

Két még nem elterjedt technika: időjel elemzés és ütésimpulzus vizsgálat

dr. Péczely György

A.A. Stádium Kft

H-6701 Magyarország, Szeged, pf.: 1181

Bevezetés

A műszaki rezgésvizsgálatok közel hat évtizedes múltja egyes technikákat felemelt, másokat elfeledtetett. Létezik néhány olyan vizsgálati módszer is, amelyek elméletben már régóta a rendelkezésünkre álltak, de a beszerezhető műszerezettség alkalmazásukat nem segítette.

A műszeres rezgésvizsgálatok egyik jelentős lépése az volt, amikor a rezgésnagyság-idő síkból sikerült átjutni a rezgésnagyság-frekvencia síkba. Az összetettségük miatt nehezen értelmezhető rezgési időjelek (time waveforms) a frekvencia-magítúdó síkon tisztán/világosan elemezhetőek. Évtizedekig számos tankönyv az időjel megjelenési formát, mint rosszul kezelhető, gyakorlatilag értékelhetetlen és ezért értéktelen információt kezelte. A valóságban számos olyan esettel találkozunk a gyakorló rezgésdiagnosztá, ahol az időjel elemzésének fontossága messze meghaladja a spektrumét.

Különböző szerkezetek sajátfrekvenciáinak megállapítása több szempontból is fontos. Segíthet a kialakuló hibák időbeni felismerésében, útmutatót adhat a vizsgált rendszer átalakításához, pontosíthatja a rezgésvizsgálat alapján kialakított diagnózist. Forgó gépeknél gyakori rezonancia frekvencia megállapítási módszer a felfutás-leállás vizsgálat, míg a tartályok, csővezetékek mechanikai elemzését a külső gejesztéses eljárások segítik. Ez utóbbiak közül a legegyszerűbb és a legkönnyebben elvégezhető az ütésimpulzussal történő gerjesztés. Ez a vizsgálat igen gyors műszerezettséget és bizonyos elméleti megfontolások meglétét igényli. E módszer egzakt elvégzéséhez szükséges a vizsgált rendszerben levő nem-linearitások és zavarok felismerése.

Az időjelek vizsgálatáról

A rezgési időjel és a spektrum: a harmonikus rezgőmozgás a kitérés, a sebesség vagy a gyorsulás legnagyobb értékével és a körfrekvenciával (illetve a rezgésszámmal vagy a rezgési ciklus idejével) egyértelműen megadható. Ha a rezgés nem tiszta szinuszos, akkor valamivel többet jelent az effektív érték.

$$y = A * \sin \alpha * t,$$

ahol y a tömegpont t időpontbani kitérése

A a legnagyobb kitérés, azaz a harmonikus rezgés elmozdulás amplitúdója

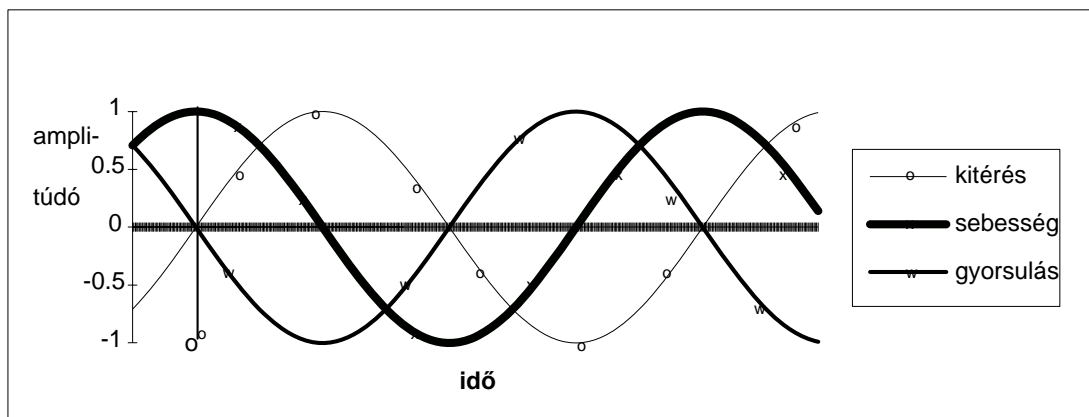
α a lengőrendszer saját lengésének a körfrekvenciája

A harmonikus rezgőmozgás $y = A * \sin \alpha * t$ kitérésének a sebesség az első, a gyorsulás pedig a második idő szerinti differenciálhányadosa:

$$v = dy/dt = \alpha A \cos \alpha t$$

$$a = d^2y/dt^2 = -\alpha^2 A \sin \alpha t$$

Az 1. ábra a kitérés, sebesség és gyorsulás viszonyát mutatja.

