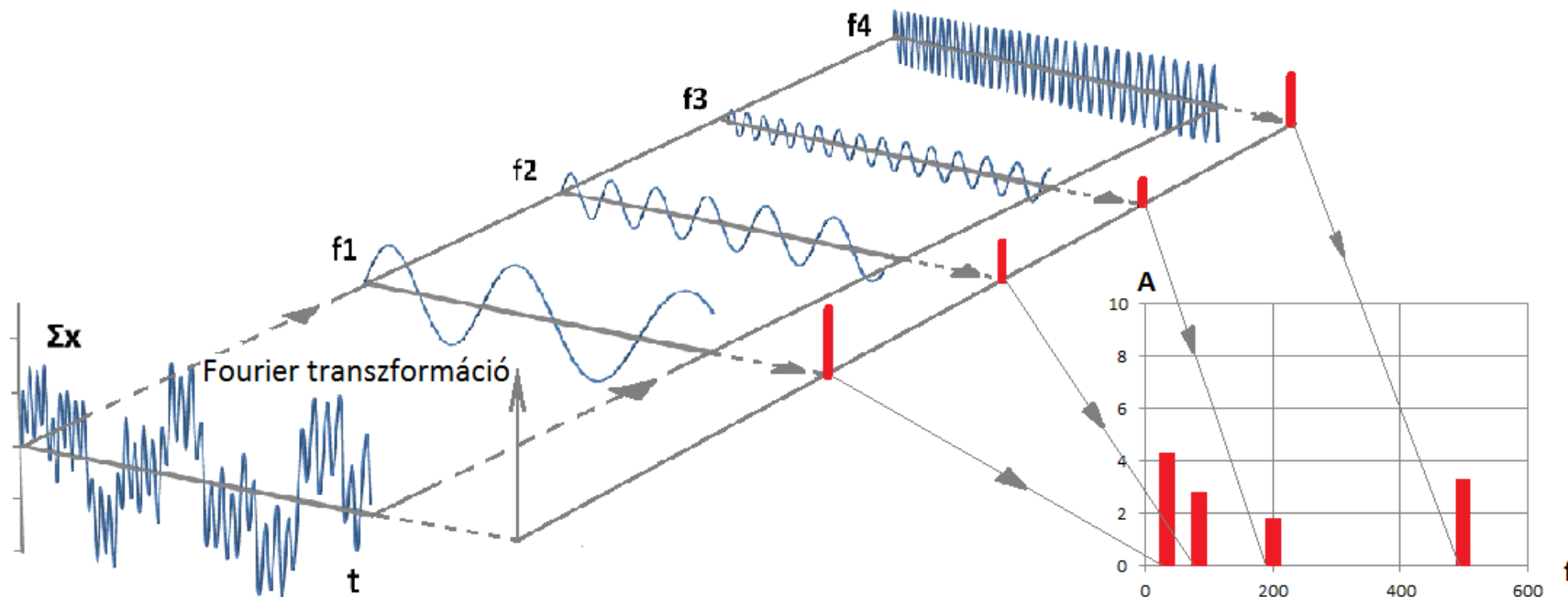
Legnagyobb előnye, hogy gyors, valós idejű spektrum elemzést végez, ami lehetővé teszi transziensek, rövid életű, akár nem ismétlődő rezgések felfedését is.

Hátránya az analóg-digitális átalakító frekvencia-tartományának adott sáv szélességéből adódó információ csökkenés. Egy adott sávon belül egy nagyobb jel árnyékában elveszhetnek esetleg jelentőséggel bíró gyengébb jelek.



FOURIER ANALIZÁTOR 2.

A Fourier analízátor tehát nem tesz mást, mint a sok összetevőjű rezgést elemi rezgésekre bontja, majd megjeleníti a frekvencia spektrumot a vonatkozó amplitúdókkal. Ezzel a rezgésről egy pillanattfelvétel készül, az időbeli lefutásról nem ad információt, viszont lehetőség van a jelek rögzítésére és későbbi elemzésére.

