

## **Forgó gépek, gépalapok és kompresszorok csővezetékeinek rezgésvizsgálata**

**dr. Péczely György**

**A.A. Stádium Kft, Szeged**

Az összeállítás olyan gyakorló ipari szakembereknek szól, akik alkalmazni kívánják a rezgésvizsgálattal elérhető előnyöket, de maguk nem rezgésdiagnosztikai szakemberek.

Az alapelvek, néhány alapfogalom és a kimutatható hibák vázlatos ismertetése után bemutatjuk a módszer alkalmazási területeit. Az érdeklődők az ajánlott szakirodalomból kaphatnak további ismereteket.

Nem törekedhettünk teljességre és ezért számos részt egyszerűsítettünk. A terjedelemre és a célkitűzésekre való tekintettel nem foglalkozhattunk egyik rezgésvizsgálati problémával sem részletesen, a fontosabb kérdésekre az Olvasó a hivatkozott irodalomban kaphat választ.

### **A rezgésvizsgálatok alapelvei és néhány alapfogalom**

1. Minden működő gép összetett rezgéseket kelt.
2. Az egyes rezgésösszetevők frekvenciája rámutat egy - egy gépelemre vagy hibára.
3. Az egyes rezgésösszetevők amplitúdója utal a hiba súlyosságára.
4. Az emelkedő rezgésszint romló gépállapotra utal.
5. Az a frekvencia, amelyen a rezgésszint emelkedik megmutatja a romló állapotú gép-elemet.

De! Egy gépelem rezgési frekvenciájának megjelenése nem jelent feltétlenül hibát.

**Rezgés:** úgy fogható fel, mint egy részecskének vagy egy testnek egy vonatkoztatási helyzet körüli oszcilláló mozgása.

**Frekvencia:** Az egy másodperc alatt megtett mozgási ciklusok száma.

**Harmonikus (vagy alapharmonikus):** a forgórész üzemi fordulatszámának megfelelő frekvencia. (Másodpercenkénti fordulatszám vagy ciklusszám.)

**Felharmonikus:** Az alapharmonikus egész-számú többszöröse.

**Amplitúdó:** A tömegközépponthez képest megtett legnagyobb kitérés. (Szokás még sebesség és gyorsulás amplitúdóról is beszélni, ebben az esetben gondoljunk a részecske sebességének és gyorsulásának szinuszos viselkedésére. 1. ábra).

**Időjel:** Az egyes rezgésösszetevők ábrázolása idő-amplitúdó dimenzióban (két szinuszos összetevő eredő időjelét ábrázolja a 2. ábra).

**Rezgési spektrum:** Az egyes rezgésösszetevők ábrázolása frekvencia-amplitúdó dimenzióban. Segít a gyakran igen bonyolult időjel értelmezésében (3. ábra).

**Rezonancia:** Egy rendszernek rezonanciája van gerjesztett lengésben, amikor a gerjesztő frekvenciának bármilyen kis változása a rendszer válaszában csökkenést eredményez.

**Csúcs, csúcstól csúcsig, átlag és effektív érték:** A rezgés szintjének számszerűsítésére néhány eltérő lehetőség van. A csúcs (vagy maximális) érték egyszerű harmonikus rezgés esetében hasznos, azonban egyéb típusú rezgések esetében kevésbé előnyös, mivel csak egy pillanatnyi rezgés nagyságától függ és nem veszi figyelembe az azt létrehozó időszakot.

Általánosan a csúcstól-csúcsig, vagyis a mozgás pozitív és negatív szélső helyzete közötti értéket használják. Egy szimmetrikus jel esetében (rendszerint ez az eset áll fenn) ez általában a csúcserték kétszerese (4. ábra). Egy másik mennyiség, mely figyelembe veszi az időlefolyást is, az átlagos abszolút érték, melyet a következőképpen definiálunk:

$$x_{\text{átlag}} = \frac{1}{T} \int x dt$$

Bár ez a mennyiség egy T periódusra vonatkoztatott időszakot vesz figyelembe, úgy találták, hogy gyakorlati jelentősége korlátozott, mivel nincs közvetlen összefüggésben semmilyen hasznos fizikai mennyiséggel. Egy sokkal hasznosabb leíró mennyiség, amely figyelembe veszi az időlefolyást is, az RMS (négyzetes átlag gyöke), más néven effektív érték, melyet a következőképpen definiálunk:

$$a_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T a^2(t) dt}$$

Az RMS érték jelentőségének fő oka az, hogy közvetlenül összefügg a rezgés energiataralmával.

Az átlag és RMS értékek közötti összefüggés a következő:

$$x_{\text{RMS}} = a_1 \cdot x_{\text{átlag}} = x_{\text{csúcs}}/a_2$$

ahol az  $a_1$ -t és  $a_2$ -t alaktényezőnek, illetve csúcstényezőnek hívják, és a tanulmányozott rezgések hullám-alakjáról adnak felvilágosítást. Tisztán szinuszos-hullám esetében:  $a_1 \approx 1,11$  és  $a_2 \approx 1,41$ .

A legtöbb rezgés nem tiszta harmonikus hullámformákból tevődik össze, és így általában az RMS mérés előnyös.

A vonatkozó szabványok és javaslatok (pl. ISO 2372 vagy VDI 2056) a 10 és 1000 Hz között mért effektív rezgéssebességre vonatkoznak.

**Rezgéserősség:** A gép jellemző pontjain (minden csapágyházon a tér három főirányában mérünk) mért effektív rezgéssebességi értékek legnagyobbika. Ez az érték képezi az alapját az ISO 2372 (vagy azzal gyakorlatilag azonos nemzeti és nemzetközi szabványok) szerinti állapotminősítésnek. Az 5. ábra az ISO 2372 szerinti minősítési táblázatot és értelmezését mutatja. A gépeket nagyság és egyéb jellemzői alapján sorolják az egyes csoportokba.

