



MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

Golyóscsapágyak vizsgálata statisztikai jellemzőkkel

Székely Bence
IV. éves gépészmérnök hallgató

Konzulens:
Tóth Dániel
PhD hallgató
Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet
Szerszámgépek Intézeti Tanszéke

Miskolc, 2014

TARTALOMJEGYZÉK

1.	Bevezetés	3
2.	Csapágyrezgések vizsgálati módszerei.....	4
3.	Időtartománybeli jellemzők	5
4.	A vizsgálat eszközszerrendszere	8
5.	A vizsgált csapágy	12
6.	A vizsgálatok értékelése	14
7.	Összegzés.....	19
8.	Irodalomjegyzék	20

1. Bevezetés

Az ipari alkalmazásban az egyik legkritikusabb gépelemek a gördülőcsapágyak. A csapágyak meghibásodásai, amennyiben rejtve maradnak, károsodásokat okozhatnak a gépekben, vagy a teljes tönkremenetelüket is okozhatják rosszabb esetben. Ennél fogva elengedhetetlen a hibák felismerése még azelőtt, hogy azok komoly károkat okoznának. Ezek feltárására és megállapítására többféle módszert alkalmaznak. Jelen dolgozatban egy egysoros, mélyhornyú golyóscsapágyat tanulmányozok időtartománybeli módszerekkel.

2. Csapágyrezgések vizsgálati módszerei

A mozgást végző gépelemekből álló berendezések állapota többféle módon vizsgálható. Nyomon követhetjük többek között az elmozdulás-, sebesség-, gyorsulás-, idő vagy frekvencia függvényében a változásokat. Alacsony fordulatszámok esetében az elmozdulás mérése, közepes fordulatszámok esetében a rezgés sebességének vizsgálata, míg nagyobb fordulatszámok esetében gyorsulásmérő szenzor alkalmazása célszerű. A szenzor átviteli tényezője ebből következik, hogy $\text{mV}/\mu\text{m}$, $\text{mV}/(\text{mm/s})$ és mV/g . Csapágyak állapotfelmérésére a sebesség-, vagy a gyorsulásmérő módszerek alkalmazása megszokott. Ha nem írja elő külön szabvány, akkor olyan rezgésérzékelőt válasszunk, amely kimeneti jele a vizsgált frekvencia és dinamika tartományban a legnagyobb, és az átviteli karakterisztikája lehetőség szerint legkevésbé függjön a frekvenciától [1].

A csapágy rezgésvizsgálatokhoz a frekvencia-, az idő és az idő-frekvencia tartománybeli vizsgálatokon alapuló módszereket használják széles körben. A vizsgálati módszerek közül gyors adatfeldolgozást és számítást tesznek lehetővé az időtartománybeli módszerek.

3. Időtartománybeli jellemzők

Az időtartománybeli módszer az idő alapú rezgési jelből, egy egyértékű statisztikai paraméter származtatásából áll. A statisztikai paraméterek – többek közt RMS (négyzetes középérték), aptp (peak-to-peak) érték, kurtosis vagy laposság, skewness vagy ferdeség, Crest-tényező, deviáció vagy eltérés – betekintést biztosíthatnak gépek hibadetektálásába. Tanulmányok már rámutattak, hogy a valószínűség sűrűségfüggvények összefüggésbe hozhatók a csapágymeghibásodásokkal. A gyorsulás sűrűségfüggvénye egy újszerű állapotú csapágynak Gauss-eloszlást mutat, még egy sérült csapágynál sem Gauss-eloszlás lesz tapasztalható, domináns végekkel. Ahelyett, hogy ezeket vizsgálnánk, gyakran több információt tudhatunk meg az adatok statisztikai momentumainak vizsgálatával. Egy folyamatos, egyváltozós eloszlás valószínűség sűrűségfüggvénye [2].

$$F[x \leq x(t) < x + dx] = f(x) \quad (3.1)$$

alakban írható fel, akkor az $x(t)$ függvény átlaga

$$E[x] = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx \quad (3.2)$$

alapján számítható. Ez alapján megadható az átlag ($\bar{x}$) körüli r -ed rendű momentuma a következő integrál segítségével [3].

$$E[\{x - E(x)\}^r] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^r f(x) dx \quad (3.3)$$

Tehát $\bar{x}$ az x sztochasztikus változó elsőrendű momentuma. Ha a sztochasztikus változó diszkrét adathalmaz formájában ismert, akkor az r -ed rendű momentumát, az alábbi módon írhatjuk fel, ahol N az adathalmaz számossága [3].

$$M_r = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})^r \quad (3.4)$$

A továbbiakban bemutatom a gyakoribb sztochasztikus jellemzők kiszámítására alkalmas összefüggések folytonos és diszkrét alakját is.

A négyzetes középérték más néven effektív érték meghatározására periodikus függvény esetén az alábbi egyenlet használható fel [2].

$$\overline{f_{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [f(t)]^2 dt} \quad (3.5)$$

Az effektív érték megoldja a negatív függvényérték problémáját is. Bár a négyzetre emelés hatására a függvény alakja torzulást fog elszenvedni, ez az átlag arányos a rezgések energiájával, ezért a gyakorlatban is ez az átlagtípus az, ami elterjedt. A fentebb említett folytonos és diszkrét alakok [3]:

$$RMS = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx} \quad (3.6)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k^2} \quad (3.7)$$

A sztenderd szórás

$$\sigma = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^2 f(x) dx}; \quad (3.8)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})^2} \quad (3.9)$$

a ferdeség az

$$Sk = \frac{M_3}{\sigma_3} \quad (3.10)$$

a kurtosis vagy a laposság a

$$K = \frac{M_4}{\sigma_4} \quad (3.11)$$

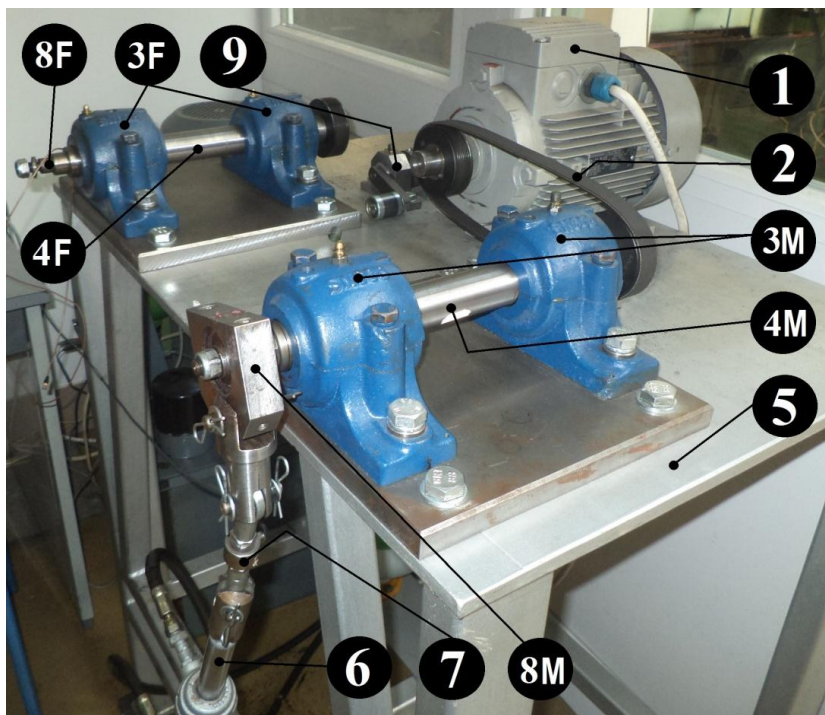
a Crest-tényező pedig

$$C = \frac{\max(AMPL.)}{RMS} \quad (3.12)$$

kifejezéssel definiálható [3].

4. A vizsgálat eszközszerkezete

A Miskolci Egyetem Szerszámgépek Intézeti Tanszékén található egy csapágyvizsgáló szerkezet, mely lehetővé tette jelen Tudományos Diákköri munka elkészítését. Az 1. ábrán látható berendezés, alkalmas gördülőcsapágyak fárasztására és mérésére is.



1. ÁBRA. CSAPÁGYVIZSGÁLÓ SZERKEZET

A berendezés főbb részei:

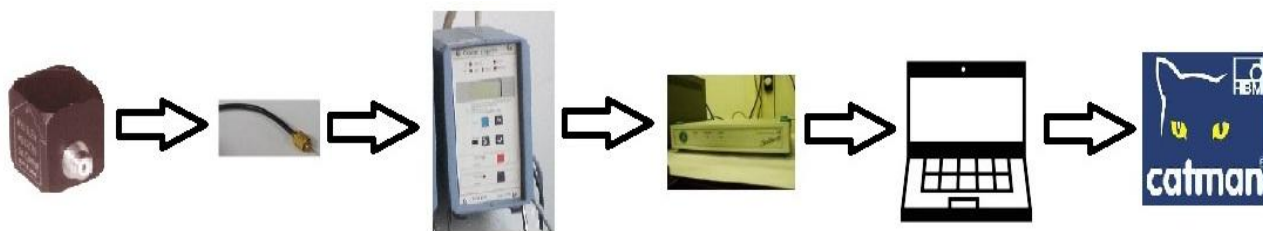
- 1: SIEMENS ILA 7106-2AA10 típusú háromfázisú motor
- 2: Hosszbordázott szíjhajtás
- 3F: Fárasztó készülék csapágyazása
- 3M: Mérőkészülék csapágyazása
- 4F: Fárasztó berendezés tengelye
- 4M: Mérő berendezés tengelye
- 5: Merveített asztal
- 6: ORSTA kettősműködésű hidraulikus munkahenger
- 7: Erőmérő szenzor
- 8F: Fárasztandó csapágy helye
- 8M: Mérendő csapágy
- 9: Szíjfeszítő készülék.

