

FORGÓGÉPEK ÜZEM KÖZBENI MOZGÁSÁNAK PRÓBAPADI ÉS IPARI VIZSGÁLATA

Dr. PhD Szabó József Zoltán

Adjunktus, Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest

SUMMARY

The significance of predictive maintenance and vibration diagnostic increasing continuously in every area of industry. Vibration diagnostics delivers considerable economic benefits for machinery operation. Vibration measurement can show up mechanical problems and harmful effects which acts on the parts throughout the operating period of the machine. This paper describes an alternative method of vibration diagnostic with „Vibshape” moving-animation software. With this program and an vibration analyser the moving of the machines, and the mechanical structures can be visible.

This article shows the basic knowledge of vibration diagnostic with animation program, and a case study from my practice. The case study shows the moving of the machines in main mechanical problems, for example resonance and electrical problem. Across of the case study we can see the resonance problem of a supporting structure and a big blower rotor bar crack.

Kulcsszavak: forgógép, mozgás-animáció, rezgésdiagnosztika, rezonancia, kalicka-törés.

1. BEVEZETÉS

A korszerű karbantartási rendszereket egyre szélesebb körben alkalmazzák a gépek váratlan tönkremenetele, a termelés kiesés csökkentése érdekében. Az állapotfüggő karbantartási stratégia legfontosabb bázisa a gépek rezgésdiagnosztikai vizsgálata, amely lehetőséget teremt arra, hogy a károsító hatásokat üzem közben, teljes terhelés alatt fedezzük fel. A rezgésdiagnosztika gazdasági előnye elsősorban abban nyilvánul meg, hogy a meghibásodások előre jelzésével elkerülhetők egy termelési folyamat, vagy akár egy egész gyár üzemképességét veszélyeztető műszaki katasztrófa helyzetek.

A cikk célja egy speciális rezgésdiagnosztikai módszer, a mozgás-animáció elméleti összefoglalása, valamint esettanulmányokon keresztül az oktatásban és az iparban való hatékony alkalmazhatóságának bemutatása. Ezzel a módszerrel a gépszerkezetek üzem közben végzett mozgásai láthatóvá tehetők, elemezhetők, segítségével feltárható a gép hibás működésének eredete. A mozgás-animációs vizsgálatban szerzett elméleti és gyakorlati tapasztalataimat egy próbapadi kísérleten, illetve egy nagy teljesítményű légfúvó hajtómotor kalicka repedéses meghibásodásának esettanulmányán keresztül mutatom be.

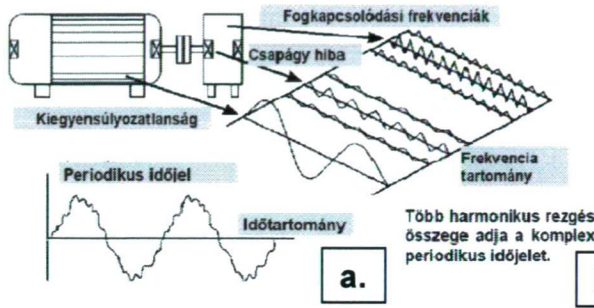
2. FORGÓGÉPEK ÖSSZETETT REZGÉSEI

Definíció szerint a rezgés valamely fizikai mennyiség változásának egy referencia hely körüli, ismétlődően növekvő és csökkenő folyamata az idő függvényében. A géprezgések legfontosabb jellemzői az idő függvényében a $g(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$ törvényszerűséggel változnak, ahol az A – amplitúdó az ω - körfrekvencia (1/s) (periódusidő) és a φ - kezdő fázisszög állandók. A műszaki diagnosztikai méréseknél a legnagyobb jelentőséggel a periodikus, harmonikus rezgések bírnak, amelyek elméletben előállíthatók egy meghatározott hosszúságú ω szögsebességgel forgó vektor vetületeként. [1]

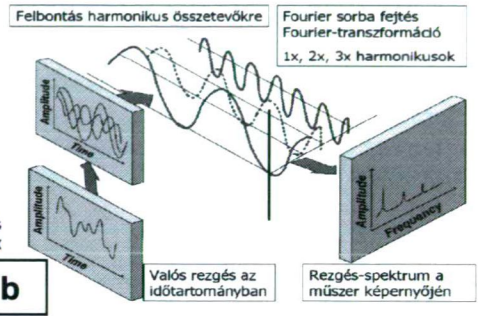
A valóságos forgógépek sokféle alkatrészből épülnek fel, különböző alkatrészeik különféle rezgéseket hoznak létre, amint azt az 1.a.ábra is szemlélteti. A sokféle frekvenciájú, különféle amplitúdójú harmonikus rezgésösszetevők adják a géptesten érzékelhető komplex periodikus időjelet. A gyakorlatban már a rezgések érzékelése után Fourier-transzformációt alkalmaznak az időfüggvények frekvencia függvényekké történő áttranszformálásához, melynek folyamata az 1.b. ábrán kísérhető figyelemmel. A rezgésspektrum tehát a rezgési

folyamat különböző frekvenciájú összetevőinek Fourier-transzformált (FFT) összessége. A spektrumban a derékszögű koordinárendszer abszcisszájára a frekvenciát Hz-ben (esetleg a percnkénti ciklusszámot CPM-ben), ordinátájára pedig az összetevők amplitúdójának Peak (csúcs), Peak-to-Peak (PTP), vagy effektív (RMS) értékét mérik fel.

1. ábra: a.) A forgógépek összetett rezgési transzformáció eredménye



b.) A Fourier

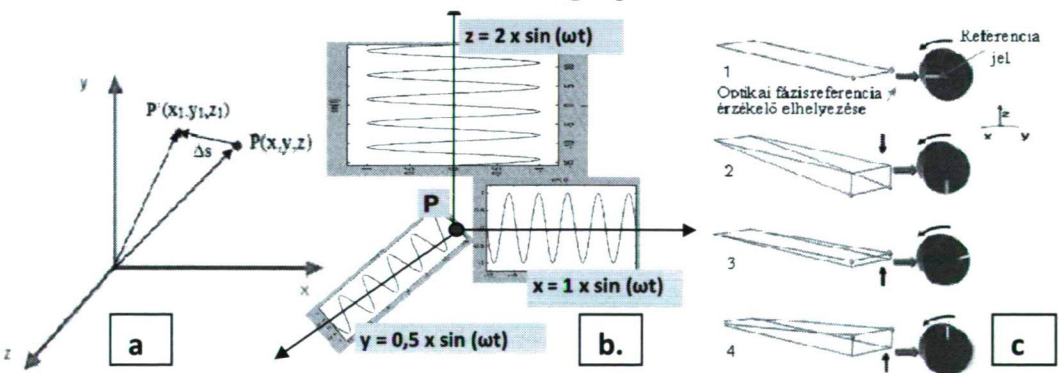


Forrás: saját szerkesztésű ábrák

2.1. A MOZGÁS-ANIMÁCIÓS VIZSGÁLATI ALAPJAI

A testek mozgásának leírására a mozgásfüggvényeket alkalmazzuk. Az x, y, z Descartes koordináta rendszerben elhelyezkedő test tetszőleges $P(x_P, y_P, z_P)$ pontjának helyzetét egy \mathbf{r} helyvektor segítségével határozhatjuk meg. A 2.a. ábrán látható $P(x, y, z)$ pont (amely lehet egy gépen lévő pont is) elmozdulásakor x, y vagy z koordináta értéke változik meg, a pont helye a mért kitérés (Δs) értékével mozdul el a $P'(x_1, y_1, z_1)$ helyzetbe. A periodikus rezgőmozgást végző pont mozgásának meghatározásánál a problémát az jelenti, hogy a gép egy pontja gyakorlatilag a tér minden irányában végez szinuszos mozgást, amelynek frekvenciája azonos, de a tér különböző irányában más amplitúdóval rendelkezik, amint azt a 2.b. ábra is mutatja. A térben mozgó P pont pillanatnyi helyzete a rezgés-amplitúdóval és az erre a pillanatra vonatkozó referencia ponttól mért fázisszöggel írható le. [1], [2]

2. ábra: a. A „P” pont térbeli helyzete b. Szinuszos rezgőmozgása c. A kitérés és fázisszög kapcsolata



Forrás: saját szerkesztésű ábrák

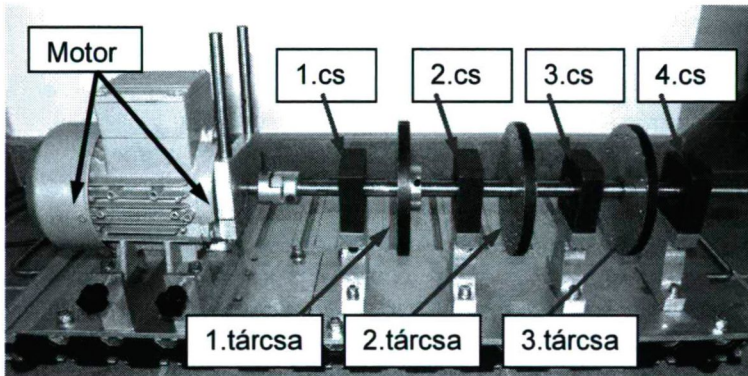
A korszerű mérőműszerek egyszerre képesek a gép kiválasztott pontjaihoz tartozó fázisszög és a rezgés kitérés megváltozását mérni egy ún. referencia (trigger) jelhez viszonyítva. Ezt figyelhetjük meg a 2.c. ábrán látható egy irányú (függőleges) rezgőmozgást végző lemez esetében, melynél az indítási pozícióban a kitérés és a fázisszög egyaránt 0 értéket vesznek fel. A forgórész elfordulásával szinkronban a fázisszög 90° -os és 270° -os megváltozásához, a lemez lefelé, vagy felfelé történő negatív, vagy pozitív kitérése tartozik.

3. KÍSÉRLETEK KIEGYENSÚLYOZATLANSÁG PRÓBAPADI VIZSGÁLATÁRA

3.1. A PRÓBAPADI VIZSGÁLAT ELŐKÉSZÍTÉSE, A MÉRÉSEK VÉGREHAJTÁSA

A gépek üzem közbeni valóságos elmozdulásai a legtöbb esetben olyan kicsik, vagy olyan gyorsak, hogy az emberi érzékszervek nem képesek feldolgozni őket. Megjelenítésük a szakemberek régi vágya, hiszen a látható elmozdulások olyan többlet információt hordoznak a gép üzem közbeni valóságos viselkedéséről, melyet más diagnosztikai módszerekkel, vagy például időigényes és komoly számítástechnikai apparátust igénylő „véges-elemes” szoftverekkel csak megközelíteni tudunk.

3. ábra: A kísérlet alapjául szolgáló mérési összeállítás a "VIBROTESTER" próbapadon



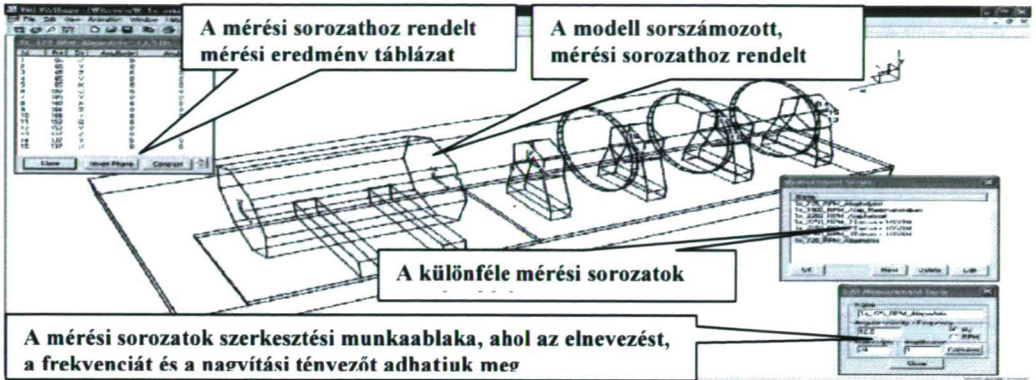
Forrás: saját fotó

A mozgás-animációs módszer használatát először egy modellkísérleten szemléltetem a „VIBROTESTER” nevű rezgésdiagnosztikai próbapadon. A kísérletekhez a 3. ábrán látható négy helyen csapágyazott három tárcsából álló kísérleti forgórészt terveztem, amelyen az egyes tárcsákon egymás után létrehozott kiegyensúlyozatlanság hatását vizsgálom a mozgás-animációs módszerrel.

A mozgás-animációs vizsgálati folyamat a modell tervezésével kezdődik, melyet a 4. ábrán a Vibshape™ szoftver mérés tervező képernyőjén kísérhetjük figyelemmel. A szoftverben pontos geometriai arányok betartásával, téglatest és hengeres elemekből, valamint ezeket összekötő vonalakkal építhetjük fel valóságos berendezésünk egyszerűsített vázát egy Descartes-koordináta rendszerben. A modell megalkotása után a mérési pontokat és a valóságban is hozzáférhető, mérhető mérési irányokat kell rögzíteni. Ennek jelentősége azért nagy, mert az méréseket ennek a szigorú mérési sorrendnek megfelelően kell végrehajtani.

A gép fordulatszámának ismeretében tervezni kell azokat az ún. „mérési sorozatokat” is, amelyek segítségével a különféle üzemállapotokat és mérési fordulatszámokat el tudjuk különíteni egymástól. A szoftver mérési eredmény táblázatot rendel a sorozathoz a mérési pontokkal, irányokkal, valamint az ezekhez tartozó amplitúdó és fázisszög értékekkel.

4. ábra: A vizsgálat tárgyát képező modell a „Vibshape” szoftver tervezési képernyőjén



Forrás: saját szerkesztésű ábra

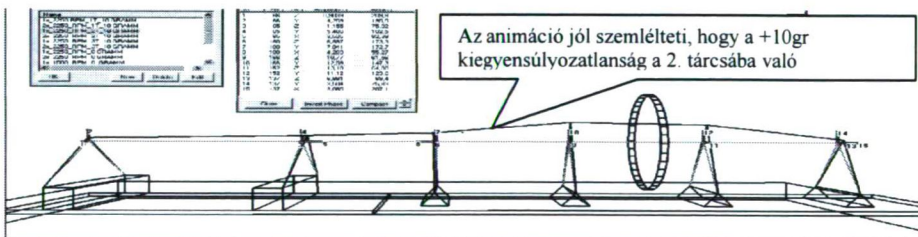
A vizsgálat során egy mindössze 10 gr tömegű csavarral egymás után „elrontva” az 1, 2, és 3 tárcsákat olyan mértékű kiegyensúlyozatlanságot okozok, amely a mozgó animációban egyértelműen beazonosítható és követhető elmozdulást, üzemállapot változást okoz. Az amplitúdó és fázisadatok rögzítését a modell megtervezett mérési helyeinek és irányainak ismeretében egy erre alkalmas Easy Viber 64 rezgésanalizátorral végeztem el. A mérés ennél részletesebb ismertetésétől a cikk terjedelme és fekete-fehér jellege miatt kell eltekintennem.

3.2 A PRÓBAPADON VÉGZETT MOZGÁS-ANIMÁCIÓS KÍSÉRLET EREDMÉNYEI

A próbapadi vizsgálatokkal a módszer gyakorlati alkalmazhatóságát kívánom bizonyítani, forgó gépek műszaki állapotváltozási folyamatának követése szempontjából. Arra keresem a választ, hogy kimutatható-e a fordulatszám, a rezonanciában való üzemelés műszaki állapotra gyakorolt hatása, illetve milyen változást okoz a tárcsák tömegváltozásának helye és mértéke?

Mérési eredményként egy olyan 3 dimenziós mozgó képet kapunk, melyet akár animáció közben is minden irányban körbeforgathatunk, kinagyíthatunk, tehát a gép egészét és a kisebb részek mozgását is elemezhetjük, értékelhetjük. A mozgást, lásd 5.ábra, a szélső helyzetekben akár meg is állíthatjuk, így a kimerevített képen az eltérések még jobban láthatóvá válnak.

5. ábra: Az 5. animációs mérési sorozat eredménye +10gr tömeg, 2250 1/min=37,5 Hz fordulatszám



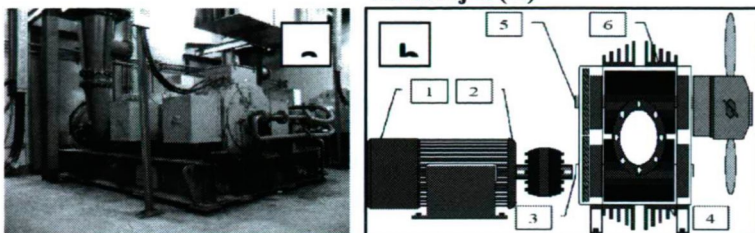
Forrás: saját szerkesztésű ábra

E cikk lapjain nehéz egy három dimenzióban mozgó objektum ábrázolása, ezért az elvégzett hat mérési sorozatból mindössze egy egyszerűsített kimerevített kép bemutatására van lehetőségem a kísérletek eredményeinek szemléltetésére. Az 5.ábra 2. számú tárcsa 10 gr tömeg okozta kiegyensúlyozatlanságát mutató kép azonban úgy érzem önmagáért beszél.

4. A MOZGÁS-ANIMÁCIÓ ALKALMAZÁSA AZ IPARI GYAKORLATBAN

A mozgás-animációt nem csak kísérleti célokkal, hanem az iparban „éles helyzetekben” is számos esetben alkalmaztam már diagnosztikai gyakorlatom során. Esettanulmányomban egy olyan műszaki problémára mutatok példát, amelyben rezgésdiagnosztikai, mozgás-animációs sőt endoszkópos szaktudásra is szükség volt a gép üzemképességének visszaállításához.

6. ábra: A HOWDEN Sirocco légfúvó fényképe (a.) és rezgémérési pontjainak vázlatrajza (b.)



Forrás: Saját fotó, saját szerkesztésű ábra

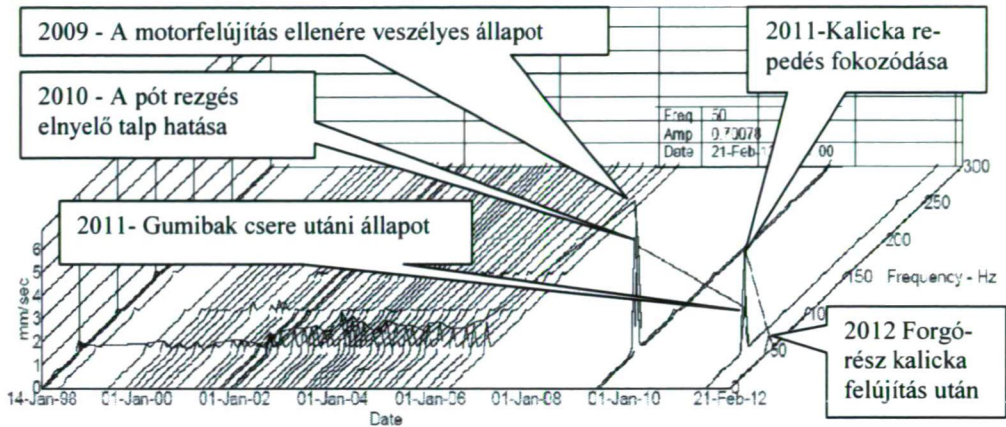
A 6. ábrán látható légfúvó egy élelmiszeripari folyamat, az élesztőgombák fejlődésének levegőellátását biztosítja. Az ipari méretű termelés során a max. 40.000 m³/h levegőszállítást, gyorsító áttételű fogaskerék hajtóművön keresztül $P_{\text{motor}} = 1100 \text{ kW}$ teljesítmény, $n_{\text{motor}} = 2976 \text{ 1/min}$ motor-, és $n_{\text{rotor}} = 9000 \text{ 1/min}$ járókerék fordulatszámokon biztosítja.

A gép, termelésben betöltött szerepe kulcsfontosságú, működésképtelensége esetén, tönkremegy a termék, így naponta akár több tízmillió forintos kár is keletkezhet. A 6.b ábra 6-os számú kihajtó csapágyon rezgés-védelmi rendszert telepítettek, amely 4 másodperc után és 6 mm/s rezgéssebesség RMS érték felett leállítja a motort. A folyamatirányító rendszer a terhelést fokozatmentesen állítja a diffúzor segítségével a pillanatnyi levegőigénynek megfelelően. A motor fordulatszám tehát állandó, de a változó lapátszög beállítással fokozatmentesen változik a motor terhelése és ezzel a szállított mennyiség is.

