

A MOZGÁS-ANIMÁCIÓS MÓDSZER ALKALMAZÁSA A REZGÉSDIAGNOSZTIKÁBAN, FORGÓGÉPEK MEGBÍZHATÓSÁGÁNAK NÖVELÉSÉRE

BEVEZETŐ

Magyarország NATO-hoz, illetve Európai Unióhoz való csatlakozásával a haderő fejlesztésére, új típusú NATO szabványoknak minden szempontból megfelelő haditechnikai eszközök, fegyverrendszerek beszerzésére volt szükség. Ennek eredményeként 2006-ban állították rendszerbe a JAS-39 Gripen EBS HU típusú vadászrepülőgépeket¹ a Magyar Légierőben [1]. Az átfegyverzésnek köszönhető korszerű, világ színvonalú berendezések rendszerben tartásához elengedhetetlen követelmény a fenntartási módszerek fejlesztése.

Cikkemben a rezgésdiagnosztika egyik speciális területével a mozgás-animációs vizsgálatok alkalmazásával foglalkozom. A téma aktualitását az egyre bonyolultabbá váló haditechnikai eszközök és az ezekhez tartozó magas fenntartási költségek adják, mivel az üzemeltetési költségek csökkentése csak korszerű diagnosztikai módszerek alkalmazásával érhető el.

A rezgésdiagnosztikával való első találkozásom óta életem meghatározó részévé vált ez a tudományterület. Az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Karán és annak jogelődjeiben két évtizede foglalkozom az állapotfüggő karbantartás és a műszaki diagnosztika oktatásával. A rezgésdiagnosztika komoly gazdasági előnyöket jelent a gépek üzemeltetésében. A rezgésméréssel olyan hatásokat tanulmányozhatunk, amelyek a gép teljes üzemideje alatt károsítják az alkatrészeket. A hibák előrejelzésével, megszüntetésével a gépek élettartama jelentősen meghosszabbítható.

Oktatói munkám mellett tizenöt éve dolgozom rezgésdiagnosztikai szakértőként a hazai ipar számos területén. Sok száz megmért gép, több tízezer rezgésspektrum elemzése által szerzett elméleti és gyakorlati tapasztalatommal szeretném segíteni a Magyar Honvédség szakembereinek munkáját.

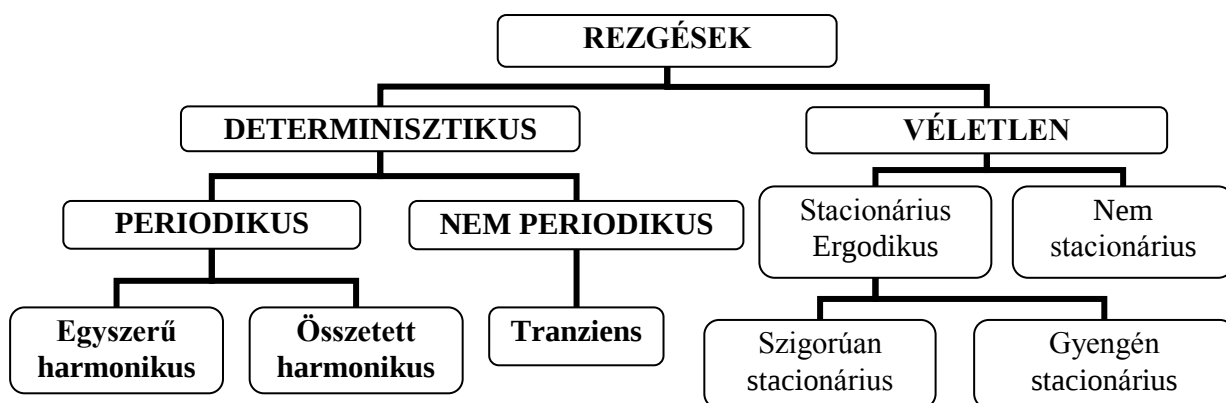
A cikk első részében összefoglalom a forgógépek diagnosztikai vizsgálatához szükséges legfontosabb rezgésjellemzőket és a rezgésdiagnosztika egyik speciális szimulációs módszerét, a mozgás-animációs módszert. A módszer hatékonyságának ellenőrzését próbapadi kísérleteken keresztül szemléltetem, majd haditechnikai alkalmazási lehetőségként a vadászrepülőgép

¹ A Svéd Védelmi Beszerzési Hivatal és a Magyar Köztársaság Honvédelmi Minisztérium Beszerzési és Biztonsági Beruházási Hivatala 2003-ban írták alá a Gripen bérleti megállapodást módosító dokumentumot, mely szerint Magyarország tíz évre 12 db JAS-39 Gripen EBS HU és 2 db JAS-39 D típusú vadászgépet bérel

sugárhajtómű szimulációs modelljét mutatom be. Az általam kidolgozott vizsgálati módszer a Gripen RM-12 hajtómű üzem közbeni valóságos rezgéseinek megjelenítését teszi lehetővé, amely a berendezés állapotfüggő karbantartásában, az üzemeltetési költségek csökkentésében használható fel.

1. MECHANIKAI REZGÉSEK ELMÉLETI ALAPJAI

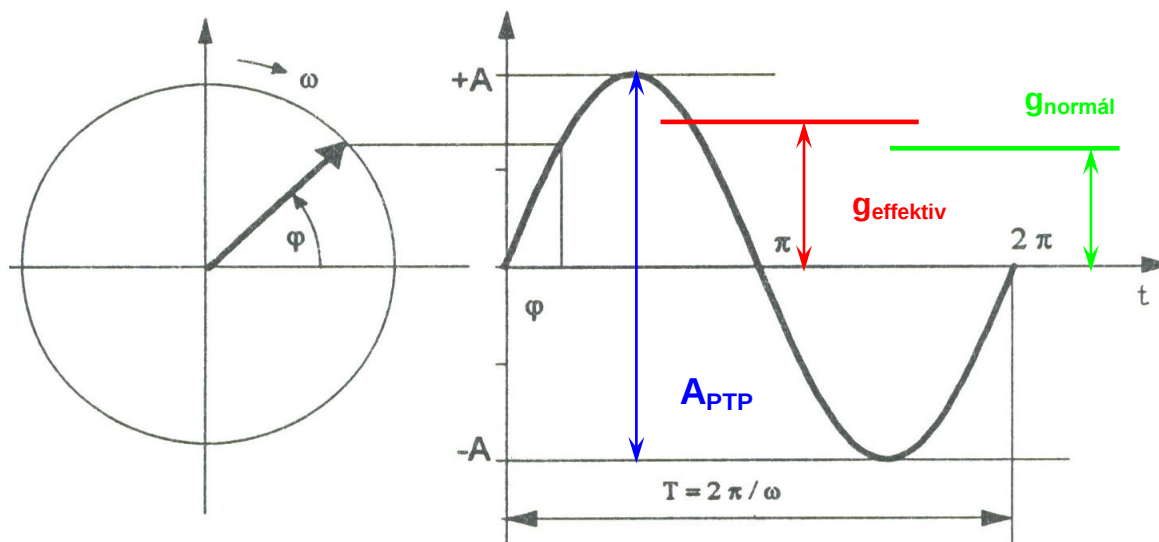
A rezgés valamely fizikai mennyiség változásának ismétlődően növekvő és csökkenő folyamata az idő függvényében. A mechanikai rezgésekre a legegyszerűbb példa az egy szabadságfokú tömeg- rugó rendszer, ahol a referencia hely (átlagérték, középhelyzet) körül az út, a sebesség és a gyorsulás állandó rezgést végez, azaz periodikusan, harmonikusan változik. A mechanikai rezgések alapvető felosztását az MSZ ISO 2041 szabvány alapján az 1. ábrán kísérhetjük figyelemmel.



1. ábra. A rezgések felosztása az MSZ ISO 2041-1995 szerint

1.1. Periodikus rezgések jellemző mennyiségei

A műszaki diagnosztikai méréseknél a legnagyobb jelentőséggel a determinisztikus és periodikus rezgések bírnak. Ezen rezgések csoportján belül vizsgálódásaink szempontjából a legfontosabbak a



2. ábra. Periodikus, harmonikus rezgés jellemző mennyiségei

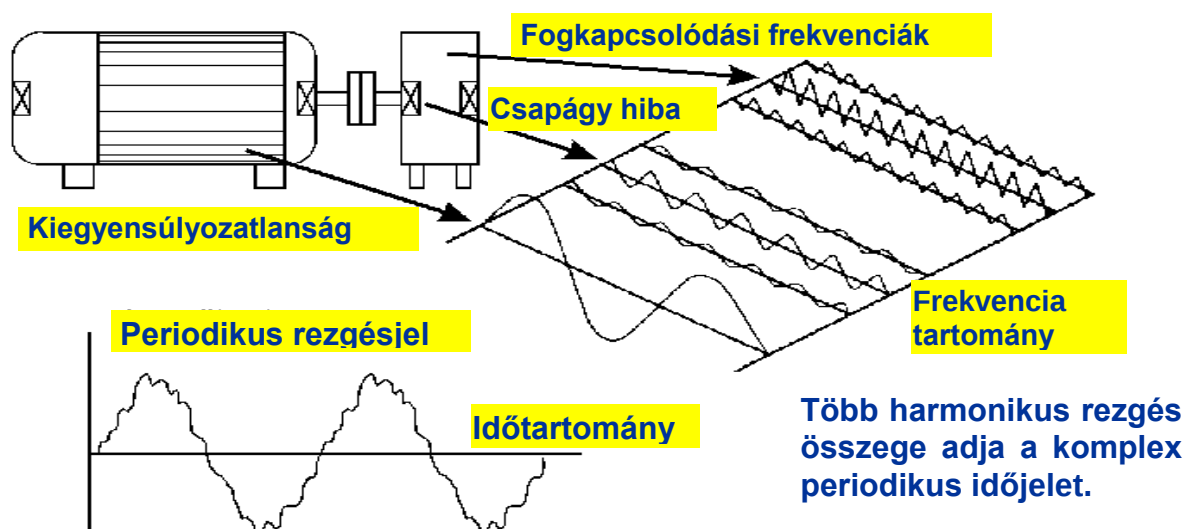
harmonikus rezgések. **Harmonikusnak** nevezzük azt a rezgést, amelynek rezgésjellemzői az idő függvényében a $g(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$ törvényszerűséggel változik, ahol az A – amplitúdó az ω -körfrekvencia (1/s) és a φ - kezdő fázisszög állandók. A harmonikus rezgés a 3.ábrának megfelelően előállítható egy „A” hosszúságú ω szögsebességgel forgó vektor vetületeként. A 2π középponti szöget a vektor ω szögsebességgel éppen T periódusidő alatt teszi meg.[2] A frekvencia a periódusidő reciproka, az egy másodperc alatt megtett rezgések száma, mértékegysége [1/s], vagy [Hz]. A rendszerre felírható differenciálegyenlet az erők állandó egyensúlyát fejezi ki : [3]

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{1}{c} \cdot x = 0 \text{ ahol} \quad (1)$$

m [kg] a rezgő test tömege, c [m/N] - a rugóállandó.

1.2. Forgógépek legfontosabb rezgésjellemzői

A haditechnikai eszközökben, vagy ipari termelésben üzembe állított forgógépek nem merev testek, hanem sokféle alkatrészből, részegységből épülnek fel, ezért különböző alkatrészeik különféle rezgéseket hoznak létre, amint azt a 3. ábra is szemlélteti. Az ábrán sematikusán ábrázolt alacsonyabb és magasabb frekvenciájú különféle amplitúdójú harmonikus rezgésösszetevők láthatók. Ezek segítségével szeretném érzékeltetni, hogy a különféle fordulatszámú és energiájú géprészek működéséből származó harmonikus rezgések összessége adja a géptesten érzékelhető periodikus komplex időjelet. A motor „forgási frekvenciáján”² alacsonyabb frekvenciájú, de magas amplitúdójú rezgések jöhetnek létre például a forgó tömegek kiegyensúlyozatlansága miatt. Egy gördülőcsapágyban 7-13 db gördülő elem van, emiatt a golyók forgásából gerjesztett erők, tehát gördülőcsapágy működése a 7-13x-os frekvencia tartományban hozhat létre felharmonikusokat. A fogaskerekek még ennél is magasabb 17-200x-os felharmonikusokat is gerjeszthetnek.



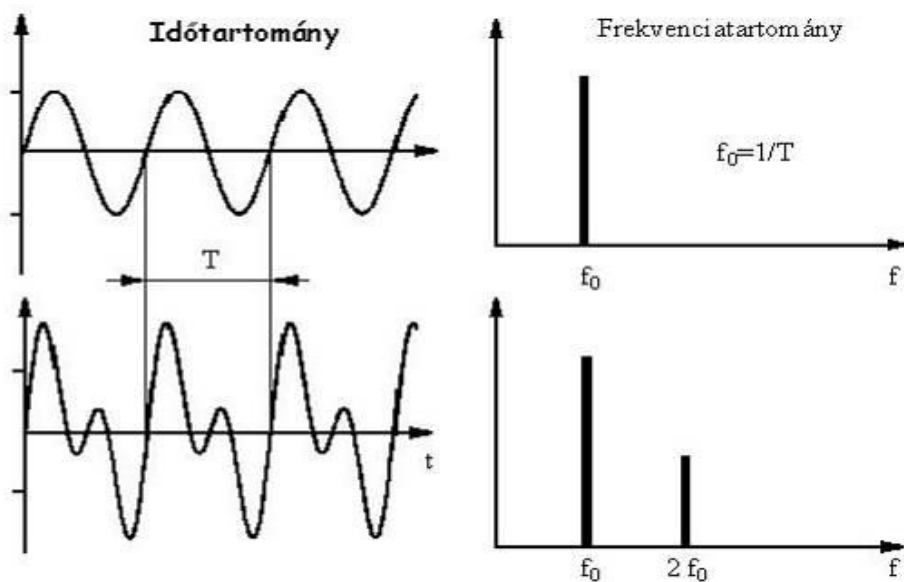
3. ábra. Forgógépek összetett rezgései [4]

² A motor „forgási frekvenciája” a motor aktuális fordulatszámát jelenti [1/min], vagy [Hz] mértékegységben

Egy géprendszer komplex periodikus időjele, minden esetben az alkatrészek működése, vagy hibája miatt kialakuló harmonikus rezgésekből tevődik össze. Minél több ilyen alkatrész található a berendezésben, annál több összetevőből jön létre a rezgésmérési eredmény, így természetesen a kiértékelés során is nehezebben lehet őket beazonosítani, nehezebben lehet az esetleges meghibásodás okára fényt deríteni. [4] Az időben lejátszódó folyamatok által keltett szinuszos rezgések a Fourier transzformáció segítségével a frekvencia tartományba transzformálhatók, az így kapott időjelre és amplitúdó spektrumra mutat példát a 4. ábra.

A Fourier transzformáció alkalmazására azért van szükség, mert a valóságban igen ritka az, hogy csak egyetlen szinuszos jellegű rezgés jelentkezzen a vizsgált gépen, vagy alkatrészen. Már két rezgés esetében is kitűnik, hogy az időtartományban a rezgések összegzése, szétbontása nehézkes, áttekinthetetlen. Ezért a gyakorlatban már a rezgések mérése után Fourier-transzformációt alkalmaznak az időfüggvények frekvencia függvényekké történő áttanszformálásához. A **rezgésspektrum** tehát a rezgési folyamat különböző frekvenciájú összetevőinek Fourier-transzformált (FFT)³ összessége. A spektrumban a derékszögű koordináta-rendszer abszcisszájára a frekvenciát (esetleg a percenkénti ciklusszámot), ordinátájára pedig az összetevők amplitúdóját vagy effektív (RMS) értékét mérik.

A dinamikus mozgást végző gépek rezgéseinek kiértékeléséhez mind a szakértőknek, mind pedig a szoftvereknek szükségük van három rezgésdiagnosztikai alapinformációra, a rezgés frekvenciájára, az amplitúdójára és fázisszögére, melyek alapján a berendezés üzeme jellemezhető, műszaki állapota meghatározható.



4. ábra A Fourier-transzformáció

³ FFT - Fast Fourier Transform – Gyors Fourier Transzformáció. Az a folyamat, mely során a rezgés-analizátor az időjelet frekvencia spektrummá transzformálja

A rezgés frekvenciája

A rezgésméleti részben már ismertetett képletek alapján a rezgési frekvencia a periódus idő reciprokaként (egy adott időtartam alatt megvalósult periódusok számaként) értelmezhető.

Mivel a valóságos gépekben akár több száz féle meghibásodási lehetőség is elképzelhető, a frekvencia jelentősége abban áll, hogy a különféle géphibák, különféle frekvenciákon jelentkeznek. Annak megállapításában, hogy egy berendezésről felvett spektrumképben melyik amplitúdó, milyen alkatrész működésére, vagy meghibásodására utal a gép üzemelési fordulatszáma, illetve az ebből számított un. forgási-, vagy alapharmonikus frekvencia utal.

Üzem közben a gépben keletkező erőknek változik az irányuk, amplitúdójuk is a gép alkatrészeinek forgási sebességével (RPM⁴) együtt fog változni. Ebből az következik, hogy a legtöbb problémának frekvenciája szorosan kapcsolódni fog a forgási sebességhez.

A rezgés amplitúdója

A frekvencia analízis és a spektrumok alapján is belátható, hogy a második legfontosabb gyakorlati információt a rezgés amplitúdója hordozza. Kiértékelési szempontból általánosan elmondható, a rezgés frekvenciája a hiba *forrására* ad utalást *rezgés-amplitúdó* pedig a hiba *súlyosságára* utal. A rezgésamplitúdót meghatározhatjuk, mint a rezgés elmozdulását, sebességét, vagy gyorsulását. Az időtartományban harmonikus rezgőmozgást végző test egy képzeletbeli pontjának mozgását jellemezhetjük kitérésével, sebességével vagy a gyorsulásával. A sebesség a kitérés első, a gyorsulás pedig a második idő szerinti differenciálhányadosa. Az amplitúdó a deriválás során egy ω szorzót kap és a függvény $\pi/2$ értékű fáziseltolást szenved. A sebesség egy negyed, a gyorsulás pedig egy fél hullámhossznak megfelelő idővel előresiet a kitéréshez képest.

A rezgés elmozdulás, melynek mértékegysége [μm] a lassú fordulatszámú gépek esetében jut érvényre. A rezgésesebesség egy gépelem periodikus rezgése során a kitérés két szélső helyzete között mérhető sebesség, mértékegysége általában [mm/sec]. A rezgésesebesség mérés előnye az elmozdulás méréshez képest, hogy jobban kifejezi a gép által keltett erők nagyságát, ráadásul nem kell feltétlenül ismernünk a frekvenciát a rezgéseerősség meghatározásához, hiszen a sebesség ezt már tartalmazza. A gépállapotról vonatkozó rezgésdiagnosztikai szabványok a rezgésesebességen alapuló mérési módszereket részesítik előnyben. [5]

A rezgőmozgás holtponthelyzeteinek utolsó fázisában a sebesség zérus lesz, mert a képzeletbeli mozgó pontnak meg kell állnia az irányváltáshoz. A rezgő test sebessége és gyorsulása állandóan változik, mivel minden alkalommal, amikor a tömeg megáll, fel kell gyorsulnia, hogy elérje azt a sebességet, amivel tovább megy a következő határértékig. A rezgési gyorsulás a rezgésesebesség (mm/s) változásának mértéke, ezért a mértékegysége mm/sec^2 , de nemzetközi egyezmények alapján a rezgés gyorsulás mértékét g -ben adják meg.

⁴ RPM - rotation per minute – a vizsgált gép fordulatszáma

Felmerül a kérdés, mikor használjunk rezgés elmozdulás, sebesség, vagy gyorsulás mérést? Elemezve az előforduló géphibákat, elmondható, hogy azokban az esetekben, amikor előre látható, hogy a gép, vagy egy részének a forgási frekvenciája 10 Hz alatti lesz, elmozdulás mérés ajánlott. Mivel a kifáradási hibák általában 10 Hz és 2000 Hz között jelentkeznek, ezért ebben a frekvencia tartományban a rezgésebbesség mérés, a 2000 Hz feletti tartományban pedig a magas frekvenciáknál előforduló rezgések és erőerjesztések miatt a rezgés gyorsulás mérések tervezése javasolt.

A rezgés fázisszöge

A frekvencia és az amplitúdó mellett a harmadik jellemző, ami szükséges a gép rezgésének leírásához a rezgés fázisszöge, lásd 2. ábrán a körben forgó vektor pillanatnyi helyzete. A fázisszöget, tekintettel a többi rezgésjellemzőre, úgy definiálhatjuk, mint a rezgő mozgást végző pont pozícióját egy adott pillanatban, egy fix kezdőponthoz, vagy esetleg egy másik rezgőmozgást végző elemhez viszonyítva. Egy másik meghatározás szerint a fázisszög (φ_0) egy teljes forgási ciklusra alkalmazott mennyiség, fokban vagy radiánban, ahol egy teljes rezgési kör 360° -kal egyenlő. Értékét mindig egy referencia ponttól számítjuk az eltelt idő függvényében. A legjobb példa erre egy kiegyensúlyozatlan forgórész fázisszöge a kijelölt referencia ponthoz, vagy vonalhoz képest.

2. A MOZGÁS-ANIMÁCIÓ ELMÉLETI ALAPJAI

A testek, vagy egy jellemző pontjuk mozgásának leírására a mechanika által kidolgozott mozgásfüggvényeket alkalmazzuk, melyek célszerűen Descartes koordináta rendszerben helyezhetők el. Az x, y, z koordináta rendszerben elhelyezkedő test tetszőleges egyenlőre még álló $P(x_p, y_p, z_p)$ pontjának helyzetét egy $\mathbf{r}$ helyvektor segítségével adhatjuk meg, majd a koordináta tengelyek irányába mutató $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ egységvektorok segítségével létrehozhatjuk az

$$\mathbf{r} = x_p \mathbf{i} + y_p \mathbf{j} + z_p \mathbf{k} \quad (2)$$

és a P pont kapcsolatát.

Az $\mathbf{r}_p$ vektorkoordinátái, az (x_p, y_p, z_p) számhármassal, egyértelműen kifejezi a pont térbeli helyzetét.

A vektor nagyságát az

$$r = |\mathbf{r}| = \sqrt{x_p^2 + y_p^2 + z_p^2} \quad (3)$$

összefüggéssel a vektor irányát pedig a vektor irány koszinuszaival számíthatjuk ki.

Ha a P pont elmozdul például a test rezgő mozgása következtében, akkor ez azt jelenti, hogy a pont különböző időpillanatokban elfoglalt helyzetéhez különböző, időtől függő helyvektorok fognak tartozni, amely $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$ vektor-skálár függvénnyel leírja a pont mozgásfüggvényét. Ez a függvény minden t időpillanathoz egy olyan $\mathbf{r}$ vektort rendel, amelynek végpontjában a mozgást végző P pontot találjuk. Ez az $\mathbf{r}$ időtől függő vektor egyértékű, a vizsgált $t_0 \leq t \leq t_1$ időintervallumban folytonos és legalább kétszer deriválható, ezáltal képes a P pont által a vizsgált időtartam alatt 5.a. ábrán látható

mozgáspálya leírására. A mozgáspálya tulajdonképpen egy geometriai alakzat, amely az

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(q) \quad (4)$$

általános koordináta felírással a q mint független változó szerepel az egyenletben. A q általános koordináta egy, a mozgással kapcsolatba hozható időtől függő mennyiség, amely lehet a megtett út, vagy a mozgás közben létrejött szögelfordulás is. A q értékének időbeni változását leíró

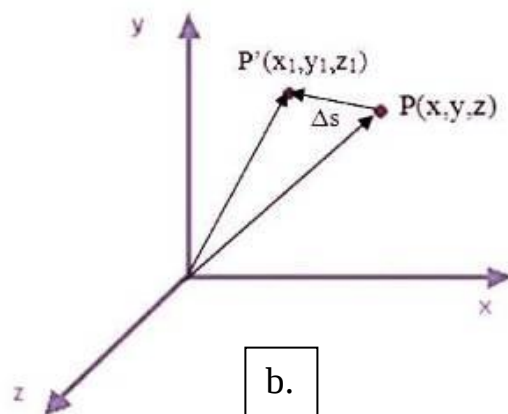
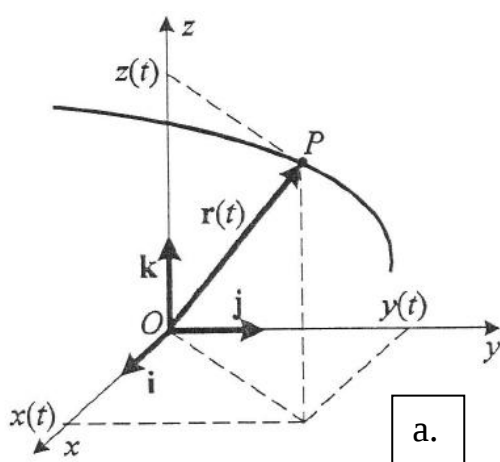
$$q = q(t) \quad (5)$$

$$\text{függvény ismeretében a mozgásfüggvényre felírható az } \mathbf{r} = \mathbf{r}(q(t)) \quad (6)$$

közvetett mozgásfüggvény, amely azt fejezi ki, hogy egy P pontból egy tetszőleges P' pontba való elmozduláskor a pont helyzete az időben a befutott mozgáspályától is függ. Egy pont mozgása közben a pályagörbén megtett távolság tulajdonképpen a megtett úttal azonos, tehát az 5.a. ábra $\mathbf{r}(t)$ függvény pályagörbén történő megváltozását az

$$s = s(t) \quad (7)$$

út-idő függvénnyel fejezhetjük ki, amely a mozgáspálya befutás függvénye. Egyszerűbben kifejezve az 5.b. ábrán látható $P(x,y,z)$ pont (amely lehet egy gyakorlatban mért gépen lévő pont is) elmozdulásakor x , y vagy z értéke változik meg, és a helye a mért kitérés (Δs) értékével mozdul el a $P'(x_1, y_1, z_1)$ helyzetbe. A periodikus rezgőmozgás alapegyenlete egy pont térbeli szinuszos mozgását a pont $s = A \sin(\omega t + \varphi)$ rezgés kitevés függvényével írja le.



5. ábra a. A P pont mozgását leíró koordináta rendszer, és b. A pont térbeli helyzetének változása [6]

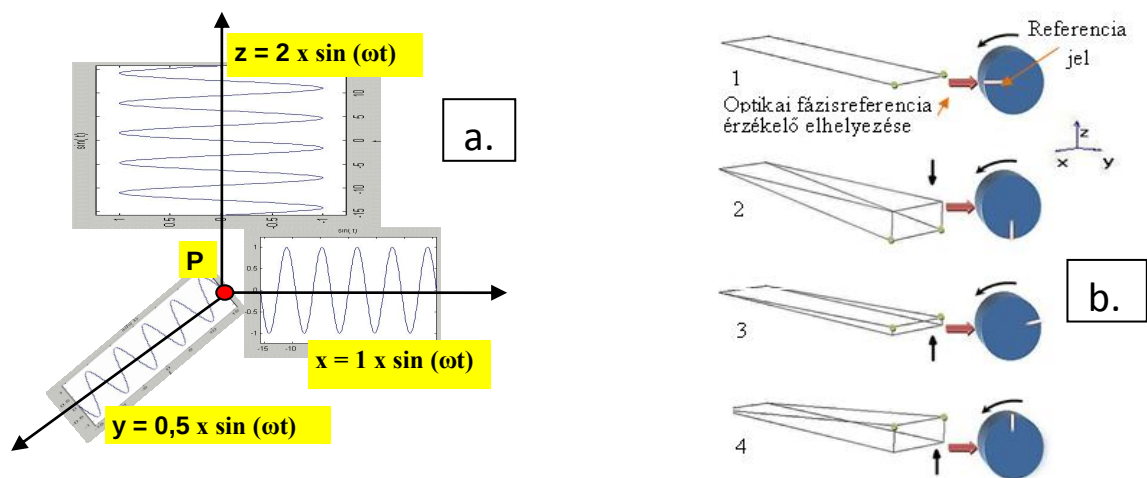
A pont mozgásának meghatározásánál a problémát az jelenti, hogy a gép egy pontja gyakorlatilag a tér minden irányában szinuszos mozgást végez, amely azonos frekvenciájú, de a tér különböző irányokban más amplitúdóval rendelkezik, amint azt a 6.a. ábra is mutatja. Mivel a mozgás-animáció során egy géptest, azaz több pont mozgását kívánjuk egymással összehasonlítani, (és együtt megjeleníteni) így magától értetődő, hogy a mozgások amplitúdójának figyelembe vétele nem elegendő információ egy összetett ponthalmaz, illetve egy gépszerkezet mozgásának reprezentálására.

Tudjuk azonban, hogy a gépek valóságos rezgéseit leíró harmonikus függvény $s(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ szerint a harmonikus rezgést nem csak az amplitúdója és periódus ideje, hanem a fázisszöge is jellemzi. Ezért, ha a pont egy adott időpillanatban elfoglalt helyzetét akarjuk meghatározni ismernünk

kell a rezgő mozgás fázisszögét is. Ebből következik, hogy akkor tekinthetjük a pont kitérését minden mérési irányban meghatározottnak, ha olyan mérési összeállítást hozunk létre amellyel az adott pillanatra vonatkozó rezgés-amplitúdók mellett meg tudjuk határozni a rezgés adott pillanatra vonatkozó fázisszögét is. Ugyanez vonatkozik arra az esetre is, ha nem egy, hanem több pont mozgását kívánjuk egyszerre és egy időben megvizsgálni, vagy a pontok helyváltoztatását akarjuk egymással összehasonlítani. Meg kell azonban jegyezni, hogy ez természetesen csak az $s(t)$ rezgés kitérés függvényben meghatározott ω szögsebességre, vagyis egy meghatározott rezgési frekvenciára vonatkozik.

A mozgás animációs vizsgálat alapelve tehát a mozgástörvényt használja fel egy adott „gép-pont” elmozdulásának leírására. Kihasználja a korszerű mérőműszerek azon jellemzőjét, hogy egyszerre képesek a rezgés amplitúdóját és fázisszögét mérni.

A működő gépen a gerjesztő erők általában a forgási frekvencián keletkeznek. A diagnosztikai mérések során is leginkább a gép forgásával kapcsolatos elmozdulásokról akarunk információt kapni, ezért a pont mozgásának megjelenítésekor lehetőleg a gép gerjesztett tengelyének, célszerűen a hajtó tengely a forgási frekvenciáját kell alapul vennünk. A valóságban ezt úgy biztosíthatjuk, hogy erre a kiválasztott tengelyre ragasztjuk fel a referencia jelet adó fényvisszaverő csíkot (referencia, vagy trigger jelet), majd ehhez képest mérjük a gép kiválasztott pontjait.



6. ábra. a. A „P” pont térbeli szinuszos rezgőmozgása és b. A rezgés kitérés és fázisszög kapcsolata [12]

A 6.b. ábrán a fázisszög és a rezgés kitérés együttes változását szemléltetem egy rezgőmozgást végző lemez példáján. [12] Ez egy különleges állapot, hiszen a lemez csak egy irányába mutató függőleges rezgőmozgást végez. A gerjesztést adó forgórészt (behajtó tengelyt) a kék tárcsa testesíti meg, ezen helyezkedik el a referencia jel. Az ábrán megfigyelhető, hogy az 1-es számú mérés indítási pozícióban a kitérés és a fázisszög egyaránt 0 értéket vesznek fel, majd a forgásirányának megfelelően a forgórész körmozgásával együtt a fázisszög 90° -os és 270° -os elfordulásaihoz a lemez lefelé, vagy felfelé történő negatív, vagy pozitív amplitúdónak megfelelő kitérése tartozik. Az egy időben mért rezgés és fázisszög között a műszer úgy teremti meg a kapcsolatot, hogy a referencia jel optikai

fázisszög mérő előtt való elhaladása egy indító (trigger) jelet ad a műszernek, amely ettől a pillanattól kezdve több száz részre felosztva a teljes körülfordulás ideje alatt (a következő triggerjelig) méri az egyes pozíciókhoz tartozó rezgés amplitúdót a megadott frekvencián.

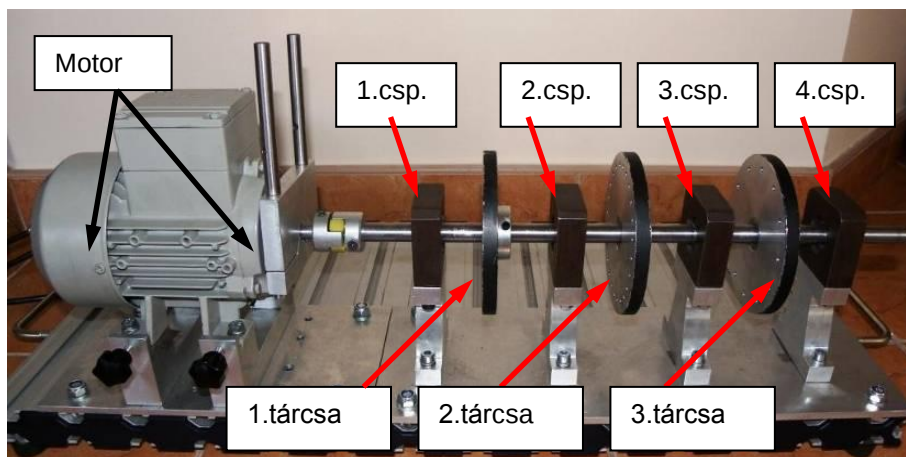
Ha egy gép több pontjának mozgására vagyunk kíváncsiak és azt akarjuk, hogy az elmozdulások a valós képet mutassák, a vizsgált test fő pontjainak amplitúdóját, frekvenciáját, és egy vonatkoztatási ponthoz mért fázisszögét kell megmérnünk. Ehhez az összes mérést az optikai fázisreferencia-érzékelő jelével (fordulatonként egy impulzus) kell a fordulatszámmal és a fázisszöggel szinkronizálni (triggerelni). Ezután a műszer az érzékelt rezgésjelet feldolgozza, meghatározza a megadott frekvenciákon a rezgés amplitúdóját és fázisszögét.

Méréseink eredményeként ez esetben tehát az általunk kijelölt szerkezetileg fontos csomópontokként három-három (mindegyik térbeli irányra vonatkozó) rezgés-amplitúdó érték és fázisadat áll rendelkezésünkre. Ezek az adatok együttesen írják le, hogy a vizsgált mérőpont a megadott frekvenciára nézve, milyen térbeli mozgást végez. [12]

3. KÍSÉRLETI MÉRÉS MOZGÁS-ANIMÁCIÓS VIZSGÁLAT BEMUTATÁSÁRA

3.1 Mérési körülmények, a vizsgálat végrehajtásának menete

A gépek elmozdulásának megjelenítése régi vágya a diagnosztikai szakembereknek, hiszen egy berendezés látható elmozdulásai azonnal rámutatnak a gyenge pontokra, a nem megfelelő műszaki állapotra. A feladatot nehezíti, hogy a valóságos elmozdulások a legtöbb esetben olyan kicsik és olyan gyorsak, hogy azt az emberi szem nem képes feldolgozni. A módszer alkalmazhatóságának bizonyításaként egy modellkísérletet mutatok be, melyhez az általam fejlesztett „WibroSoW” rezgésdiagnosztikai próbapadot használtam fel. A kísérlet végrehajtásához a 7. ábrán látható négy helyen csapágyazott három tárcsából álló forgórészt, amelyen az egyes tárcsákon létrehozott kiegyensúlyozatlanság hatása mozgás-animációs módszerrel vizsgálható.

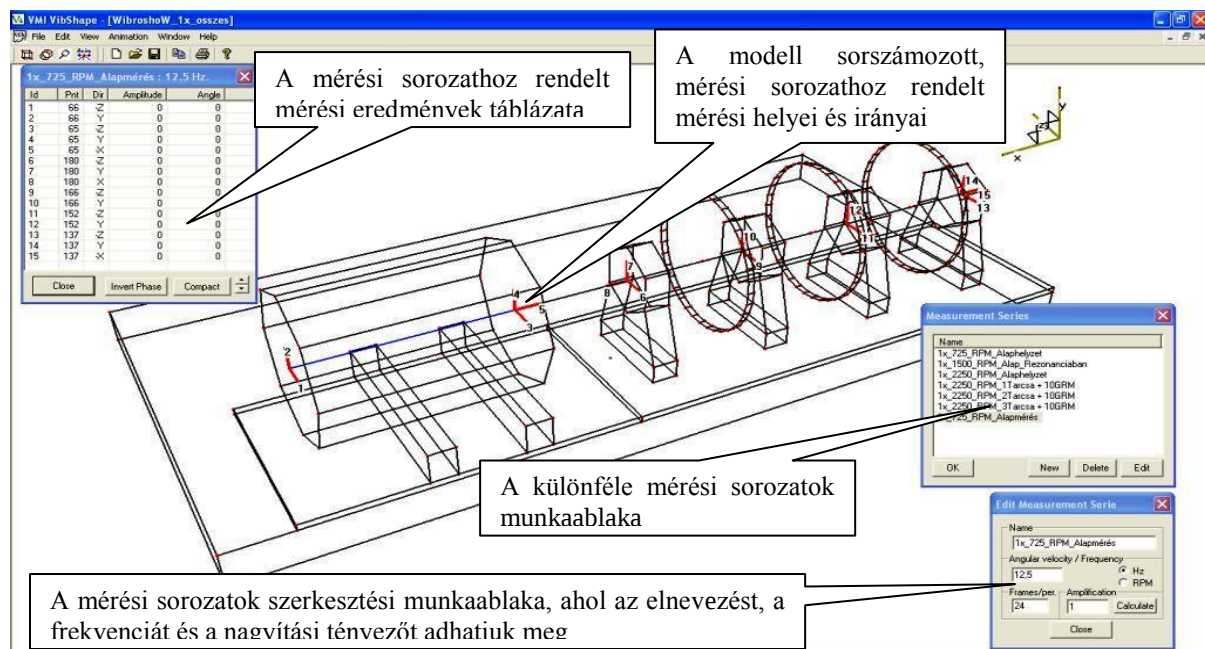


7. ábra. A vizsgálatához tervezett forgórész és a mérési helyek [12]

A vizsgált modell mozgásának megjelenítéséhez speciális képességekkel rendelkező VMI Vibshape™ mozgás-animációs szoftverre és a mérési adatok rögzítésére alkalmas szintén VMI EasyViber64 rezgés-analizátorra van szükség. A mozgás-animáció készítése során az alábbi lépéseket kell betartani: [8] [9] [12]

1. Geometriai adatok felvétele, a gép mérési pontjainak kijelölése
2. Modellalkotás a geometriai arányok megtartásával a Vibshape™ szoftverben
3. Mérési pontok tervezése a berendezés pontjainak megfelelően
4. A mérési irányok tervezése
5. Mérés végrehajtása a mérési irányok sorrendjében EasyViber64 rezgésanalizátorral
6. A mérési adatok fordulatszámra megfelelő visszatöltése a Vibshape™ szoftverbe
7. A modell mozgásának elemzése, a mérési eredmények kiértékelése, dokumentálása

A mérések elvégzéséhez tervezett modult saját kezűleg építettem össze, így a geometriai adatok ismeretében rögtön a modellkészítés következhetett, melynek eredménye a 8. ábrán a VMI Vibshape™ szoftver képernyőjén látható. A szoftverben Descartes-koordináta rendszerben építhetjük fel téglatest és henger elemekből, valamint ezeket összekötő vonalakból, a valóságos berendezés egyszerűsített vázát. A modell készítésekor ügyelni kell a geometriai arányok betartására, valamint az egyes géprészek összekapcsolására, hiszen az elmozdulások majd ennek függvényében lesznek láthatók. Ezután a mérési helyeket és ezeken a mérési helyeken a valóságban is hozzáférhető és megmérhető mérési irányokat kell megtervezni, amelyek esetünkben a 8. ábrán látható módon a motor és a csapágyházak csapágyhelyein vannak.



8. ábra A kísérleti háromtárcsás modul modellje és mérési sorozatai a Vibshape szoftverben

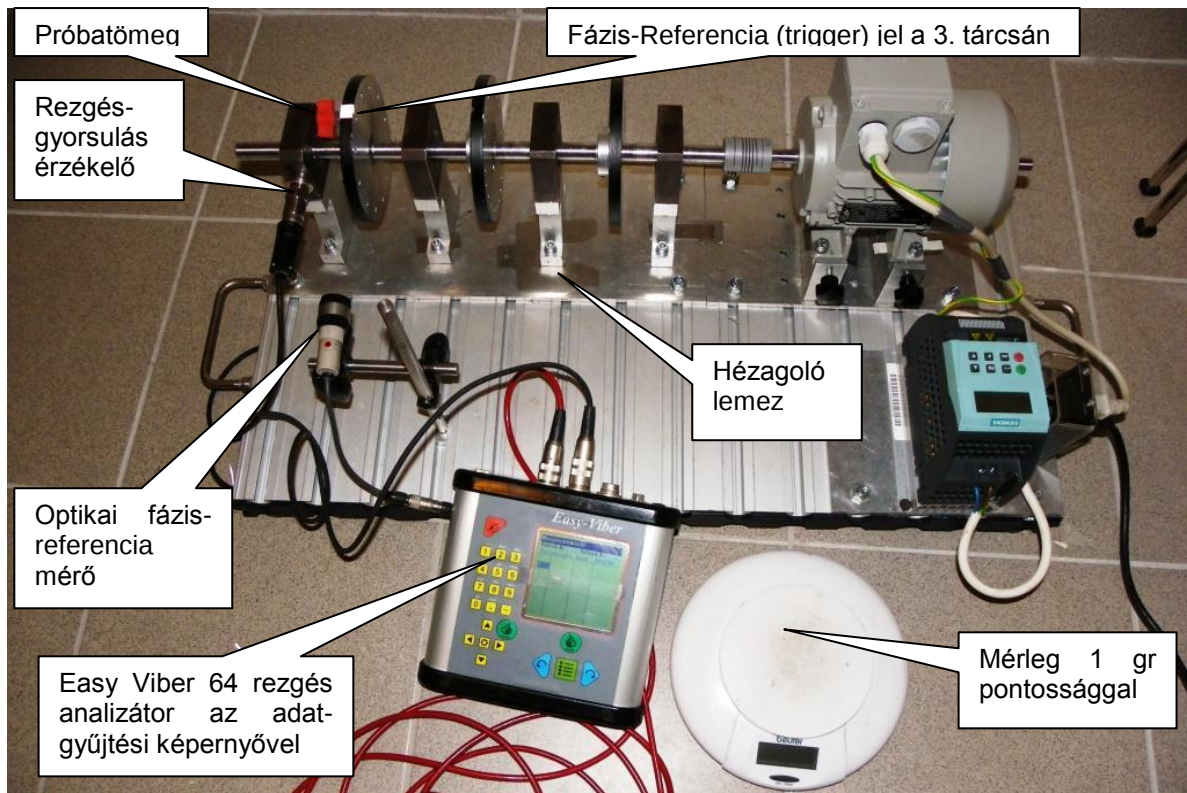
A mozgás-animációs kísérlet valóságos mérési összeállítását a 9. ábrán kísérhetjük figyelemmel.