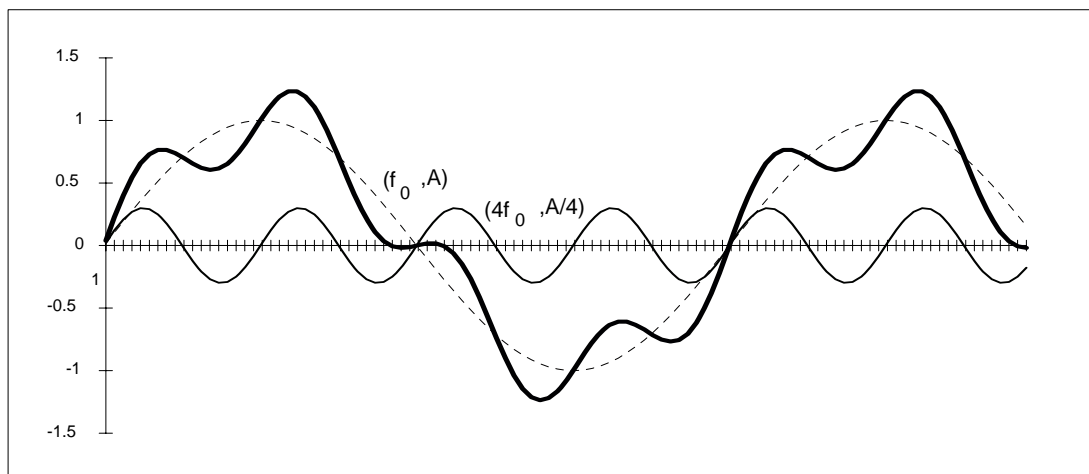


1. ábra A kitérés, a sebesség és a gyorsulás időbeni kapcsolata

Az effektív érték gyorsulás esetén a következő:

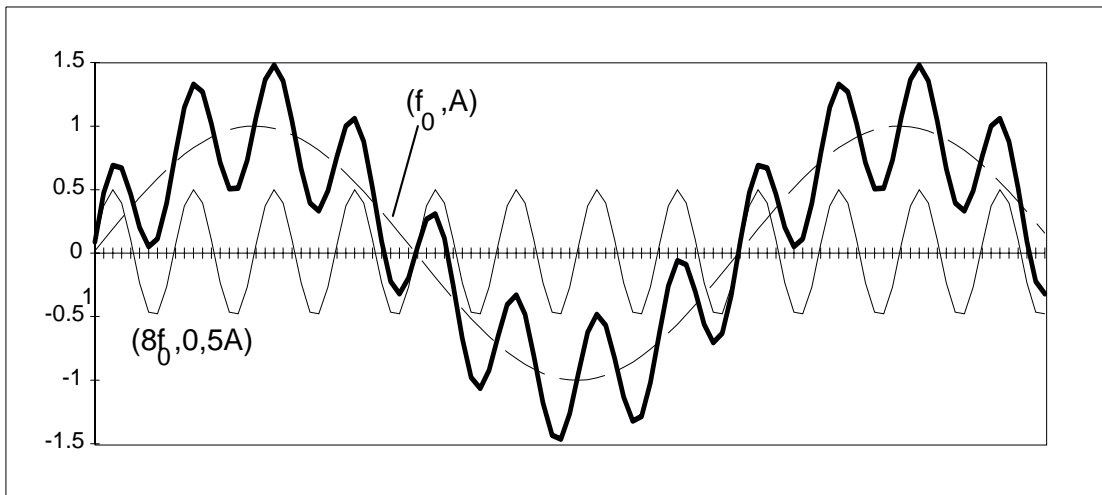
$$a_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt}$$

A valóságban igen ritka az, hogy csak egyetlen szinuszos jellegű rezgés jelentkezzen a vizsgált objektumon. Több rezgésösszetevő együttese már vizuálisan nehezen értelmezhető időjelet eredményez, mint azt a 2. ábra mutatja.



2.a. ábra Két tisztán szinuszos jellegű rezgés és összege ($y_1 = A \cdot \sin \alpha \cdot t$ és $y_2 = A/4 \cdot \sin \alpha \cdot 4 \cdot t$)

A vizuálisan nehezen elemezhető időjelből Fourier analízissel állíthatjuk elő a rezgési spektrumot, amelynek interpretálhatósága lényegesen egyszerűbb.



