

FOGASKEREKES HAJTÓMŰVEK AKUSZTIKAI JELLEMZŐINEK ELEMZÉSE VIZSGÁLÓ BERENDEZÉS TERVEZÉSÉHEZ

ANALYSING ACOUSTICAL CHARACTERISTICS OF GEARBOXES FOR DESIGNING TESTER EQUIPMENT

*Sarka Ferenc adjunktus, Tóbis Zsolt tanszéki mérnök
Miskolci Egyetem Gép-és Terméktervezési Tanszék*

ABSTRACT

The most determining noise parameter of gearboxes is the connecting area of the gears. Low-noise operation is one of the most significant conditions of the application on many fields. This way low-noise design and production come into view. According to the claims against the gearbox the one that is optimal for the given task can be chosen.

1. BEVEZETÉS

Fogaskerekes hajtómű meghatározó zajforrása a fogaskerekek kapcsolódásának környezete. Számos alkalmazási terület egyik feltétele a zajszegény működés. Ezáltal előtérbe kerül a zajszempontú tervezés és gyártás. A hajtóművel szemben támasztott követelmények alapján választhatjuk ki az adott feladathoz az optimális hajtóművet. Célunk, egy olyan vizsgáló berendezés tervezése, mely jellegzetes frekvenciák alapján alkalmas hajtómű hibák meghatározására. Ha egy ideálisnak tekinthető fogaskerékpáron szándékosan létrehozunk károsodási formákat, majd meghatározzuk a spektrumát, (amelyről feltételezzük, hogy egyedi, és megfeleltethető az egyes károsodási típusoknak), akkor egy általános fogaskerekes hajtómű spektrumából visszakövetkeztethetünk a hajtómű állapotára. Célunk tehát egy ilyen vizsgálati mérőpad létrehozása és a vizsgálatok végzése.

2. HAJTÓMŰ ZAJOK

A fogaskerék zaj nagyon bonyolult probléma, ez már abból is kitűnik, hogy különböző frekvenciájú lengések lépnek fel, - különböző kifejezéssel illetjük őket - a fogak zörögnek, kattognak, morognak, zümmögnek, búgnak,

stb. A hajtóművek zaja, és rezgései működésük során megváltoznak. Maga a zajnövekedés a hajtóművekben végbemenő mechanikai változásokra (károsodásokra) vezethető vissza. Fogaskerekes-hajtóművek jellemzője: az alakzáró csúszásmentes kényszerkapcsolat a be- és kihajtóoldal között, lehetővé téve nagy erő illetve, forgatónyomaték átszarmaztatását. A hajtómű meghatározó zajforrását a fogaskerekek fogkapcsolódása okozza, melyből a rezgés a hajtómű ház falán keresztül léghangként kerül ki a környezetbe (1. ábra).

Gépszerkezetek esetében különös jelentőségű a gerjesztést alapvetően meghatározó fogkapcsolódási frekvencia össze-tevői:

- kapcsolódási;
- az alakváltozási;
- a gördülőköri;
- hibaimpulzus.

3. FOGASKEREKES HAJTÓMŰVEK JELLEGZETES FREKVENCIAI:

Egy hajtóműben több, jellegzetes frekvencián kiugró intenzitású összetevők jelentkeznek. Ezek jelenléte műszeres vizsgálattal kimutatható, súlyuk és arányuk a gerjesztési viszonyok függvényében rendkívül változó. Fogkapcsolódási frekvencia:

$$f_z = \frac{n \cdot z}{60} \text{ [Hz]} \quad (1)$$

ahol: n a fogaskerék fordulatszáma min^{-1} -ben, z a fogsám. A csúszásmentes kapcsolat miatt, értéke kerékpáronként állandó. Fogazati hibák függvényében felharmonikusaival együtt jelentkezik.

Hajtási (forgási) frekvencia:
kiegyensúlyozatlanság (erőgerjesztés: $i_n=1$),

excentricitás (útgerjesztés: $i_h=2$) megjelenése következtében lép fel:

$$f_h = v \cdot \frac{i_h \cdot n}{60} \text{ [Hz]} \quad (2)$$

ahol: n a fogaskerék fordulatszáma min^{-1} -ben, v természetes szám.

Gépfrekvencia: A fogaskerék utolsó megmunkálást végző szerszám gép hibáját tükrözi vissza:

$$f_m = z_m \frac{n}{60} \text{ [Hz]} \quad (3)$$

ahol: z_m a szerszám gép osztó csigakerekének fogszáma.