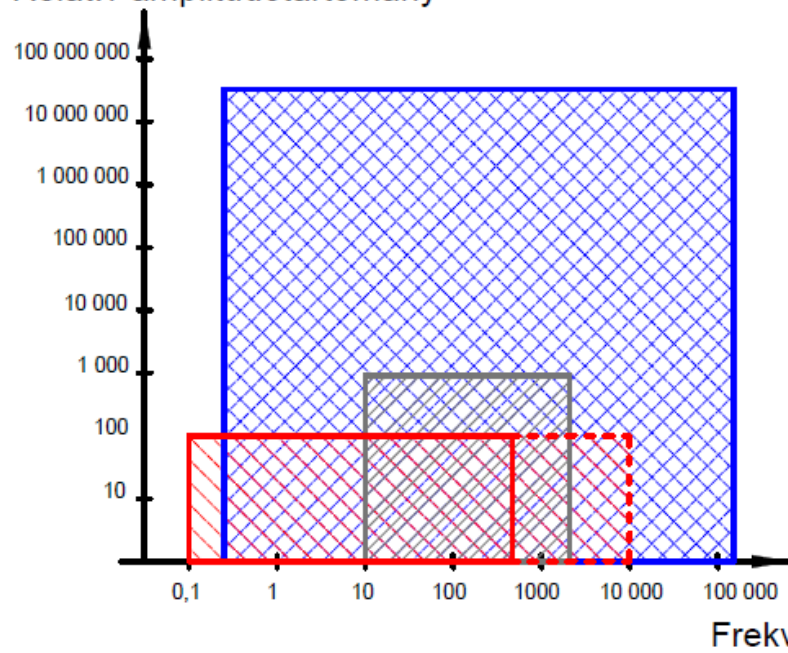


REZGÉSJELLEMZŐK

A rezgések mérése során az érzékelők típusainak megfelelően különböző jellemzők mérésére van lehetőségünk. Az elmozdulás ($x(t)$), sebesség ($v(t)$), gyorsulás ($a(t)$) jelek között matematikai összefüggés áll fenn, így bármelyik mérésével a másik kettő számítható. Ezt az integrálást vagy deriválást a műszerek automatikusan elvégzik.

A legtöbb korszerű műszer mindhárom jellemző mérésére képes, megfelelő érzékelő kiválasztásával.

Relatív amplitúdótartomány



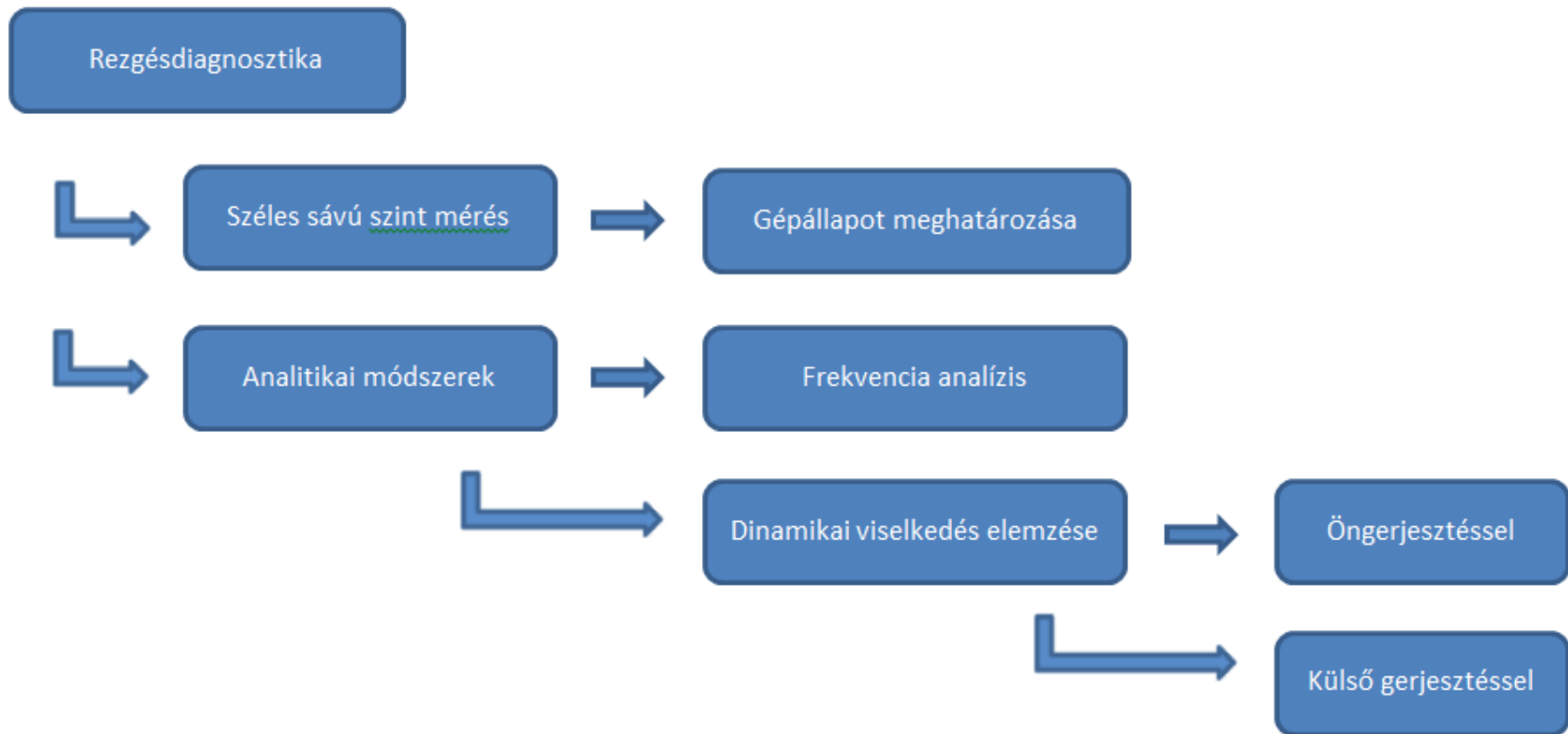
- Elmozdulás: kisfrekvenciájú összetevőkre, pl. forgórész ütés
- Sebesség: a rezgés energia-tartalmával kapcsolatos
- Gyorsulás: nagyobb frekvenciájú összetevők esetén széles spektrumban

