

MISKOLCI EGYETEM DOKTORI (PHD) TÉZISFÜZETEI  
HATVANY JÓZSEF INFORMATIKAI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA



**TRANZIENS ÉS KVÁZIPERIODIKUS FOLYAMATOK  
ANALÍZISE AZ  
IDŐ-FREKVENCIA TARTOMÁNYBAN**

*Készítette:*  
**TÓTH LAJOS TIBOR**  
adjunktus

AKI DOKTORI (PHD) FOKOZAT ELNYERÉSÉRE PÁLYÁZIK

*A doktori iskola vezetője:*  
**DR. TÓTH TIBOR**  
*a műszaki tudomány doktora*

*Tudományos vezető:*  
**DR. SZARKA TIVADAR**  
*a műszaki tudomány kandidátusa*

MISKOLC  
2011



**Bíráló bizottság tagjai***Elnök:*

Tóth Tibor DSc, egyetemi tanár (ME)

*Tartalék elnök:*

Szentirmai László CSc, professor emeritus (ME)

*Titkár:*

Kovács Szilveszter PhD, egyetemi docens (ME)

*Tagok:*

Dán András DSc, egyetemi tanár (BME)

Madarász György CSc, fejlesztési igazgató (Hyundai Technologies Center Hungary)

Erdélyi Ferenc CSc, címzetes egyetemi tanár (BME)

*Póttag:*

Czap László PhD, egyetemi docens (ME)

*Hivatalos bírálók:*

Csáki Tibor CSc, egyetemi docens (ME)

Jónap Károly PhD, osztályvezető (AKKI)

## 1. ELŐZMÉNYEK

Napjainkban a gördülőcsapágy egy gyakran alkalmazott gépelem. Ez az alkatrész kitüntetett szerepet játszik eszközeink működésében. Meghibásodása ezért nem csak hatalmas károkat okozhat, de esetenként az emberi életet is veszélyezteti. A gördülőcsapágyak meghibásodására a csapágy elem működés közbeni szokatlan viselkedése utal. A nem megfelelő működésre utalhat a megnövekedett csapágyzaj vagy az emelkedő csapágyhőmérséklet. A „szokatlan viselkedés” kezdeti állapotát (melyeket sem füllel, sem tapintással még nem érzékelünk) rendszerint a csapágyak váratlanul gyors meghibásodása követi. Az így jelentkező csapágy hibák beláthatatlan következményekkel járhatnak. Éppen ezért fontos a rendszeres ellenőrzés, megelőző karbantartás és szükség esetén a hibás alkatrész cseréje.

A váratlan meghibásodások elkerülésére különböző eljárásokat dolgoztak ki. Ilyenek a folyamatos állapot felügyeleti rendszerek vagy a rezgés diagnosztika. Az állapot felügyeleti rendszerek lényegében olyan összehasonlító méréseket végeznek, ahol a csapágy aktuális, megfelelően kiválasztott működési paraméterét egy korábbi, meghibásodás előtti (beszerelés utáni) állapotával hasonlítják össze. Az előre meghatározott érték elérésekor elvégzik a karbantartást. A rezgés diagnosztika olyan módszer, ahol az adott gépelem rezgésképében keresik a jellemzően előforduló összetevőket (harmonikusokat) és a gép geometriai-, működési paramétereinek ismeretében állapítják meg a hiba forrását.

A csapágy helyes működésének vizsgálatára különböző módszerek állnak rendelkezésre. Általánosságban elmondható, hogy a módszerek túlnyomó része a rezgés jel Fourier-transzformációján (FFT vagy DFT) alapul. A különböző típusú meghibásodások ugyanis a csapágy geometriájával és a működési paraméterekkel szorosan összefüggő frekvenciájú rezgéseket generálnak. A rezgéseket leíró jelekre jellemző, hogy ezek a legkülönbözőbb frekvenciájú rezgések összege, olyan összetett jelek, melyekben megtalálhatók a periodikus-, a kvázi periodikus-, a sztochasztikus- és a tranziensszerű összetevők is.

Ismeretes, hogy a diszkrét Fourier-transzformáció véges energiájú, periodikusan ismétlődő, időben diszkrét mennyiségek vizsgálatára alkalmas leginkább. Annak oka, hogy a diszkrét Fourier-transzformációt mégis eredményesen használják csapágyvizsgálatra az, hogy legtöbb esetben az összetett rezgések, impulzusok - a geometriával és fordulatszámmal szoros összefüggésben -  $\Delta t$  idő alatt periodicitást mutatnak, így azok összetevői elfogadható pontossággal meghatározhatók.

Az eljárásnak nagy hibája az, hogy Fourier-transzformáció minden jelet, így az összetett jeleket is szinuszos jelkomponensek szuperpozíciójaként írja le. A tranziens jelek esetében ezért ez az eljárás azon időpillanatokban is egymást kioltó szinuszos jeleket feltételez ahol eredetileg az analizálandó jel zérusértékű. Természetesen a valóság más, amit a gyakorlat nem ritkán bizonyít.

A disszertációmban javasolt rezgésvizsgálati módszer tudományos alapja és gyakorlati alkalmazhatósága az, hogy a vizsgáló jel maga is tranziens jel és annak alakja - idő és frekvencia tartománybeli kiterjedése - a keresett tranziens impulzushoz hasonló.

A fenti elven működő, új tudományos eredményekre támaszkodó jelfeldolgozási módszert, az utóbbi évtizedek kiterjedt kutatásai révén kidolgozott 'Wavelet analízis' tette lehetővé. A Wavelet analízis eredményeit sikeresen alkalmazták a tudomány számos területén.

## 2. TUDOMÁNYOS CÉLKITŰZÉSEK

Az értekezésnek nem célja a gördülőcsapágy meghibásodások kialakulásának mechanikai, szilárdságtani vagy anyagszerkezettani vizsgálata. Elsődleges cél a katasztrófális meghibásodási állapot előtti utolsó karbantartási lehetőség időpontjának rezgésvizsgálati vagy állapot felügyeleti módszerrel történő pontosabb, megbízhatóbb jelzése.

A gördülőcsapágy akkor éri el élettartamának végét, amikor az anyagkifáradás első jelei (hámlás vagy kipattogzás) bármelyik csapágygyűrűn, vagy gördülő testen megjelenik [S.6].

Az értekezés készítése során olyan rezgésvizsgálati módszer kidolgozását és szoftveres megvalósítását tűztem ki célul mely zajos mérési környezetben is képes gördülőcsapágyak belső gyűrűjének lepattogzás szerű, „pittinges” meghibásodásakor létrejövő tranziens impulzusok érzékelésére, valamint ismétlődési gyakoriságuk és frekvencia tartománybeli elhelyezkedésük alapján a hiba forrásának felderítésére.

A vizsgálat tárgyát képező meghibásodás reprodukálására több lehetőség is kínálkozik. A klasszikus módszer szerint a csapágyat fárasztó vizsgálatnak teszik ki. Élettartam vizsgáló gépeken addig futtatják a csapágyakat ameddig azok felületén a pittingképződés megindul. Ez a folyamat a névleges terhelés mellett nagyon sok időt venne igénybe, ezért a vizsgálatot a névleges értéknél nagyobb terhelésen végzik. Mivel nem állt rendelkezésemre ilyen berendezés a meghibásodás mesterséges úton történő létrehozását tűztem ki célul.

