

Belsőégésű motorok rezgés-és zajdiagnosztikai állapotvizsgálata Gábor eljárások felhasználásával

dr. Bánlaki Pál

*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar,
Gépjárművek és Járműgyártás Tanszék
Budapest, Stoczek utca 4. 1111, - St épület Fszt. 5. szoba
(e-mail: pal.banlaki@gjt.bme.hu)*

Kivonat: Az üzemelő belsőégésű motorok rezgés- és zajdiagnosztikai mérései során kapott adatokból az esetleges hibákra vonatkozó információ kinyerése komoly feladat. Az adatfeldolgozás, majd a feldolgozott adatok kiértékelése ma igen sokféle szinten és módon történik. A vizsgálat helyén szükséges emberi tudás kiváltása irányában tett lépés a mesterséges intelligencia alapú kiértékelő rendszerek alkalmazása. A kiértékelést elősegíti a közvetlen mérési eredmények magas szinten történő feldolgozása. Az utóbbi időben ezen a területen a gyakorlatban is megjelentek a Gábor eljárások, amelyek új színvonalat jelentenek az adatfeldolgozás és a vizsgált eszközök állapotfelmérése területén is. Jelen cikkben áttekintést adunk a szokásos adatfeldolgozási módszerekről, majd bemutatjuk a Gábor eljárások elméleti alapjait és néhány gyakorlati vizsgálati eredménnyel szemléltetjük a módszer eredményeit a tesztelt motorok esetében.

1. BEVEZETÉS

A kutatási munkám célja elsősorban a gyártósori végellenőrzés keretében, a meglegetési során, a rezgés- és zajdiagnosztikai módszerek továbbfejlesztése. A motorok esetében a rezgés- és zajforrások két csoportba sorolhatóak be:

- a belsőégési folyamat által keltett rezgések és zajok,
- a mozgó, forgó vagy alternáló mozgást végző, és eközben a környezetükkel súrlódásos kapcsolatban levő szerkezeti elemek.

Természetesen a hibátlan motor is kelt jellegzetes rezgéseket és zajt. A hibás motorok rezgései és zaja azonban jellemzően eltér a hibátlan eszköztől. A hibás motor megváltozott rezgés- és zajjellemzőinek okai az alábbiak lehetnek:

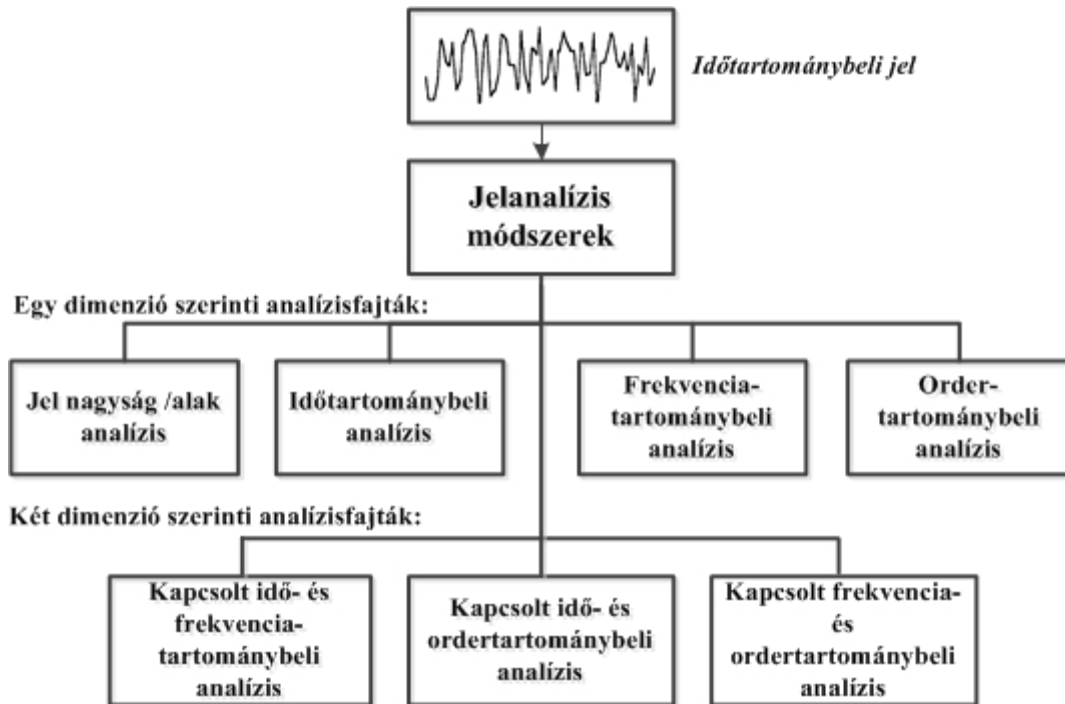
- hibás lefolyású belsőégési folyamat,
- hibás alkatrész, vagy alkatrész-együttes,
- rögzítési, szerelési hiba.

A rezgés-, ill. zajvizsgálatok – más módszerekhez hasonlóan – meglehetősen átfogó diagnosztikai „képet” adó, és a hibátlan eszközökhöz képest kis eltéréseket is kimutatni képes eljárások. A rezgés- és zajmérések eredményeinek feldolgozása és kiértékelése azonban komoly szakmai tudást, hosszú idő alatt összegyűjthető tapasztalati tudásbázist, ill. magas szintű számítástechnikai módszereket igényelhet. A rezgés- és zajjellemzők kiértékelésénél esetenként számos olyan tényezőre is figyelemmel kell lenni, amelyek nem mindig magától nyilvánvalóak, pl. ilyenek az alkalmazott üzemanyag, a motor rögzítése a tesztpadon, a motor kapcsolata a tengelykapcsolón át a műterheléssel a fékpadon, stb.

A gyártósori diagnosztikai kutatások eredményeinek egy része ma kezd megjelenni a fedélzeti diagnosztika, ill. a szerviz tevékenység területén is, ahol a méréseket befolyásoló külső tényezőkre szintén figyelemmel kell lenni.

2. A REZGÉS- ÉS ZAJADATOK FELDOLGOZÁSA

A belsőégésű motorok rezgés- és zajjelei sztochasztikus jelek, amelyeket a valószínűségszámítás és a matematikai statisztika módszereivel tudunk leírni, elemezni. (A matematikai függvényekkel egyértelműen leírható jelek a determinisztikus jelek). A különféle sztochasztikus jelek jellegzetes értékű valószínűségi paraméterekkel jellemezhetőek. A rezgés- és zajjelek vizsgálatának legrégebbi módja az emberi érzékelés, amelyből tapasztalt szakember sok következtetést le tud vonni. A ma használatos rezgés- és zajdiagnosztikai rendszerek több funkcionális egységből állnak. A rezgések érzékelésére egy irányban, vagy a térbeli három koordináta szerint érzékelő, egy vagy több, általában piezoelektromos működésű szenzort használnak, a zajjeleket pedig mérőmikrofonokkal érzékelik. A kapott villamos jeleket szaknyelvi kifejezéssel szólva kondicionálni, pl. erősíteni kell. Ezután következik a jelek egyenletes időközökben történő mintavételezése, és a jelminták analóg-digitális átalakítása. A következő feladat a digitális formában kódolt jel eltárolása, feldolgozása, majd a kiértékelés. A ma elérhető vizsgáló rendszerek kínálata, tudás és árszintje rendkívül széles, és a terület gyorsan fejlődik. Az 1. ábra a jelanalízis vonatkozásában mutatja be a ma használatos alapvető módszereket.