REZGÉSERŐSSÉG - MINŐSÍTÉS

Az ISO 10816 szabvány minősítő táblázata különböző gépekre adja meg a rezgéssebesség megengedett négyzetes középérték értékeit (RMS) 10-1000 Hz frekvenciatartományban.

A rezgésereősség tartománya (mm/s-ban)	A gép osztálya				
	I. osztály Kis méretű gépek	II. osztály Közepes méretű gépek	III. osztály Nagy méretű gépek merev rögzítéssel	IV. osztály Nagy méretű gépek rugalmas rögzítéssel	
0,28	JÓ	JÓ	JÓ	JÓ	
0,45					
0,71					
1,12	Elfogadható	Elfogadható	JÓ	JÓ	
1,8					
2,8	Figyelmeztető	Figyelmeztető	Elfogadható	Elfogadható	
4,5					
7,1	Veszélyes!	Veszélyes!	Figyelmeztető	Figyelmeztető	
11,2					
18,0			Veszélyes!	Veszélyes!	Veszélyes!
28,0					
45,0					
71,0	Veszélyes!	Veszélyes!	Veszélyes!	Veszélyes!	

REZGÉSDIAGNOSZTIKAI ESZKÖZÖK CSOPORTOSÍTÁSA



Rezgéseket gerjesztő okok 1.		0-40 % f	40-50 % f	50-100 % f	1 x RPM	2 x RPM	További felharm.	1/2 x RPM	1/4 x RPM	Tov. Alharmonik.	Nagyon magas fr.
Kiegyensúlyozatlanság	Kezdeti kiegyensúlyozatlanság			10							
	Tengely ív kopás, hiányosság			10							
Beállítási hibák, lazaságok, torzulások	Tengely vonaltól való eltérések			4	5	1					
	Mechanikai fellazulások					8	1				
	Illesztési hézagok	1	8	1							
	Alapzat torzulásai		2		5	2					
	Ház torzulásai		1		8						
	Tömítési egyenetlenség	1	1	1	2	1	1			1	1
	Axiális forgórész súrlódások		2		3	1	1			1	1
	Csővezetésekből származó erők				4	5	1				
Rossz csapágyak és tengelycsapok	Csap és csapágy külpontosság				8	2					
	Hordcsapágy hiba		1		4	2					
	Támcsapágy hiba			9							1
	Gördülőelemek gerjesztette rezgés		10								
	Egyenőtlen csapágymerevség (vízszintes - függőleges)						9				
Fogaskerék kapcsolódási hibák	Fogaskerék pontatlanságok						2				6
	Kapcsolódási hibák					1	8	1			
Kritikusok	Kritikus sebesség				10						
	Forgórész és csapágyazási rendszer kritikus állapota				10						
	Kapcsolódás kritikus állapota				10						
	Kiálló részek kritikus fordulatszáma				10						

A következő két táblázat a rezgések alapján segít következtetni az adott hibára.

[Kis Attila: A rezgésdiagnosztika szerepe az erőművi turbina-generátor gépcsoportok karbantartásában, ALSTOM Rezgésdiagnosztikai Laboratórium, 2001.]