Szerszámfrekvencia: a lefejtő szerszám osztás – és előtolás hibájának következménye:

$$f_{sz} = z_{sz} \frac{n}{60} \text{ [Hz]} \quad (4)$$

ahol: z_{sz} a lefejtő szerszám osztása.

Ismétlődési frekvencia: egy fogaskerék kapcsolatban ugyanazon fogak rendszeresen ismétlődő kapcsolódása.

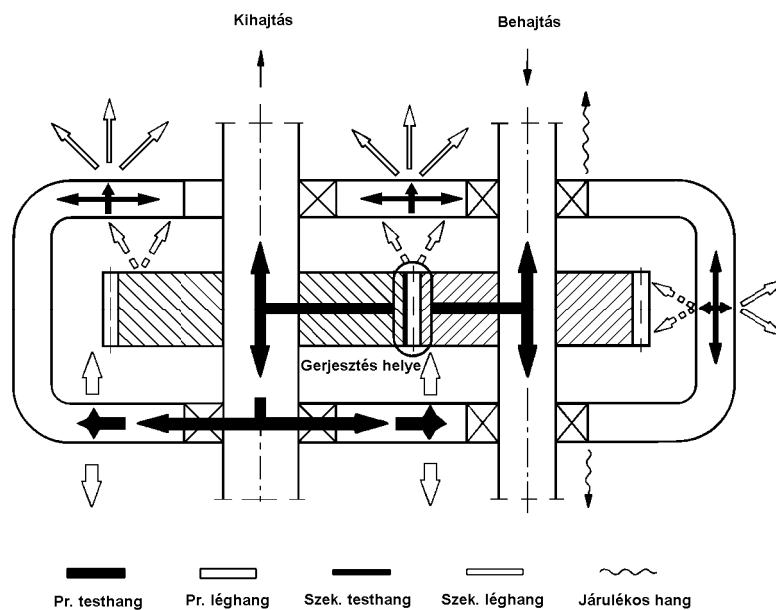
$$f_i = \frac{z_{i/j}}{z_i z_j} \cdot f_{hi/j} \text{ [Hz]} \quad (5)$$

ahol: z_{ij} a kapcsolatban lévő i vagy j jelű fogaskerék fogszáma; z_i és z_j a megfelelő fogszámok; $f_{hi/j}$ a vonatkoztatott fogaskerék forgási frekvenciája.

4. TERVEZÉSI FOLYAMAT SZAKASZAI

Zajszempontú tervezés egy olyan céltudatos cselekvés, mely a tudományterület megfelelő ismereteit felhasználva – a cél elérése érdekében – zajcsökkentéshez ad biztos alapot. Tervezési eljárást négy fő szakaszra lehet bontani.

- Feladat felépítése: követelményjegyzék felállítása, megfelelő jogszabályok, rendelkezések, zajelőírások összegzése – ez egyben a tervezési folyamat irányelve.
- Elvi tervezés: megoldásvetők keresése, zajosság becslése, ismert konstrukciók összehasonlítása
- Tervezés és részletezés: számítás és modellezés, tervezési részletek meghatározása. akusztikai modellezés – zajosság becslése.
- Mintapéldány: Prototípus megalkotása, akusztikai mérések elvégzése előírásoknak megfelelően – zajszint meghatározása, értékelése, szükség esetén a konstrukció módosítása.



1. ábra Hajtóműszekrény gerjesztése

Alaplépések:

Különböző zajforrásokkal rendelkező gépek zajjellemzői akusztikai modellel szemléltethető, a modell gondos kidolgozásakor a gépet aktív és passzív zajforráselemekre kell felosztani.

Aktív és a passzív zajforráselemek léghangot, folyadékhangot és testhangot gerjeszhetnek, átvihetnek és lesugározhatnak (1. ábra). Ezen három típus szerint kell vizsgálni a zajforráselemeket, további feladat a meghatározó zajforrások, átviteli utak és a lesugárzó felületek meghatározása. Figyelembe kell venni azt is, hogy a zaj milyen módon terjedhet. Figyelembe kell venni a testhang-, a folyadékhang- és a léghangutakat, esetleges léghang-sugárzást.