1. ábra. A rezgés- és zajjelek analizálására használatos módszerek áttekintése (Norton, 2007 alapján)

A rezgés- és zajjelek mintavételezése, azaz a mérési adatgyűjtés szinte mindig az idő szerint, tehát egy dimenzió mentén történik. A rezgés- és zajjelek mellett azonban általában célszerű és szükséges további jellemzők, pl. a főtelegy és a vezérműtelegyek pillanatnyi fordulatszámának, szögsebességének, a gyújtás lefolyásának, stb. mérése is. A vizsgálatok célja többféle lehet. Egyszerű esetben a cél a meghatározott valószínűséggel hibás termékek kiszűrése (go/no go teszt), amit a feltételezhetően hibás példányoknál alaposabb vizsgálat, vagy más tevékenység követhet. A sokkal nehezebb feladat a hibabehatárolás. Itt figyelemre méltó az a tény, hogy motorok esetében éves szinten millió darabos tételek készülhetnek el, amelyekből mindössze néhány darab hibás. A motor bonyolult, sok száz alkatrészből álló felépítése, és összetett működési rendszere ellenére a tapasztalatok szerint az előforduló hibatípusok száma kicsi, és ezen belül is néhány hiba dominál. A hibás darabok kiszűrése egyértelmű szempont, (ez a kimenő zéró darab hibás termék célkitűzés), de a hibák behatárolása vonatkozásában átgondolt döntéseket kell hozni.

A belsőégésű motorok rezgés- és zajdiagnosztikáját megnehezíti az a tény, hogy a fordulatszámuk az idő függvényében rövid és hosszú távon változik. Az egyik ok a hengerekben lezajló energiatermelő folyamat, ami szöggyorsulást okoz, majd ezt szöglassulás követi. A fordulatszámot ma a fedélzeti vezérlő egység szabályozza, ami a forgási sebességben jellegzetes hullámzást okoz. Végül, a motort, akár a tesztelés során is változó fordulatszámú járattjuk, - tesztelés során a gyorsítási – lassítási folyamatok sok hibajelenség kimutatására alkalmas.

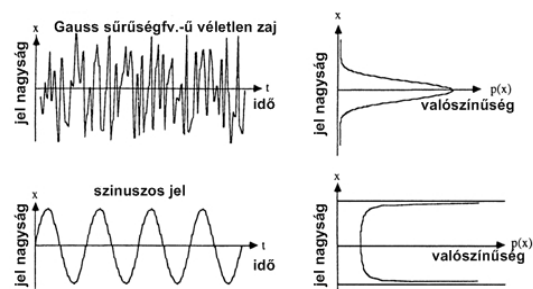
A rezgés- és zajjeleket sokféle módon lehet feldolgozni és kiértékelni, a fenti gondolatoknak megfelelő módszerekkel és

ráfordításokkal. A következő szakaszokban áttekintést adunk a különféle jelanalízis módszerekről.

2.1 Jel nagyság és jelalak analízis

Ezek a módszerek akkor kivitelezhetőek, ha a motor – lehetőségek keretein belül állandó fordulatszámon üzemel. A rezgés és zajjelek vizsgálatának egyik legegyszerűbb módja, ha meghatározzuk nagyságukat, szintjüket. A jel mintavételezett értékeiből nagyszámú statisztikai jellemző számolható ki. A minták átlaga várhatóan nulla. Sok más jellemző azonban értékes információt hordoz, ilyenek a medián, a módusz, a kiterjedési jellemzők (tapasztalati szórás, terjedelem, stb.), ill. az eloszlás magasabb momentumai, pl. a ferdeség, csúcosság, stb.

Az előbbiekkal összefüggésben jel sűrűségfüggvénye is érdekes információt rejt, amit a 2. ábra szemléltet.



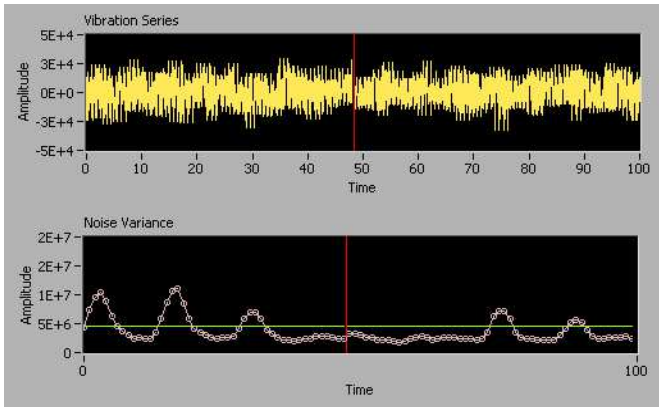
2. ábra. Véletlen lefolyású Gauss zaj és szinuszos jel sűrűségfüggvénye (Norton 2007 alapján)

Az ábrán felül egy véletlen lefolyású zaj időjelét, és sűrűségfüggvényét láthatjuk, amely történetesen Gauss sűrűségfüggvényű zaj, de ezt az időjelből aligha lehet

ránézésre megállapítani. Az ábra alsó része egy szinuszos jel sűrűségfüggvényét mutatja. A sűrűségfüggvények minősítéséhez ma egyre magasabb fokszámú momentumaik kiszámítását és elemzést is elvégzik.

2.2 A rezgés- és zajjelek időbeli lefolyásának elemzése

A rezgés- és zajjelek kiértékelésének egyik legegyszerűbb módja a jelek időfüggvényének kirajzolása képernyőre, vagy nyomtatott megjelenítése, - ekkor tehát egy dimenzió szerint, az idő függvényében vizsgáljuk a jel nagyságát. A számítógépes megjelenítés a nagyítást, a részletek megfigyelését is lehetővé teszi. A 3. ábra egy belsőégésű motor rezgés időfüggvényét mutatja.



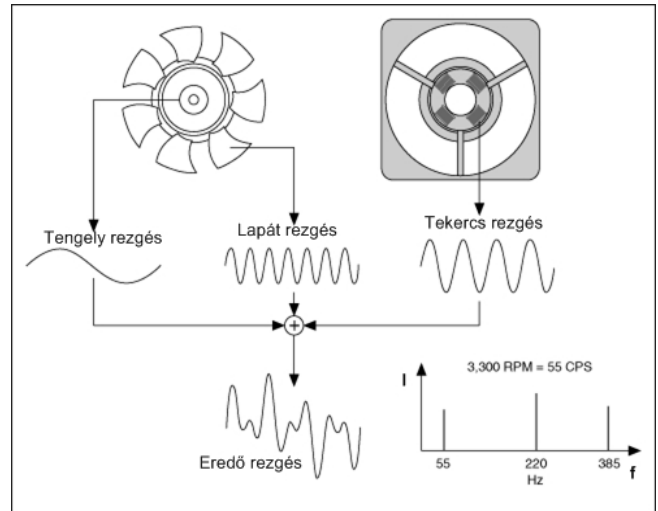
3. ábra. Belsőégésű motor rezgésjele kopogás hiba esetén (NI2012a)

Az ábrán közvetlenül megfigyelhető a rezgésjel egyenetlen volta, ami hibás működésre, ebben az esetben a motor kopogására utal. Az idő függvényében felvett jelek kiértékelését megkönnyíti a burkológörbe megrajzolása. Az előző pontban említetteknek kívül számítható még pl. a Crest faktor (Nagy 2006), vagy az ábra alsó részén az idő függvényében az ARMA algoritlussal számított szórás (NI2012a). Az időtartománybeli jelek elemzéséhez számos további módszer áll rendelkezésre, pl. az autokorrelációs függvény a megfigyelt folyamat stacionárius voltát jellemzi.