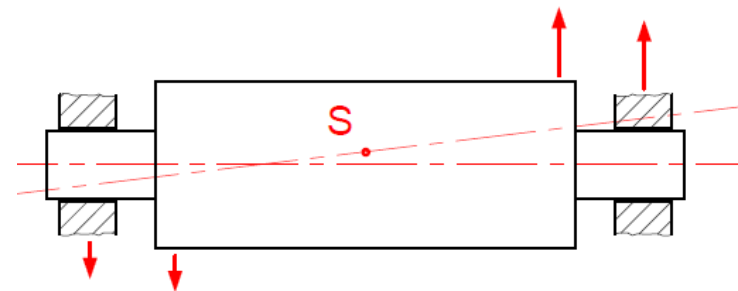
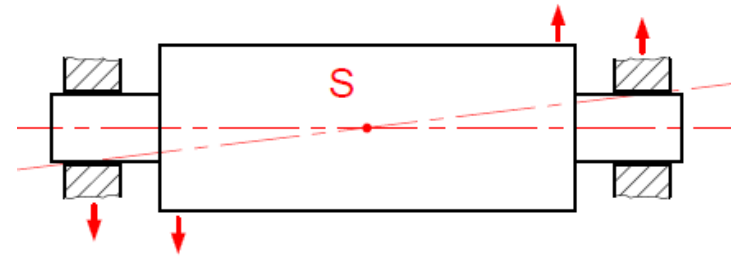
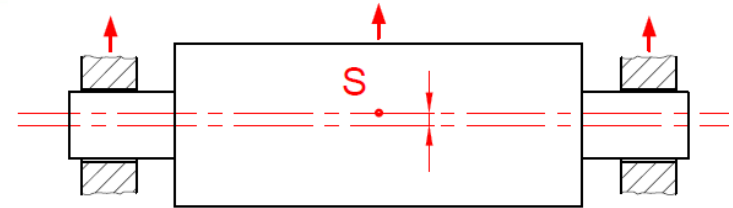
A hibák előfordulási valószínűsége 1-10-ig

Rezgéseket gerjesztő okok 2.		0-40 % f	40-50 % f	50-100 % f	1 x RPM	2 x RPM	További felharm.	1/2 x RPM	1/4 x RPM	Tov. Alharmonik.	Nagyon magas fr.
Rezonancia	Rezonáns rezgések				10						
	Alharmonikus rezonancia							10			
	Harmonikus rezonancia						10				
	Ház, konstrukciós elemek rezonancia				8	1		1			
	Környezeti rezonanciák				8	1		1			
	Alapzat rezonancia				8	1		1			
	Torziós rezonancia				4	2	2				
Különbéle alapvető okok	Rossz hajtószíjak					10					
	Alternáló erőhatások				3	5	2				
	Aerodinamikus és hidraulikus erők				2		6				2
	Súrlódás által indukált	8	1	1							
	Olajörvény		10								
	Rezonancia örvények		10								
	Vegyes súrlódás állapota										10
Elektromos szerkezetek hibái	A motor forgórész nem kerek				10						
	Forgó/állórész egytengelyűségi hiba				10						
	Elliptikus házfurat				10						
	Hibás tekerceslés				10						
	Görbült motortengely				10						
	A motor elektromos szempontból nem központos				10						
A hibák előfordulási valószínűsége 1-10-ig											

[Kis Attila:
A
rezgésdiagnosztika
szerepe az erőművi
turbina-generátor
gépcsoportok
karbantartásában,
ALSTOM
Rezgésdiagnosztik
ai Laboratórium,
2001.]

KIEGYENSÚLYOZATLANSÁG ÉRZÉKELÉSE

- **Statikus kiegyensúlyozatlanság:** a forgástengely és a tehetetlenségi főtengely párhuzamos.
↳ radiális, forgási frekvencián mért rezgés azonos irányban
- **Dinamikus kiegyensúlyozatlanság:** a súlypont a forgási tengelyen, a tehetetlenségi főtengely és a forgási tengely szöget zár be.
↳ radiális, forgási frekvencián mért rezgés ellentétes irányban
- **Páros kiegyensúlyozatlanság:** a súlypont nincs a forgási tengelyen, a tehetetlenségi főtengely és a forgástengely szöget zár be.
↳ Radiális, forgási frekvencián mért rezgés ellentétes irányban, jelentős különbséggel



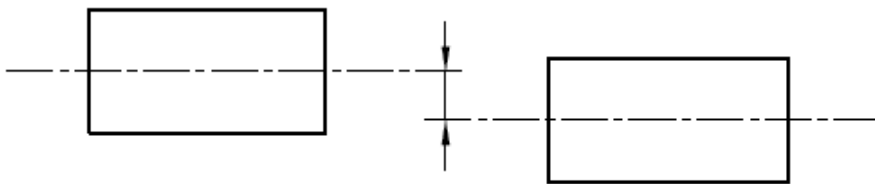
EGYTENGELYŰSÉGI HIBA

Az egytengelyűségi hiba kapcsolt géprészek (pl. tengelykapcsolók) esetén fordul elő. Tipikus gépbeállítási probléma, melyre sok esetben nem fordítanak elég figyelmet, ezzel megrövidítve az érintett alkatrészek élettartamát, leginkább a forgó alkatrészek támcsapágyaiét. Emellett magasabb a súrlódás, ennek következtében az energiafogyasztás is. A helyes beállítás történhet élvonalzóval, mérőórákkal, de a legkönnyebb lézeres tengelybeállító szettel.