A mérési körülmények:

A mérés helyszíne: Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépészmérnöki Kar Géptan labor

A méréshez felhasznált műszerek és eszközök:

- A hajtómotor Siemens 1LA7-063-2AA P=180W, $n = 1350$ 1/min
- Frekvenciaváltó Siemens Sinamics G110, a motor max. fordulatszáma: 3000 1/min
- COMBI-LASER lézeres tengelybeállító,
- SKF CMSS 6455 stroboszkóp,
- VMI EasyViber64 rezgés-analizátor optikai fázisreferencia mérővel,
- Mérőóra ütés ellenőrzéshez, hézagmérő és hézagoló lemezek, 1 gr pontosságú mérleg



9. ábra. A mozgás-animációs vizsgálat rezgésmérésének mérési összeállítása [12]

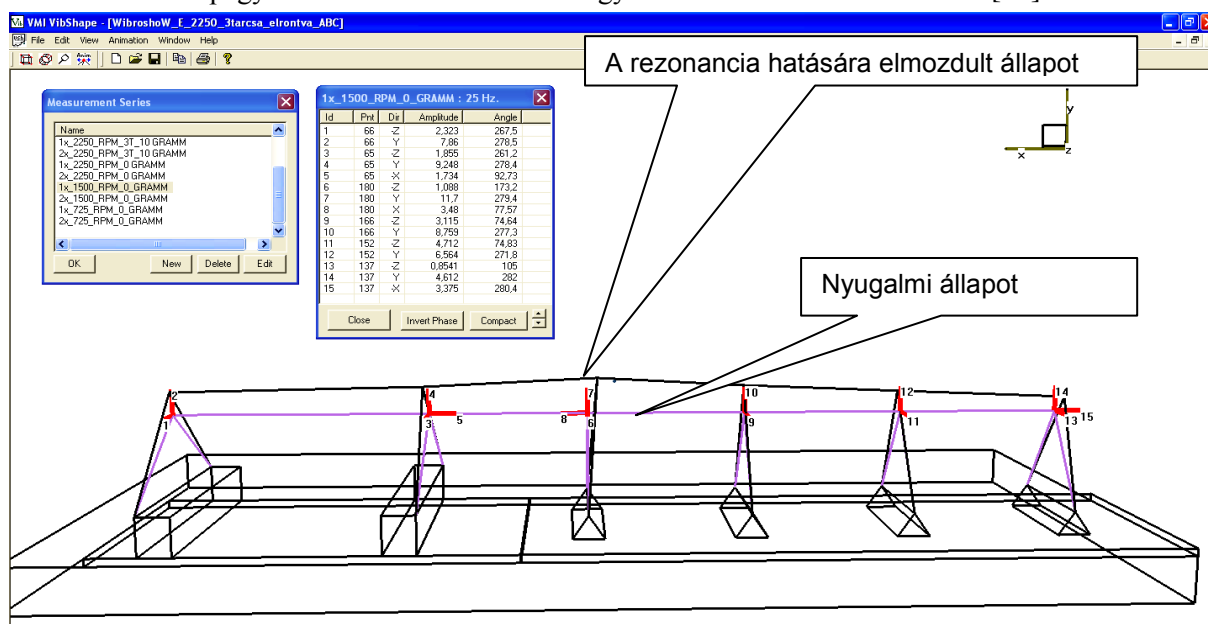
A mérési fordulatszámok meghatározása érdekében szükség van a rendszer rezonancia frekvenciájának ismeretére, mivel a rezonanciához közeli fordulaton megváltozik a gép viselkedése így lehetőségünk nyílik a rezonanciás állapotok közben kialakult mozgások tanulmányozására is.

A próbapad rezonanciavizsgálatát az Easy Viber 64 műszerbe épített kifizetésvizsgálattal határoztam meg, melynek eredményeként a rezonancia frekvenciák vízszintes irányban **884 1/min** sajátfrekvencián **2,70 mm/s**, függőleges irányban **1400 1/min** sajátfrekvencián **15,97 mm/s** rezgéssebesség amplitúdó értékre adódtak. A mérés tervezésénél ezt úgy vettem figyelembe, hogy egy mérést a sajátfrekvenciák alatt, egyet a sajátfrekvencia környezetében, egyet pedig felette terveztem az üzemállapotok és a rendszer mozgásainak jó megkülönböztethetősége érdekében. A kísérleti mérések során mindezek ismeretében az alábbi mérési sorozatokat alakítottam ki [12]:

1. animációs mérés $n = 725 \text{ 1/min} = 12,5 \text{ Hz}$ fordulatszámon
2. animációs mérés $n = 1500 \text{ 1/min} = 25 \text{ Hz}$ fordulatszámon
3. animációs mérés $n = 2250 \text{ 1/min} = 37,5 \text{ Hz}$ fordulatszámon
4. animációs mérés $n = 2250 \text{ 1/min} = 37,5 \text{ Hz}$ fordulatszám az 1. tárcsában +10gr tömeg
5. animációs mérés $n = 2250 \text{ 1/min} = 37,5 \text{ Hz}$ fordulatszám a 2. tárcsában +10gr tömeg
6. animációs mérés $n = 2250 \text{ 1/min} = 37,5 \text{ Hz}$ fordulatszám a 3. tárcsában +10gr tömeg

3.2 A mérési eredmények

Mérési eredményként egy olyan 3 dimenziós mozgó animációt kapunk, melyet minden irányban körbeforgathatunk, kinagyíthatunk, tehát a gép egészét és a kisebb részleteket is tanulmányozhatjuk. Lehetőség rá, hogy a mozgást a szélső helyzetekben megállítsuk, így a kimerevített képen az eltérések még jobban láthatóvá válnak. Ezen cikk kétdimenziós lapjain nehéz egy három dimenzióban mozgó objektum bemutatása, ezért - valamint a cikk terjedelmére való tekintettel - az elvégzett hat mérési sorozatból csak három jellegzetes kimerevített képet mutatok be a 10. 11. és 12. ábrán, amelyhez egy, a tárcsák és a csapágyházak körvonalait mellőző egyszerűsített modellt készítettem [12].

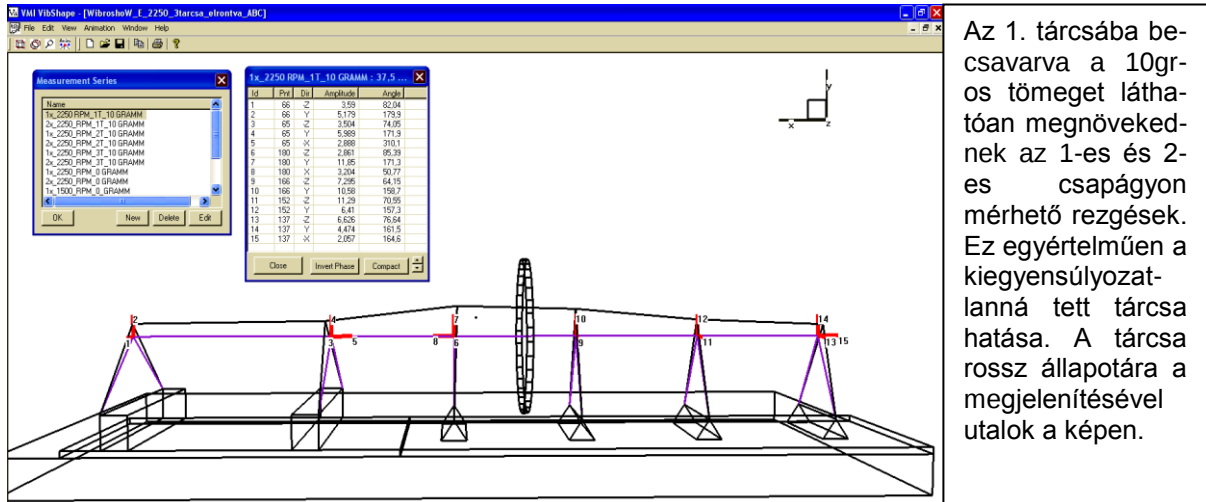


10. ábra. A 2. animációs mérési sorozat eredménye 1500 1/min=25 Hz rezonancia fordulatszámon

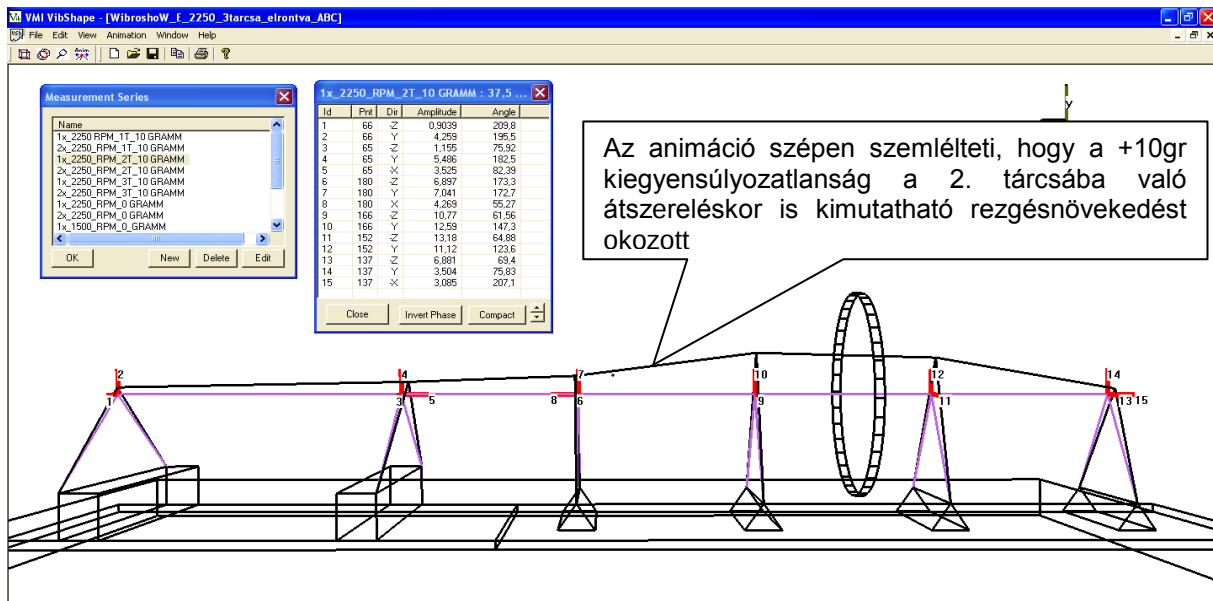
3.3 A mérési eredmények értékelése

A mozgás-animációs kísérletek eredménye, egyrészt a mérési eredmények alapján valóságos mozgást végző modell, másrészt meg lehet jeleníteni a 10. 11. és 12. ábrákon bemutatásra kerülő kimerevített képet. A kísérletek kiértékelésében mindkét lehetőséget kihasználtam. Mivel a kísérletek célja elsődlegesen a módszer gyakorlati alkalmazhatóságának bizonyítása volt, ezért az animációk eredményének kiértékelése során a forgó gépek műszaki állapotváltozásainak követésére szempontjából, az alábbi kérdésekre kerestem a választ:

- Kimutatható-e fordulatszám változás műszaki állapotra gyakorolt hatása?
- Kimutatható-e a rezonancia mentes és a rezonanciában való üzemelés különbsége?
- Milyen változást okoz a tárcsák kiegyensúlyozatlanságának növelése?
- Alkalmazható-e a módszer a műszaki állapotban bekövetkezett változások megjelenítésére?



11. ábra. A 4. animációs mérési sorozat eredménye 2250 1/min=37,5 Hz fordulatszámon jól látható, hogy az 1-es tárcsába szerelt +10 gr tömeg hatására az 1 és 2 csapágyakon nőtték a rezgések



12. ábra. Az 5. animációs mérési sorozat eredménye 2250 1/min=37,5 Hz fordulatszámon jól látható, hogy az 2-es tárcsába szerelt +10 gr tömeg hatása, a rezgés „átvándorolt” 2 és 3 csapágyra

A cikk terjedelme sajnos nem teszi lehetővé a mérési eredmények ennél részletesebb ismertetését, de a rendelkezésemre álló összes mérési eredmény alapján megállapítható, hogy a mozgás-animációs diagnosztikai módszer a mechanikai rezgéseket, az üzem közben létrejövő elmozdulásokat jól szemlélteti, melyet az alábbi tények bizonyítanak:

- A animációk alapján kijelenthetem, hogy a gép fordulatszám változásának hatása az animációban megjelenik, melyet a rezonancia alatti és feletti mérések igazolnak.
- A 10. ábrán látható animáció, valamint a kifutás vizsgálat eredményei azonos műszaki állapotra, a rezonanciában való üzemelésre utalnak, tehát a módszerrel a gépek rezonanciában való üzemelése láthatóvá tehető, megfigyelhető, hogy a rezonancia mind a négy csapágyon egyszerre közel azonos rezgésváltozást okozott, míg a kiegyensúlyozatlanságok előállításakor csak az elrontott tárcsa körüli csapágyon következett be szemmel látható és a mérési eredményekből számszerűen is kiolvasható a rezgésváltozás. Ez bizonyítja, hogy a módszerrel elkülöníthetők azok a hibák, amelyek azonos frekvencián fejtik ki hatásukat.
- A 11. és 12. ábrákon látható animációk alapján megállapítható, hogy a forgórész három tárcsájának kiegyensúlyozatlanságát a mozgás animáció mérési eredményeinek segítségével jól le lehet követni. A próbatömeg átszerelése egyértelműen látszik. Tehát a mechanikus hibákkal, kiegyensúlyozatlansággal, vagy fellazulással, szerkezeti rezonanciákkal, tengely-beállítási hibákkal kapcsolatos meghibásodások, a műszaki állapotban bekövetkezett változások a módszer alkalmazásával láthatóvá tehetők.

3.4 A kísérleti eredmények alapján levonható következtetések:

- A kísérletek során az általam létrehozott mesterséges hibákat a valós rezgésmérési eredményeknek megfelelő, valóságos formában jelenítettem meg a modell mozgásában. Megállapíthatom, hogy a módszer által szolgáltatott mérési eredmények a hibás alkatrész gyorsabb felfedezésére és a meghibásodás fajtájának pontosabb megállapítására nyújtanak lehetőséget.
- Az animációs vizsgálat eredményei alapján levonható az a következtetés, hogy azoknál a tönkremeneteli módoknál, amelyeknél meg tudjuk mérni a gerjesztési frekvenciát, vagy ismerjük a gép sajátfrekvenciáját, a mozgás-animáció a spektrumanalízisnél hatékonyabban alkalmazható a diagnózis felállításában. Különösen ott van jelentősége, ahol egy frekvencia pl. a forgási frekvencia jelenléte egyszerre többféle (kiegyensúlyozatlanság, rezonancia, tengely-beállítási hiba, tárcsa excentrikusság, stb.) meghibásodásra is utalhat.
- A mozgás-animációs módszert vázszerkezetek, gépalapok, gépelemek „rezonanciás viselkedésének”, repedési, törési helyeinek kimutatására, mechanikai lazaságokból, fellazulásból, kiegyensúlyozatlanságból, tengely-beállítási hibából eredő gerjesztések hatásának kimutatásával kapcsolatos diagnosztikai feladatok megoldására javaslom.

4. MOZGÁS-ANIMÁCIÓS MÓDSZER KIDOLGOZÁSA A JAS-39 GRIPEN VOLVO RM 12 HAJTÓMŰVÉNEK ÁLLAPOTFÜGGŐ KARBANTARTÁSÁHOZ

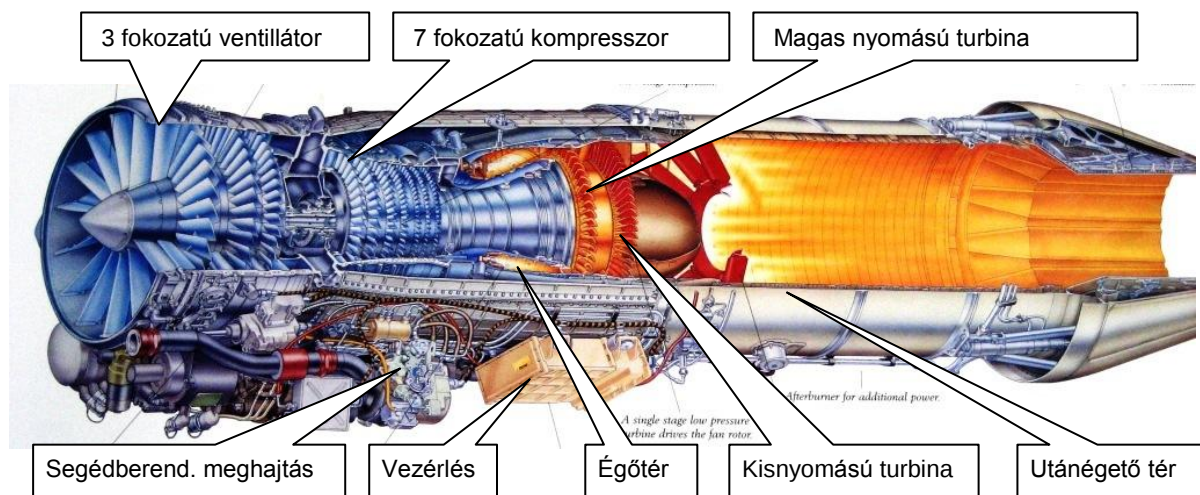
Napjaink korszerű hadviselésében a katonai műveletek alapvető eleme a légierő alkalmazása. A légierő alkalmazhatósága és az általa elvégezhető harcászati feladatok végrehajthatósága azonban nagymértékben függ a haditechnikai eszközök megfelelő rendelkezésre állásától is. A légierőnél rendszerbe állított vadászpilóta nélküli repülőgépek csak a kor színvonalának megfelelő technológiák alkalmazásával lehetnek az ellenféllel szemben eredményesek. Az egyre bonyolultabb eszközök esetében azonban nem csak beszerzésük, hanem üzemben tartásuk is magas ráfordítást, üzemeltetési költséget igényel.

A vadászpilóta nélküli repülőgépek eredményes harcászati alkalmazhatósága mellett tehát gondot kell fordítani a repülőtechnika gazdaságos üzemeltetésére is. A hosszú élettartamon keresztül, megbízhatóan működő berendezések fenntartásának alapja a műszaki állapot minél pontosabb megítélése, annak érdekében, hogy a karbantartási intézkedések, javítások, vagy cserék tekintetében is optimális döntéseket lehessen hozni. Az időben felderített meghibásodások növelik a hadrafoghatóságot és csökkentik a fenntartási költségeket.

4.1 A JAS-39 Gripen és a Volvo RM 12 hajtómű főbb jellemzői

A Svéd Légierő 1980-ban kezdte el egy újszerű, negyedik generációs harci repülőgép létre hozásának programját, melynek célja egy különböző jellegű harc feladatok végrehajtására alkalmas könnyű harci repülőgép kifejlesztése volt. A JAS-39 Gripen (Griffmadár) névre keresztelt repülőgép felhasználása többcélú, hiszen vadász (Jakt), csapásmérő (Attack), felderítő (Spanung) feladatkörök ellátására is képes. A Gripen tervezésénél már a 21. század harci repülőgépével szemben támasztható követelményeket vették figyelembe, a megfelelő harci hatékonyságot, a taktikai rugalmasságot, a földön és levegőben megfelelő túlélőképességet, a repülési biztonságot, hajózószemélyzet hatékony kiképzési lehetőségei, a fejlesztetheőséget és nem utolsósorban az alacsony üzemeltetési költségeket.

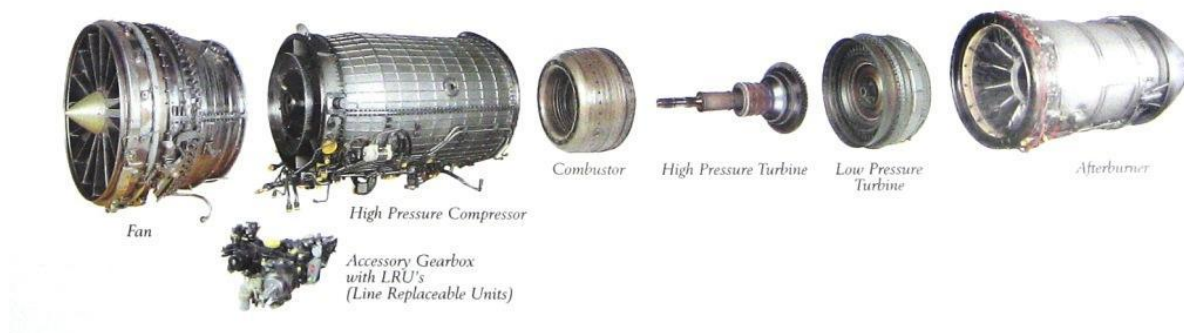
A repülőgép rendelkezik repülési terhelés figyelő rendszerrel, amely méri a hat fő repülési terhelést, azaz a tér három koordináta tengelyének irányában az erőket és nyomatékokat. Ezeket az adatokat az adatrögzítő rendszer segítségével tárolják, így lehetőség van a teljes repülési élettartam során tervezett és a valós terhelési viszonyok, valamint a sárkányszerkezet kifáradási viszonyainak rögzítésére, elemzésére. Az önellenőrzést biztosító digitális technika a repülőgép áram aláhelyezése után az ellenőrző tesztek lefuttatása után lehetőséget biztosít az egyes rendszerek funkció figyelésére, a meghibásodás helyének meghatározására, valamint repülés közben történt meghibásodások rögzítésére is. A repülőgépbe folyamatos rezgésfigyelő rendszer sajnos nem került beépítésre.[11]



13. ábra. A Volvo RM 12 hajtómű felépítése és főbb részegységei [11]

A Volvo RM12 hajtóművet a Volvo és a General Electric együttműködésével hozták létre a General Electric F404 hajtóművének (amely az F-18-as vadászgép hajtóműve) továbbfejlesztése útján. A fejlesztések eredményeképpen az új konstrukció tolóerejét 72 kN-ról 80,5 kN-ra sikerült megemelni. A Volvo RM12 egy két-forgórészes, kis kétáramúsági fokú, kétáramú utánégető térrel ellátott sugárhajtómű, melynek fő részeit a 13. ábrán kísérhetünk figyelemmel. Amint az ábrán is látható hajtómű forgórésze egy három-fokozatú ventilátorból és egy hét-fokozatú nagynyomású kompresszorból áll, melyeket külön-külön egy-fokozatú turbinák hajtanak. A hajtómű ventilátor kialakítását úgy tervezték, hogy az elődjénél jobban viselje az idegen tárgyakkal és madárral történő ütközést.

A hajtómű a 14. ábrán látható hét modulból épül fel. Mivel mindegyik modul csereszabatos más RM12 hajtóművek moduljaival ez a kialakítás minimalizálja és egyszerűsíti a karbantartást, mivel az esetlegesen meghibásodott részek rövid idő alatt kicserélhetők. Ez egyrészt azt jelenti, hogy nem kell a teljes hajtóművet javításba küldeni, csak a meghibásodott egységet kicserélni, másrészt az újonnan beépített elemet a hajtómű vezérlő elektronika automatikusan szabályozza hozzá a rendszerhez, így elmaradhat a beszabályozás miatti hajtóműpróba, amely jelentős karbantartási időt takarít meg.



14. ábra. A Volvo RM 12 hajtóművének külön-külön szerelhető csereszabatos részegységei [11]

Tulajdonképpen a hajtóműnek ez a tulajdonsága adta az ötletet a mozgás-animáció alkalmazásának lehetőségére, mert az egyes részek nem megfelelő működési állapota a csapágyazási helyeken és a hatómű összeépítési pontjain mindenképpen rezgésnövekedésben nyilvánul meg. Ezek alapján a nem megfelelő működésre a rezgésvizsgálat eredménye alapján lehet következtetni, majd dönteni arról, hogy melyik hajtómű részegységet szükséges kicserélni?

4.2 A JAS-39 Gripen vadászpilótaegység jelenleg alkalmazott rezgésvizsgálat

A Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetemen sikeresen megvédett PhD doktori értekezésem kutatómunkája kapcsán az MH Repülőműszaki Szolgálatfőnök engedélye alapján több alkalommal is lehetőségem volt eljutni a Kecskeméti MH 59. Szentgyörgyi Dezső Repülőbázisra, ahol részt vehettem a JAS-39 EBS HU Gripen vadászpilótaegység Volvo RM 12 B típusú hajtóműpróbáján, valamint éppen aktuális időszakos rezgésmérésén is. A repülőgép időszakos rezgésvizsgálatát előírás szerint hajtómű modul csere után, idegen tárgy beszívása esetén, vagy akkor kell elvégezni, ha a pilóta erős rezgéseket tapasztal repülés közben.

Mivel a JAS-39 Gripen vadászpilótaegységnek nincs repülés közbeni rezgés ellenőrző rendszere, ezért a hajtómű rezgésméréséhez a Saab gyár egy külső céggel tesztberendezést fejlesztett ki az időszakos rezgésvizsgálatok végrehajtására. A hajtómű rezgésmérését a repülőtéren erre a célra kialakított hajtómű vizsgáló állomásán kell elvégezni álló helyzetben, a repülőgép rögzítésével. A Saab gyár által alkalmazott rezgésdiagnosztikai eszköz az alábbi részegységekből áll:

- Központi mérési adatrögzítő egység
- 4 db piezoelektromos rezgésérzékelő
- Az érzékelőket hajtómű testhez rögzítő idomok,
- Interface egység
- Kábelek a részegységek összekötéséhez

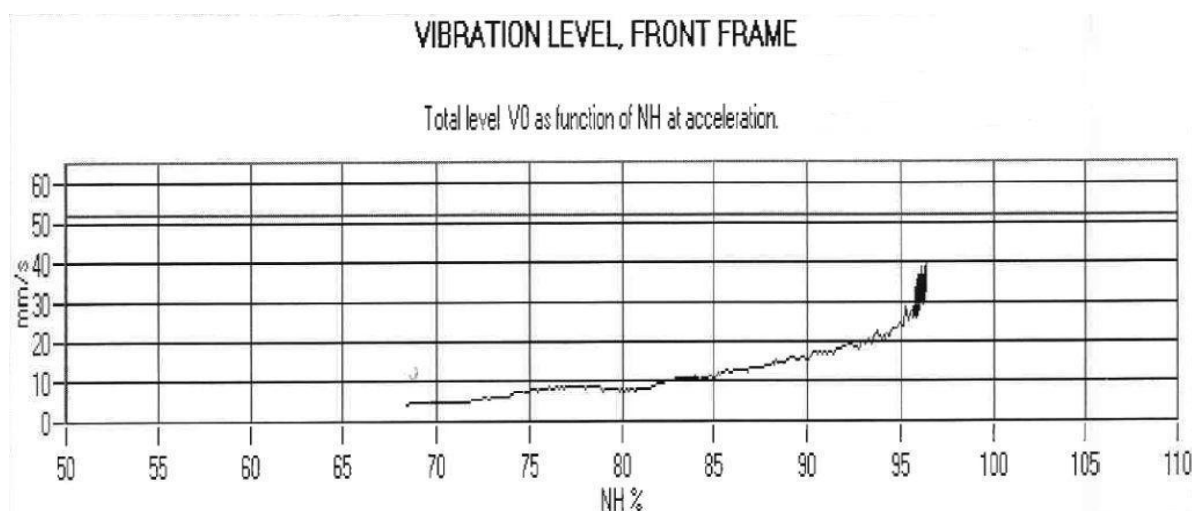
A vizsgálat az érzékelők és az interface egység repülőgépen való elhelyezésével kezdődik, amelyhez rögzítő elemek állnak rendelkezésre. Az érzékelők felszerelése a hajtómű négy pontján történik. A mérés megkezdése előtt az adatgyűjtővel összekötik az érzékelők jeleit fogadó interface egységet, majd a repülőgéptől biztonságos távolságban elhelyezkedve a meghatározott mérési menetrend szerint el lehet kezdeni a mérést. A mérés alapjáratról 95%-os terhelésig való gyorsítási, utánégető üzemmódban, és alapjáratra történő lassítási fázisban történik. A mérés során a rezgésebesség effektív értékét rögzíti a berendezés, a mérési frekvenciatartomány azonban nincs megadva. Az adatrögzítő csak a különböző felterhelési és leterhelési állapotokhoz tartozó maximális rezgésebesség mérési eredményeket (OA_{RSS} ⁵-el jelölt overall értékeket) jeleníti meg képernyőn, majd a mérési adatok számítógépbe való visszatöltése után a az üzemállapotoknak megfelelő terhelés függvényében skálázott rezgésváltozási grafikont készít, amelyre példát a 15. ábrán láthatunk.

⁵ OA_{RSS} - Root Sum Square – a teljes spektrumban található amplitúdók négyzetes rezgésösszege

A mérési eredmények kiértékelése is tulajdonképpen ezen adatokból történik oly módon, hogy a különböző mérési helyekhez megadják azokat a maximális rezgésszint értékeket, amelyek már nem megfelelő üzemállapotra utalnak. Mivel a repülőgépen nincs telepített rezgésfigyelő rendszer, ezért ez az időszakos vizsgálati módszer mindenképpen hasznos abból a szempontból, hogy legalább a repülőgépet érintő különleges esetekben képet ad a hajtómű műszaki állapotáról. A módszer előnye, hogy a valós repülési helyzetet megközelítő gyorsítási és lassítási és „teljes utánégetési üzemben” (max. terhelésnél) is ad információt a hajtómű rezgésállapotáról.

A jelenleg alkalmazott módszer hátrányaként azt lehet még megemlíteni, hogy a rezgésmérést nem rendszeresen, hanem esetlegesen végzik, a pilóták jelzései alapján, illetve csak a hajtómű részegység cseréket követően kötelező a rezgésmérés és a hajtómű próba. A mérési eredmények gyakran csak kismértékben (1-2 mm/sec értékkel) maradnak el a még megengedhető értéktől, emiatt az üzemeltetők nem lehetnek minden esetben 100%-ig biztosak a hajtómű műszaki állapotát illetően.

Ezen információk ismeretében a Gripen repülőgép hajtómű üzembiztonságának növelése érdekében határoztam el, hogy az iparban hatékonyan alkalmazott mozgás-animációs módszerrel e területen alternatív rezgésmérési lehetőséget dolgozok ki.



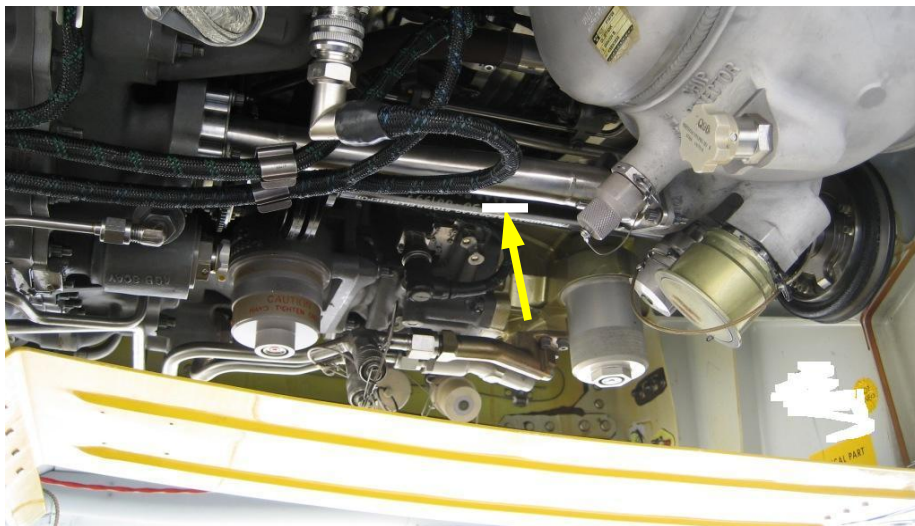
15. ábra. A ventilátor csapágyazáson (FrontFrame) mérhető rezgéssebesség változás a hajtómű terhelés % függvényében, gyorsítási üzemmódban

4.3 Javaslat a Gripen hajtóművének mozgás-animációs rezgésvizsgálatára

A JAS 39 Gripen vadászrepülőgép üzemeltetési és rezgésmérési gyakorlatának ismeretében, támaszkodva mozgás-animációs kísérleti eredményeimre, valamint iparban valós problémák megoldása során szerzett műszaki tapasztalatomra, javaslom a mozgás-animációs mérés részletes kidolgozását a Volvo RM 12 hajtóműre. Véleményem szerint a hajtómű rezgéseinek láthatóvá tétele az eddig alkalmazott módszerhez képest többlet információt ad. Lehetőséget biztosít a hajtómű részegységek egymáshoz viszonyított elmozdulásának kimutatására, a magas rezgések eredetének beazonosítására, valamint a meghibásodott rész szomszédos elemekre gyakorolt hatásának elemzésére.

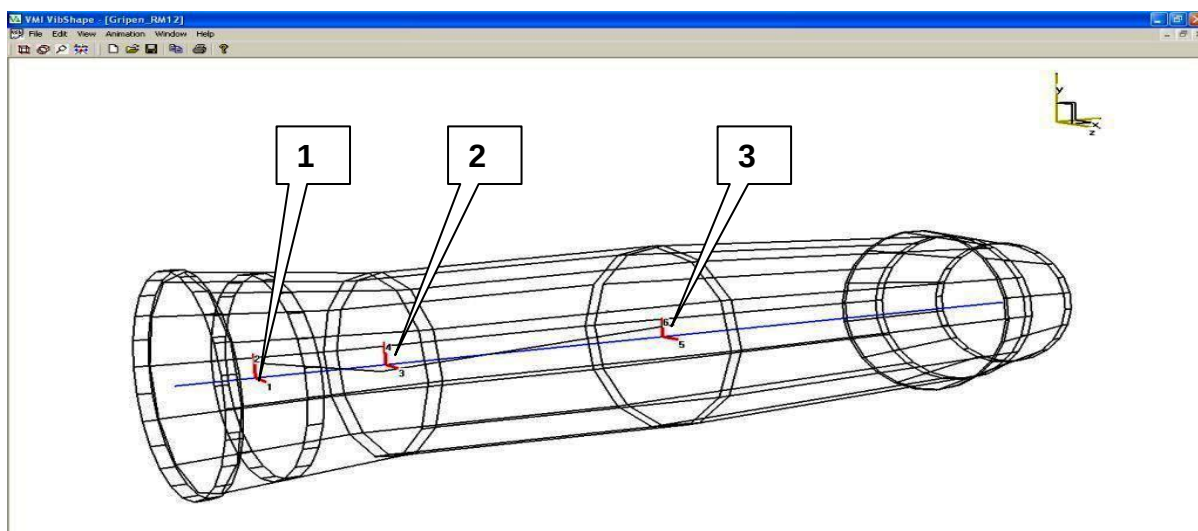
Gyakorlati tapasztalatom alapján, annak érdekében, hogy a mozgás-animációs vizsgálat a JAS-39 Gripen repülőgépen elvégezhető legyen, az alábbi feladatokat kell elvégezni:

- Rezgésanalízist kell végezni a vizsgálati fordulatszámok és frekvenciák megállapításához
- Az érzékelők rögzítésére felfogató idomokat kell tervezni legyártani és alkalmazni.
- El kell készíteni a hajtómű mozgás-animáció modelljét
- A fordulatszám és fázisszög mérésére a repülőgép segédberendezés hajtás tengelyére ragasztott fényvisszaverő csík segítségével van lehetőség, lásd 19. ábrán, ennek felragasztásához szükséges engedélyeket be kell szerezni a vadászrepülő gyártójától.
- A mérést alapljárton és maximális fordulatszámon javaslom elvégezni
- A vizsgálati frekvenciákat a nagy- és kisnyomású forgórész forgási frekvenciájára kell beállítani
- Vízszintes, függőleges és axiális méréseket kell végezni a Front Frame, Mid Frame, Rear Mount Ring és Aircraft Gearbox pontokon, így a térbeli mozgás láthatóvá tehető
- A mozgás-animációs vizsgálatot a tapasztalatszerzés növelése érdekében olyan sűrűn kell elvégezni, amilyen sűrűn csak lehet. 50 óránként, illetve **minden hajtómű próbánál** javaslom
- A jellegzetes meghibásodások szimptóma rendszerét a svéd gyárral közösen kell kidolgozni
- A mérés végrehajtásához és kiértékeléséhez szükséges műszerekkel és szoftverekkel rendelkezem
- A mérés tervezésében, előkészítésében, kivitelezésében és természetesen a mérési eredmények kiértékelésében igény esetén szakértőként részt veszek



16. ábra. A fázis referencia jel javasolt elhelyezése a JAS-39 Gripen repülőgép segédhajtás áthajtó tengelyén

A méretarányos mozgás-animációs modell tervezését és kidolgozását elvégeztem, melyet a 17. ábrán kísérhetünk figyelemmel. Ez egyenlőre egy olyan animáció, melyet mesterségesen töltöttem fel adatokkal az animáció által szolgáltatott információ hatékonyságának bemutatása érdekében.



17. ábra. A JAS-39 Gripen Volvo RM 12 B típusú hajtóművéhez készített mozgás-animációs modell a javasolt mérési pontokkal

A mozgás-animáció előnyei a jelenlegi rezgésméréshez képest:

- A mozgás-animációs módszer eszközigénye nem jelentős, a szükséges műszerek és szoftverek beszerezhetők, költségük a vadászpilóta gépekre jellemző magas költségekhez képest elenyésző.
- A rezgés spektrumokhoz, vizesítés diagramokhoz képest a fázisszög helyesen elkészített mozgás-animációs mérések a térbeli mozgás láthatóvá tétele által a hibás területek és hibára utaló jelek könnyebb felismerhetőségét teszik lehetővé.
- Nagyon fontos információk lehetnek az egyes mérési pontok egy fordulat alatt egymáshoz képest történő elmozdulásai, amelyek láthatóvá teszik a hajtóműre üzem közben ható erőket.
- Nem csak a hibás hajtóműrész, hanem a szomszédos elemekre gyakorolt hatása is vizsgálható
- Lehetőséget biztosít a segédberendezés hajtás, illetve az áttételek ismerete esetén gyakorlatilag az összes mechanikus problémára utaló rezgés láthatóvá tételére
- A jelenlegi rendszer mérési eredményeiből megállapítható, hogy a legmagasabb rezgések általában a maximális fordulatszámon jelentkeznek, így ezen a fordulatszámon elkészített mozgás-animáció szemléletesebben, térben mutatja a hajtómű egyes részeinek mozgását.

ÖSSZEFOGLALÁS

A vadászpilóta gépek folyamatos és biztonságos üzemeltetése a magyar honvédelmi szempontok tekintetében is kiemelt terület. Úgy gondolom, hogy minden többlet információ, amely a megbízhatóság növelését, a meghibásodások csökkentését eredményezi, a nemzetbiztonság érdekeit szolgálja. Szakmai szemmel úgy érzem, hogy mint minden működő gép vonatkozásában, a repülőtechnika tekintetében is szükséges a megelőző karbantartás folyamatos fejlesztése.

Tulajdonképpen minden készen áll egy próbamérés elvégzéséhez, azonban a vadászrepülőgépek esetében mind a gyártóműtől, mind az üzemeltetőtől be kell szerezni a szükséges engedélyeket. Jelenleg a gyártómű szakembereivel való kapcsolatfelvétel folyik, de remélhetőleg az első próbamérésekre is hamarosan sor kerülhet.

A mozgás-animációs vizsgálat alkalmazásával a repülőgép sugárhajtómű szimulációs modelljének elkészítésével, arra kívánok lehetőséget teremteni, hogy rezgésdiagnosztikai eszközök segítségével a hajtómű rezgéseit megbontás nélkül, üzem közben lehessen láthatóvá tenni. A vizsgálat eredményei a jelenleg alkalmazott módszerhez képest többlet információt adnak a hajtómű műszaki állapotáról, használatával növelni lehet a hajtómű meghibásodások korai felderítésének hatékonyságát.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Tóth András : JAS-39 Gripen EBS HU többfeladatú vadászrepülőgép Repüléstudományi Közlemények Különszám, Szolnok, 2005. április
- [2] Dr. Ludvig Győző: Gépek dinamikája Műszaki Könyvkiadó, 1973. pp. 80.-81.
- [3] Szerk. Dr. Dömötör Ferenc: Rezgésdiagnosztika I. kötet Dunaújvárosi Főiskola Kiadói Hivatala, Dunaújváros 2008. pp. 8.-17., pp. 71.- 76.
- [4] cm5003.pdf SKF Vibration Guide-12007 AB SKF http://iis.aptitudexchange.com/inquire/psp/DisplayQA.aspx?segment=MISCELLANEOUS&filename=q200603_como_eabd0ff2575e37ff88257139007d4264.html Letöltés dátuma: 2010.10.20.
- [5] Dennis Shreve: Rezgésanalízis: alapok A.A.Stádium Kft, Karbantartás & Diagnosztika, II. évf. 4. szám, 1995. dec. pp.4.-9.
- [6] Dr. Nagy István: Állapotfüggő karbantartás, Műszaki Diagnosztika I. Kiadó : Delta-3N Kft., Paks 2006. pp. 20.- 25.
- [7] Szerk. M. Csizmadia Béla – Nándori Ernő : MOZGÁSTAN mechanikai mérnököknek Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest 1997. pp.26 – 43.
- [8] EasyViber 64 Felhasználói kézikönyv VMI AB, Norrköping, 2000
- [9] Vibshape Manual Használati utasítás, VMI AB, Norrköping, 2002
- [10] Rahne Eric: Gépszerkezetek mozgás-animációs vizsgálata PIM Kft. Kiadványa, Budapest 2004. <http://www.pim-kft.hu/szakmai anyagok>
- [11] Peták, Gy. – Szabó, J. : A Gripen. Petit Real könyvkiadó, Budapest, 2003.
- [12] Szabó József Zoltán Rezgésdiagnosztikai vizsgálatok és haditechnikai alkalmazhatóságuk kutatása Doktori Ph.D. értekezés ZMNE, 2011.