2. b. ábra Két tisztán szinuszos jellegű rezgés és összege ($y_1 = A \cdot \sin \alpha \cdot t$ és $y_2 = A/2 \cdot \sin \alpha \cdot 8 \cdot t$)

Időjelből spektrum: a Fourier analízis segítségével a tetszőleges $y(t)$ periodikus rezgés harmonikus összetevőkre bontható:

$$y(t) = y_0 + \sum_{i=1}^{\infty} y_i \sin(2\pi i f_0 t + \phi_i)$$

,ahol y_0 a jel aritmetikai középértéke (többnyire zérus)
 y_i a harmonikus összetevő amplitúdója
 ϕ_i a $t=0$ pillanathoz tartozó fázishelyzet
 f_0 a periodikus jel alaphfrekvenciája

A többi összetevő frekvenciája az alapharmonikus frekvenciájának egészszámú többszöröse. A periodikus jelet rendszerint véges (n) számú összetevővel közelítik meg. Az összetett periodikus rezgés tehát összetevőkkel is megadható, ami a frekvenciaspektrummal ábrázolható.

Spektrum: rezgési folyamat különböző frekvenciájú összetevőinek összesége. A spektrumban a derékszögű koordinátarendszer abszcisszájára a frekvenciát (vagy a percenkénti ciklusszámot), ordinátájára pedig az összetevők amplitúdóját vagy effektív értékét mérik. Periodikus jel esetén vonalas színeképet kapunk.

Sok esetben a mért jel nem periodikus. Ha az összetevők száma n , akkor

$$y(t) = \sum_{i=1}^n y_i \sin(2\pi i f_i t + \phi_i)$$

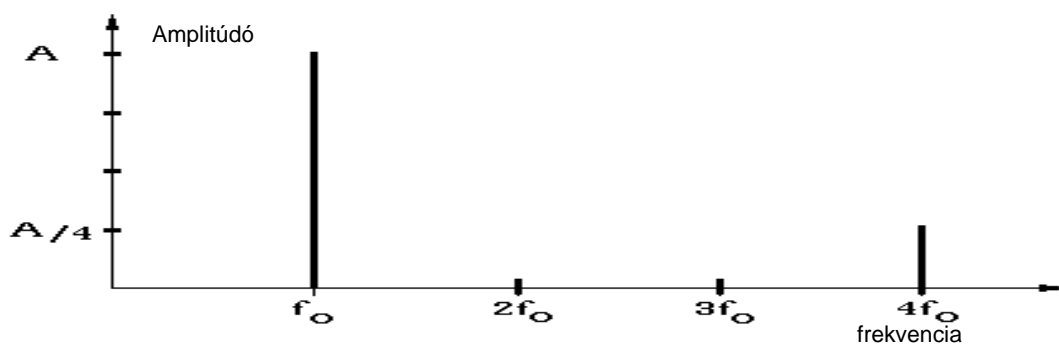
Az f_i a rezgéskeverék egyes összetevőinek frekvenciája. Sztochasztikus rezgéskeverékek frekvenciaspektruma többnyire folytonos.

A frekvenciaanalízis a diagnosztikai rezgésvizsgálat fontos eszköze, ugyanis ezzel a módszerrel lehet felismerni a különféle frekvenciájú rezgésforrásokból származó jeleket.

A 3. ábra a 2. ábrán bemutatott két időjel keverék rezgési spektrumát mutatja be.



3.a. ábra Két szinuszos jellegű rezgés spektruma ($y_1 = A \sin \alpha t$ és $y_2 = A/2 \sin \alpha 8 t$)



3. b. ábra Két tisztán szinuszos jellegű rezgés spektruma ($y_1 = A \sin \alpha t$ és $y_2 = A/4 \sin \alpha 4 t$)

A hagyományos felfogás szerint a rezgési spektrum frekvenciái segíteneik a hiba azonosításában, míg az amplitúdók annak súlyosságáról adnak információt, az időjel csak "feldolgozandó nyersanyag".

A valóság ezzel szemben az, hogy ez a felfogás csak az olyan eseményeknél alkalmazható megbízhatóan, ahol a rezgés a mérés alatt nem változik.

1. példa: fogaskerekes hajtómű

Vegyünk példának egy fogaskerekes hajtást. A hajtó keréken legyen 19 fog, percnkénti fordulatszáma 1440, a hajtókerék 47 fogú és 582/perc a fordulatszáma. Tételezzük fel, hogy a hajtott kerék egy foga sérült, továbbá mindkét keréken található egy "magas pont", amelyek találkozásakor káros mértékű túlterhelés lép fel. A hajtóműről a rezgési spektrum felvétele tartson 1,6 s-ig.

A mérés ideje alatt mindkét tengely több fordulatot tesz meg (a gyors tengely 38,4-et, a lassú 15,5-öt). A hajtott kerék fogkapcsolódási frekvenciáján a hibás fog hatása csak 2 %-ban érvényesül az össz mért értékben (1/47). A "magas pontok" találkozása csak 82%-os valószínű-

séggel következnek be a mérés ideje alatt.. Bekövetkező találkozás esetén is a gerjesztett magasabb rezgésszint hatása csak 1/730-ad arányban jelenik meg az összképben. Egyik hiba sem jelenik meg tehát a rezgési spektrumban, ugyanakkor bármelyik súlyos havária forrása lehet.