A légfúvón, a gép műszaki átadás átvétele óta 1998-tól 2006-ig két-három hónaponként a 6.b ábrán látható mérési helyeken, ugyanazon műszerrel és mérési beállításokkal, rendszeresen mértem a rezgéseket. Az un. „multi-paraméteres” rezgésdiagnosztikai vizsgálatot SKF MICROLOG CMVA 60 rezgésanalizátorral és Wilcoxon CMSS 786 kombinált magas frekvenciás piezoelektromos érzékelővel a gép csapágyazási helyein, vízszintes függőleges és axiális mérési irányokban végeztem. Az adatfeldolgozás Prism4 for Windows szoftverrel történt. A rendszeres mérés és a pontos diagnózisok eredményeképpen a gép a tervezett nagyjavítási ciklus kétszeresét élte meg felújítás nélkül, de 2006-ban egy vállalati átszervezés kapcsán először csökkentették, majd teljesen megszüntették a méréseket. A karbantartásokat elvégeztették a szakszervizekkel, de nem a műszaki állapotról, hanem a cégek által javasolt „szokásos” TMK jellegű csereintervallumokra támaszkodtak.

2009-ben a megfelelő működés ellenére döntöttek a gép több millió forintos felújításáról. Ennek során szétszerelték az egész gépet, a motoron az álló és forgórész elektromos felújítását, tengelykapcsoló motor és hajtómű csapágycserét hajtottak végre.

7. ábra: A légfűvő 6. csp. vízszintes rezgésbesség RMS spektrumon belüli változásai 1998 -2012

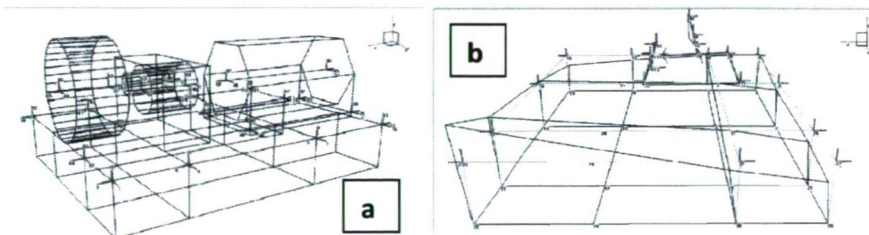


Forrás: Saját szerkesztésű ábra (SKF - Prism4 for Windows)

A jegyzőkönyvek szerint a felújítást végző cég a motort kiegyensúlyozta, elektromosan felújította, ellenőrizte, és ügyelt a tengelybeállításra is. Ennek ellenére az indulás után olyan veszélyesen magasra növekedtek rezgések, lásd. 7. ábra, hogy a rezgésvédelem kb. 40-50%-os terhelésen leállította a gépet. A karbantartás eredményeként, sajnos a gép gyakorlatilag használhatatlan volt, felterheléskor a rezgésőr továbbra is letiltott 6 - 7 mm/s-os rezgések miatt. Ekkor hívtak „vissza” engem.

A spektrumanalízis és a multi paraméteres rezgésvizsgálat során, a rezgésspektrumon belüli változásokból megállapítottam, hogy a domináns, veszélyes a fűvő minden mérési pontján a motor 50 Hz-es forgási frekvenciáján jelentkeznek. A vázszerkezeten ennél még magasabb, 15 - 25 mm/s rezgésszintet is tapasztaltam. Sajnos ezek a szimptómák egyszerre utalhattak a motor kiegyensúlyozatlanságára, a motor, vagy a vázszerkezet fellazulására (gumibak előregedésre), tengely-beállítási, illetve elektromos problémára. Az egész vázszerkezet olyan erősen remegett, hogy gépre szerelt kisebb alkatrészek közül több is tönkrement, a rezgések még az olajat is „kirázták” az olajtartályból.

8. ábra A légfűvő mozgás-animációs modellje (a.) és a mozgás-animáció eredménye (b.)



Forrás: Saját szerkesztésű ábrák (Vibshape, 2002)

A spektrumanalízis eredményeinek tisztázása, a többféle hibára utaló rezgésjelek szétválasztása érdekében javasoltam a mozgás-animáció alkalmazását. A mozgás animációs vizsgálatot ennél a berendezésnél is a „Vibshape” szoftverrel és az „EasyViber 64” digitális rezgésanalizátorral, valamint optikai fordulatszám és fázisszög mérő készülékkel végeztem el. A vizsgálat menete megegyezett az előző fejezetben ismertetett előkészítési, mérési, kiértékelési folyamattal, de itt több mérési pontot és irányt kellett terveznem. A fűvő modellje a 8.a. ábrán, a maximális kitérés kimerevített képe a 8.b. ábrán kísérhető figyelemmel.

Megállapítások a légfúvó diagnosztikai vizsgálatai alapján:

Az animáció eredményei két fontos mozgásra hívták fel a figyelmemet. Először is a vázszerkezet veszélyes mértékű billegésére (lásd.8.b. ábra), amely feltámasztási, vázszerkezet merevségi, valamint a rezgéselnyelő talpakkal kapcsolatos problémákat mutat. Másrészt a motor és a hajtómű tengely ellentétes mozgása figyelhető meg, amely tengely beállítási hibát feltételez. A magas 50 Hz-es frekvencia alapvetően a gumibakok nem megfelelő rezgés elnyelő képességére, motor forgórész kiegyensúlyozatlanságra, elektromos problémájára utal.

Javasolt és elvégzett beavatkozások:

Egy ilyen nagy értékű gép felújítása komoly gazdasági következményekkel is jár ezért a feltételezett hibák kijavítását fokozatosan, az „olcsóbb” beavatkozásokkal kellett kezdeni.

A vázszerkezeten több helyen csavar fellazulást találtam, de jelentősen a meghúzásuk ellenére sem csökkentek a rezgések. Ezek után a vázat a három legmagasabb rezgésű helyen pót rezgéselnyelő talpakkal, aláhangeléssel próbáltuk „elnyeletni” a gerjesztő erőket, de ez sem jelentett végleges megoldást, mert a fúvót így is csak 70% terhelésig lehetett használni.

Ezután a pontos tengelybeállítás és a rezgéselnyelő talpak cseréje a rezgéseket átmenetileg csökkentette, azonban 2011-ben ismét növekedést tapasztaltunk.

Ekkor javasoltam a motor elektromos ellenőrzését, bár a 2009-es jegyzőkönyvek szerint a motor felújítása rendben volt. Az álló és forgórész elektromos ellenőrzése, a mágneses mező ingadozását jelezte, amely forgórész excentrikusságára, vagy kalicka repedésére utalt. A kalicka repedés kizárására endoszkópos vizsgálatot végeztünk (úgy gondoltuk ezt a felújítás során észrevették volna), ez azonban negatív eredménnyel zárult, a forgórész mindkét végén olyan mértékű repedéseket tapasztaltunk, hogy a gép azonnali leállítását és a forgórész újbóli felújítását javasoltam az üzemeltető cégnek, amelyet 2011 év végére tudtak elvégezni.

A légfúvó műszaki állapotában bekövetkezett változás, konklúzió:

A javítás után a veszélyes rezgések látványosan elfogadható szintre csökkentek, jelenleg nem csak a motoron, hanem a hajtóművön és a vázszerkezeten is jó rezgésszint és megfelelő műszaki állapot tapasztalható. A 7. ábra spektrumaiban egyértelműen beazonosíthatók, követhetők a hibás és jó műszaki állapot rezgésamplitúdói, melyek szemléletesen bizonyítják, hogy a forgórész kalicka csere elérte célját, a légfúvó újra 100%-os terhelésen üzemeltethető.

5. KÖVETKEZTETÉSEK

A kísérleti mérésekkel bizonyítottam, hogy a „Vibshape” mozgás-animációs szoftverrel és Easy Viber64 rezgés-analizátorral láthatóvá tehető, mérhető és elemezhető a gépszerkezetek üzem közbeni mozgása. A kísérletek során az általam létrehozott mesterséges hibákat, az animáció a valóságnak megfelelően jelenítette meg. A légfúvó saját mérési tapasztalatomból vett példáján keresztül igazoltam, hogy a módszer az ipari gyakorlatban is jól alkalmazható, hatékonyan kiegészíti a spektrum analízis által szolgáltatott információkat.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk és előadás a TÁMOP-4.2.1.B-11/2/KMR-2011-0001 „Kritikus infrastruktúra védelmi kutatások” projekt kutatási eredményeinek felhasználásával készült. „A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.”

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Szabó József Zoltán : Rezgésdiagnosztikai vizsgálatok és haditechnikai alkalmazhatóságuk kutatása Doktori Ph.D. értekezés ZMNE, 2011.
 Rahne Eric: Gépszerkezetek mozgás-animációs vizsgálata PIM Kft. Kiadványa, 2004.
 www.pim-kft.hu
 EasyViber 64 Felhasználói kézikönyv VMI AB, Norrköping, 2000
 Vibshape Manual Használati utasítás, VMI AB, Norrköping, 2002