

GÉPALAPOK ÉS TARTÓSZERKEZETEK HATÉKONY ÁLLAPOTFELMÉRÉSE ODS-VIZSGÁLATTAL

Doboviczki István*

1.1 SZERKEZETELEMZÉS CÉLJA, ALKALMAZÁSI TERÜLETE

A termelőeszközök üzemeltetéséhez egyre pontosabb modellekre van szükség, hogy funkcióikat hibátlanul vagy megfelelően lássák el névleges és szélsőséges üzemi viszonyok között egyaránt. A versenyképes gyártás és üzemeltetés ma már nem képzelhető el számítógépes tervezés, modellezés nélkül, legyen szó kisméretű alkatrészről vagy összetett szerkezetéről. A modellalkotás módszerei egyre finomodnak, eszközei egyre nagyobb lehetőségeket kínálnak a műszaki alkalmazások esetén is. A műszaki modellezésnek számos elsődleges célja, és ipari alkalmazásokhoz közeli funkciója lehet, mint például:

- anyagismereti modell alkotása,
- statikai-, kinematikai-, lengéstanai modell felépítése,
- műszaki tervezés, termékfejlesztés,
- eszköz vagy folyamat működésének elemzése,
- állapot meghatározása, károsodások feltárása,
- szerkezeti rekonstrukció, műszaki-gazdasági döntés előkészítése.

A fizikai törvények, környezeti hatások ismerete, megfogalmazása, modellre való alkalmazása és „szűkítése” nagy körültekintést kíván. Egy-egy fontos paraméter figyelmen kívül hagyása, hatásának helytelen felmérése vagy értelmezése a kész szerkezet igénybevételekkel szembeni ellenállását jelentősen befolyásolja. A biztonságos működés érdekében ezért az analitikus, numerikus és kísérleti modellek képzésének nem alternatíváknak, hanem egymást kiegészítő tevékenységek kell lenniük.



1. ábra A Tacoma-híd leszakadása, 1940. november 7. Egy hibásan kialakított modellnek katasztrofális következményei lehetnek. [1]

*gépészmérnök, mérés- műszaki diagnosztikai mérnök, karbantartás-tervező mérnök, e-mail: doboviczki.istvan@gmail.com

1.2 SZERKEZETI MODELLEK ÉS ALKALMAZÁSUK – FEM, EMA, ODS

A hagyományos analitikus modellek, módszerek továbbra is alkalmasak egyszerű tervezési feladatok elvégzésére. Egy kéttámaszú tartó statikus modelljének szilárdsági számításai hagyományos eszközökkel is viszonylag egyszerűen elvégezhetők, azonban bonyolultabb, dinamikus igénybevételek és hatásaik számításához numerikus, szimulációjához végeeselemes módszerek alkalmazása válik szükségessé. A modell peremfeltételeinek megadása hangsúlyos feladat, a termék élettartamát, üzemeltetési és gyártási költségeit alapvetően meghatározza.

1.2.1 Analitikus vagy numerikus modális elemzés

Az analitikus elemzés a matematikai modellezés eszközeit használja a szerkezet dinamikus tulajdonságainak – sajátfrekvenciák, csillapítási tényezők, lengésképek – meghatározására, folyamatosan finomítva a peremfeltételek, a merevség, a tömegeloszlás állapotainak hatását.

1.2.2 Végeeselemes analízis – Végeeselemes eljárás (FEM)

A végeeselemes módszer és -elemzés¹ az analitikus-numerikus eljárás alapjaira épülve, számítógépes feldolgozással részletesebb, pontosabb képet ad egy modell statikus és/vagy dinamikus viselkedéséről. A modell pontosításában nagy szerepe van a kísérleti úton, esetenként üzemi körülmények között rögzített mérési adatoknak, elemzésnek.

1.2.3 Kísérleti modális elemzés (EMA)

A kísérleti modális elemzés² egy létező rugalmas struktúrán végzett rezgésmérés alapján határozza meg a szerkezet dinamikus tulajdonságait, úgynevezett modális paramétereit, a modális frekvenciákat, a csillapításokat és modális mozgásmintákat. A modális modell készülhet arányos méretű másolatáról, prototípusról vagy üzemi környezetbe telepített szerkezetéről. A vizsgálat ellenőrzött, mesterséges körülmények között történik, külső gerjesztés alkalmazásával.