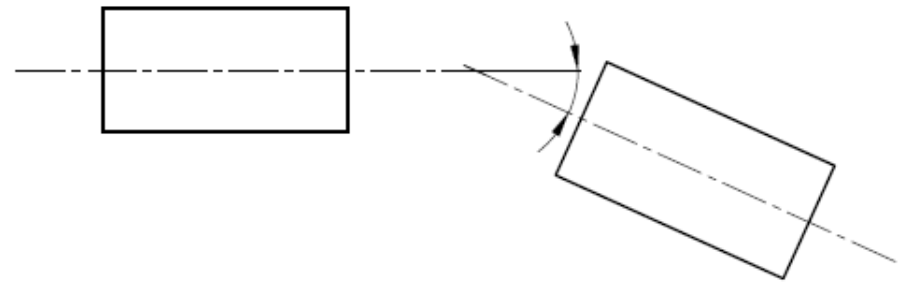
Párhuzamossági hibáról akkor beszélhetünk, amikor a két tengely párhuzamos, de nem esik egybe. A tengelyek párhuzamossági eltérése esetén sugárirányú ütés keletkezik, mely a forgási frekvencián okoz rezgéseket.

Szöghibáról akkor beszélhetünk, amikor a két forgástengely nem párhuzamos egymással, de metszik egymást, azaz szöget zárnak be. Ekkor a axiális irányú rezgéseket érzékelhetünk, szintén a forgási frekvencián.

A legtöbbször persze a két hiba egyszerre jelentkezik, azaz kitérő forgási tengellyel van dolgunk.



Párhuzamossági hiba



Szöghiba

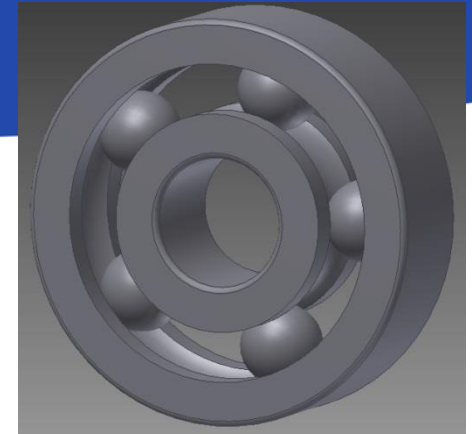
GÖRDÜLŐCSAPÁGY HIBA

A gördülő csapágyak rezgést keltő hibái a legtöbbször a futó felületeken keresendők, azaz radiális csapágy esetén keletkezhetnek a gördülő elemeken, a külső gyűrű belső felületén és a külső gyűrű belső felületén. Ilyen esetekben radiális és axiális rezgések is keletkeznek, a forgási frekvencia felharmonikusain.

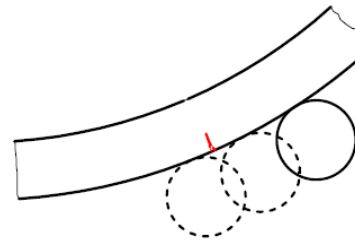
Kenési elégtelenség szintén radiális és axiális irányú rezgést kelt, magas frekvenciájú (100 kHz feletti), széles tartományban.

Ha az álló, külső gyűrű a belső futófelületén, vagy a forgó belső gyűrű a külső futófelületén sérül meg, a rezgés frekvenciáját a gördülőelemek közötti távolság és azok sebessége határozza meg. Előbbi esetben az amplitúdó állandó, hiszen a sérülésen mindig azonos terhelésű gördülőelem halad át, míg a második esetben változó amplitúdót észlelünk, ahogy felületi hiba kigördül a terhelés alól, majd megint terhelés alá kerül.

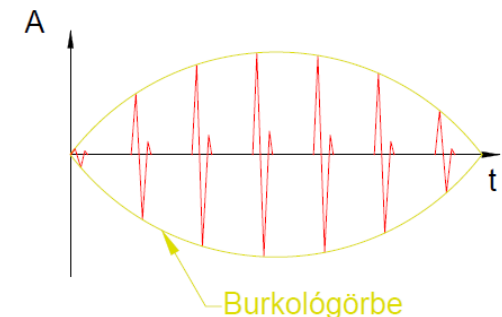
Amennyiben a csapágy fellazul a csapágyházban, radiális ütések fogunk észlelni a forgási frekvencia alharmonikusain.



