

Gépalapok hibájának kimutatása rezgésvizsgálattal

DR. PÉCZELY GYÖRGY*

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 gépalapjavítási 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 nem rezgésdiagnosztika szakember számára is meggyőzően detektáljuk.

Ez az írás azokkal a korszerű rezgésvizsgálati eljárásokkal foglalkozik, amelyek lehetővé teszik a gépalaphibák kimutatását.

Alapfoglamak

Mobilitás (mozgékonyosság): A mechanikus rendszer valamely pontjában mért sebesség és a harmónikus mozgásban levő ugyanazon rendszernek ugyanabban, vagy egy másik pontjában mért erő közötti komplex arány.

* A.A. Stádium Kft.

Rezonancia: A gerjesztett rezgési rendszernek akkor van rezonanciája, amikor a gerjesztési frekvencia, bármilyen csekély pozitív, vagy negatív változtatásra is a rendszer reakció csökkenéséhez vezet.

Rezonancia-frekvencia: Olyan frekvencia, amelyen rezonancia lép fel.

Antirezonancia: A gerjesztett rezgési rendszernek akkor van rezonanciája, amikor a gerjesztési frekvencia, bármilyen csekély pozitív, vagy negatív változtatásra is a rendszer reakció növekedéséhez vezet.

A gép rezonancia frekvenciája és a gépalap

A forgórészek rezgésvizsgálatánál gyakori jelenség a rezonancia. Szerencsés esetben a forgórész a rezonancia-frekvencián csak áthalad felfutás vagy leállás 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 "mozgékonyága" nagy), akkor a berendezés rezonanciában üzemel és ez alkalmas arra, hogy az egész egységet "berázza", esetleges géptörés, kapcsolódó technológiai rendszer törésének kiinduló pontja legyen. A jelenséget az 1. ábra szemlélteti.

A gyakorlatban, szerencsére csak az első néhány száz Hz-es egybeesés veszélyes, mert a magasabb frekvenciákon keletkezett rezgések energiái igen csekélyek.

lyek és a szerkezetek csillapítóképessége a frekvencia növekedésével rohamosan növekszik.

Az 1. ábrán ismertetett esetről a mobilitás-spektrumon hiába találunk már az első csúcson erőteljes rezonanciás kiemelést, nem veszélyes a helyzet, mivel az erős spektrumban e frekvencián nincs számottevő gerjesztés. A mobilitási görbe második rezonanciás csúcsa viszont egybeesik egy jelentős erőgerjesztési frekvenciával. Ez az állapot már veszélyes - tehát csak az a rezonancia okoz problémát, ahol gerjesztés is jelen van.

Nem csak a rezonanciában való üzemelés vagy annak elkerülése fontos. A kritikus fordulatszámokon való áthaladás, a rezonanciafrekvencia eltolódása vagy pusztán ismerete is számos esetben szükséges.

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. Általában cél a berendezést a rezonanciaponton a lehető leggyorsabban túljuttatni.

Más esetben a rezonanciapont eltolódása adhat arról információt, hogy a vizsgált egység mechanikai állapota megváltozott. Ilyen változás lehet pl. a tengelyrepedés, egy rögzítés kiesése vagy a készülék ház, csővezeték nem látható károsodása - pl. tömegvesztése. (Kocogtassunk meg egy vízzel telt poharat, öntsük ki a víz felét és kocogtassuk meg ismét. A "szerkezet" hangja megváltozik.)

Harmadrészt előfordulhat, hogy a berendezésen, vagy annak egy részén, átalakítást kívánnak végrehajtani (pl. az alapozás tömegét növelni vagy a meglévő földemre egy újabb berendezést elhelyezni). 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. (Az ipari gyakorlatban hosszasan sorolhatjuk azokat az eseteket, amikor "próba - szerencse" alapon avatkoztak be egy bonyolult szerkezetbe, elmozdították a rezonanciákat és az addig hibátlanul üzemelő berendezés a környezet "fő rezgés- és zajforrása" lett, ráadásul gyakori kényyszerleállást okozott.)

A rezonanciafrekvenciák megállapítására több eljárás is elterjedt:

- a számításos módszerek közül a legismertebb a végeselemes modellezés,
- a kísérleti eljárások közül egyszerűbb esetben impulzus-szerű gerjesztésnek (pl. kalapácsütés) teszik ki a rendszert, és a válaszfüggvényből következtetnek a rezonanciafrekvenciákra (ld. pohárkocogtatás),
- bonyolultabb eset, amikor a bemenő jelet pl. egy erőmérő szondával, a válaszfüggvényt gyorsulásérzékelővel mérik, 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 rezgés-keltővel is gerjeszteni a vizsgált tárgyat, amelyre szinte tetszés szerinti bemenő jelet vihetünk föl.

A számításos módszer igen munkaigényes, és sok a tévesztési lehetőség. A bonyolultabb módszerek esetén a műszerezettség erőteljes kiterjesztése szükséges. Az ütésimpulzusos módszerrel egy nagytömegű berendezés hatékonyan nem gerjeszthető, emellett nagysebességű valós idejű analízátort igényel.

Amennyiben mégis szeretnénk megtudni a vizsgált berendezés sajátfrekvenciáját két reális lehetőség áll rendelkezésünkre. Az egyikhez szükséges a környezet intenzív, széles sávban jelen levő zaja, a másik a leállásvizsgálat.

Ha a gépházban, ahol több egység is működik, de ezekről nem diszkrét frekvenciájú rezgés és zaj, hanem széles sávban közel azonos intenzitású 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 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 rezonanciafrekvencia jelentkezésének mindhárom válfaja érdekes lehet.

Az első esetben a rezonanciafrekvencián való működés azt jelentheti, hogy a gépalap tervezése hibás, vagy ami a gyakorlat alapján valószínűbb, az elkészítés technológiája nem felelt meg az előírásoknak. A változó frekvencián jelentkező rezonancia arra utalhat, hogy a gépalapban a hiba terjed. A gépalap javításánál annyiból fontos a rendszer rezonanciafrekvenciáinak az ismerete, hogy elkerülhessük a gerjesztési frekvenciák valamelyikére történő ráhangolást.

Rezonanciafrekvencián üzemelő ventilátor leállásvizsgálata

Az első példa 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 fordulatszámra. A spektrumon még egy jelentős csúcsot észleltünk, amely a nem tökéletes tengelykapcsoló beállításától 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 kb. 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 elemei 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 Hz közöttiek, ami a jelen esetben veszélyes, mivel a berendezés üzemi fordulatszáma 780 és $960 \frac{1}{\text{min}}$ között változik, ami 13-16 Hz-es tartománynak felel meg.

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 re-

zonanciás állapot ugyanakkor sietteti az alaphiba kiterjedését, ezért a folyamat gyorsuló tendenciájú.

A leállásvizsgálathoz olyan nagysebességű FFT analizátor szükséges, amely segítségével a vizsgált berendezés leállása során legalább 12 spektrumot tudunk rögzíteni. A mérést 0 és az üzemi fordulatszám legalább kétszeres frekvenciája között kell elvégezni, legalább 1 Hz-es felbontással.

Mozgásanimációs vizsgálat

A gépalapok és géprögzítések hibás működésének felismerése és a hiba szemléletes bemutatása legjobban az ún. mozgásanimációs módszerrel oldható meg. A fejlett ipari államokban 4-5 éve jelent meg ez az eljárás. Lényege, hogy a vizsgált szerkezetet a végeselemes eljáráshoz hasonlóan hálózatszerűen felosztják és az egyes hálózati csomópontokban mérik a rezgési spektrumot és a főbb összetevőkhöz tartozó fázisértékeket. 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 fázisszögeket a tér három irányában, számítógépen modellezhető a test egészének a mozgása. 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 határozni a mérési irányokat és szöghelyzeteket is. A 6. ábra és az 1.-3. táblázat mutatja be egy konkrét gépalap animációs ellenőrzése során felvett geometriát, illetve a mérési pontok és irányok megadását.

Az alap magassága 6,0; szélessége 4,5; hosszúsága pedig 7,3 méter. A rajta üzemelő berendezés egy villamos motorral hajtott dugattyús kompresszor, melynek fordulatszáma $360 \text{ }^1/\text{min}$.

A következő lépés a mérés elvégzése, mely során felveszik a rezgési spektrumot és a fontosabb harmonikusokhoz tartozó fázishelyzeteket is. A mérési eredmények részletét mutatja a 4. táblázat.

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

A kép láthatóságát a 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 levővel, feltehető, hogy repedés a jelenség oka. Az alap nyíllal és B betűvel jelzett részén 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 utólagos vizsgálata során az A-val jelzett részen valóban repedést észleltek, a B-vel jelzett részen pedig 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 megren-

delő szakemberei végig ellenőrizték és amelynek a működésével a későbbiekben elégedettek voltak. A 8. ábra a 7. ábrán bemutatott gépalap animációs rezgésképét mutatja azonos léptékben.

A 9. ábra a 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.

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

A gépalapok rezgésvizsgálatának hazai művelői és eszközei

A rezgésvizsgálatok e nem szokványos módszereit megfelelő szoftver és műszerezettség hiányában igen kevesen végzik Magyarországon.

A felfutás-leállítás vizsgálattal konferenciákon, szakcikkekben és előadásokon csak az A.A. Stádium Kft. nevével találkoztunk. A szerző tudomása szerint e méréseket néhány nagyobb hazai erőműünkben is elvégzik a turbina-generátor egységek leállításakor.

Az ütésimpulzus vizsgálatot a szerző tudomása szerint szintén csak az előbb említett kft. végzi az országban.

Külső gerjesztéses vizsgálatot az Energopenta Kft. végez változtatható frekvenciát "leadó" mechanikus gerjesztővel.

Véges elemes vizsgálatokat műszaki egyetemeink és főiskoláink mellett a témával foglalkozó kutatóintézeteink is végeznek.

Mozgásanimációs elemzéseket az A.A. Stádium Kft. és az Energopenta Kft. végez. Az előbbi a legkülönbözőbb iparágakban (pl. olaj-, vegy-, papír-, üveg-, energetikai- és élelmiszeriparban), az utóbbi inkább az erőművekben.

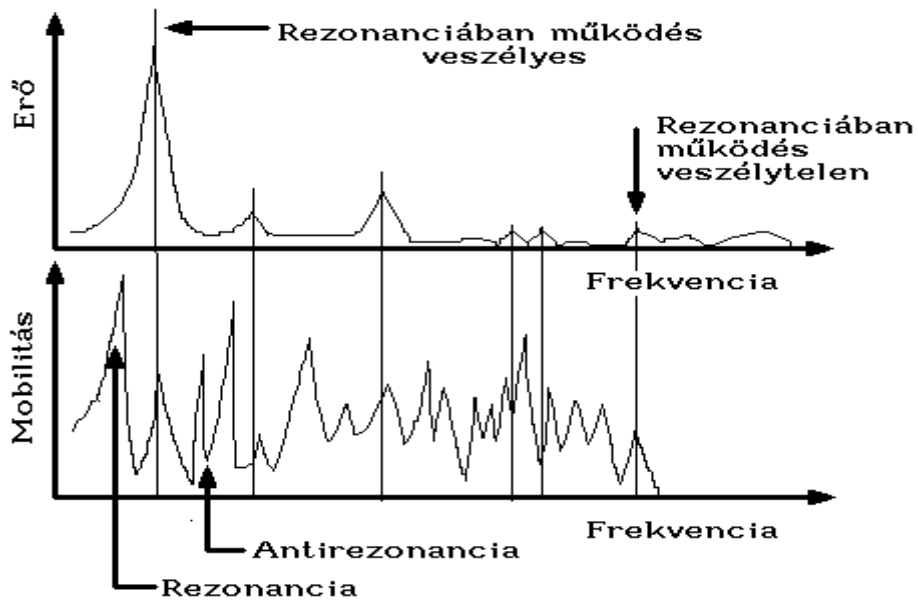
Összefoglalás

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.

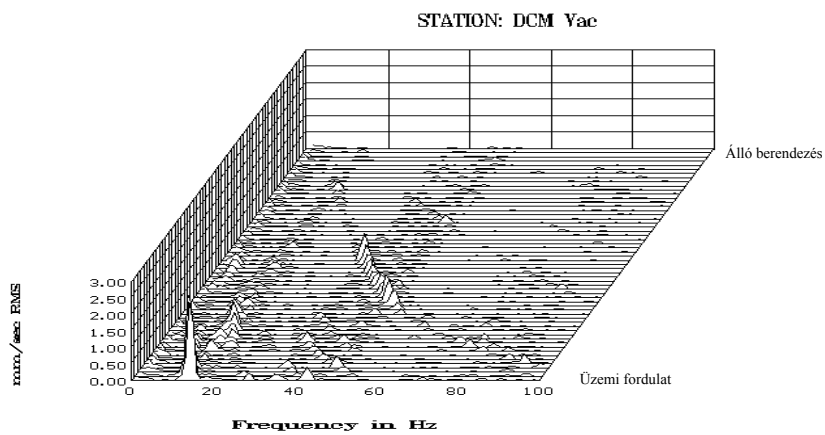
A korszerű gépalap javítási módszerek segítségével rendkívül jó eredmények érhetők el, nincs szükség az alapozás teljes cseréjére.

Felhasznált irodalom:

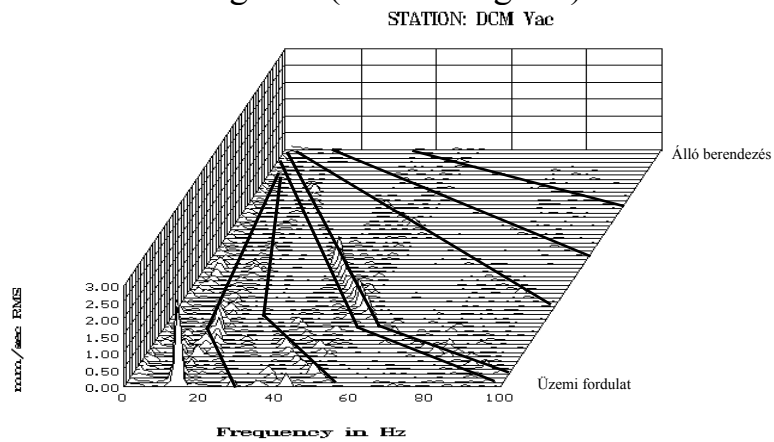
- [1] Mitchell, J.S.: Machinery Analysis and Monitoring, Tulsa, PennWell Books, 1981.
- [2] Péczely, Gy.: Vibration Analysis Of Gas-Engine Units, IMMD Conference, Las Vegas 1989 szeptember



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



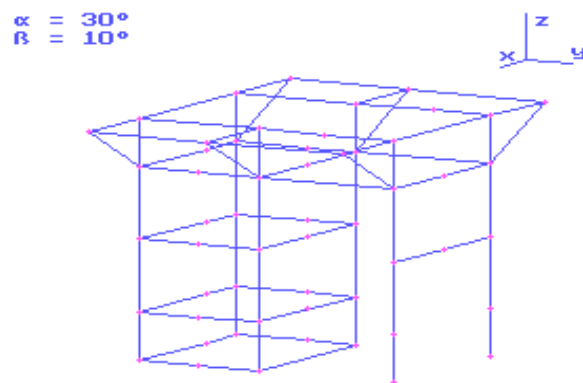
2. ábra Ventilátor leállásvizsgálata (vizesésdiagram)



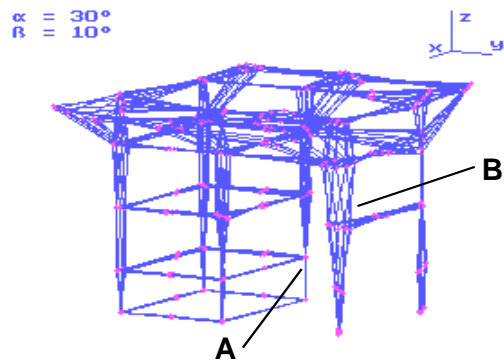
3. ábra A legyezőszerűen összefutó vonalak a fordulatszámhoz és felharmonikusaihoz tartoznak

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

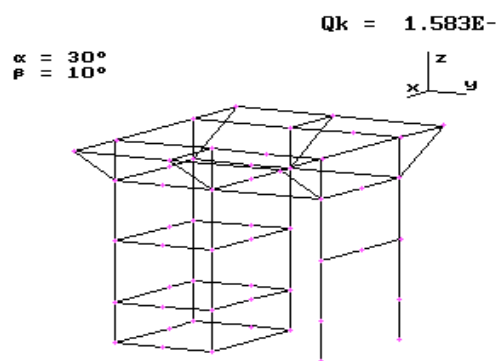
5. ábra Ventilátor leállásvizsgálata. Az üzemi fordulatszámon rezonancia van



6. ábra Gépalap geometriai modellje



7. ábra Animációs ábra ($Q_k=0.1583$)



8. ábra Gépalap javítás utáni animációs rezgésképe ($Q_k=1,583$)



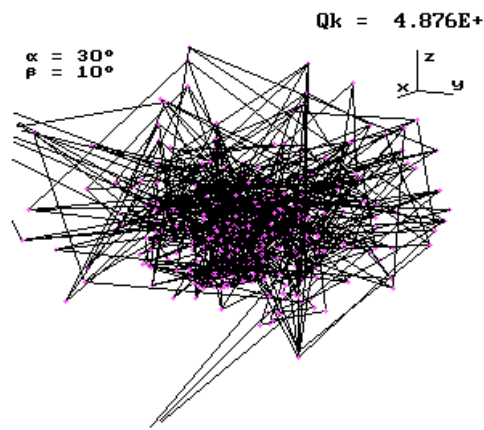
9. ábra Gépalap javítás utáni animációs rezgésképe ($Q_k=4,876$)

← ↑ → $Q_k = 4.876E+$

$\alpha = 30^\circ$
 $\beta = 10^\circ$




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



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

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

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

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

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