

A rezgésdiagnosztika szerepe
az erőművi turbina-generátor
gépcsoportok karbantartásában

Készítette:

Kiss Attila
labor vezető mérnök

2001. szeptember

Tartalomjegyzék:

1. Bevezetés	3. oldal
2. Diagnosztikai módszerek	4. oldal
3. Diagnosztika rezgésméréssel	4. oldal
3.1. Forgógépek rezgései	6. oldal
3.2. Gépállapot értékelés csapágybak rezgésszint mérésével	8. oldal
3.3. Gépállapot értékelés relatív tengelyrezgés mérésével	9. oldal
3.4. Spektrumanalízis	12. oldal
3.4.1. A spektrumanalízis segítségével azonosítható géphibák	14. oldal
3.4.2. A spektrumanalízis előnyei és korlátjai	17. oldal
3.5. A dinamikai viselkedés mérése öngerjesztéssel	18. oldal
3.5.1. Az öngerjesztés méréseiből levonható következtetések	19. oldal
3.5.2. Az öngerjesztés mérési eredményeinek trendje	23. oldal
3.6. A dinamikai viselkedés mérése külső gerjesztéssel	26. oldal
4. Végző következtetések, összefoglalás,	29. oldal

A rezgésdiagnosztika szerepe az erőművi turbina-generátor gépcsoportok karbantartásában

1. Bevezetés

A rezgésdiagnosztika a forgógép karbantartás olyan ágazata, amely nagyon sokrétűen és dinamikusán fejlődik. A gyors fejlődés a gazdasági, megbízhatósági követelmények növekedésének tulajdonítható.

Korábban a turbógépcsoportokat kizárólagosan előre meghatározott ciklusidő szerint javították, mely tervszerű megelőző karbantartási rendszer bizonyos fokig mind a gyártó, mind az üzemeltető érdekeit szolgálta, de – különösen, ha az üzemeltető szempontjait nézzük - nem volt elég hatékony.

Az időfüggő, megelőző, vagy preventív karbantartás esetén a javítási ciklusidőket úgy választották meg, hogy rövidebb legyen, mint a berendezés meghibásodási gyakorisága. A javításra tartalék alkatrészekkel, szakmunkásokkal, stb. előre lehetett készülni, így biztosítható volt a rövid javítási idő és nagy valószínűséggel megelőzhető volt az üzemzavar. Mindezek ellenére gyakran meghibásodások következtek be a betervezett javítási időpont előtt. Ugyanakkor ellen példa is sok akadt, számos esetben a jó állapotú gépeket is – a megelőzés érdekében – szétszerelték, ezzel több problémát, mint hasznot okozva.

A műszaki fejlődés következtében egyre gyorsuló tempóban hódítanak teret az állapotfüggő illetve a teljes körű karbantartási rendszerek. A turbógenerátorok meghatározott paramétereinek a rendszeres vagy folyamatos figyelése és mérése alapján értékelik, és nagy valószínűséggel előrejelzik a gép állapotát, maradék élettartamát. Ennek a technikának az alkalmazásával biztosítható, hogy csak a műszakilag ténylegesen indokolt esetben kell javítás céljából beavatkozni, ugyanakkor – egy-egy hirtelen fellépő hiba kivételével - általában arra is van elegendő idő, hogy a javításra felkészüljenek.

A tanulmány a turbógépek esetében alkalmazható rezgésdiagnosztikai módszereket tárgyalja, különös tekintettel a hazánkban újabbnak tekinthető tengelyrezgés mérésre valamint a turbinák rendszeres (javítás előtt, után és rezgéselemelkedéskor elvégzendő) dinamikai viselkedés (sokcsatornás, azonos idejű kifutás- és felfutás-) mérésének jelentőségére.

2. Diagnosztikai módszerek

Számos diagnosztikai eljárás áll rendelkezésre a turbógenerátorok esetében:

- Elmozdulások, nyúlások és technológiai paraméterek elemzése.
- Rezgésmérés és analízis
- Zajszint mérés és elemzés
- Olaj analízis
- Anyagvizsgálatok (ultrahang, röntgen...)
- Optikai tesztek (mikroszkóp, endoszkóp...)

Fenti eljárások egy része üzem közben, míg másik része csak a gép megállítása esetén alkalmazható. Az előbbi kategóriába tartozó, viszonylag olcsó és elterjedt eljárás a rezgésdiagnosztika, melynek szerteágazó területei vannak.

3. Diagnosztika rezgésméréssel

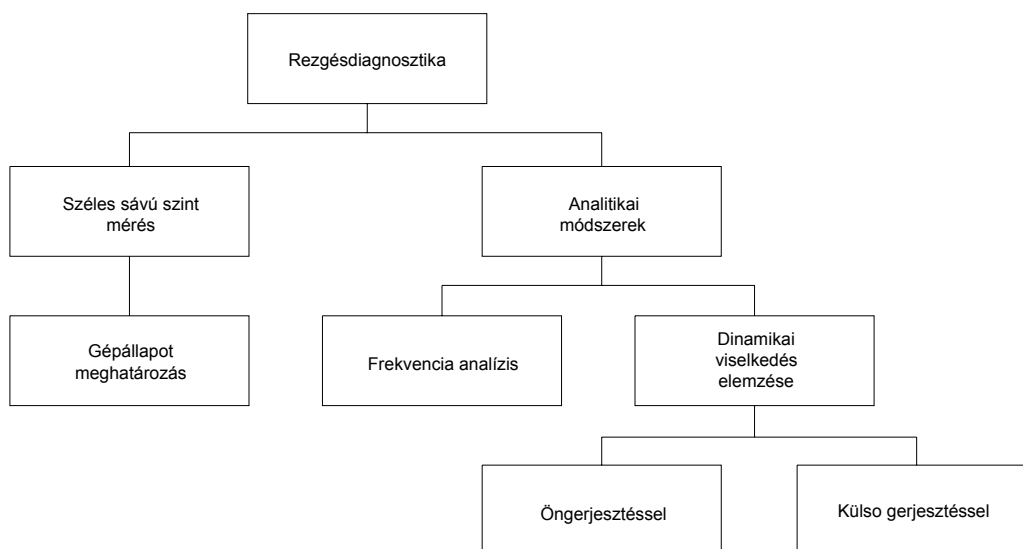
A rezgésdiagnosztika a műszaki diagnosztikának egy speciális ága, amelyik a berendezések dinamikus erőhatásokra keletkező rezgéseinek mérésével és értékelésével foglalkozik. Ezek a rezgések keletkezhetnek a berendezés működése közben, vagy álló helyzetben, külső kényszer-gerjesztések hatására. A rezgésdiagnosztika alkalmas a gép funkcionális, működőképességi ellenőrzésére és alkalmas a berendezés bizonyos részeinek (alkatrészeinek) hiba-megállapítására.

A rezgésmérésen alapuló diagnosztikai mérések két alapvető módszerre oszthatók, úgymint széles sávú szint mérések és analitikai módszerek.

A széles sávú rezgésszint mérések a gépek és egyben turbógenerátorok általános állapotának gyors, olcsó meghatározására szolgálnak. (a széles sávú mérések hasonlóak az orvosi diagnosztikában alkalmazott pulzusszám, vérnyomás vagy hőmérsékletméréshez...). A széles sávú szint mérési eredményeket a fentiekén túl - szabványokban és ajánlásokban

rögzített értékekhez hasonlítva - általában gép védelemre használják, de korlátozott diagnosztikai célokra is alkalmasak.

Az analitikai módszerek az egyedi gép komponensek állapotának, illetve kifejlődő hibáinak korai állapotban történő felismerésére és meghatározására szolgálnak (hasonlóan az orvosi diagnosztikában alkalmazott EKG, EEG, ultrahangos, röntgen, tomográfiai és egyéb eljárásokhoz).



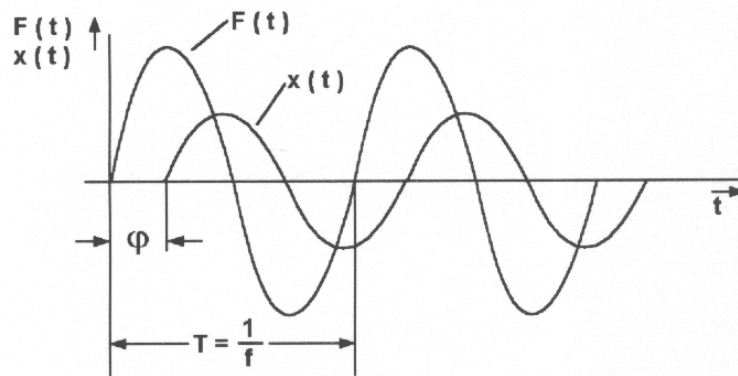
A leggyakrabban használt hibaelemző módszer a rezgések frekvencia analízise vagy más szóval a spektrumanalízis. A módszer rendkívül hatékony, de természetesen vannak – a későbbiekben részletezett - korlátai.

Ha a spektrumanalízis segítségével nem adható egyértelmű, pontos hibadiagnózis (elégg gyakori eset !), akkor szükség lehet a gépek dinamikai viselkedésének elemzésére is.

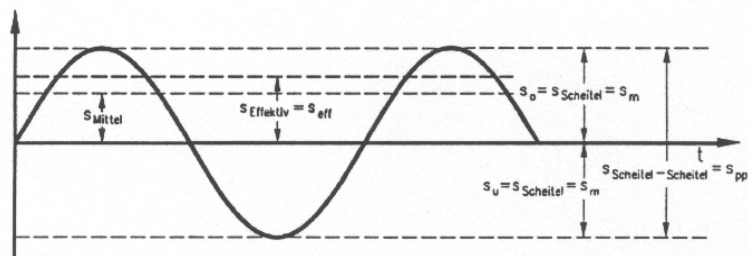
Az öngerjesztéses dinamikai vizsgálat nem áll másból, mint a gép indulása és leállása alatti – általában gyorsműködésű, sokcsatornás - elemzésből. Ilyenkor a belső erőhatások frekvenciája elég gyorsan, széles tartományban változik (az egyensúlyozatlanságból származó erőhatás például nullától a gép fordulatszámának megfelelő frekvenciáig). Ez a mérési módszer számos hibajelenség esetén egyértelművé teszi a diagnózist, csak elenyészően kevés esetben van szükség a rendkívül költséges, ismert erőhatással történő gerjesztésre.

3.1. Forgógépek rezgései

A forgógépek működésekor a belső, dinamikus periodikus erőhatások periodikus rezgéseket keltenek. Minden egyes szerkezeti elem más-más geometriai és fizikai tulajdonsággal, vagyis különböző merevséggel és csillapítással rendelkezik. A forgógépeket és mechanikai szerkezeteket modellezhetjük úgy, vagyis felfoghatjuk egy olyan egységnek, amely a belső dinamikus erőhatásokra - egy csillapított, többszabadságfokú rendszerhez hasonlóan -, valamilyen átviteli függvénnyel meghatározható rezgésválaszt ad.



A gép belső erőhatásairól [$F(t)$] egyszerű eszközökkel nehezen szerezhetők mérhető információk, de a gépen kívül megjelenő rezgésválaszt $x(t)$, annak paramétereit mérni tudjuk, és a kapott eredmények alapján vizsgálhatjuk a rendszert, annak tulajdonságait.