A vizsgálóberendezés fárasztótengelye kétsoros önbeálló golyóscsapágyakkal, míg a mérőtengely különleges siklócsapágyakkal szerelt. A gördülőcsapágy fárasztásakor a berendezés fárasztó tengelye működik adott fordulatszámon és adott terhelőerő mellett. A terhelés erőmérő szenzor segítségével állítható be. Adott ideig történő fárasztás után, a csapágyat átszereljük a mérőtengelyre, ahol valamilyen terhelőerő mellett, adott fordulatszámon elvégezhetjük a rezgésmérést. A mérés végzése közben a fárasztótengelyt nem hajtjuk meg, mert annak rezgései károsan hatnának a mérési eredményekre.

A rezgésmérés műszerláncát mindig a mérési cél határozza meg. Más-más műszerezésre van szükség egy üzemi vagy laboratóriumi, illetve folyamatos vagy eseti méréseknél. A műszerek megválasztásánál több szempont is megjelenik, ilyenek például a mérési pontossági követelmények, vagy a gazdaságossági szempontok. Kijelenthető azonban, hogy minden mérőláncban kell lennie egy rezgésmérő szenzornak, egy előerősítőnek és egy kijelző, kiértékelő berendezésnek [3].

Ahogy már a 2. fejezetben is szó esett róla, a rezgésméréshez alkalmazhatunk út-, sebesség-, vagy gyorsulásérzékelőt is. A gyorsulásérzékelők többféle elven működhetnek. Lehetnek mechanikusak, kapacitívak, mágnesesek, induktívak. A gyakorlatban leginkább a piezoelektromos hatás elvén működő szenzorok a legmegfelelőbbek. Az ilyen gyorsulás érzékelők egyik fontos jellemzője az érzékenység, mely megadja, hogy 1 m/s^2 gyorsulás hatására, mekkora lesz a szeizmikus tömeg és a kvarckristály mechanikai kölcsönhatásából adódóan előálló feszültség $[\text{mV}]$ vagy töltés $[\text{pC}]$ értéke. Az érzékenység a szeizmikus tömeggel arányos. Általános szabály, hogy a gyorsulásérzékelő tömege maximum az egy tized része lehet, a vizsgált alkatrészt tömegének.

A vizsgálatoknál alkalmazott mérőláncot szemlélteti a 2. ábra.



2. ÁBRA. MÉRÉSI MŰSZERLÁNC

A rezgésmérés során alkalmazott mérőlánc az alábbi műszerekből áll:

1. Gyorsulásmérő: KISTLER 8632C50
2. Csatlakozókábel töltéserősítő felé: teflonszigetelésű
3. Töltéserősítő: KISTLER 5011 típusú
4. Mérőerősítő: HBM SPIDER8
5. Csatlakozó kábel PC felé: USB kábel LPT porton keresztül
6. Megjelenítő, kiértékelő egység: PC
7. Kiértékelő szoftver: HBM Catman 4.0

Az alkalmazott KISTLER 8632C50 típusú gyorsulásmérő egy nagy érzékenységgű és nagy hőállósággal bíró gyorsulásmérő. Kemény, eloxált házat kapott, mely ellenállóvá teszi a kedvezőtlen körülményekkel szemben. Kocka alakjának és a ragasztásos rögzítési módnak köszönhetően könnyen felszerelhető illetve eltávolítható. A gyorsulási erők függőlegesen hatnak a szenzor PiezoBEAM felfogási bázisára és egy biomorf hajlékony elem alakváltozásával arányos töltésjelekké konvertálják a gyorsulási erőket. Ezeket a töltésjeleket a szenzorba integrált, miniatürizált hibrid töltéserősítővel, magas szintű, alacsony impedanciájú, feszültséggé konvertálja. Ez a szenzort ellenállóvá teszi a zajokkal szemben, illetve független lesz a kábel minőségétől, lehetővé téve a sztenderd, olcsó kábelek használatát [4].

A gyorsulásmérő főbb jellemzői [4]:

- mérési tartomány: $\pm 50g$
- érzékenység: $100mV/g$
- maximális keresztirány érzékenység: 1%
- nyúlásérzékenység az alapnál: $<0,001 g/\mu\epsilon$
- hőérzékenység: $+0,08 \text{ }^\circ C$
- üzemi hőmérséklet tartomány: $0 - 65 \text{ }^\circ C$.

Jelátalakítás során célszerű olyan megoldást választanunk, mely független a kábelkapacitástól, másrészt képes megoldani a nagy időálló igényt. Ezt a két kritériumot egyidejűleg oldhatjuk meg egy töltéserősítő alkalmazásával. Erre a célra egy KISTLER 5011 típusú töltéserősítőt alkalmazunk. A berendezés a nagy impedanciájú jeleket, amiket a piezoelektromos anyag generál, átalakítja egy tipikusan 100Ω -nál kisebb jellé, lehetővé téve a hagyományos kétszálas, illetve koaxiális kábel használatát. A kalibrációs tényező (mV/g) [5].

A mérőerősítőre azért van szükség, mert az előerősítőt közvetlenül nem lehetséges a mérőszoftverrel ellátott PC-hez csatlakoztatni, illetve a mérőszoftver csak a mérőerősítővel tud kommunikálni. Mérőerősítőként egy általános mérési célokra ideális HBM SPIDER 8 típusú eszközt használunk. Ez a berendezés gyorsulásmérés mellett egyéb mechanikai, illetve termikus jellemzők regisztrálására is alkalmas. A készülék soros RS232-es vagy LPT porton keresztül csatlakozik a számítógéphez, ehhez, a jelátalakítóhoz és az előerősítőhöz való illesztését szoftveresen kell megtenni.

Erre a célra a HBM által forgalmazott Catman 4.0 programot alkalmazzuk. Működéséhez szükséges a SPIDER 8 mérőerősítő illesztő-programjának telepítése. Ennek a programnak a segítségével végezzük el az adatgyűjtést, a megjelenítést és a mért adatok tárolását.

5. A vizsgált csapágó

Az általunk végzett vizsgálatok során az előző fejezetben bemutatott csapágó fárasztó illetve rezgésmérő berendezést használtam. A kísérlet során egy FAG 6303 típusú egysoros, mélyhornyú, golyóscsapágóat vizsgáltunk.

A vizsgált FAG 6303 csapágó jellemzőit, illetve a fárasztási paramétereket ismerve, meghatározható a csapágó várható névleges élettartama. A csapágó névleges élettartama millió körülfordulásban az, amit nagyszámú azonos csapágó legalább 90%-a elér vagy meghalad. A csapágóat dinamikus igénybevételnek tesszük ki, hogy az erre vonatkozó szabványos számítási eljárást (DIN ISO 281) kell alkalmazni a várható élettartam számolásakor. Ez az anyagkifáradást (pitting képződést) tekinti a csapágó tönkremeneteli okának. A számítás képlete:

$$L_{10} = L = \left(\frac{C}{P}\right)^p [10^6 \text{ fordulát}] \quad (5.1)$$

Ahol:

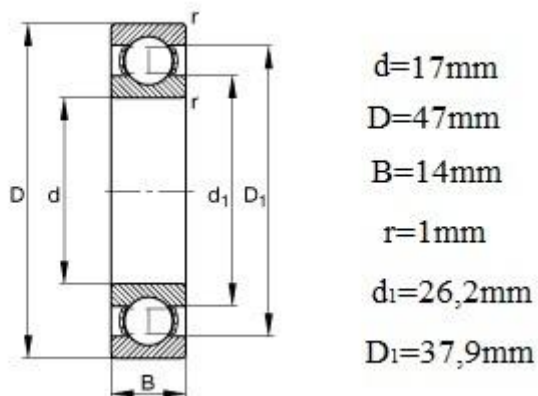
- L a névleges élettartam
- C a dinamikus teherbírás
- P a dinamikus egyenértékű terhelés
- p az élettartam kitevő

Ha a csapágó fordulatszáma állandó, akkor az élettartama kifejezhető órákban:

$$L_{10h} = L_h = \frac{L \cdot 10^6}{n \cdot 60} [h] \quad (5.2)$$

Ahol:

- L_{10h} névleges élettartam órákban
- n a fordulatszám



3. ÁBRA. FAG 6303 CSAPÁGY MŰSZAKI ADATAI

A csapágyélettartam számításához szükséges adatot megtaláljuk az FAG csapágy főkatalógusban [6], továbbá a kísérletek egyéb paraméterei:

- $C = 13,4 \text{ kN}$
- $p = 3$
- $P = 6 \text{ kN}$
- $n = 1500 \text{ 1/min}$

Ezek ismeretében a számítások, az (5.2) egyenletbe behelyettesítve:

$$L_{10} = L = \left(\frac{C}{P}\right)^p = \left(\frac{13,4 \text{ kN}}{6 \text{ kN}}\right)^3 = 11,13937 [10^6 \text{ fordulát}] \quad (5.3)$$

$$L_{10h} = L_h = \frac{L \cdot 10^6}{n \cdot 60} = \frac{11,13937 \cdot 10^6}{1500 \text{ min}^{-1} \cdot 60} = 123,77 [h] \quad (5.4)$$

A csapágy várható élettartama – a vizsgálatok során alkalmazott paraméterekkel - 123 óra.

6. A vizsgálatok értékelése

A csapágyvizsgálatok korai szakaszában megvizsgáltuk a fárasztásra használt tengely rezgésmérésre alkalmasságát. Egy azonos fárasztási idő elteltével, azonos terhelések mellett, rezgésmérést végeztünk a fárasztótengelyen és a mérőtengelyen. A 4. ábrán látható, hogy a fárasztótengely csapágyazásának rezgései eltorzítják a mérési eredményeket, így a továbbiakban kizárólag a mérőtengelyt használtuk rezgésmérésre.

Mérésnél alkalmazott tengely	Statistikai jellemzők				
	aptpm	rmsm	curtm	skewm	crestm
Mérő	0,872297936	0,099426967	5,179752505	1,201153461	4,343956858
Fárasztó	8,076659362	1,20981227	3,502254178	0,803288565	3,273642572

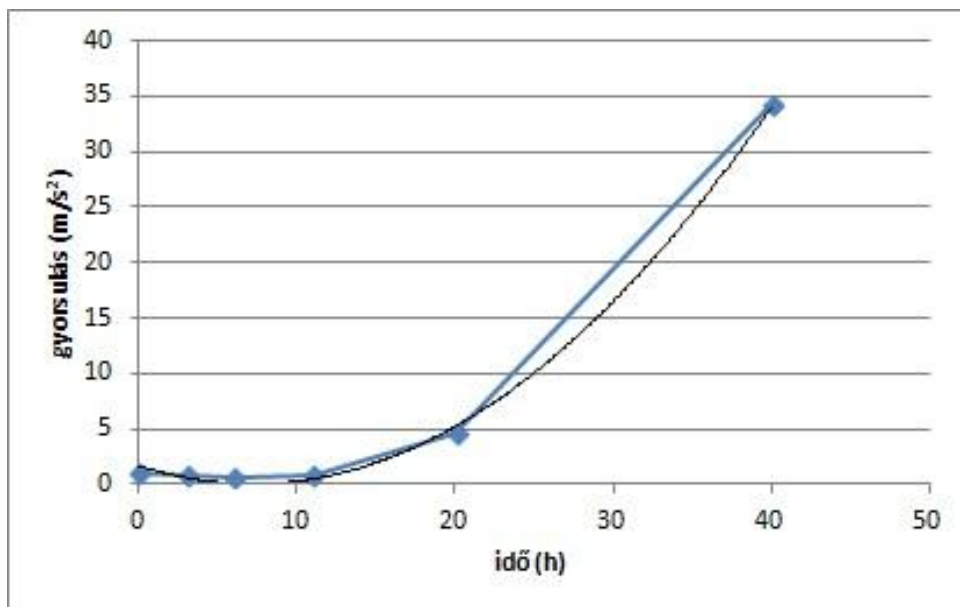
4. ÁBRA. MÉRŐ- ÉS FÁRASZTÓTENGELY EREDMÉNYEINEK ÖSSZEVETÉSE

A vizsgálatoknál az adott idejű csapágyfárasztásokat követően rezgésmintát vettünk a vizsgált golyóscsapágyról, és a mintavételezett értékek alapján statisztikai jellemzőket számítottunk a Maple matematikai szoftver segítségével.

Az A_{PTP} index időbeli lefolyása alatt több különböző és jól megfigyelhető szakaszt különböztethetünk meg egymástól. A csapágy korai üzemi szakasza során megfigyelhetünk egy bejáródási szakaszt, mikor jelentős ingadozást mutat a jel. A későbbiekben, de még bőven a csapágy élettartamának az elején, egy enyhe emelkedés jellemzi az értéket egészen addig, amíg ez az emelkedés hirtelen élesebbé válik. Ez az emelkedés folytatódik egy rövid ideig, majd ahogyan a csapágy egyre jobban közelít élettartama végéhez, töréspontok jelennek meg az átlagos jelszintben. Ekkor az átlagos jelszint váltakozóan emelkedik és csökken. Ezt a jelenséget több kutató is megfigyelte [7], [8]. Ezt a gyógyulás jelenségeként írták le. Ez azt jelenti, hogy a törések vagy más felületi defektusok élei, ahogy a gördülő testek vagy a futópályák folyamatos áthaladásai miatt ezek tompulnak. Az ezt követő szakaszon megfigyelhető a jelszint középértékének minimális csökkenése, melynek legvalószínűbb oka a sérülések hirtelen alakváltozása. Az A_{PTP} index csak a hiba megállapítására használható, a defektusok méretét és hollétét, nem tudjuk felderíteni ennek segítségével.

Az 5. ábrán a peak-to-peak értéket ábrázoltuk a polinomiális görbéjével együtt. Az ábrán megfigyelhető, hogy jelszint az első 10 órás intervallumban nagyjából állandó értékeket

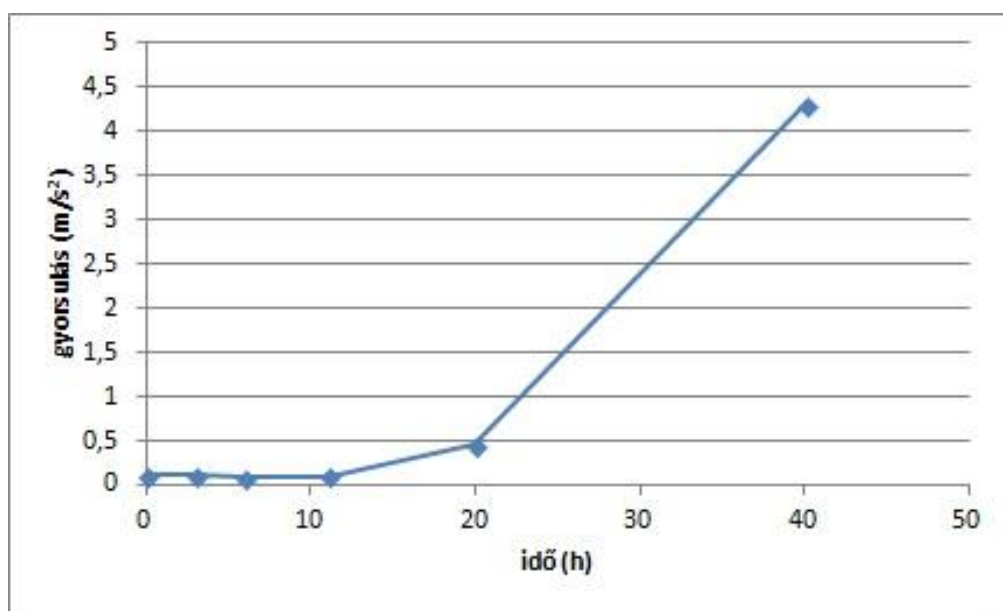
mutat, majd a 20. órát követően ugrásszerű növekedésbe kezd. Ez a csapágó teljes tönkremenetelét jelzi előre. Amennyiben a csapágó valóban tönkrement, az első 10 órás intervallum fluktuáló jelszintjére a gyógyulás jelensége is magyarázatot adhat.



5. ÁBRA. PEAK-TO-PEAK ÉRTÉK VÁLTOZÁSA

Az RMS szint mindhárom sérülési zónában létrejövő defektusok mellett növekvő jelleget mutat. A gyorsulásmérő jele növekszik egészen addig, amíg el nem éri a maximumát, majd lecsökken, és újra megemelkedik. Ezt a fluktuáló jelleget a sérülés természetével lehet magyarázni. A kezdeti növekedést a defektus megjelenése és a kezdeti növekedése okozza. Az ezt követő esést a jel nagyságában a gyógyulás jelenségének tulajdoníthatjuk. Ez a jelleg a törések éles széleinek vagy kis sérült zónák eltompulásából adódik, amit a folyamatos gördülő kontakt okoz. Esetenként itt egy-egy rövidebb intervallum idejéig meg is állhat a defektus növekedése. Később, ahogy a defektus szétterjed, az RMS értéke ismét növekedni fog. Lefutása egyébként nagyon hasonló az A_{PTP} görbéjéhez, bár itt az éles töréspontok nem mutatkoznak olyan hangsúlyosan. Az RMS görbét, az A_{PTP} jel egy alul áteresztő szűrőn keresztülbocsájtott változataként is értelmezhetjük.

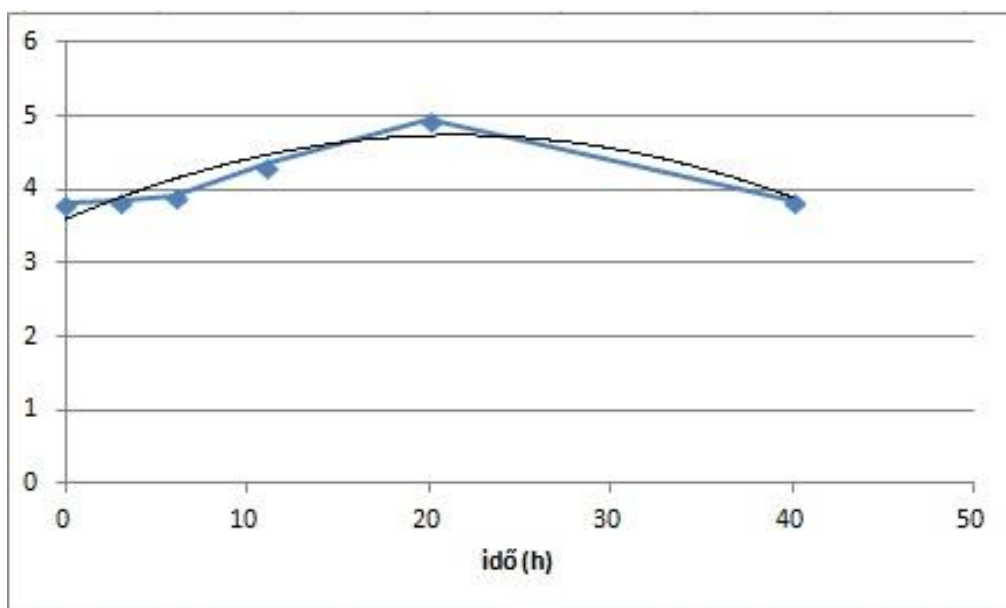
A 6. ábrán látható az RMS index változása, mely jelszintjének változása nagy egyezést mutat az A_{PTP} görbéjével. Ennek a görbének a jellege is megerősíti azt a feltételezést miszerint a csapágó élettartama végéhez közeledik.



6. ÁBRA. NÉGYZETES KÖZÉPÉRTÉK VÁLTOZÁSA

A Crest-tényező értéket kifejezetten a csapágókban megjelenő hibák kimutatására szokták használni. Bizonyos források szerint -[8]-, amennyiben a Crest-tényező meghaladja az 5 értékét, nagy valószínűséggel valamilyen defektus megjelent a csapágóban. Egy tanulmányban -[7]- megfigyelték, hogy a csapágó élettartamának körülbelül harmadánál lépi át a Crest-tényezője az 5-t és utána hosszabb ideig stabilan ennek a közelében ingadozik.

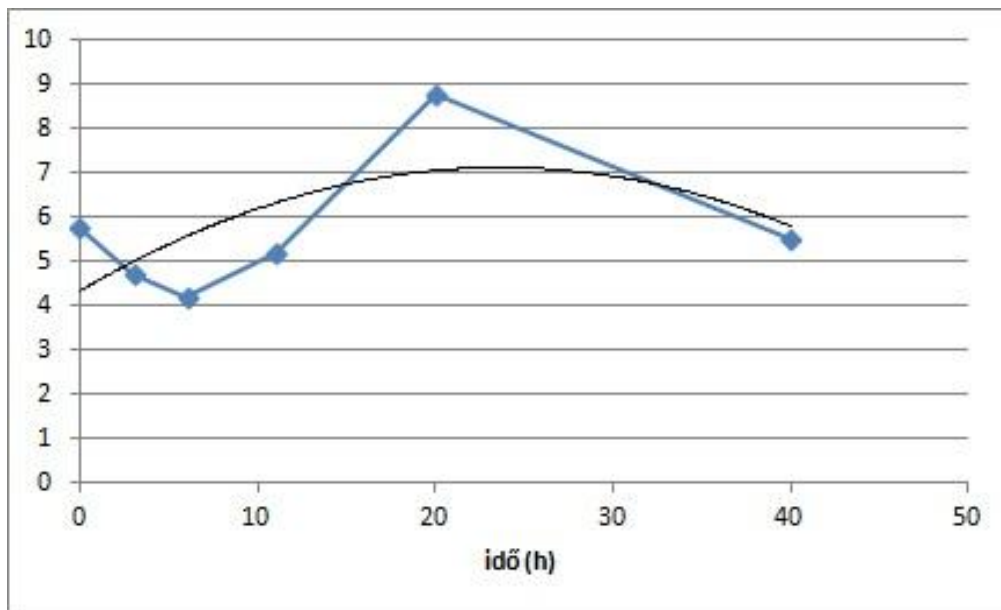
A 7. ábrán a Crest-tényező értékeinek alakulása figyelhetjük meg. Jól látszik, hogy a 20. óra környékén a jelszint eléri az 5 értékét, ami a defektus megjelenését jelenti. Ezt alátámasztja az előbbi ábrákon látható ugrásszerű növekedése az értékeknek.



7. ÁBRA CREST-TÉNYEZŐ ALAKULÁSA

A Kurtosis kismértékű egyezést mutat a Crest-tényező görbéjével. Egy új csapágy esetében a Kurtosis értéke 3 közelében van. Egy kialakulóban lévő defektus bármely érintkező felületeken impulzusokat generál, így megváltoztatva a rezgési jel eloszlását és ezzel növelve a Kurtosis értékét. Ha egyszer a sérült rész területe meghaladja a gördülő elemek közt lévő osztási távolságot, a folyamatos lengéscsillapítás (köszönhetően annak, hogy egy már hanyatló impulzus beleütközik az épp keletkezőbe) visszahozza az index értékét normál eloszlásúra és a Kurtosis értéke ismét 3 körül fog ingadozni.

A 8. ábrán a Kurtosis változását láthatjuk. Jól látható, hogy a még új állapotába vizsgált csapágy közel 6 értékéről indult, ami egy esetleges gyári hibára enged következtetni. Megfigyelhető, ahogyan a csapágyhiba növekedése, lengéscsillapítást idéz elő és visszahozza 3 közelébe az értéket, majd itt is a jelszint ugrásszerű növekedése következik.



8. ÁBRA KURTOSIS VÁLTOZÁSA

Megállapítható, hogy a statisztikai jellemzők közül a peak-to-peak és az RMS görbéjén a 40. üzemóra tájékán nagy ugrás figyelhető meg. Ekkor a csapágyzaj is erősödött, így a csapágy kiszerezésre került. A kiszerezés után a csapágy meghibásodása bizonyossá vált, a sérülés a kosárszerkezeten volt megfigyelhető.

7. Összegzés

Jelen dolgozat keretei között egy egysoros, mélyhornyú golyóscsapágyat vizsgáltunk statisztikai indexek segítségével. A vizsgálatok során, a csapágó várható élettartamának körülbelül felénél néhány statisztikai jellemző ugrásszerűen változott, valamint különös csapágózaj volt megfigyelhető. Ekkor a vizsgált csapágó kiserelésre került és bebizonyosodott annak meghibásodása. A csapágóállapot felmérések során a statisztikai módszerek jó megbízhatóságot mutatnak, mindazonáltal a hiba csapágón belüli elhelyezkedéséről nem kapunk információt.

8. Irodalomjegyzék

- [1] Tóth Lajos Tibor: Tranziens és kváziperiodikus folyamatok analízise az idő-frekvencia tartományban, PhD értekezés, Miskolci Egyetem, 2011.
- [2] Patkó Gy., Takács Gy.: Kísérleti mérőeszközök kifejlesztése, Miskolc, 2009.
- [3] Takács Gy., Szilágyi A.: Gördülőcsapágyak remanens élettartamának meghatározási módszere. Jegyzet és labor útmutató, Miskolc, 2009.
- [4] KISTLER 8632C PiezoBEAM CUBE ACCELEROMETERS
http://www.intertechnology.com/Kistler/pdfs/Accelerometer_Model_8632C.pdf,
Letöltés dátuma: 2014.10.28.
- [5] KISTLER Piezo-Instrumentation Power supply/Couples, Kistler Instrumente AG
Winterthur, CH-8400 Winterthur, Schweiz.
- [6] FAG Gördülőcsapágyak Főkatalógus, WL 41 520/2 HA sz. Katalógus, 1996.
- [7] Karacy, T. Akturk, N.: Experimental diagnostics of ball bearings using statistical and spectral methods, Tribology International, 42 (2009) 836-843.
- [8] Williams, T. Ribandera, X. Billington, S. Kurfess, T.: Rolling element bearing diagnostics in run-to-failure lifetime testing, MSSP 2001; 15(5): 979 – 93.