2.2 A rezgés- és zajjelek frekvenciatartománybeli elemzése

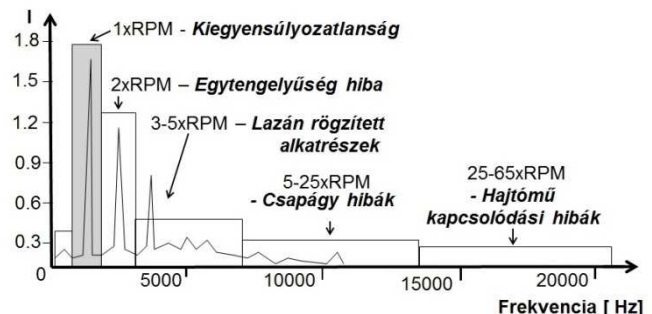
A rezgés- és zajjelek kiértékelését nagymértékben megkönnyíti, ha az időbeli jel helyett a jel nagyságát a frekvencia függvényében vizsgáljuk. A diagnosztika szempontjából általában a véges mintahosszúságú sztochasztikus jelek időtartományból frekvenciatartományba történő transzformálásával érjük el a diszkrét Fourier transzformáció segítségével, általában az FFT (gyors Fourier transzformáció) algoritmus alkalmazásával. A kapott eredmény itt is egy dimenzió, a frekvencia függvényében mutatja az adott frekvenciájú jelösszetevő nagyságát, a teljes mintavett jelre vonatkoztatva. Az irodalomban ezért ezt a módszert hosszú idejű Fourier transzformációnak is nevezik. A frekvenciaspektrum elemzése akkor végezhető el eredményesen, akkor ad használható eredményt, ha a megfigyelt folyamat ciklikus lefolyása, a forgási sebesség, vagy az alternáló mozgás ismétlődési gyakorisága állandó.

A Fourier transzformációval történő rezgésvizsgálatot egy egyszerű példán, egy ventilátor esetében a 4. ábra szemlélteti.



4. ábra. Egy ventilátor rezgésviszonyai 3300 fordulat/perc sebesség esetén (NI2005 alapján)

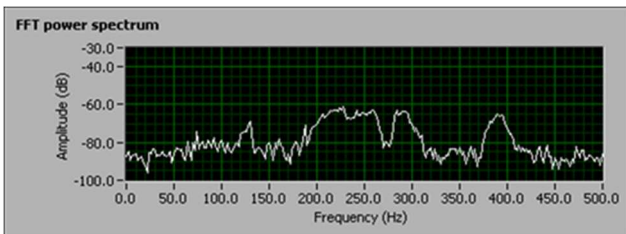
A ventilátor rezgésképe lényegében a forgórész/tengely, a négy tekercs, és a hét lapát kiegyensúlyozatlanságából adódik össze. Az ábrán látható a kiadódó eredő rezgés, és annak FFT módszerrel kapott frekvenciaspektruma. A három spektrumvonal jól mutatja a rezgést összetevő különböző frekvenciájú komponensek megjelenését a frekvenciatengely mentén. Összetettebb gépek esetében természetesen a frekvenciaspektrum jóval összetettebb, részletdúsabb képet alkot. Egy hajtómű frekvenciaspektrumát mutatja be az 5. ábra. A különböző sebességgel mozgó, forgó alkatrészeknek, ill. a különféle hibáknak más és más frekvenciasávok felelnek meg, amelyeken belül az egyes folyamatok általában kiemelkedő intenzitás, ill. energiacsúcsokat okoznak a nekik megfelelő frekvenciákon. A spektrumok kiértékelése egyrészt az ábrán bemutatott ablakolási technikával történik. A hibátlan eszközök rezgésszintjeit a frekvenciasávokban ablakokkal határozzák meg. Ha a vizsgált eszköz frekvenciaspektruma valamely sávban kívül esik az ablakon, akkor valószínűleg hibás darab. A hibabehatárolás másik fő módszere az aktuális spektrum összehasonlítása korábban hibás darabok mérése során összegyűjtött és eltárolt spektrumával.



5. ábra. Hajtómű rezgés frekvenciaspektruma a jellegzetes hibásávokkal (Powell et al, 1999 alapján).

2.3 A rezgés- és zajjelek újramintavételezéses order analízise

A belsőégésű motorok rezgés- és zajdiagnosztikai vizsgálatánál a tengelyek fordulatszáma, ill. szögsebessége a – a fentebb említett okok miatt – névlegesen állandó értékre beállított fordulatszámon is változó. Emellett a vizsgálatok fontos fajtája a gyorsítási, és lassítási folyamat megfigyelése. Ebben az esetben a teljes jelmintára vonatkoztatott, „hosszú idejű” FFT a frekvenciadiagrammon elkenődött spektrumot, éles helyett széles spektrumcsúcsokat, vonalakat eredményez. A probléma megoldását jelenti, ha a rezgés- és zajjelek mintavételezése nem azonos időközönként, hanem azonos szögelfordulás közök szerint történik. A mechanikai rendszert gerjesztő, rezgést és zajt okozó pillanatnyi alap fordulatszámnak megfelelő frekvenciát alap order frekvenciának nevezzük, és a spektrumot ehhez viszonyítva, tehát ekvidisztáns szögelfordulások szerint, és nem ekvidisztáns időközök alapján számítjuk ki. A gyakorlatban a leírt módszert az újramintavételezés (angolul: resampling) eljárással valósíthatjuk meg. Ehhez szükség van a pillanatnyi szögsebesség értékre, amit pl. a főtengelyhez kapcsolt szögjeladóból állhat rendelkezésre. A mérés során a rezgés-, ill. zajjelek mellett a szögjeladó jelét is el kell tárolni, majd a rezgés-, ill. zajjel mintából az ekvidisztáns szögjelközök – és nem időközök szerinti rezgés-, ill. zajmintasorokat kell elkészíteni. A kapott minta Fourier transzformációja révén kaphatjuk meg az order spektrumot, ami tehát nem idő alapú frekvencia dimenzió szerinti, hanem szögelfordulás alapú order frekvencia szerinti spektrumot mutat. A 6. ábra és a 7. ábra egy egyszerű példával mutatja be az order analízist. A korábbi példában bemutatott ventilátor forgási sebessége 1000 fordulat/perc értékről 4000 fordulat/perc forgási sebességre lett gyorsítva. Az ábrákon a rezgésjel tárolása után elkészített frekvenciaspektrum és az order spektrum látható. A két ábra jól mutatja a változó sebesség esetén történő mérésnél az order analízis előnyét. A frekvenciaspektrum – elég szemebetűnő módon - nem ad használható eredményt, míg az order spektrum világosan mutatja a három rezgésforrás (forgórész, tekercsek, lapátok) hatását, a változó fordulatszám ellenére az order tartományban éles spektrumcsúcsokat kapunk. A gépjármű hajtáslánc elemek vizsgálatánál, különösen a motorok esetében ezért előnyös, sőt sokszor nélkülözhetetlen az order analízis alkalmazása.



6. ábra. A ventilátor frekvenciaspektruma a gyorsítási folyamat alatt felvéve (NI2005)



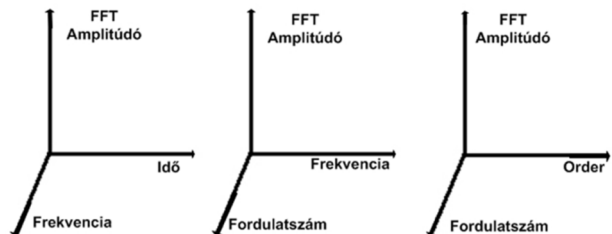
7. ábra. A ventilátor order spektruma a gyorsítási folyamat alatt felvéve (NI2005)

Az order analízis háttérben levő feladatok és algoritmusok sok vonatkozásban megfelelnek a Fourier analízis esetében használatos eszközökkel, de a feladat jóval bonyolultabb. A Nyquist kritériummal analóg feltételnek az order mintavételezés esetében is meg kell például felelni, ezért pl. vizsgált jel esetében az order transzformáció előtt a jel sávzélességét adaptív szűrővel kell biztosítani.