2. példa: lazaság vagy egytengelvűségi hiba

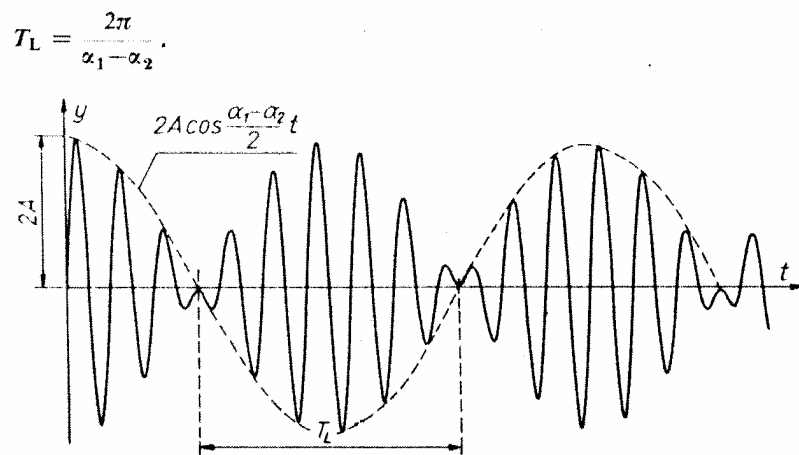
A spektrumban mindkét probléma a fordulatszám (f_0) és első felharmonikusai ($2f_0, 3f_0, \dots$) frekvenciáján jelentkeznek megnövekedett amplitúdóval.

A tengelykapcsolat hibánál az időjelben a $2f_0, 3f_0$ forgási frekvenciának megfelelő csúcsok egymáshoz képest szabályos távolságokra helyezkednek el. A hullámok alakja és magassága is közel teljesen megegyező (pl. a három csúcs közül az egyik rendre magasabb a többinél). Nincs kiemelkedően magas csúcs.

A fellazulás esetében a fő csúcsok távolsága kevésbé meghatározott. A hullámok alakja eltérő és egyes csúcsok akár 5-8 g magasságot is elérhetnek.

3. példa: lebegés

A lebegést közel azonos frekvenciájú hullámok egymásra hatása okozza. Amikor a jelek fázisban közel kerülnek egymáshoz, akkor erősítés, ellenkező esetben gyengítés lép. Felismerése a spektrumból megoldatlan.



4. ábra Ha két harmonikus összetevő körfrekvenciája csak kevésbé tér el egymástól lebegés jön létre

Egy 1460/perc ($f_{0,1} = 24,33$ Hz) és egy 1480/perc ($f_{0,2} = 24,66$ Hz) fordulatszámú berendezésnél a lebegési idő ($T = 1/\Delta f$) 3 s. A gyakorlatban a jelenség 3 másodpercenként érezhető rezgés felerősödésként/gyengülésként jelentkezik. A legnagyobb létrejövő amplitúdó az egyes amplitúdók számtani összege. A rezgési spektrumban f_0 -on látható magnitúdó nagysága alapján a diagnosztika téves következtetésre jut, hiszen a mért érték nincs lineáris kapcsolatban a gépben keletkező gerjesztő erővel. A lebegés mindezekén túl a berendezések fokozott igénybevételét is eredményezi, tehát felismerése mindenképp kívánatos.

4. példa: dugattyús (reciprokáló) berendezések állapotértékelése

A körfolyamat egyes pillanataiban a dugattyús berendezések egyes elemei működnek, mások nem, illetve hogy a működő elemek terhelése is változik a ciklus alatt. Mindezeket a megfontolásokat figyelembe véve könnyen belátható, hogy a dugattyús berendezés állapotértékelése pusztán a rezgési spektrum alapján nehéz.

