

A rezgésdiagnosztikai előrejelzések megbízhatóságának néhány problémája az Ipar 4.0 adta keretek és követelmények között

Dr. Szabó József Zoltán*, Dr. Dömötör Ferenc**

*Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, 1081 Budapest, Népszínház utca 8.
(Tel: +36-30-933-7479; e-mail: szabo.jozsef@bgk.uni-obuda.hu).

**BME Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Gépjárműtechnológia Tanszék, 1111 Budapest, Stoczek utca 4.
(e-mail: ferenc.domotor@gjt.bme.hu)

Az Ipar 4.0 hatékony működésének alapvető feltétele, hogy az egyes eszközök között áramló információ pontos és hiteles legyen. Ez nemcsak a mért adatokra, jelekre vonatkozik, hanem a kiértékelésüket célzó szabályok rendszerére is. Ilyen szabályokra szokás hivatkozni például az egyes géphibákra jellemző spektrumok kiértékelése során is. Kutató munkánk során azt a célt tűztük ki, hogy laboratóriumi körülmények között, mesterségesen előállított, különböző nagyságú/erősségű hibák esetén megvizsgáljuk néhány típushibának a spektrumát (statikus és dinamikus kiegyensúlyozatlanság többféle fordulaton és többféle pótsúllyal, illetve tengelyek beállítása különböző nagyságú párhuzamossági hibával).

1. BEVEZETÉS

Azt szokták mondani, hogy a műszaki fejlődés sem térben, sem időben nem egyenletes, hanem sokkal inkább hullámokban terjed, amely hullámokat egy-egy sor technológiai fejlesztés indít útjára. Az első ipari forradalomban a főszerpet a gőz- és a vízenergia által hajtott mechanikus gyártóberendezések (vö. textilipar robbanásszerű fejlődése) játszották. Jó száz évvel később jött létre a második ipari forradalomhoz köthető tömeggyártás, amelynek a hajtóerejét az elektromos energia biztosította. Aztán ismét eltelt néhány évtized, és az elektronikus vezérlés/szabályozás elterjedése elindította a harmadik ipari forradalmat.

A napjainkban végbemenő, negyedik, ipari forradalom a digitális jelfeldolgozás és az ehhez köthető, széleskörű informatikai támogatás elterjedésével jellemezhető. Ennek a negyedik ipari forradalomnak, vagy más néven Ipar 4.0-nak nevezett fogalomnak az egyik alappillére (Juhász L. és Pokorádi L. 2018) a Dolgok Internete (IoT = Internet of Things), amely az okos („smart”) jelzővel ellátott eszközök az egymással összeköttetésben lévő eszközök egész hálózatát jelenti. Ebben a hálózatban az egyes elemek külön-külön címezhetők, és az elemek egymás között nagy sebességgel, valós időben és szabványos internet protokollokon (angolul Internet Protocol - IP) keresztül kommunikálnak egymással.

A gyakorlatban ez úgy valósul meg, hogy az érzékelők és a mérőeszközök segítségével a gépekről, berendezésekről adatokat gyűjtünk. Ezeket feldolgozva működtetjük a gépeket, berendezéseket. Az egyes elemek között a kapcsolatot főleg rádiófrekvenciás egyedi azonosítók (angolul Radio Frequency Identification - RFID)

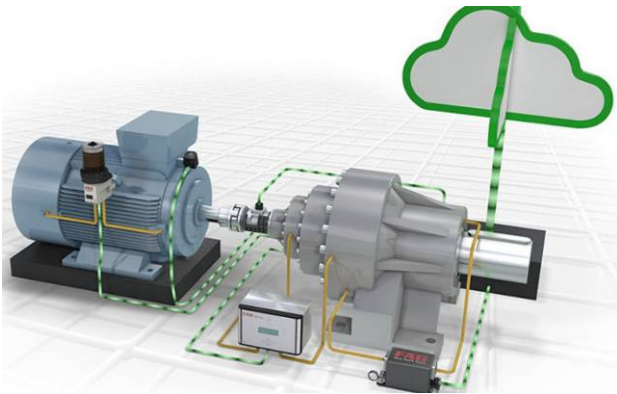
segítségével biztosítjuk. Minden egyes dologhoz (thing), vagyis a gép, berendezés fontosnak ítélt egységéhez, alkatrészéhez egy-egy szenzort rendelünk, melyek hálózatba kapcsolva kommunikálnak egymással. Az egyes elemek közötti kapcsolat lehet vezetékes vagy vezeték nélküli, történhet nyílt hálózaton (internet) vagy csak egy-egy szervezeten belüli hálózaton (intranet) keresztül.

