

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Csapágydiagnosztikai módszerek fejlesztése jelfeldolgozási és gépi tanulási módszerekkel

Deák Krisztián

Témavezető: Dr. habil. Kocsis Imre



DEBRECENI EGYETEM
Informatikai Tudományok Doktori Iskola

Debrecen, 2020

Tartalomjegyzék/ Table of Contents

Bevezetés.....	1
A kutatási célkitűzések.....	2
A szakirodalom kritikai értékelése	4
Módszerek.....	5
A kutatások eredményeinek ismertetése.....	7
1. Objektum-orientált mérési rendszer fejlesztése és hiba nagyság megállapítás	7
1.1 Optimális wavelet meghatározása a köszörülési hiba méretbecsléséhez	9
1.2 A Maximális Energia-Shannon Entrópia kritériumon alapuló waveletkiválasztás	9
1.3 A hiba méretének meghatározása	11
1.4 A hibaméret validálása	12
2. Mechanikai jelmodell és diszkrét wavelet tervezés	13
2.1 A mechanikai jelmodell előállítása.....	13
2.2 Wavelettervezés a Labview szoftverrel	14
2.3 Waveletek rangsorolása a Maximális Energia-Shannon Entrópia kritérium alapján.....	16
2.4 A hibaméreték validálása	17
3. Komplex Morlet wavelet tervezés globális paraméteroptimalizálással.....	18
3.1 Wavelet paraméteroptimalizálás genetikus algoritmus segítségével	18
3.3 Autokorreláció alkalmazása a jel információ-tartalmának kiemeléséhez	20
3.4 A hibafrekvenciák azonosítása	20
3.5 Hibanagyság-becslés a scalogramra alapján	21
4. Sokskalás felbontáson és gépi tanuláson alapuló csapágyhiba-osztályozás.....	23
4.1 Hibaosztályozás gépi tanulási algoritmusokkal	23
4.2 Tanulóvektorok a csapágyhibák osztályozásához	23
4.3 Hibaosztályozás SVM módszer alkalmazásával	25

5. Mesterséges neurális hálózat tervezése a csapágyhibák osztályozására.....	26
5.1 A neurális hálózat alkalmazásának körülményei	26
5.2 Az algoritmusok összehasonlítása	26
Új tudományos eredmények.....	28
1. TÉZIS	28
2. TÉZISCSOPORT.....	29
2. A. TÉZIS.....	29
2. B. TÉZIS.....	30
3. TÉZIS	31
Alkalmazási lehetőségek és jövőbeli kutatások	32
Introduction.....	41
Purposes of the research	42
Conclusions of the literature overview.....	44
Methods.....	44
Results of the Dissertation.....	46
1. Object-oriented measurement system and grinding defect size estimation	46
1.2 Wavelet selection with Maximum Energy-to-Shannon Entropy Criteria	48
1.3 Fault size estimation procedure.....	49
1.4 Verification of the fault size	50
2. Transient model and discrete wavelet design procedure	52
2.1 Mechanical signal model of the fault.....	52
2.2 Application of Labview Wavelet Design	52
2.3 Ranking by Maximum Energy-to-Shannon Entropy Criteria	54
2.4 Validation of the grinding fault width estimation	55
3. Complex Morlet wavelet design with global parameter optimization.....	56
3.1 Wavelet parameter optimization with genetic algorithm	56
3.3 Autocorrelation envelope power spectrum for signal enhancement.....	58
3.4 Identification of the fault frequencies	58
3.5 Fault size estimation based on scalogram of Cmor filter	59

4. Bearing grinding fault classification based on wavelet decomposition.....	60
4.1 Fault classification with machine learning algorithms	60
4.2 Bearing grinding faults and feature vectors for fault classification	61
4.3 Fault classification by SVM method.....	62
5. Artificial neural network applications for classifying bearing grinding faults.....	63
5.1 Realization of ANN for the analysis	63
5.2 Comparison of the algorithms.....	64
New scientific results	66
THESIS 1	66
THESES RELATED TO WAVELET DESIGN.....	67
THESIS 2A	67
THESIS 2B	68
THESIS 3	69
Practical applications and future work.....	71
Értekezéshez kapcsolódó saját publikációk/ Author's publications related to the Dissertation	72
Hivatkozások/ References	75

Bevezetés

A modern műszaki diagnosztikai eszközöknek meghatározó szerepe van a mérnöki folyamatokban, és fontos kutatási terület a műszaki tudományok területén. A csapágydiagnosztika, mint a műszaki diagnosztika egyik alkalmazása, központi helyet foglal el a gépek állapotfelügyeletében. Bizonyos típusú csapágyhibák rövid idejű, alacsony energiaszintű tranziens impulzusokat generálnak, amelyeket a rezgésspektrumban a környezeti rezgések elnyomnak és alacsony értékű jel-zaj viszonyt eredményeznek a mérések végrehajtása során. A Fourier transzformáció alkalmas periodikusan ismétlődő, harmonikus függvények lineáris kombinációjával leírható rezgések detektálására, de nem megfelelő a rezgésjelben előforduló szingularitások kimutatására. Erre a célra alkalmasabbnak bizonyul a wavelet transzformáció, amely pontos frekvenciafelbontást és időbeli lokalizációt tesz lehetővé diszkrét vagy folytonos, illetve valós vagy komplex értékű wavelet függvények alkalmazásával.

A csapágyhibák morfológiai elemzése, majd a felállított mechanikai jelmodell segítségével a hibák okozta impulzusok matematikailag leírhatók és a hibák összehasonlíthatók.

A komplex Morlet waveletek tervezése során a wavelet középfrekvencia és sáv szélesség változtatható, a paraméterek ideális értékei optimalizációs eljárásokkal meghatározhatók a veszteségfüggvény megfelelő megválasztásával. A tervezett wavelet függvény hatékonysága lemérhető a jel Parseval energia tartalmának és Shannon entrópiájának hányadosával, amely alapján a waveletek rangsorolása elvégezhető.

Gépi tanuláson és mesterséges intelligencián alapuló módszerekkel az egyes csapágyhibák osztályozása megvalósítható, amellyel a döntési folyamat hatékonyabbá és gyorsabbá tehető, illetve az emberi beavatkozás minimalizálható, továbbá rendszer szinten implementálható az Ipar 4.0 folyamatokba. Az osztályozási feladatok végrehajtásához többek

között hatékonynak bizonyulnak a mesterséges neurális hálózatok (ANN) és a tartóvektor gépek módszer (SVM), amelyek esetében meghatározó jelentőségű a tanuló algoritmusok és paraméterek megfelelő kiválasztása az eredményes hibaosztályozás érdekében.

A kutatási célkitűzések

A kisméretű, gyártásból eredő csapágyhibák, különösen, ha a kúpgörgős csapágy támfelületén található, kis energiasztintú impulzusokat generálnak a rezgésjelben, amelyek kimutatása különös nehézségekbe ütközik zajos környezetben. Céлом olyan hatékony objektum-orientált diagnosztikai rendszer és módszer kifejlesztése, amely alkalmas a gyártásból eredő köszörülési csapágyhibák kimutatására, hibaméret becslésére vonalszerű érintkezési felülettel rendelkező csapágyak esetében.

A gördülőelemnek a hibába való belépési és kilépési pontjainak elemzésével becslem a csapágy egyes elemein előforduló hibák szélességét meghatározott mérettartományban. Eredményeimet validáló mérésekkel bizonyítom nagy pontosságú optikai és tapintócsúcsos mérőberendezések alkalmazásával.

A mérések végrehajtásához, az objektum-orientált mérőrendszer részeként, egyedi tervezésű csapágyvizsgáló mérőpadot fejleszték, amely lehetővé teszi különböző méretű és típusú csapágyak vizsgálatát a mérési követelmények figyelembevételével. A rendszer főbb részeit képezi a mérőpad, az adatgyűjtő rendszer mérőszensorokkal, a jellemzők kinyerésére, az adatfeldolgozásra és az osztályozási feladatok végrehajtására szolgáló algoritmusok.

Céлом olyan módszer kifejlesztése, amely képes zajjal terhelt környezetben, alacsony értékű (<30 dB) jel-zaj viszony mellett a jelben előforduló hasznos információtartalom kinyerésére.

Olyan mechanikai jelmodellt állítok fel, amely általánosan képes leírni a vonalszerű érintkezési felülettel rendelkező csapágyak felületi hiba okozta tranziensét, ezáltal lehetővé teszi a mérések általánosítását több típusú és méretű csapágyra.

Összehasonlítom a tudományos szakirodalom áttekintése során az általános csapágyhibák kimutatásához hatékonynak minősített wavelet családokat és kimutatom, hogy a „kész” waveletek közül melyik a leghatékonyabb a speciális, vonalszerű köszörülési hiba kimutatására. A waveletek rangsorolását a Maximális Energia-Shannon Entrópia hányados kritérium alapján végzem.

Kísérleteimben célul tűzöm ki, a hagyományos wavelet függvényeken túlmenően egyedi, illetve folytonos waveletek tervezését, amelyek a speciális csapágyhiba kimutatására alkalmasabbak és hatékonyabbak lehetnek, mint a „kész” waveletek. Erre a célra komplex együtttható Morlet wavelet középfrekvenciáját és sáv szélességét optimalizálom genetikus algoritmus segítségével. A tervezési folyamatot nem kizárólag a folytonos waveletekre, hanem a diszkrét waveletekre is kiterjesztem, amely során véges impulzusválaszú FIR szűrőket tartalmazó waveletet tervezek, alkalmazom a Parks McClellan algoritmust és a Chapa Rao módszert a szűrőegyütthatók meghatározásához.

A tervezett waveleteket a hibadetektáláson túlmenően a hibaméret megállapítására is használom, amely lehetővé teszi, hogy csak a rezgésjelből, roncsolásmentes úton kerüljön meghatározásra a hiba mérete. Az eredményeket nagy precizitású optikai és tapintócsúcsos mérőberendezések segítségével validálom.

További célom, hogy az objektum-orientált mérőrendszerbe hatékony gépi tanulási algoritmusokat implementáljak. A tanulórendszer célja az egyes csapágyhibák többsztályú minősítése, amely nagy pontossággal (>90%) képes elvégezni a hibák osztályozását annak megfelelően, hogy a csapágyhiba a csapágy melyik részén helyezkedik el. A feladat végrehajtását mesterséges neurális hálózatokkal és tartóvektor gépek módszer alkalmazásával végzem, amelyek a szakirodalmi kutatásom alapján hatékonyan bizonyulnak általános jellegű csapágyhibák osztályozására. Ehhez szükséges a tanulási paraméterek helyes megválasztása, mint a neuronok száma, a bemeneti, kimeneti és rejtett rétegek száma, a tanulóalgoritmusok, a leállási feltételek

helyes megadása, a tanulási ráta és a költségfüggvény meghatározása. Különböző tanulóalgoritmusok hasonlítok össze a speciális csapágyhiba osztályozásához. A tanulórendszerek bemeneti vektorait kétféle adathalmazból származtatom: az egyik adathalmaz a nyers mérési adatokból számított statisztikai paramétereken alapul, a másik adathalmaz többskálás felbontásból (MRA) eredő statisztikai bemenő vektorokat tartalmaz. Ehhez kapcsolódó célom annak megállapítása, hogy a sokskálás felbontásból származtatott statisztikai paraméterekkel történő gépi tanulás hatékonyabb osztályozást tesz-e lehetővé, mint a feldolgozás nélküli adatokkal végzett tanítás azonos rendszer paraméterezés mellett.

A szakirodalom kritikai értékelése

A szakirodalomban a wavelet transzformációt gyakran alkalmazzák a jelekben előforduló szingularitások felismerésére.

A folytonos és a diszkrét waveleteket több kutatásban használják általános jellegű, kopásból és károsodásból származó hibák detektálásra, általános csapágydiagnosztikai célokra leggyakrabban a Daubechies, Symlet és Morlet wavelet családokat alkalmazzák.

A Maximális Energia-Shannon Entrópia kritériumot több publikációban használják a waveletek rangsorolására speciális feladatok megoldásakor.

Hatékonyabb csapágydiagnosztikai módszerek megtalálására széles körben alkalmaznak mesterséges intelligencián és gépi tanuláson alapuló optimalizációs eljárásokat is.

A felületi hibák detektálását célzó kutatásokban többnyire golyóscsapágyakat vizsgáltak, csak néhány, a kúpgörgős csapágyakkal kapcsolatos publikáció jelent meg. Ezekben a kutatásokban a csapágyak természetes kopásából, illetve az üzemeltetés során bekövetkező károsodásokból származó hibák képezték a vizsgálatok alapját, és nem a technológiai gyártási folyamatból származó hibák, különösképpen nem a köszörülésből eredő felületi hibák.

Több tudományos cikkekben foglalkoznak mesterséges úton (szikraforgácsolással vagy lézermegmunkálással) előállított hibák detektálásával. Jelen doktori disszertáció tárgyát a közsörülésből eredő hibák képezik, melyek morfológiája, így a vizsgálatok módja is eltér a mesterséges úton előállított hibákétól.

Módszerek

A mérést jel időtartománybeli elemzéséből származtatott statisztikai paraméterek és Fourier transzformációval előállított, frekvenciatartománybeli adatok szolgáltatták a vizsgálatok alapját.

A rövid idejű tranziens impulzusok detektálása wavelet transzformáció segítségével történt, amely hatékony idő- és frekvencia szerinti lokalizálást valósított meg.

A részletes frekvenciafelbontás sokskálás elemzéssel (MRA-multiresolution analysis) valósult meg.

A diszkrét értékű waveletek tervezéséhez a Chapa Rao és Parks–McClellan algoritmusokat használtam a releváns szűrőegyütthetők meghatározásához.

A komplex értékű Morlet waveletek tervezéséhez sztochasztikus optimalizálást alkalmaztam genetikus algoritmusok segítségével.

A tervezett waveletek hatékonyságát és az egyes waveletek hatékonyságának összehasonlítását a Maximum Energia-Shannon Entrópia kritériumra alapoztam.

Az objektum-orientált mérési rendszer részét képező csapágyvizsgáló próbapad sajátfrekvenciáinak meghatározásához modálanalízis módszert használtam.

A mérések során tekintettel voltam a Nyquist–Shannon féle mintavételezési elv betartására, a megfelelő ablakozási technikák alkalmazására az anti-aliasing jelenség elkerülése érdekében.

A mechanikai jelmodell felállítása során a Nelder-Mead nemlineáris simplex optimalizálási módszert alkalmaztam, ahol a veszteségfüggvényként a négyzetes középhiba szerepelt.

A mérési jelből waveletekkel kinyert információból származtatott hibanagyságok validálásához optikai és

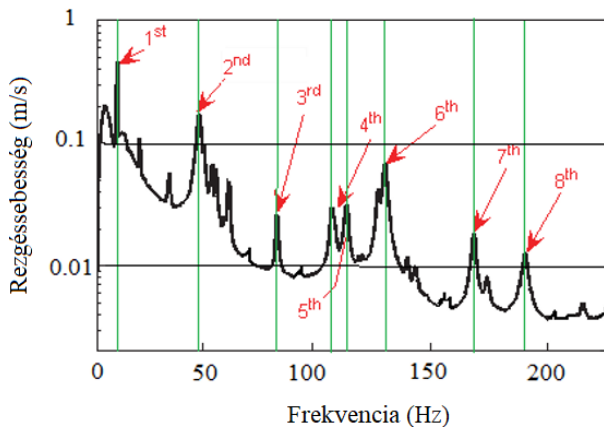
tapintócsúcsos méréseken alapuló geometriai mérési eljárásokat alkalmaztam nagy pontosságú laboratóriumi mérőberendezések segítségével.

A jelekben előforduló komponensek kiemeléséhez autokorrelációs függvényeket alkalmaztam.

A csapágyhibák automatikus detektálásához a gépi tanulási rendszer részeként a tartóvektor gépek módszert és mesterséges neurális hálózatokat alkalmaztam. A tanulórendszerek bemeneti vektorainak előállításához wavelet alapú sokskálás felbontást (MRA) alkalmaztam. A neurális hálózat tanulóalgoritmusaihoz tartozó tanulási ráták és paraméterek optimalizása genetikus algoritmusok alkalmazásával valósult meg.

A mérőrendszer sajátfrekvenciáinak meghatározásához gerjesztőkalapácsos vizsgálaton alapuló modálanalízist hajtottam végre, amelynek eredménye a módálfrekvenciákkal a 2. ábrán láthatók. Megfigyelhető, hogy a 24 Hz – 39 Hz tartományban nem jelentkezt modálfrekvencia. Így biztosítható volt, hogy a strukturális rezgések a legkisebb mértékben befolyásolják azt a frekvenciatartományt, ahol a kísérleti mérések kerültek végrehajtásra. A vonatkozó amerikai ANSI és német DIN szabványoknak megfelelően a kísérleti rezgésmérések fordulatszáma ($1800 \text{ 1/min} = 30 \text{ Hz} \pm 2\%$) volt.

Az objektum-orientált mérőrendszer további részei a rezgésjelből hibadetektálásra és hibanagyság becslésre alkalmas algoritmusok, tervezett waveletek és hozzátartozó digitális szűrők, egyedileg felépített Labview VI mérőkörök a mérésekhez és az adatfeldolgozáshoz, amelyek részletes ismertetését a következő fejezetekben mutatom be a saját tudományos eredményeimhez kapcsolódóan.



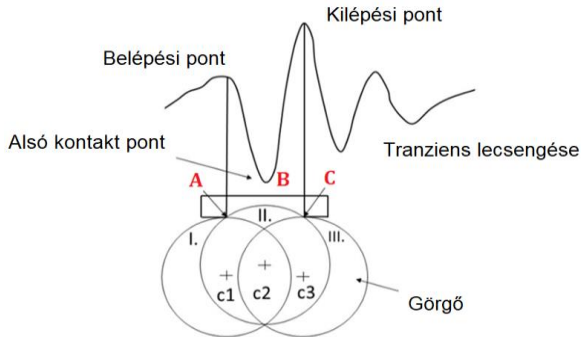
2. ábra: A csapágyvizsgáló próbapad módálfrekvenciái

1.1 Optimális wavelet meghatározása a köszörülési hiba méretbecsléséhez

A vonalszerűen érintkező gördülőcsapágyak egyes felületein előforduló vonalmenti hibák becsléséhez szükséges a gördülőelemnek a hibába való belépési és kilépési pontjának meghatározása (3. ábra). A köszörülési csapágyhiba tranzienst generál abban a pillanatban, amikor a gördülőelem fizikai kapcsolatba lép a hibával. A belépési és kilépési pontok között eltelt Δt időtartam, az üzemi fordulatszám és a D_{OI} külsőgyűrű átmérő ismeretében a hiba szélessége az

$$L_{OD} = \pi \cdot \Delta t \cdot D_{OI} \cdot FTF = 1713.74 \cdot \Delta t,$$

összefüggéssel számítható, ahol az FTF a csapágy fordulatszámával arányos kosárfrekvencia [12].



3. ábra: A tranzienst generáló pontjai a csapágy görgő és a külső gyűrű kölcsönhatása során

1.2 A Maximális Energia-Shannon Entrópia kritériumon alapuló waveletkiválasztás

A kritérium a jel $C_{n,i}$ wavelet együtthatóiból származtatott

$$E(n) = \sum_{i=1}^m |C_{n,i}|^2$$

Parseval energiához és az

$$S(n) = - \sum_{i=1}^m p_i \log_2 p_i$$

Shannon entrópiához kapcsolódik, ahol m a wavelet együtthatók száma az n -dik skálán, (p_1, \dots, p_n) a wavelet együtthatók energiaeloszlása a

$$p_i = |C_{n,i}|^2 / E(n)$$

definíció szerint. Az

$$E(n)/S(n)$$

mérőszám alapjául szolgálhat a leghatékonyabb wavelet kiválasztásához [58].

A kísérletben kilenc valós értékű wavelet került elemzésre és összehasonlításra a kritérium alapján, amely segítségével meghatároztam, hogy a szakirodalomban említett hagyományos, általános csapágydiagnosztikai célokra alkalmazott waveletek közül melyik a leghatékonyabb a speciális gyártási technológiai folyamatból eredő köszörülési hiba rezgésdiagnosztikai alapú detektálására és méretbecslésére. A vizsgálatom eredményeit az 1. táblázatban közlöm.

1. táblázat: A vizsgálatban szereplő waveletek E/S értékei

E/S	OR1	OR2	OR3	OR4	Átlag
Sym2	59.96	80.20	100.87	109.16	87.55
Sym5	65.58	95.37	117.07	119.92	99.48
Sym8	82.81	113.77	120.16	118.48	108.81
db02	60.91	81.09	101.12	113.46	89.14
db06	71.74	89.02	120.42	117.40	99.65
db10	77.76	104.69	120.34	120.45	105.81
db14	85.02	120.03	121.37	123.78	112.55
Meyer	92.31	160.31	126.20	105.70	121.13
Morlet	113.15	194.15	142.18	138.14	146.90

A vizsgálatban szereplő waveletek közül a Morlet wavelet eredményezte a legnagyobb értékű E/S hányadost, a kritérium alapján kijelenthető, hogy a Morlet biztosítja a leghatékonyabb

hibafelismerést a vonalmenti érintkezést mutató gördülőcsapályák hibadiagnosztikájában.

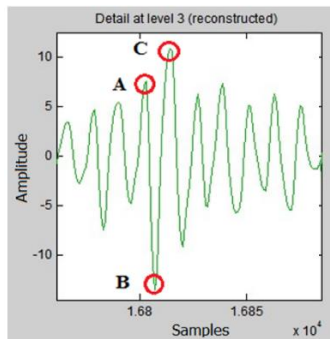
1.3 A hiba méretének meghatározása

A csapágyhiba méretének pontos meghatározásához sokskálás elemzést alkalmaztam, amelynek az alkalmasan megválasztott szintje lehetővé tette a frekvenciasávok elemzést, ezzel a jel részleteinek pontosabb detektálását.

A nyers rezgésjel túl zajosnak bizonyult a csapágygörgőnek a hibába való belépési- és kilépési pontjainak hatékony meghatározására.

A részletesebb frekvenciafelbontás céljából a sokskálás elemzést a CD_3 szintig alkalmaztam, amely 1.25 kHz -tól 2.5 kHz frekvenciatartományig terjedt.

A 4. ábrán az *A* pont reprezentálja a gördülőelem csapágyhibába belépési pontját, *B* a legkisebb feszültségű pontot és *C* pont a gördülőelem hibából kilépésének helyét mutatja.



4. ábra: *A* 0.6311 mm -es hiba mérethez tartozó tranziens impulzus MRA felbontást követően a belépési pont (*A*), a legkisebb feszültségű pont (*B*) és a kilépési pont (*C*) szemléltetésével

A gördülőelem a hibán történő áthaladása során időben kis mértékű fluktuációt mutat, az átlagosan eltelt időtartam átlag képzésével számítható, amely meghatározza az *A* – *C* pontok közötti eltelt időtartam alapján a hiba szélességét.

1.4 A hibaméret validálása

A vonalmenti köszörülési hiba becsült méretének validálása céljából Garant MM1-200 típusú optikai mérőmikroszkópot és Mahr MMQ 200 tapintócsúcsos mérőeszközt alkalmaztam. A vizsgálatok célja annak megállapítása, hogy a rezgésjelből wavelet transzformációval származtatott tranziens impulzusból számított hibaszélesség milyen mértékű eltérést mutat a precíziós laboratóriumi mérőeszközökkel mért értéktől.

Két mérőeszközön minden méret esetén három-három mérést végeztem, mért méretnek a kapott mérési eredmények átlagát tekintettem, amellyel összehasonlítottam a számított méretet.

A validálás eredményeit itt három wavelet esetében mutatom be (2-4. táblázat). A validálás eredményeképpen a Daubechies_02 (db_02) waveletek esetében 4.12% értékű maximális eltérés és 2.81%-os átlagos eltérés adódott. A Morlet wavelet esetében 2.06%-os maximális eltérés és 1.49% átlagos eltérés adódott. A vizsgálat kimutatta, hogy a Morlet wavelet pontosabb hibaméret becslést tett lehetővé, mint a kísérletben szereplő többi wavelet, amely alapján kijelenthető, hogy a Morlet wavelet nem csak a hiba detektálására alkalmas leghatékonyabban a kísérletben szereplő wavelet közül, hanem a legpontosabb hibaméret megállapítást is biztosította a bemutatott vizsgálati körülmények esetében.

2. táblázat: A számított és a mért hibaméret értékek közötti eltérés a db02 wavelet esetében

Paraméterek	OR1 hiba	OR2 hiba	OR3 hiba	OR4 hiba
Számított hiba szélesség mérésből (mm)	0.657	1.277	1.521	1.653
Optikai úton meghatározott hiba szélesség (mm)	0.6311	1.2492	1.4751	1.6236
Eltérés (%)	4.12	2.24	3.11	1.78
Átlagos eltérés (%)	2.81			

3. táblázat: A számított és a mért hibaméret értékek közötti eltérés a Symlet-5 wavelet esetében

Paraméterek	OR1 hiba	OR2 hiba	OR3 hiba	OR4 hiba
Számított hiba szélesség mérésből (mm)	0.646	1.269	1.4481	1.639
Optikai úton meghatározott hiba szélesség (mm)	0.6311	1.2492	1.4751	1.6236
Eltérés (%)	2.41	1.56	1.83	0.92
Átlagos eltérés (%)	1.68			

4. táblázat: A számított és a mért hibaméret értékek közötti eltérés a Morlet wavelet esetében

Paraméterek	OR1 hiba	OR2 hiba	OR3 hiba	OR4 hiba
Számított hiba szélesség mérésből (mm)	0.644	1.266	1.502	1.637
Optikai úton meghatározott hiba szélesség (mm)	0.6311	1.2492	1.4751	1.6236
Eltérés (%)	2.06	1.38	1.69	0.84
Átlagos eltérés (%)	1.49			

2. Mechanikai jelmodell és diszkrét wavelet tervezés

2.1 A mechanikai jelmodell előállítás

Diszkrét waveletet terveztem a Labview szoftverrel a Park-McClellan algoritmus felhasználásával, továbbá validáló ellenőrzést végeztem Chapa-Rao algoritmus alkalmazásával [28].

A kísérleteim alapján előállítottam a vonalmenti érintkezésű gördülőcsapágyak esetén a beköszörülési hiba okozta tranziens jel impulzusát. Vizsgálataim alapján a csapágyak vonalmenti érintkezése során, a vonalmenti köszörülési hibából származó tranziens impulzus matematikailag leírható az

$$x(t) = A \cdot t^n \cdot e^{-C \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t),$$

függvény formájában, ahol $\omega = 2\pi \cdot f$, körfrekvencia, f az impulzushoz tartozó frekvencia, A a kezdeti amplitúdó értéke, C a csillapítási tényező és az n a kitevő a tranziens időbeli viselkedését jellemzi.

A jelmodell felvétele során általánosan elemzésre kerültek vonalmenti érintkezést mutató kúpgörgős, hengergörgős, tűgörgős csapágók különböző gyártási méretben.

A vizsgált No. 30205 típusú kúpgörgős tesztcsapágó esetében az alábbi együtthatók adódtak 1024 mérési pont alapján: $A = 28.74$, $n = 2.748$, $C = 17.34$ and $\omega = 265.28$

A vizsgálataimban megállapítottam, hogy a különböző típusú és méretű vonalmenti érintkezést mutató gördülőcsapágók mindegyike a fenti matematikai függvénnyel leírható tranzienszt produkálta, eltérés csak a tranziens jelalak paramétereiben mutatkozott. A jelmodell hasonlósága megteremtette az általánosítás lehetőségét a hibadetektálás és a hibaméret- becslés vonatkozásában eltérő méretű és típusú, de vonalmenti köszörülési hibákat tartalmazó és vonalmenti érintkezést mutató gördülőcsapágók esetében.

2.2 Wavelettervezés a Labview szoftverrel

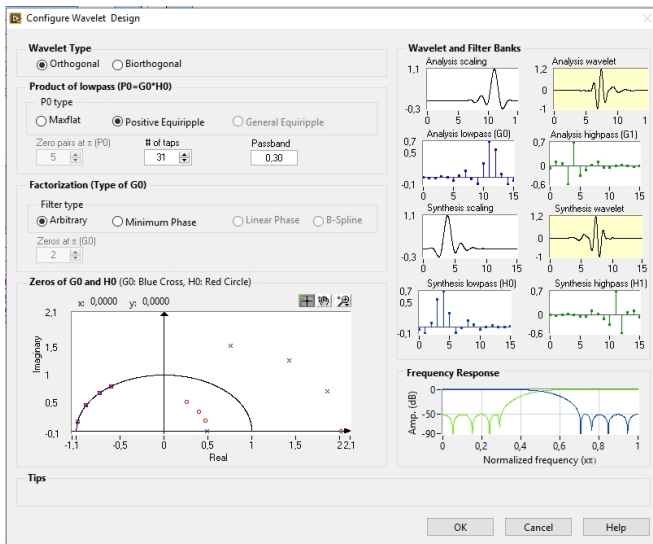
Az alkalmazott wavelet tervezés során FIR szűrőket használtam, amelyben a $P_0(z)$, $G_0(z)$ és $H_0(z)$ függvények szimmetrikusak a z -síkban értelmezve. A tervezett wavelet $G_0(z)$ és $H_0(z)$ zérushelyei úgy lettek megválasztva, hogy a leghatékonyabb hibadetektálást tegyék lehetővé a vonalmenti köszörülési hibadetektálásra.

A szűrőegyütthatók meghatározásához a Parks-McClellan algoritmus részeként Remez-cseremódszer került alkalmazásra, ami iteratív algoritmusként függvényapproximációt tett lehetővé. Az algoritmus meghatározta az együtthatók $N + 1$ elemszámú halmazát, amely minimalizálja a maximális eltérést az ideális szűrőhöz viszonyítva. A Parks-McClellan VI lineáris fázismenetű véges impulzusválaszú FIR digitális szűrőt eredményezett, amely

a leágazások számát, a szűrő típusát és sáv szélességét tartalmazta.

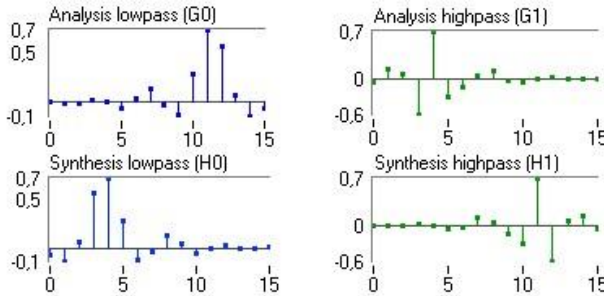
Az ω_p értéknek az előírások alapján 0.5-nél kisebbnek kell lenni, jelen kísérletben 0.3 értékkel került alkalmazásra. Nagyobb érték esetében élesebb átviteli sávot, illetve nagyobb csillapítást tapasztaltam az oldalsávokban, viszont általánosságban növelte a számítási időszükségletet és a szűrőgyűthetők terén sem tapasztaltam számottevő javulást. Az elágazások számát 31 értékben határoztam meg, amely elegendően részletes leképezést tett lehetővé megfelelő darabszámú szűrőgyűthetőkkel (5. ábra).

A szűrőgyűthetőkkel meghatározott új tervezett wavelet magasabb E/S hányadost eredményezett, csapágydiagnosztikában hagyományosan alkalmazott Symlet és Daubechies waveletcsaládok.



5. ábra: A wavelettervezés konfigurációs felülete a Labview programban

A tervezett wavelet szűrőegyütthetőkkel írható le, amelyek elhelyezkedése a 6. ábrán látható és értékei részletesen a disszertációban található.



6. ábra: A tervezett wavelet alul- és felüláteresztő szűrőinek együtthetői

A szűrőegyütthetőkát Chapa-Rao módszerrel ellenőriztem, amely során a Meyer wavelet amplitúdó és fázisspektrumát illesztettem a jelmodellhez. Megállapítottam, hogy a Parks-McClellan módszerrel, Remez-cseremódszerrel létrehozott wavelet mérnöki alkalmazhatóság terén hasonló hatékonyságot produkált, mint a Chapa Rao módszerrel tervezett wavelet.

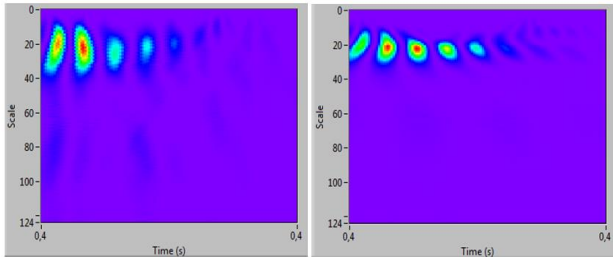
2.3 Waveletek rangsorolása a Maximális Energia-Shannon Entrópia kritérium alapján

A vizsgálataim során a Maximális Energia-Entrópia kritérium alkalmazásával elvégeztem a waveletek rangsorolását.

5. táblázat: A waveletek E/S hányados értékei

E/S értékek	1. mérés	2. mérés	3. mérés	Átlag
Sym5	99.65	101.12	100.67	100.48
Sym8	121.85	122.81	123.05	122.57
db04	88.18	87.21	86.84	87.41
db06	117.01	115.94	116.07	116.34
db08	84.28	82.86	84.50	83.88
Tervezett	155.12	154.18	155.23	154.84

A wavelet együtthatók koncentrálódását scalogram segítségével vizsgáltam, amit itt a Daubechies_08 és a tervezett waveletre mutatok be (7. ábra). A vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a tervezett wavelet magasabb wavelet együttható értékeket eredményezett a többi waveletnél, ami megerősítette a Maximális Energia-Shannon Entrópia kritériummal előállított eredményt, hogy a tervezett wavelet hatékonyabban detektálta a vonalmenti beköszörülési hibákat.



7. ábra: A scalogramok wavelet együttható koncentrálódásának összehasonlítása a Daubechies_08 (baloldali kép) és a tervezett új wavelet (jobboldali kép) esetében

2.4 A hibaméreték validálása

A mérési jelből számított hibanagyságok validálásához a Garant MM1-200 optikai mikroszkópot és a Mahr MMQ 200 tapintócsúcsos mérőberendezéseket alkalmaztam.

A jelenlegi kísérletben négy különböző hibamérettel (0.6311 mm, 1.2492 mm, 1.4751 mm, 1.6236 mm) rendelkező csapágyat vizsgáltam, a 6. táblázat tartalmazza az 1.2492 mm névleges hibaméretre vonatkoztatott eltérések százalékos értékeit. Megállapítottam, hogy a tervezett wavelet eredményezte a legkisebb, 1.18 % értékű eltérést a számított értékhez viszonyítva.

6. táblázat: A számított és a mért hibanagyságok összehasonlítása a 1.2492 mm hibaméret esetében

Wavelet	Számított szélesség (mm)	Eltérés (%)
Sym_05	1.2875	3.07
Sym_08	1.2713	1.77

Daub_04	1.2930	3.51
Daub_06	1.2765	2.19
Daub_08	1.2975	3.87
Tervezett	1.2639	1.18

3. Komplex Morlet wavelet tervezés globális paraméteroptimalizálással

3.1 Wavelet paraméteroptimalizálás genetikus algoritmus segítségével

Célul tűztem ki, hogy egy adott zajszint küszöbig eredményesen használható folytonos waveletet tervezzek, amely jelentős zaj jelenlétében, vagyis alacsony (SNR<30 dB) mellett is képes a gördülőcsapágyságok vonalmenti köszörülési hiba kimutatására és a hibaméret megállapítására.

A zajjal terhelt környezetet szabályozható Duffing oszcillátorral szimuláltam.

Folytonos waveletként a

$$\psi(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi\beta}} e^{2i\pi f_0 x} e^{-\frac{x^2}{\beta}}$$

függvénnyel leírható komplex Morlet waveletet alkalmaztam, a középfrekvencia és sáv szélesség optimalizálásához genetikus algoritmus használtam, amelyben az E/S hányados képezte a veszteségfüggvényt. A keresztezés értékét 0.75, a mutáció értékét 0.03 értékben határoztam meg maximálisan 60 engedélyezett generáció számon keresztül.

Ha az f_0/β érték elegendően nagy, akkor teljesül a waveletekre vonatkozó megengedhetőségi feltételt. A komplex Morlet tervezésénél a

$$\begin{aligned} \beta &< f_0/3.5 & f_0 - 0.5\beta &\geq 35f_r \\ f_0 + 0.5\beta &< 0.39f_s & \beta &> 3f_b \end{aligned}$$

feltételeket vettem figyelembe a szakirodalmi ajánlások alapján. Ezek alapján a $\beta \in [602 \text{ Hz}, 706 \text{ Hz}]$, $f_0 \in [1805 \text{ Hz}, 9631 \text{ Hz}]$ tartományok adódtak.

A genetikus algoritmus segítségével a komplex Morlet wavelet középfrekvenciáját és sávszélességét az alábbi értékekben határoztam meg: $f_0 = 2118 \text{ Hz}$ és $\beta = 642 \text{ Hz}$.

A kísérletben tíz különböző waveletet hasonlítottam össze, hogy meghatározzam melyik wavelet alkalmas leghatékonyabban a speciális vonalmenti köszörülési hiba detektálására zajjal terhelt környezetben.

Symlet, Daubechies wavelet családokat és valós értékű Morlet waveletet hasonlítottam össze a tervezett wavelettel. Az összehasonlításban szereplő waveletek, szakirodalmi kutatásaim alapján, a leghatékonyabb csapágydiagnosztikát valósítják meg kopásból és károsodási folyamatokból eredő meghibásodások terén. Kimutattam, hogy a tervezett paraméteroptimalizált komplex Morlet wavelet minden esetben magasabb E/S hányadost, tehát hatékonyabb hibafelismerést valósított meg a Maximális Energia-Shannon Entrópia kritérium alapján, mint a kísérletben szereplő többi wavelet (7. táblázat).

7. táblázat: E/S értékek a vizsgálatban szereplő és a paraméteroptimalizált komplex Morlet wavelet (Cmor) esetében

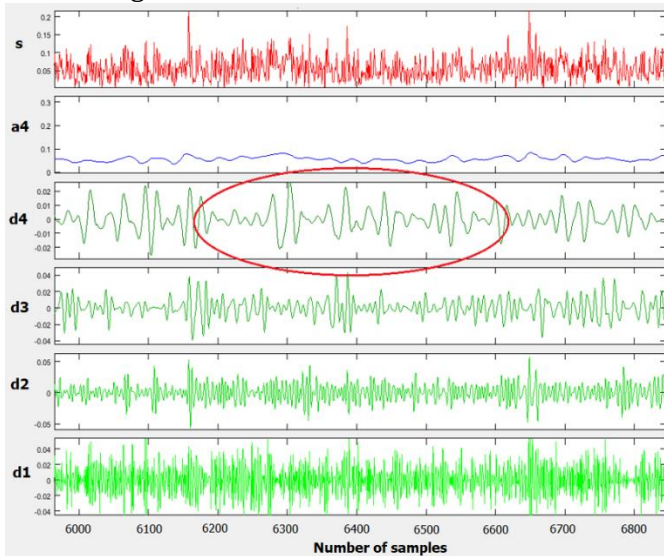
E/S	OR1	OR2	OR3	OR4	Átlag
Sym2	59.86	82.69	103.26	112.52	89.58
Sym5	69.58	98.31	114.01	112.34	98.56
Sym8	79.43	117.2	120.56	113.51	107.69
db02	59.86	82.69	103.26	112.54	89.59
db06	72.64	95.03	116.37	121.17	101.30
db10	77.69	101.8	121.01	123.05	105.89
db14	85.81	118.4	123.14	124.31	112.93
Morlet	114.0	194.2	144.72	142.14	148.78
Cmor	138.2	235.1	247.45	227.89	212.12
Meyer	97.56	160.3	127.08	103.33	122.09

3.3 Autokorreláció alkalmazása a jel információ-tartalmának kiemeléséhez

A jelben előforduló periodikusan ismétlődő jelenségek amplitúdó szintjének javítására, ezáltal a kedvezőbb jel-zaj viszony biztosítására autokorrelációt alkalmaztam, amely lehetővé teszi, hogy zajjal terhelt környezetben eredményesebben kimutatható legyen a hibajel az által, hogy felerősíti az ismétlődő jelkomponenseket.

3.4 A hibafrekvenciák azonosítása

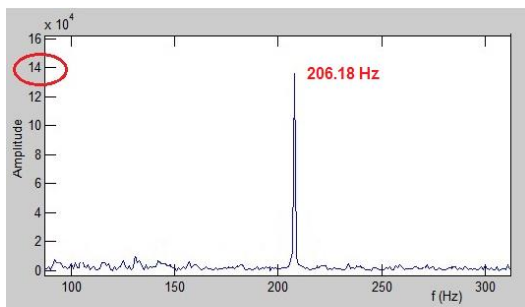
Wavelet alapú sokskálás felbontást végeztem a harmadik felbontási szintig 10 kHz-től számítva.



8. ábra: Wavelet sokskálás felbontás (MRA) alkalmazása a rezgésjelre

A rezgésjelben előforduló külsőgyűrű (BPFO) hiba frekvenciákat detektáltam, tekintve, hogy jelen kísérletben a felületi hiba a tesztcsapágy külső gyűrűjén helyezkedett el. A csapágy típusát és vizsgálati körülményeit figyelembe véve meghatároztam a BPFO frekvenciát, amely 206.18 Hz értéknek

adódott. Összesen tíz waveletet hasonlítottam össze, amelyből az egyik a tervezett paraméteroptimalizált komplex Morlet wavelet volt. Arra kerestem a választ, hogy sokskálás felbontást, autokorrelációt követően melyik wavelet képes leghatékonyabban kiemelni a speciális közsorülési csapágyhibára jellemző BPFO hibafrekvenciát a rezgésspektrumban, amellyel a pontos hibadiagnosztika elvégezhető. Kimutattam, hogy a paraméteroptimalizált wavelet minden esetben magasabb E/S hányadost eredményezett és a legnagyobb értékkel emelte ki a BPFO frekvenciát, mint hasznos információt a rezgésjelből (9. ábra).



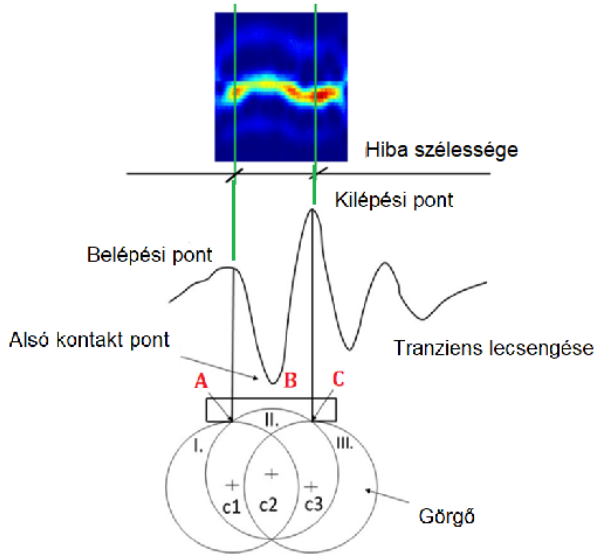
9. ábra: A BPFO frekvencia kiemelése paraméteroptimalizált komplex Morlet wavelettel autokorrelációt követően

3.5 Hibanagyság-becslés a scalogramra alapján

A hiba nagyságát a scalogramból származtatott belépési és kilépési pontokkal elemeztem ([5], [23]).

Megállapítottam, hogy a tervezett paraméteroptimalizált komplex Morlet wavelet eredményezte a legkisebb értékű, 1.19%-os hibaeltérést az optikai és tapintócsúcsos mérőberendezésekkel megállapított méretekhez viszonyítva.

A kísérletben négy különböző hibaméretű csapágyat vizsgáltam (0.6311 mm, 1.2492 mm, 1.4751 mm, 1.6236 mm), amelyek mindegyikére kimutattam, hogy a tervezett wavelet eredményezte a legpontosabb hibaméret megállapítást. A 8. táblázatban a 1.2492 mm-es hibaméretre vonatkozó eredményeimet közlöm.



10. ábra: Belépési és kilépési pontok elemzése

8. táblázat: A waveletek összehasonlítása a tervezett komplex Morlet wavelettel hibanagyság megállapítás céljából

Wavelet	Számított méret (mm)	Eltérés [%]
Sym2	1.277	2.24
Sym5	1.269	1.56
Sym8	1.2713	1.77
db2	1.277	2.24
db6	1.2765	2.19
db10	1.2681	1.52
db14	1.2679	1.5
Morlet	1.266	1.38
Cmor	1.264	1.19
Meyer	1.2674	1.46

4. Sokskálás felbontáson és gépi tanuláson alapuló csapágyhiba-osztályozás

4.1 Hibaosztályozás gépi tanulási algoritmusokkal

A gépi tanuláson alapuló hibaosztályozás célja a csapágy egyes részein (külső gyűrűn, belső gyűrűn, görgőn, támfelületen) előforduló vonalmenti köszörülési hibák osztályozása. A szakirodalmi kutatásaim alapján feltártam, hogy a tartóvektor gépek módszer (SVM) és a mesterséges neurális hálózatok (ANN) hatékonyan alkalmazhatók csapágyhibák osztályozására. Erre tekintettel a vizsgálataim során az SVM és az ANN tanulási módszereket alkalmaztam és hasonlítottam össze a speciális vonalmenti köszörülési csapágyhibák minősítése szempontjából.

4.2 Tanulóvektorok a csapágyhibák osztályozásához

A kísérletekben ötfajta csapágyhiba osztályozását végeztem el attól függően, hogy a köszörülési hiba a csapágy melyik részén keletkezett: külső gyűrű hiba (OR), belső gyűrű hiba (IR), görgőhiba (RF), belső gyűrű támfelület hiba (IRB) és összetett hiba (MF). Célul tűztem ki a felsorolt hibák gépi tanuláson alapuló hatékony optimalizálását, ehhez kapcsolódóan a tanulási rendszerek paramétereinek optimalizálását és a tanulási algoritmusok helyes megválasztását.

9. táblázat: A gépi tanulásban szereplő csapágyhibák paraméterei

Típus	Szélesség [mm]	Mélység [μm]
OR1 hiba	0.6311	6.5
OR2 hiba	1.2492	33.6
OR3 hiba	1.4751	42.3
OR4 hiba	1.6236	51.4

Típus	Szélesség [mm]	Mélység [μm]
IR1 hiba	0.7187	7.9
IR2 hiba	1.3945	36.8
IR3 hiba	1.5268	46.2
IR4 hiba	1.7943	58.3

Típus	Szélesség [mm]	Mélység [μm]
RF1 hiba	0.6418	6.8
RF2 hiba	1.3245	35.2
RF3 hiba	1.5512	48.3
RF4 hiba	1.9425	71.2

Típus	Szélesség [mm]	Mélység [μm]
IRB1 hiba	0.6257	12.1
IRB 2 hiba	1.6432	14.7
IRB 3 hiba	2.1719	19.3
IRB 4 hiba	2.8546	15.2

Két adathalmazt definiáltam, amelyek a gépi tanulási rendszerek bemeneti vektorait képezték. Az első adathalmaz időtartománybeli statisztikai paraméterekre épül, a másik adathalmaz wavelet sokskalás elemzésből származtatott időtartománybeli paramétereken alapul. Mindkét adathalmazzal elvégeztem a tanulórendszerek tanítását.

A kísérletek végrehajtása során a megfelelő számú tanuló adat előállítása céljából két fő paramétert változtattam, a csapágyvizsgáló próbapad fordulatszámát és a tesztcsapágyakat előfeszítő axiális erők nagyságát. A vizsgálatokat 60...2880 1/min fordulatszámok között 48 különböző fordulatszámon, 1 Hz-es lépésközökkel végeztem el. Az előfeszítő erő nagyságát 25...450 N között változtattam, az alábbi értékekkel: 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 275, 300, 325, 350, 375, 400, 425, 450 N.

Az erő 450 N-os maximális értékét nem léptem túl tekintettel arra, hogy ne keletkezzen olyan mértékű Hertz feszültség az érintkezési felületeknél még dinamikus terhelésviszonyok esetében sem, amely a felületek maradó deformációját okozná.

Az előfeszítő erők és a fordulatszámok kombinációja összesen 864 bemeneti paramétert eredményezett és az összes paraméterhez 8 különböző, a jelet jellemző matematikai és fizikai mennyiséget rendeltem, mint a jel terjedelme, lapultsága, ferdesége, csúcstényezője, átlaga, szórása, az MRA-val származtatott Parseval energia tartalma és Shannon entrópia

értéke. Összesen 6912 adatot állítottam elő, amely alkalmazhatónak bizonyult gépi tanulási célokra.

A reprezentatív adathalmaz előállítása céljából nagyszámú csapágy elemeket vizsgáltam, 184 hibás külső gyűrűt, 162 hibás belső gyűrűt, 247 hibás gördülőelemet és 147 támfelület hibás belső gyűrűt, illetve 225 hibátlan csapágyat.

A 8 különböző paraméter közül 4 szignifikáns paramétert jelöltem ki, amelyek a tanulórendszerek bemeneti vektoraiként szolgálták: a jel terjedelme, lapultsága, ferdesége, csúcstényezője, amely összesen 3456 tanulóparamétert eredményezett.

4.3 Hibaosztályzás SVM módszer alkalmazásával

A feladat végrehajtásához az R Cran szoftvert használtam [79]. Az összes bemenővektor (3456 db) 80 %-át használtam tanítási célokra és 20 %-át használtam tesztelésre.

10. táblázat: Az SVM osztályozás eredményessége

Osztály	Osztályozási ráták a nyers statisztikai paraméterekkel	Osztályozási ráták az MRA utáni statisztikai paraméterekkel
OR	89.3 %	96.4 %
IR	85.7 %	92.8 %
IRB	78.5 %	89.3 %
RF	85.7 %	92.8 %
MF	92.8 %	96.4 %
Átlag:	86.4 %	93.5 %

Az SVM osztályozás hatékonyságát a 10. táblázat mutatja. Az MRA sokskálás felbontásból származtatott statisztikai paraméterekkel történő tanítási folyamat lényegesen eredményesebb hibaosztályozást tett lehetővé.

Az MRA alkalmazását követően előállított statisztikai paraméterekkel való tanítás eredményezte az összes esetben a magasabb osztályozási rátát, amely átlagosan 93.5 %-os eredményességet ért el, ellentétben a nyers adatokkal történő tanítással, amely csak 86.4%-os eredményességet adott.

Az SVM esetén a polinomiális és RBF kernelt használtam. A paraméterek optimalizálását az R Cran szoftver `tune.svm` 1071 alkalmazásával végeztem el.

5. Mesterséges neurális hálózat tervezése a csapágyhibák osztályozására

5.1 A neurális hálózat alkalmazásának körülményei

Az SVM módszernél bemutatott ötféle csapágyhiba osztályozását tűztem ki célul az ott bemutatott négy statisztikai paraméterből képzett 3456 tanulóvektor alkalmazásával, a Gradiens, a Levenberg-Marquardt és a konjugált gradiens módszerek, mint tanulóalgoritmusok felhasználásával.

A neurális hálózat tervezésének szempontjai

A szakirodalomban található iránymutatásokra, a korábbi kapcsolódó kutatások eredményeire, valamint a saját tapasztalataimra alapozva definiáltam a neurális hálózat paramétereit, amelyet a disszertációban részletesen bemutatok. A paraméterek optimalizációjának végrehajtásához a Bayes féle módszert részesítettem előnyben. A hálózat súlyait abban az irányban változtattam, amely a célfüggvény (négyzetes közép hiba, MSE) értékének iterációnkénti csökkenését eredményezte.

5.2 Az algoritmusok összehasonlítása

A tanítási ráta értékét mindhárom tanulási algoritmus esetében $lr=0.05$ értékkel vettem fel. Az összehasonlítás miatt az egyes algoritmusok többi paramétereit is azonos értéken tartottam. A gradiens módszer feltehetően lokális minimumba ragadás következtében nem állt le, csak a maximális 10000 iteráció, mint egyik leállási kritérium teljesülése után. A tanulási ráta optimalizálása $lr=0.78$ értéket eredményezett, amely esetben rövidebb futásidővel és 4852 iteráción keresztül végezte el az algoritmus az osztályozási feladatot. A Levenberg-Marquardt és a konjugált gradiens módszer 36, illetve 50 iteráción keresztül hajtotta végre az osztályozást, amelynek eredménye a 11.

táblázatban látható. A Levenberg-Marquardt algoritmus átlagosan 92%-os hibaosztályozást valósított meg. A gradiens módszer $lr=0.05$ értékű tanulási ráta mellett mindössze 20%-os hibaosztályozást adott a támfelület hiba esetében, amely nem megfelelő szint gyakorlati alkalmazási célokra. A tanulási ráta optimalizálását követően $lr=0.78$ érték mellett ugyanez az algoritmus 60%-os támfelület hibaosztályozást adott, viszont a Levenberg-Marquardt algoritmus 85%-os hatékonysággal működött. Megjegyzendő, hogy a támfelületi hiba kisméretű közsörülési hiba, amely igen nehezen detektálható.

A 12. táblázatban található CPU gépidők az algoritmusok lefutásának átlagos értékeit mutatják, amely alapján kijelenthető, hogy a Levenberg-Marquardt eredményezte a leggyorsabb, 314 ms idejű osztályozást, ellentétben a gradiens módszerrel, amely 7813 ms időtartamú osztályozást adott.

11. táblázat: A osztályozási ráták alakulása különböző algoritmusok és csapágyelem hibák esetében

Osztály	Gd ($lr=0.05$)	Gd ($lr=0.78$)	L-M ($lr=0.05$)	Scg ($lr=0.05$)
OR	80.0 %	80.0 %	90.0 %	80.0 %
IR	94.7 %	100.0 %	100.0 %	94.7 %
RF	89.5 %	84.2%	100.0 %	89.5 %
IRB	20.0 %	60.0 %	85.0 %	70.0 %
MF	80.0 %	95.0 %	85.0 %	90.0 %
Átlag	72.8 %	83.9 %	92.0 %	84.8 %

12. táblázat: A gépidők alakulása az osztályozási feladat végrehajtása során

Osztály	Gd ($lr=0.05$)	Gd ($lr=0.78$)	L-M ($lr=0.05$)	Scg ($lr=0.05$)
Idő	7813 ms	3248 ms	314 ms	548 ms

Új tudományos eredmények

1. TÉZIS

Mérőrendszert és vizsgálati eljárást dolgoztam ki a csapágygyártás során fellépő egyes felületi hibák elemzésére vonalszerű érintkező elemeket tartalmazó gördülőcsapágyak esetén. A speciális célú, objektum-orientált mérőrendszer részei a vizsgálat követelményeinek megfelelő, különböző méretű és fajtájú gördülőcsapágyak vizsgálatára alkalmas, egyedi tervezésű próbapad, az elemzések alapját képező rezgésjelet a vizsgálati követelményeknek megfelelő pontossággal mintavételező mérőegység (szenzorok és mérőkártyák), illetve a hibák detektálására és méretbecslésre alkalmas adatfeldolgozó algoritmusok, saját tervezésű waveletek, szűrők és Labview VI-ok. Kúpgörgős csapágyakon, mint kiválasztott objektumtípuson, végrehajtott mérésekkel és elemzésekkel igazoltam, hogy a kifejlesztett mérőrendszer és vizsgálati eljárás hatékonyan alkalmazható a célkitűzésben leírt hibák detektálására és a méretük meghatározására. A Maximális Energia-Shannon Entrópia hányados kritérium felhasználásával igazoltam, hogy a vizsgálati eljárásban a jelfeldolgozás alapozható a vizsgálati célra optimalizált wavelet transzformációkra.

[DK3] K. Deák, T. Mankovits, I. Kocsis, Optimal wavelet selection for manufacturing defect size estimation of tapered roller bearings with vibration measurement using Shannon Entropy Criteria, Strojnicki Vestnik-Journal of Mechanical Engineering, vol. 63, no. 1, 2017, p. 3–14.

További kapcsolódó publikációk:

[DK10] K. Deák, I. Kocsis, Rotary machine and roller bearing fault measurement with FPGA embedded system, in Tavaszi Szél / Spring Wind, II. kötet Állam- és jogtudomány, közgazgatás tudomány, had- és rendészettudomány, 2014.

[DK18] K. Deák, I. Kocsis, Applied vibration measurement methods and data extraction for bearing fault diagnosis, in Proceedings of the

International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering, 2016, p. 122–126.

[DK20] K. Deák, I. Kocsis, Condition Monitoring by Applying Advanced Diagnostic Method, in Proceedings of the International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering, 2017, p. 102–108.

[DK5] K. Deák, J. Menyhárt, L. Czégé, Defect analysis of bearings with vibration monitoring and optical methods, International Journal of Engineering and Management Sciences, vol. 3, no. 4, 2018, p. 1–12.

[DK 22] K. Deák and I. Kocsis, Applied diagnostic methods in engine and bearing health monitoring. In: 7th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering, 2019.

2. TÉZISCSOPORT

Különböző jel-zaj viszonyú környezetben való vizsgálatokhoz két, egymástól független eljárással, egy diszkrét és egy folytonos waveletet terveztem a célkitűzésben leírt hibák detektálására és a méretük meghatározására. Kúpgörgős csapágyakon végrehajtott mérésekkel és elemzésekkel igazoltam, hogy a Maximális Energia-Shannon Entrópia hányados kritérium szerint, a 0.63 mm és 1.63 mm hibaszélességi intervallumban a tervezett waveletek hatékonyabban alkalmazhatók más, a szakirodalomban a csapágyelemek felületi hibáinak vizsgálatára általánosan használt, waveleteknél. A bevezetett két módszer méretbecslő képességét optikai és tapintócsúcsos mérőeszközökkel igazoltam.

2. A. TÉZIS

A köszörülési hiba be- és kilépési pontjainál fellépő tranziens jel modellje alapján új diszkrét waveletet terveztem a célkitűzésben leírt hibák detektálására és a méretük meghatározására. Kúpgörgős csapágyakon végrehajtott mérésekkel és elemzésekkel igazoltam, hogy a hibadetektálásra és a méretbecslésre az új waveletre alapozott vizsgálati eljárás hatékonyabb a szakirodalomban leírt waveleteket alkalmazó eljárásoknál.

2. B. TÉZIS

A komplex Morlet wavelet paramétereinek optimális megválasztásával új folytonos waveletet terveztem a célkitűzésben meghatározott hibatípushoz tartozó frekvencia azonosítására, a hiba detektálására és a hiba méretének meghatározására zajjal terhelt környezetben. Kúpgörgős csapágyakon végrehajtott mérésekkel és elemzésekkel igazoltam, hogy a hibadetektálásra és a méretbecslésre SNR=26 dB jel-zaj viszonyig az új waveletre alapozott vizsgálati eljárás hatékonyabb a szakirodalomban leírt waveleteket alkalmazó eljárásoknál.

[DK1] K. Deák, Design of Discrete Wavelet by Using Transient Model for Exact Measurement of Manufacturing Faults of Tapered Roller Bearings, Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, vol. 63, no. 2, 2019, p. 113–122.

[DK2] K. Deák, I. Kocsis, Complex Morlet wavelet design with global parameter optimization for diagnosis of industrial manufacturing faults of tapered roller bearing in noisy condition, Diagnostyka, vol. 20, no. 2, 2019, p. 77–86.

További kapcsolódó publikációk:

[DK8] K. Deák, I. Kocsis, Gépek károsodása által előidézett kifáradásos csapágyhibák által generált tranziens impulzusok jelfeldolgozása ablakozott fourier és wavelet transzformációk segítségével = bearing fault detection and signal processing with STFT and wavelet transform in maintenance engineering, in Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban, 2014, p. 67–72.

[DK13] Z. Keviczki, K. Deák, I. Kocsis, Machine condition monitoring in bearing manufacture using vibration analysis and intelligent approaches, in Proceedings of the International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering, 2014, p. 55–69.

[DK14] K. Deák, I. Kocsis, Manufacturing of tapered roller bearings, defects and fault detection, in Proceedings of the International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering, 2015, p. 44–53.

[DK19] K. Deák, I. Kocsis, *Selection of wavelet function for detection of bearing defects by Shannon entropy*, in *Proceedings of the International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering*, 2016, p. 127–134.

[DK21] K. Deák, I. Kocsis, *Wavelet design for diagnosis of tapered roller bearing manufacturing defects*, in *Proceedings of the International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering*, 2018, p. 39–40.

[DK17] K. Deák, I. Kocsis, *Diagnosztikai és karbantartási vizsgálat csapágyhiba esetében wavelet transzformáció alkalmazásával*, in *Műszaki tudomány az Észak-Kelet Magyarországi régióban*, 2016, p. 720–727.

3. TÉZIS

Új eljárást dolgoztam ki a csapágygyártás során fellépő köszörülési hibák osztályozására. Az osztályozást a rezgésjelre alkalmazott sokskalás felbontás (MRA) hármas szintjéből számított négy statisztikai paraméterre alapoztam, és SVM módszerrel, valamint neurális hálózattal végeztem. Kúpörgős csapágyakon végrehajtott mérésekkel és elemzésekkel igazoltam, hogy a kidolgozott osztályozási eljárás hatékonysága megfelel a releváns szakirodalomban elfogadott szintnek. Az eljárás a neurális hálózattal történő osztályozás esetében – a Levenberg-Marquardt algoritmus alkalmazásával, optimalizált tanulási paraméterek mellett – átlagosan 92 %-os hibaosztályozást eredményezett. Az SVM osztályozás esetében pedig 93.5 %-os hibaosztályozást eredményezett.

[DK4] K. Deák, I. Kocsis, *Support Vector Machine with Wavelet Decomposition Method for Fault Diagnosis of Tapered Roller Bearings by Modelling Manufacturing Defects*, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, vol. 61, no. 4, 2017, p. 276–281.

További kapcsolódó publikációk:

[DK6] K. Deák, I. Kocsis, A. Vámosi, and Z. Keviczki, *Failure diagnostics with SVM in machine maintenance engineering*, *Annals of the University of*

Oradea Fascicle of Management and Technological Engineering, vol. XXIII (XIII), no. 1, 2014, p. 19–24.

[DK12] K. Deák, I. Kocsis, A. Vámosi, Z. Keviczki, Failure diagnostics with SVM in machine maintenance engineering, in IMT Oradea, Proceedings of the annual session of scientific papers: volume XIII (XXIII), 2014, p. 23–28.

[DK7] K. Deák, A. Vámosi, I. Kocsis, Csapágy meghibásodások mérés technikája és rezgésdiagnosztikája mesterséges neurális hálók segítségével = Measurement techniques and diagnostics of bearings based on artificial neural networks, in Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban, 2014, p. 58–66.

[DK9] K. Deák, I. Kocsis, A. Vámosi, Application of machine vision in manufacturing of bearings using ANN and SVM, in The 9th International Conference on Applied Informatics, vol. 2., 2014, p. 1.

[DK11] K. Deák, I. Kocsis, Z. Keviczki, Machine fault diagnosis, prognosis and condition monitoring based on machine learning, in IMT Oradea, Proceedings of the annual session of scientific papers: volume XIII (XXIII), 2014, p. 29–34.

[DK15] K. Deák, I. Kocsis, A. Vámosi, Gépek és gépelemek diagnosztikája, élettartam becslése gépi tanulás segítségével, in Informatika a felsőoktatásban, 2014, p. 470–476.

[DK16] I. Kocsis, T. Mankovits, A. Vámosi, and K. Deák, SVM Variants Used in the Investigation of some Engineering Optimization Problems, in Book of Abstracts of the 4th International Conference on Engineering Optimization, 2014, pp. 213–214.

Alkalmazási lehetőségek és jövőbeli kutatások

A bemutatott módszerek alkalmazhatók ipari minőségellenőrzési folyamatokban a csapágygyártás, mint technológiai folyamat részeként, ahol a hiba jellegéből eredően rövid idejű tranzienst impulzusokat kell kimutatni. A hibanagyság megállapítása, az automatikus, gépi tanuláson alapuló hibaosztályozás integrálható az Ipar 4.0 folyamatokba, ahol az

emberi beavatkozás minimalizálásával valósítható meg modern állapotfelügyelet.

Tervezem olyan hibákhoz tartozó algoritmusok és hatékony vizsgáló waveletek kifejlesztését, amelyek alkalmasak lehetnek elektromos beégések ellenőrzésére a villanymotorok elégtelen szigetelése, a kóboráramok következtében. Bizonyos esetekben ezek a jelenségek hasonló vonalmenti beégéseket okoznak, amelyek morfológiai vizsgálata indokolt. Céлом felállítani a kapcsolódó mechanikai jelmodellt és validáló mérésekkel ellenőrizni waveletek hatékonyságát a Maximális Energia-Shannon Entrópia kritériumra alapozva.

Vizsgálataim területét ki szeretném terjeszteni egyéb gépelemekre és szerkezeti elemekre is, mint például fogaskerekek, darupályák, belsőégésű motorok hasonló típusú meghibásodásainak vizsgálatára.

Tervezem az optimalizálási módszerek finomítását és tesztelését, különböző globális optimalizációs módszerek felhasználásával a genetikus algoritmusokon túlmenően.

További céloom olyan algoritmusok vizsgálata, amelyeket ritkán alkalmaznak, de ugyanakkor hatékonyak lehetnek a speciális hibák detektálására, mint a BFGS Quasi-Newton, Resilient Backpropagation, Fletcher-Powell Conjugate Gradient, Polak-Ribière Conjugate Gradient algoritmusok.

Hosszútávú céljaim között szerepel olyan hibrid szakértői rendszer létrehozása, amely a módszerek integrálása útján lehetővé teszi nehezen detektálható hibák hatékony és gyors kimutatását a rezgésdiagnosztikán túlmenően a képi információk feldolgozásával kiegészítve, amelyek eredményesen implementálhatók a valós ipari gyártási és minőségellenőrzési folyamatokba is.



Nyilvántartási szám: DEENK/46/2020.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Deák Krisztián
Neptun kód: MI06NK
Doktori Iskola: Informatikai Tudományok Doktori Iskola
MTMT azonosító: 10039252

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Idegen nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (3)

1. **Deák, K.:** Design of Discrete Wavelet by Using Transient Model for Exact Measurement of Manufacturing Faults of Tapered Roller Bearings.
Period. Polytech. Mech. Eng. 63 (2), 113-122, 2019. ISSN: 0324-6051.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3311/PPme.13034>
2. **Deák, K.,** Menyhárt, J., Czégé, L.: Defect analysis of bearings with vibration monitoring and optical methods.
Int. J. Eng. Manag. Sci. 3 (1), 1-12, 2018. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2018.1.1>.
3. **Deák, K.,** Kocsis, I.: Support Vector Machine with Wavelet Decomposition Method for Fault Diagnosis of Tapered Roller Bearings by Modelling Manufacturing Defects.
Period. Polytech. Mech. Eng. 61 (4), 276-281, 2017. ISSN: 0324-6051.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3311/PPme.10802>

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (3)

4. **Deák, K.,** Kocsis, I.: Complex Morlet wavelet design with global parameter optimization for diagnosis of industrial manufacturing faults of tapered roller bearing in noisy condition.
Diagnostyka. 20 (2), 77-86, 2019. ISSN: 1641-6414.
DOI: <http://dx.doi.org/10.29354/diag/109223>
5. **Deák, K.,** Mankovits, T., Kocsis, I.: Optimal Wavelet Selection for the Size Estimation of Manufacturing Defects of Tapered Roller Bearings with Vibration Measurement Using Shannon Entropy Criteria.
Strojnicki Vestn.-J. Mech. Eng. 63 (1), 3-14, 2017. ISSN: 0039-2480.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5545/sv-jme.2016.3989>
IF: 1.182





6. **Deák, K., Kocsis, I., Vámosi, A., Keviczki, Z.:** Failure diagnostics with SVM in machine maintenance engineering.
Anal. Univ. Oradea. Fasc. Ing. Manag. Technol. 23 (1), 19-24, 2014. ISSN: 1583-0691.
DOI: <https://doi.org/10.15660/auofmte.2014-1.2969>

Magyar nyelvű konferencia közlemények (3)

7. **Deák, K., Kocsis, I.:** Diagnosztikai és karbantartási vizsgálat csapágyhiba esetében wavelet transzformáció alkalmazásával.
In: Műszaki tudomány az Észak-Kelet Magyarországi régióban 2016 : konferencia előadásai. Szerk.: Bodzás Sándor, Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, Debrecen, 720-727, 2016. ISBN: 9789637064333
8. **Deák, K., Kocsis, I., Vámosi, A.:** Gépek és gépelemek diagnosztikája, élettartam becslése gépi tanulás segítségével.
In: Informatika a felsőoktatásban 2014 konferencia : konferencia kiadvány. Szerk.: Kunkli Roland, Papp Ildikó, Rutkovszky Edéné, Debreceni Egyetem Informatikai Kar, Debrecen, 470-476, 2014. ISBN: 9789634737124
9. **Deák, K., Kocsis, I.:** Gépek károsodása által előidézett kifáradásos csapágyhibák által generált tranzienzi impulzusok jelfeldolgozása ablakozott fourier és wavelet transzformációk segítségével = Bearing fault detection and signal processing with stft and wavelet transform in maintenance engineering.
In: Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban 2014 : konferencia előadásai. Szerk.: Pokorádi László, Debreceni Akadémiai Bizottság, Debrecen, 67-72, 2014. (Műszaki füzetek ; 14) ISBN: 9789635087525

Idegen nyelvű konferencia közlemények (10)

10. **Deák, K., Kocsis, I.:** Condition Monitoring by Applying Advanced Diagnostic Method.
In: Proceedings of the 5th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2017). Eds.: Sándor Bodzás, Tamás Mankovits, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 102-108, 2017. ISBN: 9789634733041
11. **Deák, K., Kocsis, I.:** Applied vibration measurement methods and data extraction for bearing fault diagnosis.
In: Proceedings of the 4th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2016). Ed.: Sándor Bodzás, Tamás Mankovits, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 122-126, 2016. ISBN: 9789634739449
12. **Deák, K., Kocsis, I.:** Selection of wavelet function for detection of bearing defects by Shannon Entropy.
In: Proceedings of the 4th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2016). Ed.: Sándor Bodzás, Tamás Mankovits, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 127-134, 2016. ISBN: 9789634739449



13. **Deák, K., Kocsis, I.:** Manufacturing of tapered roller bearings, defects and fault detection.
In: Proceedings of the 3rd International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2015). Ed.: Sándor Bodzás, Tamás Mankovits, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 44-53, 2015. ISBN: 9789634739173
14. **Deák, K., Kocsis, I., Vámosi, A.:** Application of machine vision in manufacturing of bearings using ANN and SVM.
In: Proceedings of the 9th International Conference on Applied Informatics January 29 - Februar 1, 2014. Eger, Hungary Volume I. Eds.: Kovács Emőd, Kusper Gábor, Kunkli Roland, Tórnács Tibor, Eszterházy Károly Főiskola, Eger, 295-304, 2014. ISBN: 9786155297182
15. **Deák, K., Vámosi, A., Kocsis, I.:** Csapágy meghibásodások mérés technikája és rezgésdiagnosztikája mesterséges neurális háló segítségével = Measurement techniques and diagnostics of bearings based on artificial neural networks.
In: Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban 2014 : konferencia előadásai. Szerk.: Pokorádi László, Debreceni Akadémiai Bizottság, Debrecen, 58-66, 2014, (Műszaki füzetek ; 14) ISBN: 9789635087525
16. **Deák, K., Kocsis, I., Vámosi, A., Keviczki, Z.:** Failure diagnostics with SVM in machine maintenance engineering.
In: IMT Oradea - 2014 : Proceedings of the annual session of scientific papers. Ed.: Colin Baban, Florin Sandu Blaga, Gavril Grebenisan, Alexandru-Viorel Pele, Mircea Teodor Pop, Alexandru Rus, Radu Catalin Tarca, University of Oradea Publishing House, Oradea, 23-28, 2014. ISBN: 9786061012763
17. **Keviczki, Z., Deák, K., Kocsis, I.:** Machine Condition Monitoring in Bearing Manufacture Using Vibration Analysis and Intelligent Approaches.
In: Proceedings of the 2nd International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2014). Ed.: Sándor Bodzás, Tamás Mankovits, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 55-69, 2014. ISBN: 9789634737513
18. **Deák, K., Kocsis, I., Keviczki, Z.:** Machine fault diagnosis, prognosis and condition monitoring based on machine learning.
In: IMT Oradea - 2014 : Proceedings of the annual session of scientific papers. Ed.: Colin Baban, Florin Sandu Blaga, Gavril Grebenisan, Alexandru-Viorel Pele, Mircea Teodor Pop, Alexandru Rus, Radu Catalin Tarca, University of Oradea Publishing House, Oradea, 29-34, 2014. ISBN: 9786061012763
19. **Deák, K., Kocsis, I.:** Rotary machine and roller bearing fault measurement with FPGA embedded system.
In: Tavaszi Szél 2014 : konferenciakötet. Szerk.: Csiszár Imre, Kőmives Péter Miklós, Doktoranduszok Országos Szövetsége, Debrecen, 297-307, 2014. ISBN: 9786158004466





Idegen nyelvű absztrakt kiadványok (3)

20. **Deák, K.**, Kocsis, I.: Applied diagnostic methods in engine and bearing health monitoring.
In: 7th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2019) 7-9 November, 2019 Debrecen, Hungary : Conference Proceedings : Book of Extended Abstracts. Ed.: Tamás Mankovits, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Debrecen, Debrecen, 29-30, 2019. ISBN: 9789634901686
21. **Deák, K.**, Kocsis, I.: Wavelet design for diagnosis of tapered roller bearing manufacturing defects.
In: 6th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2018) : Conference proceedings : Book of extended abstracts. Ed.: Tamás Mankovits, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Debrecen, Debrecen, 39-40, 2018. ISBN: 9789634900511
22. Kocsis, I., Mankovits, T., Vámosi, A., **Deák, K.**: SVM Variants Used in the Investigation of some Engineering Optimization Problems.
In: Book of Abstracts of the 4th International Conference on Engineering Optimization. Ed.: H. C. Rodrigues, J. Herskovist, C.M. Mota Soares, J. M. Guedes, A. L. Araújo, J. O. Folgado, F. Moleiro, J. F. A. Maderia, IST Press, Lisbon, 213-214, 2014. ISBN: 9789899627666

Egyéb közlemények (1)

23. **Deák, K.**, Kocsis, I., Vámosi, A.: Application of machine vision in manufacturing of bearings using ANN and SVM.

További közlemények

Magyar nyelvű könyvek (4)

24. Fazekas, L., **Deák, K.**, Menyhárt, J.: Gépészeti rendszerek károsodása, javítástechnológiája és karbantartása. Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Debrecen, 177 p., 2018. ISBN: 9789634900382
25. Kocsis, I., **Deák, K.**, Szabó, T., Kvasz, R.: Diagnosztika és állapotfelügyelet. Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Debrecen, 204 p., 2015. ISBN: 9789634739036
26. Sziki, G. Á., Mankovits, T., Hajdu, S., **Deák, K.**, Huri, D.: Műszaki mechanika példatár. Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Debrecen, 239 p., 2015. ISBN: 9789634739098
27. Budai, I., **Deák, K.**, Jenői, A., Kovács-Csuvarszki, R., Strigel, J.: Tevékenységmenedzsment: folyamatelmzés, folyamatoptimalizálás (gyakorlat). Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Debrecen, 113 p., 2015. ISBN: 9789634739142



Magyar nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (1)

28. Kocsis, I., Kiss, J. T., **Deák, K.**: A karbantartási stratégia hatása a megújuló energia rendszerek életciklus költségére = Maintenance strategies and life cycle costs of renewable energy systems.
Int. J. Eng. Manag. Sci. 3 (1), 106-116, 2018. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2018.1.12>.

Magyar nyelvű konferencia közlemények (5)

29. **Deák, K.**, Kocsis, I.: Szerszámgépsorok rezgésdiagnosztikán alapuló hibadiagnosztikája gépi tanulás alkalmazásával.
In: Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2015 : konferencia előadásai. Szerk.: Bodzás Sándor, Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, Debrecen, 517-523, 2015. ISBN: 9789637064326
30. Vámosi, A., **Deák, K.**: A FEMAP végeeselemes módszer bemutatása és programozási lehetőségei = The FEMAP finite element software and its programming options.
In: Proceedings of the Conference on Problem-based Learning in Engineering Education. Ed.: Imre Kocsis, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 80-85, 2014. ISBN: 9789634737612
31. Kocsis, I., Tóth, L., Vámosi, A., **Deák, K.**: A matematikai szoftverek szerepe a mérnöki problémamegoldás átalakulásában.
In: Informatika a felsőoktatásban 2014 konferencia : konferencia kiadvány. Szerk.: Kunkli Roland, Papp Ildikó, Rutkovszky Edéné, Debreceni Egyetem Informatikai Kar, Debrecen, 600-611, 2014. ISBN: 9789634737124
32. Vámosi, A., Kocsis, I., **Deák, K.**: Az SVM módozatainak alkalmazási lehetősége műszaki optimalizációs problémák megoldásában.
In: Informatika a felsőoktatásban 2014 konferencia : konferencia kiadvány. Szerk.: Kunkli Roland, Papp Ildikó, Rutkovszky Edéné, Debreceni Egyetem Informatikai Kar, Debrecen, 148-159, 2014. ISBN: 9789634737124
33. **Deák, K.**: Belsőégésű motoros láncfűrész rezgésanalízise egyéni védőeszközök vizsgálata = Vibration analysis of chainsaw with internal combustion engine, tests of protective tools.
In: Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban 2013 : konferencia előadásai. Szerk.: Pokorádi László, Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, Debrecen, 494-503, 2013. ISBN: 9789637064302

Idegen nyelvű konferencia közlemények (6)

34. Kocsis, I., Krakkó, B., Vámosi, A., **Deák, K.**: Multiple regression analysis in time management.
In: Proceedings of the 3rd International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2015). Ed.: Sándor Bodzás, Tamás Mankovits, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 85-89, 2015. ISBN: 9789634739173





35. **Deák, K.**, Kocsis, I.: Machine fault diagnosis by time domain and frequency domain features using fuzzy decision system.
In: Tavasz Szél 2014 : konferenciakötet. Szerk.: Csiszár Imre, Kőmíves Péter Miklós, Doktoranduszok Országos Szövetsége, Debrecen, 281-296, 2014. ISBN: 9786158004466
36. **Deák, K.**, Kocsis, I., Vámosi, A., Keviczki, Z.: Tool Condition Monitoring Using Machine Learning.
In: Proceedings of the 2nd International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2014). Ed.: Sándor Bodzás, Tamás Mankovits, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 15-33, 2014. ISBN: 9789634737513
37. **Deák, K.**, Kocsis, I.: Chatter vibration and image processing with artificial neural networks and support vector machines.
In: Proceedings of the 1st International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2013). Szerk.: Mankovits Tamás, Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszék, Debrecen, 20-27, 2013. ISBN: 9789634736233
38. **Deák, K.**, Kocsis, I.: Signal processing of machines and attenuation test of anti-vibration gloves.
In: Proceedings of the 1st International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2013). Szerk.: Mankovits Tamás, Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszék, Debrecen, 28-36, 2013. ISBN: 9789634736233
39. Kocsis, I., **Deák, K.**: Villamos motor és kétfokozatú hajtómű rezgésvizsgálata = Vibration analysis of a 2-stage helical geared motor.
In: Proceedings of the 1st International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2013). Szerk.: Mankovits Tamás, Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszék, Debrecen, 222-225, 2013. ISBN: 9789634736233

Idegen nyelvű absztrakt kiadványok (1)

40. Czégé, L., Menyhárt, J., **Deák, K.**: Design issues of steam turbines.
In: 6th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2018) : Conference proceedings : Book of extended abstracts. Ed.: Tamás Mankovits, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Debrecen, Debrecen, 33-34, 2018. ISBN: 9789634900511

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 1,182

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapján szolgáló közleményekre): 1,182

A DEENK a Jelölt által az IDEa Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudományterületi ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2020.02.24.



**SHORT THESIS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF
PHILOSOPHY (PHD)**

**Development of bearing fault diagnostics
methodology based on signal processing and
machine learning tools**

by Krisztián Deák

Supervisor: Imre Kocsis PhD, dr. habil.



UNIVERSITY OF DEBRECEN
DOCTORAL SCHOOL OF INFORMATICS

DEBRECEN, 2020

Introduction

Modern technical diagnostics tools play an important role in the industrial processes and it is indispensable for scientific researches. Bearing fault diagnostics is a crucial part of the machine fault analysis. Certain types of faults create short time low energy impulses, called transients and results in strong harmonics of the fault frequencies in the spectrum of vibration signals. These fault frequencies are sometimes masked by adjacent frequencies in the spectra due to their little energy. To reduce drawbacks of traditional FFT analysis it is well advised to search for more precise and efficient methods such as wavelet transform.

The morphological analysis of the bearing faults and the mechanical signal model help to describe mathematically the faults and compare them.

Wavelets-based representations offer an important option for capturing localized effects in many signals. This is achieved by employing representations continuous transforms or discrete transforms. Wavelet families associated with specific mother functions have proven quite appropriate for a variety of problems. By sophisticated methods, new discrete wavelets are designed with their filter coefficients to realize more effective diagnostics than the traditional wavelet families. There is possibility to design continuous complex Morlet wavelets and optimize the center frequency and bandwidth to enhance the feature extraction capability of the wavelet.

Wavelet-based defect size measurement is efficient to reveal the size of the defects therefore reduce manufacturing problems, enhance manufacturing technology and quality standards. They are all vital for companies nowadays to minimal loss and maximize productivity.

To make the decision process faster artificial intelligence tool is developed applying machine learning, namely Support Vector Machines (SVM) and Artificial Neural Networks (ANN) with optimized parameters for effective fault classification which can be implemented in Industry 4.0.

Purposes of the research

Special surface faults of roller bearings produce short-time transients which have unique morphology. Small size grinding problems and cracks are very difficult to reveal especially if they are on the back-surface of the roller in tapered roller bearings under noisy conditions. Therefore, my main purpose is to develop new reliable bearing fault diagnostics methods based on vibration signal processing for analysing rectangular shape manufacturing grinding faults.

It is important to efficiently detect the grinding defects with rectangular shapes and estimate their widths from the vibration signature. My purpose is to analyse the entry and exit events of the roller and fault interaction and determine a geometrical range where the method is applicable for accurate fault size estimation.

To acquire reliable data and to minimize the measurement errors a special object-oriented measurement system and method is developed with the next parts: test-rig, data acquisition system and transducers, feature extraction and machine learning algorithms.

My purpose is to find methods to efficiently reveal the useful information content from the noisy signal different methods are tested and compared which are able to detect the unique bearing problems under low signal-to-noise ratio (SNR) environment. I plan to create a signal model for the analysis of different size and types of bearings with similar rectangular shape grinding problem. In this way the transient wave is analysed which is caused by faults with similar morphology.

My aim to test different wavelets which are determined as efficient ones for bearing fault diagnostics and analyse how efficient they are for the actual manufacturing grinding process fault detection. For choosing the best efficient wavelets I plan to make experiments related to the Maximum Energy-to-Shannon Entropy ratio criteria. Furthermore, I plan to design new continuous and discrete wavelets which are better for the feature extraction of the grinding defects than the customized wavelets. Complex Morlet wavelets are preferred because of its flexibility to

design for a problem. As for the discrete wavelet design, I plan to apply the FIR filters, Chapa Rao method, Parks McClellan algorithm to determine the ideal filter coefficients which ensure the best feature extraction.

My purpose is to make validation of the several thousand measurement data with precise contact devices and optical devices to prove the assumptions.

It is an important requirement not only detect the bearing fault but execute automatic fault classification. If the right data set is determined, thus the proper feature vectors it possible to define a technological defect size tolerance limit to classify the bearing not only as healthy or faulty but in more quality classes. My purpose is to make multi-class fault classification with high efficiency above 90% which is reliable and fast for practical applications. I plan to compare different machine learning techniques and determine the best efficient for classifying the grinding faults. Mostly, I focus on SVM and ANN on the basis of my scientific overview because they seemed to be effective for bearing fault classifications. As for the input parameters I plan to test the efficiency of time-domain statistical parameters of the vibration signal to teach the machine learning systems. My plan is to connect the statistical data set with wavelet multiresolution analysis (MRA) to fed the networks with the data set after MRA. My hypothesis at this point that statistical data input vectors after MRA provide higher efficiency rates than if the statistical parameters are used is raw form for teaching the machine learning systems. Here, my further purpose is to analyse different training algorithms, make comparisons and tests for the best efficiency. I determine the proper training parameters for the machine learning methods with global or stochastic optimization methods.

Conclusions of the literature overview

Wavelet transform was successfully applied for revealing singularity of the signal. Continuous and discrete wavelets are effective tools for feature extraction from the vibration signal related to malfunctions.

Mostly Daubechies, Symlet and Morlet wavelets were applied for general bearing diagnostics.

Researchers applied the Energy-to-Shannon Entropy Criteria for ranking of wavelets.

In the relevant literature a wide range of optimization and machine learning procedures are applied based on machine learning.

As for criticism of the researches, the conclusions that the related papers mostly focus on ball bearings and there are only a few publications which deal with roller bearings. Moreover, the operational, wear and artificial defects are the main areas of the investigations, while the manufacturing bearing faults are not discussed in the scientific papers, especially the grinding faults, which have unique morphological fault shape.

Methods

Time domain analysis was used to extract features from the time domain signal and works with the statistical parameters of the signal. Besides time domain parameters, Fourier transform is used to determine the frequency content of the vibration and peak value. Detecting of the short time transients wavelet transform was used. Wavelets are enabling the analysis on several timescales of the local properties of complex signals that can present non-stationary zones.

For detailed frequency analysis wavelet multiresolution decomposition (MRA) was applied relevant to the discrete wavelet transform.

To design discrete wavelet Chapa Rao and Parks–McClellan algorithm was used to determine the coefficients of the FIR filters.

To design continuous complex Morlet wavelet genetic algorithm as stochastic parameter optimization was applied.

The efficiency of the wavelets was determined by the Maximum-Energy-to-Shannon Entropy Criteria.

For the design procedure of the bearing test-rig experimental modal analysis was used to determine the resonant frequencies of the structure.

For the measurements Nyquist-Shannon sampling theorem was used to ensure the right data acquisition considering the proper window functions and to avoid the aliasing phenomena.

For signal model Nelder-Mead non-linear simplex optimization was applied with the mean-square error function minimization.

For validation of the results I used precise contact and optical geometrical measurement methods with laboratory devices.

Cyclic autocorrelation was used to enhance the information content of the signal when the useful components was near the detection threshold.

In machine learning fault classification, SVM and ANN with different training algorithms were used to develop the best efficient for the grinding fault classification. Input vectors of the machine learning system were coming from multi-resolution analysis (MRA). Learning rates of the training algorithms were optimized by genetic algorithm.

modal frequency was between $24 \text{ Hz} < f_0 < 39 \text{ Hz}$ range which was the aim of the design to ensure smooth measurements. American ANSI and German DIN standards ($1800 \text{ 1/min} = 30 \text{ Hz} \pm 2\%$) was taken into consideration which is referred to bearing vibration measurements.

Further parts of the object-oriented measurement system are: algorithm for surface fault detection and fault size estimation (designed wavelet and filters), designed Labview VIs for the measurements and data processing which are presented later related to the experiments.

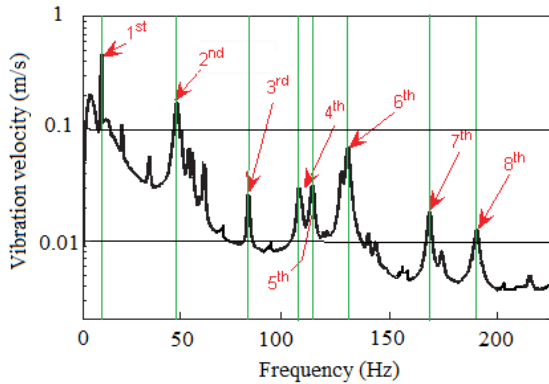


Figure 2. Measured modal frequencies of the test-rig

1.1 Optimal wavelet selection for grinding defect size estimation

Analysis of the de-stressing and re-stressing points of the entry and exit interactions between the fault and the roller is necessary for the fault size estimation as Figure 3 shows. Bearing defects generate transient impulses in the vibration signal when the rollers pass through the defects. The defect can be calculated, where D_{OI} is the outer ring diameter on the raceways, Δt is the time duration between the contact points of the bearing elements [12].

$$L_{OD} = \pi \cdot \Delta t \cdot D_{OI} \cdot FTF = 1713.74 \cdot \Delta t$$

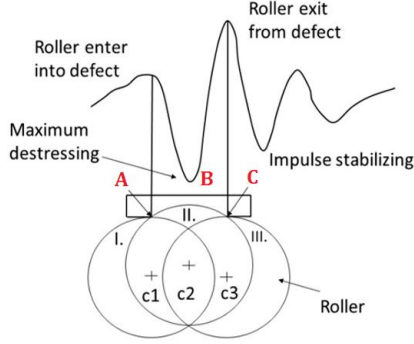


Figure 3. Analysis of the transient impulse presenting the entry and exit events of the roller into the grinding defects on the outer ring

1.2 Wavelet selection with Maximum Energy-to-Shannon Entropy Criteria

The Energy-to-Shannon Entropy Criteria is related to the Parseval energy

$$E(n) = \sum_i^m |C_{n,i}|^2$$

and to the Shannon entropy

$$S(n) = - \sum_{i=1}^m p_i \log_2 p_i$$

which are derived from the wavelet coefficients $C_{n,i}$, where m is the number of the wavelet coefficients of n -th scale and (p_1, \dots, p_m) is the energy distribution of the wavelet coefficients defined by

$$p_i = |C_{n,i}|^2 / E(n).$$

The indicator

$$\xi(n) = E(n)/S(n)$$

is used to choose the best wavelet for diagnosis of a special fault [58].

Nine different traditional real-valued wavelets were compared to reveal the rectangular shape grinding faults. Appropriate wavelet should extract the maximum Energy-to-Shannon entropy

ratio of the corresponding wavelet coefficients. Values of the Energy-to-Shannon Entropy ratios are in Table 1.

Table 1. Values of Energy-to-Shannon Entropy ratio belonging to the different wavelets, $F_c=2.09$ kHz (Morlet)

E/S	OR1	OR2	OR3	OR4	Mean
Sym2	59.96	80.20	100.87	109.16	87.55
Sym5	65.58	95.37	117.07	119.92	99.48
Sym8	82.81	113.77	120.16	118.48	108.81
db02	60.91	81.09	101.12	113.46	89.14
db06	71.74	89.02	120.42	117.40	99.65
db10	77.76	104.69	120.34	120.45	105.81
db14	85.02	120.03	121.37	123.78	112.55
Meyer	92.31	160.31	126.20	105.70	121.13
Morlet	113.15	194.15	142.18	138.14	146.90

It is observed that Morlet wavelet provided the highest value that indicates to be the most efficient wavelet from the nine wavelets for both fault detection and fault size estimation of the special grinding defect.

1.3 Fault size estimation procedure

To determine the defect size MRA is applied by filter banks which is a design method of most of the practically relevant discrete wavelet transforms.

The raw signal is too noisy to detect entry and exit points but wavelet decomposition makes it possible to analyse them more efficiently.

Multiresolution analysis is made in order to obtain precise frequency analysis. BPF0 frequency analysis was made down to the 3rd detail level (cD_3) which is from 1.25 kHz to 2.5 kHz.

As Figure 4 shows A is the entry point of the roller into the outer race defect, B is the maximum de-stressing, C is the exit point of the roller from the defect.

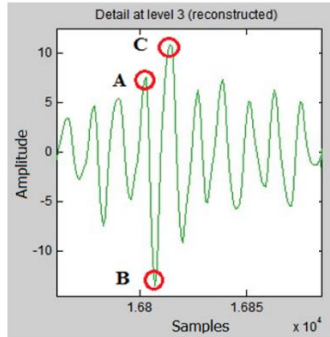


Figure 4. A section of the original vibration signal of 0.6311 mm fault width after MRA at detail 3rd level, entry point (A), de-stressing point (B) and exit point (C) are highlighted

There is variation in data points for each roller crossing over the defect. Average data points are calculated for estimating the time taken by roller to pass over the grinding defect. The average is converted into time duration that determine the fault width.

1.4 Verification of the fault size

To verify the precision of the fault size estimation method discussed before contact and optical measurements are applied to determine the exact geometrical size of the defect. Garant MM1-200 video microscope and Mahr MMQ 200 contact equipment are used. All measurements were executed three times. The average of all measurements resulted in the number which was compared to the calculated values.

The maximum difference was obtained 4.12 % for defect width of 0.6311 mm by db02 wavelet and 2.81% average difference Morlet wavelet provides the most accurate width estimation from the vibration signal which was 2.06 % maximum difference and 1.49% average difference. Tables 2-4 present the calculated and measured widths and their deviations in the case of Daubechies_02 (db02), the Symlet-5 and the Morlet wavelet. The proposed technique has been successfully implemented for measuring defect width over a range of 0.63 mm to 1.63 mm.

The defect width has been verified by optical microscope and contact roundness measurement device.

Table 2. Deviation between calculated and measured fault widths with db02 wavelet

Parameters	OR1 defect	OR2 defect	OR3 defect	OR4 defect
Calculated defect widths (mm)	0.657	1.277	1.521	1.653
Optically measured defect widths (mm)	0.6311	1.2492	1.4751	1.6236
Deviation between calculated and measured data (%)	4.12	2.24	3.11	1.78
Mean deviation (%)	2.81			

Table 3. Deviation between calculated and measured fault widths with Symlet-5 wavelet

Parameters	OR1 defect	OR2 defect	OR3 defect	OR4 defect
Calculated defect widths (mm)	0.646	1.269	1.4481	1.639
Optically measured defect widths (mm)	0.6311	1.2492	1.4751	1.6236
Deviation between calculated and measured data (%)	2.41	1.56	1.83	0.92
Mean deviation (%)	1.68			

Table 4. Deviation between calculated and measured fault widths with Morlet wavelet

Parameters	OR1 defect	OR2 defect	OR3 defect	OR4 defect
Calculated defect widths (mm)	0.644	1.266	1.502	1.637
Optically measured defect widths (mm)	0.6311	1.2492	1.4751	1.6236
Deviation between calculated and measured data (%)	2.06	1.38	1.69	0.84
Mean deviation (%)	1.49			

2. Transient model and discrete wavelet design procedure

2.1 Mechanical signal model of the fault

A discrete wavelet design procedure is established to create a wavelet function which is similar to the signal caused by the grinding fault. Wavelet Design VI Park-McClellan algorithm in Labview and the Chapa-Rao algorithm were used [28].

Linear shape surface fault causes an amplitude modulation that is more emphasized in the load zone. One of these impulses can be described as

$$x(t) = A \cdot t^n \cdot e^{-C \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t),$$

where $\omega = 2\pi \cdot f$, and f is the natural frequency of the transient, A is the initial amplitude, the damping factor C and the exponential n show the behaviour of the transient.

In order to create a new wavelet basis function, 1024 sample points of the transients were used. In the case of the test bearing the transient could be described with $A = 28.74$, $n = 2.748$, $C = 17.34$ and $\omega = 265.28$ equation parameters. Different roller bearings with the same grinding faults produced different constant but all of them were mathematically described by the same above-mentioned equation. The new wavelet amplitude spectra match the amplitude spectra of the transient with the MSE 0.2137 value.

2.2 Application of Labview Wavelet Design

In the applied discrete wavelet design all filters act as real-valued FIR filters, the zeros of $P_0(z)$, $G_0(z)$ and $H_0(z)$ are symmetrical in the z -plane. Hence, it is only needed to deal with half of the z -plane. Zeros of G_0 and H_0 of the new-designed wavelet are chosen in a way to provide the best result for the diagnosis of the grinding problem.

Remez exchange algorithm was used as the part of the Parks-McClellan method to find an optimal equiripple set of coefficients

which is an iterative algorithm used to find simple approximations to functions. The algorithm then finds the set of $N + 1$ coefficients that minimize the maximum deviation from the ideal. Intuitively, this finds the filter that is as close as possible to the desired response given that only $N + 1$ coefficients can be used. Parks-McClellan VI generates a set of linear-phase FIR multiband digital filter coefficients using the number of taps, sampling frequency: f_s , band parameters and filter type.

The value of ω_p must be less than 0.5 and the value of 0.3 was chosen here. Longer filters improved the sharpness of the transition band and the magnitude of the attenuation in the stopband at the expense of extra computation time for implementation. Lowpass filter with 31 taps provided the wavelet with sufficient correlation to the transient under analysis (Figure 5). Using these setting parameters the wavelet was obtained which had higher E/S ratio than the conventional Symlet and Daubechies wavelets which were frequently applied in bearing fault diagnosis.

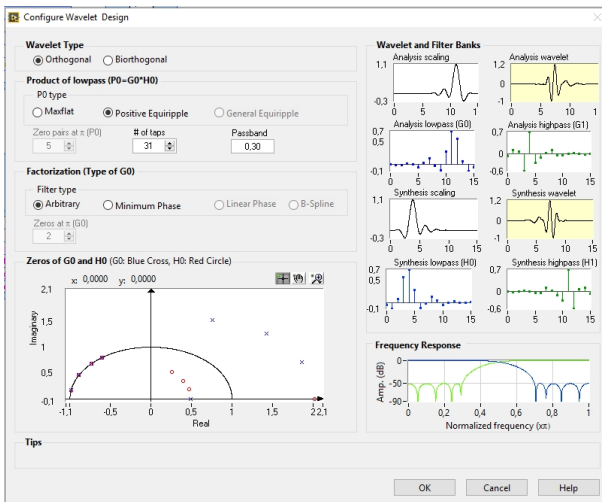


Figure 5. Configuration of the wavelet design

Since the new wavelet basis cannot be given in closed form we give the filter coefficients.

The coefficients of analysis and synthesis filters are in Figure 6. The whole list of the filter coefficients are in the Dissertation.

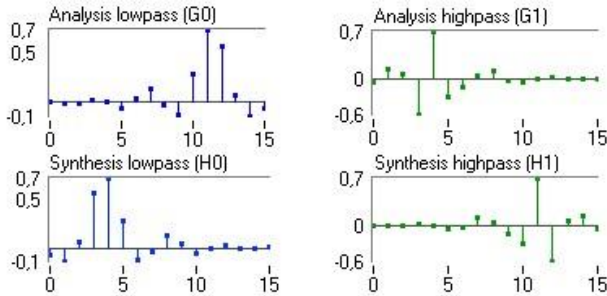


Figure 6. Values of the analysis and synthesis filters of the new-designed wavelet

The filter coefficients were checked with Chapa and Rao’s method, where the Meyer wavelet amplitude and phase spectra were matched independently to the signal. Since the two wavelets provided the same efficiency in fault detection and width estimation in practice, the filter coefficients provided by Labview were applied.

2.3 Ranking by Maximum Energy-to-Shannon Entropy Criteria

The designed discrete wavelet was compared with five generally used discrete wavelets using optical validation and the Energy-to-Shannon Entropy ratio. In this experiment, measurements were established as Table 5 shows to determine E/S values.

Table 5. E/S values of the wavelets by the number of measurements

E/S values	1st	2nd	3rd	Mean
Sym5	99.65	101.12	100.67	100.48
Sym8	121.85	122.81	123.05	122.57
db04	88.18	87.21	86.84	87.41

db06	117.01	115.94	116.07	116.34
db08	84.28	82.86	84.50	83.88
New_Designed	155.12	154.18	155.23	154.84

It is observed that new-designed wavelet gives the highest value that indicates to be the most efficient wavelet for both fault detection and fault size estimation. The scalogram (Figure 7) clearly shows the time-frequency location.

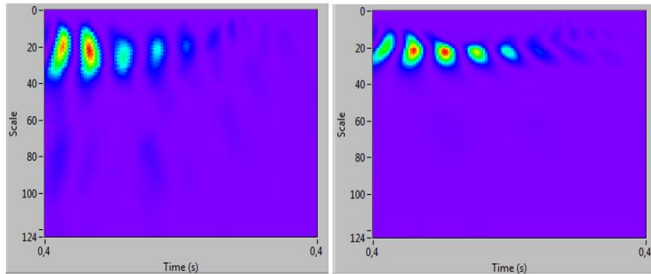


Figure 7. Comparison of the scalograms of the Daub_08 (left) and the new-designed wavelet (right)

Comparing the two scalogram representations it is noticed that the designed wavelet provided better energy concentration.

2.4 Validation of the grinding fault width estimation

To verify the precision of the measurements optical and contact inspection is applied to reveal the exact geometrical size of the defect. Garant MM1-200 video microscope and Mahr MMQ 200 contact equipment were used.

In this experiment four different widths (0.6311 mm, 1.2492 mm, 1.4751 mm, 1.6236 mm) were measured and the design wavelet produced the highest accuracy (Table 6). It was declared that the designed wavelet produced the least difference of 1.18% compared to the calculated value.

Table 6. Comparison of the calculated and measured fault widths of the faults in case of the 1.2492 mm

Wavelet	Calculated width (mm)	Width deviation (%)
Sym_05	1.2875	3.07
Sym_08	1.2713	1.77
Daub_04	1.2930	3.51
Daub_06	1.2765	2.19
Daub_08	1.2975	3.87
New_designed	1.2639	1.18

3. Complex Morlet wavelet design with global parameter optimization

3.1 Wavelet parameter optimization with genetic algorithm

Continuous complex Morlet wavelet was designed that could efficiently detect the special rectangular shape manufacturing grinding faults in noisy environment (SNR<30 dB) and estimate the fault size. Noisy environment was generated by a Duffing oscillator.

The center frequency and the bandwidth of the complex Morlet wavelet

$$\psi(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi\beta}} e^{2i\pi f_0 x} e^{-\frac{x^2}{\beta}}$$

were optimized by genetic algorithm (GA). The objective function is the E/S value.

In the experiment a single-point crossover was applied, the typical crossover probability value was 0.75. Mutation was used to avoid local convergence of the GA with the probability value of 0.03.

The maximum number of 60 generations were adopted as the termination criterion for the solution process.

When $f_0/\beta >$ is sufficiently large the admissibility condition is satisfied.

The Morlet wavelet parameter optimization is summarized in the following conditions

$$\begin{aligned} \beta < f_0/3.5 & & f_0 - 0.5\beta \geq 35f_r \\ f_0 + 0.5\beta < 0.39f_s & & \beta > 3f_b \end{aligned}$$

Based on the inequalities above the domain of the optimization process is given: $\beta \in [602 \text{ Hz}, 706 \text{ Hz}]$, $f_0 \in [1805 \text{ Hz}, 9631 \text{ Hz}]$.

With the genetic algorithm the center frequency and the bandwidth of the complex Morlet wavelet were optimized to $f_0 = 2118 \text{ Hz}$ and $\beta = 642 \text{ Hz}$.

Ten different wavelets were considered. The wavelet with the highest E/S ratio was obtained. The comparison of the wavelets using their E/S values are in Table 7.

Table 7. Calculated values of Energy-to-Shannon-Entropy ratio of the ten wavelet functions

E/S	O	OR2	OR3	OR4	Mean
Sym2	59.8	82.69	103.26	112.52	89.58
Sym5	69.5	98.31	114.01	112.34	98.56
Sym8	79.4	117.24	120.56	113.51	107.69
db02	59.8	82.69	103.26	112.54	89.59
db06	72.6	95.03	116.37	121.17	101.30
db10	77.6	101.8	121.01	123.05	105.89
db14	85.8	118.47	123.14	124.31	112.93
Morlet	114.	194.25	144.72	142.14	148.78
Cmor	138.	235.19	247.45	227.89	212.12
Meyer	97.5	160.37	127.08	103.33	122.09

It is observed that the designed and parameter optimized complex Morlet wavelet provided the highest E/S value that indicates the Morlet wavelet was the most efficient for both fault detection and fault size estimation.

3.3 Autocorrelation envelope power spectrum for signal enhancement

In order to enhance the signal in the frequency band, an autocorrelation enhancement algorithm is proposed. It increases the periodic impulsive feature of the signal to provide more efficient fault signal detection.

3.4 Identification of the fault frequencies

Using the actual parameters of the bearing and operational conditions the fault frequencies were calculated. Multi-resolution analysis was executed down to 3rd level from 10 kHz in order to obtain precise and detailed frequency analysis. Figure 8 presents the multiresolution analysis from signal to reveal BPFO frequency for outer race grinding fault identification.

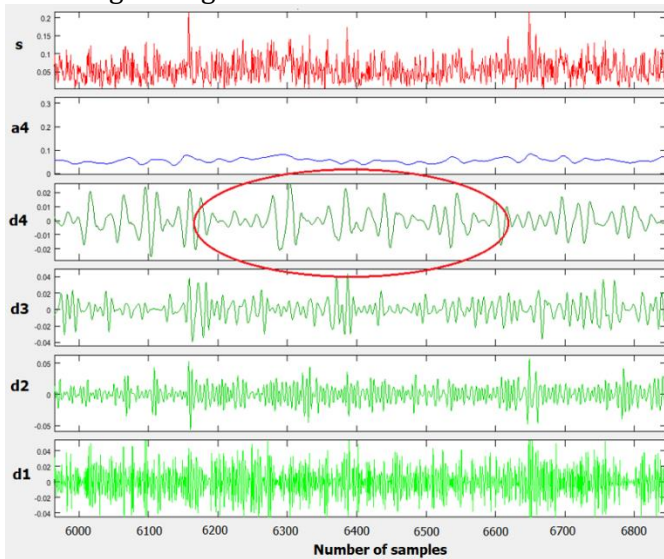


Figure 8. Multi-resolution analysis of the signal for finding transients

The Morlet wavelet provided better feature extraction, therefore higher BPFO peak values. Symlet-5 wavelet provided less values. The optimized complex Morlet wavelet provided the highest peak value after autocorrelation enhancement (Figure 9).

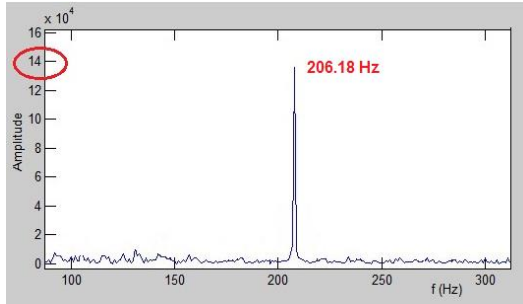


Figure 9. Envelope spectrum of the ORD filtered by the parameter optimized Cmor wavelet with autocorrelation enhancement

3.5 Fault size estimation based on scalogram of Cmor filter

Analysing the transients, the typical points where the roller enters into and exits from the defect are defined as Figure 21 shows ([5], [23]).

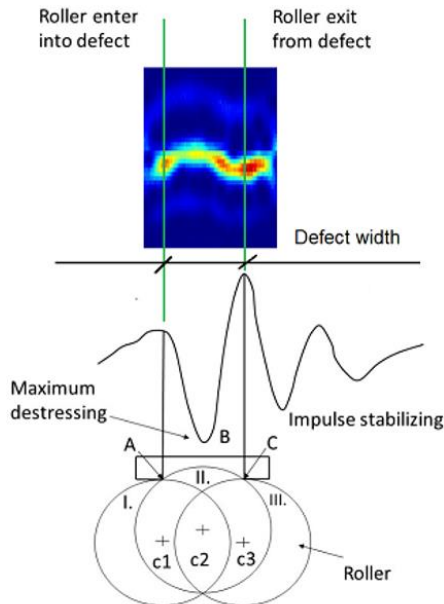


Figure 10. Entry and exit point analysis with wavelet scalogram

With this procedure entry and exit points can be exactly determined for fault width measurement (Figure 10). The *E/S* result of the compared wavelets are in the Table 8. The optimized complex Morlet (Cmor) wavelet provided the most accurate result with only the deviation of 1.19% from the measured value. In the experiment four different widths (0.6311 mm, 1.2492 mm, 1.4751 mm, 1.6236 mm) were validated.

Table 8. Comparison of the calculated and measured fault widths of the ORD

Wavelet	Calculated width (mm)	Width deviation [%]
Sym2	1.277	2.24
Sym5	1.269	1.56
Sym8	1.2713	1.77
db2	1.277	2.24
db6	1.2765	2.19
db10	1.2681	1.52
db14	1.2679	1.5
Morlet	1.266	1.38
Cmor	1.264	1.19
Meyer	1.2674	1.46

4. Bearing grinding fault classification based on wavelet decomposition

4.1 Fault classification with machine learning algorithms

The special rectangular shape bearing manufacturing grinding defects were classified with SVM method and with Artificial neural Networks (ANN). Using machine learning methods for the bearing fault classification, it is possible to exclude the human intervention from the technological process, therefore it can be faster and more efficient.

4.2 Bearing grinding faults and feature vectors for fault classification

Five types of bearing defects, the outer-ring (OR), inner ring (IR), roller fault (RF), back-surface fault on the roller (IRB), multi-fault (MF) defects are analysed which are the most common manufacturing bearing defects caused by the grinding process.

The geometrical parameters of the bearing defects can be seen in the Table 9.

Table 9. Geometrical parameters of bearing defects

Type	Width [mm]	Depth [μm]
OR1 defect	0.6311	6.5
OR2 defect	1.2492	33.6
OR3 defect	1.4751	42.3
OR4 defect	1.6236	51.4

Type	Width [mm]	Depth [μm]
IR1 defect	0.7187	7.9
IR2 defect	1.3945	36.8
IR3 defect	1.5268	46.2
IR4 defect	1.7943	58.3

Type	Width [mm]	Depth [μm]
RF1 defect	0.6418	6.8
RF2 defect	1.3245	35.2
RF3 defect	1.5512	48.3
RF4 defect	1.9425	71.2

Type	Width [mm]	Depth [μm]
IRB1 defect	0.6257	12.1
IRB 2 defect	1.6432	14.7
IRB 3 defect	2.1719	19.3
IRB 4 defect	2.8546	15.2

Two data sets of statistical parameters were defined. The first data set contains the statistical parameters related to the original measuring results and the second one contains the processed data after wavelet multiresolution analysis (MRA).

There were five fault classes (healthy, outer ring fault, inner ring fault, roller fault, roller back-surface fault, multi fault) for the software. Two main parameters were changed in the experiment: engine rotation speed and the axial spanning force of the bearing. Experiments were executed from 60 to 2880 $1/min$ which means 48 different speed of revolution. Experiments were executed with different spanning force of the test-rig screw mechanism from 25 N to 450 N, namely 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 275, 300, 325, 350, 375, 400, 425, 450 N. The maximum value of the axial force by the screw mechanism of the test-rig is 450 N because of avoiding the risk of excessive Hertz-tension between the contact areas even in operation when dynamic forces are produced. Thus, 864 input vectors were created and each vectors contained 8 different calculated parameters (range, kurtosis, skewness, crest, mean, std. deviation, Parseval energy, entropy) that were 6912 data for each bearing element. Statistical data were calculated by the Labview VI. In order to obtain representative statistical data, outer-ring fault (184 pieces), inner ring fault (162 pieces), roller fault (247 pieces), back-surface fault (147 pieces) and healthy bearings (225 pieces) were used. For teaching vectors 4 main parameters are used: range, kurtosis, skewness, crest producing 3456 data.

4.3 Fault classification by SVM method

The sample training and testing vectors were created to R Cran software [79]. The 20% rule was applied for SVM classification to distinguished the training data and the testing data (80% for training and 20% for testing).

Table 10. Results of the SVM classification

Classified element	Classification rate with raw data without filtering	Classification rate with data after 3rd level wavelet decomposition
OR	89.3 %	96.4 %
IR	85.7 %	92.8 %
IRB	78.5 %	89.3 %
RF	85.7 %	92.8 %
MF	92.8 %	96.4 %
Mean:	86.4 %	93.5 %

Effectiveness of the SVM classification is in Table 10. Wavelet multiresolution analysis successfully removed the additional noise components from the vibration signature, behaved as a band-filter and enhanced the useful frequency content that involved the unique feature of faults themselves.

Effectiveness on the basis of raw measurement input data: 24 cases was classified properly out of 28 which means 86.7% classification efficiency of all cases for IR backfaults.

Classification effectiveness was higher with the filtered data set than with the raw data in all cases. 96.4% classification rate was given for outer race fault that is remarkable for industrial application. Averaged value of the classification rate was 93.5% by using wavelet decomposition.

The applied kernel functions were polynomial and RBF kernels. Tune.svm of 1071 package was applied in the R Cran software to optimization of the parameters to obtain the best result.

5. Artificial neural network applications for classifying bearing grinding faults

5.1 Realization of ANN for the analysis

In this experiment, five kind of bearing defects were analysed, outer-ring fault, inner-ring fault, roller fault, roller back-surface fault and multi-fault which was the combination of the roller fault and the roller back-surface fault. The feature parameters were

extracted by discrete wavelet multiresolution analysis. Time domain parameters after multi-resolution analysis, namely range, kurtosis, skewness and crest factor were provided for the MLP neural network using gradient-descent, Levenberg-Marquardt, and scaled-conjugate back propagation algorithms.

Designing MLP neural network for fault classification

The choice of training parameters is critical to the success of the neural network training process. The choice of these values is generally problem-dependent and there is no generic formula that can be used to choose these parameter values. Parameters of MLP network were optimized with Bayesian method and experimental way following the advices of the related scientific literatures.

The training of an MLP network was achieved by modifying the connection weights and biases iteratively to optimize a performance function which was the mean square error (MSE) in the research.

5.2 Comparison of the algorithms

In case of all three algorithms $lr = 0.05$ was used, gradient descent algorithm missed the local minima because lr learning rate was too small, the algorithm took long time to converge making up to 10000 iterations without stopping. Therefore, lr was optimized to find the shortest CPU running time to converge (4852 iterations) and the highest percentage of classification ratio. Levenberg-Marquardt and scaled-conjugate algorithms performed 36 and 50 iterations which were small enough in CPU running time, however they provided high classification ratio. To compare the efficiency, Levenberg-Marquardt algorithm was the best for the special task of the research. Parameters were kept the same value when the training algorithms were compared.

In Table 11 the classification rates can be seen in percentage values. Overall, Levenberg-Marquardt algorithm was the best for classifying percentage of 92.0% with the less computational time as Table 12 represents. Gradient descent algorithm with $lr = 0.05$ provided only 20% classification rate, therefore it was useless to identify the defect type. Increasing the learning rate up to the

optimized level of 0.78 it provided 60.0% classification ratio that was quite lower than the accuracy of the Levenberg-Marquardt algorithm. Scaled conjugate algorithm was not able to provide sufficient classification rate for the industrial classification of the roller back-surface defects. The changing of the learning ratio did not provide higher classification ratios in case of the Levenberg-Marquardt and the scaled conjugate algorithms.

Table 11. Classification rates of ANN classification with the applied training algorithms

Class	Gd (lr=0.05)	Gd (lr=0.78)	L-M (lr=0.05)	Scg (lr=0.05)
OR	80.0 %	80.0 %	90.0 %	80.0 %
IR	94.7 %	100.0 %	100.0 %	94.7 %
RF	89.5 %	84.2%	100.0 %	89.5 %
IRB	20.0 %	60.0 %	85.0 %	70.0 %
MF	80.0 %	95.0 %	85.0 %	90.0 %
Mean	72.8 %	83.9 %	92.0 %	84.8 %

Table 12. CPU times of ANN classification with the applied training algorithms

Class	Gd (lr=0.05)	Gd (lr=0.78)	L-M (lr=0.05)	Scg (lr=0.05)
Time	7813 ms	3248 ms	314 ms	548 ms

New scientific results

THESIS 1

An object-oriented measurement system and method was developed to analyse certain type of manufacturing surface faults of roller bearings with rectangular shape contact areas.

The main parts of the special measurement system are a designed test-rig which is suitable to analyse roller bearings of different sizes and types according to the requirements of the analysis, a vibration transducer and a data acquisition system, algorithms for surface fault detection and fault size estimation, designed wavelets and filters with developed Labview VIs for measurements and data processing.

It was proven on tapered roller bearings that the measurement system and the method is effective for the detection and size estimation of the investigated type of bearing faults. It was proved with the Maximum Energy-to-Shannon Entropy Criteria that the optimized wavelets are appropriate for the analysis.

[DK3] K. Deák, T. Mankovits, I. Kocsis, Optimal wavelet selection for manufacturing defect size estimation of tapered roller bearings with vibration measurement using Shannon Entropy Criteria, Strojnicki Vestnik-Journal of Mechanical Engineering, vol. 63, no. 1, 2017, p. 3–14.

Further related publications:

[DK10] K. Deák, I. Kocsis, Rotary machine and roller bearing fault measurement with FPGA embedded system, in Tavaszi Szél / Spring Wind, II. kötet Állam- és jogtudomány, közigazgatás tudomány, had- és rendészettudomány, 2014.

[DK18] K. Deák, I. Kocsis, Applied vibration measurement methods and data extraction for bearing fault diagnosis, in

Proceedings of the International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering, 2016, p. 122–126.

[DK20] K. Deák, I. Kocsis, Condition Monitoring by Applying Advanced Diagnostic Method, in Proceedings of the International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering, 2017, p. 102–108.

[DK5] K. Deák, J. Menyhárt, L. Czégé, Defect analysis of bearings with vibration monitoring and optical methods, International Journal of Engineering and Management Sciences, vol. 3, no. 4, 2018, p. 1–12.

[DK 22] K. Deák and I. Kocsis, Applied diagnostic methods in engine and bearing health monitoring. In: 7th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering, 2019.

THESES RELATED TO WAVELET DESIGN

A discrete and a continuous wavelet were designed to detect rectangular shape manufacturing grinding faults of roller bearings and to estimate the fault sizes. It was proven with measurements on tapered roller bearings that the designed wavelet in the range from 0.63 mm to 1.63 mm is more effective than the traditional wavelets which are generally applied for bearing fault detection. The effectiveness of both methods in the fault size estimation was proven by optical and contact validation measurement methods.

THESIS 2A

A new discrete wavelet was developed using the transient signal model referring to the entry and exit interactions between the roller and the defect. It was proven on tapered roller bearings that the designed wavelet is more effective than the traditional wavelets which are generally applied for bearing fault detection.

THESIS 2B

A new complex Morlet wavelet was designed to determine the fault frequency of the investigated fault type, and to estimate the fault size in noisy environment. It was proven with measurements that the designed wavelet is more effective up to SNR=26 dB than the traditional wavelets which are generally applied for bearing fault detection.

[DK1] K. Deák, Design of Discrete Wavelet by Using Transient Model for Exact Measurement of Manufacturing Faults of Tapered Roller Bearings, Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, vol. 63, no. 2, 2019, p. 113–122.

[DK2] K. Deák, I. Kocsis, Complex Morlet wavelet design with global parameter optimization for diagnosis of industrial manufacturing faults of tapered roller bearing in noisy condition, Diagnostyka, vol. 20, no. 2, 2019, p. 77–86.

Further related publications:

[DK8] K. Deák, I. Kocsis, Gépek károsodása által előidézett kifáradásos csapágyhibák által generált tranziens impulzusok jelfeldolgozása ablakozott fourier és wavelet transzformációk segítségével = bearing fault detection and signal processing with STFT and wavelet transform in maintenance engineering, in Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban, 2014, p. 67–72.

[DK13] Z. Keviczki, K. Deák, I. Kocsis, Machine condition monitoring in bearing manufacture using vibration analysis and intelligent approaches, in Proceedings of the International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering, 2014, p. 55–69.

[DK14] K. Deák, I. Kocsis, Manufacturing of tapered roller bearings, defects and fault detection, in Proceedings of the

International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering, 2015, p. 44–53.

[DK19] K. Deák, I. Kocsis, Selection of wavelet function for detection of bearing defects by Shannon entropy, in Proceedings of the International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering, 2016, p. 127–134.

[DK21] K. Deák, I. Kocsis, Wavelet design for diagnosis of tapered roller bearing manufacturing defects, in Proceedings of the International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering, 2018, p. 39–40.

[DK17] K. Deák, I. Kocsis, Diagnosztikai és karbantartási vizsgálat csapágyhiba esetében wavelet transzformáció alkalmazásával, in Műszaki tudomány az Észak-Kelet Magyarországi régióban, 2016, p. 720–727.

THESIS 3

A new method was developed to classify rectangular shape manufacturing grinding defects of roller bearings. The classifications were executed with SVM method and Artificial Neural Network. Input vectors of the machine learning systems were derived from the 3rd level multiresolution decomposition of the vibration signal using four statistical parameters. It was proven with measurements that the efficiency of the new classification method satisfies the requirements set in the relevant literature. Artificial Neural Network with optimized parameters using Levenberg-Marquardt algorithm resulted in a classification efficiency of an average of 92 %. The SVM method produced a classification efficiency of 93.5 %.

[DK4] K. Deák, I. Kocsis, Support Vector Machine with Wavelet Decomposition Method for Fault Diagnosis of Tapered Roller Bearings by Modelling Manufacturing Defects, Periodica

Polytechnica Mechanical Engineering, vol. 61, no. 4, 2017, p. 276–281.

Further related publications:

[DK6] K. Deák, I. Kocsis, A. Vámosi, and Z. Keviczki, *Failure diagnostics with SVM in machine maintenance engineering*, *Annals of the University of Oradea Fascicle of Management and Technological Engineering*, vol. XXIII (XIII), no. 1, 2014, p. 19–24.

[DK12] K. Deák, I. Kocsis, A. Vámosi, Z. Keviczki, *Failure diagnostics with SVM in machine maintenance engineering*, in *IMT Oradea, Proceedings of the annual session of scientific papers: volume XIII (XXIII)*, 2014, p. 23–28.

[DK7] K. Deák, A. Vámosi, I. Kocsis, *Csapágy meghibásodások mérés technikája és rezgésdiagnosztikája mesterséges neurális hálóak segítségével = Measurement techniques and diagnostics of bearings based on artificial neural networks*, in *Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban*, 2014, p. 58–66.

[DK9] K. Deák, I. Kocsis, A. Vámosi, *Application of machine vision in manufacturing of bearings using ANN and SVM*, in *The 9th International Conference on Applied Informatics*, vol. 2., 2014, p. 1.

[DK11] K. Deák, I. Kocsis, Z. Keviczki, *Machine fault diagnosis, prognosis and condition monitoring based on machine learning*, in *IMT Oradea, Proceedings of the annual session of scientific papers: volume XIII (XXIII)*, 2014, p. 29–34.

[DK15] K. Deák, I. Kocsis, A. Vámosi, *Gépek és gépelemek diagnosztikája, élettartam becslése gépi tanulás segítségével*, in *Informatika a felsőoktatásban*, 2014, p. 470–476.

[DK16] I. Kocsis, T. Mankovits, A. Vámosi, and K. Deák, *SVM Variants Used in the Investigation of some Engineering Optimization Problems*, in *Book of Abstracts of the 4th*

Practical applications and future work

The proposed methods can be used in industrial manufacturing processes where short time transients should be revealed. Automatic fault detection can be fully implemented in the quality management procedure in the industry 4.0 to avoid human interventions and make the checking process faster.

As for the future work I plan to analyse the methods for other kind of manufacturing faults.

Electrical marks are many times a problem of the bearings of electrical motors which has similar rectangular shape under certain circumstances. If the fault has a well-defined entry and exit points, the fault could be detected similar way that the grinding defects. My purpose is to analyse how to detect the suffered bearings of the electric motors by using the vibration data of the system.

Further purpose is to test my method for detecting similar shape of problems on other machine elements, e.g. crane raceways or linear motion devices. The optimization of the wavelet parameters is very subtle method, therefore my plan is to investigate other optimization methods besides the genetic algorithms such as differential algorithms, simulated annealing and compare their results.

I plan to analyse the efficiency other training algorithms in case of deep learning which can be used in neural networks for fault classification, such as BFGS Quasi-Newton, Resilient Backpropagation, Fletcher-Powell Conjugate Gradient, Polak-Ribière Conjugate Gradient.

My further plan is to combine the SVM and ANN and analyse the fault classification efficiency of this hybrid system.

Realizing an expert system which gathers an overall data from the faulty items is an ultimate purpose of my research which can be implemented in the engineering serial production and quality inspection processes.

Értekezéshez kapcsolódó saját publikációk/ Author's publications related to the Dissertation

Impakt faktoral vagy Q besorolással rendelkező nemzetközi folyóirat cikkek/ In international scientific journals with Impact Factor or Q ranking

- [DK1] K. Deák, Design of Discrete Wavelet by Using Transient Model for Exact Measurement of Manufacturing Faults of Tapered Roller Bearings, *Periodica Polytechnica- Mechanical Engineering*, vol. 63, no. 2, pp. 113–122, 2019. Ranking: Q3
- [DK2] K. Deák and I. Kocsis, Complex Morlet wavelet design with global parameter optimization for diagnosis of industrial manufacturing faults of tapered roller bearing in noisy condition, *Diagnostyka*, vol. 20, no. 2, pp. 77–86, 2019. Ranking: Q2
- [DK3] K. Deák, T. Mankovits, I Kocsis, Optimal wavelet selection for manufacturing defect size estimation of tapered roller bearings with vibration measurement using Shannon Entropy Criteria, *Strojnicki Vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, vol. 63, no. 1, pp. 3–14, 2017. Ranking: Q2, IF: 1.182
- [DK4] K. Deák and I. Kocsis, Support Vector Machine with Wavelet Decomposition Method for Fault Diagnosis of Tapered Roller Bearings by Modelling Manufacturing Defects, *Periodica Polytechnica-Mechanical Engineering*, vol. 61, no. 4, pp. 276–281, 2017. Ranking: Q3

Nemzetközi folyóiratokban megjelent cikkek/ Publications in international scientific journals

- [DK5] K. Deák, J. Menyhárt, and L. Czégé, Defect analysis of bearings with vibration monitoring and optical methods, *International Journal of Engineering and Management Sciences / Műszaki és Menedzsment Tudományi Közlemények*, vol. 3, no. 4, pp. 1–12, 2018.
- [DK6] K. Deák, I. Kocsis, A. Vámosi, Z. Keviczki, Failure diagnostics with SVM in machine maintenance engineering, *Analele universitatii din oradea fasciola management si inginerie tehnologica / Annals*

of the university of oradea fascicle of management and technological engineering, vol. XXIII (XIII), no. 1, pp. 19–24, 2014.

Konferenciakiadványban megjelent cikkek/ Publications in conference proceedings

- [DK7] K. Deák, A. Vámosi, and I. Kocsis, Csapágy meghibásodások méréstechnikája és rezgésdiagnosztikája mesterséges neurális hálóok segítségével = Measurement techniques and diagnostics of bearings based on Artificial Neural Networks (ANN), in *Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2014*, 2014, pp. 58–66.
- [DK8] K. Deák, I. Kocsis, Gépek károsodása által előidézett kifáradásos csapágyhibák által generált tranzienst impulzusok jelfeldolgozása ablakozott fourier és wavelet transzformációk segítségével = bearing fault detection and signal processing with stft and wavelet transform in maintenance engineering, in *Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2014*, 2014, pp. 67–72.
- [DK9] K. Deák, I. Kocsis, A. Vámosi, Application of machine vision in manufacturing of bearings using ANN and SVM, in *The 9th International Conference on Applied Informatics*, vol. 2., 2014
- [DK10] K. Deák, I. Kocsis, Rotary machine and roller bearing fault measurement with FPGA embedded system, in *Tavaszi Szél 2014 / Spring Wind 2014: II. kötet Állam- és jogtudomány, közgazdaságtudomány, had- és rendészettudomány*, 2014.
- [DK11] K. Deák, I. Kocsis, Z. Keviczki, Machine fault diagnosis, prognosis and condition monitoring based on machine learning, in *IMT Oradea - 2014: Proceedings of the annual session of scientific papers: volume XIII (XXIII): may 29 - may 31, 2014, Oradea, Romania*, 2014, pp. 29–34.
- [DK12] K. Deák, I. Kocsis, A. Vámosi, Z. Keviczki, Failure diagnostics with SVM in machine maintenance engineering, in *IMT Oradea - 2014: Proceedings of the annual session of scientific papers: volume XIII (XXIII): may 29 - may 31, 2014, Oradea, Romania*, 2014, pp. 23–28.
- [DK13] Z. Keviczki, K. Deák, and I. Kocsis, Machine condition monitoring in bearing manufacture using vibration analysis and intelligent approaches, in *Proceedings of the International Scientific*

- Conference on Advances in Mechanical Engineering*, 2014, pp. 55–69.
- [DK14] K. Deák and I. Kocsis, Manufacturing of tapered roller bearings, defects and fault detection, in *Proceedings of the 3rd International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering*, 2015, pp. 44–53.
- [DK15] K. Deák, I. Kocsis, and A. Vámosi, Gépek és gépelemek diagnosztikája, élettartam becslése gépi tanulás segítségével, in *Informatika a felsőoktatásban 2014*, 2014, pp. 470–476.
- [DK16] I. Kocsis, T. Mankovits, A. Vámosi, and K. Deák, SVM Variants Used in the Investigation of some Engineering Optimization Problems, in *Book of Abstracts of the 4th International Conference on Engineering Optimization*, 2014, pp. 213–214.
- [DK17] K. Deák and I. Kocsis, Diagnosztikai és karbantartási vizsgálat csapágyhiba esetében wavelet transzformáció alkalmazásával, in *Műszaki tudomány az Észak-Kelet Magyarországi régióban 2016*, 2016, pp. 720–727.
- [DK18] K. Deák and I. Kocsis, Applied vibration measurement methods and data extraction for bearing fault diagnosis, in *Proceedings of the 4th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering*, 2016, pp. 122–126.
- [DK19] K. Deák and I. Kocsis, Selection of wavelet function for detection of bearing defects by Shannon entropy, in *Proceedings of the 4th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering*, 2016, pp. 127–134.
- [DK20] K. Deák and I. Kocsis, Condition Monitoring by Applying Advanced Diagnostic Method, in *Proceedings of the 5th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering*, 2017, pp. 102–108.
- [DK21] K. Deák and I. Kocsis, Wavelet design for diagnosis of tapered roller bearing manufacturing defects, in *Proceedings of the 6th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering*, 2018, pp. 39–40.
- [DK22] K. Deák and I. Kocsis, Applied diagnostic methods in engine and bearing health monitoring. In: 7th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering, 2019.

Független hivatkozások száma az MTMT szerint: 21

Hivatkozások/ References

- [1] Patel, V. N., Tandon, N., Pandey, R., K., Defect Detection in Deep Groove Ball Bearing in Presence of External Vibration Using Envelope Analysis and Duffing Oscillator, *Measurement* 45, 2012, p. 960.
- [2] Khanam, S., Tandon, N., Dutt, J. K., Fault Identification of Rolling Element Bearings from Vibration Signals: An Application of Kalman and H LOWHUV10th International Conference on Vibrations in Rotating Machinery (VIRM10), IMechE London, UK, Woodhead Publishing Limited, Institution of Mechanical Engineers (IMechE), 2012, pp. 703-713.
- [3] Al-Ghamd, A.M., Mba, D., A Comparative Experimental Study on the Use of Acoustic Emission and Vibration Analysis for Bearing Defect Identification and Estimation of Defect Size, *Mechanical Systems and Signal Processing* 20, p. 1537.
- [4] Elforjani, M., Mba, D., Accelerated Natural Fault Diagnosis in Slow Speed Bearings with Acoustic Emission, *Engineering Fracture Mechanics* 77, 2010, p. 112.
- [5] Sawalhi, N., Randall, R.B., Vibration Response of Spalled Rolling Element Bearings: Observations, Simulations and Signal Processing Techniques to Track the Spall Size, *Mechanical Systems and Signal Processing* 25, 2011, p. 846.
- [6] Peng, Z.K., Chu, F.L., Application of the Wavelet Transform in Machine Condition Monitoring and Fault Diagnostics: A Review with Bibliography, *Mechanical Systems and Signal Processing* 18, 2004, p. 199.
- [7] Prabhakar, S., Mohanty, A.R., Sekhar, A.S., Application of Discrete Wavelet Transform for Detection of Ball Bearing Race Faults, *Tribology International* 35, 2002, p.793.
- [8] Shi, D. F., Wang, W. J., Qu, L. S., Defect detection for bearings using envelope spectra of wavelet transform, *ASME Journal of Vibration and Acoustics* 126 (4), 2004, p. 567.
- [9] Nikolaou, N. G., Antoniadis, I. A., Demodulation of Vibration Signals Generated by Defects in Rolling Element Bearings Using Complex Shifted Morlet Wavelets, *Mechanical Systems and Signal Processing* 16(4), 2002, p. 677.
- [10] Qiu, H., Lee, J., Lin, J., Yu, G., Wavelet Filter-Based Weak Signature Detection Method and its Application on Rolling Element Bearing Prognostics, *Journal of Sound and Vibration* 289, 2006, p. 1066.

- [11] Junsheng, C., Dejie, Y., Yu, Y., Application of an Impulse Response Wavelet to Fault Diagnosis of Rolling Bearings, *Mechanical Systems and Signal Processing* 21, 2007, p. 920.
- [12] Kumar, R., Singh, M., Outer Race Defect Width Measurement in Taper Roller Bearing using Discrete Wavelet Transform of Vibration Signal, *Measurement* 46, 2013, p. 537.
- [13] Awal, M. A., Mostafa, S. S., Ahmad, M., Quality Assessment of ECG Signal Using Symlet Wavelet Transform, *Proceedings of International Conference on Advances in Electrical Engineering*, 2012, p.129-134.
- [14] R. Kumar, D.P. Jena, M. Bains, Identification of inner race defect in radial ball bearing using acoustic emission and wavelet analysis, in: *Proceedings of ISMA 2010 including USD 2010 Leuven (Belgium)*, 2010, pp. 2883–2891.
- [15] R. Yan, R.X. Gao, Multi-scale enveloping spectrogram for vibration analysis in bearing defect diagnosis, *Tribology International* 42, 2009, 293–302.
- [16] M.S. Patil, J. Mathew, P.K. Rajendrakumar, S. Desai, A theoretical model to predict the effect of localized defect on vibrations associated with ball bearing, *International Journal of Mechanical Sciences* 52 (9), 2010, 1193–1201.
- [17] W. He, Z. Jiang, K. Feng, Bearing fault detection based on optimal wavelet filter and sparse code shrinkage, *Measurement* 42, 2009, 1092–1102.
- [18] N. Sawalhi, R.B. Randall, Vibration response of spalled rolling element bearings, observations, simulations and signal processing techniques to track the spall size, *Mechanical Systems and Signal Processing* 25, 2011, 846–870.
- [19] S. Khanam, N. Tandon, J.K. Dutt, Fault size estimation in the outer race of ball bearing using discrete wavelet transform of the vibration signal. 2nd International Conference on Innovations in Automation and Mechatronics Engineering, ICIAME 2014
- [20] L. Tóth, T. Tóth, Construction of a realistic signal model of transients for a ball bearing with inner race fault. *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol 10., No 1., 2013.
- [21] L. Tóth, T. Tóth: On finding wavelet basis for bearing fault detection, Vol 10., No 3., 2013.
- [22] Borghesani, P., Pennacchi, P., Randall, R.B., Sawalhi, N., Ricci, R., Application of cepstrum pre-whitening for the diagnosis of bearing faults under variable speed conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 36, no. 2, 2013, p. 370-384,

- [23] Figlus, T., Stanczyk, M., A method for detecting damage to rolling bearings in toothed gears of processing lines. *Metalurgija*, vol. 55 no. 1, 2016, p. 75-78.
- [24] Slavič, J., Brković, A., Boltežar, M, Typical bearing-fault rating using force measurements: application to real data. *Journal of Vibration and Control*, vol. 17, no 14, 2011, p. 2164-2174.
- [25] Abboud, D., Antoni, J., Eltabach, M., Sieg-Zieba, S., Angle\time cyclostationarity for the analysis of rolling element bearing vibrations. *Measurement*, vol. 75, 2015, p. 29-39.
- [26] Antoni, J., Cyclic spectral analysis of rolling-element bearing signals: Facts and fictions. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 304, no. 3-5, 2007, p. 497-529,
- [27] A. H. Tewfik, D. Sinha, P. Jorgensen, On the Optimal Choice of a Wavelet for Signal Representation, *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 38, 1992, p. 747-765.
- [28] J. O. Chapa, R. M. Rao. Algorithms for Designing Wavelets to Match a Specified Signal, *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 48, No. 12, 2007, p. 3395-3406, 2000.
- [29] S. Mallat. *A Wavelet Tour of Signal Processing*, Second Edition, Academic Press, 1998.
- [30] N. Saravanan, V.N.S. Kumar Siddabattuni, K.I. Ramachandran. A comparative study on classification of features by SVM and PSVM extracted using Morlet Wavelet for fault diagnosis. *Expert Systems with Applications*, 35, 2008, p. 1351-1366.
- [31] J. Rafiee, M.A. Rafiee, P.W. Tse. Application of mother wavelet functions for automatic gear and bearing fault diagnosis. *Expert Systems with Applications*, 37, 2010, p. 4568-4579.
- [32] P.K. Kankar, Satish C. Sharma, S.P. Harsha: Fault diagnosis of rolling element bearing using cyclic autocorrelation and wavelet transform. *Neurocomputing* 110, 2013, p. 9-17.
- [33] P.K. Kankar, Satish C. Sharma, S.P. Harsha. Fault diagnosis of ball bearings using machine learning methods. *Expert System with Applications*, 38, 2011, p. 1876-1886.
- [34] P.K. Kankar, Satish C. Sharma, S.P. Harsha. Fault diagnosis of ball bearings using continuous wavelet transform. *Applied Soft Computing*, 11, 2011, p. 2300-2312.
- [35] P.K. Kankar, Satish C. Sharma, S.P. Harsha. Rolling element fault diagnosis using wavelet transform. *Neurocomputing*, 74, 2011, p. 1638-1645.
- [36] V. Purushotham, S. Narayanan, A.N. Prasad Suryamarayana. Multi-fault diagnosis of rolling elements using wavelet analysis and

- Hidden Markov Model based fault recognition. *NDT and E International*, 38, 2005, p. 654-664.
- [37] Honghu, P., Xingxi, H., Sai, T., Fanming, M., An Improved Bearing Fault Diagnosis Method using One-Dimensional CNN and LSTM. *Strojnski vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 64, p. 443-452.
- [38] Li, Z., Ma, Z., Liu, Y., Teng, W., Jiang, R. Crack, Fault Detection for a Gearbox Using Discrete Wavelet Transform and an Adaptive Resonance Theory Neural Network. *Strojnski vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 61, 2015, p. 63-73.
- [39] Strączkiewicz, M., Czap, P., Barszcz, T., Supervised and unsupervised learning process in damage classification of rolling element bearings. *Diagnostyka*, vol. 17, no. 2, 2016, p. 71-80.
- [40] Gligorijevic, J., Gajic, D., Brkovic, A., Savic-Gajic, I., Georgieva, O., Di Gennaro, S., Online condition monitoring of bearings to support total productive maintenance in the packaging materials industry. *Sensors*, vol. 16 no. 3, 2016, p. 316.
- [41] Strączkiewicz, M., Czap, P., Barszcz, T., Supervised and unsupervised learning process in damage classification of rolling element bearings. *Diagnostyka*, 2016, 17, p. 71-80.
- [42] Paya, B. A., Esat, I. I., Artificial neural network based fault diagnostics of rotating machinery using wavelet transforms as a preprocessor. *Mechanical Systems and Signal processing*, Vol. 11, No. 5, 1997, p.751-765.
- [43] Wang, P., Vachtsevanos, G., Fault diagnostics using dynamic wavelet neural networks. *Artificial Intelligent for Engineering Design Analysis and Manufacturing*, Vol.15, 2001, p. 349-365.
- [44] Ray, S., Chan, A., Automatic feature extraction from wavelet coefficients using genetic algorithms. *Proceedings of the 2001 IEEE Signal Processing Society Workshop*, 2001, p. 233-24.
- [45] Chen, D., Wang, W. J., Classification of wavelet map patterns using multi-layer neural networks for gear fault detection. *Mechanical System and Signal Processing*, Vol.16, No. 4, 2002, p. 695-704.
- [46] 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, p. 677-694.
- [47] K.C. Gryllias, I.A. Antoniadis, A Support Vector Machine approach based on pyhysical model training for rolling element bearing fault detection in industrial environments. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 25, 2012, p. 326-344.

- [48] Wensheng Su, Fengtao Wang, Hong Zhu, Zhixin Zhang, Zhenggang Guo, Rolling element bearing faults diagnosis on optimal Morlet wavelet filter and autocorrelation enhancement. *Mechanical Systems and Signal Processing* 24., 2010, p. 1458-1472.
- [49] Manpreet Singh, Rajesh Kumar: Thrust bearing groove race defect measurement by wavelet decomposition of pre-processed vibration signal. *Measurement* 46., 2013 p. 3508-3515.
- [50] Bennett, K. P. & Campbell, C., *Support Vector Machines: Hype or Hallelujah?* SIGKDD 2., 2000.
- [51] Luenberger, D. G. & YE, Y., *Linear and non-linear programming*, New York, 2008, Springer
- [52] Nguyen, M. H. & DE LA Torre, F., Optimal feature selection for support vector machines. *Pattern Recognition*, 43, 2010, p. 584-591.
- [53] Burges C., A tutorial on support vector machines for pattern recognition, In *Data Mining and Knowledge Discovery*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998, Volume 2.
- [54] Theodoros Evgeniou and Massimiliano Pontil, *Statistical Learning Theory*, 1998.
- [55] Nello Cristianini and John Shawe-Taylor, *An Introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-based Learning Methods*, Cambridge University Press, 2000.
- [56] J.P. Lewis, *Tutorial on SVM*, CGIT Lab, USC, 2004.
- [57] Vapnik V., *Statistical Learning Theory*, Wiley, New York, 1998.
- [58] R.A. Wiggins, Minimum entropy Deconvolution, *Geoexploration*, Vol. 16, 1978, p. 21-35.
- [59] Addison, P.S., *The Illustrated Wavelet Transform Handbook*, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia
- [60] Georges Oppenheim, *Wavelets and their applications*. Hermes Science/ Lavoisier, 2003.
- [61] Shreve, D.H., *Signal processing for effective vibration analysis*, IRD Mechanical, Inc, Columbus, Ohio
- [62] Micheil-Yves-Georges-Jean, *Wavelets and their applications*, 2007. ISTA Ltd.
- [63] Allan-Thomas: *Harris's Shock and Vibration Handbook*. McGrawHill, 2010.
- [64] Tom M. Mitchell: *Machine learning*. McGraw-Hill Science. 1997.
- [65] I. Kocsis, K. Deák, T. Szabó, R. Kvasz: *Diagnosztika és állapotfelügyelet*. 2015.
- [66] I. Nagy: *Műszaki diagnosztika I. Rezgésdiagnosztika*. Delta-3N Kft., Paks, 2006

- [67] I. Fazekas, Neurális hálózatok. Debreceni Egyetem Informatikai Kar. 2013.
- [68] Gy. Kovács: A jelfeldolgozás matematikai alapjai. Debreceni Egyetem. 2014.
- [69] F. Dömötör: A rezgésdiagnosztika elemei, SKF, Budapest, 1996
- [70] Gy. Lipovszki, Jelfeldolgozás és számítógépes irányítás. Edutus Főiskola 2012.
- [71] S. Graham Kelly: Mechanical Vibrations. Theory and Applications. The University of Akron. 2012
- [72] Alena Bilosova, Jan Bilos: Vibration Diagnostics. Ostrava, 2012.
- [73] Jaroslav Ramík: Soft Computing: Overview and Recent Developments in Fuzzy Optimization. Ostravská univerzita. Listopad 2001
- [74] SPM INSTRUMENT BUDAPEST KFT: Az SPM Módszer, 2000. <http://www.spminstrument.hu/index.php?lid=0&gcf=24&sidx=1>
- [75] http://visl.technion.ac.il/documents/wavelet_ug.pdf.tomma.ewing
Downloaded: 9th March, 2019.
- [76] NI 9234 datasheet: <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-316>.
Downloaded: 18th February, 2019.
- [77] PCB IMI 603C01 transducer:
https://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/IMI/Products/Manuals/603C01.pdf,
Downloaded: 20th April, 2019.
- [78] Schneider frekvenciaváltó:
<http://datasheet.octopart.com/ATV32HU22M2-Schneider-Electric-datasheet-14430726.pdf> Downloaded: 8th April, 2019.
- [79] R Software page: <https://cran.r-project.org/>. Downloaded: 12th April, 2019.
- [80] High Speed spindle for grinding: <https://cnc-machine-tools.com/cnc-router-spindle/>
- [81] F. Schipp, Waveletek, egyetemi jegyzet, ELTE 2003.
- [82] E.Abele, Y. Altintas, C.Brecher: Machine tool spindle units. CIRP Annals Manufacturing Technology, Vol. 59, Issue 2, 2010, p. 781-802.
- [83] Danobat Machine Tools: <https://www.danobatusa.com/bearings-rings-internal-cylindrical-grinding>, Downloaded: 20th September, 2019.

Szabványok/ Standards

- [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 10816-1:1995-(E) Mechanikai rezgések – Géprezgések kiértékelése a nem forgó részeken történő mérésel. – 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.



Registry number: DEENK/46/2020.PL
Subject: PhD Publikációs Lista

Candidate: Krisztián Deák
Neptun ID: MI06NK
Doctoral School: Doctoral School of Informatics
MTMT ID: 10039252

List of publications related to the dissertation

Foreign language scientific articles in Hungarian journals (3)

1. **Deák, K.:** Design of Discrete Wavelet by Using Transient Model for Exact Measurement of Manufacturing Faults of Tapered Roller Bearings.
Period. Polytech. Mech. Eng. 63 (2), 113-122, 2019. ISSN: 0324-6051.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3311/PPme.13034>
2. **Deák, K.,** Menyhárt, J., Czégé, L.: Defect analysis of bearings with vibration monitoring and optical methods.
Int. J. Eng. Manag. Sci. 3 (1), 1-12, 2018. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2018.1.1>.
3. **Deák, K.,** Kocsis, I.: Support Vector Machine with Wavelet Decomposition Method for Fault Diagnosis of Tapered Roller Bearings by Modelling Manufacturing Defects.
Period. Polytech. Mech. Eng. 61 (4), 276-281, 2017. ISSN: 0324-6051.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3311/PPme.10802>

Foreign language scientific articles in international journals (3)

4. **Deák, K.,** Kocsis, I.: Complex Morlet wavelet design with global parameter optimization for diagnosis of industrial manufacturing faults of tapered roller bearing in noisy condition.
Diagnostyka. 20 (2), 77-86, 2019. ISSN: 1641-6414.
DOI: <http://dx.doi.org/10.29354/diag/109223>
5. **Deák, K.,** Mankovits, T., Kocsis, I.: Optimal Wavelet Selection for the Size Estimation of Manufacturing Defects of Tapered Roller Bearings with Vibration Measurement using Shannon Entropy Criteria.
Strojnicki Vestn.-J. Mech. Eng. 63 (1), 3-14, 2017. ISSN: 0039-2480.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5545/sv-jme.2016.3989>
IF: 1.182





6. **Deák, K.,** Kocsis, I., Vámosi, A., Keviczki, Z.: Failure diagnostics with SVM in machine maintenance engineering.
Anal. Univ. Oradea. Fasc. Ing. Manag. Technol. 23 (1), 19-24, 2014. ISSN: 1583-0691.
DOI: <https://doi.org/10.15660/auofmte.2014-1.2969>

Hungarian conference proceedings (3)

7. **Deák, K.,** Kocsis, I.: Diagnosztikai és karbantartási vizsgálat csapágyhiba esetében wavelet transzformáció alkalmazásával.
In: Műszaki tudomány az Észak-Kelet Magyarországi régióban 2016 : konferencia előadásai. Szerk.: Bodzás Sándor, Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, Debrecen, 720-727, 2016. ISBN: 9789637064333
8. **Deák, K.,** Kocsis, I., Vámosi, A.: Gépek és gépelemek diagnosztikája, élettartam becslése gépi tanulás segítségével.
In: Informatika a felsőoktatásban 2014 konferencia : konferencia kiadvány. Szerk.: Kunkli Roland, Papp Ildikó, Rutkovszky Edéné, Debreceni Egyetem Informatikai Kar, Debrecen, 470-476, 2014. ISBN: 9789634737124
9. **Deák, K.,** Kocsis, I.: Gépek károsodása által előidézett kifáradásos csapágyhibák által generált transziens impulzusok jelfeldolgozása ablakozott fourier és wavelet transzformációk segítségével = Bearing fault detection and signal processing with stft and wavelet transform in maintenance engineering.
In: Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban 2014 : konferencia előadásai. Szerk.: Pokorádi László, Debreceni Akadémiai Bizottság, Debrecen, 67-72, 2014, (Műszaki füzetek ; 14) ISBN: 9789635087525

Foreign language conference proceedings (10)

10. **Deák, K.,** Kocsis, I.: Condition Monitoring by Applying Advanced Diagnostic Method.
In: Proceedings of the 5th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2017). Eds.: Sándor Bodzás, Tamás Mankovits, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 102-108, 2017. ISBN: 9789634733041
11. **Deák, K.,** Kocsis, I.: Applied vibration measurement methods and data extraction for bearing fault diagnosis.
In: Proceedings of the 4th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2016). Ed.: Sándor Bodzás, Tamás Mankovits, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 122-126, 2016. ISBN: 9789634739449
12. **Deák, K.,** Kocsis, I.: Selection of wavelet function for detection of bearing defects by Shannon Entropy.
In: Proceedings of the 4th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2016). Ed.: Sándor Bodzás, Tamás Mankovits, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 127-134, 2016. ISBN: 9789634739449



13. **Deák, K.**, Kocsis, I.: Manufacturing of tapered roller bearings, defects and fault detection.
In: Proceedings of the 3rd International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2015). Ed.: Sándor Bodzás, Tamás Mankovits, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 44-53, 2015. ISBN: 9789634739173
14. **Deák, K.**, Kocsis, I., Vámosi, A.: Application of machine vision in manufacturing of bearings using ANN and SVM.
In: Proceedings of the 9th International Conference on Applied Informatics January 29 - February 1, 2014. Eger, Hungary Volume I. Eds.: Kovács Emőd, Kusper Gábor, Kunkli Roland, Tórnácsi Tibor, Eszterházy Károly Főiskola, Eger, 295-304, 2014. ISBN: 9786155297182
15. **Deák, K.**, Vámosi, A., Kocsis, I.: Csapágy meghibásodások mérés technikája és rezgésdiagnosztikája mesterséges neurális háló segítségével = Measurement techniques and diagnostics of bearings based on artificial neural networks.
In: Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban 2014 : konferencia előadásai. Szerk.: Pokorádi László, Debreceni Akadémiai Bizottság, Debrecen, 58-66, 2014, (Műszaki füzetek ; 14) ISBN: 9789635087525
16. **Deák, K.**, Kocsis, I., Vámosi, A., Keviczki, Z.: Failure diagnostics with SVM in machine maintenance engineering.
In: IMT Oradea - 2014 : Proceedings of the annual session of scientific papers. Ed.: Colin Baban, Florin Sandu Blaga, Gavril Grebenisan, Alexandru-Viorel Pele, Mircea Teodor Pop, Alexandru Rus, Radu Catalin Tarca, University of Oradea Publishing House, Oradea, 23-28, 2014. ISBN: 9786061012763
17. Keviczki, Z., **Deák, K.**, Kocsis, I.: Machine Condition Monitoring in Bearing Manufacture Using Vibration Analysis and Intelligent Approaches.
In: Proceedings of the 2nd International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2014). Ed.: Sándor Bodzás, Tamás Mankovits, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 55-69, 2014. ISBN: 9789634737513
18. **Deák, K.**, Kocsis, I., Keviczki, Z.: Machine fault diagnosis, prognosis and condition monitoring based on machine learning.
In: IMT Oradea - 2014 : Proceedings of the annual session of scientific papers. Ed.: Colin Baban, Florin Sandu Blaga, Gavril Grebenisan, Alexandru-Viorel Pele, Mircea Teodor Pop, Alexandru Rus, Radu Catalin Tarca, University of Oradea Publishing House, Oradea, 29-34, 2014. ISBN: 9786061012763
19. **Deák, K.**, Kocsis, I.: Rotary machine and roller bearing fault measurement with FPGA embedded system.
In: Tavasz Szél 2014 : konferenciakötet. Szerk.: Csizsár Imre, Kőmives Péter Miklós, Doktoranduszok Országos Szövetsége, Debrecen, 297-307, 2014. ISBN: 9786158004466





Foreign language abstracts (3)

20. **Deák, K.**, Kocsis, I.: Applied diagnostic methods in engine and bearing health monitoring.
In: 7th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2019) 7-9 November, 2019 Debrecen, Hungary : Conference Proceedings : Book of Extended Abstracts. Ed.: Tamás Mankovits, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Debrecen, Debrecen, 29-30, 2019. ISBN: 9789634901686
21. **Deák, K.**, Kocsis, I.: Wavelet design for diagnosis of tapered roller bearing manufacturing defects.
In: 6th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2018) : Conference proceedings : Book of extended abstracts. Ed.: Tamás Mankovits, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Debrecen, Debrecen, 39-40, 2018. ISBN: 9789634900511
22. Kocsis, I., Mankovits, T., Vámosi, A., **Deák, K.**: SVM Variants Used in the Investigation of some Engineering Optimization Problems.
In: Book of Abstracts of the 4th International Conference on Engineering Optimization. Ed.: H. C. Rodrigues, J. Herskovist, C.M. Mota Soares, J. M. Guedes, A. L. Araújo, J. O. Folgado, F. Moleiro, J. F. A. Maderia, IST Press, Lisbon, 213-214, 2014. ISBN: 9789899627666

List of other publications

Hungarian books (4)

23. Fazekas, L., **Deák, K.**, Menyhárt, J.: Gépészeti rendszerek károsodása, javítástechnológiája és karbantartása. Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Debrecen, 177 p., 2018. ISBN: 9789634900382
24. Kocsis, I., **Deák, K.**, Szabó, T., Kvasz, R.: Diagnosztika és állapotfelülvétel. Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Debrecen, 204 p., 2015. ISBN: 9789634739036
25. Szíki, G. Á., Mankovits, T., Hajdu, S., **Deák, K.**, Huri, D.: Műszaki mechanika példatár. Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Debrecen, 239 p., 2015. ISBN: 9789634739098
26. Budai, I., **Deák, K.**, Jenei, A., Kovács-Csuvarszki, R., Strigel, J.: Tevékenységmenedzsment: folyamatelemzés, folyamatoptimalizálás (gyakorlat). Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Debrecen, 113 p., 2015. ISBN: 9789634739142





Hungarian scientific articles in Hungarian journals (1)

27. Kocsis, I., Kiss, J. T., **Deák, K.**: A karbantartási stratégia hatása a megújuló energia rendszerek életciklus költségére = Maintenance strategies and life cycle costs of renewable energy systems.
Int. J. Eng. Manag. Sci. 3 (1), 106-116, 2018. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2018.1.12>.

Hungarian conference proceedings (5)

28. **Deák, K.**, Kocsis, I.: Szerszámgépsorok rezgésdiagnosztikán alapuló hibadiagnosztikája gépi tanulás alkalmazásával.
In: Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2015 : konferencia előadásai. Szerk.: Bodzás Sándor, Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, Debrecen, 517-523, 2015. ISBN: 9789637064326
29. Vámosi, A., **Deák, K.**: A FEMAP végeelemes módszer bemutatása és programozási lehetőségei = The FEMAP finite element software and its programming options.
In: Proceedings of the Conference on Problem-based Learning in Engineering Education. Ed.: Imre Kocsis, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 80-85, 2014. ISBN: 9789634737612
30. Kocsis, I., Tóth, L., Vámosi, A., **Deák, K.**: A matematikai szoftverek szerepe a mérnöki problémamegoldás átalakulásában.
In: Informatika a felsőoktatásban 2014 konferencia : konferencia kiadvány. Szerk.: Kunkli Roland, Papp Ildikó, Rutkovszky Edéné, Debreceni Egyetem Informatikai Kar, Debrecen, 600-611, 2014. ISBN: 9789634737124
31. Vámosi, A., Kocsis, I., **Deák, K.**: Az SVM módozatainak alkalmazási lehetősége műszaki optimalizációs problémák megoldásában.
In: Informatika a felsőoktatásban 2014 konferencia : konferencia kiadvány. Szerk.: Kunkli Roland, Papp Ildikó, Rutkovszky Edéné, Debreceni Egyetem Informatikai Kar, Debrecen, 148-159, 2014. ISBN: 9789634737124
32. **Deák, K.**: Belsőégésű motoros láncfűrész rezgésanalízise egyéni védőeszközök vizsgálata = Vibration analysis of chainsaw with internal combustion engine, tests of protective tools.
In: Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban 2013 : konferencia előadásai. Szerk.: Pokorádi László, Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, Debrecen, 494-503, 2013. ISBN: 9789637064302

Foreign language conference proceedings (6)

33. Kocsis, I., Krakkó, B., Vámosi, A., **Deák, K.**: Multiple regression analysis in time management.
In: Proceedings of the 3rd International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2015). Ed.: Sándor Bodzás, Tamás Mankovits, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 85-89, 2015. ISBN: 9789634739173





34. **Deák, K.**, Kocsis, I.: Machine fault diagnosis by time domain and frequency domain features using fuzzy decision system.
In: Tavasz Szél 2014 : konferenciakötet. Szerk.: Csizsár Imre, Kőmíves Péter Miklós, Doktoranduszok Országos Szövetsége, Debrecen, 281-296, 2014. ISBN: 9786158004466
35. **Deák, K.**, Kocsis, I., Vámosi, A., Keviczki, Z.: Tool Condition Monitoring Using Machine Learning.
In: Proceedings of the 2nd International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2014). Ed.: Sándor Bodzás, Tamás Mankovits, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 15-33, 2014. ISBN: 9789634737513
36. **Deák, K.**, Kocsis, I.: Chatter vibration and image processing with artificial neural networks and support vector machines.
In: Proceedings of the 1st International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2013). Szerk.: Mankovits Tamás, Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszék, Debrecen, 20-27, 2013. ISBN: 9789634736233
37. **Deák, K.**, Kocsis, I.: Signal processing of machines and attenuation test of anti-vibration gloves.
In: Proceedings of the 1st International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2013). Szerk.: Mankovits Tamás, Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszék, Debrecen, 28-36, 2013. ISBN: 9789634736233
38. Kocsis, I., **Deák, K.**: Villamos motor és kétfokozatú hajtómű rezgésvizsgálata = Vibration analysis of a 2-stage helical geared motor.
In: Proceedings of the 1st International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2013). Szerk.: Mankovits Tamás, Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszék, Debrecen, 222-225, 2013. ISBN: 9789634736233

Foreign language abstracts (1)

39. Czégé, L., Menyhárt, J., **Deák, K.**: Design issues of steam turbines.
In: 6th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2018) : Conference proceedings : Book of extended abstracts. Ed.: Tamás Mankovits, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Debrecen, Debrecen, 33-34, 2018. ISBN: 9789634900511

Total IF of journals (all publications): 1,182

Total IF of journals (publications related to the dissertation): 1,182

The Candidate's publication data submitted to the iDEa Tudóstér have been validated by DEENK on the basis of the Journal Citation Report (Impact Factor) database.

24 February, 2020