5. példa: Az időjel analízis jelentősége gördülőcsapágy hibák kimutatásában

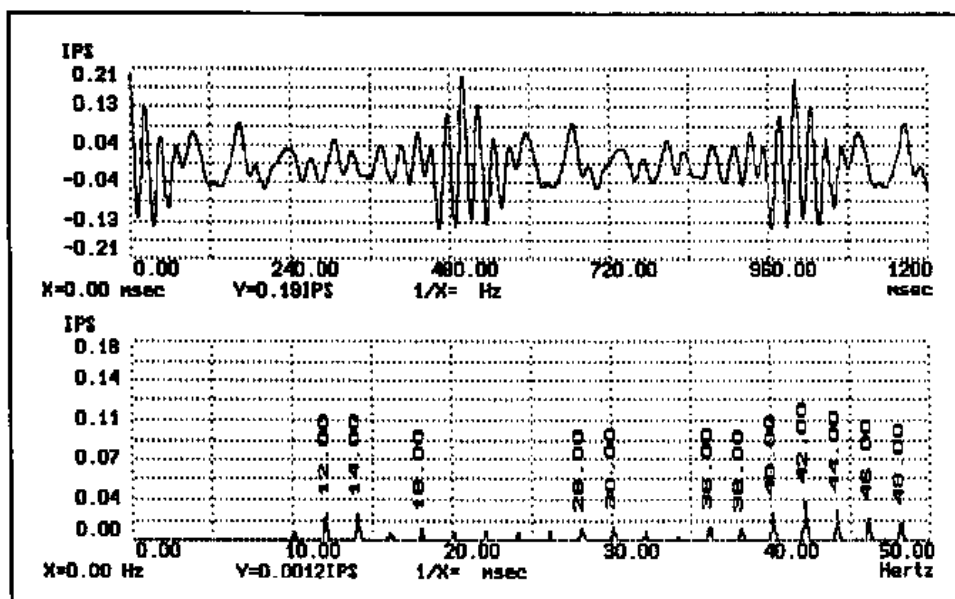
Egyes gördülőcsapágy hibák felismeréséhez szükséges az időjel vizsgálata. Ha a csapágy terhelt zónájában egy gördülőelem futófelületi hibán halad keresztül, vagy egy gördülőelem hiba érintkezik a futófelülettel impulzus keletkezik. Ez azonban nem feltétlenül eredményezi spektrumcsúcs megjelenését a csapágytípus ismeretében kiszámítható frekvenciákon. A csapágy terhelt zónájának nagysága jelentős mértékben függ a csapágy típusától, elrendezésétől, terhelési viszonyaitól. Tisztán radiális terhelés esetén a terhelt zóna szűk szögterületre esik, míg nagy axiális terhelésnél ez 360° is lehet.

Ha a csapágy külső futópályáján, a terhelt zónában sérülés van (ez a gyakori eset álló külső gyűrű esetén), azon minden gördülő elem áthaladásakor impulzus jön létre, ami a jellemző csapágyfrekvencián (BPFO) gerjeszt, tehát a spektrumban általában jól észrevehető. Ezzel szemben egy kisebb kiterjedésű belső gyűrű hiba, például repedés csak akkor hoz létre impulzust, ha a terhelt zónában gördülőelemmel találkozik, így szűk terhelt zóna esetén sok esetben csak fordulatonként egyszer. Ilyenkor nem jelenik meg a hibára jellemző csapágyfrekvencia (BPFI), az alapfordulati spektrumcsúcs pedig nem nő meg számottevően (ha meg is nőne, sem gondolnánk csapágyhibára, hisz ez a frekvencia számos más gyakori hiba megjelenési helye).

A gördülőelem frekvenciák (BSF) megjelenése is ritka. Ennek három fő oka:

1. Gyakran a teljes gördülőelem felülete sérült (hengergörgős csapágyak), ilyenkor csak az általános zajszint emelkedik a spektrumban.
2. A gördülőelem hiba csak akkor kelt impulzust, ha a terhelt zónában a futófelülettel érintkezik, ez sokszor csak fordulatonként egyszer következik be.
3. Golyóscsapágy esetén a golyó több fordulaton keresztül is foroghat úgy, hogy a hiba nem is érintkezik a futófelületekkel.

Az időjel alkalmazásának még sok egyéb példája ismert. Gépi megmunkáláskor a szerszám rendellenes ütődéses mozgása a munkadarabon, gyorsan változó fordulatszámú berendezésnél a helyi rezonancia problémák felismerése, időszakos ütődések, súrlódások felismerése mind e módszerrel ismerhetők fel. Az időjel elemzése mindezekén túl sok esetben segít a spektrum megfelelő értelmezésében.



Az ábrán egy belső gyűrű repedéses csapágy frekvencia spektruma és időjele látható. A fordulatszám 2 Hz a BPFI 17.6 Hz. Megfigyelhető, hogy fordulatonként csak egy impulzuskeletkezik, és a spektrumban nincs jelen a BPFI.

5. ábra Gördülőcsapágyról felvett időjel és spektrum

Az ütészvizsgálatokról

A rezgésdiagnosztika eszköztárának másik, még nem kellően alkalmazott lehetősége a külső gerjesztéses vizsgálatok közé tartozó ütészvizsgálat.

A forgógépek, szerkezetek rezgészvizsgálatánál gyakori jelenség a rezonancia kialakulása. Szerencsés esetben a gerjesztő erőt adó gép a rezonanciaponton csak áthalad felfutás vagy leállítás közben, rosszabb esetben annak közelében vagy épp azon üzemel.

A rezonanciaponton való áthaladás a forgórészre, az egész berendezésre és a környezetre is veszélyes lehet. A szükséges óvintézkedések megtételéhez mindenképpen szükséges tudni, hogy a forgórész mikor, milyen módon halad át a rezonanciaponton vagy pontokon.

Más esetben a rezonanciapont eltolódása adhat arról információt, hogy a vizsgált egység mechanikai állapota megváltozott.

Előfordulhat az is, hogy a berendezésen vagy annak egy részén, átalakítást kívánnak végrehajtani (pl. az alapozás tömegét növelni). Mivel az átalakítás a rezonanciapontot becsülhető irányban eltolja, ezért szükséges tudni, hogy a rezonanciapont és a főbb gerjesztések

jesztési frekvenciák hogyan helyezkednek el egymáshoz képest. Ebben az esetben az átalakítás veszélytelenségének vagy épp veszélyességének előrejelzése a cél.

A rezonanciafrekvenciák megállapítására több eljárás is elterjedt:

- a számításmódszerek közül a legismertebb a végeselemes modellezés;
- a kísérleti eljárások közül egyszerűbb esetben impulzusszerű gerjesztésnek (pl. kalapácsütés) teszik ki a rendszert és a válaszfüggvényből következtetnek a rezonanciafrekvenciákra;
- bonyolultabb eset, amikor a bemenő jelet pl. egy erőmérő szondával, a válaszfüggvényt gyorsulásérzékelővel mérik és a két jel hányadosából határozzák meg akár a mobilitás (rendszer válasz/input erő), akár pedig a mechanikai impedancia (input erő/rendszer válasz) függvényét;
- lehetséges külön e célra kifejlesztett rezgéseltetővel is gerjeszteni a vizsgált tárgyat, amelyre szinte tetsző szerinti bemenő jelet vihetünk fel.

Míg a számításmódszer igen nagy munkaigénnyel jár és sok a tévesztési lehetőség, a bonyolultabb módszerek esetén a műszerezettség erőteljes kiterjesztése szükséges; az ütésimpulzusos módszerrel pedig egy nagytömegű és bonyolult geometriájú berendezés hatékonyan nem gerjeszthető, ráadásul nagysebességű valós idejű analízist igényel.

Statikus és dinamikus merevség

A rendszer merevségét vagy statikus merevségét az egységnyi elmozduláshoz szükséges erő mértékével határozhatjuk meg: $K = F/X$

,ahol $K =$ merevség (N/m)
 $F =$ erő (N)
 $X =$ elmozdulás (m)

A szerkezetek dinamikus válasza nagyon alacsony frekvenciás terhelés esetén megegyezik a statikus válasszal. Amennyiben a terhelés frekvenciája növekszik, a merevség megváltozhat a statikus állapothoz képest. A viselkedést ebben az állapotban a dinamikus merevség írja le: $K_d(f) = F(f)/A(f)$

,ahol $K_d(f) =$ dinamikus merevség egy adott frekvencián (N/m)
 $F(f) =$ erő ugyanazon a frekvencián (N)
 $A(f) =$ elmozdulás ugyanazon a frekvencián (m)

Attól függően, hogy a választ elmozdulásban vagy sebességben vagy gyorsulásban mérjük és a válaszhoz viszonyítjuk e a gerjesztést vagy fordítva a dinamikus viselkedést hat formában írhatjuk le:

- Gyorsulékönyság (g/N) = gyorsulás/erő
- Hatékony tömeg (N/g) = erő/gyorsulás
- Mobilitás (m/Ns) = sebesség/erő
- Mechanikai impedancia (Ns/m) = erő/sebesség

- Dinamikus engedékenység (m/N) = elmozdulás/erő
- Dinamikus merevség (N/m) = erő/elmozdulás

A felsorolt tényezőket gyűjtő néven *Frekvencia Válasz Függvénynek* nevezzük, angol utáni rövidítésük *FRF*. Hat megjelenési formáját az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat A frekvencia válasz függvény hat formája

Válasz jellemző	Válasz/Bemenő erő	Bemenő erő/válasz
Gyorsulás	Gyorsulékönység	Hatékony tömeg
Sebesség	Mobilitás	Mechanikai impedancia
Elmozdulás	Dinamikus engedékenység	Dinamikus merevség