Mérhetjük a rezgési elmozdulást, a rezgéssebességet és a gyorsulást, ezen paraméterek [$x(t)$, $v(t)$, $a(t)$] csúcstól-csúcstól értékeit illetve effektív értékeit, de az effektív rezgéssebesség érték a leggyakrabban mért paraméter, mivel ennek értéke van a

legszorosabb összefüggésben a gépek mechanikai állapotával. Az effektív érték (angolszász irodalomban RMS „Root Mean Square” érték) definíciója:

$$\bar{f}_{eff} = \frac{1}{T} \sqrt{\int_0^T f^2(t) \cdot dt}$$

A rezgéseknél alapvető követelmény, hogy a magas szintértékek mellett az alacsony szintek közötti finom különbségek is kimutathatók legyenek. Ezért logaritmikus léptékű skálát, az ún. decibelszámítást is alkalmazzák, melynek összefüggése a sebesség és a gyorsulás kifejezésére a következő:

$$L_v = 20 \cdot \lg \frac{v}{v_{ref}} \text{ [dB]}$$

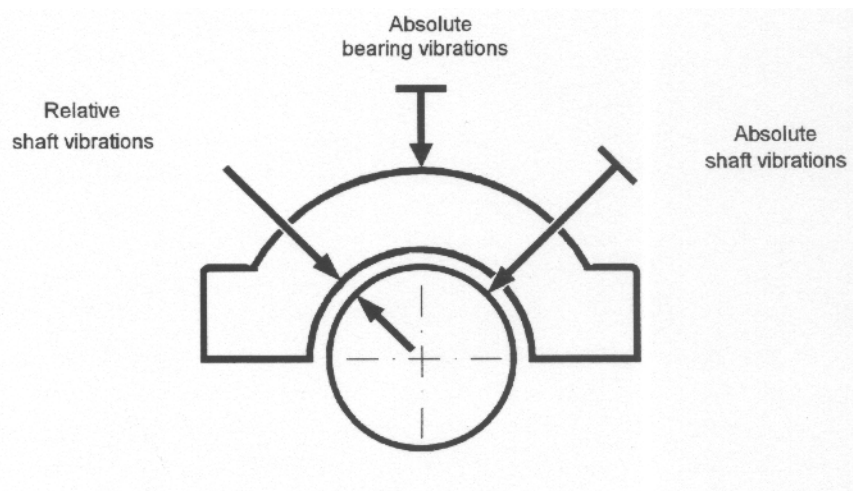
$$L_a = 20 \cdot \lg \frac{a}{a_{ref}} \text{ [dB]}$$

ahol : v rezgéssebesség
 v_{ref} rezgéssebesség referencia szintje,
 a rezgésgyorsulás,
 a_{ref} rezgésgyorsulás referencia szintje.

A referencia szinteket szabványok rögzítik:

Az ISO R 1683 szabvány szerint $v_{ref} = 10^{-9} \left[\frac{m}{s} \right]$ és $a_{ref} = 10^{-6} \left[\frac{m}{s^2} \right]$.

Magyarországon az MSZ 3391 szerint $v_{ref} = 5 \cdot 10^{-8} \left[\frac{m}{s} \right]$ és $a_{ref} = 10^{-6} \left[\frac{m}{s^2} \right]$.

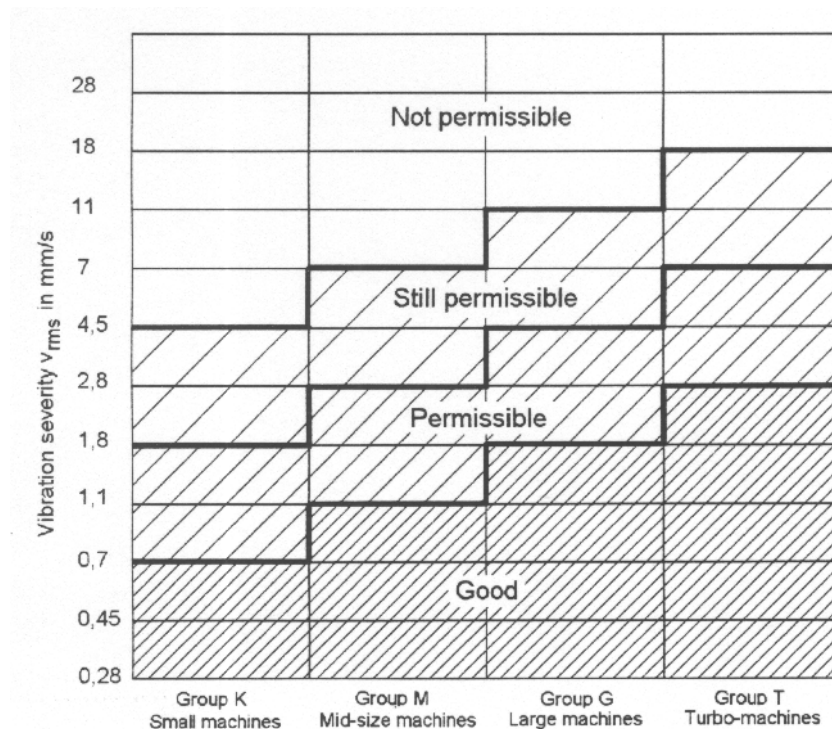


A gép csapágyazásának és a rotornak a merevségétől függően mérhetjük a rezgést a csapágyon, a tengelyen illetve a kettő közötti relatív mozgás formájában.

3.2. Gép állapot értékelés csapágyak rezgésszint méréssel

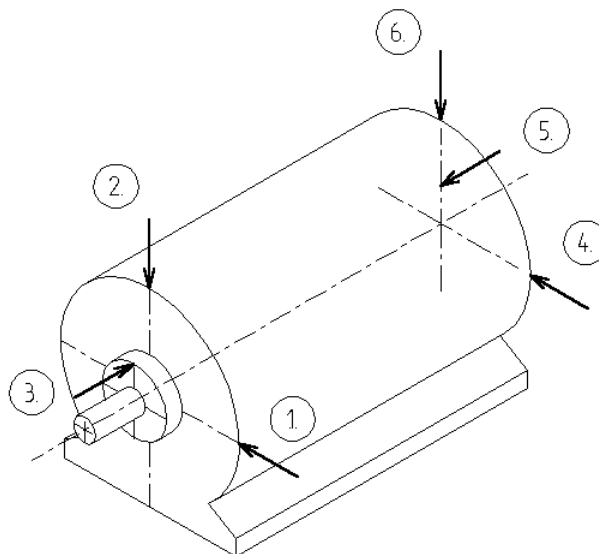
Az a hosszú idejű megfigyelés, miszerint a gépek általános mechanikai állapota leginkább a csapágyakon mért széles sávú effektív rezgésebbesség szinttel arányos, tükröződik a szabványalkotók munkájában.

Az ISO 2372, a VDI 2056 illetve az ezeken alapuló összes szabvány, többek között az MSZ EN 10816 szabvány is a 10-200 fordulat/s forgási sebességű forgógépeket, teljesítményeik alapján szétválasztva, a csapágyakon mérhető effektív rezgésebbesség szerint „JÓ”, „MEGFELELŐ”, „JAVÍTANI SZÜKSÉGES” és „MEGEGEDHETETLEN” kategóriákba sorolja.



A felosztás szerint turbógépeken (T csoport), melyek teljesítménye nagyobb, mint 300 kW és üzemi fordulatszámuk a rezonancia felett van, a „JÓ” rezgésszint felső határa 2,8 mm/s effektív érték. Az egyes rezgésszintek között 2,5-szeres szorzó jelenti a kategóriahatárt, vagyis a jó szint felső határa és megengedhetetlen szint között 6,25-szeres szorzó van.

A szabvány a megengedhető szintek abszolút értékeit illetően nem kötelező érvényű, csupán ajánlás, mert egy-egy gépen belül is nagy eltérés lehet a csapágyak merevsége között. A fenti számértékektől el lehet térni – a szintek saját tapasztalat és a gyártó előírásai alapján is módosíthatók-, de ajánlatos betartani, hogy az új állapothoz viszonyított kb. (6~10)-szeres rezgésemelkedés esetén minden gépet azonnal le kell állítani.



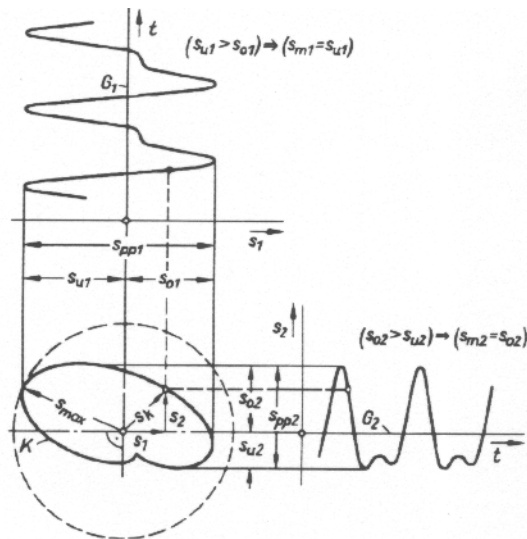
A szabvány megadja a mérés körülményeit, a mérőhelyeket, a mérőműszer karakterisztikáját is.

A mérőműszerre vonatkozó előírás, miszerint a bementi szűrő 6 dB/dekád meredekségű, 10 Hz felülvágó és 1000 Hz alulvágó típusú kell legyen.

3.3. Gép állapot értékelés relatív tengelyrezgés méréssel

Siklócsapágyakkal ágyazott, gyors fordulátú, rugalmas forgórészű gépek (a turbina-generátor gépcsoportok is ilyenek!) csapágyrezgései mellett (sőt néha ezt megelőzően, illetve azt helyettesítve) relatív tengely rezgéseit is mérik. A fenti géptípusoknál erre azért van szükség, mert a forgórészen bekövetkező belső erő változások rugalmas tengely és merev csapágyazás esetén a csapágyházon csak kis mértékben láthatóak. Bizonyos géptípusok esetén amikor a rezgések a csapágyházon is számottevően megjelennek, addigra a gép már jelentősen károsodott, esetleg tönkremegy.

A relatív tengelyrezgést általában két, egymásra megőleges – akár „V” alakban, akár vízszintesen és függőlegesen elhelyezett - érzékelővel mérik. Ezzel az érzékelő elrendezéssel biztosítható, hogy a csap csapágyon belüli mozgása (az u.n. kinetikus pályagörbe vagy orbit) is képezhető. Az orbit alakjából komoly diagnosztikai információk nyerhetők. Kimutatható az egyensúlyhiba, a tengely radiális előterhelése (pl: tengelyvonal hiba), besúrolás, csapágy kenési probléma, megnövekedett csapágyházazag, egyéb fellazulás, tengely repedés.