A meghibásodás által gerjesztett rezgések vizsgálata csak olyan csapágyon végezhető el, amely a megmunkálási (hiba kialakítási) művelet után működőképes állapotba hozható. Ennek megfelelően olyan csapágy kiválasztására törekedtem mely roncsolás mentesen szét és összeszerelhető.

A meghibásodás által gerjesztett tranziens rezgés impulzusok jelmodelljének felvételénél fontos követelménynek tekintettem a szabványokban [S.1-S.5] előírt radiális terhelés megvalósítását. A mérési elrendezés összeállításánál törekedtem a zajok kiszűrésére. A mérési adatok felvételéhez és feldolgozásához olyan szoftver elkészítését tűztem ki célul, amely segítségével a kiértékelési folyamat automatizálható, az adatok a mérési paraméterekkel együtt archiválhatók és visszatölthetők.

## 3. AZ ALKALMAZOTT MÓDSZEREK ÉS AZ ELVÉGZETT KUTATÓMUNKA ÖSSZEFOGLALÁSA

A jelmodell felvételéhez ki kellett választani a vizsgálat tárgyát képező csapágytípust. Mesterségesen létre kellett hozni egy pontszerű meghibásodást. Meg kellett tervezni a szabványban előírt radiális terhelés megvalósítására alkalmas

szerkezeti kialakítást. Ki kellett választani a tranziens rezgések érzékelésére alkalmas szenzort, valamint el kellett készíteni a mérésadatgyűjtés feladatát ellátó szoftvert.

A csapágy kiválasztásánál elsődleges szempont a tesztelésre való alkalmasság volt. Olyan csapágyat kellett választani, amely roncsolás mentesen szét- és összeszerelhető.

A fenti szempontok és a rendelkezésre álló források figyelembe vételével a 6204 típusú, műanyag kosaras, egysorú, mélyhornyú, radiális terhelésű golyóscsapágyra esett a választás.

Mivel a csapágy anyaga nagyon kemény (HRC 58 – HRC 65), a hiba létrehozásához a mechanikai módszerek alkalmazását elvettem. A pontszerű meghibásodást egy „Vibro-Iron” márkájú vibrációs-ívfényes gravírozó és egy lézeres fűrő-vágó berendezés segítségével is sikerült létrehozni.

A „Vibro-Iron”-t egy oszlopos fűrőgép orsójához, a csapágyat fúróasztalhoz leszorított satuba rögzítettem. A szakaszos üzemű „Vibro-Iron” által létrehozott 42V/1,5A-es villamos ív 0,6mm széles krátert hozott létre a belső gyűrű gördülőpályáján.

A villamos ív által létrehozott meghibásodás alakja függ a fémben folyó áram útjától. Ennek alakja az ív kialakulásának függvénye, mely eltért az ideális körtől. A lézersugaras vágó berendezés ezzel szemben az ideális kör alakot nagyon megközelítő furatot hozott létre.

A rezgésméréshez KISTLER gyártmányú 8702B50 típusú gyorsulásmérő szenzort választottam. A gyorsulásmérő szenzor adatlapja [113] szerint a mérési tartomány  $\pm 50$  g, az érzékenység  $100 \text{ mV/g}$  ( $\pm 5 \%$ ), az átviteli görbe  $0,5 \text{ kHz} - 10 \text{ kHz}$  ( $\pm 5 \%$ ) tartományon belül állandó értékű és a nonlinearitás  $\pm 1 \%$  FSO. A rezgés gyorsulás mérés előnye, hogy a kimeneti jel integrálásával a rezgése sebesség és az elmozdulás értéke is előállítható.

A szabványokban [S1-S5] előírt radiális csapágyterhelés megvalósításához egy E1N típusú esztergapadot használtam. A jelmodell felvételéhez és a teszteléshez két szerkezeti kialakítást valósítottam meg. Az összeszerelt csapágyat a tokmányba befogott és szegnyereggel megtámasztott, méretre esztergált csapra illesztettem. Az esztergapad késtartójába egy kengyelhez rögzített rudat fogtam be. A kengyel segítségével radiális terhelést adtam a csapágyra. A jelmodell felvételéhez a gyorsulásmérő szenzort a csapágy külső gyűrűjén síkra köszörült felülethez rögzítettem kifejezetten erre a célra szolgáló méhviasszal. A teszteléshez a valóságos csapágybeépítést modellező kialakításban a késtartóba befogott tüskéhez rögzítettem az M6-os menetes furatba rögzíthető gyorsulásérzékelő szenzort. A csavarral történő rögzítésre a rögzítési mód okozta rezgés csillapítási veszteség lehető legkisebb értéken való tartása miatt volt szükség. A szerkezet kialakításánál elsődleges szempont az erő/rezgés átviteli út minimalizálása volt. Mérési elrendezés helyes beállítását oszcilloszkóp segítségével ellenőriztem.

A jelmodell felvételéhez rendelkezésemre álló eszközök: VOLTcraft DS-01 típusú digitális stroboszkóp a belső gyűrű fordulatszámának pontos méréséhez, villanófrekvencia:  $2-175 \text{ Hz}$ , ( $20..10500 \text{ 1/min}$ ), KISTLER Gyorsulásmérő szenzor 8702B50, KISTLER 5108 típusú töltéserősítő és PCI 6063E PCMCIA mérésadatgyűjtő kártya,  $500 \text{ kS/s}$  mintavételi sebességgel a rezgés gyorsulás adatok rögzítéséhez, valamint NI LABWINDOWS CVI programcsomag a mintavételezett adatok feldolgozásához.

A rezgés adatok rögzítéséhez szoftvert fejlesztettem LabWindows CVI környezetben. A szoftver vezérli a számítógéphez csatlakoztatott mérésadatgyűjtő kártyát valamint gondoskodik a mintavételezett adatok feldolgozásáról. Beállítható a mintavételezés sebessége, a minták száma és az erősítés mértéke. A felhasználónak lehetősége nyílik a mért adatok letárolására, beolvasására. A mintavételezett jelek ASCII formátumban kódolt feszültség értékek alakjában kerültek letárolásra. A program a feszültség értékeken kívül minden egyes adatfájl mellé automatikusan lementí a mintavételezéskor használt mérésadatgyűjtő kártya beállításokat egy konfigurációs fájlba.

A csapágy hibafrekvenciák elméleti értékeinek kiszámítására szoftvert fejlesztettem Pocket PC típusú PDA-ra. A program segítségével lehetővé válik üzemi körülmények között, változó működési paraméterek mellett a hibafrekvenciák kiszámítására.

Mintavételezést az esztergapad főorsójának különböző fordulatszámai mellett végeztem el. A próbamérések során azt tapasztaltam, hogy a gyorsulásérzékelő csak nagyobb fordulatszámok mellett adott értékelhető kimeneti jelet. A méréseket a szabvány előírásainak megfelelően  $1800 \text{ min}^{-1}$ -os főorsó fordulatszám mellett végeztem el.

A jelmodell felvételéhez egy új szűrési eljárást fejlesztettem ki a zajjal terhelt, amplitúdó modulált, periodikusan ismétlődő tranziens impulzusok szűrésére. Ezzel a módszerrel lehetőség nyílt a meghibásodáson átgördülő gördülő elem által gerjesztett tranziens rezgés impulzusok terhelési tényezőjétől független alakjának meghatározására.