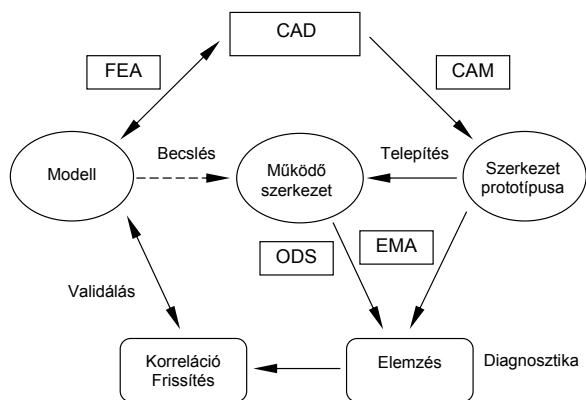
1.2.4 Működési elmozdulás minta – Lengésképek elemzés (ODS)

A működési elmozdulási minta³ – vagy üzemi lengésképek – egy állandósult vagy átmeneti üzemi viszonyok kö-

¹ FEM/FEA (Finite Element Method/Analysis)

² EMA (Experimental Modal Analysis)

³ ODS (Operating Deflection Shapes)



2. ábra. A tervezés, a gyártás és a dinamikus modellezési technikák kapcsolata. Az [2] kiegészítésével.

zött működő szerkezet dinamikus viselkedését jellemzi. Az elemzés adatai a belső gerjesztőerők és a szerkezet saját jellemzőinek (rezonancia-frekvencia, csillapítás, lengéskép) kombinációja. Előbbiek általában nem ismeretek, csak elméleti, tapasztalati ismeretek alapján számolható vissza vagy becsülhető forrásuk és mértékük. Az elemzés lehetőségei ezért korlátozottak, kevésbé alkalmas a szerkezetmódosítás következményeinek becslésére. Az ipari üzemeltetési gyakorlatban azonban a szerkezet funkcióképessége, maradék élettartama, állapota, a szerkezetben esetleg bekövetkezett károsodások mértéke és helye a fontos információ. Az ODS-modell a valós, üzemi körülmények között működő berendezés állapotát jellemzi, elemzésével az üzemeltetés, a karbantartás és karbantartás-tervezés számára szemléletes megjelenítéssel a megfelelő információkat nyújtja.

1.3 ODS-VIZSGÁLAT – „EZER SZÓ, EGY KÉP VAGY INKÁBB LENGÉSKÉP!”

Egy szerkezet bonyolultságával a dinamikus működésének leírásához szükséges adat mennyisége és az elemzésükhöz szükséges erőforrás mértéke hatványozódik az adatok közötti kapcsolatok vizsgálata miatt. Egy szerke-

zet rezgésmérése során keletkező több száz, ezer mérési adat geometriához való hozzárendelésével a szerkezet mozgó modellje, mozgásmintái létrehozhatók. A tömeges számsorok, a bennük rejlő összefüggések közvetlen numerikus vizsgálata helyett, a könnyebben felfogható mozgáskép teszi lehetővé a szerkezet hatékony elemzését.

Az ODS-vizsgálat ipari környezetben számos előnnyel bír más, modellezési vagy elemzési eljárásokkal szemben:

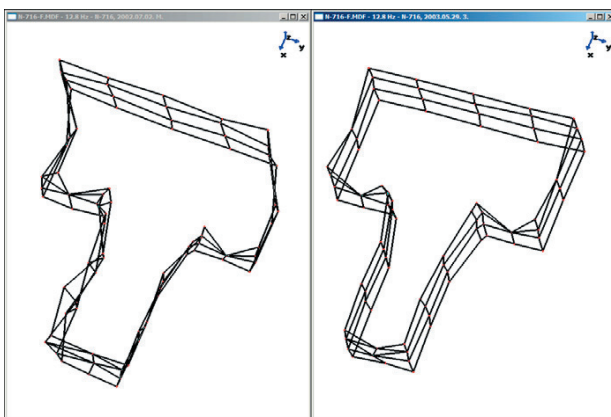
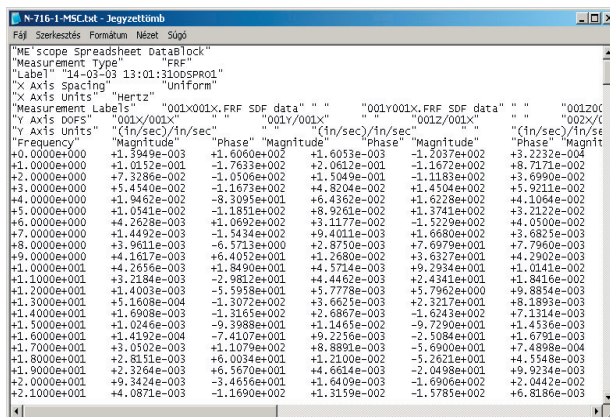
- A mérés üzem közben, a termelés megszakítása nélkül végezhető.
- A hagyományos rezgéselemzéshez képest nagyságrendekkel nagyobb adatmennyiség gyors kiértékelésére alkalmas.
- Gyorsabb eljárás, mint a FEM vagy az EMA.
- Nem szükséges hozzá speciális, külső gerjesztés.
- A szerkezet normál üzemi állapotát mutatja, károsodásairól, dinamikus állapotról általában megfelelő információt ad.
- Hatékony eszköz a hibaképek bemutatására.

A gerjesztések, és a rendszer saját jellemzőinek pontos ismerete nélkül az ODS-elemzés néhány korlátozással használható:

- Összetett gerjesztő- és lengőrendszer esetén a kiértékelés bizonytalanra válhat.
- Egy szerkezet ellenőrzött, szimulációs módosításához nem ad elegendő információt.
- EMA-modell csak további mérésekkel alkotható adataiból.
- FEM áttervezéshez mérési adatai közvetlenül nem használhatók.

Az ODS-vizsgálat eredményeit az ipari gyakorlatban a karbantartás, karbantartás-tervezés használja fel, például:

- üzemelő szerkezet hibáinak feltárására,
- javítások meghatározására és ütemezésére,
- költséges javítások, átalakítások műszaki indoklására,
- beruházás utáni állapot rögzítésére, kiértékelésére,
- javítás vagy beruházás garanciális feltételeinek ellenőrzésére.



3. ábra. Több ezer adat, vagy egyetlen mozgásmodell. Egy ODS-elemzés adatai és az adatokból készített ODS mozgásfázisok. A baloldali mozgáskép a javítás előtti, a jobboldali a javított gépalap állapotának lengésképe. [3]

1.3.1 Az ODS technológia jellemzői, technikái

Az ODS, vagy mozgásmodell egy szerkezet kijelölt pontjainak mozgását jeleníti meg, állandósult lengőrendszer esetén például a kiválasztott működési frekvencián vagy frekvenciákon.

Az ODS-elemzéshez létre kell hozni a vizsgált szerkezet modelljét. Első lépésként fel kell mérni a szerkezet geometriáját, károsodások potenciális helyeit, a fő gerjesztő erőket és hatásvonalait. Ellenőrző mérésekkel meg kell határozni a szerkezet kitüntetett működési frekvenciáit, és a mérést befolyásoló tényezőket. A rendelkezésre álló mérő- és elemző-eszközök függvényében meg kell határozni a méréshez használt technikát, ki kell jelölni a modell csomópontjait és a mérési irányokat. A kijelölt csomópontokon és irányokban a megállapított frekvenciatartományban rögzíteni kell a mérési adatokat. A mérési adatokat hozzá kell rendelni a geometria csomópontjaihoz megfelelő ODS-programmal, ezek után a szerkezet modelljének mozgásképe elemezhető.

A mozgást leíró, amplitúdó- és fázis adatokat rezgésméréssel kell rögzíteni. A rezgésadatok felvételének a szerkezet üzemétől, a rendelkezésre álló műszerektől függően több módja is lehetséges. A rendelkezésre álló eszközök adatrögzítési lehetőségei szerint az adatok felvétele elvégezhető:

- Egyetlen csatorna triggerelt⁴ jeléből.
- Kétszatornás adatfelvétellel.
- Többszatornás, párhuzamos adatrögzítéssel.