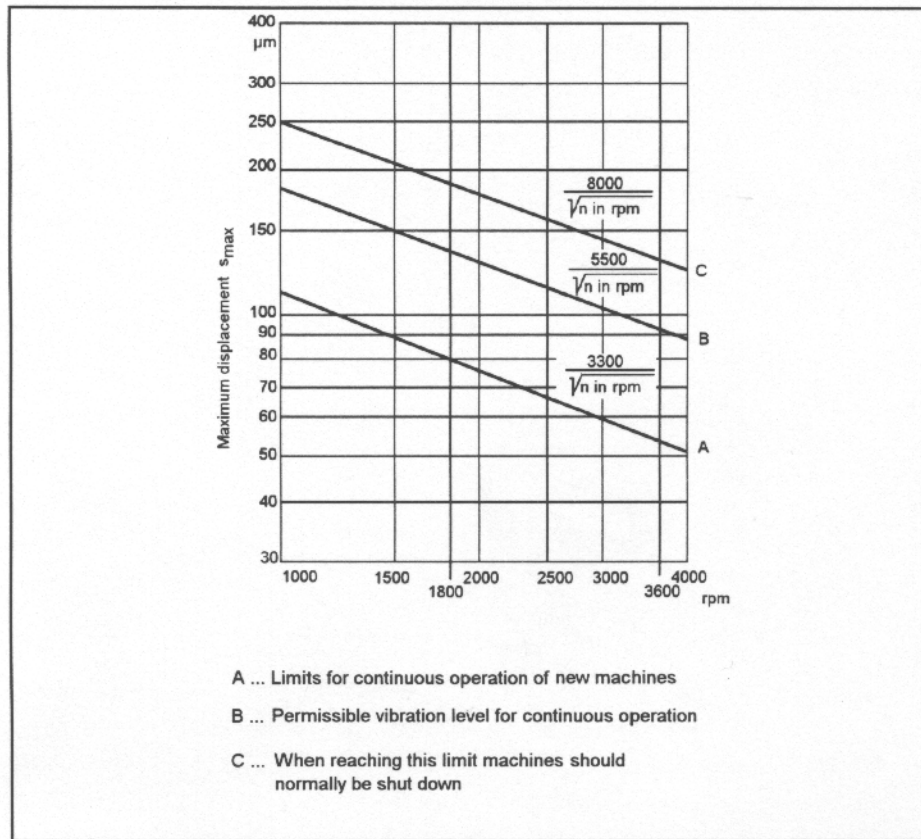
s_1, s_2	Instantaneous values	} of vibration displacements $s_1(t)$ and $s_2(t)$ in the measuring directions 1 and 2
s_{o1}, s_{o2}	Largest values	
s_{u1}, s_{u2}	Smallest values	
s_{m1}, s_{m2}	Maximum values	
s_{pp1}, s_{pp2}	Vibration amplitudes	
s_k	instantaneous kinetic shaft displacement	
s_{max}	Maximum value of shaft displacement, Maximum displacement	
K	kinetic shaft orbit	
t	Time	
G_1, G_2	Mean value axes	

A relatív tengelyrezgés mérés az analízist megelőzően, a gép védelme szempontjából is döntő jelentőségű. A csap mozgásának szélső határhelyzete a csapágyhézag, de természetesen a megengedhető maximális relatív tengelyrezgésnek ennél kisebbnek kell lenni.

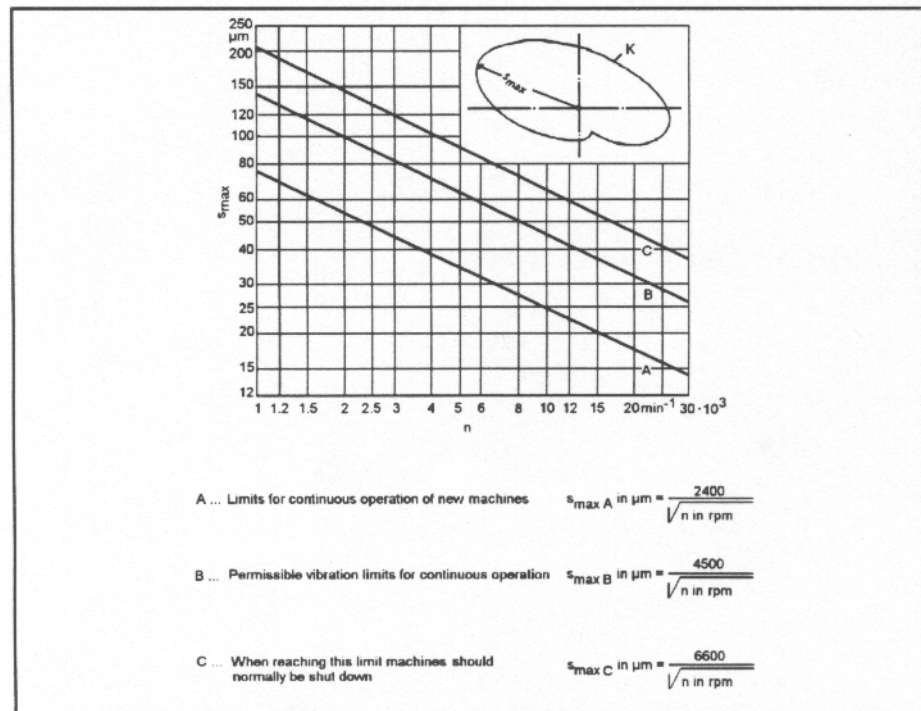
A csapágyrezgéshez hasonló szabványok rögzítik a relatív tengelyrezgések megengedhető szintjeit is. A szabványok bizonyos típusai a két érzékelő jelének vektoros összegét az u.n. s_{max} -ot, míg más (amerikai) szabványok szerint a két jel közül a nagyobbat kell a diagramokban megadott értékekhez hasonlítani.

Ezekben a szabványok is „JÓ”, „MEGFELELŐ”, „JAVÍTANI SZÜKSÉGES” és „MEGENGEDHETETLEN” kategóriákat különböztetnek meg, de a gépek típusának és teljesítményének megfelelően külön-külön lapon található a megengedhető szintek illetve a fordulatszám függvényében is más-más szint a normális.

VDI 2059, part 2: Shaft vibrations of steam turbines



VDI 2059, part 3: Shaft vibrations of industrial turbosets



3.4. A spektrumanalízis

A gépek működésekor a belső, dinamikus erőhatások rezgéseket keltenek. Ezen periodikus rezgések, amelyek periódusideje „T” – Fourier tétele szerint – egyértelműen előállíthatók olyan, megfelelő amplitúdókkal és fázisállandókkal bíró harmonikus rezgések összegeként, amelyek körfrekvenciái az adott f(t) rezgés körfrekvenciája ($\omega=2\pi/T$) és ennek egész számú többszörösei (felharmónikusai).

$$f(t)=c_0+c_1\sin(\omega t+\varphi_1)+c_2\sin(2\omega t+\varphi_2)+\dots+c_n\sin(n\omega t+\varphi_n)$$

vagy más alakban:

$$f(t)=a_0+(a_1\cos\omega t+b_1\sin\omega t)+(a_2\cos 2\omega t+b_2\sin 2\omega t)+\dots+(a_n\cos n\omega t+b_n\sin n\omega t)$$

A fenti elvet felhasználó műszerek, a spektrumanalizátorok a gépek szerkezeti elemein megjelenő sok különböző frekvenciájú jelből összegződött, szuperponálódott rezgéseképét összetevőkre bontják, alkalmazásukkal előállítható a v(t) rezgés-időfüggvényből a v(f) rezgés-frekvencia függvény, a rezgés-spektrum.

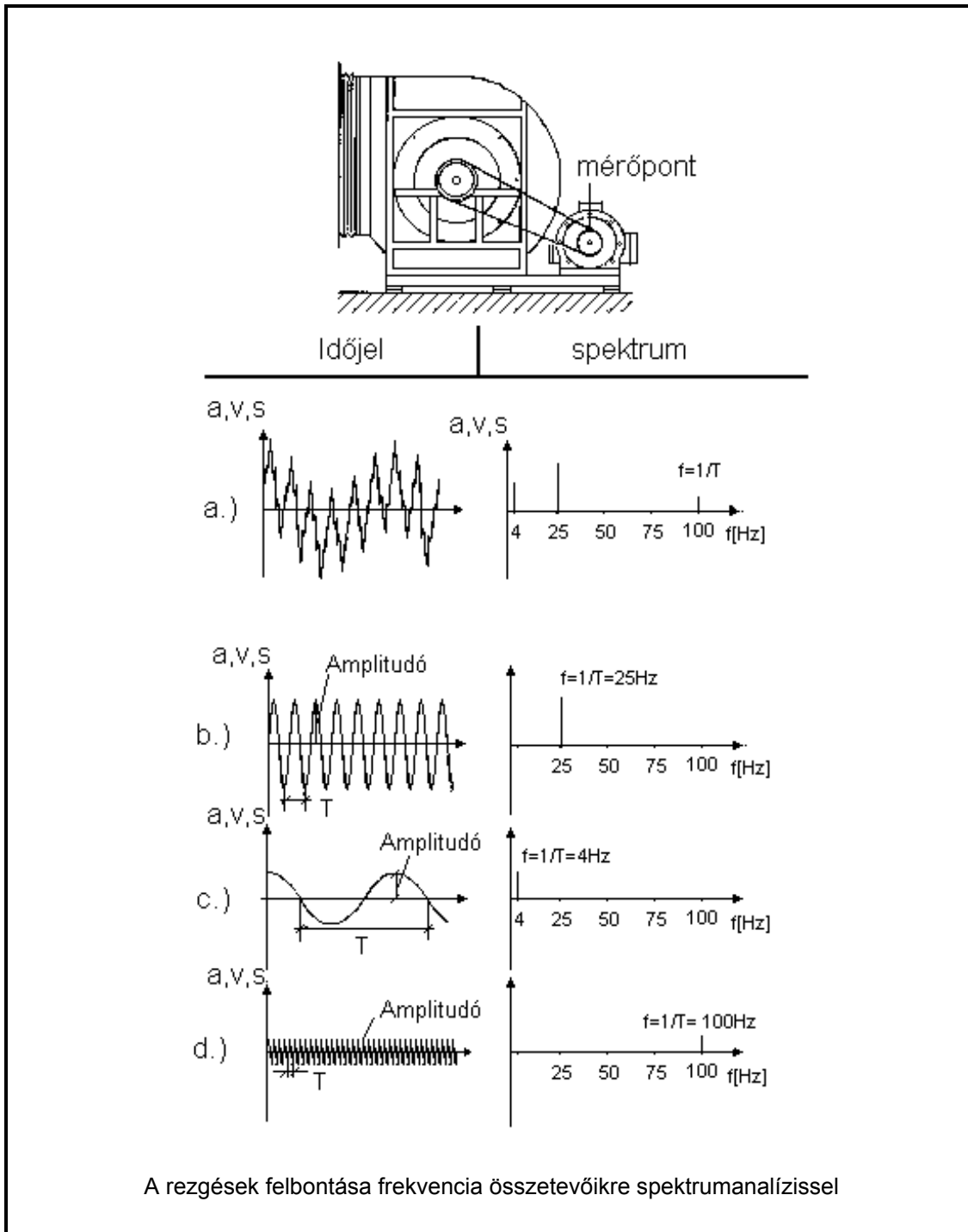
A klasszikus Fourier elvet megvalósító (hangolható szűrős és a wattmérős) műszereket ma már teljes egészében kiszorították az u.n. gyors-Fourier (FFT) elvet alkalmazó digitális eszközök. Ezek – az óhajtott spektrum felső határfrekvenciájától és felbontásától függő sebességű és számú – mintavétellel, majd digitális technikával állítják elő a rezgésspektrumot.

A diagnosztika a rezgésspektrumok, a gép részletes ismerete és mechanikai szaktudása birtokában, valamint elegendő rezgésdiagnosztikai gyakorlattal következtetni tud mind a rezgéseket okozó belső erőhatásokra, az erőhatások keletkezésének okaira, a szerkezet mechanikai tulajdonságaira, illetve ha korábbi mérések is rendelkezésre állnak ezek változásaira.