Az *FRF* jellemző a **lineáris** dinamikai rendszerben független a gerjesztés típusától. Az idő szempontjából a gerjesztés lehet harmonikus, véletlenszerű vagy tranziens. A gerjesztéssel elért vizsgálati eredményekből megbecsülhetjük azokat a válaszokat, amelyeket a rendszer más gerjesztés esetén eredményez. Az impulzus kalapáccsal végzett gerjesztés a tranziens gerjesztések osztályába sorolható. A frekvencia válasz információt ez a vizsgálat adja meg a leggyorsabban és legegyszerűbben, ugyanakkor a kapott eredmények megbízhatóak. Más oldalról az ütéssel gerjesztési technika nem való a nem-lineáris rendszerek vizsgálatához mivel a gerjesztési csúcserték aránya az összes bevitt energiához viszonyítva nagyon magas. A szerkezeti nem-linearitásra tipikus példa a részek közötti hézag vagy fellazulás, nemlineáris a csillapítás a mechanikus kötéseknel és terhelésfüggő a merevség. Azok a rendszerek, amelyekről tudott a nem-linearitás nem tesztelhetők eredményesen ütésimpulzus módszerrel.

Az ütésimpulzos vizsgálat módszere értelemszerűen a kevés összetevőt tartalmazó, egyszerűbb rendszereknel terjedt el, forgógépeknél kevésbé. A diagnosztika gyakran kerül szembe olyan problémával, amikor egy csővezetés, tartály, tartó, befogott szerszám rezgési, fáradásos törési problémáját kell megoldania. Az ilyen esetek leggyakrabban rezonanciával kapcsolatosak, aminek a frekvenciáit a helyes problémamegoldáshoz feltétlenül ismerni kell.

6. példa: gyakori szerszámtörés

Egy gépi megmunkáló rendszerben a munkadarab mozgási irányához képest az orsó 45 fokos helyzetű és hátsó részén rögzített. Az orsónál gyakran eltört a szerszám. Az ellenőrző dinamikus merevségvizsgálat kimutatta, hogy a gyakori szerszámtörés oka a nem megfelelő orsó rögzítési megoldás.

A megmunkálás során fellépő ütődések és egyéb zavar hatások rezonanciát gerjesztettek, ami a szerszám csekély csillapítottságú rezgési mozgását eredményezte, a munkadarabot befogása viszont megfelelő dinamikai merevségű volt. A befogó rendszer módosítása drasztikusan csökkentette a szerszámtörések számát.

7. példa: szerszám átvétel

Egy cég nagy mennyiségben vásárolt orsókat, amelyek élettartama igen eltérő volt. Amikor a beérkező orsókat dinamikusan ellenőrizték kiderült, hogy a terhelés hatására mért statikus behajlásuk meglehetősen egységes mértékű. A látszólag teljesen egyforma orsók azonos mérési körülmények között azonban eltérő viselkedést mutattak a dinamikai merevség tekintetében. Az orsók üzemi életének figyelemmel kísérése bebizonyította, hogy a csekélyebb merevségű orsóknál több volt az idő előtti tönkremenetel. E felismerés alapján történt a jövőben a szerszámok átvétele, ami a cégnek jelentős megtakarítást eredményezett.

8. példa: összetett rendszer részleges rezonanciája

Rezonancia vizsgálatok esetében sokszor nem elég a rezonanciában való üzemelés tényét megállapítani, hanem fel kell ismerni azt az elemet, amely sajátfrekvenciája megegyezik a gerjesztő frekvenciával.

Problémát ez akkor okoz, ha a gerjesztőt nem lehet elhangolni. (Pl.: Egy motor fordulatszámának megfelelő frekvencián gerjeszt, de a technológia nem engedi meg ennek a fordulatszámnak a csökkentését illetve növelését.)

Egy palackozóüzem egyik zárógépén működés közben káros rezgések léptek fel, amelyek a termelést közvetlenül nem befolyásolták, de féltő volt, hogy a fokozott dinamikus génybevétel géptörést okozhat. A rendszer felfutás-leállás vizsgálata kimutatta, hogy rezonanciában üzemel a gép. A fordulatszám elhangolása a gép hajtásának bonyolultsága miatt nem jöhetett szóba. A feladat ezért a rezonáló elem felismerése és javaslat adás a szerkezet módosítására.