Az order transzformáció nem megfordítható, azaz az order spektrumból az eredeti időjel nem kapható vissza. Bár számítástechnikai erőforrásigénye jelentős, de a mai számítógépekkel a legtöbb mechanikai gép esetében a művelet on-line feldolgozással is elvégezhető. Az order spektrumok kiértékelése a frekvenciaspektrumok kiértékelésével azonos módszerekkel történhet.

2.4 A többdimenziós jelanalízis alapjai

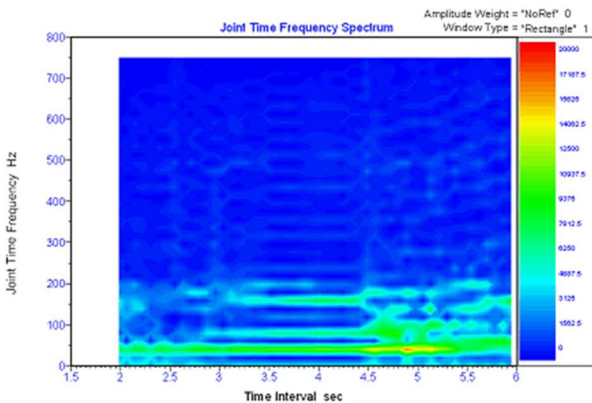
Az előző pontokban elsorolt módszerek a jelek nagyságát, energiáját az idő, vagy a frekvencia, vagy az order függvényében mutatják meg, mindhárom esetben egy dimenzió függvényében egy másik dimenzióbeli értéket, nagyságot. Ez az analízis sok esetben elegendő, és az eredmény kétdimenziós diagramokban megjeleníthető. Bonyolultabb, pl. időben erősen változó folyamatok elemzésénél előnyös, elvárható, vagy akár nélkülözhetetlen a jelek nagyságának két dimenzió szerinti megjelenítése, majd kiértékelése. Az ún. kétdimenziós kapcsolt jelanalízisnek az előző analízisfajtákból adódó három lehetőségét a 8. ábra szemlélteti. Ezek közül a leggyakrabban a kapcsolt idő – frekvencia analízis, a JFTA (angolul: Joint Time Frequency Analysis) használatos (NI2012b).



8. ábra. A két dimenzió szerinti kapcsolt jelanalízis lehetőségei (NI2012b alapján).

Az olyan összetett felépítésű gépekben, ill. komplex működési folyamatok esetében, ami például a belső égésű motorok esetében is jellemző, a folyamatok nyomon követéséhez, ill. az összefüggések feltárásához az egy dimenzió szerinti analízishez képest lényeges előrelépést jelent a rezgés vagy zaj nagyságának az idő és frekvencia, vagy a frekvencia és fordulatszám, vagy az order és fordulatszám szerinti egyidejű megfigyelése.

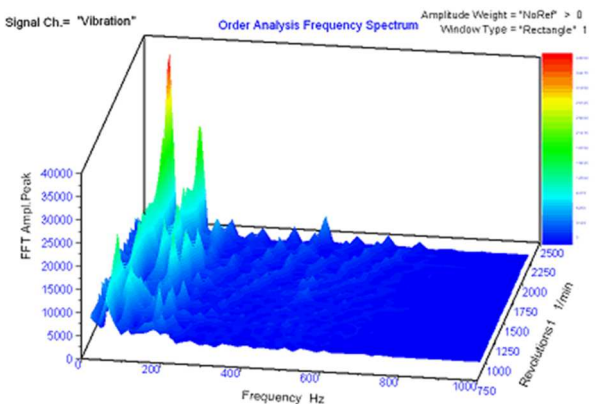
A három dimenziós grafikonok megjelenítése többféle módon történhet. A színes képernyők és nyomtatók világában elterjedt a két síkbeli dimenzió szerint változó jel nagyság színekkel történő kódolása, a színtérkép, amelyet a 9. ábra egy frekvencia-idő függvényében felvett rezgésspektrum kapcsán szemléltet:



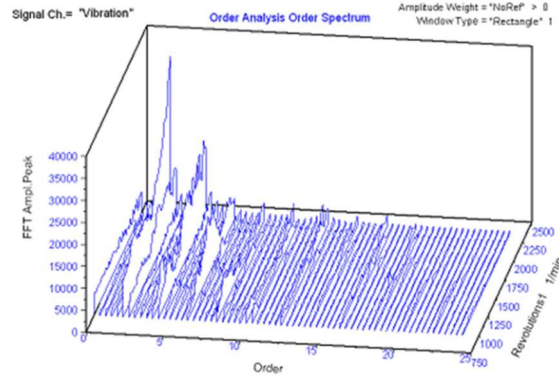
9. ábra. Kapcsolt idő – frekvencia spektrum színekódolással (NI2012b)

A második lehetőség az színes axonometrikus ábrázolás, a 10. ábra egy kapcsolt order – frekvencia spektrumot mutat be. Ezen az ábrán megfigyelhető, hogy vannak rezgéseket gerjesztő alapfolyamatot jellemző fordulatszámától erősen és alig függő rezgések.

A harmadik lehetőség a klasszikus vízésdiagram, amelyet a régóta, pl. a klasszikus order analízis esetében is használtak. A 11. ábrán kapcsolt fordulatszám – order spektrumot láthatunk, a rezgések a fordulatszámhoz kötődnek az ordertöbbszörösök mentén.



10. ábra. Axonometrikusan ábrázolt színes kapcsolt order-frekvencia spektrum (NI2012b)



11. ábra. Kapcsolt order – fordulatszám spektrum egyszínű vízésdiagram formában ábrázolva (NI2012b)

3. A GÁBOR TRANSZFORMÁCIÓ ELMÉLETI ALAPJAI

A Gábor transzformáció, ill. az ahhoz kapcsolódó több módszer a jelanalízishez a műszaki gyakorlatban újabban kezd elterjedni. Ezek magas szintű matematikai alapokon nyugvó eljárások, amelyek összefüggéseiben történő értelmezéséhez, használati lehetőségeinek értékeléséhez hasznosak a cikk első részében leírtak. A továbbiakban a kapcsolt idő – frekvencia dimenziók szerinti jelanalízissel foglalkozunk, egyrészt, mert ez a leggyakrabban használt módszer, másrészt a többi módszer is hasonló megfontolások alapján nyugszik. A hagyományos FFT a jelminta teljes egészének frekvenciaspektrumát adja meg, a jel teljes időtartamára. Az alaposabb elemzéshez kívánatos lenne a frekvenciaspektrum idő szerinti változásának a követése, azaz a frekvenciaspektrum meghatározása egy időpontban, vagy egy viszonylag szűk időintervallumban. A teljes időtartománybeli jelmintából egy időpontbeli helyet egy ablak-függvénnyel lehet lokalizálni, kivágni, és a kivágott rész frekvenciaspektrumának a meghatározása a következő feladat. A teljes mintán végighaladva így megkaphatjuk az idő függvényében számított spektrumot. A leírt módszer azonban két súlyos problémát tartalmaz. Az első probléma az ablakoló függvény alakja. Ez a kérdés az egydimenziós FFT eljárásnál is előjön. Különböző jelek esetében és különböző célokra sokféle ablakoló függvényt javasoltak és használnak, de mindegyiknek megvan a hátránya, és mindegyik valamilyen szinten befolyásolja, meghamisítja a kapott frekvenciaspektrumot. A másik probléma az ablak szélessége. Egy keskeny ablak jobban meghatározza, lokalizálja a vizsgálati időpontot, de ezzel a frekvenciatartományban érthető módon rossz felbontást eredményez. Fordítva, rossz időpont lokalizálás jobb frekvenciatartománybeli felbontást nyújt. Ezek után felvetődik az a kérdés, hogy a vizsgált idő- és frekvenciatartományt egyenletes felosztása mellett más megoldás is használható-e. A rövid idejű Fourier transzformáció, - (STFT, angolul Short Time Fourier Transformation), az egyenletes felosztást használja, míg a wavelet transzformáció esetében nem egyenletes felosztást használnak. A továbbiakban – a motorvizsgálati célra koncentrálna - csak a STFT módszerrel foglalkozunk.

