

Gépalapok hibáinak kimutatása és javítása

Édelmayer János (Alfatec Kft.)-Péczely György (A.A. Stádium Kft.)

Bevezetés

A hagyományos karbantartói megközelítés szerint, ha egy berendezés visszatérően meghibásodik és a hiba kiváltó oka nem azonosítható, akkor feltehetően a gépalap nem funkcionál megfelelően.

A hagyományos rezgésdiagnosztikai megközelítés szerint, ha a rezgési spektrumban a fordulatszámú második harmonikushoz tartozó amplitúdó érték nagy, akkor feltehetően a gépalap nem funkcionál megfelelően.

Mindkét megközelítés számos bizonytalanságot tartalmaz és ezért az üzemeltető-karbantartó nehezen szánja el magát a gépalap javítására, hiszen az egyben költséges és időigényes művelet is. A hagyományos gépalap javítási módszerek ráadásul számos esetben nem hozzák meg a várt eredményt, tehát mindenki joggal tart e beavatkozástól.

A rezgésdiagnosztika általánosan még nem elterjedt, korszerű eszközei módot adnak arra, hogy a gépalapok meghibásodását egyértelműen és ráadásul a laikus (nem rezgésdiagnosztika) számára is meggyőzően detektáljuk.

Ma már létezik olyan gépalap javítási technológia, amely megbízhatóan jó eredménnyel jár.

Az előadás azokkal a korszerű rezgésvizsgálati eljárásokkal foglalkozik, amelyek lehetővé teszik a gépalaphibák kimutatását továbbá ismerttet egy korszerű alap javítási technológiát.

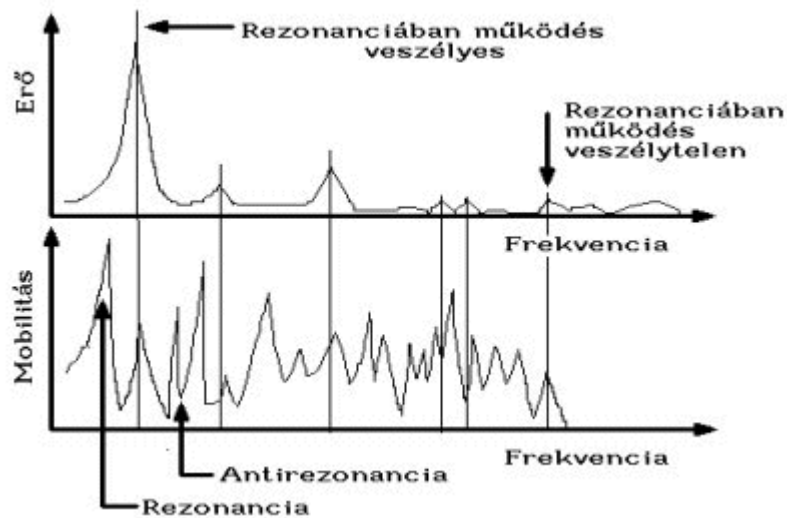
A gép rezonancia frekvenciája és a gépalap

A forgórészek rezgésvizsgálatánál gyakori jelenség a **rezonancia bekövetkezése**. Szerencsés esetben a forgórész a rezonanciaponton csak áthalad felfutás vagy leállítás közben, rosszabb esetben annak közelében vagy épp azon üzemel.

Rezonanciában való üzemelés

*A rezonanciában való üzemelés igen gyakran téves diagnózisok kiinduló forrása. Amennyiben a mobilitási spektrumon és a várhatóan gerjesztett spektrumon az egyes csúcsok egybeesnek (azaz ott jelentkezik számottevő gerjesztést, ahol a szerkezet mobilitása nagy), akkor a berendezés **elvileg** rezonanciában üzemel és ez alkalmas arra, hogy az egész berendezést "berázza", esetleges géptörés, kapcsolódó technológiai rendszer törésének kiinduló pontja legyen.*

A gyakorlatban, szerencsére, csak az első néhány száz Hz-es egybeesés veszélyes, mert a magasabb frekvenciákon keletkezett rezgések energiái igen csekélyek és a szerkezetek csillapítóképessége a frekvencia növekedésével rohamosan növekszik. A jelenséget az 1. ábra szemlélteti. [1]



1. ábra Egy forgógép tipikus erőspektruma és az ugyanazon a ponton felvett mobilitás görbe

Az 1. ábrán ismertetett esetről a mobilitás spektrumon hiába találhatunk már az első csúcsonál erőteljes rezonanciás kiemelést, nem veszélyes a helyzet, mivel az erőspektrumban e frekvencián nincs számottevő gerjesztés. A mobilitási görbe második rezonanciás csúcsa viszont egybeesik egy jelentős erőgerjesztési frekvenciával, ez az állapot már veszélyes.

A rezonanciaponton való áthaladás a forgórészre, az egész berendezésre és a környezetre is veszélyes lehet. A szükséges óvintézkedések megtételéhez mindenképpen szükséges tudni, hogy a forgórész mikor, milyen módon halad át a rezonanciaponton vagy pontokon.

Más esetben a **rezonanciapont eltolódása** adhat arról információt, hogy a vizsgált egység mechanikai állapota megváltozott.

Harmadrészt előfordulhat, hogy a berendezésen, vagy annak egy részén, átalakítást kívánnak végrehajtani (pl. az alapozás tömegét növelni), de mivel **az átalakítás a rezonanciapontot megbecsülhető irányban eltolja**, ezért szükséges tudni, hogy a rezonanciapont és a főbb gerjesztési frekvenciák hogyan helyezkednek el egymáshoz képest a frekvenciaskálán. Ebben az esetben az átalakítás veszélytelenségének vagy épp veszélyességének előrejelzése a cél.

A **rezonanciafrekvenciák megállapítására** több eljárás is elterjedt:

- a **számításos** módszerek közül a legismertebb a végesselelemes modellezés,
- a **kísérleti eljárások** közül egyszerűbb esetben **impulzusszerű gerjesztésnek** (pl. kalapácsütés) teszik ki a rendszert, és a válaszfüggvényből következtetnek a rezonanciafrekvenciákra,
- bonyolultabb eset, amikor **a bemenő jelet pl. egy erőmérő szondával, a válaszfüggvényt gyorsulásérzékelővel méri**, és a két jel hányadosából határozzák meg akár a mobilitás (rendszer válasz/input erő), akár pedig a mechanikai impedancia (input erő/rendszer válasz) függvényt,
- lehetséges külön e célra kifejlesztett **rezgékeltővel is gerjeszteni** a vizsgált tárgyat, amelyre szinte tetszés szerinti bemenő jelet vihetünk föl.

Míg a számításos módszer igen nagy munkaigénnyel jár, és sok a tévesztési lehetőség, a bonyolultabb módszerek esetén a műszerezettség erőteljes kiterjesztése szükséges; az ütésiimpulzusos módszerrel pedig egy nagytömegű berendezés hatékonyan nem gerjeszthető, ráadásul nagysebességű valós idejű analizátort igényel.

Amennyiben mégis szeretnénk megtudni a vizsgált berendezés sajátfrekvenciáját két reális lehetőség áll

rendelkezésünkre. Az egyikhez szükséges a környezet intenzív, szélessávban jelen levő fehér zaja, a másik a leállásvizsgálat.

Mint azt a [2] számú irodalom is leírja, akkor, ha a gépházban, ahol több egység is működik, de ezekről nem diszkrét frekvenciájú rezgés és zaj, hanem fehér zaj érkezik a vizsgálandó gépre, akkor annak felületén bizonyos sajátfrekvenciák kiemelkednek. Ez azonban ritka eset.

A felfutás-leállásvizsgálat során a berendezés zérus és üzemi fordulatszám között változtatja sebességét, a kiegyensúlyozatlanság eredetű erő frekvenciája áthalad valamennyi üzemi fordulatszám alatti frekvencián, míg a felharmonikusok magasabb kiindulási frekvencia és névlegesen 0 Hz között pásztázzák végig a frekvenciatartományt. Azokon a frekvenciákon, amelyek megegyeznek a vizsgált egység valamely sajátfrekvenciájával, a válaszrezgés amplitúdója megnövekszik.

A gépalaphibák szempontjából a rezonancia frekvencia jelentkezésének mindhárom válfaja érdekes lehet.

Az első esetben a rezonancia frekvencián való működés azt jelentheti, hogy a gépalap **tervezése hibás vagy**, ami a valószínűbb, hogy az elkészítés **technológiája volt nem megfelelő**. A **változó frekvencián** jelentkező rezonancia arra utalhat, hogy a **gépalapban a hiba kiterjed**. A gépalap **javításánál** annyiból fontos a rendszer rezonancia frekvenciáinak az ismerete, hogy **elkerülhessük a rezonancia frekvenciák valamelyikének a gerjesztési frekvenciák valamelyikére történő ráhangolását**.

Rezonancia frekvencián üzemelő ventilátor leállásvizsgálata

Az 1. példa egy ventilátorhoz kapcsolódik, amely egy cementgyárban fontos technológiai szerepet tölt be. A berendezés fordulatszáma változtatható és az üzemeltetők panasza szerint a berendezés "időnként erősen rezeg".

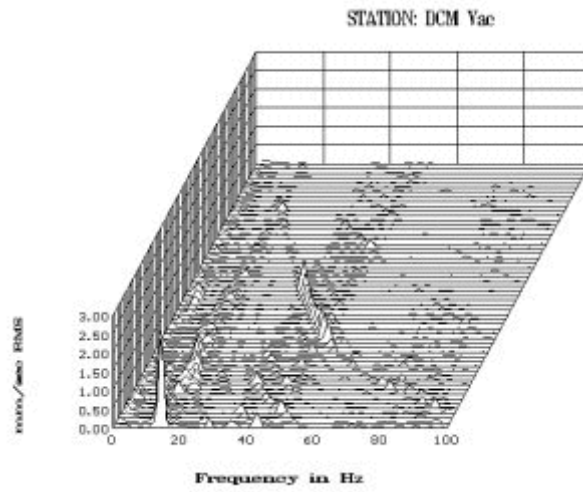
Vizsgálatunk első lépésében a ventilátor motortól távolabbi csapágyán 8,6 mm/s-os rezgésszintet mértünk az üzemi fordulatszámon, a spektrumon még egy jelentős csúcsot észleltünk, amely a nem tökéletes tengelykapcsoló beállítástól származott.

A tengelykapcsolat megbontása után kérésünkre a villamos motort teljes fordulatszámra felpörgették, majd a gerjesztést levéve engedték "kifutni". A ventilátor előbb említett mérési pontján rögzítettük a csapágyház rezgési spektrumát 4 másodpercenként (miközben a motor lassulva pörgött és a ventilátor állt). A motort ez esetben tehát mint rezgésgerjesztőt használtuk fel a mérendő objektum (a ventilátor és gépalap) vizsgálatához.

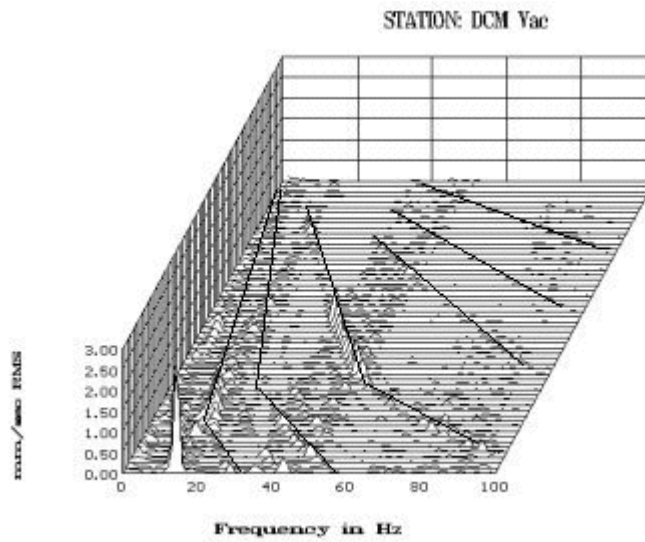
A felvett spektrumokat időrendbe állítva kaptuk meg az ún. vízésés vagy kaszkád diagramot, amit a 2. ábra mutat.

Érdeemes megfigyelni, hogy két típusú vonulat halad végig az ábrán. Az egyik csoport tagjai a névlegesen 0 Hz pontba legyezőszerűen összeszűkülve futnak be (3. ábra). Ezek a fordulatszámú frekvenciához és felharmonikusaihoz tartozó csúcsok. A másik csoport független a fordulatszám változástól (4. ábra), és ennek megfelelően párhuzamosak a fordulatszámú tengellyel. Ezek a kiemelkedések a rezonanciás sávokat jelzik.

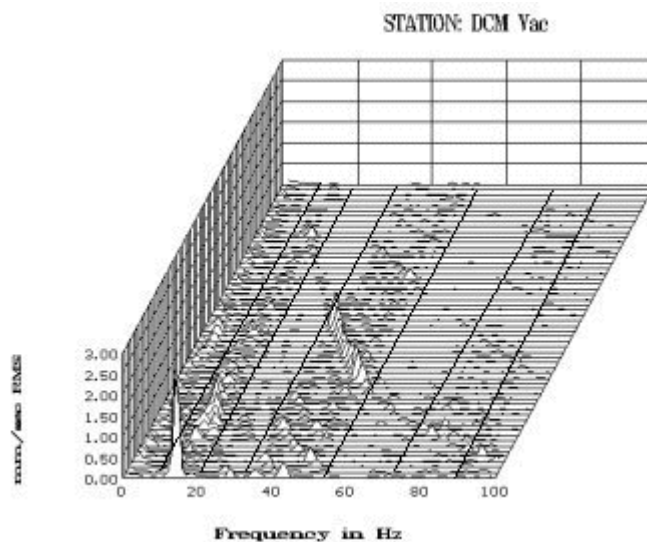
Az 5. ábra az előző vízésés diagramot mutatja beforgatva, azaz valamennyi spektrumot egymásra rajzoltattuk. Tisztán kivehető, hogy a vizsgált rendszer rezonancia fő frekvenciasávjai 12-16, 34-50 és 79-96, ami a jelen esetben veszélyes, mivel a berendezés üzemi fordulatszáma 780 és 960 között változik, ami 13-16 Hz-es tartománynak felel meg.



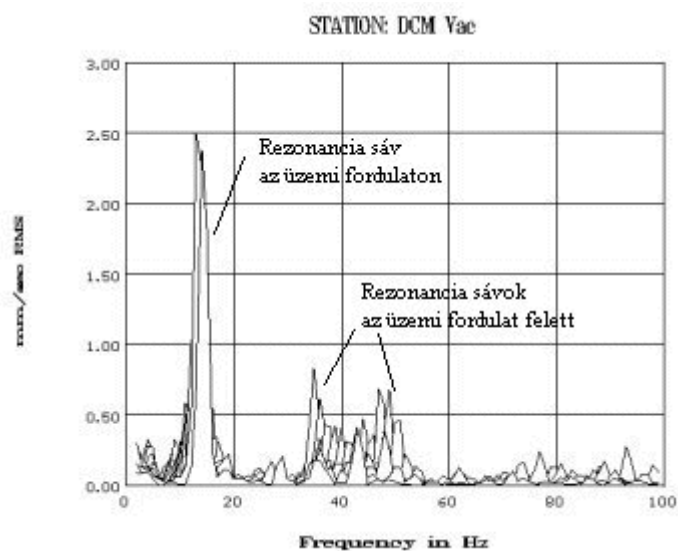
2. ábra Ventilátor leállásvizsgálata (vizesésdiagram)



3. ábra A legyezőszerűen összefutó vonalak a fordulatszámhoz és felharmonikusaihoz tartoznak



4. ábra A fordulatszámától független kiemelések jelzik a rezonanciás jellegű sávokat



5. ábra Ventilátor leállásvizsgálata. Az üzemi fordulatszámmon rezonancia van

A berendezés alapozásánál a részletesebb vizsgálat repedést állapított meg, feltehetően ez volt a rezonanciás állapot okozója és egyben következménye is. Amennyiben a gépalap együtt dolgozó tömege csökken, a rendszer rezonancia frekvenciája növekszik és így ráhangolódik az üzemelési fordulatszámra. A rezonanciás állapot ugyanakkor sietteteti az alaphiba kiterjedését és ezért a folyamat gyorsuló tendenciájú.

Mozgásanimációs vizsgálat

A gépalapok és géprögzítések hibás működésének felismerése és a hiba szemléletes bemutatása legjobban az ún. mozgásanimáció módszerével oldható meg.

A fejlett ipari államokban is még alig 3-4 éve jelent meg ez az eljárás. Lényege, hogy a vizsgált szerkezetet a végeselemes elemzéshez hasonlóan hálózatszerűen felosztják és az egyes hálózati csomópontokban mérik a rezgési spektrumot és a főbb összetevőkhöz tartozó fáziskomponenseket. Az animációs elv feltételezi, hogy az egyes harmonikusok amplitúdóinak fázisszögei egymáshoz képest állandó szögeltérésben vannak, és e szöghelyzetek a gép forgási tengelyén kijelölt referenciaponthoz képest is állandóak.

Mérve a hálómodellen a rezgéseket és a hozzájuk tartozó fáziszöveket a tér három irányában, számítógépen modellezhető a test egészének a rezgőmozgása. A modellezés eredménye lehet az egyes repedések és anyagfolytonossági hibák, rögzítési problémák kimutatása, láthatóvá tétele.

Az animációs vizsgálat első lépése a geometriai modell megalkotása. E lépésben szükséges egy alappont kijelölése, melyhez képest az egyes csomópontok helyzetét megadhatjuk. Az egyes csomópontokban meg kell adni a mérési irányokat és szöghelyzeteket is. Az 6. ábra és az 1.-3. táblázat mutatja be egy konkrét gépalap animációs ellenőrzése során felvett geometriát, illetve a mérési pontok és irányok megadását.

A geometriai modell három részből áll. Az első rész adja meg a mérési pontok elhelyezkedését a térben. A második részben meg kell adni, hogy mely pontok állnak összeköttetésben egymással, végül meg kell adni, hogy a mérést mely irányból (x, y, z) kívánom végrehajtani, az 6. ábrának megfelelően.

1. táblázat A mérési csomópontok elhelyezkedése a geometriai modellen (részlet)

Mérési pont száma	x koordináta (cm)	y koordináta (cm)	z koordináta (cm)
1	0	0	50
2	0	145	50
3	0	245	50
4	345	245	50
5	345	122	50
6	345	0	50
7	110	0	50
8	0	0	150
9	0	145	150
10	0	245	150
11	170	245	150
12	345	245	150
13	345	122	150
14	345	0	150
15	110	0	150
16	0	0	300

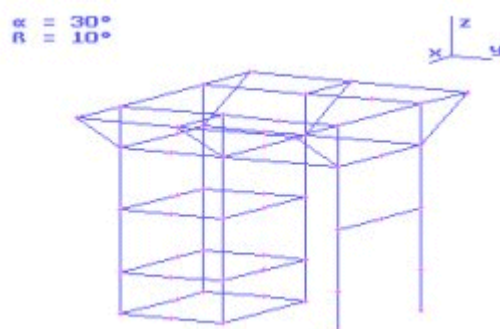
2. táblázat Mérési pontok összekötése (részlet)

sorszám	indul	végez
1	1	2
2	2	3
3	3	4
4	4	5
5	5	6
6	6	7
7	7	1
8	8	1
9	8	9
10	9	10
11	10	3
12	10	11
13	12	13
14	13	14
15	14	6

3. táblázat Mérési irányok a geometriai modellen (részlet)

sorszám	mérési pont	szöghelyzet (1) [fok]	szöghelyzet (2) [fok]
1	1	180	0
2	1	0	-90
3	1	90	0
4	2	180	0
5	2	0	-90
6	2	90	0
7	3	180	0
8	3	0	-90
9	3	90	0
10	4	0	0
11	4	0	-90
12	4	90	0
13	5	0	0
14	5	0	-90
15	5	90	0

Az alap magassága 6, szélessége 4.5 hosszúsága 7.3 méter. A rajta üzemelő berendezés egy villamos motorral hajtott dugattyús kompresszor, melynek fordulatszáma 360 percenként.



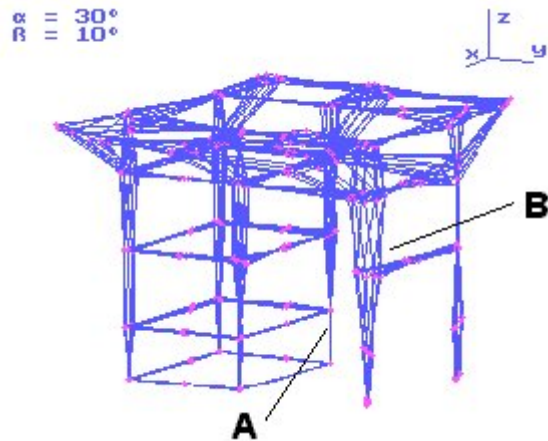
6. ábra Gépalap geometriai modellje

A következő lépés a mérés elvégzése, mely során felvételre kerül a rezgési spektrum és a fontosabb harmonikusokhoz tartozó fázishelyzet is. A mérési eredmények egy részletét mutatja a 4. táblázat.

4. táblázat Mérési eredmények az 1. és 2. pont x-y-z mérési irányán (részlet)

mérési hely	amplitúdó (*0,01mm)	fázis (fok)
1	4,6	287
2	5,9	211
3	6,0	110
4	1,2	117
5	6,6	171
6	6,8	311

Az utolsó lépés az animációs kép létrehozása és értékelése. A dolgozat természetesen nem mutathatja be a mozgási képet, de a 7. ábra az egyes pontok pályagöreibét jeleníti meg a geometriai modellen.



7. ábra Animációs ábra ($Q_k=0.1583$)

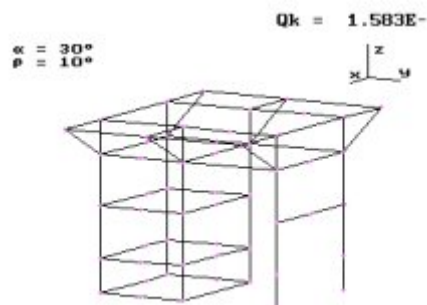
A kép láthatóságát egy Q_k arányossági tényező segíti. Ez a szám minél kisebb, annál kisebb a mért értékek szükséges nagyítása.

Az ábrán jól látható, hogy a nyíllal és A betűvel jelzett él nem mozog együtt a hasonló helyzetű többi három éllel. Mivel ez a szakasz nem dolgozik együtt a fölötte levő szakasszal, feltehető volt, hogy repedés a jelenség oka. Az ábrán nyíllal és B betűvel jelzett részen látható, hogy nem működik szimmetrikusan a mellette levő hasonló pillérrel. A keringési görbe jellege és nagysága sejtetni engedi, hogy a nyíllal jelölt részen jelentős az anyaggyengülés.

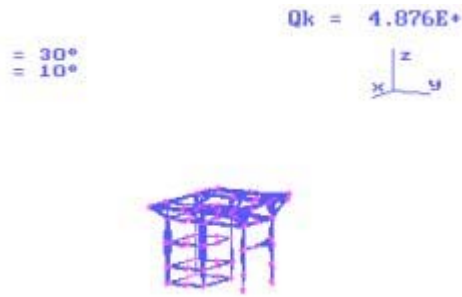
A szerkezet vizsgálata során az A-val jelzett részen valóban repedést észleltek és a B-vel jelzett részen görögdinnye nagyságú térfogatból elporladt a beton.

A javítási munkálatok elvégzése után megismételtük a mérést a javított gépalapon, majd egy olyanon, amelynél az építési technológia betartását a megrendelő szakemberei végig ellenőrizték és amelynek a működésével a későbbiekben elégedettek voltak. A 8. ábra a 7. ábrán bemutatott gépalap animációs rezgésképét mutatja a 7. ábrával azonos léptékben.

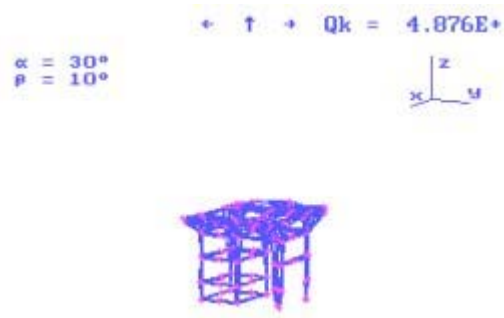
A 9. ábra javítás utáni animációs képet mutatja olyan léptékezésben, amely a láthatóságot optimálissá teszi. Ugyanebben a léptékezésben a 10. ábra mutatja a "jó gyártási technológiával gyártott" és a 11. ábra a hibás gép, javítás előtti mozgási képét.



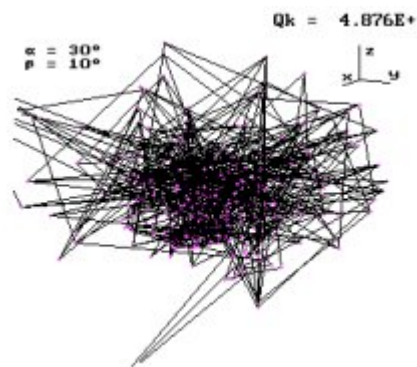
8. ábra Gépalap javítás utáni animációs rezgésképe ($Q_k=0.1583$)



9. ábra Gépalap javítás utáni animációs rezgésképe ($Q_k=4,876$)



10. ábra Javítatlan, de jó állapotú gépalap animációs rezgésképe ($Q_k=4,876$)



11. ábra Javítatlan és rossz állapotú gépalap animációs rezgésképe ($Q_k=4,876$)

Az ábrák összehasonlításából kitűnik, hogy a legjobb rezgésértéket a javított egységnél sikerült elérni. A javítás eredményeként a rezgésszint nagyságrendekkel csökkent.

Összefoglalás

A gépalapok rezgésvizsgálata a korszerű mérési módszerekkel nagy biztonsággal valósítható meg. A leállásvizsgálat segítségével az esetleges rezonanciák, az animációs mérésekkel pedig a repedések, fellazulások azonosíthatók.

A korszerű gépalapjavítási módszerek segítségével rendkívül jó eredmények érhetők el, nincs szükség az alapozás teljes cseréjére.

Felhasznált irodalom:

[1] Mitchell, J.S.: Machinery Analysis and Monitoring, Tulsa, PennWell Books, 1981.

[2]*Péczely, Gy.*: Vibration Analysis Of Gas-Engine Units, IMMD Conference, Las Vegas 1989 szeptember