Általános tervezési szabályok:

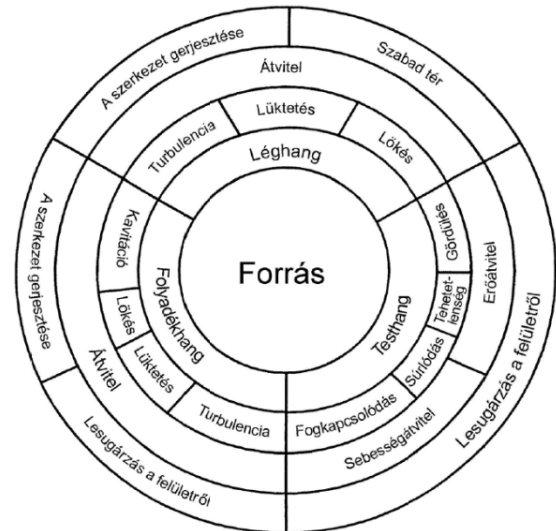
- a gépet szét kell választani aktív és passzív zajforráselemekre;
- meg kell határozni a lég-, a folyadék- és a testhangforrások helyét;
- meg kell határozni a lég-, a folyadék- és a testhangterjedés útját;
- meg kell határozni a hanglesugárzó felületeket;
- azonosítani kell a legnagyobb zajkószókat (források, átviteli utak, lesugárzó felületek).

A különböző zajmechanizmusok kapcsolódásának módjait szemlélteti a 2. ábra. Zajcsökkentésben elsődleges a forrás azonosítása (minden hangforráshoz saját jellemző, saját átviteli út és a lesugárzó felületek gerjesztése tartozik). Különböző típusú forrással rendelkező gép zajának kézbe tartására minden zajforrást, az átviteli utat és a lesugárzó felületet külön-külön elemezni kell, hogy egymáshoz képest értékelni lehessen.

5. ZAJKIBOCSAJTÁSÁNAK CSÖKKENTÉSE [11]

Léghangforrások:

Minden áramló gáz turbulencia, lökés és lüktetés következtében zajt okozhat. Áramlási rendszerben a zaj forrása behatárolható a lehetséges akadályok vizsgálatával. Ezen akadályok eltávolításával vagy számuk csökkentésével a rendszer zajmagatartás változik.



2. ábra Gépek zajgerjesztésének alapmodellje

Folyadékhangok:

A folyadékok, mint a levegő is, turbulenciával, lüktetéssel és lökessel zajt gerjesztenek, ezért ugyan olyan szabályokat lehet alkalmazni, mint a léghangforrásoknál.

Testhangforrások:

Ütközés: az előző két lehetőségtől eltérően ebben az esetben az ütközési zaj a leguralkodóbb zajforrás gépekben. Számos zajgerjesztési mechanizmus ismétlődő ütközéseként kezelhető. Az ütközési zaj legfontosabb paraméterei az ütköző testek tömege és sebessége, valamint az ütközés időtartama.

Tervezési szabályok az ütközési zaj csökkentésére:

- ütközési idő növelése;
- az ütközési sebesség csökkentése;
- a szabadon ütköztetett test tömegének a lehető legkisebbre való csökkentése;
- a rögzített test tömegének növelése;
- a nem rögzített, váltakozó terhelésű alkatrészek kiküszöbölése.

A következőkben különböző testhangforrások kerülnek ismertetésre:

Fogkapcsolás:

Az ütközési zaj egyik különleges formája a fogaskerek fogainak kapcsolódása. Fontos paraméterei az érintkező elemek érintkezési időtartama, az erő-időváltozás az érintkezés alatt és az érintkező elemek – fogak – merevsége. További erőváltozásokat okozhatnak a foghibák, amik a zajt növelhetik. A fogaskerek leggyakrabban tiszta hangokat gerjesztenek.

Fogkapcsolódás okozta testhang csökkentése:

- érintkezési idő növelése;
- ferde fogazású fogaskerekek használata;
- fogak számának növelése;
- minőség fokozása;
- kis terheléshez műanyagok használata.

Gördülés:

Gördüléskor keletkező zaj a gördülő felületek egymással való érintkezésénél lévő érdesség vagy egyenetlenség következménye, illetve függ az érintkező felületek rugalmasságától is.

Gördülési zaj csökkentése:

- sima gördülő felületek kialakítása;
- megfelelő olajozás alkalmazása;
- precíziós gördülőcsapágyak alkalmazása;
- ház méretűreinek a lehető legkisebbre való csökkentése;
- érintkező felületek rugalmasságának növelése.