3.1 Az STFT és a Gábor transzformáció matematikai alapjai

Az $s(t)$ időfüggvény $t = \tau$ időponthoz $w(t)$ ablakfüggvénnyel lokalizált részéhez tartozó frekvenciaspektrum meghatározásához, vagyis az STFT végrehajtásához az alábbi műveleteket kell elvégezni (Boashash 2003)(Gadre, 2012):

- képezni kell a t időpontba eltoló ablakoló függvény és az $s(t)$ függvény τ időpontbeli értékének szorzatát:

$$s_w(t, \tau) = s(\tau) w(\tau - t) \quad (1)$$

- el kell végezni a Fourier transzformációt:

$$F_s^w(t, f) = \mathcal{F}_{\tau \rightarrow f} \{s(\tau) w(\tau - t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) w(\tau - t) e^{-i2\pi f \tau} d\tau \quad (2)$$

A művelet invertálható, a sűrűségfüggvényből az eredeti időfüggvény inverz transzformációval visszanyerhető:

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F_s^w(t, f) w^*(\tau - t) e^{i2\pi f \tau} df d\tau \quad (3)$$

Az STFT magnitúdójának négyzetre emelt értéke a spektrogram (4):

$$S_s^w(t, f) = |F_s^w(t, f)|^2 = \left| \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) w(\tau - t) e^{-i2\pi f \tau} d\tau \right|^2$$

A spektrogram fizikai jelentése sok esetben a vizsgált jel energiasűrűség függvénye az idő és a frekvencia szerint az idő-frekvencia síkon, amelyet Heisenberg-síknak is neveznek. Az irodalomban és a szoftverekben esetenként spektrogramnak nevezik a magnitúdó abszolút értékét is.

A Gábor transzformáció, ill. az ehhez kapcsolódó eljárások családjának kidolgozása Gábor Dénes Nobel díjas magyar mérnök munkája. A módszer elméleti, matematikai alapjait 1946-ban megjelent híres cikkében ismertette (Gábor 1946). Gábor Dénes az ablakoló függvénynek a Gauss-függvényt javasolta:

$$g(t) = \sqrt[4]{\frac{\alpha}{\pi}} e^{-\frac{\alpha}{2} t^2} \quad (5)$$

Ez a forma a Gauss függvény energia normalizált alakja, mert (Bastiaans, 1981):

$$\int_{-\infty}^{\infty} |g(t)|^2 dt = 1 \quad (6)$$

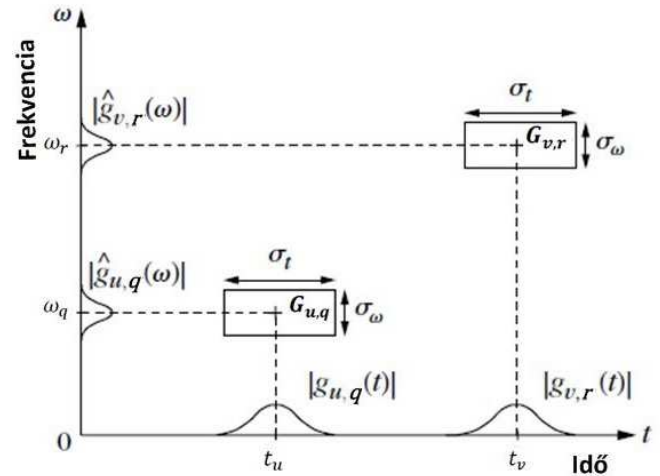
Dénes Gábor felismerte, hogy a Heisenberg-féle bizonytalansági elvhez hasonlóan az időpont és a frekvenciaérték összefüggésében is hasonló összefüggés áll fenn, amit Gábor-féle bizonytalansági elvnek nevezünk (Christiansen, 2002) (Pokol 2014):

$$\sigma_t \sigma_\omega \geq \frac{1}{2} \quad (7)$$

Dénes Gábor választása a Gauss függvényre azért esett, mert a létező összes ablakoló függvény közül ez adja a legjobb idő-és frekvencia lokalizációt:

$$\sigma_t^g \sigma_\omega^g = \frac{1}{2} \quad (8)$$

Az idő – frekvencia síkon a Gábor transzformáció eredményét szemlélteti a 12. ábra.



12. ábra. Az idő – frekvencia sík és a Gábor transzformáció eredménye

A Gábor transzformáció eredménye az idő-frekvencia síkon elhelyezkedő az egyforma méretű ún. Heisenberg dobozokban levő ún. Gábor atomok, - az ábrán két Gábor atom látható, $G_{u,q}$ és $G_{v,r}$.

A Gauss függvénynek számos különleges tulajdonsága van, - amelyek a Gábor transzformációt is különlegessé teszik, - pl. Fourier transzformáltja is Gauss függvény, és megegyezik komplex konjugáltjával; mivel valós értékű; a Gauss függvény szorzata másik Gauss függvénnyel Gauss függvényt eredményez, stb.

3.2 A diszkrét Gábor transzformáció és expanzió

A műszaki, ill. informatikai feladatok során az analóg jelekből diszkrét idő- és frekvenciaértékek melletti mintavételezett adatokkal dolgozunk. A diszkrét Gábor transzformáció a folyamatos Gábor transzformáció mintavételezett jelek esetére használható változata, egy invertálható, lineáris idő-frekvencia tartományok közötti transzformáció. Az inverz Gábor transzformáció elnevezése a Gábor expanzió. A Gábor transzformáció révén az időtartománybeli, mintavételezett $s(i)$ jelből a $c_{m,n}$ Gábor együtthatókat, - más néven Gábor koefficienseket - kapjuk meg. A transzformáció során alkalmazott ablakoló függvény neve itt a $\gamma(i)$ analízis ablak, az expanzió során alkalmazott ablakoló függvény pedig a $h(i)$ szintézis ablak. Ezek ortogonális, komplementer, ún. duális függvénypárok. A diszkrét Gábor transzformáció képlete:

$$c_{m,n} = \sum_i s(i) \gamma^*(i - m dM) e^{-\frac{j 2\pi n i}{N}} \quad (9)$$

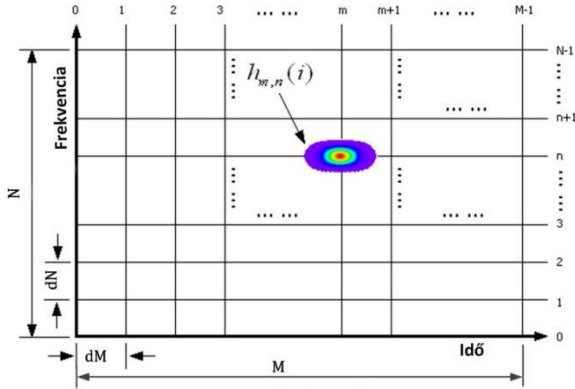
A Gábor expanzió révén, (azaz az inverz Gábor transzformáció elvégzésével), a Gábor együtthatók és az idő-frekvencia elemi függvények ismeretében a megfelelő időtartománybeli $s(i)$ időtartománybeli jelet kapjuk:

$$s(i) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} c_{m,n} h_{m,n}(i) \quad (10)$$

ahol

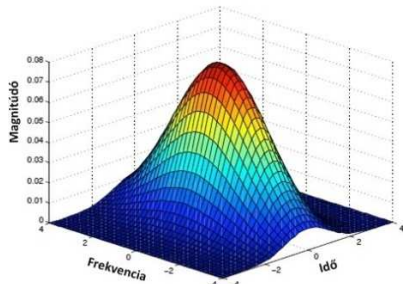
$$h_{m,n}(i) = h(i - m dM) e^{\frac{j2\pi n i}{N}} \quad (11)$$

A futó indexek értelmezését a 13. ábrán láthatjuk, amely a 12. ábra diszkrét eljárásra és értékekre vonatkozó változata:



13. ábra. A diszkrét idő – frekvencia sík és a jelölésrendszer

A diszkrét Gábor eljárásokat több matematikai szoftverkönyvtárban megtalálhatjuk. A fogalmak használata, és a jelölések nem egységesek, ez sok zavart okozhat. A szoftverek egy része többféle duális ablakoló függvény használatát is lehetővé teszi. Szigorú értelemben a Gábor transzformáció egyértelműen a Gauss függvényt használja, amelynek kétdimenziós változatát mutatja a 14. ábra.