1.3.2 Előzetes vizsgálatok

A mérés végrehajtása előtt feltétlen meg kell győződni a folyamat jellegéről: előzetes mérésekkel érdemes bizonyosságot szerezni a mérési adatok várható pontosságáról, információt szerezni a szerkezet mérést befolyásolható jellemzőiről, például vizsgált frekvenciákhoz esetleg közel- vagy egybeeső rezonanciákról.

1.3.2.1 Szerkezet geometriája, üzemi jellemzők felmérése

A modell megalkotásához, és későbbi elemzéséhez tanulmányozni kell a szerkezet eredeti terveit, helyszínen a tervekhez képest megvalósított szerkezeteket. Meg kell ismerni annak gyártási technológiáját, az abból potenciálisan bekövetkező hibákat, kifejlődésük jellegzetességeit. Fel kell mérni a szerkezet jellegzetes igénybevételeit, üzemállapotait, azok jellegét.

1.3.2.2 Domináns frekvenciák, amplitúdók, irányok

A szerkezetre jellemző mozgás kitüntetett frekvenciáinak, amplitúdóinak meghatározásához első lépésben általában a hagyományos rezgésvizsgálati eljárások alkalmazhatók.

⁴ Trigger-jel, vagy indító jel. Valamilyen jól definiálható eseményből származik, és más jelek rögzítésének szinkronizálásához alkalmazható.

1.3.2.3 Fázisviszonyok ellenőrzése

Az ODS adatok különböző módokon rögzíthetők. A szerkezet stabil üzeme mellett lehetséges hosszabb időn keresztül, pontról pontra rögzíteni az ODS adatokat. Ez esetben fontos, hogy a vizsgálat teljes időtartama alatt a rendszer fázisviszonyai ne változzanak meg.

1.3.2.4 Rezonanciák feltárása

A rezonancia jelensége nem csak a berendezésre káros, de a rezgés fázisát is jelentősen megváltoztatja, ezért az ODS-mérés előtt érdemes felmérni, milyen rezonanciákkal rendelkezik a vizsgált szerkezet.

1.3.3 Csomópontok száma – vizuális aliasing-hatás

A geometria helyes megtervezése a mérésen túl az egyik legfontosabb tényező a szerkezet állapotának kiértékelhetőségéhez, károsodások feltárásához, a mozgásképe helyes ábrázolásához és értelmezéséhez.

A mozgás alakhű megjelenítéséhez a csomópontok számának növelése szükséges. Az elvi megfontolásokon túl a gyakorlatban módosíthatják a szükséges csomópontok számát a valós szerkezet konstrukciójának sajátosságai, a várható hibahelyek száma, elrendeződése. Példa erre a nagyméretű beton szerkezeteknél, egyes építési technológiákból esetleg adódó úgynevezett munkahézag⁵.

Néhány ajánlás az ODS-modell csomópontjainak felvételéhez:

- Megfogások, támaszok helyein, egyenként a gerjesztőerők levezetésének minden szintjén, illetve síkjaiban.
- Csatlakozó (gép)elemek, darabok mindkét oldalán (például csökötések, karimák).
- Szerkezet inhomogén határainál, például hegesztések helyénél, geometriától függően a varratok mindkét oldalán.
- Geometria módosulásainál, például furatok, csökönyök helyeinél oldalanként.
- Potenciális hibahelyeknél, például alapok munkahézagainak környezetében.
- Csavarodások vizsgálatára síkok kijelölése szükséges.

1.3.4 Üzemállapot és az adatfelvétel kritériumai

Az ODS-elemzés adatai egy szerkezet különböző üzemviszonyai között rögzíthetők:

- Tranziens működés
- Ismételt működés
- Statikus működés

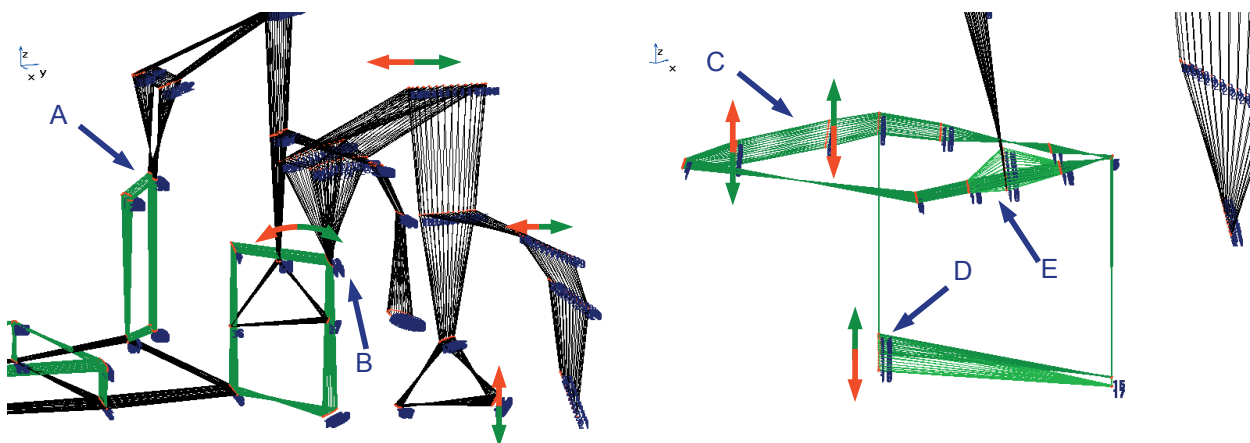
Tranziens működési állapot esetén a szerkezet csomópontjainak amplitúdó- és fázisviszonyai csak azonos

⁵ Nagyméretű beton szerkezeteknél, gépalpnál a betontömb több menetben készülhet, a megszilárdult és a friss beton között gyengébb kötés, „munkahézag” jön, jöhet létre.

időpillanatban hasonlíthatók össze. A tranziens szerkezetmérésekhez nagyszámú mérőcsatorna és érzékelő szükséges⁶, továbbá megfelelő kijelző képességű, időjel szerinti elmozdulást is elemző ODS program.

Ismételhető üzemi állapotban minden egyes üzemenél pontosan ugyanaz a rezgésidőjel mérhető újra és újra csomópontként. Statikus működés esetén a mérés teljes időtartama alatt a szerkezet csomópontjaiban a rezgésének amplitúdó- és fázisviszonyai állandónak tekinthetők. A stabil állapotban működő szerkezet méréséhez elegendő egy szinkronizálható egycsatornás-, vagy egy kétszatornás mérőeszköz. Forgó- és alternáló gépek, tartószerkezeteik, alapjaik vizsgálata esetén általában statikus működési állapotot tételezünk fel, melynek érvényességét a vizsgálat pontosságának érdekében ajánlatos ellenőrizni.

1.3.5 Elemzési eljárás



4. ábra. Bal kép: egy kéthengeres kompresszor állószerparatorainak mozgása. Az előtérben levő álló szeparátor kitérési miatt a szívócsonk erős hajlító igénybevételnek van kitéve. (B) Jobb kép: a szeparátortalp és -tartó mozgásfázisainak képe. A szeparátor tartójának több csavarja felszakadt (D), a dinamikus igénybevétellel szemben gyenge tartólemez a terhelés alatt jelentősen meghajlik (C). A szeparátor rögzítése gyenge (E). [4]

Az ODS-elemzési eljárás összetett, intuitív tevékenység, számos környezeti feltétel, rendelkezésre álló adat határozza meg. Ipari alkalmazásának során általánosan az alábbi séma követhető az adatok kiértékelésére:

- Geometria és gerjesztőerők viszonyának elemzése.
- Szerkezet helyszíni vizsgálatának megállapításai.
- Abszolút rezgésszintek kiértékelése, maximumok, minimumok.
- Fázisviszonyok szerinti kiértékelés.
- Megállapítások rögzítése.
- Működés összevetése geometriai felépítéssel.
- Előzetes vizsgálatok adatainak összevetése modellel.
- Megfigyelések leírása, álló- vagy mozgóképes illusztrációval.
- Beavatkozási javaslat, javítási tevékenység kidolgozása.
- Teljes mérési dokumentáció- és prezentáció-készítés.

⁶Általában 16-32 csatorna minimális kiépítést jelent, nagy szerkezetek – , mint például repülőgépek vizsgálatánál – azonban több száz csatorna jeleit is rögzíthetik párhuzamosan.

1.3.6 Jegyzőkönyvezés és prezentáció

Egy dinamikus jelenség, mint a mozgásképek dokumentálása hagyományos, statikus jegyzőkönyvben nem könnyű feladat, azonban az átlagosnál alig több ráfordítással a mozgásfázisok együttes megjelenítésével, irányok, még inkább a hibák helyének megjelölésével, a károsodások leírásával elfogadható szinten megoldható.

Az alapvető dokumentációs kötelezettség teljesítése mellett, a vizsgálat eredményének átadásához, bemutatásához a gyakorlatban szükség van a szerkezet mozgásának bemutatására. A mozgásmodell megjelenítése nem csak az elemző számára teheti könnyebbé a szerkezet működésének megértését, általa egy-egy hiba tényét, a hibajelenséget könnyebben lehet tolmácsolni diagnosztikában kevésbé jártas munkatárs számára is. Ami a diagnosztikai szakember számára időjelekből, spektrumokból, jól ismert természeti törvényekből, ökölszabályokból, megfigyelésekből olykor egyértelműen következik, az a

felhasználó számára nem feltétlenül látható be. A vizsgálat eredményét a közvetlen felhasználón, az üzemeltetőn, karbantartón kívül esetleg műszaki ismeretekkel kevésbé rendelkező döntéshozó előtt kell megjeleníteni, ez esetben nem a minőségügyi- és vizsgálati előírások által megkövetelt akkurátus jegyzőkönyvezés, a mérési adatok közlése a fontos, hanem egy – természetesen tényszerű érvekkel alátámasztott – hatásos bemutatás, a hibajelenségek egyértelmű magyarázata és világos megjelenítése.

1.4 ODS – EGY HATÉKONY ESZKÖZ GÉPALAPOK VIZSGÁLATÁRA [5]

A rezgésvizsgálat bizonyítottan hatékony eszköz a gépállapot felmérésére, hibák azonosítására, a termelő berendezések maradék élettartamának becslésére. Bonyolult szerkezetek vizsgálatánál azonban a rengeteg mérési adat kezelésére, összefüggő elemzésére hatékonyabb

megoldás szükséges. Az ODS (Operating Deflection Shapes) egy ilyen vizuális elemző eszköz, mely akár több száz mérési adat animációs megjelenítésével segít az alapok, tartók, csővezeték-rendszerek hibáinak gyors és pontos feltárásában.

A feladat

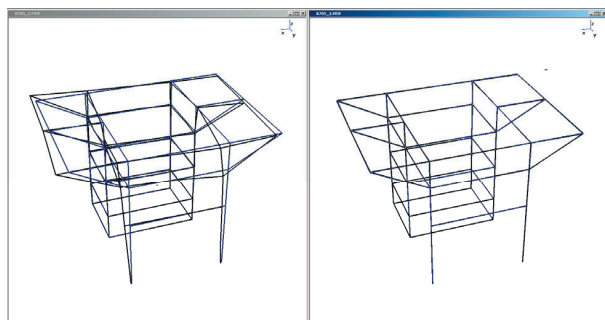
A MOL Nyrt. algyői üzemében több, a talajszinttől jelentősen megemelt, vasbeton alapokon nyugvó földgáz kompresszort telepítettek a '70-es években. A korra jellemző alapozási technológiához és az építési fegyelem be nem tartása miatt előforduló hibákhoz társuló nagy teljesítményű gerjesztés húsz év alatt meggyengítette a vasbeton alapokat, felületükön több helyen is repedések jelentek meg. Az üzemeltetés számára hangsúlyos kérdéssé vált a gépalapok állapotának felmérése, ezt követően megfelelő javítási technológia alkalmazása és eredményességének visszaellenőrzése.

Mi a megoldás? – Az ODS alkalmazás

Az egyszerű forgógépek elemzésénél általánosan bevált frekvenciaelemzéses vizsgálat a nagyobb bonyolultságú és értékű szerkezetek állapotának meghatározásához szükséges nagyságrendekkel több mérési adat felvétele miatt, közvetlenül nem alkalmas elemzésre. A megoldást az ODS technika adja, mely a megfelelő módszerrel rögzített rezgés adatokból a gépre jellemző működési frekvenciákon a gép mozgását annak modelljén jeleníti meg.

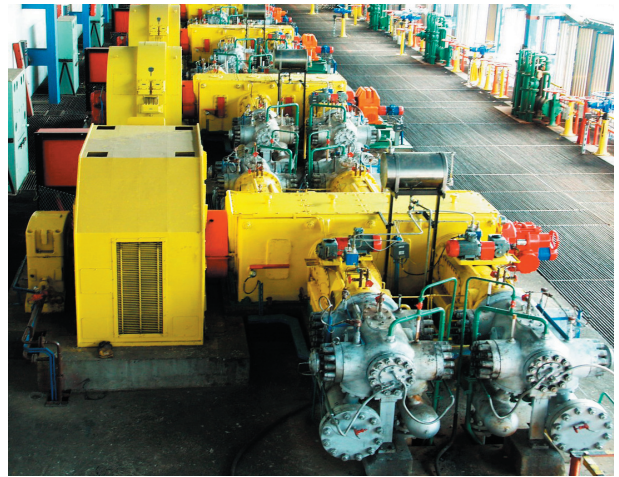
Ezzel a módszerrel a teljes rendszer dinamikus működése részletesen megfigyelhető, a szerkezet nemlineáris jellemzői, fellazulás, repedés, törés, fáradás könnyen azonosíthatók és helyük behatárolható.

Az eredmény



5. ábra. Az algyői üzem egyik dugattyús kompresszorának ODS modellje (Az alap mérete cca.: 6x5x7 m). A javítás előtt (balról) számos repedésre, törésre utaló, eltérő fázisban mozgó hely volt azonosítható. Az alapjavítás utáni modellben (jobbról) jelentősen csökkent a rezgésszint és kiegyensúlyozottabb, egységesebb lett az alap mozgása.

A kompresszor alapokról rögzített adatok ODS-elemzése alapján az alapok sérüléseit sikerült pontosan behatárolni. A MOL az alapok javítására ennek függvényében nem csak a szükséges javítási technológiát írhat-



6. ábra. MOL Nyrt. Algyő, CC2 kompresszorház, 1,5 MW-os gázkompresszorok. Az ODS technika legelterjedtebb alkalmazási területei a gépalapok, tartószerkezetek és csővezeték rendszerek hibafeltárása, ellenőrző vizsgálata. Az üzemben több költséges alapjavítás esetén az ODS technika alapvető eszközzé vált a követelmények és minőségi átvételi feltételek meghatározásához.

ta elő, de szerződéses feltételként elvárható eredményt is meg tudott fogalmazni.

Az alapok javítását műgyantás ragasztásos technológiával, több esetben acélrudas megerősítéssel végezték el.

Az ellenőrző vizsgálatok és a javítás óta eltelt idő igazolták a költségesnek és kockázatosnak látszó javítás sikerességét. A rezgésszintek csökkentek, a szerkezet mozgása kiegyensúlyozottabb, energia-elnyelése kedvezőbb lett, a csatlakozó gépelemeket, vezetékeket kisebb terhelés érte, a közvetett meghibásodások száma csökkent. A kompresszorok javított alapjai már több mint 20 éve állják a folyamatos üzemet.

1.5 IRODALOMJEGYZÉK

- [1] S. DOUG: A case study and analysis of the Tacoma narrows bridge failure, Department of Mechanical Engineering, Carleton University, Ottawa, 1974.
- [2] C. R. PICKREL: Boeing Commercial Airplane Groupe: Airplane Ground Vibration Testing – Nominal Modal Model Correlation, Soung & Vibration, November, 2002., 7 pp.
- [3] DOBOVICZKI I.: N-716, N-717, N-718, N-719 jelű Cooper motor-kompresszor egységek alapjainak rezgésvizsgálata – ODS-elemzés, Vizsgálati jelentés, Szeged, 2002.
- [4] DOBOVICZKI I.: K-6, K-7 gázkompresszoros egységek komplex állapotvizsgálata, Vizsgálati jelentés, Szeged, 2005.
- [5] DOBOVICZKI I.: Az ODS – Egy hatékony eszköz a szerkezetek állapotvizsgálatára; Esettanulmány, Szeged, 2007.