Álló külső gyűrű
belső futófelületi hibája



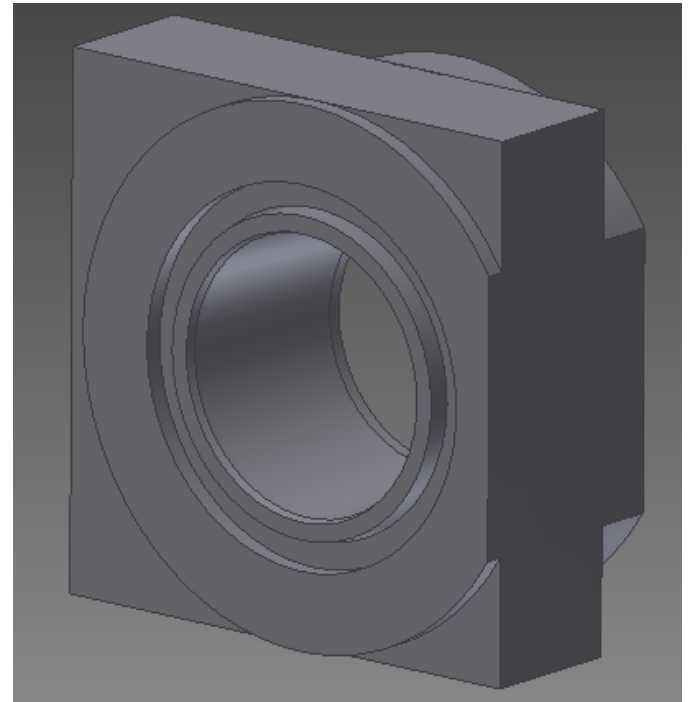
Forgó belső gyűrű
futófelületi hibája



SIKLÓCSAPÁGY HIBA

Siklócsapágy hibák esetében tengelyre merőleges rezgéseket mérhetünk a következő frekvenciákon:

- Hézag probléma esetén a rezgés a forgási fordulatszám felharmonikusain jelentkezik. Ugyanez tapasztalható kenési probléma esetén is.
- Olajfilmben keletkező hidrodinamikai instabilitás esetén alacsony frekvenciás rezgések keletkeznek.
- Olajörvények (leginkább gyengén terhelt, nagy fordulatszámú tengelyeknél) előfordulásánál a forgási fordulatszám törtrész frekvenciáján érzékelhető a rezgés, mivel a csapágyhézag a tengely fordulatszámánál alacsonyabb frekvencián fordul körbe.



VILLANYMOTOR ELEKTROMOS HIBA

A villanymotorokból több fajta létezik, mindegyiknek lehetnek sajátos mechanikai vagy elektromos eredetű meghibásodásai. A teljesség igénye nélkül bemutatunk néhány jellemző példát a jellemző frekvenciával:

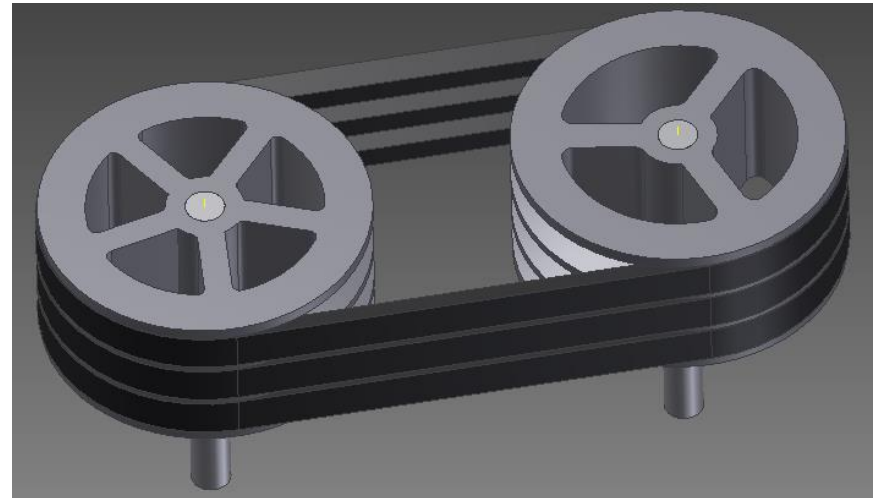
- Aszinkron (indukciós) motor esetén:
 - Forgórész kalickarúd repedése vagy törése: forgási frekvencia oldalsávokkal
 - Forgórész statikus, dinamikus vagy páros kiegyensúlyozatlansága: forgási frekvencia
 - Állórész tekercselés rövidre-záró gyűrű törése: tekercs frekvencia (forgási frekvencia x tekercsszám)
 - Állórész excentricitás: hálózati frekvencia kétszerese
- Érdemes ellenőrizni a motor talpainak az alaphoz való rögzítését feszülés, deformáció gyanújával, hiszen minden motornál az állórész deformációjához vezet.



SZÍJHAJTÁSI HIBA

Szíjhajtások esetében a meghibásodások a következők szerint érzékelhetők:

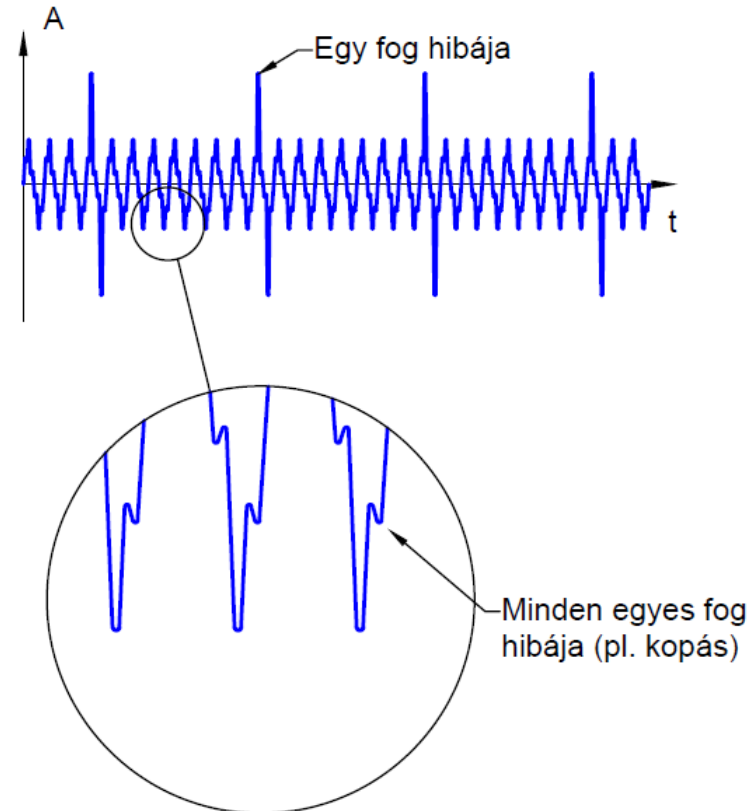
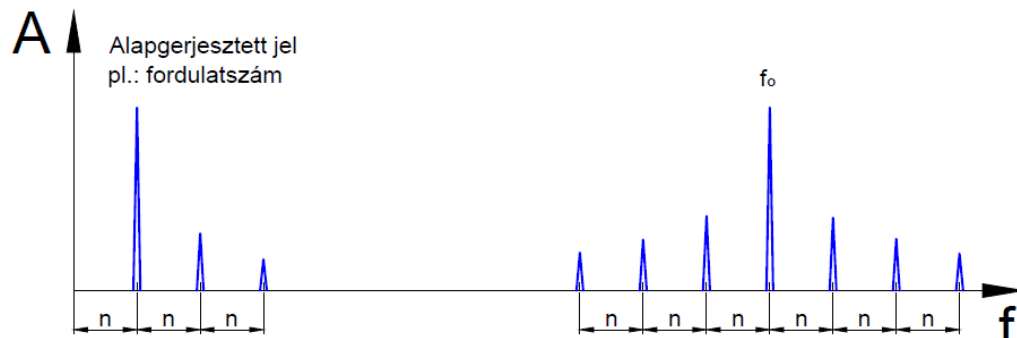
- A szíjak hibája okozza a legalacsonyabb frekvenciájú, radiális rezgést, hiszen a szíj egy adott pontjának körbefutási ideje magasabb, mint a tárcsák körülfordulási ideje.
 - A mechanikai hiba (sérülés) egy körülfordulás alatt mindkét tárcsával találkozik, ám a hajtó tárcsával nagyobb erőhatás mellett.
 - Több szíj használatakor előfordulhat a szíja eltérő feszessége, ekkor a rezgés az adott szíj körbefutási frekvenciáján jelenik meg.
- Szíjtárcsák ütésekor kiegyensúlyozatlansági problémával állunk szemben, így minden tárcsa a saját forgási frekvenciáján produkál radiáli irányú rezgéseket.