Egy villanymotorral hajtott ventilátor példáján keresztül jól szemléltethető a spektrumanalízis.

A villanymotoron elhelyezkedő mérőponton felvett összetett rezgés-idő jelet (gyorsulás, sebesség, kitérés) mutatja az ábra bal oldali oszlopának „a” mezője. Fenti jel több, különböző frekvenciájú, amplitúdójú és fázisú jel összegeként előállítható. Az adott példában az egyensúlyhibából származó „b”, a szíjhajtás hibájából eredő „c” és az elektromágneses erőhatásokból keletkező „d” jelek összegeként, a gépen belül „képződik” az „a” összetett időfüggvény.

Fenti időfüggvény frekvencia komponensekre történő visszafejtése az időtartományban nem lehetséges, megoldható viszont egy alkalmas FFT analízátor műszer segítségével, mely előállítja az eredeti „a” időfüggvény $F\{v(t)\}$ transzponáltját, a spektrumot (jobb oldali oszlop „a” mezője). Ezen közvetlenül látható, hogy az adott példában a szíjhajtás hibájából (4Hz), egyensúlyhibából (25Hz) és elektromos hibából (100Hz) keletkeznek a motor rezgései.



3.4.1. A spektrumanalízis segítségével azonosítható géphibák

A különböző géphibák meghatározott, esetenként eltérő frekvenciájú erőhatásokat keltenek. A spektrumanalízis éppen a rezgési frekvenciák meghatározásával segít a kialakuló hiba diagnosztizálásában.

Az egyensúlyhiba erősödése növekvő belső erőhatást eredményez. A hiba forgási frekvenciájú, radiális irányú erőt kelt, tehát a rezgésválasz is forgási frekvenciájú, de durvább esetben – ha a csapágyazás már a rugókarakterisztikájának nemlineáris tartományában van terhelve – a rezgésválaszban megjelennek a felharmónikusok.

Görbe tengely és tengelyvonal hibák esetében a tengely vagy eleve görbe vagy a hibás tengelyvonal miatt szenved deformációt, görbül meg bizonyos mértékben. Ennek megfelelően alapvetően egyensúlyhiba, ennek következtében forgási frekvenciájú rezgés jön létre. A hiba típust a ferde tengelycsapok miatt axiális rezgések is jellemzik, illetve magasabb szinten vannak jelen a felharmónikusok.

Mechanikai lazaságok esetén a belső erők nem nagyobbak a szokásosnál, de a rugókarakterisztika nemlineáris, aminek következtében a rezgésválaszban megjelennek, és sokszor dominálnak a felharmónikusok (elsősorban a 2-szeres forgási összetevő).

A gördülőcsapágy hibák a rezgésspektrumokból általában jól azonosíthatóak. A csapágyak geometriai adatainak, a csapágyat terhelő erőhatások hatásvonalának valamint a fordulatszámok birtokában számíthatóak az egyes elemek (külső gyűrű, belső gyűrű, gördülőelem, kosár). hibafrekvenciái. Az összefüggéseket szinte minden rezgésdiagnosztikával foglalkozó irodalom ismerteti.

A siklócsapágyak alapvető hibái az olajfilm instabilitások, melyek a spektrumokban jellegzetes frekvenciájukkal $\{ (0.42 \div 0.48) \times n \}$ jól azonosíthatóak. A megnövekedett hézagok a felharmónikusok megemelkedésével és esetenként tört harmónikusok megjelenésével is párosulnak.

Fogaskerék hajtások hibái a fordulatszám-szor fogszám illetve ennek felharmónikusain keltenek rezgéseket. Fenti frekvenciák mellett gyakorta megjelennek a fordulatszámnak megfelelő oldalsávok.

Az aszinkron motorok elektromos hibái esetén a hálózati frekvencia és kétszerese a jellemző. Az ilyen jellegű hiba jól azonosítható az elektromos áram kikapcsolásának pillanatában bekövetkező rezgéscsökkenéssel.

Áramlási eredetű hibák esetén a fordulatszám és lapátszám szorzatának megfelelő frekvencia-összetevők illetve ezek felharmónikusai emelkednek.

Az egyes hibák azonosítására adnak segítséget a következő táblázatok:

Rezgés forrása		Frekvencia összefüggése a rezgésekkel									
		0-40 % f	40-50 % f	50-100 % f	f	2 x f	k x f	különbféle frekv.	nagyon magas frekv.	1 vagy 2 x hálózati frekv.	1 vagy 2x szíj frekv.
Kiegyensúlyozatlanság	egyenlőtlen tömegeloszlás a forgórészen				●	○	○				
Egytengelyűségi hiba	Egytengelyűségi hiba				●	●	○				
	alapzat deformációja				●	○	○				
	ház torzulása				●	○					
	axiális irányú tengelykapcsolat				●	←—————→		○			
Csapágyhibák	hibás gördülőelemű csapágy				○			●	○		
	rossz támcsapágy	←—————→		●							
	csapágy és tengelycsap kulponosság				●	○					
Elektromos és mágneses zavar	aszimmetrikus állórész									●	
	aszimmetrikus forgórész	●									
	nem központos légrés	←————— a konstrukciótól függ —————→									
Hibás ékszíjak	nem állandó szíjkeresztmetszet, hibás összeillesztés								○		●
Külső rezgésösszetevők	ház, alapzat, konstrukciós részek	←————— kiterjed az összes frekvencia-összetevőre —————→									
	kritikus forgórész sebesség				●						
Aerodinamikusan és hidraulikus erők					○			●	○		
Instabilitások	olaj örvények		●								
	olajfilm rezgések		●	○							
	súrlódás okozta örvények	●	○	○							
	légrés okozta gerjesztés	○	●	○							
Fogaskerekek és kapcsolódásuk	foghibák						○	○	●		
	hibás kapcsolódások		○		○	○	●				
Környezettől átvett rezgések		←————— kiterjed az összes frekvencia-összetevőre —————→									
Karakterisztikus rezgés frekvenciák = ●											
Járolékos rezgések = ○											

Rezgéseket gerjesztő okok		0-40 %	40-50%	50-100%	1XRPM	2XRPM	magasabb többszörösök	1/2XRPM	1/4XRPM	alharmonikusok	nagyon magas f.	
Kiegyensúlyozatlanság	Kezdeti kiegyensúlyozatlanság			10								
	Tengely ív kopás, hiányosság			10								
Beállási hibák, lazaságok, torzulások	A tengelyvonaltól 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						
	Hord csapágy hiba	1			4	2						
	Támcsapágy hiba	9									1	
	Gördüloelemek gerjesztette rezgések		10									
	Egyenlőtlen csapágy merevség (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							
Rezonancia	Rezonáns rezgések				10							
	Al-harmonikus rezonancia								10			
	Harmonikus rezonancia							10				
	Ház, konstrukciós elemek rezonancia				8	1		1				
	Környezeti rezonanciák				8	1		1				
	Alapzat rezonancia				8	1		1				
	Torzíós rezonancia				4	2	2					
Különféle alapvető okok	Rossz hajtósíjak					10						
	Alternáló erőhatások				3	5	2					
	Aerodinamikus és hidraulikus erők				2		6				2	
	Súrlódás által indukált	8	1	1								
	Olaj örvény		10									
	Rezonancia örvények		10									
	Vegyes súrlódás állapota										10	
Elektromos szerkezetek hibái	A motor forgórész nem kerek				10							
	A fogró/állórész egytengelyűségi eltérése				10							
	Elliptikus házfurat				10							
	Hibás tekercselés				10							
	Görbült motortengely				10							
	A motor elektromos szempontból nem központos				10							
A hibák előfordulási valószínűsége 1-10-ig												

3.4.2. A spektrumanalízis előnyei és korlátjai

A spektrumanalízis a forgógép diagnosztika egyik legfontosabb eszköze. Egyszerű, olcsó, üzemi feltételek mellett végezhető mérési módszer. Segítségével, a gép rezgési frekvenciái alapján közelebbi képet kapunk annak hibáiról. Számos esetben már egyetlen spektrum elegendő a hiba 100 %-os azonosítására. Más esetekben egyértelmű diagnózis nem adható, de a hibák nagy része teljes bizonyossággal kizárható, a lehetséges okok köre szűkül. Jól elkülöníthető, viszonylag könnyen felismerhető hiba az olajfilm rezonancia, a fogaskerék hiba, az aszinkron motorok elektromos természetű hibái, a szíjhajtásokból származó hibák és a gördülőcsapágy hibák, bár sajnos ezen utóbbiak nem jellemzőek turbógép-csoportokra.

A pontos diagnózist segíti, ha az analízis eredményei a gép jónak tekinthető állapotából is a rendelkezésre állnak. Méginkább eredményes lehet a hibafeltárás, ha az elemzést bizonyos rendszerességgel, sorozatszerűen végzik. Ez utóbbi esetben nyomon követhető a hiba kialakulási folyamata, előre jelezhető az adott szerkezeti elem teljes elhasználódási, illetve tönkremeneteli időpontja. A karbantartó személyzet fel tud készülni a javításhoz szükséges eszközökkel, szerszámokkal, az alkatrész pótlásával. Mivel a várható hiba előre ismert, tervezhető lesz a gép, vagy gépcsoport leállításának, és javításának ideje.

A spektrumanalízis rendkívüli előnyei mellett sem mindenható, a módszernek számos korlátja és nehézsége van. Vannak olyan hibák, különösen a turbógépcsoportok esetében, melyek nem mindig azonosíthatóak egyértelműen, 100 %-os valószínűséggel.

Ahogy a hibaaazonosító táblázatokból is látszik, a diagnózis pontosságát csökkenti, hogy egyes hibafajták spektrumai nagyon hasonlóak. Gyakorlatilag a forgási frekvencia és harmónikusainak megjelenése esetén adódik a legtöbb nehézség (kiegyensúlyozatlanság, tengelyvonal hibák, görbe tengely és lazaságok). A diagnózis főleg akkor bizonytalan, ha fenti hibák együttesen vannak jelen a gépen. Ilyenkor előfordul, hogy a hibák nehezen elválaszthatóak, nem tudható, mely hiba a domináns, mit kell a forgógépen elsősorban javítani.

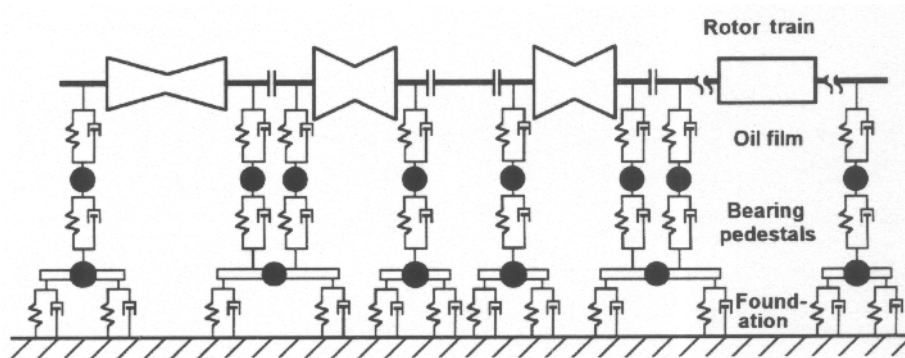
Ha a 3.1. fejezetben tárgyalt rezgési modellt tekintjük, akkor mondhatjuk, hogy a szakember feladata az, hogy a rendszer kimeneti függvényeinek változását össze kell rendelje a gerjesztő erők, vagy a rendszer átmeneti függvényeinek (például a merevség, a mobilitás) változásával.