Tehetetlenség:

a tömeg gyorsítása olyan erőket hoz létre, amelyek számos módon, például ütközéssel, gördüléssel, súrlódással vagy lüktetéssel zajt gerjesztenek. Tehetetlenségi erőket kiegyensúlyozással, a forgási sebesség, a gyorsuló tömegek vagy a gyorsulás csökkentésével lehet mérsékelni, illetve mozgás egyenetlenségének javításával.

Súrlódás, öngerjesztés:

Az olyan szerkezeteket, amelyekben a súrlódás tapadás- megcsúszás jelenséget okoz, potenciális zajforrások. az ezeknél tapasztalható erőváltozások, mint ütközések jelentkeznek, amelyek a szerkezetet a rezonanciáin gerjeszthetik és meghatározzák a rezonanciák öngerjesztésének formáját. Súrlódás és öngerjesztés által okozott testhangok csökkenthetők:

- a súrlódás csökkentése megfelelő anyagválasztással,
- a súrlódás csökkentése megfelelő kenéssel;
- öngerjesztésre hajlamos szerkezet csillapításának növelése.

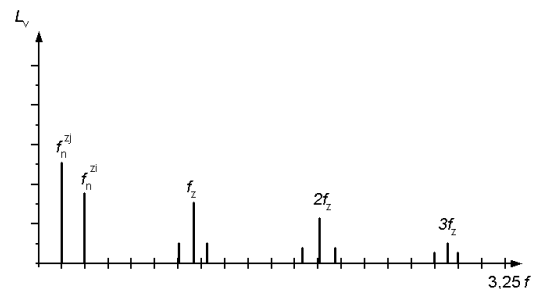
6. FOGASKERÉK KAPCSOLATOK HIBÁI [3]

Súlyos gépkárosodás okozója lehet a fogaskerekek valamely hibája. A hibák sokfélesége (kapcsolódási hiba, lazaság, excentricitás, fogak repedése/törése, stb.).

A fogaskerék kapcsolat állapotának elemzéséhez szükséges a nagyfelbontású spektrumfelvétel

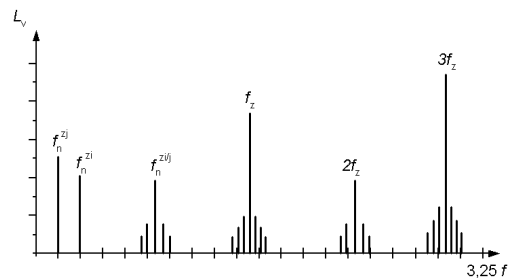
Fogaskerék hajtások általános spektruma

A fogaskerekes hajtások működésükből kifolyólag jellegzetes spektrummal rendelkeznek, melyet az 3. ábrán kísérhetünk figyelemmel. Az általános (hiba nélküli) spektrumban a fogaskerék fordulatszámának és az áttételnek megfelelő frekvenciákon kívül láthatóak az ún. fogkapcsolódási (f_k) (Gear Mesh Frequency = GMF) frekvenciák, és ezek igen alacsony rezgésamplitúdójú harmonikusai.



3. ábra Hibátlan fogkapcsolódás elvi spektruma

A fogkapcsolódási frekvenciák és harmonikusaik körül szimmetrikusan a fogaskerék fordulatszámának megfelelő ún. oldalsáv frekvenciák helyezkednek el. Mindegyik csúcs alacsony értékű és a spektrumban nem jelenik meg a fogaskerék saját frekvenciája (GNF (f_n)).



4. ábra fogprofil kopását jellemző elvi spektrum

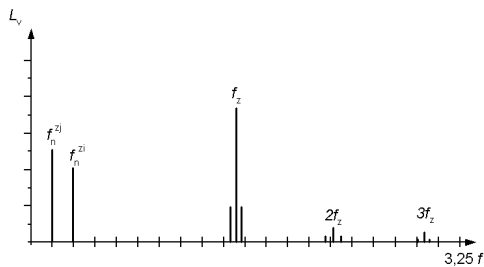
Fogkopás

A fogazat kopása esetén lásd 4. ábra, a spektrumban megjelenik a hibás fogaskerékre jellemző saját frekvencia, olyan oldalsáv frekvenciákkal, amelyek a kopott kerék fordulatszámának felelnek meg. A fogkapcsolódási frekvencia amplitúdója nem változik minden esetben, noha általában a kopott fogaskerekek esetében megnövekszik a fogkapcsolódási frekvenciák oldalsáv

frekvenciáinak nagysága és nő az oldalsáv amplitúdók száma is.

