

# HAJLÉKONY ELEMES HATÓMŰ LABORATÓRIUMI VIZSGÁLATA II.

## LABOARATORY TESTS OF FLEXIBL GEAR DRIVE II.

Dr. Péter József, a műszaki tudomány kandidátusa, egyetemi docens,  
Németh Géza egyetemi adjunktus,

Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Tanszéke. 3515 Miskolc-Egyetemváros

### ABSTRACT

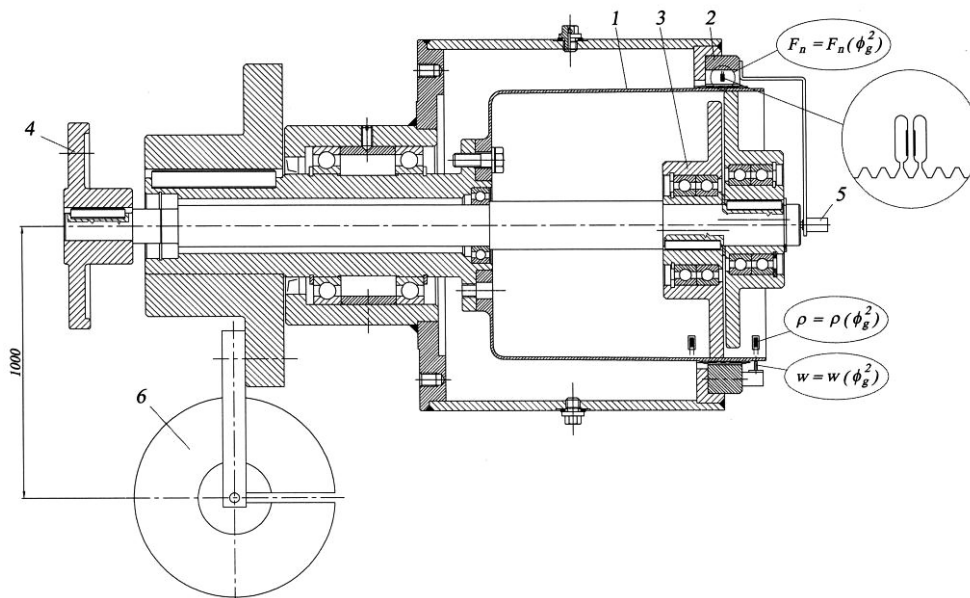
The constraint of the reliable operation of a gear drive is the proper stiffness of the structural elements, so the stiffness of the gears. One of the variant of the planetary gear drives is the harmonic gear drive, which essence is the flexibility of one or both elements of the gear pair. The flexible gear

body changes its shape due to the structure of wave generator and gear pair, and also due to the external loads of the drive. The mesh of the gears is the function of the degree and nature of deformation. This paper is dealing with the laboratory test of a drive produced for experimental purposes.

### 1. A HAJTÓMŰ LABORATÓRIUMI VIZSGÁLATA

A hagyományos fogaskerék-hajtómű fogaskerekeit a terhelés hatására bekövetkező rugalmas alakváltozásuk kicsinségére tekintettel merevnek tekintjük. A fogaskerék-hullámhajtómű egyik, vagy mindkét fogaskerékét alakváltozásuk nagysága miatt rugalmas testként kezeljük. A hajlékony fogaskerék rugalmas alakváltozását a hajtómű

szerkezeti kialakítása, a generátor – hullámkerék – gyűrűkerék – ház lánc rugalmas alakváltozása és az elemek közötti játék vagy fedés befolyásolja. A laboratóriumi vizsgálatok célja a generátor kialakítása, a hullámkerék terhelése és rugalmas alakváltozása közötti kapcsolat tanulmányozása. A vizsgált hullámhajtómű elemeinek geometriai adatait a [4] tartalmazza.



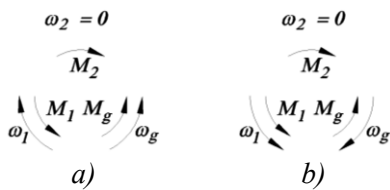
1. ábra. Kísérleti hajtómű. 1 hullámkerék, 2 gyűrűkerék, 3 generátor, 4 tengelykapcsoló, 5 forgó jeladó, 6 tárcsa

#### 1.1. A mérőhely felépítése

Az 1. ábrán látható, gépalapra rögzített hajtómű 3 tárcsás generátorát egy nyomaték-mérő tengelyen keresztül forgattuk. Az 1

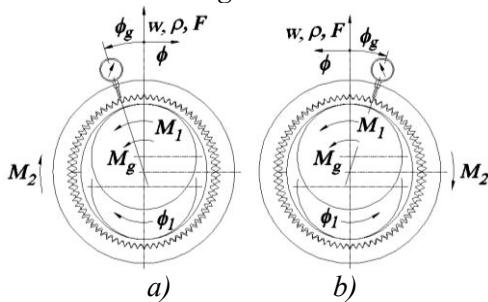
hullámkerékre ható  $M_f$  nyomatékot a karra függesztett 6 tárcsákkal változtattuk.

A hajtómű homlokfelülete felől nézve az  $I$  hullámkerékre az  $M_I$  nyomaték az óramutató járásával ellentétes irányban hatott, amint az 1. és 2. ábra mutatja.



2. ábra. A hajtómű elemekre ható nyomatékok és a szögsebességek fogaskerék-hullámhajtómű üzemmódban. a) Lassít, b) gyorsít

### 1.2. A mért értékek regisztrálása



3. ábra. A generátor elfordulása és a mért értékek regisztrálása fogaskerék-hullámhajtómű üzemmódban. a) Lassít, b) gyorsít

A  $g$  generátor  $2$  gyűrűkerékhez viszonyított elfordulása  $\varphi_g$ . Lassító hullámhajtómű üzemmódban a generátor az óramutató járásával ellentétes irányban, gyorsító hullámhajtómű üzemmódban megegyező irányban forgott. A regisztrálás a generátor forgásirányával ellentétes irányban történt,  $\varphi = -\varphi_g$ .

### 1.3. A sugárirányú elmozdulás mérése

A hullámkerék  $w$  sugárirányú elmozdulását a fogak mellett, a hullámkerék homlokfelületével párhuzamos síkban mértük, a nyelvből és tapintóból álló mérőeszköz a gyűrűkerékhez volt rögzítve. Az elmozdulást a nyelv két oldalára ragasztott nyúlásmérő bélyegek segítségével a generátor gyűrűkerékhez viszonyított elfordulása függvényében regisztráltuk. A  $w=0$  elmozdulást a generátor hullámkerékbe bujtatása előtt jelöltük ki, az egységnyi elmozdulást a deformációs hullám csúcsán a generátor geometriai adatai alapján definiáltuk.

### 1.4. A görbületi sugár mérése

A vizsgálatok során feltételezzük, hogy a hullámkerék középfelületének megnyúlása elhanyagolhatóan kicsi. A hullámkerék középfelületétől  $\frac{h_0}{2}$  távolságra a hullámkerék homlokfelületével párhuzamos síkban a hajlításból eredő fajlagos nyúlás  $\varepsilon_\varphi = \varepsilon_\varphi(\varphi_g)$ , a görbületi sugár  $\rho = \frac{I}{\frac{I}{r_0} + \varepsilon_\varphi(\varphi_g) \frac{h_0}{2}}$ .

A görbületi sugár változását a hullámkerék homlokfelületével párhuzamos síkban, a fogak mellett mértük. A nyúlásmérő bélyegek a fogak mellé voltak ragasztva, az  $r_0$  görbületi sugárnak megfelelő szintet a generátor hullámkerékbe bujtatása előtt jelöltük ki, az egységnyi görbületi sugár változást ismert sugarú generátor tárcsával határoztuk meg. A görbületi sugarat a generátor gyűrűkerékhez viszonyított elfordulása közben regisztráltuk.

### 1.5. A gyűrűkerék fogára ható erő

A gyűrűkerék fogára ható terhelés meghatározásához a gyűrűkeréken egy mérőfogat alakítottunk ki, 1. ábra. A mérőfogat egy vékony nyelv hordozta, oldalára nyúlásmérő bélyegeket ragasztottunk. A fogakra ható terhelést a generátor gyűrűkerékhez viszonyított elfordulása függvényében regisztráltuk. A fogakra ható terhelést a fogakra ható terhelés eloszlása, a kapcsolódásban részt vevő fogak száma, és a gyűrűkerékre ható  $M_I$  nyomaték ismeretében határoztuk meg.

## 2. A MÉRT ÉRTÉKEK

A mért értékeket az 1. és 2. táblázat tartalmazza. Az 1. táblázatban a bal oldali oszlop fogaskerék-hullámhajtómű üzemmódban lassító ( $g \rightarrow I$ ), a jobb oldali oszlop a gyorsító üzemmódban ( $I \rightarrow g$ ) mért értékeket mutatja. A hullámkerékre az a) és b) ábrán látható esetben  $M_I = 0Nm, 200Nm, 400Nm, 600Nm$  és  $800Nm$  nyomaték, a c) esetben  $M_I = 0Nm, 200Nm, 400Nm$  és  $600Nm$ , a d) esetben  $M_I = 0Nm, 200Nm, 400Nm$ , az e) és f) esetben  $M_I = 600Nm$  hatott. Az a) és b) ábrán a hullámkerék fogazat mellett a gyűrűkerékhez viszonyítva mért  $w$  sugárirányú elmozdulás, a c) és d) ábrán a hullámkerék fogazat mellett  $\rho$

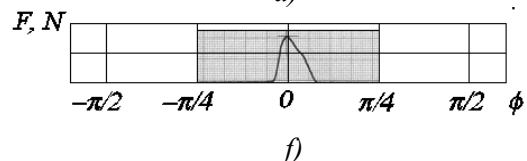
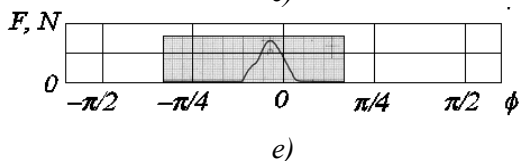
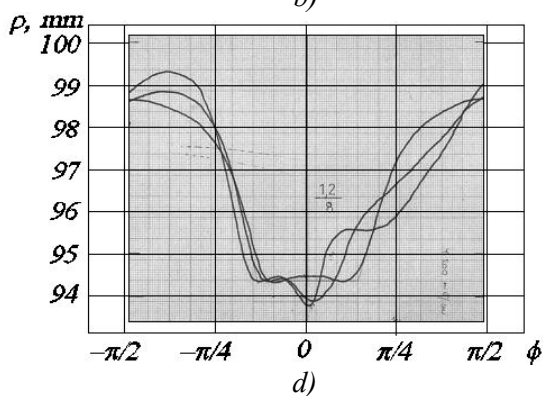
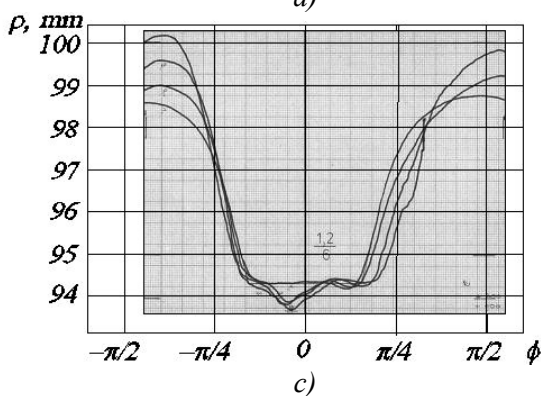
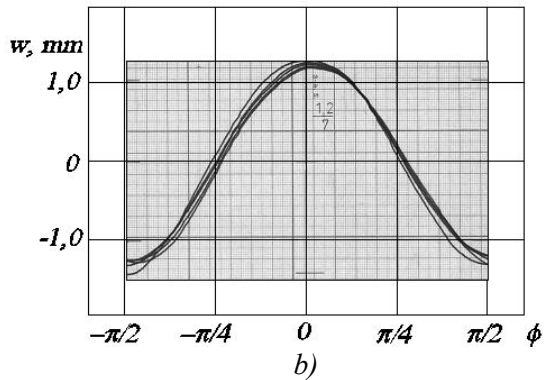
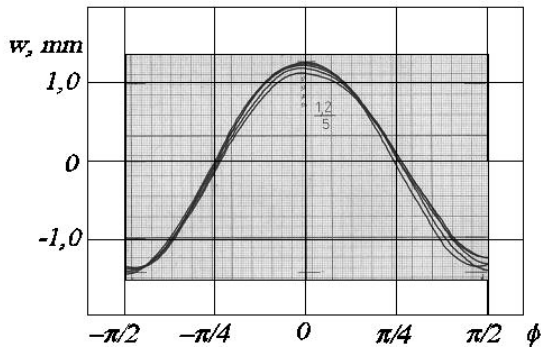
görbületi sugara, a d) és e) ábrán a gyűrűkerék

fogára ható  $F$  erő van ábrázolva.

1. táblázat.

Fogaskerék-hajtómű üzemmód,  $1 \rightarrow 2$

Fogaskerék-hajtómű üzemmód,  $2 \rightarrow 1$



A hullámkerék görbületi  $\rho$  sugara,  $w$  sugárirányú elmozdulás és a gyűrűkerék fogára ható  $F$  erő mért értéke. A jellemző méretek:  $z_1=190$ ,  $x_1=4,555$ ,  $z_2=192$ ,  $x_2=4,958$ ,  $D=191,7\text{mm}$ ,  $w_0=1,2\text{mm}$ ,  $e=3,9\text{mm}$ ,  $d_1=186,3\text{mm}$   $\beta=34,757^\circ$

### 3. KÖVETKEZTETÉSEK

A mérések eredményei könnyebben érthetők és magyarázhatóak, ha a hajtóművet fogaskerék-hajtómű üzemmódban, a fogaskerékpár generátorhoz viszonyított mozgása közben vizsgáljuk. A 2. ábrán látható  $M_g$ ,  $M_1$  és  $M_2$  nyomatékok iránya a vonatkozási rendszertől független.

Fogaskerék-hajtómű üzemmódban az 1. táblázat bal oldali oszlopába az  $1 \rightarrow 2$ , a jobb oldali oszlopba a  $2 \rightarrow 1$  hajtás iránynak megfelelő regisztrátumok kerültek.  $1 \rightarrow 2$  esetben a fogaskerékpár a hullámkerék homloka felől nézve az óramutató járásával ellentétes irányban mozog, a hullámkerék fogai a hullám jobb oldalán hatolnak a gyűrűkerék fogárába és onnan a hullám bal oldalán távoznak.  $2 \rightarrow 1$  esetben a hullámkerék fogainak a hullám bal

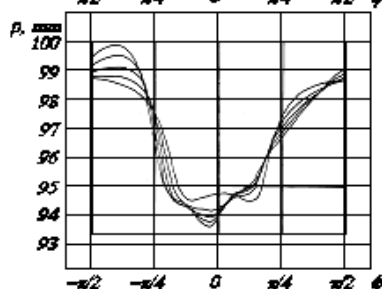
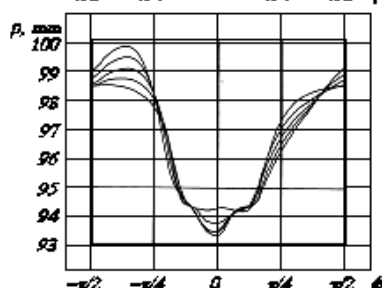
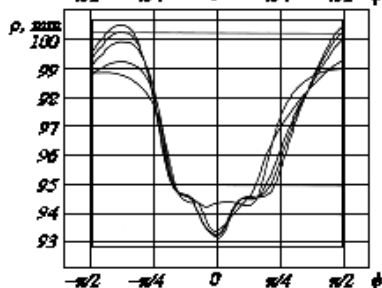
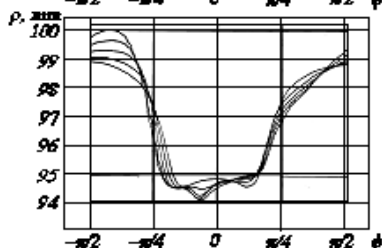
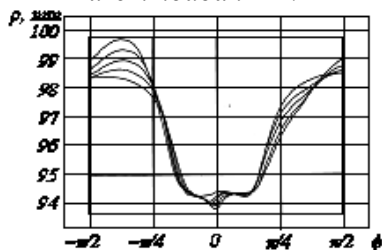
oldalán bújnak a gyűrűkerék fogárába, és a jobb oldalon távoznak.

a) Az 1. táblázat első sora a hullámkerék gyűrűkerékhez viszonyított sugárirányú mozgását mutatja. Látható, hogy a deformációs hullám a gyűrűkeréktől sugárirányban távolodik, a hullám nagysága kis mértékben csökken. A változás hatására csökken a hullámkerék és a gyűrűkerék közös fogmagassága.

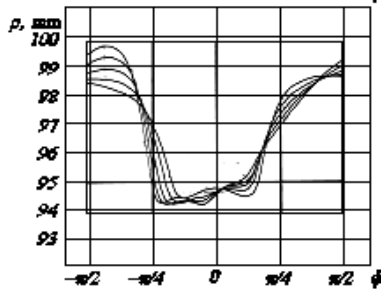
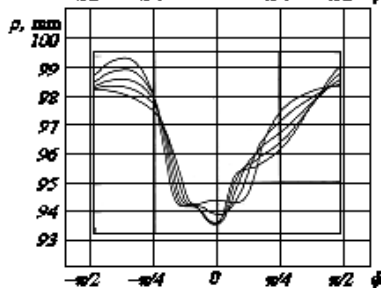
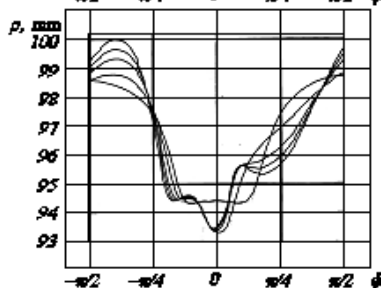
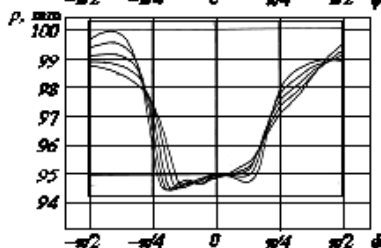
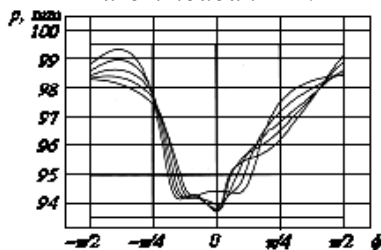
d) A második sorban a görbületi sugár változása látható.  $M_1=0\text{Nm}$  esetben a hullámkerék  $2\beta$  szöghöz tartozó íven a tárcsához simul, görbületi sugarának mért értéke mindkét esetben jó közelítéssel állandó.

2. táblázat  
Adatok

Fogaskerék-hajtómű  
üzem módban  $1 \rightarrow 2$



Fogaskerék-hajtómű  
üzem módban  $2 \rightarrow 1$



$$z_1 = 190, x_1 = 4,555$$

$$z_2 = 192, x_2 = 4,958$$

$$D = 191,7 \text{ mm}, w_0 = 1,1 \text{ mm}$$

$$e = 3,9 \text{ mm}, d_t = 186,1 \text{ mm}$$

$$\beta = 24,811^\circ$$

$$z_1 = 190, x_1 = 4,555$$

$$z_2 = 192, x_2 = 4,958$$

$$D = 191,5 \text{ mm}, w_0 = 1,2 \text{ mm}$$

$$e = 3,4 \text{ mm}, d_t = 186,9 \text{ mm}$$

$$\beta = 42,53^\circ$$

$$z_1 = 190, x_1 = 4,555$$

$$z_2 = 192, x_2 = 5,098$$

$$D = 191,7 \text{ mm}, w_0 = 1,2 \text{ mm}$$

$$e = 3,9 \text{ mm}, d_t = 186,3 \text{ mm}$$

$$\beta = 34,757^\circ$$

$$z_1 = 190, x_1 = 4,555$$

$$z_2 = 192, x_2 = 5,098$$

$$D = 191,7 \text{ mm}, w_0 = 1,2 \text{ mm}$$

$$e = 3,9 \text{ mm}, d_t = 186,1 \text{ mm}$$

$$\beta = 24,811^\circ$$

$$z_1 = 190, x_1 = 4,555$$

$$z_2 = 192, x_2 = 5,098$$

$$D = 191,5 \text{ mm}, w_0 = 1,1 \text{ mm}$$

$$e = 3,4 \text{ mm}, d_t = 186,9 \text{ mm}$$

$$\beta = 42,53^\circ$$

c) Ha  $M_1 > 0$ , az  $1 \rightarrow 2$  és  $2 \rightarrow 1$  esetben a görbületes sugarak jellemzően eltérnek egymástól.  $1 \rightarrow 2$  esetben a hullámkerék két szakaszon simul a tárcsához, középen a görbületes sugár változása miatt a hullámkerék elválk a tárcsától.

d)  $M_1 > 0$  és  $2 \rightarrow 1$  esetben a generátor csak a hullám bal oldalán, a hullámkerék fogainak a gyűrűkerék fogárkába bújásának szakaszán

támasztja a hullámkeréket. A hullám csúcán a hullámkerék a tárcsától elválk, görbületes sugara csökken, majd megnő és hullámkerék fogainak a gyűrűkerék fogárkába kimenetének szakaszán közel állandó görbületes sugarú szakasz következik.

e) Az 1. táblázat 3. sora a gyűrűkerék fogára ható erő változását mutatja. Az egy időben kapcsolódó fogak száma a terhelés függvényében nő, a táblázatban az

$M_1 = 600Nm$  nyomatéknak megfelelő állapot látható. Az egy időben kapcsolódó fogak száma és a legnagyobb fogerő a hajtás irányától függetlenül közel azonos, a kapcsolódó fogakra ható erő változása is hasonló.

f) Ha  $M_1 > 0$ ,  $1 \rightarrow 2$  és  $2 \rightarrow 1$  esetben a hullámkerék alakváltozásáról könnyen értelmezhető és értékelhető következtetések levonására a görbületi sugár az alkalmas jellemző.

A 2. táblázatban az 1. táblázat 2. sorában látható görbületi sugarak bemutatása folytatódik. A hullámkereket változatlanul hagyva az excentert, a tárcsát és a gyűrűkereket cseréltük. Az excenter (az  $e$  excentricitás) és a tárcsa ( $d_t$  tárcsaátmérő) cserélésével változtattuk a hullám nagyságára jellemző  $w_0$  elmozdulást ( $w_0 = 1,1mm$ ,  $w_0 = 1,2mm$ ) és a hullámkerék tárcsához simulására jellemző  $\beta$  szöget ( $\beta = 24,811^\circ$ ,  $\beta = 34,757^\circ$ ,  $\beta = 42,53^\circ$ ).

j) A 2. táblázat első, harmadik és negyedik sora a  $1 \rightarrow 2$  és  $2 \rightarrow 1$  esetben a görbületi sugár 1. táblázatban látotthoz hasonló változást mutat.  $1 \rightarrow 2$  hajtásirány esetén a hullámkerék tárcsához simulás ívének nagysága nem változik, de a fogak kapcsolódásának környezetében a görbületi sugár csökken, és a hullámkerék a tárcsától elválik.  $2 \rightarrow 1$  esetben a tárcsa csak a hullám bal oldalán támasztja a hullámkereket, a hullám jobb oldalán a hullámkerék a tárcsától elválik.

k) A 2. táblázat második és ötödik sorában  $1 \rightarrow 2$  esetben a görbületi sugár változása az 1. és 2. táblázatban látható változáshoz hasonló.

l) Az ötödik sorban  $M_1 = 0Nm$  és  $2 \rightarrow 1$  esetben a hullámkerék  $2\beta = 85,06^\circ$  szöghöz tartozó íven simul a tárcsához.  $M_1 > 0$  esetben a tárcsa korlátozza a hullámkerék terhelés hatására bekövetkező alakváltozását.

m) A generátort és a hullámkereket változatlanul hagyva a vizsgálatokat nagyobb oldalirányú foghézagot biztosító gyűrűkerékkel is elvégeztük. Az 1. táblázat 2. sorában, valamint a 2. táblázat 1. és 2. sorában látható értékeket a 2. táblázat 3., 4. és 5. sorában

látható értékekkel összehasonlítva mondhatjuk, hogy az oldalirányú foghézag hatása a hullámkerék alakjára gyakorolt hatása csekély.

#### 4. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben a szerzők egy fogaskerék-hullámhajtómű homlokfelülete mellett mért sugárirányú elmozdulás, görbületi sugár, a gyűrűkerék fogára ható erő, a hajtómű geometriai adatai és terhelése közötti kapcsolatot vizsgálták. A mért értékek lehetőséget biztosítottak az elméleti számítások ellenőrzésére és a konstrukciós következtetések levonására.

#### FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Musser C.W.: Elastic-Body Mechanics. Machine Design. 1961. No. 6. 150-156 p.
- [2] Péter József: Fogazott hullámhajtómű kapcsolódásának vizsgálata. (a Miskolci Műszaki Egyetemen elfogadott egyetemi doktori értekezés). 1981. 174 p.
- [3] Péter József: Fogaskerék-hullámhajtómű és tengelykapcsoló kapcsolódásának vizsgálata. (az MTA Tudományos Minősítő Bizottsága által elfogadott kandidátusi értekezés). 1992. 111 p.
- [4] Péter József, Németh Géza: Fogaskerék-hullámhajtómű laboratóriumi vizsgálata I. Gép, 2011. (megjelenés alatt)
- [5] Terplán Zénó, Apró Ferenc, Antal Miklós, Döbröczöni Ádám: Fogaskerék-bolygóművek. Műszaki Könyvkiadó. Budapest, 1979. 258 p.
- [6] Suvalov Sz. A., Volkov A. D.: Deformacija gibkogo zubcsatogo kolesza dvumja diszkami. Izv. vuz. Mas. 1971. No 10. 44/49 p.
- [7] US Pat. 2906143, 1959.
- [8] US Pat. 2931248, 1959.

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.

This research was carried out as part of the TAMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 project with support by the European Union, co-financed by the European Social Fund.