Tehát a hibadiagnózist készítőnek választani kell, hogy a rezgésváltozást a belső erők keltik, vagy a rendszer átmeneti függvényének (repedés, lazaság vagy egyéb ok miatt jelentkező, a lineáristól való eltérése) a torzulása okozza. Ennek a döntési feladatnak az elvégzése, pusztán a spektrumanalízis segítségével az egyensúlyhiba, a tengelyvonal hibák és lazaságok bizonyos típusainál, 100 %-os bizonyossággal gyakorta lehetetlen. Az olyan hibák

estében, amelyeknek a rezgésspektruma nagyon hasonló, szükség van a spektrumanalízis mellett más, belső vagy külső erőgerjesztéses vizsgálatra, esetleg egyéb rezgés vizsgálatokra (animáció, stb...).

3.5. A dinamikai viselkedés mérése öngerjesztéssel

Amikor a forgógépek indulnak, leállnak, illetve ha azokat változó fordulaton üzemeltetik, a többszabadságfokú mechanikai rendszernek tekinthető gép-alap rendszer változó frekvenciájú gerjesztést kap.



Ilyenkor az egyik legalapvetőbb belső gerjesztő erő az óhatatlanul jelen lévő maradó kiegyensúlyozatlanság. Ennek frekvenciája megegyezik a gép forgási frekvenciájával, de egyéb, magasabb frekvenciájú gerjesztő erők is működnek.

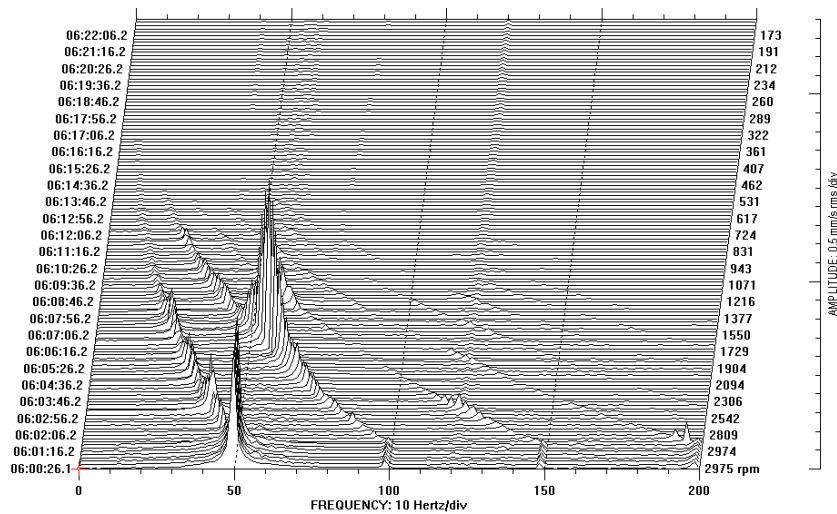
A turbina-generátor gépcsoportok – konstrukciójukból és viszonylag magas fordulatszámukból eredően - minden esetben áthaladnak rezonancián vagy rezonanciákon. Megfelelő mérések elvégzése esetén, fenti frekvenciákon való áthaladások alatt sok fontos, máshonnan nem megszerezhető diagnosztikai információ szerezhető.

Az öngerjesztéses mérés során általában sokcsatornás mérőberendezéssel, a csapágyakon több irányban elhelyezett érzékelővel illetve csapágyanként párosával, 90 fokra elhelyezett tengelyrezgés érzékelőkkel mérik a rezgéseket. Egyszerűbb, kevesebb csapágygal rendelkező gépeken, jól ismert probléma esetén két csatornás műszerrel is lehet mérni, de turbinák esetében a szükséges számú adat begyűjtéséhez olyan sokszor kellene indulni, leállni, hogy ez gyakorlatilag megvalósíthatatlan.

3.5.1. Az öngerjesztés mérési eredményeiből levonható következtetések

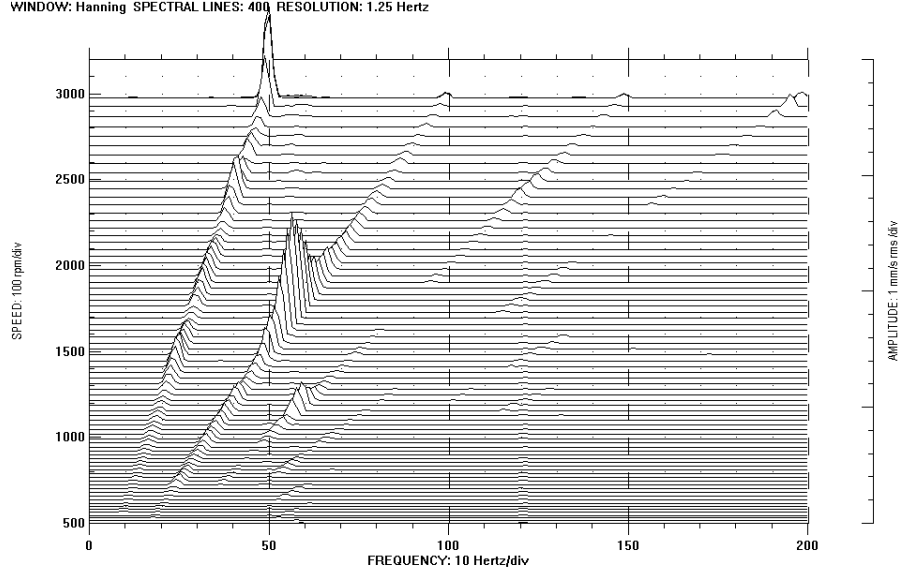
Ha a gép fordulatszám változási sebessége nagyságrendekkel kisebb, mint az analízátor működési sebessége – vagyis gyors működésű, digitális működésű FFT spektrumanalízátor áll rendelkezésre – elő lehet állítani az u.n. vízéses spektrumot.

POINT: 4. csapágy ax. $\angle 0^\circ$
 MACHINE: IV. turbína
 From 04JUL2001 06:00:26.1 To 04JUL2001 06:22:46.2 Steady State 06:00:26.1
 WINDOW: None SPECTRAL LINES: 400 RESOLUTION: 1.25 Hertz



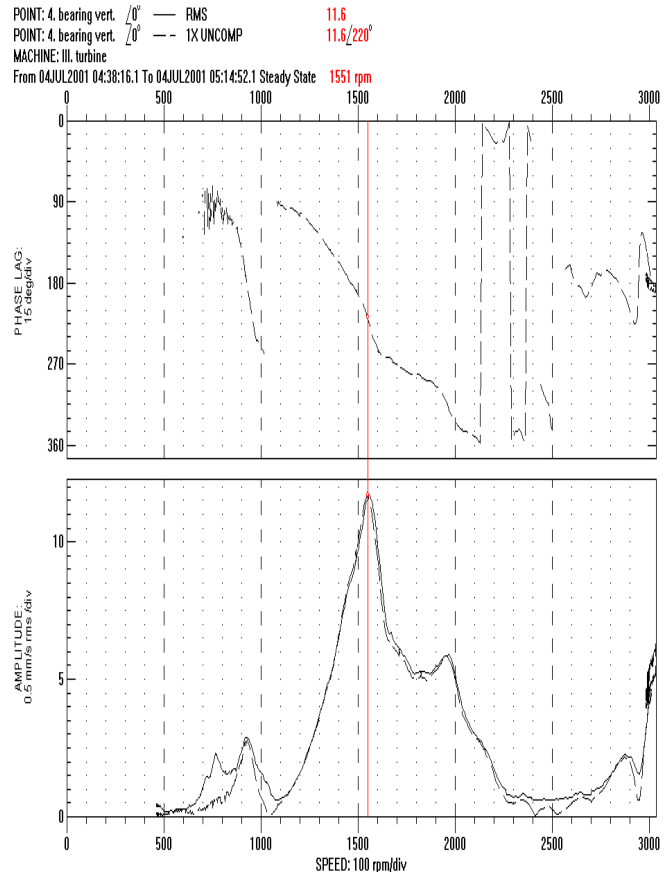
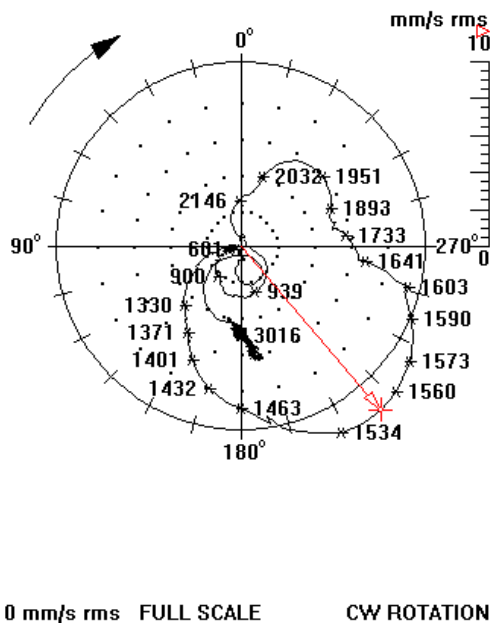
A mérések 3D ábrázolásban a fordulatszám függvényében adják az u.n. kaszkád spektrumot. Mind a két függvény a rezonanciák szemléletes, bár számszerűen eléggé pontatlan megjelenítését biztosítja (az ábrákon üzemi fordulathoz közeli, nem kívánt rezonancia látható).

POINT: 4. csapágy ax. $\angle 0^\circ$
 MACHINE: IV. turbína
 From 04JUL2001 06:00:26.1 To 04JUL2001 06:22:46.2 Steady State
 WINDOW: Hanning SPECTRAL LINES: 400 RESOLUTION: 1.25 Hertz



Ha a mérés kezdeti pillanata mindenkor egybe esik a forgórész adott szöghelyzetével, vagyis a mérés triggerelt, akkor a rezgés fázisszöge is rendelkezésre áll. A fázis segítségével előállítható bármely mért frekvenciaösszetevő (az ábrán példaként az 1 x n forgási összetevő) Nyquist vagy más szóhasználatnál polár függvénye illetve a Bode diagrammja.