Az oldalsávok amplitúdó változásainak megfigyelésével a fogkopás jobban kimutatható, mint a fogkapcsolódási (f_k) frekvenciával.

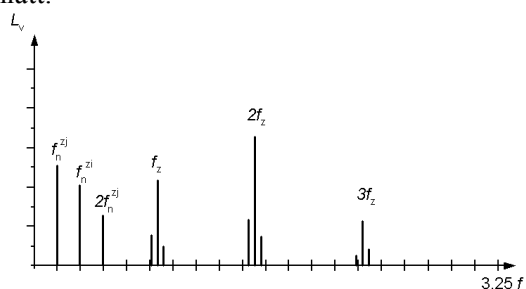
Szintén magas amplitúdók keletkezhetnek a $2xf_k$, de még inkább a $3xf_k$ frekvencián, még akkor is, ha a f_k frekvencia amplitúdója elfogadható nagyságú.



5. ábra A fogazat terhelés növekedés alapspektruma

Túlterhelés

A fogazat magas fogterhelésére vonatkozó tipikus rezgésspektrumot az 5. ábrán kísérhetjük figyelemmel. A fogkapcsolódási frekvenciák a legtöbb esetben nagymértékben érzékenyek a terhelésre. A magas fogkapcsolódási frekvencia amplitúdók nem jelentenek szükségszerűen meghibásodást, különösen akkor nem, ha az oldalsáv frekvenciák alacsony szinten maradnak és a spektrumban nem jelenik meg a fogaskerék sajátfrekvenciájának amplitúdója. A teljes analízis végrehajtásához lehetőleg a maximális üzemi terhelésen végrehajtott vizsgálat szükséges a spektrális összehasonlíthatóság miatt.



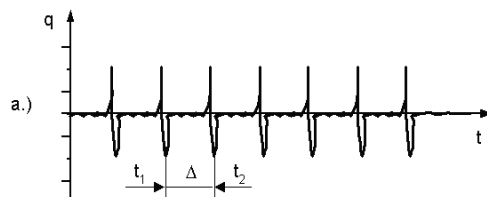
6. ábra Szerelt fogaskerék lazulásának elvi spektruma

Fogaskerékütés, kotyogás (nagy foghézag)

A meglehetősen magas oldalsáv frekvenciák a GMF frekvenciák körül gyakran a fogaskerék excentrikusságára, vagy a helytelen foghézagra engednek következtetni, melyet az 6. ábra szemléltet. Ezek a problémák az oldalsáv

frekvenciák közötti távolságok (üres helyek) segítségével mutathatók ki.

Ha a fő probléma a fogaskerék ütése, akkor általában magas amplitúdójú lesz a fogaskerék fordulatszámának 1x-es frekvenciája. A helytelen foghézag általában olyan fogkapcsolódási frekvenciákat és fogaskerék saját frekvenciákat (f_n) gerjeszt, amelyek oldalsáv frekvenciái a fogaskerék egyszeres forgási frekvenciájának felelnek meg. A helytelenül beállított (nagy) foghézag miatt sok esetben előfordul, hogy a terhelés növekedésének eredményeként csökkenni fog a fogkapcsolódási amplitúdók magassága.



7. ábra Törött, vagy repedt fog időfüggvénye (a) és frekvencia (b) alapspektruma

Fogtörés

A részben letört, vagy kitört fog magas amplitúdót gerjeszt az 1x-es fogaskerék forgási frekvencián, de ez a meghibásodás csak az időtartományban történő vizsgálattal mutatható ki. A frekvencia tartományban a fogaskerék (f_n) saját frekvenciája jelenik meg két oldalán a fordulatszámnak megfelelő oldalsáv frekvenciákkal. A legjobb érzékelési mód mégis az időjel felvétele, amely meghatározott (a törött fog periódusidejének megfelelő) időközönként jelentkező csúcsokkal kimutatja azt a jelenséget, amikor a kapcsolódó kerek a törött fog helyén megpróbálnak kapcsolódni. Az ütközések között eltelt $T = 1/n$ (s) periódus időből következtethetünk a meghibásodásra. Az időjelben kimutatható ütközési csúcs amplitúdók gyakran tízszer, hússzor magasabbak a frekvenciatartományban ugyanezen frekvenciánál található amplitúdóknál. A fogtörésre jellemző időjel az 7. ábrán látható.