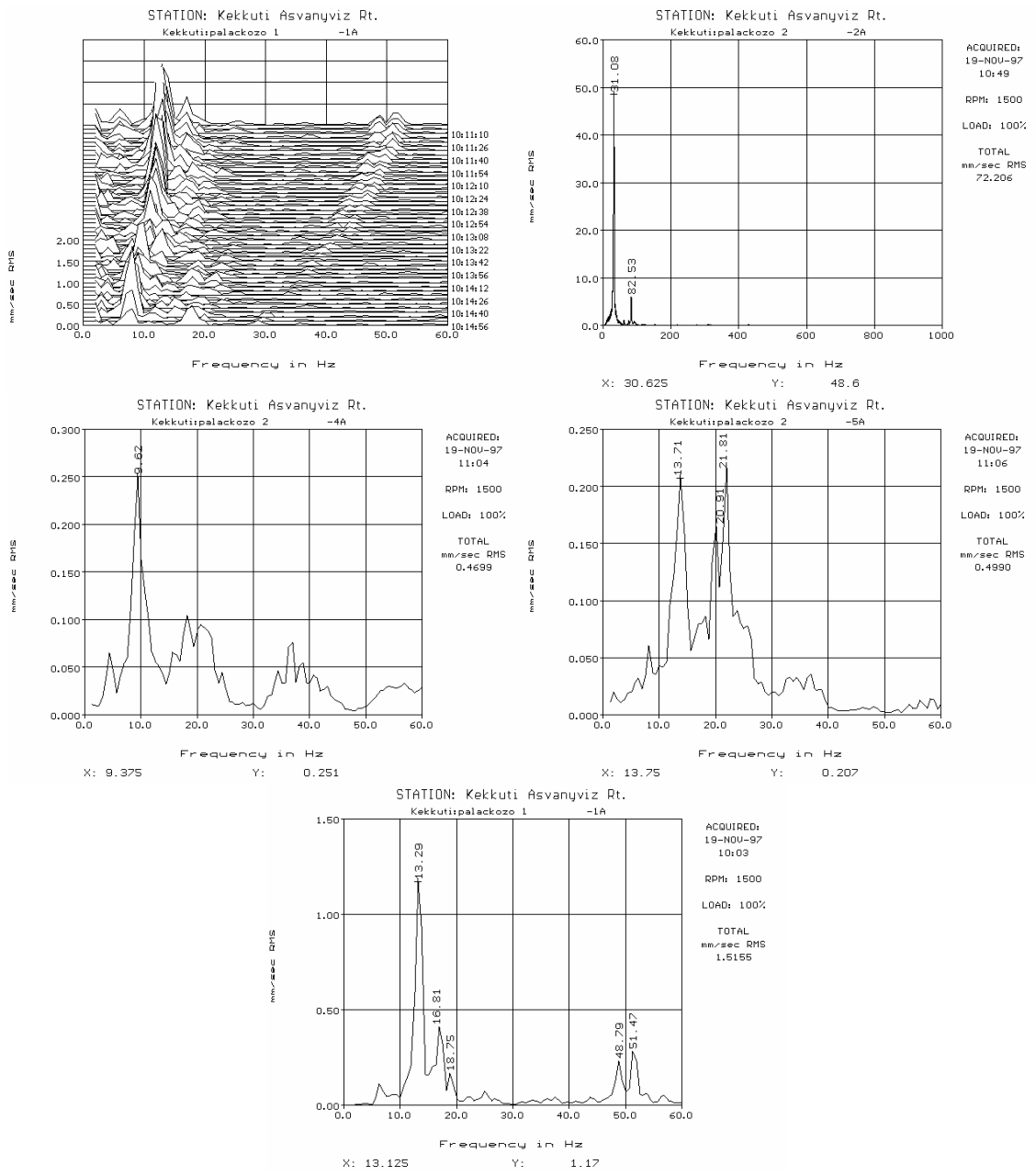
A rezonáló elem azonosításához ütésimpulzus tesztet végeztünk. A gerjesztést (az ütések) gumikalapáccsal hoztuk létre. A vizsgálatot minden statikailag különálló darabon elvégeztük a tér három irányában. A többirányú gerjesztést az indokolja, hogy a testeknek egymásra merőleges irányokban más-más lehet a sajátfrekvenciája, ("más mánagon szólalnak meg").

A vizsgálatok kimutatták, hogy a kupakolófej tartószerkezetének a sajátfrekvenciája az ütésimpulzus teszt szerint 13,7 Hz. A probléma érdekessége, hogy mivel ez a tartó nagyon merev senki sem gyanakodott rá a vizsgálatok előtt. A mérés kétséget kizáróan a valós tényeket rögzítette. Javasoltuk a tartó szabad végének egy fix részhez történő rögzítését, ami kellően elhangolta a fordulatszám közeléből a tartó sajátfrekvenciáját.

A 6. ábra a leállásvizsgálat és az ütésgerjesztéses vizsgálatok eredményét mutatja

Összefoglalás

Az előadás két általánosságban nem elterjedt diagnosztikai segédeszközt mutatott be néhány kapcsolódó példával. E módszerek nem helyettesítik, hanem az esetek többségében kiegészítik a spektrumanalízises rezgésvizsgálatokat. Egyes problémák azonban a spektrumanalízissel egyáltalán nem mutatható ki, míg e módszerekkel könnyen felismerhetők.



6. ábra Palackozógép vizsgálatának néhány spektruma