A jelmodell felvételénél feltételeztem és bebizonyítottam, hogy a tranziens előállítható a tranziens időbeli lefolyását megtestesítő burkológörbe és a csapágy valamely sajátfrekvenciájának szorzataként. A tranziens impulzus burkológörbéjét *Hilbert* transzformáció segítségével állítottam elő. A burkológörbe egyenletének alakját *a priori* ismereteim alapján egy három ismeretlen tartalmazó függvényvel adtam meg. A függvény közelítéséhez a *Nelder-Mead* nem-lineáris szimplex módszerét használtam fel. Hibakritériumnak a hibák négyzetes összegét választottam. Az új mérési (vizsgálati) módszer alkalmazásával sikerült olyan paramétereket találni melyekkel a burkológörbe egyenlete az adott tartományon belül jó illeszkedett a mesterségesen létrehozott meghibásodás által gerjesztett tranziens impulzus burkológörbéjére. A burkológörbe illesztését elvégeztem négy ismeretlen tartalmazó jelmodellel is. A negyedik paraméter értéke alig különbözött egytől, így a háromparaméteres jelmodellt tekinthető az ilyen típusú meghibásodás valóságghú jelmodelljének.

A sávhatárolt skálázó függvényű ortonormált wavelet család létrehozásánál a skálázó függvény pontonként folytonos alakjának magadásából indultam ki. A skálázó függvényt ortonormalizáltam, majd előállítottam belőle a waveletet. Megadtam a wavelethez tartozó szűrőegyütthatók numerikus értékeit. Bebizonyítottam, hogy a wavelet a fokszámának növelésével átmegy ideális sávszűrőbe.

A jelmodellt jól közelítő ortonormális wavelet konstruálásánál *Chapa, és Rao* [34] módszerét használtam fel. Az eljárás külön-külön illeszti a wavelet függvény amplitúdó és fázis spektrumát a megkívánt jel karakterisztikáihoz. Az amplitúdó illesztési eljárást a *Lagrange multiplier* felhasználásával egy zárt alakban megadott formula írja le. A fázis menet illesztését az eljárás visszavezeti egy *R*-ed fokú

polinom alakban megadott csoportfutási idő illesztésre. Az amplitúdó és fázismenet illesztéséhez a MATLAB programcsomagot használtam fel. Létrehoztam a jelmodellhez a négyzetes hibakritérium alapján (MSE) jól illeszkedő waveletet. Megadtam a wavelethez tartozó szűrőegységű numerikus értékeit.

Megvizsgáltam a két új wavelet digitális szűrőként történő alkalmazásának lehetőségét. A vizsgálathoz a wavelet szűrő egységű numerikus értékeit felhasználó *wavelet thresholding* eljárást használtam. Viszonyítási alapnak egy *compact support*-al – véges számú wavelet egységűvel – rendelkező szimmetrikus, folytonos waveletet (*symlet5*) választottam. Az eredmények kiértékelését a zajmentes és a szűrt tranziens jelekből számolt négyzetes hibakritérium értéke alapján végeztem el.

Megvizsgáltam a két új wavelet tranziens impulzus detektálási képességét. A vizsgálathoz előállítottam a tranziens impulzus folytonos wavelet transzformáltját (*CWT*) mindkét wavelet esetére. Összehasonlítási alapnak a tranziens jelek wavelet analízisének általánosan használt *Morlet* wavelettel számolt *CWT* egységűeket használtam fel. A kiértékelést a wavelet egységűek nagysága alapján végeztem el.

A *CWT* reprezentációk összevetésekor nagyfokú hasonlóság mutatkozott a két új és a *Morlet* wavelettel számolt értékek között. A hasonlóság okának keresését a wavelet függvények idő és frekvencia tartománybeli alakjainak összehasonlításával végeztem el.

A lepattozás szerű „pittinges” meghibásodás rezgésadatokból történő kimutatására az *lwave2* wavelettel számolt *scalogram* idő-skálaparaméter(frekvencia) eloszlást használtam.

#### 4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Az értekezés új tudományos eredményeit az alábbi tézisek foglalják össze:

**1. Tézis: Kidolgoztam egy olyan új szűrési eljárást, amely alkalmas a periodikusan ismétlődő, amplitúdó modulált, zajjal terhelt tranziens impulzusok szűrésére.** Az eljárás alapját a vonalas spektrum mintavételezése adja. Amplitúdómoduláció hatására az egyes spektrumvonalaknak oldalsávjai jelennek meg. A spektrális mintavételezéssel valamint - additív zajt feltételezve - a mintavételezett frekvencia komponensek amplitúdóinak, - a zaj energiaszintnek - megfelelő amplitúdó értékkel való csökkentésével, a nem kívánt információ eltávolítható a jelről. Az időtartományba történő átranzformálás után a visszanyerjük az eredeti modulálatlan jelet. **Igazoltam, hogy az új módszer alkalmazásával lehetőség nyílik a modulálatlan, zajmentes impulzus sorozat elhanyagolhatóan kis hibával történő visszaállítására 30dB-es jel-zaj viszony (SNR) értékig.** Összehasonlítva a hagyományos szűrési eljárás és az új módszer alkalmazhatóságát különböző jel-zaj viszony esetére azt találtam, hogy a hagyományos szűrési módszerrel az eredeti modulálatlan, zajmentes impulzus sorozat – ellentétben az általam kidolgozott eljárással – nem állítható vissza maradéktalanul. **Rosozabb SNR értékek esetén a két módszer hibája egy adott érték felé konvergál. A disszertációban számos mérés eredményeként bemutattam az új módszer alkalmazhatóságát csapágyrezgés adatok kiszűrésére [P. 15].**



**2. Tézis: Kidolgoztam az egysoros mélyhornyú golyóscsapágy belső gyűrű felületén keletkező pontszerű meghibásodás valóságú jelmodelljét. Kidolgoztam egy új mérési eljárást a jelmodell felvételre, ahol elsődleges célnak az erő/rezgés átviteli út minimalizálását tartottam. A jelmodell felvételénél feltételeztem és igazoltam, hogy a tranziens impulzus előállítható a tranziens időbeli lefolyását megtestesítő burkológörbe és a csapágy valamely sajátfrekvenciájának szorzataként. Az impulzusok idő-frekvencia vizsgálatai (STFT, Wiegner-Ville) kimutatták, hogy a tranziensek frekvenciában nem moduláltak. Előállítottam a mintavételezett, szűrt tranziens impulzus burkológörbéjét Hilbert transzformáció felhasználásával. A burkológörbe egyenletének alakját a priori ismereteink alapján egy három ismeretlen tartalmazó függvénnyel adtam meg. A függvény közelítéséhez a Nelder-Mead nem-lineáris szimplex módszerét használtam fel. Hibakritériumnak a hibák négyzetes összegét választottam. Az új mérési (vizsgálati) módszer alkalmazásával sikerült olyan paramétereket találni melyekkel a burkológörbe egyenlete az adott tartományon belül jól közelítette a mesterségesen létrehozott meghibásodás által gerjesztett tranziens impulzus burkológörbéjét [P. 14].**

**3. Tézis: Létrehoztam egy sávhatárolt skálázófüggvényű ortonormált wavelet családot (*lwave1*) mely alkalmas csapágyakban keletkező, ismétlődő, tranziens rezgésimpulzusok vizsgálatára. Megadtam a wavelethez tartozó szűrőegyütthatók numerikus értékeit. Igazoltam, hogy a wavelet a fokszámának növelésével átmegy ideális sávszűrőbe. A jelmodell alapján létrehoztam egy olyan analízáló waveletet (*lwave2*), mely az adott meghibásodás által gerjesztett tranziens rezgésimpulzust, a négyzetes hibakritérium alapján (MSE) jól közelíti. Megadtam a wavelethez tartozó szűrőegyütthatók numerikus értékeit. Megvizsgáltam a két új wavelet digitális szűrőként történő felhasználásának lehetőségét. Bebizonyítottam, hogy a két új wavelet alkalmas zajjal terhelt tranziens impulzusok szűrésére. A vizsgálatnál használt tranziens impulzushoz additív fehérzajt kevertem, majd azt a két új és a – wavelet technikában jól ismert, általánosan használt – „*symlet5*” waveleteket felhasználó „*Wavelet thresholding*” eljárással megsűríttem. A szűrés jóságának jellemzésére MSE értéket számoltam a zajmentes és a szűréssel visszaállított jelekből. Megállapítottam, hogy szűrőként való felhasználás tekintetében csak a wavelet együtthatók számában van különbség a waveletek között [P. 13, P. 15].**

**4. Tézis: Megvizsgáltam, a két új wavelet erősen zajos mérési környezetben lévő, exponenciálisan csillapított tranziens impulzusok detektálására való alkalmasságát. Bebizonyítottam, hogy mind a két új wavelet alkalmas tranziens események lokalizálására. Viszonyítási alapnak a tranziens mechanikai rezgések wavelet transzformációval történő vizsgálatánál általánosan alkalmazott *Morlet-waveletet* használtam fel. Vizsgálatom tárgya a tranziens impulzus analízálásából nyert CWT együtthatók idő és skálaparaméter szerinti értékei. A két új (*lwave1*, *lwave2*) és a *Morlet-wavelet* felhasználásával számolt CWT együtthatók idő és skálaparaméter szerinti eloszlása nagyfokú hasonlóságot mutatott. A hasonlóság okát keresve kimutattam, hogy az exponenciális vagy közel-exponenciális függvénnyel amplitúdóban modulált (csillapított)**

**rezgés válaszok időtartománybeli alakja a Morlet-wavelethez nagyon hasonlít.** A wavelet analízis alapjául szolgáló konvolúció akkor adja a legnagyobb értéket, ha a vizsgálandó jel és a wavelet hasonló. Mivel az *lwave2* wavelet **az egysoros mélyhornyú golyóscsapágy belső gyűrűjének pontszerű meghibásodásán áthaladó gördülőelem által gerjesztett rezgés impulzus** felhasználásával készült megállapítható, hogy az ilyen típusú meghibásodás wavelet transzformációval történő **detektálására alkalmas analízáló wavelete a *lwave2-wavelet*** [P. 13, P. 15].

**5. Tézis:** Összehasonlítottam számos, a gördülőcsapágyak meghibásodásának jelzésére használt állapotfelügyeleti módszert az egysoros mélyhornyú golyóscsapágy - belső gyűrű kipattogzása „pitting” - katasztrofális meghibásodása előtti utolsó lehetséges karbantartási állapot jelzésére. **Kimutattam, hogy zajos mérési környezetben a *lwave2-wavelettel* számolt scalogram idő-frekvencia eloszlása nélkülözhetetlen segédeszköz a zajba beágyazott tranzienis impulzusok kimutatására.** A módszer használhatóságát valós mérési adatokon teszteltem. A pontszerű meghibásodás gerjesztette tranzienis impulzusok érzékelésére, azaz a **katasztrofális meghibásodási állapot előtti utolsó karbantartási állapot meghatározására az *lwave2-wavelettel* vagy a *Morlet-wavelettel* számolt scalogram** (skálaparaméter szerinti energia eloszlás) **használatát javaslom.** A javasolt módszer szerint amint megjelenik a **mintavételezett rezgés adatok scalogramjában a periodikusan ismétlődő tranzienis impulzus, a gördülőcsapágy elérte élettartamának végét.** Ettől az időponttól kezdve a **gördülőcsapágy lepattogzás szerű meghibásodásának rohamos kifejlődése várható.**

## 5. HASZNOSÍTHATÓSÁG, TOVÁBBFEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK

Az értekezésben tárgyalt állapot felügyeleti és rezgésvizsgáló módszerek jól alkalmazhatók forgó gépelemet tartalmazó berendezések állapotának meghatározására. Az utóbbi évtizedek kutatásainak eredményei újabb vizsgálati módszerek felhasználását tették lehetővé melyek az ipari gyakorlatban is alkalmazást nyertek. Az új módszerek új rezgésvizsgáló berendezések formájában jelennek meg. Az értekezés tudományos eredményeit felhasználva lehetőséget látok egy új, tranzienis impulzusok vizsgálatára alkalmas mérőműszer megvalósítására.

Fontos továbbfejlesztési irányként szeretném megjelölni az értekezésben tárgyalt meghibásodási módra jól illeszkedő, „compact support”-al, azaz véges számú wavelet együtthatóval rendelkező wavelet létrehozását. Az értekezésben előállított waveletek, valamint a *Morlet* wavelet diszkrét alakja sem rendelkezik ilyen tulajdonsággal. Ezzel a wavelet függvényeket felhasználó algoritmusok számítási igénye, a pontossági jellemzők megtartása mellett csökkenthető lenne.

További fontos kutatási lehetőségként szeretném megjelölni a többi csapágyelem (gördülő elem, kosár, külső gyűrű) meghibásodásának wavelet analízis segítségével történő vizsgálatát.

## 6. NEW SCIENTIFIC RESULTS

The new scientific results are summarized by the following:

**Thesis 1. I have developed a new filtering method, which is applicable for filtering periodic-, amplitude modulated-, noisy transient pulses.** The technique is based on sampling of the line spectra. Sidebars will appear near the spectral lines due to amplitude modulation. Using spectral sampling, and – assuming an additive noise on the sampled data – reducing the amplitude values of the spectral components by the noise energy level the unwanted information can be removed from the signal. One can obtain the original unmodulated signal by inverse Fourier transformation. **It is proved that the new method is capable of restoring the unmodulated noise-free signal at negligibly small error level as long as the signal to noise ratio (SNR) is lower than 30dB.** Compared with the traditional filtering process and the new method at different signal-to-noise ratio values, it was found that by the conventional filtering method the original unmodulated, noise-free pulse train - in contrast to the method developed by me - cannot be restored completely. At worse SNR values, the failures of the two methods converge toward a certain value. **Applicability of the new method for filtering bearing vibration data was presented in the thesis [P. 15].**

**Thesis 2. I developed a realistic signal model of the deep groove ball bearing with point wise fault on the inner race. I have also developed a new measurement procedure for establishing signal model, where the primary purpose was to minimize the force / vibration transmission path. In the process of formulating the signal model it was assumed and verified that the transient pulse produced is made of products of envelope – representing the time course of transient – one of the bearing’s natural frequencies.** Tests of time–frequency pulses (STFT, Wiegner-Ville) showed that the transients are non-modulated in frequency. The envelope of sampled, filtered transient pulse was computed using Hilbert transform. Shape of the envelope equation based on a priori information is given by the function containing three unknowns. For approximation the non-linear Nelder-Mead simplex method was used. The mean-squared-error was chosen to be the error-function. By using the new measurement (test) method such parameters has been found by which the equation of the envelope function is in a good approximation within the given range to the envelope of the transient response of the artificially created defect [P. 14].

**Thesis 3. I created an orthonormal wavelet family (lwave1) with band-limited scaling function which is applicable for analyzing repetitive transient pulses generated in ball bearings.** The numerical values of filter coefficients belonging to Wavelets are given. **It is proved that by increasing the degree of wavelets they become ideal band-pass filter. Using the signal model an analyzing wavelet (lwave2) is created, which approximates the vibration response generated by the fault well.** The numerical values of filter coefficients belonging to Wavelets are given. **I investigated the applicability of the new wavelets digital filtering. It has been proven that the new wavelets capable of filtering noisy transient pulses.** I tested these wavelets with white noise added and

filtered signals by "Wavelet thresholding" process using the new and the generally used "symlet 5" wavelets. The MSE values were calculated to characterize the goodness of filtering from the noise-free and the restored signals. The only difference found was the number of wavelet coefficients [P. 13, P. 15].

**Thesis 4. I have examined the applicability of two new wavelets for detecting exponentially damped transient pulses in a highly noisy environment. It was proved that both new wavelets are suitable for localization of transient events.** I used the well-known Morlet wavelet – generally used in analyzing mechanical vibrations – as a benchmark for evaluation. I investigated the CWT coefficients of transient pulses as function of time and frequency (scale parameter). The coefficients CWT distribution of the new (*lwave1*, *lwave2*) and Morlet-wavelet showed a high degree of similarity. **It was shown that the cause of similarity was that the time domain plot of amplitude modulated (attenuated) vibration response by exponential or near-exponential functions and Morlet-wavelets are very similar.** The wavelet analysis is based convolution will give the greatest value when the test signal and the wavelet are similar. **Since the *lwave2* was established using a transient pulse generated in a deep groove ball bearing with point wise defect on the inner ring, it can be stated that *lwave2* is suitable for detecting this kind of failures by wavelet transform** [P. 13, P. 15].

**Thesis 5.** I compared a number of condition monitoring methods to indicate the failure of deep groove ball bearing – as "pitting" formulation on the inner ring – that is the last possible time for maintenance before a catastrophic failure. **I have shown that in a noisy environment, the scalogram time-frequency distribution calculated by *lwave2* wavelet is an essential tool for detecting transient pulses.** The method is tested on real measurement data. For detection of transient pulses generated in a deep groove ball bearing i.e. **to determine the time of last possible maintenance before catastrophic failure condition I suggest using the scalogram distribution calculated with *lwave2* wavelet or Morlet wavelet.** **According to the proposed method, the bearing has reached the end of life as the periodically repeating transient pulses appear in the scalogram. From that moment on rapid development of spalling can be expected.**

## 7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN KÉSZÜLT PUBLIKÁCIÓK

- [P. 1] **TÓTH L:** *Rezgések számítógépes analízise*, Tudományos diákköri konferencia, Miskolc, 1997
- [P. 2] **TÓTH L:** *Computer Aided Vibration Analysis of a Three-Story, One-Bay Structure*, International Workshop on Mechatronics Courses, p. 213, ISSN 0238-3888.
- [P. 3] **TÓTH L.:** *Rezgések számítógépes analízise.*, Doktorandusz fórum, Miskolc, 1997, szekciókiadvány, pp. 74-79

- [P. 4] **TÓTH L, SZARKA T:** *Improvements of the reliability of measurement*, microCAD 1998, International Computer Science Conference, Section E: Electrotechnics and Electronics, pp.83-86.
- [P. 5] **TÓTH L, SZARKA T:** *Improvements of the reliability of measurement*, GÉP, IL. Évfolyam. 1998/4-5. szám, pp. 60-61, ISSN 0016-8572
- [P. 6] **TÓTH L, SZARKA T:** *Examination of Non-Periodic Composite, Mechanical Vibrations*, microCAD 1999, International Computer Science Conference, Section F: Electrotechnics and Electronics, pp.101-106, ISBN 963-661-356-7
- [P. 7] **TÓTH L, SZARKA T:** *Examination of Non-Periodic Composite, Mechanical Vibrations*, GÉP, L. Évfolyam. 1999/5. szám, pp. 7-9, ISSN 0016-8572
- [P. 8] **TÓTH L, SZARKA T:** *On Condition Monitoring Using Wavelets and Neural Networks*, microCAD 2000, International Computer Science Conference, Section F: Electrotechnics and Electronics, pp.71-76, ISBN 963-661-419-9
- [P. 9] **TÓTH L:** *Investigation of the Effect of Local Scattering on Determination of DOA by MUSIC Algorithm*, microCAD 2003, International Computer Science Conference, Section J: Electrotechnics and Electronics, pp.93-99, ISBN 963-661-556
- [P. 10] **TÓTH L:** *Time-frequency, Time-scale analysis of transient signals*, microCAD 2004, International Computer Science Conference, Section F: Electrotechnics and Electronics, pp.67-73, ISBN 963-661-616-7.
- [P. 11] **TÓTH L, KOVÁCS E:** *Wavelet analysis of Bearing Vibration Signals*, microCAD 2005, International Science Conference, Section J: Electrotechnics and Electronics, pp.59-64, ISBN 963-661-656
- [P. 12] **TÓTH L:** *Construction of modified Meyer Wavelets*, microCAD 2006, International Science Conference, Section J: Electrotechnics and Electronics, pp.95-100, ISBN 963-661-710-4
- [P. 13] **TÓTH L:** *Construction of Orthonormal Wavelets from Bandlimited Scaling functions*, microCAD 2007, International Science Conference, Section J: Electrotechnics and Electronics, pp.59-65, ISBN 978-963-661-751-6
- [P. 14] **TÓTH L:** *Identification of a Transient Vibration Signal Model*, microCAD 2008, International Science Conference, Section J: Electrotechnics and Electronics, pp.83-88, ISBN 978-963-661-821

- [P. 15] TÓTH L: *Improving the Accuracy of Transient Vibration Measurements*, microCAD 2009, International Science Conference, Section J: Electrotechnics and Electronics, pp.93-99, ISBN 978-963-661-866
- [P. 16] TÓTH L: *Construction of Wavelets to Match transient Vibration Signals*, microCAD 2010, International Science Conference, Section K: Electrotechnics and Electronics, pp.103-108, ISBN 978-963-661-915-2

## 7.1. HIVATKOZOTT IRODALOM

### *Szabványok, előírások*

- [S.1] ISO 2372:1974 Mechanical vibration of machines with operating speeds from 10 to 200 rev/s -- Basis for specifying evaluation standards
- [S.2] ISO 3945:1985 Mechanical vibration of large rotating machines with speed range from 10 to 200 r/s -- Measurement and evaluation of vibration severity in situ
- [S.3] ISO 10816-1:1195-(E) Mechanikai rezgések – Géprezgések kiértékelése a nem forgó részekben történő mérésrel. – Nemzetközi szabvány
- [S.4] American National Standard ANSI/AFBMA Std 13-1970, ANSI B3.13-1970, Rolling Bearing Vibration and Noise (Methods of Measuring)
- [S.5] Deutsches Institut für Normung DIN 5426, Laufgeräusche von Wälzlagern, Prüfverfahren.
- [S.6] SKF főkatalógus, katalógusszám: 8200, Svéd golyóscsapágy Rt., 810937, Kossuth nyomda Bp.
- [S.7] FAG Gördülőcsapágyak Főkatalógus, FAG OEM und Handel AG, 1996.

### *Könyvek, folyóiratok, publikációk*

- [1] GUSTAFSSON OG, TALLIAN T. Detection of damage in assembled rolling element bearings. ASLE Preprint 61-AM 3B-1. 16th ASLE, Philadelphia, PA, 1961. 39pp.
- [2] HARRIS TA. Rolling bearing analysis. New York: John Wiley and Sons, 1966.
- [3] BRODERICK JJ, BURCHILL RF, CLARK HL. Design and fabrication of prototype system for early warning of impending bearing failure. MTI Report MTI-71 TR-1 (prepared for NASA), 1972.

- [4] BUTLER DE. The shock pulse method for the detection of damaged rolling bearings. *NDT Int* 1973:92–5.
- [5] DYER D. Bearing condition monitoring. In: *Interim Report 1*. Southampton (UK): Department of Mechanical Engineering, University of Southampton, 1973.
- [6] BURCHILL RF, FRAREY JL, WILSON DS. New machinery health diagnostic techniques using high frequency vibration. In: *SAE Paper 730930*. Dearborn (IL): SAE, 1973.
- [7] DARLOW MS, BADGLEY RH. Early detection of defects in rolling element bearings. *SAE Paper 750209*. Dearborn (IL): SAE, 1975. 12pp.
- [8] WINN LW, BULL HL. Diagnostic system for ball bearing quality control. *SAE Paper 760910*. Dearborn (IL): SAE, 1976. 8pp.
- [9] COLLACOTT RA. *Mechanical fault diagnosis*. London: Chapman and Hall, 1977.
- [10] A, PAPOULIS: *Signal Analysis*, Singapore, McGraw-Hill, Inc. 1977.
- [11] MOLNÁR, DR. VARGA: *Gördülőcsapágyazások tervezése*, Műszaki kiadó, Budapest, 1977.
- [12] C.S. SUNNERSJÖ, Varying compliance vibrations of rolling bearings, *Journal of Sound and Vibration* 58 (1978), pp. 363-373.
- [13] DYER D, STEWART RM. Detection of rolling element bearing damage by statistical vibration analysis. *Trans ASME, J Mech Design* 1978;100(2):229–35.
- [14] ROGERS LM. The application of vibration signature analysis and acoustic emission source location to on-line condition monitoring of anti-friction bearings. *Tribol Int* 1979;12(2):51–9.
- [15] NISHIO K, HOSHIYA S, MIYACHI T. An investigation of the early detection of defects in ball bearings by the vibration monitoring. *ASME Paper 79-DET-45*. New York: ASME, 1979.
- [16] MEYER LD, AHLGREN FF, WEICHBRODT B. An analytic model for ball bearing vibrations to predict vibration response to distributed defects. *Trans ASME, J Mech Design* 1980;102:205–10.
- [17] IGARASHI T, NODA B, MATSUSHIMA E. A study on the prediction of abnormalities in rolling bearings (1). *J JSLE Int* 1980;1:71–6.

- [18] IGARASHI T, HAMADA H. Studies on the vibration and sound of defective rolling bearings (first report: vibration of ball bearings with one defect). Bull JSME 1982;25(204):994–1001.
- [19] OSUAGWU CC, THOMAS DW. Effect of inter-modulation and quasi-periodic instability in the diagnosis of rolling element incipient defect. Trans ASME, J Mech Design 1982;104(2):296–302.
- [20] YOSHIOKA T, FUJIWARA T. A new acoustic emission source locating system for the study of rolling contact fatigue. Wear 1982;81:183–6.
- [21] WARDLE FP, POON SY. Rolling bearing noise — cause and cure. Chartered Mech Engr July/August 1983:36–40.
- [22] MCFADDEN PD, SMITH JD. The vibration produced by a single point defect on the inner or outer race or rolling elements of a bearing under radial or axial load. Technical Report CUED/CMech/ TR34. Cambridge (UK): Engineering Department, Cambridge University, 1983.
- [23] KIM PY, LOWE IRG. A review of rolling element bearing health monitoring. In: Proceedings of Machinery Vibration Monitoring and Analysis Meeting, Vibration Institute, Houston, TX, 19–21 April, 1983. p.145–54.
- [24] MATHEW J, ALFREDSON RJ. The condition monitoring of rolling element bearings using vibration analysis. Trans ASME, J Vibr, Acoust, Stress Reliab Design 1984;106:447–53.
- [25] MCFADDEN PD, SMITH JD. Vibration monitoring of rolling element bearings by the high frequency resonance technique —a review. Tribol Int 1984;17(1):3–10.
- [26] KIM PY. A review of rolling element bearing health monitoring (II): preliminary test results on current technologies. In: Proceedings of Machinery Vibration Monitoring and Analysis Meeting, Vibration Institute, New Orleans, LA, 26–28 June, 1984. p.127–37.
- [27] KIM PY. A review of rolling element bearing health monitoring (III): preliminary test results on eddy current proximity transducer technique. In: Proceedings of 3rd International Conference on Vibration in Rotating Machinery, York, UK, 11–13 September, 1984. p.119–25.
- [28] YOSHIOKA T, FUJIWARA T. Application of acoustic emission technique to detection of rolling bearing failure. In: Dornfield DA, editor. Acoustic emission monitoring and analysis in manufacturing. New York: ASME, 1984. p.55–75.



- [29] MARTINS LG, GERGES SNY. Comparison between signal analysis for detecting incipient bearing damage. In: Proceedings of the International Condition Monitoring Conference, Swansea, UK, 10–13 April, 1984. p.191–204.
- [30] STRONACH AF, CUDWORTH CJ, JOHNSTON AB. Condition monitoring of rolling element bearings. In: Proceedings of the International Condition Monitoring Conference, Swansea, UK, 10–13 April, 1984. p.162–77.
- [31] P.D. MCFADDEN, J.D. SMITH, Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing, *Journal of Sound and Vibration* 96 (1984), pp. 69-82.
- [32] MCFADDEN PD, SMITH JD. Information from the vibration of rolling bearings. In: Proceedings of International Condition Monitoring Conference, Swansea, UK, 10–13 April, 1984. p.178–90.
- [33] P.D. MCFADDEN, J.D. SMITH, The vibration produced by multiple point defects in a rolling element bearing, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 98 (1985), pp. 263-273.
- [34] MCFADDEN PD. Advances in vibration monitoring of Gears and rolling element bearings. In: Proceedings of IE Australia/RAeS Joint National Symposium, Melbourne, 8–9 August, 1985. p.27–32.
- [35] DR SCHNELL, L.: *Jelek és rendszerek mérés technikája*, Budapest, Műszaki Könyvkiadó, 1985.
- [36] C.S. SUNNERSJÖ, Rolling bearing vibrations - the effects of geometrical imperfections and wear, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 98 (1985), pp. 455-474.
- [37] IGARASHI T, KATO J. Studies on the vibration and sound of defective rolling bearings (third report: vibration of ball bearings with multiple defects). *Bull JSME* 1985;28(237):492–9.
- [38] KUHNE BT, STECKI JS. Correlation of vibration, wear debris analysis and oil analysis in rolling element bearing condition monitoring. *Maintenance Management Int* 1985;5:105–15.
- [39] RAO BVA, SWARNAMANI S, VARGHESE GV. Studies on a test rig to check defective and spurious ball and roller bearings. In: Proceedings of the National Conference on Industrial Tribology, Bombay, India, 1986. p.1.1–0.
- [40] MIYACHI T, SEKI K. An investigation of the early detection of defects in ball bearings using vibration monitoring — practical limit of detectability and growth speed of defects. In: Proceedings of the International

- Conference on Rotordynamics, JSMEIFToMM, Tokyo, 14–17 September, 1986. p.403–8.
- [41] BRÜEL & KJAER, Windows to FFT Analysis, Technical Review, No. 4-1987.
- [42] BRÜEL & KJAER, Vibration Monitoring of Machines, Technical Review, No. 1-1987.
- [43] R.B. RANDALL: Frequency analysis, Brüel & Kjaer, Denmark, 1987.
- [44] BRÜEL & KJAER, Gépállapot-felügyelet, 1988.
- [45] YOSHIOKA T, FUJIWARA T. Measurement of propagation initiation and propagation time of rolling contact fatigue crack by observation of acoustic emission and vibration. In: Dowson D et al, editor. Interface dynamics. Amsterdam: Elsevier, 1988. p.29–33.
- [46] D. E. BENTLY, BENTLY NEVADA CO., Predictive Maintenance through the Monitoring and Diagnostics of Rolling Element Bearings, application note, 1989. <http://www.bently.com/articles/apnotes/an044.asp>
- [47] REIF Z, LAI MS. Detection of developing bearing failures by means of vibration. ASME Design Eng Div (Publ) DE 1989;18(1):231–6.
- [48] GYÖRGY LIPOVSZKY, KÁROLY SÓLYOMVÁRI, GÁBOR VARGA: Vibration Testing of Machines and their Maintenance, Oxford: Elsevier, 1990.
- [49] MCFADDEN PD. Condition monitoring of rolling element bearings by vibration analysis. IMechE Paper, Solid Mechanics and Machine Systems Group Seminar, 9 January 1990. London: IMechE. p.49–53.
- [50] BERRY JE.: How to track rolling element bearing health with vibration signature analysis, Sound and Vibration 1991; November: 24-35.
- [51] I. DAUBECHIES, J. C. LAGARIAS: Two-scale difference equations I. Existence and global regularity of solutions, SIAM J. Math. Anal., Vol. 22, No. 5, pp. 1388-1410, September 1991
- [52] TANDON N, NAKRA BC. Comparison of vibration and acoustic measurement techniques for the condition monitoring of rolling element bearings. Tribol Int 1992;25(3):205–12.
- [53] I. DAUBECHIES, J. C. LAGARIAS: Two-scale difference equations II. Local regularity, infinite products of matrices and fractals, SIAM J. Math. Anal., Vol. 23, No. 4, pp. 1031-1079, July 1992

- [54] INGRID DAUBECHIES: Ten Lectures on Wavelets, Society For Industrial And Applied Mathematics, Philadelphia, PA,1992
- [55] Y.T. SU, S.J. LIN, On initial fault detection of a tapered roller bearing: frequency domain analysis, Journal of Sound and Vibration, Vol. 155 (1992), pp. 75-84.
- [56] A. H. TEWFIK, D. SINHA, AND P. JORGENSEN, On the optimal choice of a wavelet for signal representation, IEEE transactions on Information theory, Vol. 38, pages 747-765, March 1992.
- [57] TANDON N, NAKRA BC. Detection of defects in rolling element bearings by vibration monitoring. J Instn Engrs (India) — MechEng Div 1993;73:271–82.
- [58] Y.-T. SU, M.-H. LIN, M.-S. LEE, The effects of surface irregularities on roller bearing vibrations, Journal of Sound and Vibration, Vol. 165 (1993), pp. 455-466.
- [59] SZÚCS PÁL, “Az akusztikus emisszió mint szilárdtestfizikai jelenség és mint roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer”, „Tribológiai szakmérnök” képzés, Veszprémi Egyetem. 1993. november 3.  
<http://www.muszeroldal.hu/measurenotes/AEszucs.pdf>
- [60] TANDON N, NAKRA BC: Detection of defects in rolling element bearings by vibration monitoring. Journal, Mechanical Engineering Division, (ISSN 0020-3408), vol. 73, pp 271-282. 1993
- [61] J.I. TAYLOR: The Vibration Analysis Handbook, Vibration Consultants, Inc., Tampa, 1994.
- [62] TANDON N. A comparison of some vibration parameters for the condition monitoring of rolling element bearings. Measurement 1994;12:285–9.
- [63] ZHENGJIA H, JIYUAN Z, QINGFENG M, YIMING N. Wavelet transform in tandem with autoregressive technique for monitoring and diagnosis of machinery. In: Proceedings of Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management Conference, New Delhi, 1994. p.204–11.
- [64] AMARA GRAPS: An Introduction to Wavelets, IEEE Computational Science and Engineering, Summer 1995, vol. 2, num 2.
- [65] MORI K, KASASHIMA N, YOSHIOKA T, UENO Y. Prediction of spalling Spalling on a ball bearing by applying the discrete wavelet transform to vibration signals. Wear 1996;195:162–8.

- [66] DR DÖMÖTÖR FERENC: A rezgésdiagnosztika elemei, SKF, Budapest, 1996
- [67] BRÜEL & KJAER, Non-stationary Signal Analysis using Wavelet Transform, Technical Review, No. 2-1996.
- [68] THOMAS GREINER. Orthogonal and biorthogonal texture matched wavelet filterbanks for hierarchical texture analysis. *Signal Processing*, 54, pp. 1–22, April 1996.
- [69] WASHO MW. A quick method of determining root causes and corrective actions of failed ball bearings. *Lubric Eng* 1996;52(3):206–13.
- [70] PRABHU R. ROLLING BEARING DIAGNOSTICS. In: Proceedings of the Indo-US Symposium on Emerging Trends in Vibration and Noise Engineering, New Delhi, 18–20 March, 1996. p.311–20.
- [71] N. TANDON, A. CHOUDHURY, An analytical model for the prediction of the vibration response of rolling element bearings due to a localized defect, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 205 (1997), pp. 275-292.
- [72] YPMA, LIGTERINGEN, FRIETMAN, DUIN, Recognition of Bearing Failures Using Wavelets and Neural Networks, TFTS'97, pages 69-72, 1997.
- [73] LI CJ, MA J. Wavelet decomposition of vibrations for detection of bearing-localized defects. *NDT&E Int* 1997;30(3):143–9.
- [74] C.J. LI, J. MA, Wavelet decomposition of vibrations for detection of bearing-localized defects, *NDT&E International*, Vol. 30, No. 3, pp. 255-262 (1997).
- [75] JEFFREY C. O'NEILL: Shift Covariant Time-Frequency Distributions of Discrete Signals, PhD thesis, University of Michigan, 1997.
- [76] SKF, SKF CONDITION MONITORING: The ABC's of Machinery Vibration Transducers, Technical Paper, CM1007, 1997.
- [77] STEPHANE MALLAT: A Wavelet tour of signal processing, Academic Press, 1998
- [78] R.B.W. HENG, M.J.M. NOR, Statistical analysis of sound and vibration signals for monitoring rolling element bearing condition, *Applied Acoustics*. Vol. 53, No. 1-3, pp. 211-226, 1998.
- [79] A. CHOUDHURY, N. TANDON, A theoretical model to predict vibration response of rolling bearings to distributed defects under radial load, *ASME transactions* Vol. 120, (1998), pp. 214-220.

- [80] BECKEMEYER, HEINZ-PETER, HAHN, ANDREAS: Linear Design Seminar '99 Reference Manual, Texas Instruments Inc, England, 1999.
- [81] J.C. GOSWAMI, A.K.CHAN: Fundamentals of Wavelets, John Wiley & Sons, Inc., 1999
- [82] N. TANDON, A. CHOUDHURY, A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings, *Tribology International*, Vol. 32 (8) (1999), pages 469-480.
- [83] J. O. CHAPA, R. M. RAO, Algorithms for Designing Wavelets to Match a Specified Signal, *IEEE transactions on signal processing*, Vol. 48, No. 12, December 2000, pages 3395-3406.
- [84] JOHAN M. DE VILLIERS, CHARLES A. MICCHELLI, TOMAS SAUER. Building refinable functions from their values at integers. *Calcolo*, 37:pp. 139–158, 2000.
- [85] R. RUBINI, U. MENEGHETTI, Application of the envelope and wavelet transform analyses for the diagnosis of incipient faults in ball bearings, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 15 (2001), pp. 287-302.
- [86] G.H. JANG, S.W. JEONG, Nonlinear excitation of ball bearing waviness in a rigid rotor supported by two or more ball bearings considering five degrees of freedom, *Transactions of the ASME*, Vol. 124, (2002), pp. 82-90.
- [87] ANUBHA GUPTA, S.D. JOSHI, AND SURENDRA PRASAD. On a new approach for estimating wavelet matched to signal. In *Proceedings of the Eighth National Conference on Communications, Bombay*, January 2002.
- [88] B. LIU, S.F. LING, R. GRIBONVAL, Bearing failure detection using matching pursuit, *NDT&E International*, Vol. 35 (2002), pp. 255-262.
- [89] S. PRABHAKAR, A.R. MOHANTY, A.S. SEKHAR, Application of discrete wavelet transform for detection of ball bearing race faults, *Tribology International*, Vol. 35 (2002), pp. 793-800.
- [90] N.G. NIKOLAOU, A.I. ANTONIADIS, Rolling element bearing fault diagnosis using wavelet packets, *NDT&E International*, Vol. 35 (2002), pp. 197-205.
- [91] N.G. NIKOLAOU, A.I. ANTONIADIS, Demodulation of vibration signals generated by defects in rolling element bearings using complex shifted Morlet wavelets, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 16 (2002), pp. 677-694.

- [92] Z. KIRAL, H. KARAGÜLLE, Simulation and analysis of vibration signals generated by rolling element bearing with defects, *Tribology International*, Vol. 36 (2003), pp. 667-678.
- [93] G.H. JANG, S.W. JEONG, Analysis of a ball bearing with waviness considering the centrifugal force and gyroscopic moment of the ball, *Journal of Tribology*, Vol. 125, (2003), pp. 1-11.
- [94] LOU, LOPARO, Bearing fault diagnosis based on wavelet transform and fuzzy inference, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 18, Issue 5, September 2004, Pages 1077-1095
- [95] JIAN-KANG ZHANG, TIMOTHY N. DAVIDSON, AND K. MAX WONG. Efficient design of orthonormal wavelet bases for signal representation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 52(7):1983–1996, July 2004.
- [96] S. ERICSSON, N. GRIP, E. JOHANSSON, L.-E. PERSSON, R. SJÖBERG, J.-O. STRÖMBERG: Towards automatic detection of local bearing defects in rotating machines, *Mechanical Systems and Signal Processing* 19 (2005), pp. 509-535.
- [97] S. ORHAN, N. AKTÜRK, V. CELIK, Vibration monitoring for defect diagnosis of rolling element bearings as a predictive maintenance tool: Comprehensive case studies, *NDT&E International*, Vol 39. (2006), pp. 293-298.
- [98] C. JUNSHENG. Y. DEJIE, Y. HU, Application of an impulse response wavelet to fault diagnosis of rolling bearings, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21 (2007), pp. 920-929.
- [99] Y.-T. SHEEN, An impulse response extracting method from the modulated signal in a roller bearing, *Measurement* (2007), doi:10.1016/j.measurement.2006.11.020.
- [100] N. TANDON, G.S. YADAVA, K.M. RAMAKRISHNA, A comparison of some condition monitoring techniques for the detection of defects in induction motor ball bearings, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21 (2007), pp. 244-256.
- [101] M. MISITI, Y. MISITI, G. OPPENHEIM, J.M. POGGI, *Wavelets and their Applications*, ISTE Ltd and John Wiley & Sons Inc., 2007
- [102] SCHAEFFLER (UK) LTD., How to detect bearing failures using vibration, 18. May. 2007. <http://www.machinebuilding.net/ta/t0057.htm>

- [103] ZHAO, CHEN, GUO, LI, Neuro-fuzzy Based Condition Prediction of Bearing Health, Journal of Vibration and Control, Vol. 15, No. 7, 1079-1091 (2009)
- [104] XU, XUAN, SHI, WU, HU, A novel fault diagnosis method of bearing based on improved fuzzy ARTMAP and modified distance discriminant technique, Expert Systems with Applications: An International Journal, Vol. 36, No. 9, 11801-11807 (2009), ISSN:0957-4174
- [105] SKF, What Are Enveloping and SEE? Application Note CM3014, SKF Condition Monitoring, Inc.  
<http://www.skfcm.com/news/appnotes/cm3014.pdf>
- [106] SKF, Early Warning Fault Detection in Rolling Element Bearings Using Microlog Enveloping Application Note CM3021, SKF Condition Monitoring, Inc. <http://www.skfcm.com/news/appnotes/cm3021.pdf>
- [107] SKF, Csapágyhibák és okai, Termékinformáció 401.  
<http://www.skf.com/files/343743.pdf>
- [108] BRÜEL & KJAER, Envelope analysis – the key to rolling-element bearing diagnosis, Application note, BO 0187-11.
- [109] BRÜEL & KJAER, Envelope Detector, System development, WB 1048, BU 0090-12.
- [110] A. V. BARKOV, N. A. BARKOVA, Non-linear Signal Models in Vibroacoustic Machine Diagnostics, proceedings, 21st annual meeting of the Vibration Institute.  
<http://www.vibrotek.com/articles/nonlin97/index.htm>
- [111] HAMEG INSTRUMENTS GMBH., Oscilloscope HM507 manual.  
<http://www.hameg.com/>
- [112] SALES TECHNOLOGY, INC., “Rolling Element Bearings”, STI Field Application Note, Leagues City TX.  
<http://www.stiweb.com/appnotes/reb.htm>
- [113] KISTLER INSTRUMENTE AG, K-Shear ® Accelerometers, General Purposes, Voltage Mode Accelerometers, Data Sheets,  
<http://www.kistler.com/>
- [114] D STEVENS: Rolling Element Bearings (4 Failure Phases), Equipment Condition Monitoring,  
<http://www.vibanalysis.co.uk/vibanalysis/rolling/rolling.html>
- [115] BRÜEL & KJAER, Vibration Measurement and Analysis, Lecture Note, BA 7676-12.

- [116] SPM INSTRUMENT INTERNATIONAL, „On-line gépállapot figyelés [A CMS rendszer]”,  
[http://www.spminstrument.com/data/pdf/brochures/71680p\\_CMS.pdf](http://www.spminstrument.com/data/pdf/brochures/71680p_CMS.pdf)
- [117] SPM INSTRUMENT INTERNATIONAL, Az SPM története,  
<http://www.spminstrument.hu>
- [118] SPM INSTRUMENT BUDAPEST KFT, Az SPM Módszer,  
<http://www.spminstrument.hu/index.php?lid=0&gcf=24&sidx=1>
- [119] SPM INSTRUMENTS AB, The shock pulse method for determining the condition of antifriction bearings, SPM Technical Information. Sweden.  
<http://www.spminstrument.com>