14. ábra. A kétdimenziós Gauss függvény.

A diszkrét Gábor transzformáció eredményére mutat egy példát a 9. ábra. Az eredmények kiértékelése nehéz feladat. Az egyik lehetőség az emberi megfigyelés, és tipikus referencia spektrogramokkal való összehasonlítás. A gyakorlatban problémát jelent a megjelenítés felbontása, és színhűsége. A feladatot az emberi alakzathelismerést számítógépes úton utánozva, mesterséges intelligencia, és neurális hálózat szerint felépített számítógépes módszerekkel valósítható meg. A másik lehetőség a spektrogramok részletes matematikai analízise. Ennek során a kétdimenziós spektrogram - a vizsgált fizikai folyamatól függően - több, paraméterezett egydimenziós diagramra bontása. A paraméter egy frekvenciasáv, vagy orderfrekvencia sáv lehet, és ezen belül figyelhetjük meg a jelkomponensek intenzitását, vagy energiaszintjét az idő függvényében. Az egy dimenziós jelek kiértékelése ezek után, a paraméterértékek szerint haladva,

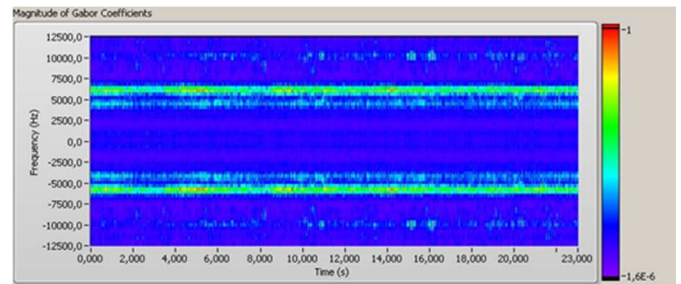
egyenként a 2.1 szakaszban leírtak szerint történhet meg, ill. itt is lehetséges a 2.2 szakaszban leírt kiértékelő ablakolási technika használata..

A Gábor spektrogramokat ma számos területen használják a gyakorlatban. Ezek közé tartozik az alakzat, kép, arc, bankjegy, radarkép alapján vadászgép, stb. felismerés, ekkor az eredeti jel mintavételezés sík, ill. térbeli koordináták szerint történik. További alkalmazás a beszéd, vagy dallam felismerés (Ding, 2011) (NI 2006).

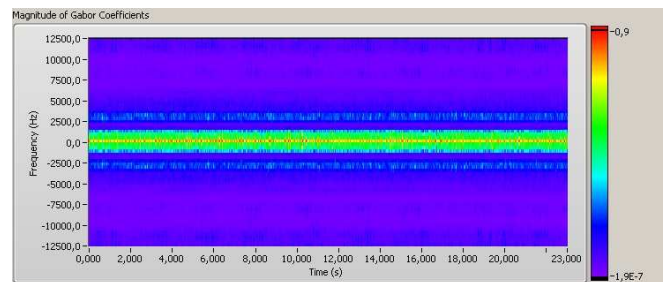
A rezgés- és zajdiagnosztika területén a Gábor eljárásokat a gépjármű hajtásláncok, ill. ezen belül belsőégésű motorok ellenőrzéséhez, hibabehatárolásához használják, és ezen a téren intenzív kutatások folynak, elsősorban neurális hálózat szervezésű, nagykapacitású számítógépek, és mesterséges intelligencia felhasználásával. (Chen 2013) (Jin et al, 2011) (Yaday et al, 2010)(Zhang et al, 2012).

4. BELSŐÉGÉSŰ MOTOROK REZGÉS- ÉS ZAJMÉRÉSI EREDMÉNYEINEK ANALÍZISE GÁBOR TRANSZFORMÁCIÓ FELHASZNÁLÁSÁVAL

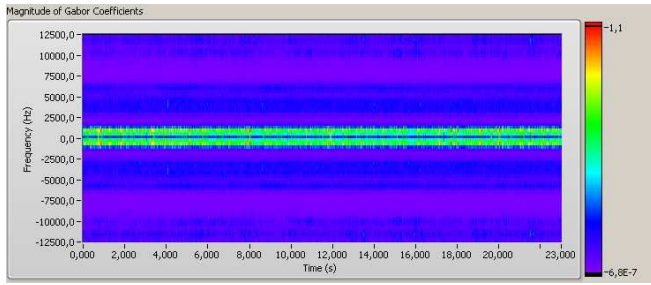
A belsőégésű motorok vizsgálatára GM Z18XER motorokat vizsgáltam, Dyno melegesztet fékpadon. A méréseket hibátlan, valamint egy kiiktatott működésű henger hibájú, ferde szeleptányérú, és hibás, rezonanciákat mutató feszítőgörgőjű motorokkal végeztük el, többféle fordulatszám, ill. alajjáratról 4200RPM értékű gyorsítás esetén (fordulatszám jele: RPM, Revolution per Minute). (A vizsgálatok leírását a (Bánlaki, 2010) publikáció tartalmazza). Az alábbiakban reprezentatív spektrogramokat mutatok be. A rezgéseket három térbeli irányban mértem, és mértem a motor zaját is. Az ábrákon a hivatkozott rezgésirányok: X- motor keresztirány, Y- motor függőleges irány, Z- motor főtengely irány. (Az ábrafeliratokban értelemszerű rövid formát használtam, pl.Y rezgést az Y irányú rezgések helyett).



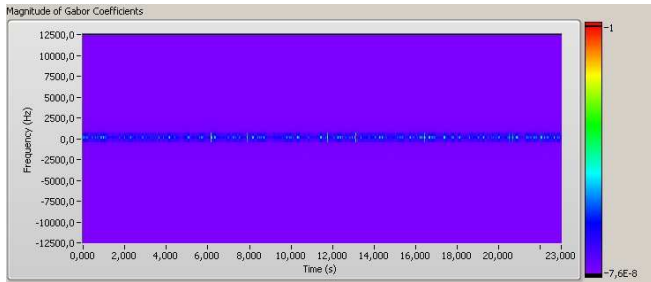
15. ábra. Hibátlan motor Y rezgés spektrogramja, 2000RPM



16. ábra Hibátlan motor X rezgés spektrogramja, 2000 RPM

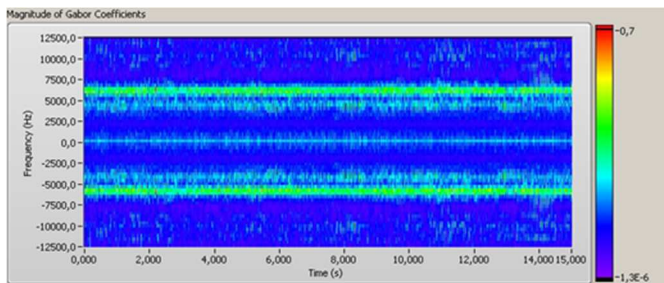


17. ábra. Hibátlan motor Z rezgés spektogramja, 2000 RPM

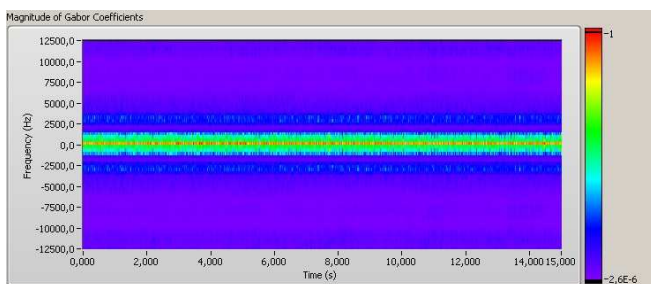


18. ábra. Hibátlan motor zaj spektogramja, 2000 RPM

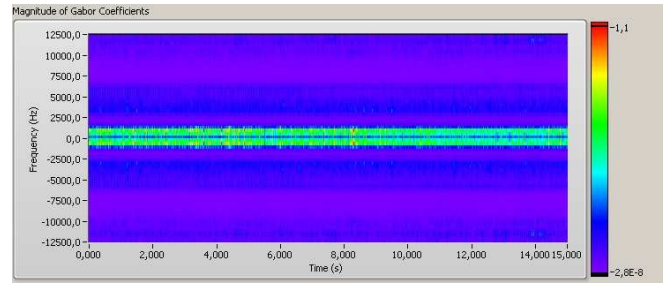
A hibátlan és a hibás motorok spektogram sorozatai között megfigyelhetők az eltérések, de a különféle hibák különféle irányokban, vagy a zajképben figyelhetők meg dominánsan. A bemutatott ábrák mérési paraméterezése azonos az összehasonlíthatóság érdekében, de eltérő paraméterezéssel egy-egy hiba specifikusabban kimutatható az egyértelmű diagnosztika elősegítésére. A következő ábrásor egy kiiktatott injektor miatt három hengerrel működő motor spektogramjait mutatja. A kiegyensúlyozatlanság Y irányban szembeötlő, viszont másutt, egyes frekvenciákon a rezgésszint kisebb.



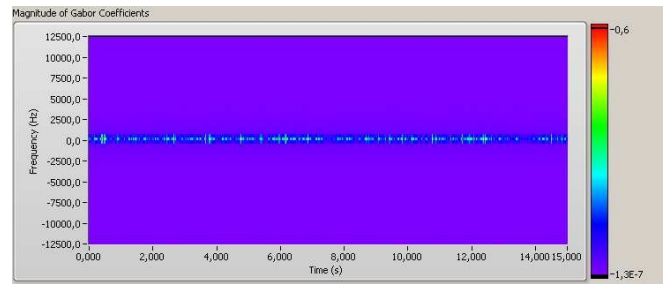
19. ábra. Hengerhibás motor Y rezgés spektogramja, 2000 RPM



20. ábra. Hengerhibás motor X rezgés spektogramja, 2000 RPM



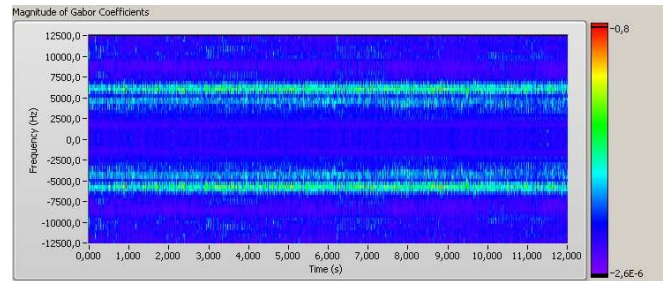
21. ábra. Hengerhibás motor Z rezgés spektogramja, 2000 RPM



22. ábra. Hengerhibás motor zaj spektogramja, 2000 RPM

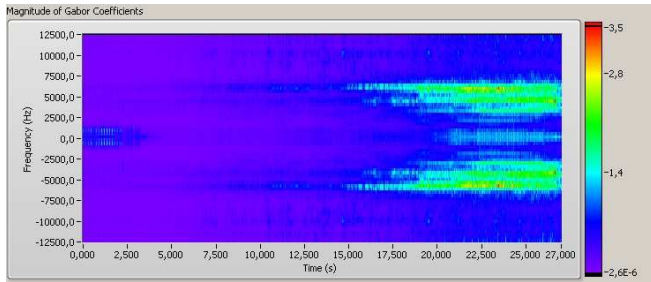
A spektogramok információtartalma nagy, érdekes összefüggéseket mutat ki, ami megfelelő paraméterezés és nagy képfelbontás esetén tapasztalható meg igazán.

A 23. ábra ferde szeleptányér hibás motor függőleges irányú rezgés spektogramját mutatja be. A „csipkézett kép” tükrözi az összetett rezgéseket, de nem jelentkezik a hibás hengerű motornál megfigyelhető kiegyensúlyozatlanság.



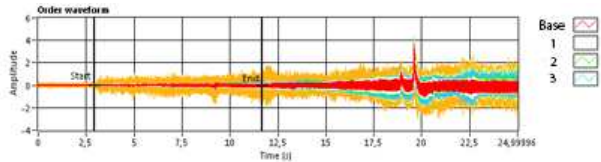
23. ábra. Szeleptányér hibás motor Y rezgés spektogramja, 2000 RPM

A 24. ábra egy hibás hengerrel működő motor alajjáratról 4200 RPM értékre gyorsítási folyamatának spektogramját mutatja. Az alajjárát nem stabil, erős rezgések keletkeznek, közepes fordulatszámra a motor „csenedesebb” a hibátlannál, magasabb fordulatszámra viszont a hiba erős rezgésképváltozást okoz.



24. ábra. Hengerhibás motor zaj spektrogramja, aljáratról 4200 RPM értékre gyorsítás során

A Gábor transzformációhoz kifejlesztett további módszerek lehetővé teszik a frekvencia, vagy orderfrekvencia szerinti harmonikus összetevők különválasztását, és önálló analizését. A 2. ábra a hibás feszítőgörgő tengelyének irányában felvett rezgésképét mutatja, az alaporder és a domináns orderek szerinti felbontásban. Ez a felbontás lehetőséget ad az egyes rezonanciát okozó komponensek független tanulmányozására.



25. ábra. Feszítőgörgő rezonanciajelenségek által keltett rezgések, aljáratról 4200 RPM értékre gyorsítás során. Színkódolás: narancs: teljes rezgés, piros: alaporder, fehér, zöld, kék: magasabb rendű domináns orderek.

A mérési sorozatok idő-, eszköz-, szakember, összességében erőforrás és költségigényes feladatok. Felmerül a kérdés, hogy milyen fordulatszámokon előnyös a mérések kivitelezése. Nagyszámú mérés tapasztalatainak, kiértékelésének birtokában megfogalmazhatóak a következő állítások:

- az aljárát ingadozása nagy, és sok tényezőtől függ, így a hibadiagnostikai szempontból speciális tényező. A fordulatszám ingadozás szintje megfigyelendő mennyiség, de rezgésdiagnostikai szempontból nem kedvező érték.
- az 1000 RPM érték ígéretes lenne, mert itt már jól működik a fedélzeti vezérlő fordulatszám szabályozása, de pont ebben a környezetben a szabályozó algoritmus váltása jellemző.
- a 2000 RPM esetén a motor szabályozása stabil, felfüggesztése, és egyéb tényezők működését rezgés és zaj vonatkozásában különösebben nem befolyásolják, ezért ez egy kedvező vizsgálati beállítás.
- a motor viselkedése – rezonanciajelenségektől eltekintve – egy további tartományban rezgés- és zajvontkozásban alig változik, a 4000 RPM feletti értékekig.
- magasabb fordulatszámokon a rezgés- és zajképet erősen befolyásolják a motor rögzítésével, a kapcsolódó egységekkel, a tesztpad és terem kialakításával kapcsolatos jelenségek, amelyek megkülönböztetése és kiszűrése nehéz.

Végeredményben, a motor alapvető, gazdaságos vizsgálatához a 2000 RPM, és az aljáratról a 4000 RPM értéket némileg meghaladó gyorsítási folyamat rezgés- és zajanalízise javasolható, előnyös, hatékony, gazdaságos módszereknek.

KÖVETKEZTETÉSEK

A belsőégésű motorok rezgés- és zajdiagnostikája ma sokféle módon és szinten kivitelezhető. Egyszerű és olcsó módszerekkel is lehetőség van a vizsgált darab hibás voltának nagy valószínűséggel történő kiszűrésére. A mai matematikai háttér, a műszaki, informatikai, számítástechnikai lehetőséget azonban megteremtik a lehetőséget a megbízható hibabeazonosításhoz is. A nemzetközi kutatásokban a Gábor transzformáció használata központi kutatási és alkalmazási szerepet kapott. Saját kutatási eredményeim az tématerület ígéretes voltát véleményem szerint igazolták.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatási munka elméleti háttérének megismerésében, valamint vizsgálati tevékenység kidolgozásában és elvégzésében sok munkatárstól kaptam értékes segítséget. Az eredmények eléréséhez különösen nagy köszönettel tartozom önzetlen együttműködésükért, tanácsaikért, és a vonatkozó ismeretanyaghoz adott kiegészítésekért, ill. értelmezésekért, magyarázatokért, valamint a gyakorlati tapasztalatban szerzett tudás megosztásáért:

- Kövér Zsoltnak, a (GM) Opel Szentgotthárd Kft vezető tesztmérnökének,
- Péter Attilának, a National Instruments Hungary Kft vezető managerének,
- Dr. Pokol Gergő docensnek, a BME Nukleáris Technika Intézet munkatársának.

IRODALOMJEGYZÉK

- dr. Bánlaci Pál, dr. Dömötör Ferenc, Mesics József (2010): *Belsőégésű motorok minőségének javítása rezgés- és zajanalízis felhasználásával*, Proceedings of IFFK 2010, MMA, Budapest, ISBN 978-963-88875-1-1
- Bastiaans, M. J. (1981): *A sampling theorem for the complex spectrogram, and Gabor's expansion of a signal in Gaussian elementary signals*, *Optical Engineering* 20(4), 594-598 (July/August 1981) . SPIE, Bellingham, http://www.univie.ac.at/nuhag-php/bibtex/open_files/1417_1500002.pdf
- Boashash, B. (2003): *Time-Frequency Signal Analysis and Processing*, ELSEVIER Ltd, Kidlington, 2003
- Chen, J., Randall, R., Feng, N., Peeters, B., Auweraer, H. (2013): *Automated diagnostics of internal combustion engines using vibration simulation*, *Surveillance 7 International Conference 2013*, Institute of Technology of Chartres, Chartres, 2013, http://surveillance7.sciencesconf.org/conference/surveillance7/09_automated_diagnostics_of_internal_combustion_engines_using.pdf
- Ding, J.J. (2011): *Time Frequency Analysis Tutorial Gabor Feature and its Application*, 2011 National Taiwan

- University, 2011, Taipei,
http://djj.ee.ntu.edu.tw/Tutorial_Gabor_Features.pdf
- Gabor, D. (1946): *Theory of communications*. Journal of the Institute of Electric Engineers, Vol 93:No III., pp. 429–457, IET, London, November 1946,
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5298517&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5298517
- Gadre, W. (2012): *Wavelets and multirate digital signal processing, Lecture 22*, IIT, Bombay,
http://nptel.ac.in/courses/117101001/downloads/Lec-22_Script.pdf
- Jin, Yang, Hao, Z., Zheng, Xu (2011): *Comparison of different techniques for time-frequency analysis of internal combustion engine vibration signals*, Journal of Zhejiang University - Science A: Applied Physics & Engineering 01/2011,
https://www.researchgate.net/researcher/71104813_Yang_Jin
- Dr. Nagy István (2006): *Állapotfüggő Karbantartás – Műszaki Diagnosztika I. – Rezgésdiagnosztika*, ISBN 978-963-06-0808-4, Delta3N, Dunaújváros, 2006
- NI (2005): *Getting Started with the Order Analysis Toolkit*, Application Note, 2005, NI,
http://www.ni.com/pdf/labview/us/order_analysis_toolkit.pdf
- NI (2006) *Four practical applications of Joint Time Frequency Analysis*, <http://www.ni.com/white-paper/2758/en/>
- NI (2012a): *Engine Knocking Monitor Using Autoregressive-moving Average Modeling*, 2012,
<http://www.ni.com/example/30699/en/>
- NI (2012b): *Joint Time Frequency and Order Analysis Tool for DIAdem*, White Paper 2012, <http://www.ni.com/white-paper/3549/en/>
- Norton, M., Karczub, D. (2007): *Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers*, Cambridge University Press, 2007, Cambridge, ISBN 978-0-521-49561-5
- dr. Pokol Gergő (2014): *Idő-frekvencia transzformációk – waveletek*, „Üzemi mérések és diagnosztika” előadás – prezentáció, BME NTI 2014, Budapest
http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/pokol/Oktatas_2013-2014-2/diagnosztika_wavelet.pdf
- Qian, S. (2004): *Application of Gabor expansion for Order Analysis*, Proceedings of 22nd IMAC Conference and Exposition 2004 (IMAC XXII), Society for Experimental Mechanics, Dearbor, 2004, ISBN: 978-1-60423-802-0,
<http://sem-proceedings.com/22i/sem.org-IMAC-XXII-Conf-s29p04-Application-Gabor-Expansion-Order-Analysis.pdf>
- Wang, K. (2011): *Approaches to the improvement os order tarcking techniques for vibration based diagnostics in rotating machines*, University of Pretoria, 2011,
[https://web.up.ac.za/sitefiles/file/44/1026/2163/PhD/PhD-](https://web.up.ac.za/sitefiles/file/44/1026/2163/PhD/PhD-Wilczok.pdf)
- Wilczok, E. (2000): *New Uncertainty Principles for the Continuous Gabor Transform and the Continuous Wavelet Transform*, Documenta Mathematica 5 (2000) 201-226, Journal der Deutschen Mathematiker-Vereinigung, Publisher: Deutsche Mathematiker-Vereinigung,
<http://www.math.uiuc.edu/documenta/vol-05/08.pdf>
- Yadav, S., Kalra, P. (2010): *Automatic Fault Diagnosis of Internal Combustion Engine Based on Spectrogram and Artificial Neural Network*, Proceedings of the 10th WSEAS Int. Conference on ROBOTICS, CONTROL and MANUFACTURING TECHNOLOGY, 2010, ISSN: 1790-5117, ISBN: 978-960-474-175-5,
<http://www.wseas.us/e-library/conferences/2010/Hangzhou/ROCOM/ROCOM-16.pdf>
- Zhang, Zhi-gang – E, Jia-qiang – Zhang, Gui-xiang (2012): *A novel dense spectrum correction algorithm for extracting vibration signals in internal combustion engine and its application*, Journal of Central South University, October 2012, Volume 19, Issue 10, pp 2810-2815, Central South University Press and Springer Verlag, Berlin Heidelberg