A gyártási folyamat egyik legfontosabb területe az üzemfenntartás, vagyis a különböző technikai eszközök, gépek és berendezések rendeltetészerű üzemeltetése, karbantartása, javítása. Ez a technológia olyan gyorsan fejlődik, hogy egyes tanulmányok szerint 2020-ra a világban már közel 20 milliárd „okos” készülék lesz üzembe állítva (Juhász L. és Pokorádi L. 2018). A mi munkánk eredményeképpen egy olyan „okos eszköz” használatával szerzett tapasztalatokat teszünk közzé, amely a forgó gépek rezgéseivel kapcsolatos, rendkívül fontos információkat szolgáltat a kezelőknek.

Az Ipar 4.0 egyik legfontosabb területe az állapotfigyelő karbantartás. A Dolgok Internete (IoT) lehetőséget ad a gyártó berendezések műszaki állapotának valós idejű nyomon követésére, és a szükség szerinti beavatkozásra, azaz leállásra, javításra. Az okos eszközök alkalmazása révén a karbantartás kisebb költségek mellett is hatékonyabb lesz. Az érzékelőkön és az adatfeldolgozó, kijelző egységeken kívül azonban szükség van egy olyan rendszerre is, amely az egyes elemeket összeköti, és a működéshez szükséges tudást, háttértámogatást adja. Ezt a rendszert manapság az ún felhő alapú szolgáltatásnak nevezik.

A felhő pontos definícióját (idézi Juhász L. és Pokorádi L. 2018) többek között az Amerikai Nemzeti Szabványügyi és

Technológiai Intézet (angolul National Institute of Standards and Technology - NIST) is meghatározza. Ezek szerint: „A felhőalapú számítástechnika egy olyan modell, amelynek segítségével bárholonnan kényelmesen és igény szerint hozzáférhetünk a testreszabott informatikai erőforrások megosztott halmazához (például: hálózatokhoz, szerverekhez, tárhelyekhez, alkalmazásokhoz, szolgáltatásokhoz), miközben a rendelkezésre bocsátás minimális adminisztrációs tevékenységet és szolgáltatói beavatkozást igényel.”



1. ábra Forgógépek felhő alapú információs hálózaton alapuló állapotfelügyelete (Forrás: Schaeffler/FAG Co.)

A szakirodalom számos példát említ arra, hogy a Dolgok Internetének az informatikai felhőkkel való összekapcsolása milyen előnyöket jelent az állapotfigyelő karbantartás terén.

Az egyik ilyen, felhő alapú informatikai rendszer a Schaeffler/FAG cég által kifejlesztett SmartCheck rezgésmérő rendszer, amely a különféle érzékelőkkel mért adatok alapján, egy szoftver segítségével meghatározza a gördülőcsapágy hátralevő üzemidejét. Az állapotfigyelő rendszerbe illeszthető az automatikus csapágykenés, a kenőanyagban felhalmozódó kopadék elemzés és egy sor, más állapotfigyelő eszközrendszer. Ennek a rendszernek a működéséhez az szükséges, hogy a mérőrendszer internet kapcsolatban legyen a Schaeffler felhő alapú szolgáltatásával, ahol a feldolgozó szoftver telepítve van.

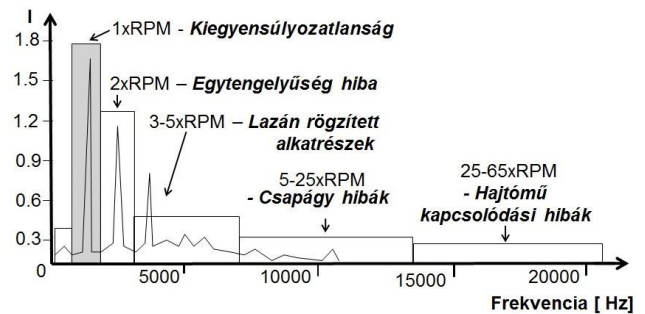
2. A DIAGNÓZIS MEGBÍZHATÓSÁGA ÉS AZ IPAR 4.0

Az előbbiekben említett, SmartCheck rendszer háromszintű rendszerfelügyeletre alkalmas. Elsőként az egyedi gép és állapotfelügyeletet kell említeni. Ennek értelmében a műszer gépre telepítése után a rezgésadatok közvetlenül letölthetők a személyi számítógépre, majd elemezhetők, ezzel időszakos állapotfelügyelet valósítható meg.

A másik lehetőség az intelligens folyamatintegráció, amely az interfészek által megvalósított kommunikáción alapul, míg a harmadik lehetőség a teljes távdiagnosztika. Ennek lényege az, hogy a mért adatokhoz internetkapcsolat segítségével lehet hozzáférni. A teljes diagnosztika kiszervezhető külső vállalkozásokhoz.

Bármely lehetőséget választjuk is, nem kerülhetjük meg azt a kérdést, hogy milyen információt akarunk továbbítani a vizsgált, felügyelt gép állapotáról.

A forgógépek rezgésdiagnosztikai vizsgálata során általában a rezgés megadott frekvencia sávban mért spektruma jelenti az elsődleges információt. A vizsgálat úgy történik, hogy a mért spektrumot időről időre összehasonlítjuk az elméleti úton kapott, ún. elvi spektrummal és figyeljük az egyes frekvenciákon bekövetkező változásokat. Egy ilyen, összefoglaló jellegű, elméleti spektrumot (J. E. Berry, 1995.) láthatunk a 2. ábrán.



2. ábra Forgógépek elméleti spektruma (J. Berry, 1995.)

Az Ipar 4.0 hatékony működésének alapvető feltétele, hogy az egyes eszközök között áramló információ hiteles legyen. Ez az „elv” nemcsak a mért adatokra, jelekre vonatkozik, hanem a kiértékelésüket célzó szabályok rendszerére is. Ilyen „szabályok” lehetnek például az egyes hibákra jellemző spektrumok, vagyis az, hogy pl statikus vagy dinamikus kiegyensúlyozatlanság esetén milyen rezgésösszetevők vannak a spektrumban, és azok amplitúdója mekkora, illetve hogyan változik.

3. CÉLKITŰZÉS, ÉS VIZSGÁLATI TERV

Kutató munkánk során azt a célt tűztük ki, hogy „laboratóriumi” körülmények között, mesterségesen előállított, különböző nagyságú/erősségű hibák esetén megvizsgáljuk néhány típushibának a spektrumát. Ezek a következők: statikus és dinamikus kiegyensúlyozatlanság többféle fordulaton és többféle pótsúllyal, illetve tengelyek beállítása különböző nagyságú párhuzamossági hibával.

Kezdjük a sort a statikus, illetve a dinamikus kiegyensúlyozatlanság vizsgálatával. A vizsgálat célja, hogy rezgésméréssel bizonyítsuk a kiegyensúlyozatlanságot okozó tömeg és a fordulatszám változásának a hatását. Az alábbi képlet szerint a centrifugális erő:

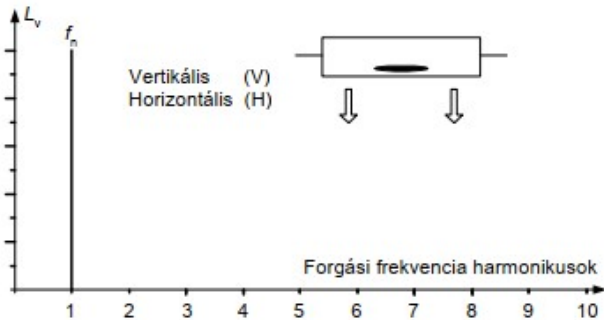
$$F_{cf} = m \cdot e \cdot \omega^2 = m \cdot e \cdot \left(\frac{2\pi \cdot n}{60}\right)^2 [N]$$

m = a kiegyensúlyozatlan tömeg [kg]

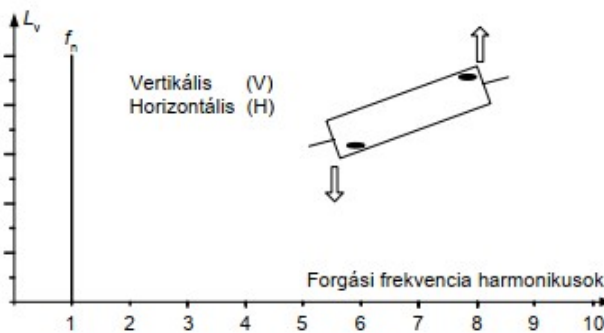
e = a kiegyensúlyozatlan tömeg tömegközéppontjának és a forgástengely távolságának nagysága [m]

n = fordulatszám [1/min]

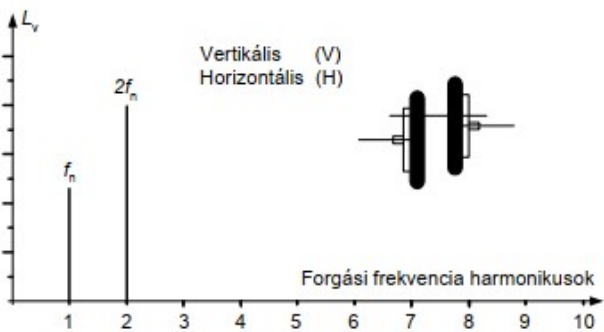
A csapágyakra ható erő – egy, a geometriától és a szerkezeti merevségtől függő állandótól eltekintve ugyanilyen képlet szerint változik. Emiatt jó okunk van feltételezni, hogy a rezgés amplitúdójának a tárcsákra helyezett többlet súlyok hatására lineárisan, míg a fordulatszám hatására (a rezonanciától távol, jó közelítéssel) négyzetesen kell növekednie.



3. ábra A statikusan kiegyensúlyozatlan forgórész elvi spektruma és vázlata (J. E. Berry, 1995.)



4. ábra A dinamikusan kiegyensúlyozatlan forgórész elvi spektruma és vázlata (J. E. Berry, 1995.)



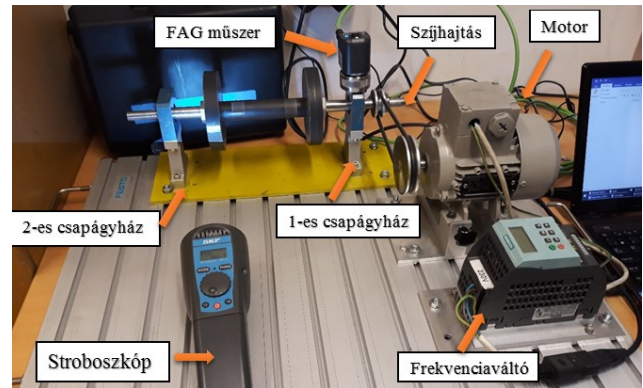
5. ábra A párhuzamossági hibával beállított forgórész elvi spektruma és vázlata (J. E. Berry, 1995.)

A vizsgálat érdekében fel kell kutatni a szakirodalmi leírásokat, amelyekben a különböző hibák leírása szerepel. Ezek közül a statikus kiegyensúlyozatlanság spektruma a 3. míg a dinamikus kiegyensúlyozatlanság spektruma a 4. ábrán látható. A vizsgálat során mind statikus, mind pedig dinamikus kiegyensúlyozatlanságokat fogunk előidézni különböző fordulatszámokon és az általuk előidézett rezgésértékeket fogjuk elemezni. A mért rezgésértékek elemzésén keresztül szeretnénk megnézni, hogy a rezgésereőség tényleg úgy változik-e, ahogy (rezonanciától távol) a forgó szerkezeteket terhelő erőhatások változnak?

4. KÍSÉRLETI ESZKÖZÖK, PRÓBAPAD ÉS MŰSZEREK

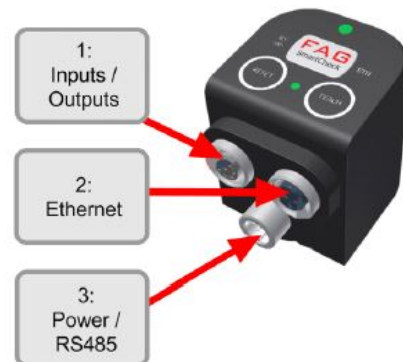
A mérésekhez használt berendezések, műszerek:

- FAG SmartCheck rezgés mérő műszer, SmartWeb és SmartUtility szoftver alkalmazások.
- SKF TKRS 10 stroboszkóp fordulatszám mérő,
- Vibrotester próbapad (saját fejlesztés),
- Fixtur Laser tengelybeállító készülék,
- Személyi számítógép
- Mérleg



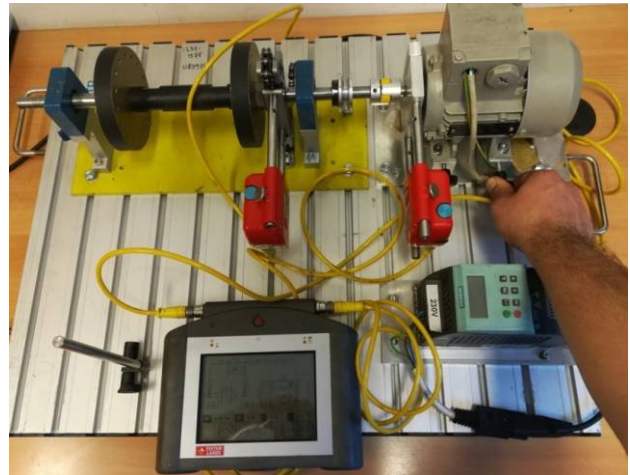
6. ábra A kísérleti vizsgálatokhoz használt próbapad

A rezgés mérésekhez az FAG/Schaeffler cég által kifejlesztett, az ipar 4.0 követelményeit kielégítő SmartCheck rezgés mérő rendszert használtuk (7. ábra).



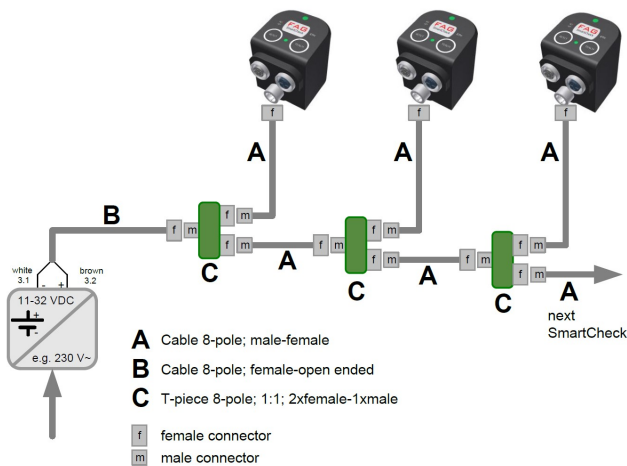
7. ábra A Smart Check mérőfej (Schaeffler/FAG)

Ez a SmartCheck csomag egy piezoelektromos érzékelőt tartalmazó mérőfejből, a kábelekből és az adatfeldolgozást, monitorozást végző számítógépes szoftvercsomagból áll. A mérés ezek után a következőképpen zajlik. A mérőfejet a vizsgálni kívánt gépre szereljük. Ennek három kimenete van. Egyik közülük a tápfeszültség helye, míg a másik kettőn a kommunikáció zajlik. Ez utóbbiak közül az egyikhez bármely Ethernet csatlakozóval ellátott számítógéphez csatlakozhatunk, feltéve hogy a rendszer támogatja a TCP/IP protokollt és a kezelőprogram fel van telepítve. A másik csatlakozó típusa RS485, amelyen az üzemi, jellemző adatok forgalma zajlik. A mérőrendszer előnye, hogy akár több száz készülék is csatlakoztatható a monitorozó számítógépre.



9. ábra A lézeres tengelybeállító készülék (Fixtur Laser Co.)

A vizsgálatok során igen nagy mennyiségű adat (spektrum) keletkezett, amelyek mindegyikének bemutatása területi okok miatt nem lehetséges. Eppen ezért itt csak illusztráció céljából bemutatunk egy spektrumot (9. ábra), míg a többit csak feldolgozott formában tárjuk a nyilvánosság elé.

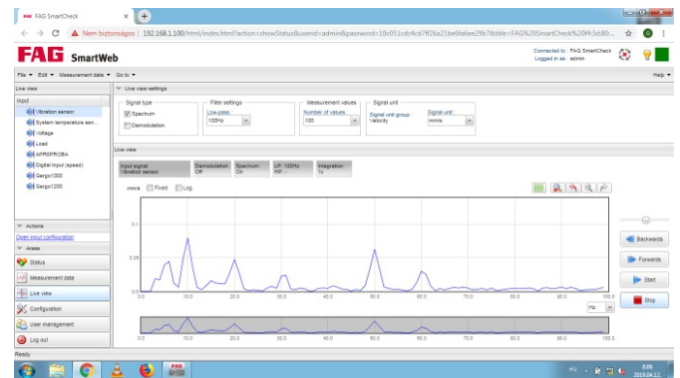


8. ábra A rendszer konfigurációja több érzékelő egyidejű használatával (Forrás: Schaeffler/FAG Co.)

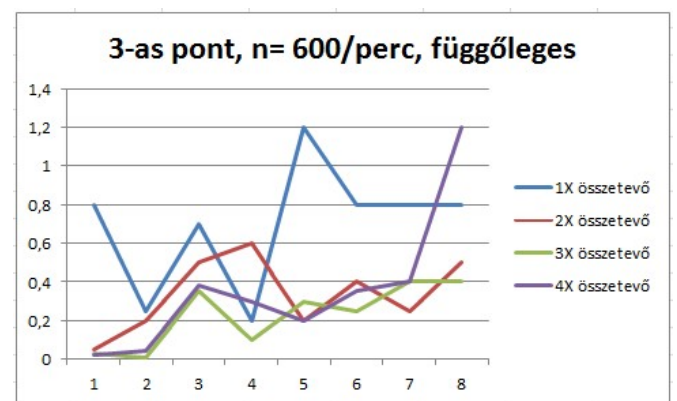
Ha az illetékes személynek van jogosultsága, akkor megfelelően kialakított TCP/IP hálózati kapcsolat esetén a diagnosztikai rendszer távolról (Internetről) is elérhető. Azt is el kell mondani, hogy a mérőműszer önmagában, azaz hálózati csatlakozás nélkül is képes az adatok gyűjtésére és feldolgozására. A hálózati kapcsolathoz szoftver és a megfelelő IP cím beállítása szükséges, s ezt követően a mért adatokat tetszés szerint elemezhetjük.

5. EGYTENGELYŰSÉGI VIZSGÁLATOK

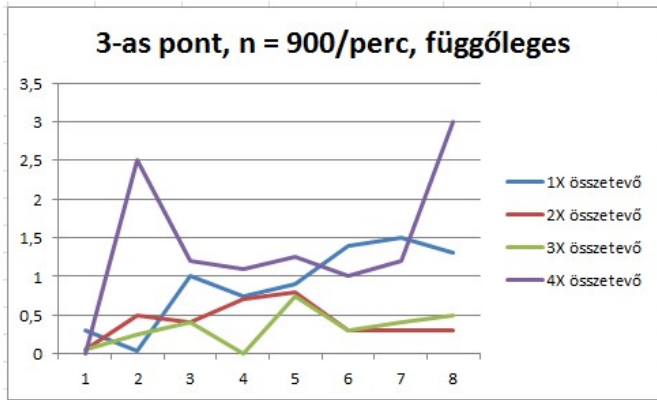
A mérés célja, hogy a szakirodalomban leírt spektrum jellemzőket visszaigazoljuk. Ennek érdekében mesterségesen állítunk elő különböző beállítási hibákat, s mérjük az ezekhez tartozó rezgéseket. Alapesetben a tengelybeállítás hibája 0, amit 0,05 mm-es lépcsőzéssel 0,35 mm-ig növelünk. Szakirodalmi leírások szerint tengelyvonal-beállítási hibák esetén az aktuális fordulatszám 1x-es 2x-es, de akár 8x-os többszörösein is tapasztalhatunk a spektrumban magasabb összetevőket. A vizsgálatot 0 – 100 Hz frekvencia értékek között végezzük. A mérést három különböző fordulatszámon végeztük, amelyek 600, 900, 1200 fordulat/perc.



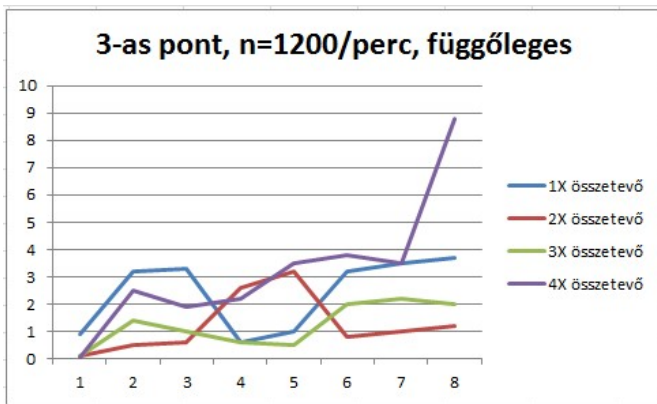
10. ábra A vizsgálatok során mért spektrum (illusztráció)



11. ábra A függőleges rezgés összetevők amplitúdójának változása a fokozatosan növekvő párhuzamossági hibával ($\Delta\epsilon = 0,05$ – től $0,05$ mm-es lépcsőzésben $\Delta\epsilon = 0,35$ mm-ig)



12. ábra A függőleges rezgés összetevők amplitúdójának változása a fokozatosan növekvő párhuzamossági hibával ($\Delta e = 0,05$ – től $0,05$ mm-es lépcsőzésben $\Delta e = 0,35$ mm-ig)

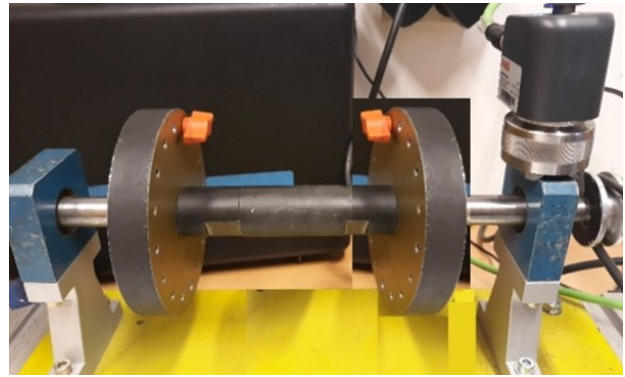


13. ábra A függőleges rezgés összetevők amplitúdójának változása a fokozatosan növekvő párhuzamossági hibával ($\Delta e = 0,05$ – től $0,05$ mm-es lépcsőzésben $\Delta e = 0,35$ mm-ig)

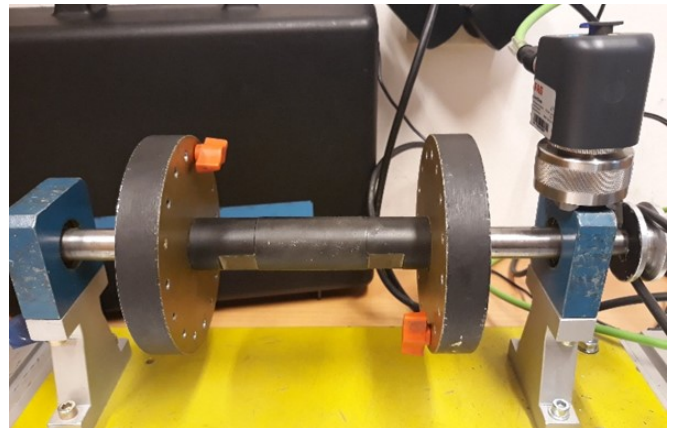
6. A KIEGYENSÚLYOZATLAN FORGÓRÉSZ KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA

A mérések végrehajtásának a gyakorlati lépései:

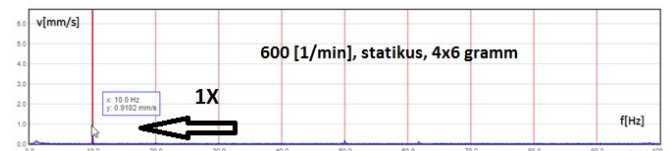
1. A próbapad összeszerelése
2. Az FAG műszer telepítése és összekapcsolása a személyi számítógéppel. A szükséges program telepítése és konfigurálása.
3. Hozzáadott súlyok nélkül a pontos fordulatszámok meghatározása SKF TKRS 10 stroboszkóp műszerrel.
4. A súlyok lemérése.
5. Súlyok nélkül végrehajtani a méréseket a meghatározott fordulatszámokon.
6. Egy – egy súly felhelyezése mindkét tárcsára egymással egyvonalban a statikus kiegyensúlyozatlanság létrehozásához.
7. Egy – egy súly felhelyezése a tárcsákra 180 fokkal elforgatva egymáshoz képest, a dinamikus kiegyensúlyozatlanság létrehozása érdekében.
8. Az előző konfigurációk megismétlése a súlyok duplázásával.
9. Mérési eredmények dokumentálása és kiértékelése.



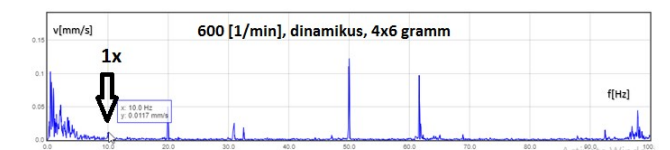
14. ábra Statikus kiegyensúlyozatlanság beállítása (a piros kupakkal ellátott csavarok a többletsúlyok)



15. ábra Dinamikus kiegyensúlyozatlanság beállítása (a piros kupakkal ellátott csavarok a többletsúlyok)



16. ábra Statikus kiegyensúlyozatlanság okozta rezgés spektruma 600 [1/min] fordulaton 4x6g póttömeg esetén



17. ábra Dinamikus kiegyensúlyozatlanság okozta rezgés spektruma 600 [1/min] fordulaton 4x6g póttömeg esetén

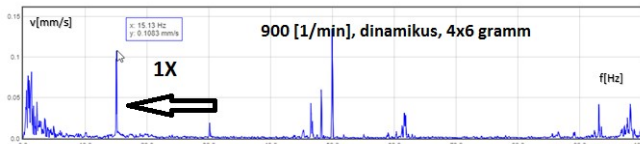
A 16. és 17. ábra összehasonlításából kitűnik, hogy a statikus kiegyensúlyozatlanság okozta rezgés spektruma 600/perc fordulaton pontosan olyan, mint amit a szakirodalomban leírtak, azaz mindössze egyetlen, a fordulatszámával arányos frekvenciájú rezgésösszetevő látható.

A dinamikus eset spektrumában ezzel szemben, ugyanolyan feltételek mellett rendkívül erős, magasabb frekvenciájú összetevők is előfordulnak, amit a szakirodalom nem jelez.



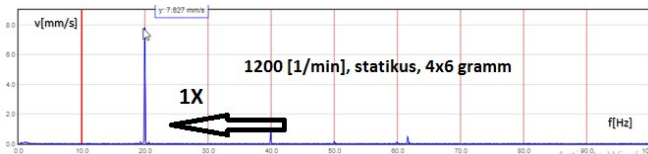
18. ábra Statikus kiegyensúlyozatlanság okozta rezgés spektruma 900 [1/min] fordulaton 4x6g póttömeg esetén

A helyzet szinte „szóról, szóra és betűről, betűre” ugyanaz lesz 900/perc fordulatszámon.

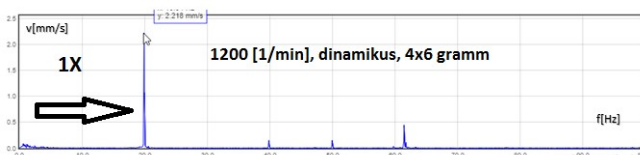


19. ábra Dinamikus kiegyensúlyozatlanság okozta rezgés spektruma 900 [1/min] fordulaton 4x6g póttömeg esetén

A 18. és 19. ábra összehasonlításából ugyancsak kitűnik, hogy a statikus kiegyensúlyozatlanság okozta rezgés spektruma 900/perc fordulaton is pontosan olyan, mint amit a szakirodalomban leírtak, azaz mindössze egyetlen, a fordulatszám arányos frekvenciájú rezgésösszetevő látható. A dinamikus eset spektrumában ezzel szemben, a 600/perc fordulatszámú esethez hasonlóan, ugyanolyan feltételek mellett rendkívül erős, magasabb frekvenciájú összetevők is előfordulnak, amit a szakirodalom nem jelez.



20. ábra Statikus kiegyensúlyozatlanság okozta rezgés spektruma 1200 [1/min] fordulaton 4x6g póttömeg esetén



21. ábra Dinamikus kiegyensúlyozatlanság okozta rezgés spektruma 1200 [1/min] fordulaton 4x6g póttömeg esetén

A mérési eredmények értékelését két részre osztottuk: 1. A felhelyezett súlyok változásának hatása. 2. A fordulatszám változásának hatása. Mindkét esetben az alábbi képlet helyességét kívántuk bizonyítani:

A tárcsákon a pótsúlyok azonos sugáron helyezkednek el. Statikus kiegyensúlyozatlanság esetén, a két tárcsán egymással szemben, míg dinamikus esetben egymáshoz képest 180-fokkal vannak elforgatva.

Abban az esetben, ha a csak a pótsúlyok nagysága változik, és minden más paraméter változatlan, akkor azt várjuk, hogy a mért rezgés erőssége (gyorsulás, sebesség, elmozdulás) a tömeggel egyenes arányban változzon.

A mérési eredmények mind a statikus, mind pedig a dinamikus kiegyensúlyozatlanság esetén, 600 és 900-as fordulatszámoknál tökéletesen visszaigazolták a várakozásokat. A legmagasabb, 1200-as vizsgálati fordulatszám azonban már eltéréseket tapasztaltunk. Feltételezéseink szerint ennek oka annak tulajdonítható, hogy a magasabb fordulatszámokon már felléphet a rezonancia jelensége. Ezt azonban nem vizsgáltuk.

7. KÖVETKEZTETÉSEK

A vizsgálatok során megállapítottuk, hogy várakozásainkkal ellentétben a tengely beállítási hiba nagyságával ugyan nő az 1X és 2X összetevők amplitúdója, de erre semmiképpen sem lehet az egyenes arányosság lineáris összefüggését ráilleszteni. Ugyancsak meglepőek a kiegyensúlyozatlansággal kapcsolatos vizsgálatok eredményei. Statikus kiegyensúlyozatlanság esetén az 1X amplitúdó jó közelítéssel lineáris összefüggés szerint változik a próbatömeg nagyságával, de dinamikus esetben ez már korántsem ilyen egyértelmű. A fordulatszám változás hatása – rezonancia miatt – egyáltalán nem követi a négyzetes függvényt. Ennek azért van jelentősége, mert közel ideális feltételek között végeztük a vizsgálatokat, s emiatt azt feltételeztük, hogy az eredmények visszaigazolják az elméletileg megállapított törvényszerűségeket. Az eredmények elemzése után úgy véljük, hogy még viszonylag ideális körülmények között sem lehet teljes mértékben a legegyszerűbb, irodalomból vett szabályokra hagyatkozni, hanem a szerkezetet mindig alaposan meg kell vizsgálni (pl. rezonancia frekvenciák meghatározása).

IRODALOMJEGYZÉK

Berry, J.E.: *Predictive Maintenance and Vibration Signature Analysis*, Technical Associates of Charlotte, NC, USA 1995.

Juhász L. és Pokorádi L. (2018): *A dolgok internete és a karbantartás közti kapcsolat napjainkban*, Gradus Vol 5, No 1 (2018) 99-106, ISSN 2064-8014