POINT: 4. bearing vert. $\angle 0^\circ$ 1X UNCOMP
 MACHINE: III. turbine
 From 04JUL2001 04:38:16.1 To 04JUL2001 05:14:52

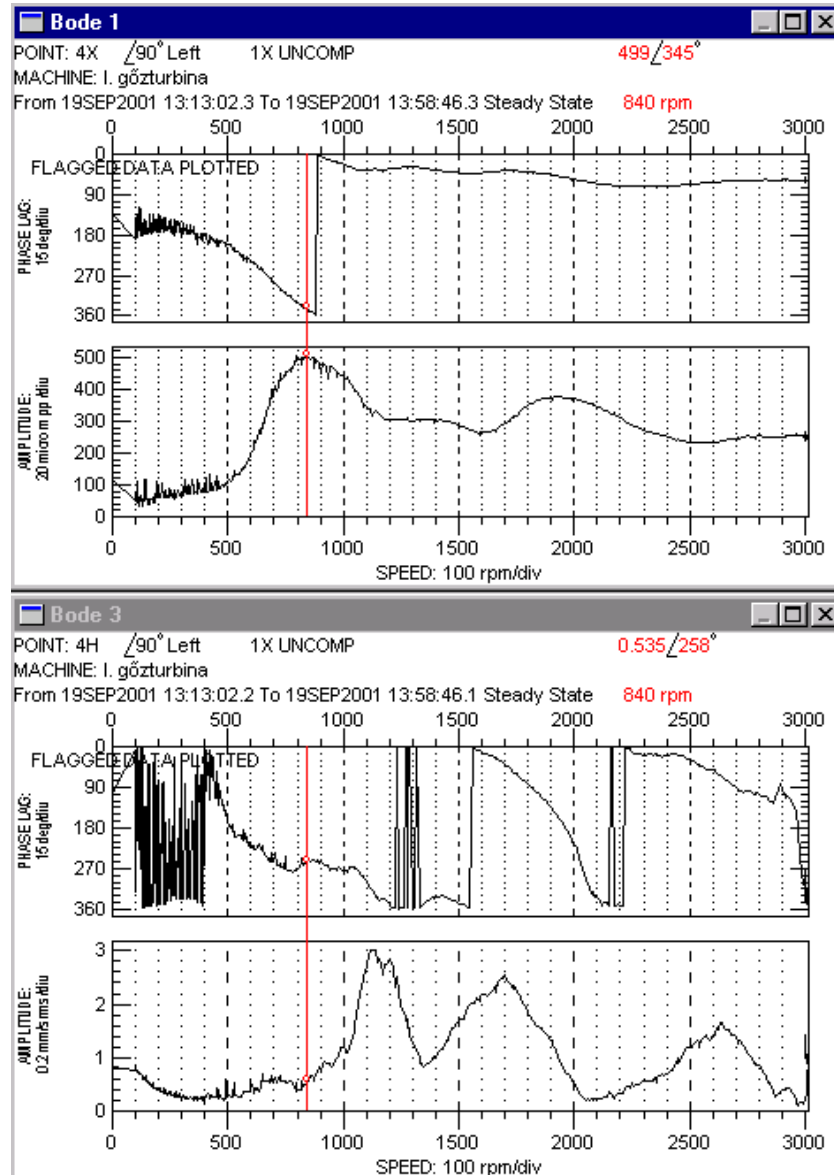


Fenti ábrák a vízesés és kaszkád függvényeknél lényegesen pontosabban mutatják a rezonancia frekvenciákat. A görbékből meghatározható az adott rezonancián a csillapítás mértéke. A gépek, így a turbinák indulása és leállása sem feltétlenül teljesen azonos görbe szerint történik, de az indulásokat az indulásokkal és a leállásokat a leállásokkal érdemes összehasonlítani, mert azoknak egymással azonosnak kell lenni. Ha változás látszik a változó fordulató üzem alatt, az mindenképpen valamilyen változás következménye.

Hazánkban alapvetően a csapágyrezgés mérésnek van hagyománya, a relatív tengelyrezgés mérés csak az utóbbi években kezd teret nyerni. Az okok nyilvánvalóak. Egyrészt a tengelyrezgés mérés drágább műszerezettséget igényel másrészt a mérés kivitelezése sem olyan egyszerű. Nem elegendő az érzékelő mágneses felrögzítése a csapágyházra, hanem alkalmas tartókat kell gyártani, szerelni és ráadásul be kell állítani az optimális tengely – érzékelő közti hézagot. Sok esetben azonban megéri a fáradozás, mivel a

méréssel olyan, biztos diagnosztikai információ nyerhető, amely más módon nem szerezhető meg.

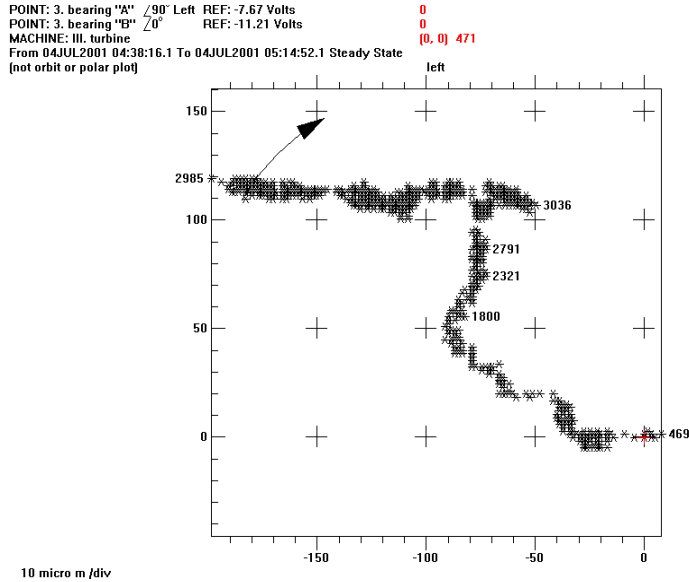
A tengelyrezgés mérés jelentőségét igazolja a következő, 32 MW-os turbinán, kifutáskor mért adatsor. A generátor mellső csapágybakon, vízszintes irányban, az 1200 1/min-nél jelentkező rezonancia alatt nem volt értékelhető esemény (alsó ábra). A tengelyrezgések azonban (felső ábra) éppen itt kezdtek emelkedni, és 900 1/perc alatt elérték az 500 mikron csúcstól-csúcsig értéket (ugyanakkor függőlegesen a mérőműszer 600 mikronnál „kiakadt”).



Ha az adott esetben csak csapágyrezgést mérés állt volna rendelkezésre, a diagnózis bizonytalanságokat tartalmazott volna.

A relatív tengelyrezgések előnyei között szerepet játszik, hogy alkalmazása esetén megjeleníthető a csapközép mindenkori helyzete a változó fordulaton (paraméter lehet az idő vagy a fordulatszám). A diagram segítségével megállapítható, a siklócsapágyban kialakult-e a

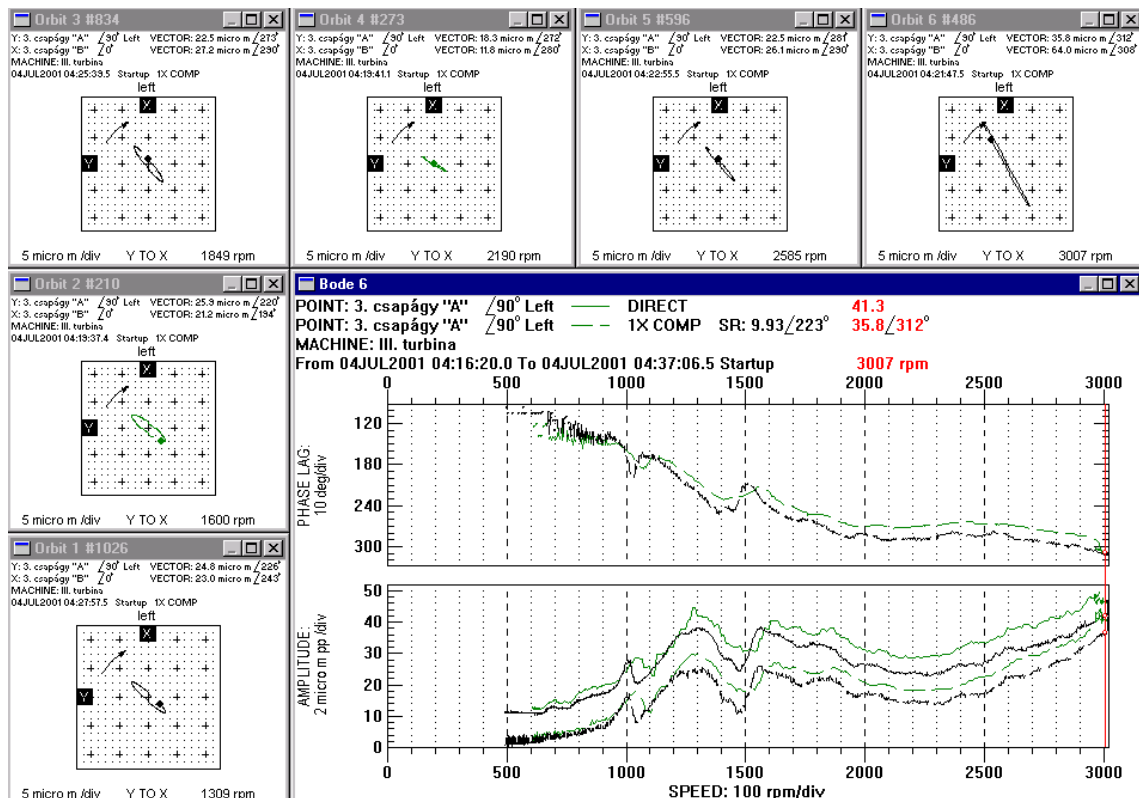
megfelelő oljafilm, a csap normális helyen fut-e? Amennyiben ez a pozíció rendellenes, egyértelműen azonosítható a tengelyvonal hiba illetve magadható, milyen irányban kell a korrekciót végrehajtani.



A fenti ábra egy generátor csapágyon mért, terhelésre és hőhatásra bekövetkezett tengelyvonal hibát mutat. A turbina-generátor gépcsoport indulásakor, a felfutás alatt a csap közelítőleg a normálisnak mondható (elfogadható) pozícióba állt be, tehát a tengelyvonal beállítása hideg állapotban megfelelő volt, a gép felterhelésének hatására azonban - deformáció következtében – létrejött a hiba, a tengelyvonal elállítódott.

Ugyancsak a tengelyrezgés mérés segítségével előállíthatóak a tengelycsapok pályái (az u.n. orbitok), illetve ezen orbitok a fordulatszám függvényében. Az utólagos feldolgozás nélküli, a mért orbitok tartalmazzák nem csak a valódi rezgési adatokat, hanem a tengelycsap geometriai és anyaghibáiból eredő zajokat is. Ezért bizonyos vizsgálatoknál célszerű a fenti hibát (az angol terminológia alapján gyakran „slow roll” vektorként említett, valójában az alacsony fordulaton mért „rezgésszerű”, de ténylegesen nem rezgés jelet) kikompenzálni, kivonni a mért rezgésből.

A következő orbit-sor nagy biztonsággal azonosítja a tengelyvonal hibát. Az ábra a normális esetben forgásiránnyal megegyező irányban forgó, kövér, ellipszis alakú, indulási hibával (slow roll vektorral) kompenzált orbit torzulását mutatja jelentős tengelyvonal hiba hatására.



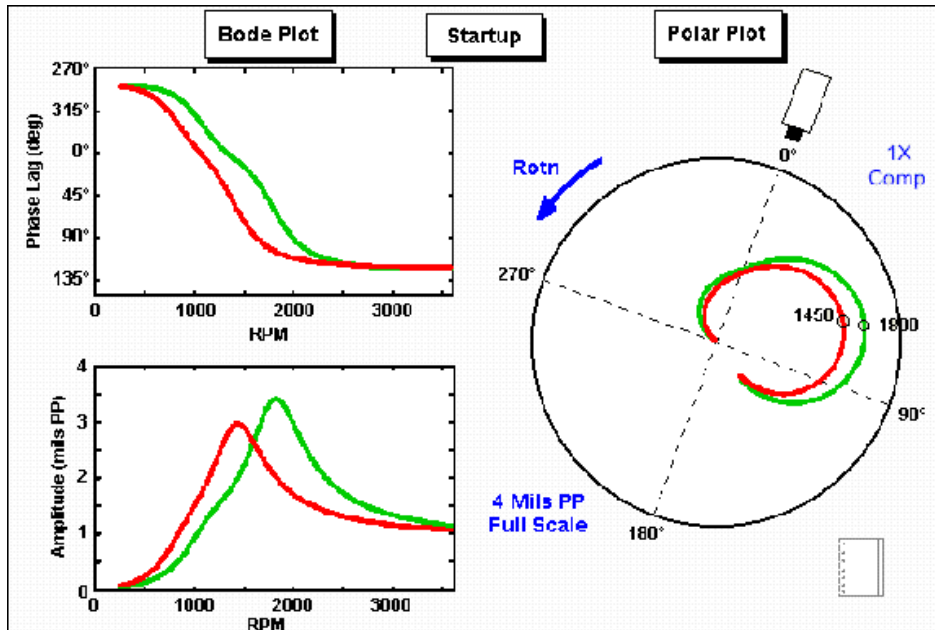
Tengelyrezgés mérésrel hasonlóan nagy biztonsággal diagnosztizálható a fordulatszám függvényében ábrázolt orbitokból az egyensúlyhiba, a besúrolás, az olajfilm mindenféle instabilitása, az áramlás leválása a lapátokról, a csapágy hézagának megnövekedése és a repedt tengely.

3.5.2. Az öngerjesztés mérési eredmények trendje

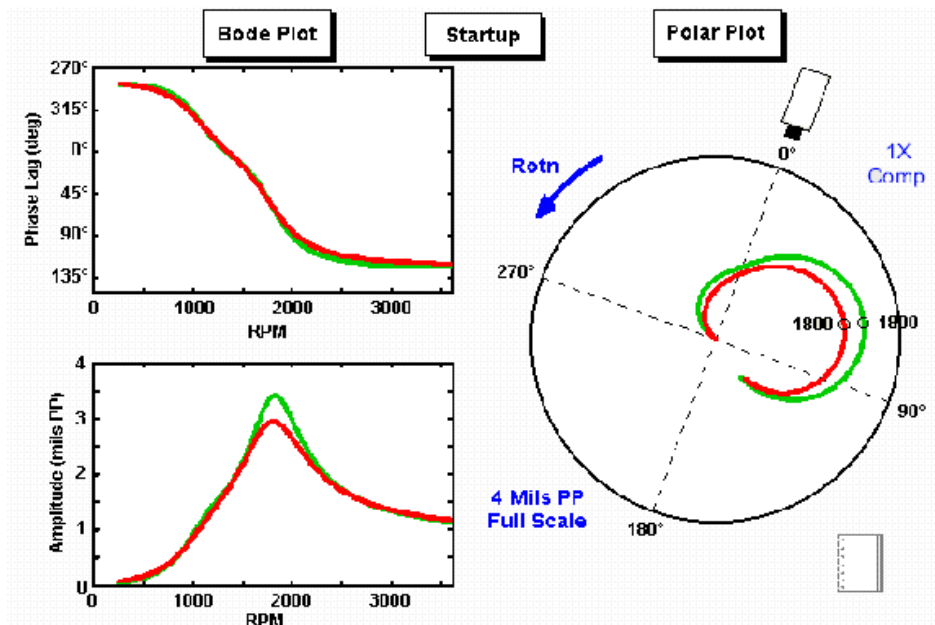
Ahogy a spektrumanalízist segíti, ha nem csak egy mérés áll rendelkezésre, úgy a változó fordulató mérés is akkor ér sokat, ha vannak a jó állapotból származó referencia adatok.

Általában a gépek indulása és leállása nem teljesen azonos módon megy végbe, de az indulást az indulással, a kifizást a kifizással feltétlenül érdemes összehasonlítani. Ha a forgógépen belül nincs szerkezeti változás vagy belső erő változás, a dinamikus rezgési viselkedés (úgy mint a rezonancia frekvenciák értékei és a csillapítások) a fordulatszám függvényében azonos kell legyen.

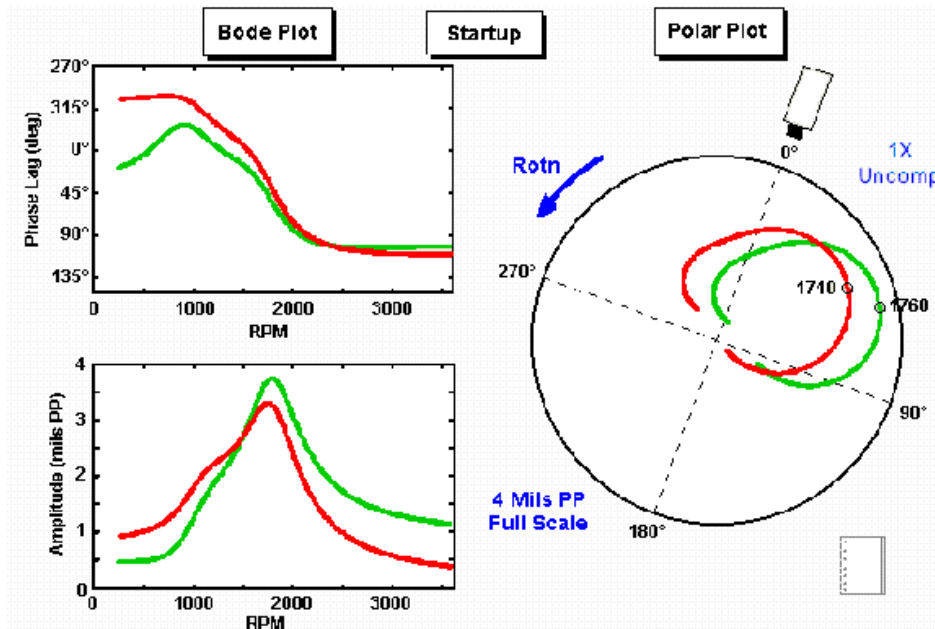
A dinamikus viselkedés változásait a legérzékenyebben és legpontosabban a tengelyrezgés mérésével, ezen adatok Bode és polár diagramjain keresztül lehet nyomon követni.



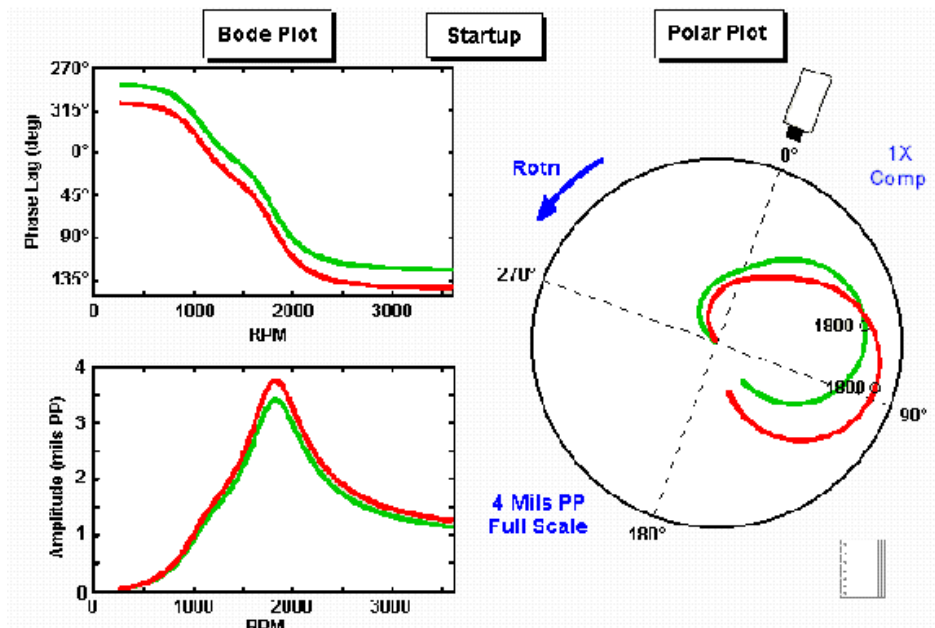
Ha a forgási frekvenciájú, slow roll vektorral kompenzált mérési adatokat tekintve mind a balans rezonancia frekvencia, mind a maximális rezonancia amplitúdó változik (az ábrán látható példán mind a frekvencia, mind az amplitúdó csökken), akkor elsősorban a gép-alap rendszer gyengülését, a felfüggesztés lazulását, esetleg – egyéb jelekkel együtt – a tengely repedését lehet feltételezni.



Ha a forgási frekvenciájú, slow roll vektorral kompenzált mérési adatokban csak a maximális rezonancia amplitúdóban van változás (az ábrán látható példán az amplitúdó csökken, vagyis a csillapítás nő), akkor a csapágy hézagának változására esetleg egyensúlyhiba változására kell gondolni.



Ha a kompenzálatlan mérési adatokban az alacsony fordulatszám tartományban van eltérés, vagyis a slow roll vektor változik, akkor vagy a tengelyvonál elállítódásával vagy tengelyrepedéssel kell számolni.



Ha a forgási frekvenciájú, slow roll vektorral kompenzált mérési adatokban a rezonancia frekvencia nem változik, de megváltozik a rezonancia frekvencián a rezgés

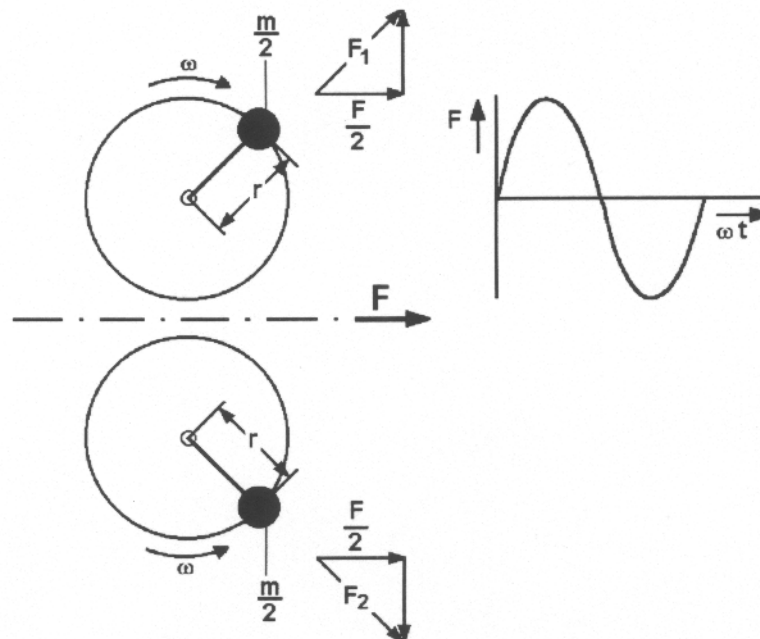
amplitúdója és fázisa, akkor valószínűleg egyensúlyállapot változás (pl: lapáttörés vagy elsózódás), esetleg tengely görbülés a hiba oka.

További példák is sorolhatók lennének, de ennek az anyagnak nem célja a hibadiagnosztika oktatása, csak arra szeretne rá mutatni, hogy milyen jelentősége van a turbina-generátor gépcsoportok esetében a tengelyrezgés és a változó fordulátú méréseknek, a dinamikai tulajdonságok rendszeres elemzésének illetve arra, hogy mennyivel megbízhatóbb diagnózis adható a fenti módszerekkel, mint egyszerű, csapágybakon mért spektrumok elemzésével.