FOGASKERÉK-HAJTÁSI HIBA

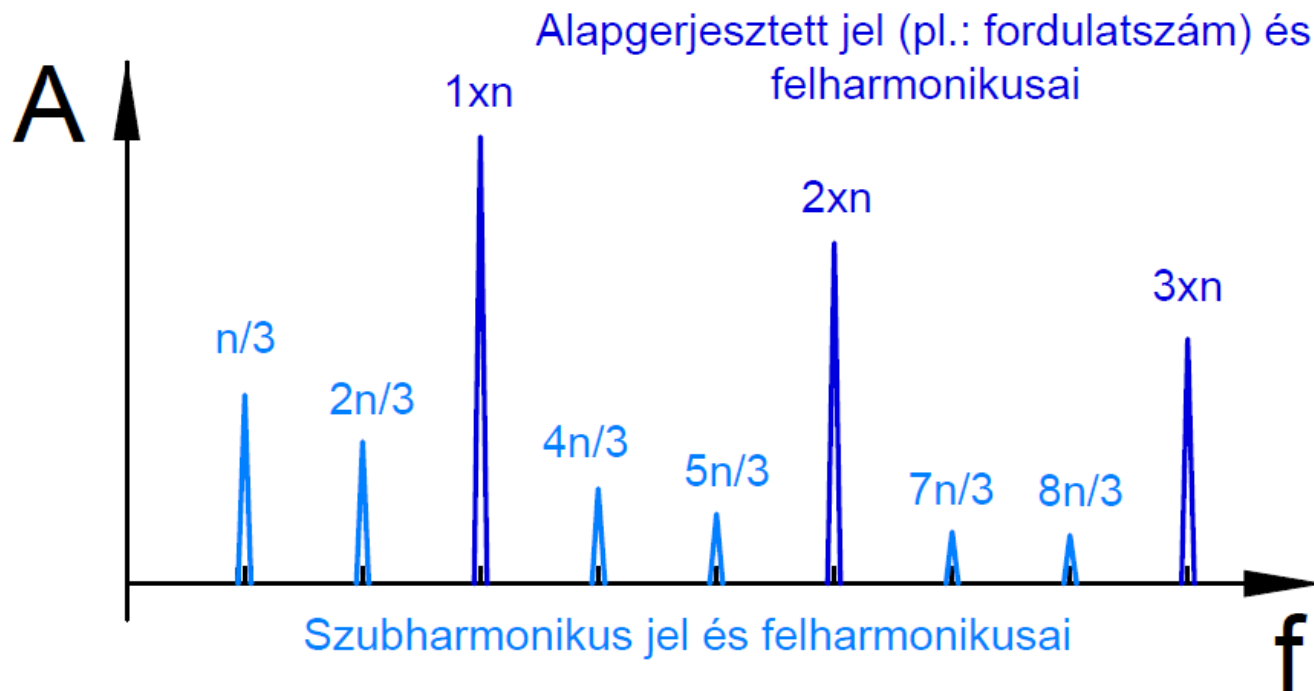
A fogaskerék hajtásoknál a rezgés frekvenciáját a fogaskerek forgási frekvenciái és fogszám szerinti felharmonikusai határozzák meg a következők szerint:

- Egyedi fogmeghibásodás (pl. fogtörés) esetén az adott fogaskerék fordulatszámán és felharmonikusain mért radiális és axiális ütések jelennek meg.
- Minden fogra kiterjedő hiba (pl. kopás) esetében pedig az adott fogaskerék fordulatszámát szorozva a fogak számával kapjuk a rezgés frekvenciáját, szintén radiális és axiális ütéseként.
- Fogaskerék ütések a már korábban tárgyalt kiegyensúlyozatlansági hibaként kerülnek felszínre.



LAZA ILLESZTÉS

Laza illesztés problémája esetén mérésre kerül a forgási frekvenciának és felharmonikusainak a jele, ami mellett a forgási frekvencia szubharmonikusai adják a laza illesztés alap jelét, melyek felharmonikusai szintén megjelennek. A rezgések alacsony frekvencián gerjesztettek, inter- és szubharmonikusokon (fél, harmad, és ezek többszörösei) adnak jeleket.



IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Forgács Endre: Rezgésdiagnosztika előadási anyag, Szegedi Tudományegyetem, Mérnöki Kar, 2014.
- [2] Dr. Bíró István: Mechanika III. Mozgástan jegyzet, Szeged, 2014.
- [3] Dr. Dömötör Ferenc: A rezgésdiagnosztika elemei, SKF Svéd Golyóscsapágy Rt. Budaörs, 1996.
- [4] Kis Attila: A rezgésdiagnosztika szerepe az erőművi turbina-generátor gépcsoportok karbantartásában, ALSTOM Rezgésdiagnosztikai Laboratórium, 2001.
- [5] Dr. Nagy István: Műszaki diagnosztika1. Gyakorlati diagnosztika, 2013., http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0013_muszaki_diagnosztika_1_gyakorlati_diagnosztika

KÖSZÖNÖM A FIGYELMET!

SZÉCHENYI  2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Szociális
Alap



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE