

FIGYELMEZTETŐ FREKVENCIÁK MEGJELENÉSE A LASSÚ FORDULATÚ FOGASKERÉK HAJTÓMŰVEKBEN

Gergely Mihály*

1. BEVEZETÉS

Gépszerkezetek üzemi állapotáról sokáig csak a gépmester sejtett valamit, mikor is egy fanyelű csavarhúzóval, a kritikus pontra tapintva s a füléhez illesztve a csavarhúzó nyelét, alkotta meg véleményét a vizsgált gépegységről. E vizsgálati eljárás tekinthető a diagnosztika, pontosabban a rezgésdiagnosztika alapjainak.

Sok sok év elteltével a technológia rohamos fejlődésének köszönhetően, törvényszerűen egyenes út vezetett a korszerű műszerek, (érzékelők, analízátorok, tengelybeállító műszerek stb.) kifejlesztéséhez. E műszerek ma már elengedhetetlen eszközei a fejlett karbantartásnak. Az alábbiakban nagy pontosságú, különböző elrendezésű fogaskerék-hajtóművekben a „kisebb”, de annál jelentősebb hibákat elemezzük.

2. FOGASKERÉKHAJTÓMŰVEK

Fogaskerék hajtóművek fokozott megbízhatósága, így folyamatos ellenőrzése, alkalmazási területét tekintve, bizonyos esetekben elsőrendű fontosságú. Elsősorban ott, ahol nemcsak nyomaték átvitel az elsődleges szempont, de az időben állandó mozgást és annak visszajelzését is biztosítani kell.

E szempontból lényeges a:

- játékmentes üzem mód,
- kapcsolatok stabilitása,
- megfelelő üzemállapot.

A megfelelő üzemállapot különös jelentőséggel bír, így a hajtáslánc elemeinek állapotát rendszeresen és megbízhatóan kell tudni ellenőrizni, értékelni anélkül, hogy üzemét le kelljen állítani.

Vizsgálatunk három alapvető változatot érint mint, a legnagyobb áttételt megvalósító lassú fordulató egységeket:

- függőleges elrendezésű homlokkerekes hajtás,
- vízszintes elrendezésű hypoid hajtás,
- függőleges elrendezésű bolygókerékes hajtás,

Mindhárom vizsgálatnál a lassú fordulató gépegységekre jellemző frekvenciák megjelenését, fogkapcsolódási hibát, az azt kiváltó okot vizsgáltuk.

E jellemző frekvenciák, és lehetséges fogkapcsolódási hiba:

- a szubharmonikus, és
- az ismétlődési frekvencia,
- párhozamostól való eltérés

a fogkapcsolatban.

A tárgyalt esetek nélkülözték a vonatkozó dokumentációt. Első lépésben egy, a hajtásrendszerekre vonatkozó „rekonstrukciót” kellett végrehajtani, így pótolva a későbbi mérésekhez illetve a spektrumok elemzéséhez szükséges adatok meghatározását.

Minden esetben két adat állt rendelkezésre:

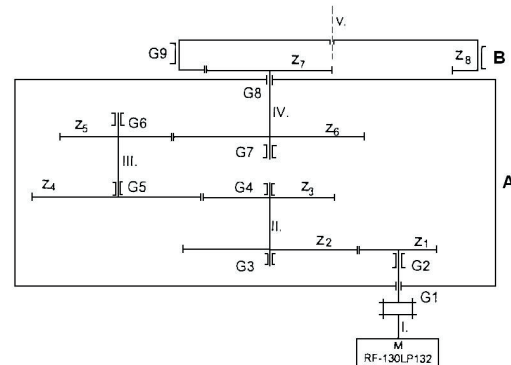
- a hajtásrendszer behajtó (n_0)
- a hajtásrendszer kimenő (n_{ki})

fordulatszámai. A többi - az elemzéshez szükséges - adat, a *spektrumképekből lett meghatározva*.

2.1 Ismétlődési és a szubharmonikus frekvencia jelentése

2.1.1 A szubharmonikus frekvencia megjelenés

Az 1. ábra függőleges elrendezésű kapcsolt hajtásegységek (A + B) kinematikai vázlatára szerint, az A jelű három-fokozatú, *ferdefogazatú* egységben a legnagyobb nyomatékot átvivő módosítás a $Z_5 - Z_6$



1. ábra. A kapcsolt hajtásegység kinematikai vázlat

fogkapcsolatban van. A vonatkozó adatokat az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat

jel	fogsám	n_z [min]	f_h [Hz]	f_k [Hz]
Z ₅	13	52, 47	0, 8745	11, 368
Z ₆	21	32, 48	0, 5413	11, 368

*okl. gépészmérnök, ACCELERATION Bt.

A **B** jelű egység belső/külső egyenesfogazatú áttételegység, melynek a vonatkozó adatait a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat

jel	fogszám	n_z [min ⁻¹]	f_h [Hz]	f_k [Hz]
Z ₇	24	32,48	0,541	12,992
Z ₈	150	5,197	0,0866	12,992

A lassú ($30 < n_0 < 600$) és az ultra-lassú ($n_0 < 30$) forulatú hajtásegységek fogkapcsolataiban, a leggyakoribb hibára utaló jel, a szubharmonikus és az ismétlődési frekvenciák megjelenése.

A szubharmonikus frekvencia megjelenése (2. ábra) a fogazat kialakításától független. A ferdefogazatú kerék – kialakításából adódóan – jóval zajszegényebb és nagyobb teherbírású mint, az egyenesfogazat.

E frekvencia megjelenése – hasonlóan a tengely csapágyazás esetében, mikor is a csapágy belsőgyűrűje a tengelyen elfordulhat – egy fémes csúszás következménye, amikor a fogkapcsolat nem tisztán gördülés-szerű hanem, csúszással párosul (ferde fogazat).

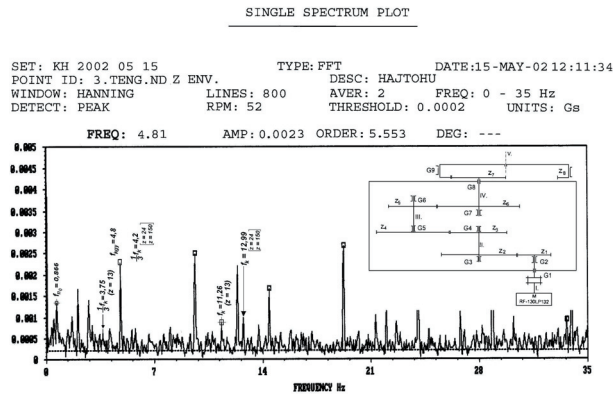
A szubharmonikus frekvencia, a fogaskerék kapcsolódási frekvenciájával is kifejezhető:

$$f_{shZ} = \frac{1}{3} f_{kz} \text{ [Hz]} \quad (1)$$

ahol: f_{shz} a vizsgált fogaskerék szubharmonikus frekvenciája [Hz]-ben,

f_{kz} a vizsgált fogaskerék fogkapcsolódási frekvenciája [Hz]-ben.

A csúszással való kapcsolódás elengedhetetlen velejárója a felület kopása, ami tervezési, gyártási, szerelés technológiai hibára vezethető vissza.



2. ábra. A fogkapcsolat környezetének spektrumképe

2.12 Ismétlődési frekvencia

A spektrum (2. ábra) $0 \rightarrow \sim 1, 4$ Hz frekvenciatartomány alsó sávjában jelennek meg a $z_5 - z_6$ fogkapcsolat f_I ismétlődési frekvenciája. E jellegzetes frekvencia és harmonikusainak megjelenése egyértelműen utal tervezési hibára [01]. A hiba jelentése szerint, a hajtott kerék minden egyes fordulatóban ugyanazon fogpárkapcsolat jön létre a hajtó kerékkel.

E frekvencia meghatározható a fogszámokból és a forgási (hajtási) frekvenciákból:

$$f_I = \frac{z_{i/j}}{z_i z_j} f_{hj/i} \text{ [Hz]} \quad (2)$$

ahol: f_I ismétlődési frekvencia [Hz]-ben,

z_i, z_j a kérdéses fogkapcsolat

$f_{hj/i}$ a kapcsolatban résztvevő fogaskerékek forgási frekvenciái [Hz]-ben.

A (2) összefüggéssel meghatározott frekvencia:

z_5 jelű fogaskerék esetében:

$$f_I = 4, 164 \cdot 10^{-2} \text{ Hz}$$

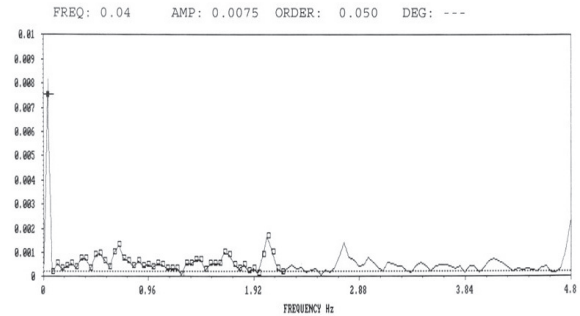
z_6 jelű fogaskerék esetében:

$$f_I = 4, 164 \cdot 10^{-2} \text{ Hz}$$

A két érték azonossága igazolja a fogpárkapcsolat hibáját (fogszámok!) ami, a nagy nyomtérátvitel miatt, fogtöréshez vezethet.

A spektrumban e frekvencia $7,6 \cdot 10^{-3} G$ - amplitúdó értékkel van jelen, ami rezgés gyorsulásban: $a = 7,45 \cdot 10^{-2} m s^{-2}$. Ez az érték az ISO 10816 szerint az I. kategória alapján a fogkapcsolatra nézve – fokozott ellenőrzés mellett – jó állapotú, egyelőre.

T: KH 2002 05 15 TYPE: FFT DATE: 15-MAY-02 12:11:34
INT ID: 3.TENG.ND Z ENV. DESC: HAJTOHU
NDOW: HANNING LINES: 800 AVER: 2 FREQ: 0 - 35 Hz
TECT: PEAK RPM: 52 THRESHOLD: 0.0002 UNITS: Gs



3. ábra

Az ismétlődési frekvencia és harmonikusai

A **B** jelű hajtásegység áttételében hasonlóan jelen van a szubharmonikus frekvencia de azt, elnyomja a G_8 csapágy külsőgyűrűn kezdődő meghibásodást jelző amplitúdó.

A szint nem számottevő, de megjelenése figyelmeztető. E kapcsolt hajtásegység egyenesfogazatú, jól méretezett.

Az ismétlődési frekvencia tekintetében, körültekintően megválasztott fogszámokkal tervezett áttétel. A számítás (2) alapján meghatározott f_I frekvenciaértékek:

z_7 jelű fogaskerék esetében:

$$f_I = 5, 78 \cdot 10^{-3} \text{ Hz}$$

z_8 jelű fogaskerék esetében:

$$f_I = 2, 254 \cdot 10^{-2} \text{ Hz}$$

Az értékek különbözősége jelenti azt, hogy e fogpárkapcsolatban nem jön létre a fordulatonkénti azonos fogkapcsolat így, a terhelés valamennyi fogat egyelőre veszi igénybe, fogfejek (fogoldal) kopása

egyenletes. A frekvenciaspektrumban nem azonosítható. Az időfüggvényben felvett spektrum (HTF) alapján, az eredmény azonos.

2.12 Szubharmonikus a hypoid-hajtásban

Mint az a 2.1 pontban bemutatásra került, a homlokfogazatú kerek fogkapcsolódása bizonyos esetekben - amennyiben tervezési hiba - a csúszással való kapcsolódás, az idő függvényében bekövetkező maradandó károsodást okoz, mely rezgésméréssel kimutatható.

Az alábbiakban, egy olyan hajtáskapcsolat vizsgálata, elemzése kerül bemutatásra, melyben a fogkapcsolódás, jelentős csúszással (ld.: csigahajtás) valósul meg [01]. (Az ilyen hajtástípusokban, az átvihető nyomaték erősen korlátozott). E fogkialakítási csoportban sorolható a hypoid hajtás is.

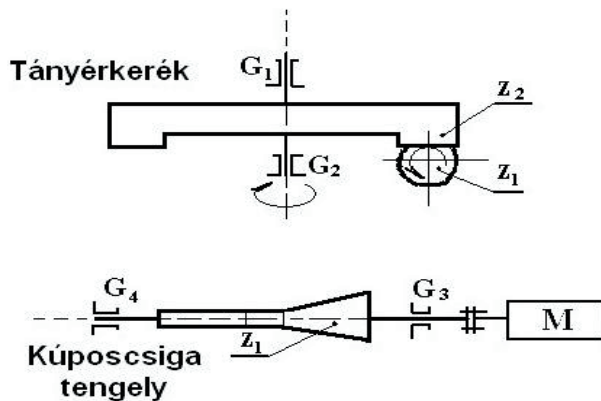
A vizsgált hajtásegység vonatkozó adatait a 3. táblázat foglalja össze:

3. táblázat

Jel	fogszám	n_z [min]	f_h [Hz]	f_k [Hz]
Z ₁	3 bek.	1480	24,666	74
Z ₂	74	60	1	74

Megjegyzés: a táblázatban, a z₁ jelű csiga fordulatszáma megegyezik a hajtó elektromotor fordulatszámával.

A hajtás elrendezési és csapágyazási vázlatát szemlélteti a 4. ábra.



4. ábra. A hypoid hajtás vázlatja

Az előzőekben röviden ismertette lett a fogkapcsolódási jellemzője. A felvett spektrumban, várhatóan meg kell jelenjen a fogkapcsolódási frekvencia szubharmonikusa is. Az ilyen típusú hajtásokra jellemző, hogy a fogkapcsolatban a profilok egymáson, a sebességeknek a profil érintőjébe eső komponenseikkel, csúsznak (a csúszás mértéke függ a csiga bekezdéseinek számától), melyek jelentős hőtermeléssel is párosulnak. A feltételezés szerint a spektrumban, e csúszásjelenség „zajjal” jár együtt.

A felvett spektrumban (5. ábra) csak a fogkapcsolódási frekvencia és szubharmonikusa, valamint a csigatengely csapágyelem frekvenciái vannak jelölve.

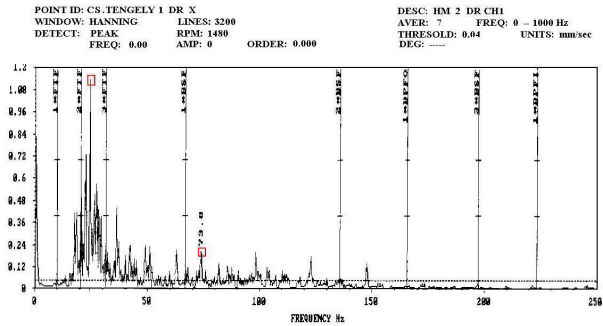
A hajtást - minthogy lassú fordulatró van szó – vizsgálni kell az ismétlési frekvencia f_I megjelenésében is. A számítás (2) alapján meghatározott f_I frekvenciaértékek:

$$z_1 \text{ jelű fogaskerék esetében: } f_I = 8,22 \text{ Hz,}$$

$$z_2 \text{ jelű fogaskerék esetében: } f_I = 1,35 \cdot 10^{-2} \text{ Hz.}$$

Az áttételben a bekezdésszám/fogszám megválasztása jónak mondható (az f_I értékek különbözők).

A hajtás jellemző spektrumát a 5. ábra szemlélteti:



5. ábra. A hajtásegység frekvencia-spektruma

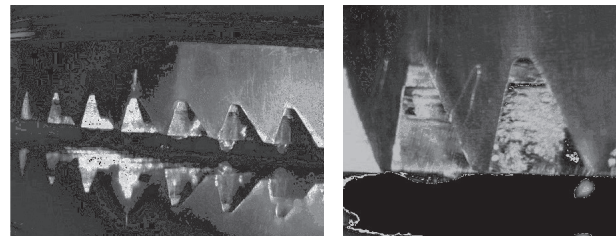
A spektrumban külön jelölve van a fogkapcsolódási ($f_k = 73,8 \text{ Hz}$) és szubharmonikus ($f_{shZ} = 24,666 \text{ Hz}$) frekvenciák.

Mint az várható volt, a kapcsolódó fogak csúszása a 16 – 33 Hz frekvenciatartományban, zajjal jelentkezik:

- mint gerjesztő forrás, e tartományban található a z₁ csigatengely $f_h = 24,66 \text{ Hz}$ hajtási (forgási) frekvenciája is és a csigatengelyen lévő G₃ kúpgörgős csapágyak egyikének (vagy mindkettőnek!) a kosárfrekvencián $f_k = 20,63 \text{ Hz}$ megjelenő amplitúdójú csúcs.

A csigatengely hajtási (forgási) frekvenciája gerjesztheti a szubharmonikus frekvenciát, de a tányérkerék fogazatának állapotát kis mértékben befolyásolja (rezgésszint elfogadható).

A tányérkeréről készült felvétel (6. ábra) jelentős fogfej (fogoldal) kopást mutat ami, a fogkapcsolódásból adódó csúszás eredménye:



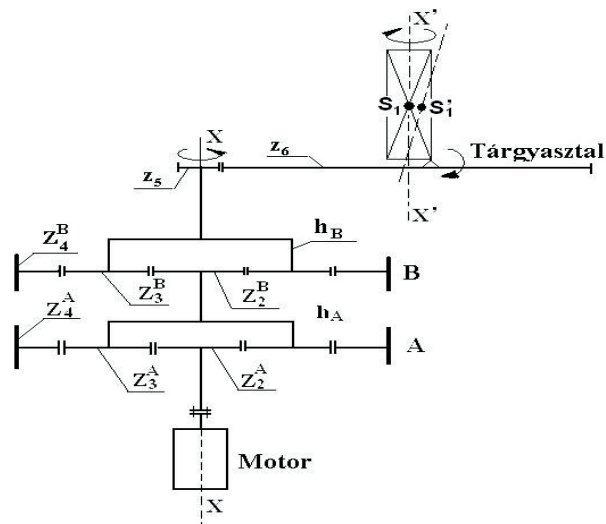
6. ábra. A tányérkerék fogazatának állapota

A bemutatott két eltérő fogazatkialakítású hajtóműben tehát, a fogkapcsolódási frekvencia szubharmonikusának megjelenési oka egyértelműen, a fogak csúszással való kapcsolódása.

2.2 A „párhuzamostól való eltérés(?)” a homlokfogazatú fogaskerekek kapcsolatában

2.21 Tömeg-kiegyensúlyozatlanság hatása a fogkapcsolatra

Elemzésünket, egy szintén függőleges elrendezésű *kapcsolt hajtásrendszer*en végezzük, melynek kinematikai felépítése a 7. ábra szerinti.



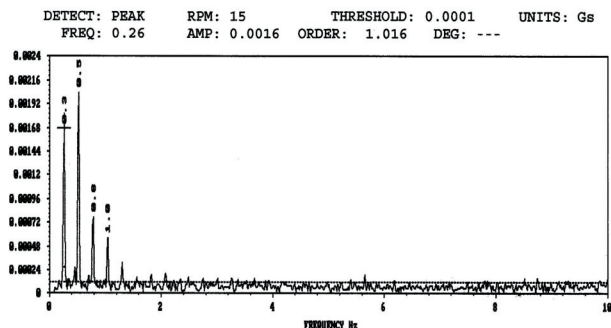
7. ábra. Bolygóműves hajtás kinematikai felépítése

A kinematikai felépítés szerint, a *hajtásrendszer* egy *kettős (A + B)*, nem azonos módosítású egyenesfogazatú *bolygóműből (KB típus)*, és a *tárgyasztalt forgató* egyenesfogazatú *áttételből* áll ($z_5 - z_6$ fogkapcsolat). Az elemzéshez szükséges fogaskerék jellemzőket a 4. táblázat tartalmazza:

4. táblázat

Jel	fogszám	n_z [min]	f_h [Hz]	f_k [Hz]
Z_5	21	100,8	1,68	35,28
Z_6	137	15,45	0,257	35,28

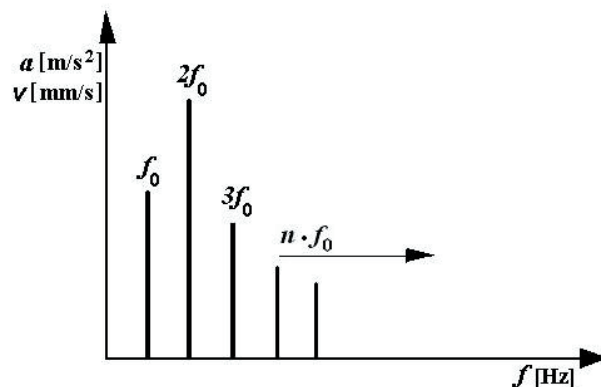
A $z_5 - z_6$ fogkapcsolat környezetében rögzített spektrumképet a 8. ábra szemlélteti:



8. ábra. A Z_6 kerék forgási frekvenciájának spektrum képe

Egy elektromotor – gépszerkezet kapcsolata általában, kapcsolóelemes egységgel, tengelykapcsolóval van

megoldva, melynek egyik feladata, az egymáshoz viszonyított helyzetbe állítás lehetőségének biztosítása.



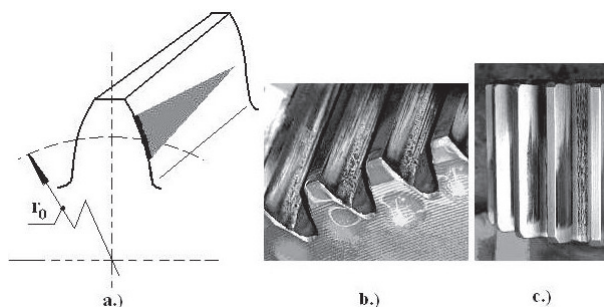
9. ábra. Gépkapcsolat excentricitási hibájának elvi spektruma

A vízszintes elrendezésű gépkapcsolat leggyakoribb *beállítási hibajelensége* [01] az *excentricitás* (a géptengelyekben párhuzamosság eltérés) beépítése a kapcsolatba. Ennek elvi frekvencia-spektruma a 9. ábra, melyben az $n \cdot f_0$ frekvenciák is jelölve vannak (f_0 = az elem forgási frekvenciája).

Minden homlokfogazatú fogaskerék kapcsolat párhuzamos, a tervezés által meghatározott tengelytávolságoknak a párhuzamostól való eltérésén belül. Ha a 8. ábrát összevetjük a 9. ábrával, a hasonlatosság egyértelmű, ám ebben az esetben más értelmezésű a hibajelenség [06].

Esetünkben a z_6 hajtott kerék egy összetett feladatot lát el – forgó mozgás és nyomatékátvitel – oly módon, hogy annak *fogaskereke egyben négy pontos csapágya is*, mely magában foglalja a „tárgyasztalt” (7. ábra). A tárgyasztalra nagy pontosságú és nagy tömegű, elektromechanikus mérőegység van rögzítve.

E fogkapcsolat környezetében felvett spektrumkép alapján a kapcsolat megbontásra került, s a 10. ábra szerinti fényképfelvételek lettek rögzítve:



10. ábra. A kapcsolatban résztvevő fogaskerekek fogfeji (fogoldal) kopása

A 10. ábra a részlete a kapcsolódó fog elvi *kopási háromszögét* vázolja, az esetben ha, a fogkapcsolat forgástengelyeinek párhuzamossága a megengedett tűrésérték felett van.

A lassú és ultra – lassú fordulató gépekben a kiegyensúlyozatlan forgórész rezgései, a hajtási (forgási) frekvencia két- vagy háromszorosán, magasabbak is lehetnek, mint az egyszeresnél, mert ez utóbbi torzulása az előbbieknél sokkal erősebb (8. ábra).

A kialakult jelentős fogkopás (az ábra **b** részlete) kiváltó oka: a tárgyasztalra rögzített nagytömegű szerelvény tömeg-kiegyensúlyozatlansága, melynek eredménye a csúszással való fogkapcsolódás is. A másik ok, gyártástechnológiai hiba – az ábra **b** részletében jól látható – a fog hőkezelési hibáját jelzi. Pittinges kopás, a **b** fog felvételen, sima fényes kopott felület a könnyen szerelhető **c** fagon. Továbbá feltételezhető, a **z₆** keréktestben kialakított csapágy futófelületi hibája is (megbontása nem lehetséges).

3. ÖSSZEFOGLALÁS

A bemutatott vizsgálati példák egyedinek tűnhetnek, de mindig található hozzájuk hasonló hajtáskialakítás, mely hasonló meghibásodási jelenségeket mutathat. Úgy a szubharmonikus, mint az ismétlődési frekvencia megjelenése, komoly veszélyt jelenthet a hajtásban. Különösen igaz ez, a lassú és az ultra-lassú fordulatszám tartományokban. E fordulatszám tartományban vizsgált gépszerkezet állapotának megítéléséhez a vonatkozó ISO nem nyújt megfelelő segítséget, de a gépet a károsodástól, az üzemkieséstől meg kell óvni.

IRODALOMJEGYZÉK

- [01] DR. DÖMÖTÖR. F. (szerk): Rezgésdiagnosztika I., 2008 Du. F.
- [02] DR. KOVÁTS A.: Gépszerkezetan (Műszaki akusztika), 1985. Budapest
- [03] J. E. Berry.: Specialists in predictive maintenance, machinery diagnostics and vibration reduction (Chapter 9, 10, 11) 1992.
- [04] GERGELY M.: Frekvenciák azonosítása többfokozatú fogaskerék-hajtóművekben, Géptervezők és termékfejlesztők XII. Országos Szemináriuma, Miskolc, 1997.
- [05] DR. APRÓ F.: Hajtóművek gépszerkezetana, 1996, Miskolc
- [06] GERGELY M.: Függőleges elrendezésű hajtásrendszerek rezgésdiagnosztikai elemzése, Magyar Karban- tartási Konferencia, Dunaujváros 2008.
- [07] DR. AMÁSI GY.: Mikrohullámú kézikönyv, 1973. Budapest.