3.6. A dinamikai viselkedés mérése külső gerjesztéssel

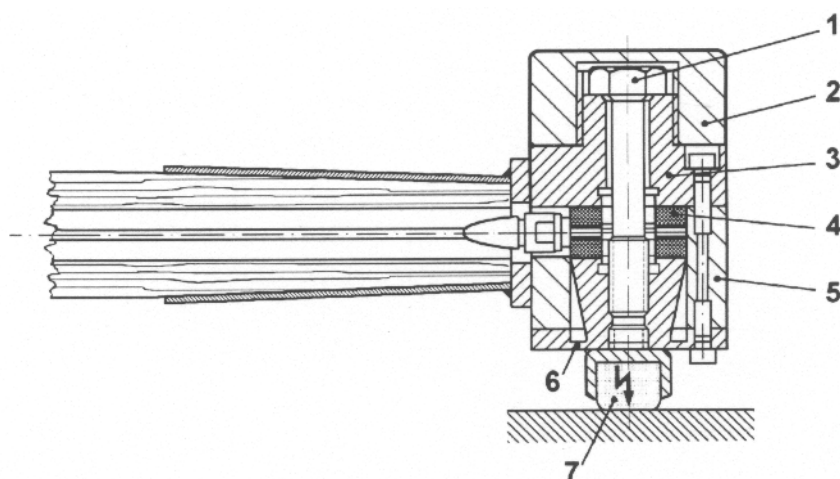
Addig, amíg az öngerjesztés esetében ismeretlen nagyságú, változó frekvenciájú belső erővel történik a gerjesztés, a külső gerjesztéses módszerekkel ismert erőhatást közlünk a rendszerrel. Ez az ismert erő akár robbantás is lehet, de turbina – generátor gépcsoportok esetében a földrengésállóság vizsgálatokat kivéve elsősorban a mechanikus, forgó gépes és az impulzus kalapácsos mérés jöhet szóba.

A forgó gépes gerjesztő egy olyan hajtómű, melyben két, azonos fordulátú tengely helyezkedik el, és mindkét tengelyen ismert, azonos nagyságú egyensúlyhiba található.



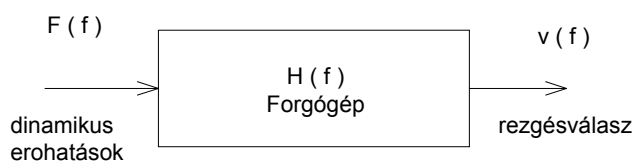
Az ábrán látható elvi elrendezés esetén az egyensúlyhibák függőleges komponensei a gerjesztő gépen belüli belső erőhatások maradnak, míg a vízszintes komponensek összegeződnek és gépen kívül, kifelé megjelennek. A hajtómű fordulatszáma változtatható és minden fordulatonál – a centrifugális erő jól ismert összefüggése szerint – számítható a gerjesztő erő.

A másik elterjedt módszer az impulzus kalapácsos gerjesztés. A kalapácsba, melyet pár grammtól 5 kilós tömegig gyártanak, erőmérő cella van beépítve. A maximális erőhatás 20000N vagy speciális esetben még több is lehet, mely már nagy szerkezetek, akár turbina – generátor gépcsoportok szerkezeti elemeinek gerjesztésére is elegendő.



A kalapács feje (7) különböző keménységű gumi vagy műanyag fejet lehet szerelni, ezzel az erőimpulzus nagyságát és meredekségét, az erő spektrumát lehet változtatni. A lágy fejek alacsonyabb frekvenciát és kisebb erőhatást adnak, mint a kemény fejek.

Mindkét erő bevezetési módszer alkalmazásakor az álló, üzemen kívüli gépet gerjesztik és nem csak a rezgésválaszt, hanem az erőhatást illetve ezek spektrumát is mérik (illetve számolják).



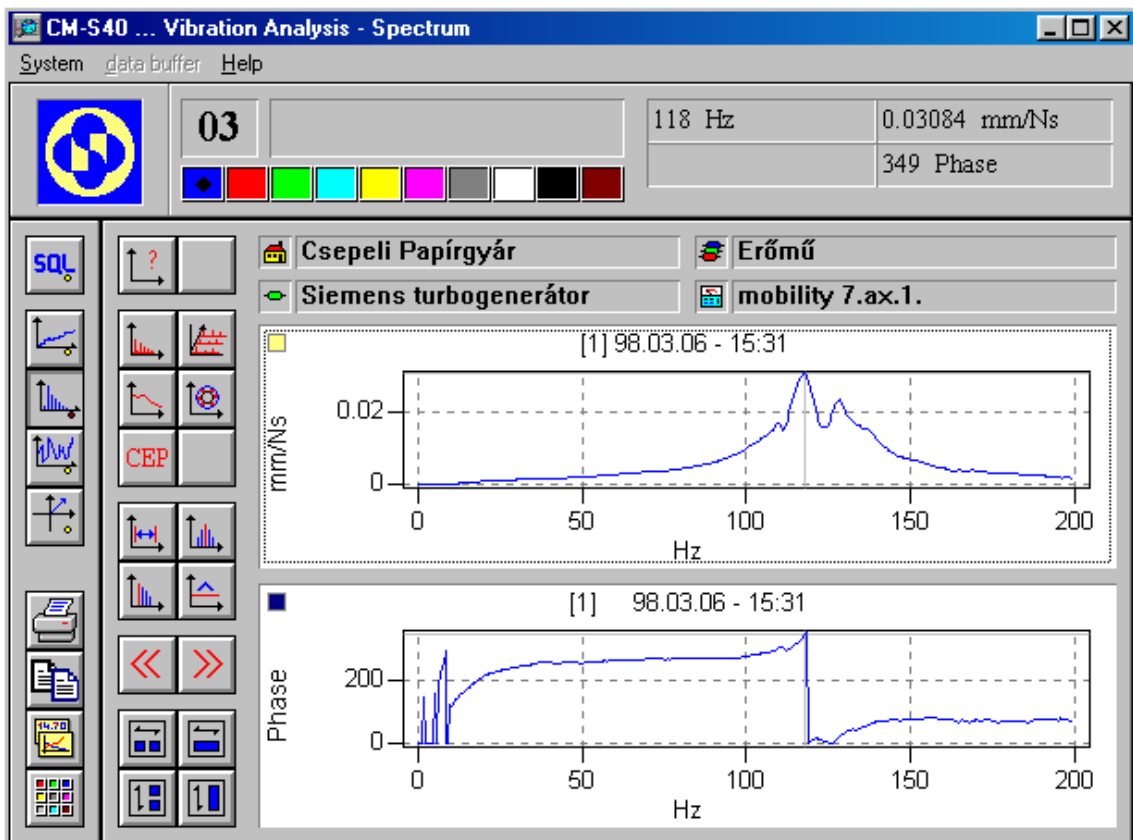
A rendszer válasz-spektruma – amiből a spektrumanalízis során mind az erők, mind a szerkezet merevségére kellett következtetni – a rezgésspektrum $v(f)$, ami az erőspektrum $F(f)$ és a merevség spektrum $H(f)$ szorzata. Tehát a merevség spektrum az előbbi két spektrum hányadosa.

$$H(f) = \frac{v(f)}{F(f)}$$

A kétcsatornás digitális spektrum analízátorok mérik mind a rendszer bemeneti jelét, az erőspektrumot, mind a kimeneti jelet, vagyis a rezgésspektrumot., illetve e két spektrumból előállítják a következő ábrán látható merevség függvényt.

A függvény segítségével egyértelműen, számszerűen meghatározható az egyes frekvenciákon a rendszer válasza, vagyis az egységnyi erőhatásra mekkora rezgés keletkezik.

Ha a merevség függvény a gép jó állapotából és esetleges rezgésemelkedés után is ismert, akkor egyértelműen lehet következtetni, hogy a rezgésemelkedés a belső erők változásának vagy a szerkezeti merevség változásának (pl.: fellazulás) tulajdonítható.



Az ábra olyan gépcsoport mobilitás függvényét mutatja, amelynél a generátor forgási frekvenciája 25 Hz, a turbina forgási frekvenciája 112 Hz. Ez a generátor - a vele egy alapon lévő turbina üzemi fordulatahoz közel eső - rezonancia miatt soha nem fog alacsony rezgésekkel üzemelni, de a függvényből az is következik, hogy az üzem közben keletkező 6 mm/s-ot 200 N, vagyis jelentéktelen dinamikus erőhatás okozza.

4. Végső következtetések, összefoglalás

A rezgésdiagnosztika a műszaki diagnosztikának egy speciális ága, amelyik a berendezések dinamikus erőhatásokra adott rezgésválaszának mérésével és értékelésével foglalkozik. Ezek a rezgések keletkezhetnek a berendezés működése közben, vagy álló helyzetben, külsőleg egy kényszergerjesztés hatására. A rezgésdiagnosztika alkalmas a gép funkcionális, működőképességi ellenőrzésére és alkalmas a berendezés bizonyos részeinek (alkatrészeinek) hiba-megállapítására.

A diagnosztika legegyszerűbb lépése a szélessávú rezgésszint rendszeres mérése. Turbina-generátor gépcsoportok esetében ez a mérés az alapvető védelmek egyike (konstrukciótól függően csapágybak és/vagy tengelyrezgés mérés folyamatosan szükséges). A széles sávú szinteket mindenkor össze kell hasonlítani a szabványokban, illetve a gyártók által megadott szintekkel, határérték túllépés esetén a turbinavédelmet működtetni kell, a gépet a következményes károk elkerülése érdekében le kell állítani.

Habár a széles sávú szint mérésből is levonhatók bizonyos diagnosztikai következtetések, az állapotfüggő karbantartás bevezetéséhez elengedhetetlen, hogy mélyebb ismereteket szerezzünk a gépeken belüli erőhatásokról és szerkezeti integritásról. A spektrumanalízis rendszeres időközönkénti elvégzése a leggyakrabban használt és egyben a legelső hibaelemző módszer turbina-generátor gépcsoportok esetén. A módszer rendkívül hatékony, de természetesen vannak korlátjai is. Még a folyamatosan végzett spektrumanalízis segítségével sem adható meg minden esetben 100 % bizonyossággal, pontos hibadiagnózis. Nehezen azonosíthatók egyértelműen az egyensúly-, tengelyvonal, görbe tengely, repedt tengely és lazasági hibák, különösen, ha azok valamilyen szinten együttesen vannak jelen.

Turbina-generátor gépcsoportok esetén rendkívül fontos a gépek dinamikai viselkedésének elemzése, vagyis a gépindulások és kifutások sokcsatornás, azonos idejű, tengelyrezgés méréssel egybekötött vizsgálata. Ezen mérésekkel az egyensúlyállapot megváltozásának, a forgórész görbülésének, az alátámasztások meggyengülésének és fellazulásának, a csapágyházak növekedésének, a tengelyvonal bárminemű torzulásának és ideálistól való - akár csak üzem közbeni, terhelés hatására létrejövő - eltérésének, a besúrolásoknak és a forgórészek repedésének a diagnosztizálása egyértelműen elvégezhető.

A sokcsatornás tengelyrezgés mérések elvégzésére alkalmas - állandó diagnosztikai feladatokat is ellátó - monitoring rendszerek telepítése rendkívül költséges, így nem minden esetben indokolt. Indokolt és ajánlható azonban a tengelyrezgés mérőhelyek kiépítése, e mérések javítások előtti és utáni, illetve rezgésemelkedés és a spektrumanalízissel kapott eredmények bizonytalansága esetén való elvégztetése hordozható mérőrendszerekkel.