### A rezgés változása az elhasználódás során

A rezgésszint elvileg a beüzemelést követő néhány (tíz) órában csökken, majd egy hosszú eseménytelen időszak következik, végül a kifejlődő hibák eredményeként rohamos növekvő szakasz következik, egészen a kényszerleállásig. Abban az esetben, ha meg tudjuk határozni a még éppen megengedhető rezgésszintet, akkor biztosíthatjuk a maximális gépkihasználást és megvalósíthatjuk a magas szintű üzemi biztonságot (6. ábra).

### **A rezgésvizsgálatok alkalmazása**

A nagy bizonytalanságot és kockázatot hordozó "meghibásodásig üzemelés rendszer" és a nagy pazarlással, de nem túl magas megbízhatósággal járó "ciklusidőn alapuló karbantartás" előnyeit egyesítő "állapotvizsgálaton alapuló karbantartás" rendszerében jelent meg alapalként a rezgésvizsgálat. Az állapotvizsgálaton alapulónál korszerűbb karbantartási rendszerek (RCM, TPM, RCM2) a műszaki diagnosztika eszközeinek alkalmazását már triviális tényként és alapelemként kezelik [2].

Általánosan azt mondhatjuk, hogy a berendezés mozgásában valamilyen módon részt vevő, vagy az azt befolyásoló elemek hibája rezgésvizsgálattal kimutatható. Az alábbiakban gyors áttekintést adunk néhány jellemző hibáról és azok kimutatásáról. Meg kell azonban jegyezni, hogy sok esetben - különösen bonyolultabb berendezéseknél - a leírt "ökölszabályok" csak korlátozottan alkalmazhatók [5].

### **Kiegyensúlyozatlanság**

A leggyakoribb hibaforrás (a mért gépek 20-25 %-ánál tapasztaljuk). A forgórész tömegeloszlási hibája. Kialakulása gyártási, szerelési vagy üzemelési okokra vezethető vissza. Tökéletesen kiegyensúlyozott forgórészeiről nem beszélhetünk, a jelenséget akkor tekintjük hibának, ha mértéke egy bizonyos szintet meghalad.

A nem megfelelő kiegyensúlyozottság az egész berendezést, de különösen a teherviselő csapágycsoportokat járulékos dinamikus erőhatással terheli. Intenzív rezgéssel, esetenként fokozott környezeti zaj és rezgésterheléssel jár. A kiegyensúlyozatlanság szintjének 50 %-os csökkenése a csapágyélettartam 100-1000 %-os növekedését is eredményezheti.

Kimutatása rezgésméréssel viszonylag egyszerű. A rezgési spektrumon elsősorban radiális irányban, az üzemi fordulathoz megfelelő frekvencián jelentkezik. Felharmonikusok megjelenése mérsékelten jellemző. Értéke szokásosan 1-50 mm/s közötti. Ritkán jellemző erőteljes axiális irányú rezgések. Forgórésztől függően kb. 0,5-10 mm/s közötti értéke az elfogadható. Összetéveszthetőség: Hasonló jelenséget eredményezhet többek között a fellazult gépalap, hajlott tengely, tengelykapcsoló hiba, villamos eredetű kiegyensúlyozatlanság és a rezonancia is.

Korrigálása helyszíni vagy padi egyensúlyozással általában egyszerű. Általános alapelv, hogy ahol lehet - helyszíni (saját beépítésben, saját csapágyon) kiegyensúlyozást alkalmazzunk.

### **Tengelykapcsoló- vagy tengelybeállítási hiba**

Gyakori és súlyos következményekkel járó probléma (a mért tengelykapcsolós berendezések 30 - 35 %-ánál tapasztaljuk). Az egytengelyűség szerelési vagy egyéb okból történő megváltozása az egyensúlyozatlansághoz hasonló gépészeti és környezeti következményekkel jár. Annak ellenére, hogy a hiba eredményeként jelentkező rezgés csekélyebb (kb. 0,5-25 mm/s

közi), a tipikus csapágyazások axiális terhelhetőségének korlátozottsága miatt e jelenség éppoly romboló.

A rezgési spektrumon az axiális irányú rezgés, ha meghaladja a radiális irányú nagyobbik összetevő felét és jelentős a felharmonikus tartalom, akkor joggal gyanakodhatunk e problémára. Kísérő jelensége a viszonylag magas radiális rezgés, szintén magas felharmonikus tartalommal. Összetéveszthetősége hasonló az egyensúlyozatlansági hibánál leírtakkal.

A tengelykapcsoló meghibásodása esetén általában a 3. vagy 4. harmonikus amplitúdója eléri az alapharmonikus amplitúdó 30-60 %-át.

Korrigálása mérőórával vagy e célra kifejlesztett célműszerrel egyszerű.

### **Hajlott tengely**

Viszonylag ritka jelenség (a mért berendezések 0,1-0,5 %-ánál tapasztaljuk). Megjelenése és hatása hasonló az egytengelyűségi hibához. A két hiba megkülönböztetésére fázismérést és a kísérő jelenségek elemzését használják fel.

### **Fellazulások**

Viszonylag gyakori hiba (a mért berendezések 3-5 %-ánál tapasztaljuk). Okozója lehet az alapozás vagy az alaphoz való kötés elégtelenségén kívül egy-egy fő rögzítőelem hibája is. Tipikusan a fordulatszámú frekvencia kétszeresén jelent felerősödő rezgést, miközben az alapharmonikus és a többi felharmonikus is jelentősen megnövekszik. A berendezés idő előtti tönkremenetelében jelentős szerepet játszhat. Összetéveszthetőség szempontjából a kiegyensúlyozatlansággal egy csoportba sorolható.

### **Villamos eredetű kiegyensúlyozatlanság**

Ritka jelenség (a mért berendezések 0,1-0,3 %-ánál tapasztaljuk). Üzem közbeni megjelenése erősen emlékeztet a mechanikai kiegyensúlyozatlanságra, bár tapasztalatunk szerint az alapharmonikus-hoz tartozó (sebesség)amplitúdó ritkán haladja meg a 10 mm/s-ot. Káros hatása a csekélyebb rezgésszintnek megfelelően mérsékeltebb. Felismerésének jelentősége inkább a rendszerben jelen levő villamos elégtelenség felfedezésében áll.

Azonosításában segít a gerjesztés elvétele és a leálló berendezés rezgési viselkedésének mérése. Míg a kiegyensúlyozatlanságnál csökkenő fordulatszám esetén is az  $F = r \cdot m \cdot \omega^2$  jellemzi az erőhatást, addig a villamos eredetű kiegyensúlyozatlanságnál a gerjesztés elvétele egyben a rezgést gerjesztő erő elvételét is jelenti. A rezgés-fordulatszám lefutás görbe ennek megfelelően a két különböző jellegű egyensúlyozásnál eltérő lesz. (7. ábra)

### **Szíjtárcsák síkbaállítási hibája**

Gyakori hiba (a mért ékszíjas berendezések 25-30 %-ánál tapasztaljuk). Gépromboló hatása a tengelybeállítási hibánál leírtakkal hasonló. Erőteljes axiális rezgés formájában jelentkezik az üzemi fordulatszámon, elsősorban a hajtott (a villamos motornál általában kevésbé merev) rendszeren. Felharmonikus tartalma csekély. A rezgésszint 3-20 mm/s körül alakul. Az elfogadható érték 1-4 mm/s körüli. Korrigálása egyszerű (pl. lézerfényvel).

## **Túlzottan feszes szíjak**

E gyakori (5-8 %) hiba járulékos terhelést okoz és ezáltal lerövidíti a berendezés csapágyainak élettartamát. Jellemzője, hogy a hajtó tengely rezgései is megjelennek a hajtott egységen és viszont. Korrigálása egyszerű.

## **Szíjrezonancia**

Talán a tervezési segédleteknek köszönhetően alig-alig előforduló jelenség. Frekvencia értéke legtöbbször a tengelyek fordulatszáma alatti és ezért jelentős gerjesztés híján a rezonancia hatásai elenyészőek.

## **Járókerék hiba**

A járókerék elhasználódása esetén nem tervezett örvények/leválások lépnek fel a szállítási folyamatban, amelyek rendre az alapharmonikus  $\times$  lapátszám frekvencián jelentkeznek. Az amplitúdó értéke 2-15 mm/s között változik jellemzően. Könnyen összetéveszthető a munkaponttól távoli üzemeltetés esetén fellépő rezgésekkel.

## **Örvénygép optimális üzemi ponttól távoli működtetése**

Gyakori jelenség az egyébként jó műszaki állapotú centrifugálszivattyúk erőteljes rezgése. Az optimális üzemi ponttól akár a nagyobb, akár a kisebb folyadékszállítás irányába mozdulunk el, az az alapharmonikus és a lapátszám szorzathoz tartozó frekvencián amplitúdó növekedést okoz. Nem ritka az 5-10-szeres rezgésszint változás sem.

## **Gördülőcsapágyak hibái**

A rezgésvizsgálati szakirodalom legtöbbet tárgyalt eleme a gördülőcsapágy. Meghibásodásának kimutatására több tucat (!) módszer létezik. A gyakran igen hasonló, máskor erősen különböző eljárások egyetlen közös jellemzője, hogy igen gyakran az eljárás kidolgozója a saját technikát nevezi a probléma legmegfelelőbb megoldásának...

Műszaki szempontból négy fő csoportba sorolhatjuk az egyes módszereket. Az első csoport az ún. "számítási eljárás", ahol a gördülőcsapágy geometriájából, a gördülőtestek számából és a hatásszögből határozzák meg a gépelem által várhatóan gerjesztett frekvenciákat. A módszer hátránya, hogy az így létrejövő rezgésösszetevők az adott frekvencia-tartományban egyébként is megjelenő egy-három nagyságrenddel erőteljesebb rezgésszint mellett (pl. kiegyensúlyozatlanság) eltörpülnek/elfedésre kerülnek.

A második csoport a 2-5-10 kHz-s tartományban jelentkező, a beépített gördülőcsapágy saját frekvenciáihoz tartozó amplitúdók alakjából és nagyságából következtet e gépelemek állapotára, pontosan közzé nem tett értékelési szempontok szerint.

A harmadik módszer csoport az előző bekezdésben említett csúcs-csoportok létrehozóit (gerjesztőit) az első csoportban kiszámolt frekvenciákkal azonosítja. A csúcs-csoport jeleinek további elemzésével kísérik meg azonosítani a számolható csapágy frekvenciák valamelyikét. (Ebbe a módszerbe sorolható a népszerű burkológörbe elemzés és a Spike Energy vizsgálat is.)

A negyedik csoportba a "magas frekvenciás" eljárások tartoznak, amelyeknél a 20 kHz feletti tartományt, illetve annak egy-egy szakaszát vizsgálják. Ezen eljárásokat egyrészt nem zavarják a nagyobb tömegű, de alacsonyabb frekvenciatartományban gerjesztő elemek rezgései, másrészt a kialakuló hibákat az egyéb módszereknél elvileg korábban jelzik. Hátránya ezen eljárásoknak a magas frekvenciatartományoknál fellépő jelátvitel megbízhatatlansága (a vizsgálatot mérés technikailag igen körültekintően kell elvégezni), másrészt a súrlódó gépelemek-től (pl. fogaskerekek) érkező jelek zavaró hatása. E módszerek leginkább ismert hazai képviselői az ütésimpulzus eljárás (SPM) és az akusztikus emissziós vizsgálatokat idéző SEE módszer.

A "melyik módszer a legjobb" kérdésre nehéz lenne valamennyi eljárás összehasonlító elemzése nélkül válaszolni. Tény azonban, hogy a különféle műszergyártóknál leggyakrabban alkalmazott módszer a harmadik csoport eljárásaihoz áll legközelebb.

### **Gördülőcsapágyak fellazulása**

Gyakori hiba (3-6 %), amely magában hordozza kisebb mértékben a fellazulás és a kiegyensúlyozatlanság jellemzőit, másrészt az üzemi fordulaton 0,3...0,8 szorosán diszkrét csúcs formájában is jelentkeznek. Ez utóbbi csúcs magassága szokásosan az alapfordulatszámú érték 5-30 %-a körül alakul.

Hatását tekintve siettetni a csapágyazás további és gyorsuló tönkremenetelét, növekvő dinamikus erőhatást és rezgést vált ki, ezáltal siettetni az egész berendezés meghibásodását is.

Korrigálására jól bevált módszer a csapágy rögzítése valamilyen e célra kidolgozott ragasztóval (pl. Loctite 603 vagy 660 quick metal típus).

### **Gördülőcsapágyak kenési állapota**

A gördülőcsapágyak idő előtti tönkremenetelének gyakran észlelt (6-10 %) kiváltója. A csapágy élettartama az elégtelen kenés miatt akár huszad részére is csökkenhet.

Felismerése spektrumanalízis segítségével egyszerű. A 2-10 kHz-es frekvenciatartomány spektrumának alaktani elemzése lehetővé teszi e hiba azonosítását. E helyen kell kiemelni annak a hiba az abszolút helytelenségét, miszerint a kenési elégtelenség csak és kizárólag a negyedik csapágyvizsgálati módszer egyes műszereivel mutatható ki. A 8. ábra gördülőcsapágy rezgési spektrumát mutatja kenetlen állapotban és tíz perccel a kenés után.

### **Siklócsapágyak hibái**

A siklócsapágy hibák közül a megnövekedett csapágyhézaggal, a vegyes súrlódás és az olajfilm örvénylés kialakulásával foglalkozunk.

A csapágyhézag megnövekedése gyakorlatilag (enyhén) megnövekedett lazaságot eredményez, ami a felharmonikus tartalom növekedését hozza. Fogaskerekes hajtásoknál a fogkapcsolódási frekvencia környezetében levő alsó oldalsáv tartalom növekedése is utal ezen állapotra.

A vegyes súrlódás kialakulását a 2-10 kHz-es tartományban jelentkező egy, esetleg kettő diszkrét csúcs jellemzi. Ez a hiba a berendezés üzembiztonsága szempontjából rendkívül kockázatos.

Az olajfilm-örvénylés a kelleténél csekélyebb fajlagos csapágyterhelés eredménye. Megjelenése a  $0,42 \dots 0,48 \cdot$  alaphordulatszámra történik, a kiegyensúlyozatlansági csúccsal közel azonos mértékű diszkrét csúcs formájában. Kiküszöbölésére csökkentett hordozófelületű csapágyakat vagy a kenőolaj viszkozitásának csökkentését (pl. hőmérséklet növeléssel) alkalmazzák.

### **Fogaskerék kapcsolatok hibái**

Súlyos gépkárosodás okozója lehet a fogaskerekek valamely hibája. A hibák sokfélesége (kapcsolódási hiba, lazaság, excentricitás, fogak repedése/törése, stb.) és a felismerés bonyolultsága miatt e kérdésre részletesen nem térünk ki.

A fogaskerék kapcsolat állapotának elemzéséhez szükséges a nagyfelbontású spektrumfelvétel (a fogkapcsolódási frekvencia környezetében legyünk képesek a lassúbb tengely forgási frekvenciájánál legalább tízszer kisebb frekvenciaérték megkülönböztetésére), az időjel felvétele és elemzése (a rezgési spektrumfelvételi technika ugyanis átlagol - ha pl. harminc fog közül csak egyetlen hibás, hatása az átlagban elenyésző lesz), valamint esetenként a fázis/fordulat szinkronizációs technika (a rejtett tengelyek hibáinak kimutatására) [4].

Megemlíthető még az egyedi technika a cepstrum analízis, amelyet a Brüel and Kjaer műszergyár alkalmaz évtizedek óta a fogaskerekes hajtások állapotvizsgálatára. E technikát a mai napig szállítja műszereivel, a versenytársak eszközeibe ez az eljárás azonban nem került be.

### **Statikus excentricitás:**

A villamos motorok álló és forgórésze közötti légrés egyenetlensége erőteljes rezgést eredményez az üzemi fordulatszám kétszeresén. A korábbi időkben kuriózumszámba menő hiba a fokozott energiatakarékosságú villamos motorok (kisebb légrés, hosszabb forgórész) bevezetésével mind gyakoribbá válik.

Az erőteljes rezgés a csapágyazás fokozott igénybevételét, megnövekedett zajszintet, hatékonyságromlást eredményez.

### **Villamos forgórészek villamos hibái:**

A hibák e csoportja a villamos gép súlyos meghibásodását eredményezheti. Kimutatására a rezgésvizsgálat csak korlátozott lehetőséget ad. Tipikusan az üzemi fordulatszámhoz tartozó frekvencia mellett megjelenő oldalsávok jellege, illetve a kalickarúdszám és a fordulatszám frekvenciáján (az ún. szirénafrekvencián) megjelenő amplitúdó nagysága utal e hibákra [7]. Nehézséget a hiba mértékének megbecslése, illetve az üzemeltetés hátralevő lehetséges időtartamának előrejelzése okoz.

A kilencvenes évek közepén e hibák kimutatására "Motor Monitor™" néven új eljárás jelent meg. A villamos motor tápkábeleinek vagy szekunder körének egyikére helyezett (mé-

rő)lakatfogó kimenő jelét egy szűrő és söntölő feladatokat ellátó jelátvitőbe, onnan pedig egy nagy amplitúdó (legalább 72 dB) és frekvencia felbontású (0-100 Hz-es tartományban legalább 0,05 Hz/vonal) spektrumanalizátorba vezetik. Az eltárolt spektrumot egy számítógépes szakértői rendszer dolgozza fel és ad konkrét hibadiagnózist és beavatkozási javaslatot.

### **Tartályok és csővezetékek rezonanciája:**

Még a legkorszerűbb tervezési módszerek alkalmazói sem képesek minden esetben sikeresen úgy kialakítani a csővezeték-tartály rendszereket, hogy azok minden pontban és minden irányban rezonancia-mentesek vagy legalább rezgésszegények legyenek. Még a legkörültekintőbb tervezés mellett is előfordulhatnak nem tervezett gerjesztések, vagy a telepítéskor bekövetkező olyan eltérések, amelyek megváltoztatják a rendszer egyes szakaszainak tervezett sajátfrekvenciáját.

Minden testnek van egy vagy több sajátfrekvenciája, ez természetes és megváltoztathatatlan tény. A rezonancia létrejöttét az okozza, ha valamelyik sajátfrekvencia közelében számottevő gerjesztés éri a rendszert. Egy bonyolult technológiai kialakításban sokszor a többszáz méternyire levő berendezések okozzák a veszélyes gerjesztést. Dugattyús gépek esetében a gázlökötést előidéző berendezés gyakran sok kilométeres távolságra helyezkedik el a kialakuló rezonanciától.

Egy test rezonancia-frekvenciáját annak tömege, rugómerevsége befolyásolja, a gerjesztésre adott válasz intenzitása döntően a csillapítástól függ. A kialakuló rezonanciát viszonylag könnyű befolyásolni, nehézséget a rezonancia-frekvencia megfelelő irányba és mértékkel történő gazdaságos eltolása jelenti úgy, hogy ezáltal ne idézzünk elő másutt kialakuló rezonanciát. A legjobban rezgő csőszakasz erőteljes megfogása ezért gyakran többet árt, mint használ.

**Példa:** állóhengeres, folyadékkal feltöltött tartályba oldalról benyúló három keverő 1440  $1/\text{min}$ -cel forog. A próbaüzem során a tartály fala erőteljesen rezgésbe jön. A tartályon ütéstesztet végeznek, ami megmutatja, hogy a tartály sajátfrekvenciája 25 Hz-en van, ami igen közeli a 24 Hz-es keverő fordulatszámú gerjesztéshez. Mi a teendő?

Az elméletileg lehetséges nagyszámú megoldás közül néhány: a tartály feltöltöttségét megváltoztatni, a tartályt abronccsal, merevítőkkel stb. merevíteni, anyagát acél helyett más anyagra cserélni, a keverők fordulatszámát csökkenteni vagy növelni, a keverőket kiegyensúlyozni, a kevert anyag viszkozitását megváltoztatni, stb. A felsorolt megoldások közül az adott esetben egyesek megvalósíthatóak, mások nem. A kérdés mindig az, hogy melyik a legolcsóbb megoldás, amely az alapfunkció károsítása nélkül a kívánt eredményt eléri.

### **Gépalap problémák**

A gépalapok igen gyakran tervezési, kivitelezési okok vagy elhasználódás miatt nem képesek funkciójukat ellátni. A hagyományos karbantartási szemlélet szerint akkor kell gépalap hibára gyanakodnunk, ha a berendezés ismétlődően tönkremegy, minden megmagyarázható ok nélkül.

A korszerű rezgésvizsgálati technikák számos lehetőséget nyújtanak a gépalap/géprögzítés elégtelenségének kimutatására. A viszonylag kis tömegű berendezéseknél a forgási frekvencia kétszeresen jelentkező erőteljes csúcs és a jelentős felharmonikus tartalom utal e problémára.



Nem ritkán a gépalap-gép rendszer rezonanciájával állunk szemben. Ilyenkor leggyakrabban a fő gerjesztési frekvencián (az üzemi fordulatszám) jelentkezik az erőteljes rezgés. A kevésbé tapasztalt diagnosztikai szakember ilyen esetben kiegyensúlyozatlanságra vagy tengelykapcsoló hibára gyanakszik. A rezonancia felismerés megbízható módszere a leállás vizsgálat, az ütésimpulzus vagy egyéb külső gerjesztést alkalmazó teszt és a fázismérés is. Ez utóbbi azt a jelenséget használja ki, hogy rezonanciában a fázisérték erősen ingadozik. Meg kell jegyezni ugyanakkor, hogy fázisingadozást a környezet zavaró rezgései is okozhatnak, tehát e jellemző használatát a rezonancia felismeréséhez csak végső soron alkalmazzuk.

Gyakran a munkahézzal készült, vagy elrepedt gépalap látszólag teljesen jó állapotú, ugyanakkor a berendezés stabil rögzítésére alkalmatlan. Az erőteljes rezgések a gépalapot tovább károsítják, ez további rezgésnövekedéshez vezet - tehát gyorsuló folyamattal állunk szemben. Az ilyen hibák kimutatására kiváló módszer a fázismérést segítségül hívó mozgásanimáció. A gépalap nagyszámú pontján három irányban egy referencijelhez hangoltan mérik a rezgéseket és a hozzájuk tartozó fázisértéket, majd az eredményeket számítógép segítségével "mozgásukban megjelenítik". E vizsgálatról a sorozat egy másik írása számol be részletesen.

## **Tengelyrepedés**

A nagy terhelésű tengelyeknél, pl. a turbina-generátor egységeknél súlyos és gyakorlati veszélyt jelent a tengelyek repedése és törése. A kezdődő tengelyrepedés az esetek jelentős részében csak minimális rezgésszint növekedéssel jár. A hiba kiterjedése egy pontot átlépve felgyorsul, a rezgés is rohamosan megnő és a tengely eltörik. Veszélyt a kritikus pont átlépése és a törés bekövetkezése közötti időtartam rövidege jelent. A csak spektrumanalízisre támaszkodó rezgésvizsgálat ezért nem nyújt kellő eredményt e hibával kapcsolatban (cél a hibát úgy felismerni, hogy legyen idő a következmény csökkentési intézkedések biztonságos kivitelezésére).

Az üzemi fordulatszámhoz (más irodalmak szerint a kétszeres üzemi fordulatszámhoz) tartozó rezgési amplitúdó fázisértékének folyamatos figyelemmel kísérése nyújt e hiba időbeni felismeréséhez segítséget. A repedés kialakulásakor a rezgési amplitúdó még alig módosul, miközben a fázis már jelentős értékváltozáson megy keresztül, jelezve a hibát.

A kellő gyakorlattal nem rendelkező diagnosztikai szakember az üzemi fordulatszámhoz tartozó amplitúdó növekedését egyensúlyozatlanság változásnak, vagy tengelykapcsolat problémának, esetleg tengelygörbülésnek hiheti. Az ilyenkor elvégzett egyensúlyozás az egyik oldalról csökkenti a rezgésszintet, a másik oldalról viszont nem tesz semmit a repedés ellen. Az ilyen állapot melletti üzemelés súlyos havária- és baleset veszélyt jelent. Az ilyen hiba felismerése esetén bármiféle kísérletezés a rezgés csökkentésére (a javítási időig) - súlyos kockázat felvállalása és felelőtlen játszadozás a berendezés közelében dolgozók életével!

## **Mikor és hol alkalmazhatjuk a rezgésvizsgálatokat?**

Az alkalmazás jellege szerint a következőképp csoportosíthatjuk a rezgésvizsgálatok felhasználását:

### **1. Egyedi mérések**

Az egyedi mérések során egyetlen vizsgálat alapján kell véleményt mondani a gép állapotáról és jövőjéről. A valóságban az aktuális mérési adatokat a hasonló berendezéseken mértekkel vagy előírások normáival hasonlítják.

1.1. Gépátvétel: beruházáskor vagy javítás után (az új és a javított gépek 7-15 %-a hibás!).

1.2. Nagyjavítás előtti mérések (hagyományos nagyjavításkor a gépek 2/3-ad részét káros megbontani).

1.3. "Gyanús jelenségek" vizsgálata (nem kell azonnal csapágyat cserélni, ha gyanús zajt/rezgést észlelünk).

**2. Rendszeres mérések** (több mérés összesített tapasztalata és a rezgésváltozás jellege alapján mondunk véleményt).

### **3. Rezgéscsökkentések**

3.1. Kiegyensúlyozás és kívánt kiegyensúlyozatlanság beállítása (az iparban működő ventilátorok 1/3-ad része durván egyensúlyhibás)

3.2. Rezonancia megszüntetés

3.3. Passzív rezgéscsökkentés

### **4. Egyéb alkalmazások**

4.1. Épületre ható rezgések vizsgálata

4.2. Emberre ható rezgések vizsgálata

### **A rezgésvizsgálatok gazdasági értékelése**

A forgó és alternáló mozgást végző berendezések állapotvizsgálati technikái közül a rezgésvizsgálatok szinte egyeduralmúak, köszönhetően viszonylag egyszerű elvégezhetőségüknek és a legjobb ár/információ tényezőnek.

Tapasztalatok szerint egy hagyományos szemléletű cégnél a karbantartási költségek 10-20, a váratlan hibák miatti állásidő 60-80 %-kal csökkenthető a rezgésvizsgálatok segítségével. A gazdasági elemzések kimutatták, hogy a rezgésvizsgálati beruházásra fordított pénz 6-60 hónap, a külső szolgáltatásra fordított kiadás 0,5-2 hónap alatt már megtérül.

Optimális diagnosztikai teljesítményt feltételezve mindkét részről (külső vagy belső szolgáltatás) hozzávetőleg 450 mérendő berendezés felett gazdaságos a saját erős műszervásárlás és diagnosztikai csoport kialakítás [9].

### **A rezgésvizsgálatok művelésének és alkalmazásának hazai helyzete [6]**

A hazai vállalatok kb. 14 %-a alkalmazta 1996-ban a rezgésvizsgálatokat. Közel 90 %-uk külső szolgáltatást vett igénybe annak ellenére, hogy többen közülük rendelkeznek saját (nem vagy kevésbé használt) műszerrel.

A jelentősebb hazai rezgésvizsgáló szolgáltatók: A.A. Stádium Kft. (kb. 60-70 % -os piaci részesedéssel), Cordimex Kft. (5-10 %), Energopenta Kft. (10-15 %), Erőkar Rt. (4-6 %), Vibroanalízis GM (8-12 %). A piac maradék kb. 5 %-án 10-12 helyi érdekű szolgáltató tevékenykedik.

(A szerző ezúton kér elnézést azon cégektől, amelyeket ismereteinek hiánya miatt nem vett a felsorolásba.)

## **Összefoglalás, jövőkép**

A rezgésvizsgálatok alkalmazása hazánkban a fejlett ipari államokhoz képest igen mérsékelt, ugyanakkor intenzíven növekvő. A megfelelő technika és technológia használata az előforduló gépészeti hibák igen széles skáláját képes lefedni. A gazdasági és szemléletbeli tendenciáknak köszönhetően a jövőben a karbantartásért és a megbízható üzemelésért felelős műszakiak valamilyen módon minden bizonnyal találkoznak e technikával és az itt leírtaknak remélhetően hasznát veszik.

## **Ajánlott és/vagy felhasznált irodalom**

[1] Lipovszky Gy.-Sólyomvári K.-Varga G.: Gépek rezgésvizsgálata és a karbantartás. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1981.

[2] Moubray, J.: Reliability-centred Maintenance. Butterworth Heinemann, Oxford, 1995.

[3] Mitchell, J.S.: Machinery Analysis and Monitoring, Pennwell Books, Tulsa, 1993.

[4] Taylor, J.I.: The Vibration Analysis Handbook, VCI, 1995

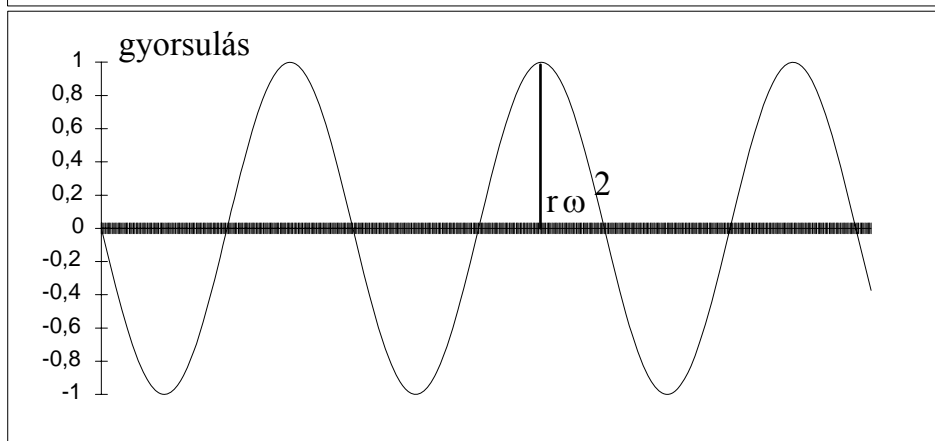
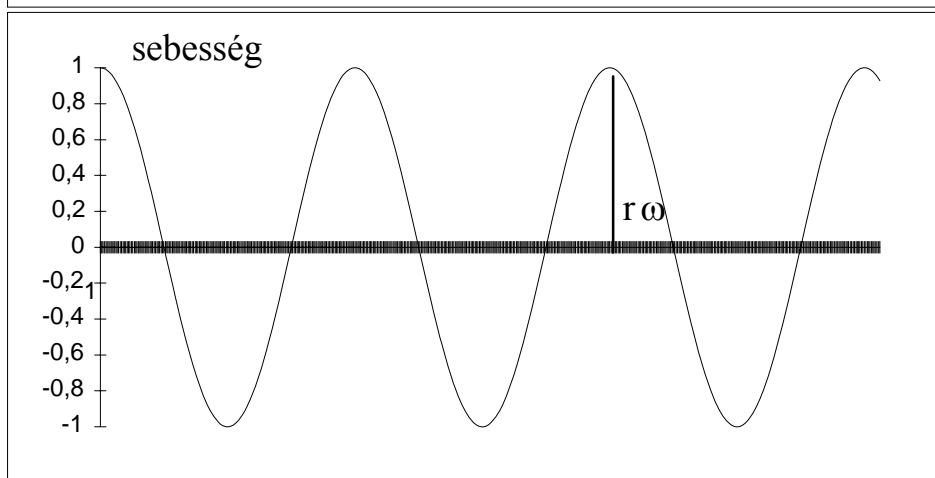
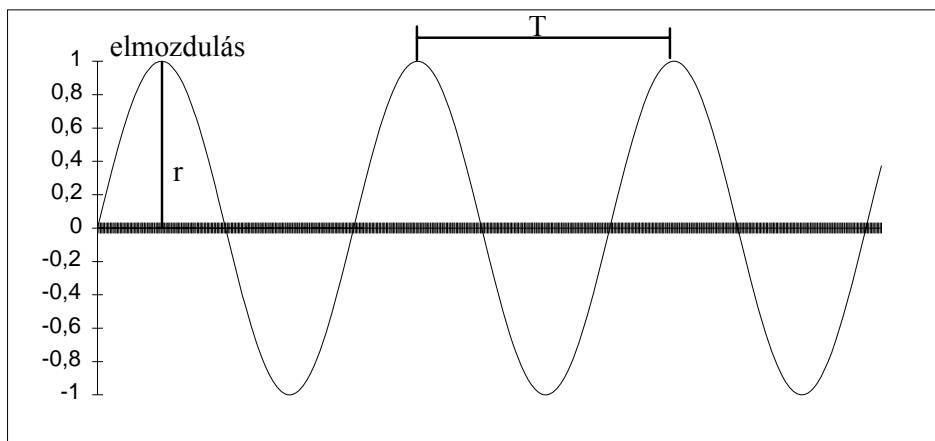
[5] Péczely Gy.: Nagy és változtatható teljesítményű centrifugálszivattyúk rezgésvizsgálata. BME doktori disszertáció, Budapest, 1995.

[6] Péczely Gy.: Műszaki állapotvizsgálat és a karbantartás helyzete Magyarországon -1996 UNIDO felmérés. ENERGOREP '96 konferencia, Siófok, 1996.

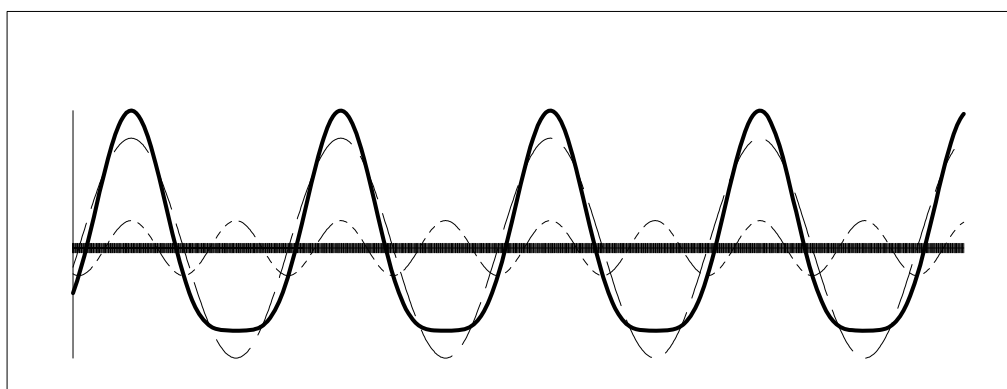
[7] Tímár Peregrin L. - Fazekas és társai: Villamos gépek zaja és rezgése. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1986.

[8] Péczely Gy.: A rezgésvizsgálat és a karbantartási menedzsment lehetőségei, Karbantartás és Diagnosztika, 1. évf. 4.sz., Szeged, 1994.

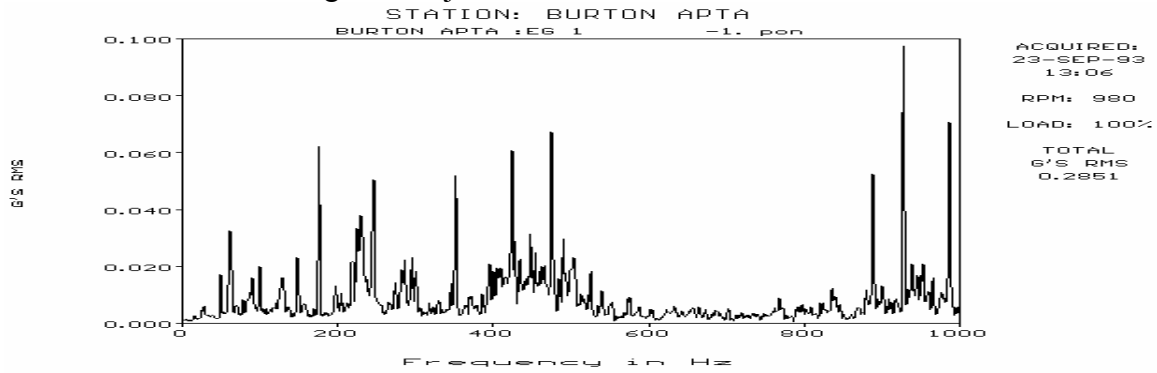
[9] Péczely Gy.: Rezgésvizsgáló eredmények dinamikus kiértékelési módszere, Gép (Budapest), 1987.10.



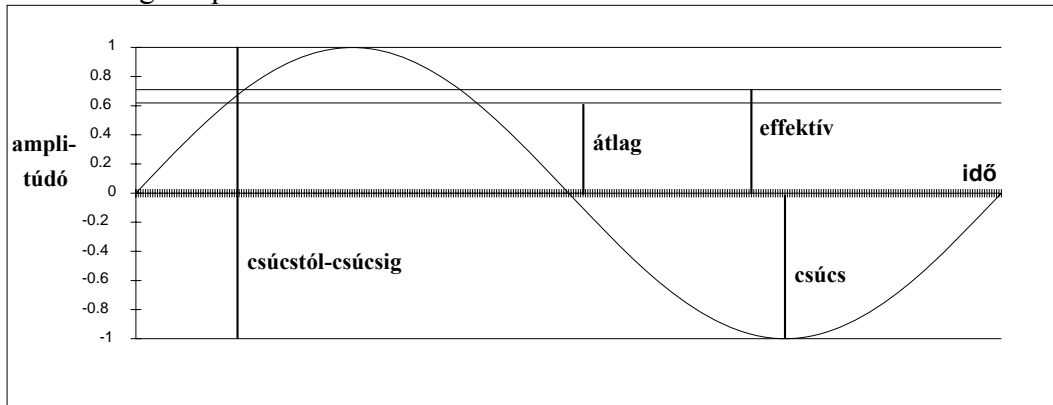
1. ábra A rezgés szinuszos jellege - elmozdulás, sebesség és gyorsulás



2. ábra Két szinuszos rezgés eredője



3. ábra rezgési spektrum



4. ábra: A csúcs-, átlag- és RMS értékek egy szinuszhullám esetében

A rezgés-erősség tartománya	A gép minősítése (osztály) (effektív rezgésebbesség mérés 10-1000 Hz közt mm/s-ban)					
	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
0,28	JÓ	JÓ	JÓ	JÓ	JÓ	JÓ
0,45						
0,71						
1,12	M	M	M	M	M	M
1,8						
2,8	MM	MM	MM	MM	MM	MM
4,5						
7,1	ROSSZ	ROSSZ	ROSSZ	ROSSZ	ROSSZ	ROSSZ
11,2						
18,0						
28,0	ROSSZ	ROSSZ	ROSSZ	ROSSZ	ROSSZ	ROSSZ
45,0						
71,0	ROSSZ	ROSSZ	ROSSZ	ROSSZ	ROSSZ	ROSSZ

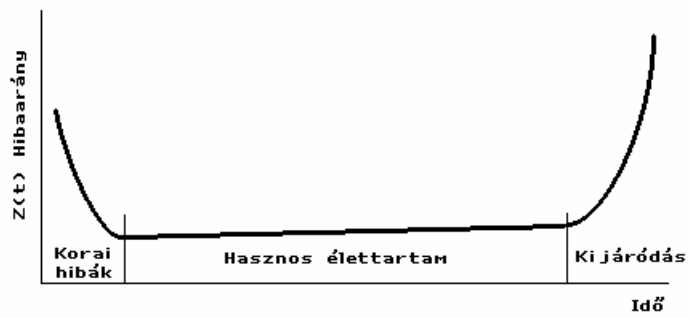
JÓ: A gép állapota jó, megbontása káros

M: Megfelelő - a gép megbontása felesleges

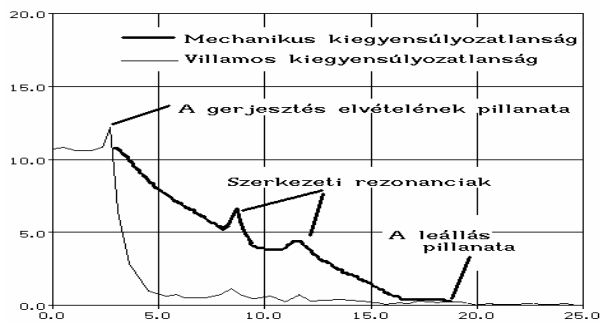
MM: Még megfelelő - a gépet nagyjavításakor érdemes megbontani, máskor nem

ROSSZ: A gép megbontása indokolt

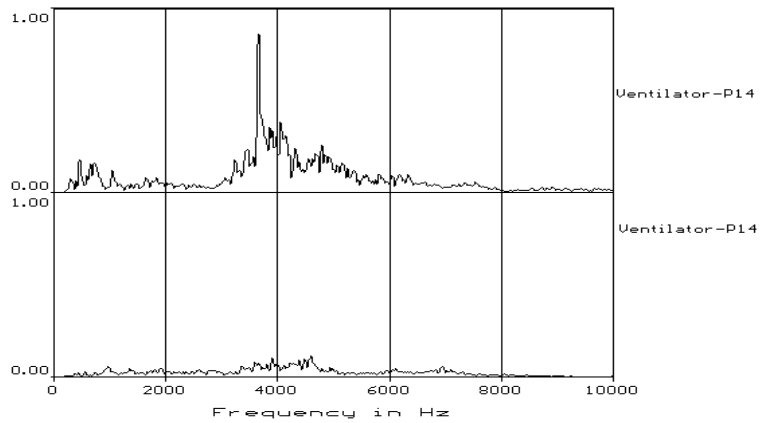
5. ábra Gépek minősítése rezgés-erősség szerint



6. ábra A kádgörbe



7. ábra Rezgési viselkedés a gerjesztés elvételét követően mechanikus illetve villamos eredetű kiegyensúlyozatlanság esetén



8. ábra Gördülőcsapágy rezgési spektruma kenés előtt és után