7. ZAJÁTVITEL – TESTHANGÁTVITELLEL

Testhangátvitelt a forrásoktól a lesugárzó felületekig az átvivő szerkezet tömeg-, merevség-, és csillapítás eloszlásának változtatásával lehet befolyásolni. A választott eljárás számos körülménytől függ, pl.:

- A tömegnövekedés meg van-e engedve vagy nem?
- Előgerjesztésről vagy sebességgerjesztésről van-e szó?
- A gerjesztés keskeny sávú vagy szélessávú?
- A gerjesztés kisfrekvenciás, középfrekvenciás vagy nagyfrekvenciás?

Ha a tömegnövekedés meg van engedve, akkor a tömegnövekedés a gerjesztési hely közelébe hatásos lehet.

Előgerjesztés esetén a bemeneti impedanciának a gerjesztési helyen tömeghozzáadással való növelése, különösen a többszörös rezonancia tartományban.

Sebességgerjesztés esetén – a tömegnövekedés nem segít- a forrás szigetelése hatásos.

Kisfrekvenciás tartományban:

- rezgésszigetelés.

Középfrekvenciás tartományban:

- tömegnövelés;
- csillapítás növelés;
- forrás szigetelés.

Nagyfrekvenciás tartományban:

- tömeg vagy merevség növelése;
- forrás szigetelése;

8. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás célja egy ilyen azonosítási rendszer összeállítása, döntően műszaki irányelv szinten. Ez azt jelenti, hogy a spektrum jellegzetes frekvenciái, ill. azok változása alapján következtetni lehessen egyrészt a hiba okára (elem, vagy elempár működése, folyamat) másrészt a beavatkozás szükségességére és annak időpontjára. Ebből a célból előre meg kell határozni egy ideális fogaskerékpár működése során kialakuló spektrumot (alapspektrum), ennek változását normál működtetési körülmények között (elhasználódás az élettartam függvényében), majd a jellegzetes károsodási eseteknek megfelelőket. Az összehasonlítás jelenti ezután az értékelést, azaz a hiba forrásának megállapítását.

9. IRODALOM

- [1] Kováts Attila: Zaj – és rezgésvédelem Veszprémi Egyetemi Kiadó. Veszprém 2004
- [2] Kováts Attila: Gépszerkezettan. Tankönyvkiadó, Budapest 1988
- [3] Dömötör Ferenc. Rezgésdiagnosztika I. – II. kötet. Dunaújvárosi Főiskolai Kiadó Hivatal 2008/2010
- [4] Sarka Ferenc: A hajtóműház szerepe a csapágyak élettartamában. OGÉT 2008 konferencia kiadvány.
- [5] Sarka Ferenc: Fogaskerekes hajtóművek zajának csökkentése Doktoranduszok fóruma 2003 konferencia kiadvány.
- [6] Tóbis Zsolt: Hajtóműhibák frekvenciaelemzéssel. Géptervezők és Termékfejlesztők XXI. Szemináriuma. Miskolc, 2005. november 10 - 11. GTE Borsod-Abaúj-Zemplén megyei Géptervező Szakosztályának kiadványa. Miskolc, 2005.
- [7] Erney Gy.: Fogaskerek. Műszaki Könyvkiadó. Budapest, 1983.
- [8] Lipovszky Gy. – Sólyomvári K. – Varga G. Gépek rezgésvizsgálata és a karbantartás. Műszaki Könyvkiadó. Budapest, 1982.
- [8] Sarka Ferenc, Prof. Dr. Döbröczöni Ádám Alacsony zajkibocsátású gépek tervezéseinek irányelvei Géptervezők és Termékfejlesztők XXVII. Szemináriuma. Miskolc, 2011. november 10 - 11. GTE Borsod-Abaúj-Zemplén megyei Géptervező Szakosztályának kiadványa. Miskolc, 2011/9-10.
- [9] Sarka Ferenc, Prof. Dr. Döbröczöni Ádám Directives of designing machines with low noise emission, International journal Advanced Engineering 2011 No.2
- [10] Kováts A.: A fogaskerékpár alapspektruma és torzulásai I. –II. = Karbantartás és Diagnosztika, 3(1966)3. p. 2., 4/8, 4(1997)1. p. 27/30.
- [11] MSZ EN ISO 11688-1 Akusztika. A kis zajú gépek és berendezések tervezéseinek irányelvei

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

"A bemutatott kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg."