

# HAJTÁSLÁNCOK FOGAZOTT ELEMEINEK KUTATÁSA ÉS FEJLESZTÉSE

## RESEARCH AND DEVELOPMENT OF TOOTHED ELEMENTS OF POWER TRAINS

Dr. Kamondi László, PhD \*

### ABSTRACT

During the past decades the toothed pairs of elements proved again their unchanged significant role in the power trains. Their functions are the accurate conversion of motion, the greatest load carrying capacity at the least sizes, the conformity to the environments. The paper shows geometric, dynamic and acoustic results on the research fields of gear coupling, free running clutch and pair of gears.

### 1. BEVEZETÉS

A klasszikus gépészeti hajtásláncok és elemeik, ezen belül a járműipari alkalmazások jelentős fejlődésen mentek keresztül. A fejlődés az alkalmazott elemek (alternatív energiaforrások, hajtóművek, tengelykapcsoló rendszerek, stb.) megoldás változataiban is megmutatkozott. Az egyes elemek térfogat- és tömeg csökkentése, a teljesítmény/tömeg arány javítása a kutatókat és fejlesztőket arra ösztönözte, hogy az új anyagok alkalmazása mellett más konstrukciós megoldásokban is gondolkodjanak. Ez a törekvés vezérelte azokat a kutatásokat is, amelyek a fogazott elempárú mozgásátvitelre irányultak azzal a céllal, hogy az átvitel pontosságát, a terhelhetőség növelését, a környezetre gyakorolt hatás csökkentését, a hibafelismerés lehetőségét biztosítani lehessen.

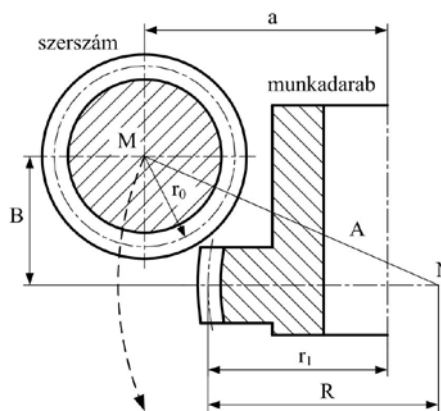
### 2. FOGASGYŰRŰS TENGE LYKAPCSOLÓK MOZGÁSÁTVITELE

A fogasgyűrűs tengelykapcsoló fő alkotó elemei: a belső fogazatú hüvely és a domborított fogazattal rendelkező agy. A két fogazott gépelem egy sajátos fogaskerékpárt alkot, ahol a fogszámok azonosak. A domborított fogazat révén a tengelykapcsoló képes kompenzálni az összekapcsolt tengelyek szögeltérését.

\* egyetemi docens, tanszékvezető, Miskolci Egyetem  
Gép- és Terméktervezési Tanszék

A tengelykapcsoló agy domborított fogazata lefejtő marással állítható elő, az 1. ábrának megfelelően.

A domborított fogfelület alakját befolyásolja a marószerszám átmérője és a mozgásparaméterek, de alapvetően a domborítás  $R$  sugarától függ (1. ábra).



1. ábra. A domborított fogfelület gyártásának elvi vázlatja

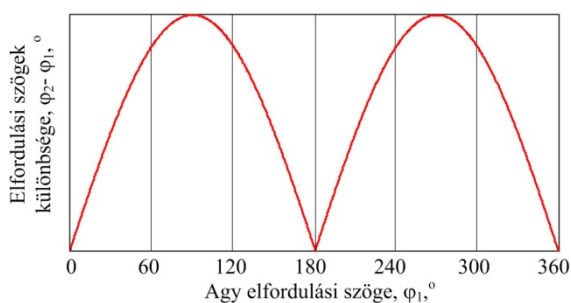
A domborított fogfelület leírására matematikai modellek készültek [1, 2]. Ezeket felhasználva elvégezhető a tengelykapcsoló érintkezési vizsgálata, a mozgásátvitel elemzése, melyhez kapcsolódva két fontos megállapítás tehető:

- az agy domborított fogfelülete miatt a két fogazott elem között a fogérintkezés pontszerű, ill.
- a tengelyek közötti szögeltérés esetén elméletileg egyszerre csak két fogpár van kapcsolatban.

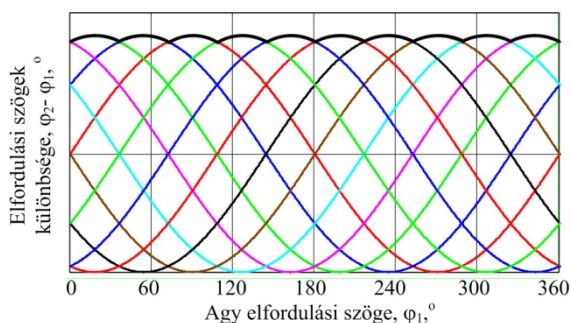
Szöghibával rendelkező hajtás esetén egyetlen fogpár kapcsolódását elemezve megállapíthatjuk, hogy az agy egyenletes forgatása mellett a belső fogazatú hüvely fordulatszáma változó lesz. A 2. ábrán látható, hogy a mozgásátvitel egyenletlenségét jellemző forgásszög különbség változása szinuszos jellegű.

Tekintettel arra, hogy a fogasgyűrűs tengelykapcsoló nem 1, hanem  $z$  számú foggal rendelkezik, a mozgástörvényt a  $z$  számú görbe egymást  $2\pi/z$  szöggel követő felső sűvegei szolgáltatják (3. ábra), mivel a metszés-

pontokban a következő fogpár átveszi a hajtást az előzőtől.



2. ábra. Egyetlen fogpár mozgásátvitele

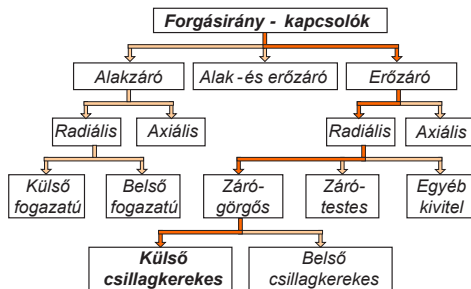


3. ábra. A tengelykapcsoló mozgástörvénye

A tengelykapcsoló szöghiba kompenzáló képességét az  $R$  domborítási sugár határozza meg. A szögeltérés egyetlen agy-hüvely párosítással kezelhető, azonban a gyakorlatban általában két elempárt építenek be. Ezzel az összekötött tengelyek sugárirányú egytengelyűségi hibájának a kiküszöbölése is lehetővé válik, továbbá az itt bemutatott egyetlen járás is kiküszöbölhető.

### 3. A GÖRGŐS SZABADONFUTÓK MINŐSÍTÉSÉNEK MÓDSZERTANI KÉRDÉSEI

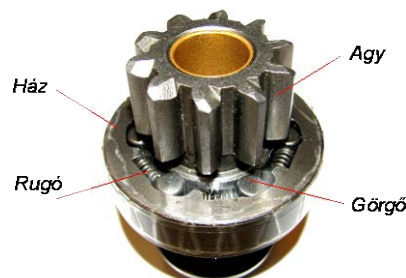
Forgásirány-kapcsolón olyan tengelykapcsolót értünk, amelyik csak az egyik forgásirányban tud nyomatékot, illetve mozgást továbbítani. Az elemek összekapcsolása vagy szétválasztása automatikusan történik. Két lehetséges üzemiállapotuk van: a szabadonfutás és a kapcsolás.



4. ábra. Forgásirány-kapcsolók osztályozása

A forgásirány kapcsoló tengelykapcsolók a gépjármű- és repülőgépipar előretörésének köszönhetően váltak széles körben alkalmazottá. A sokféle kivitel visszavezethető néhány alapvető működési elvre, melyet a 4. ábra táblázata mutat be.

A gépjárműiparban a leginkább elterjedt típus a külső csillagkerekű görgős szabadonfutó. Jellemüket tekintve ezek a szerkezetek tömör, zárt kialakításúak (5. ábra).



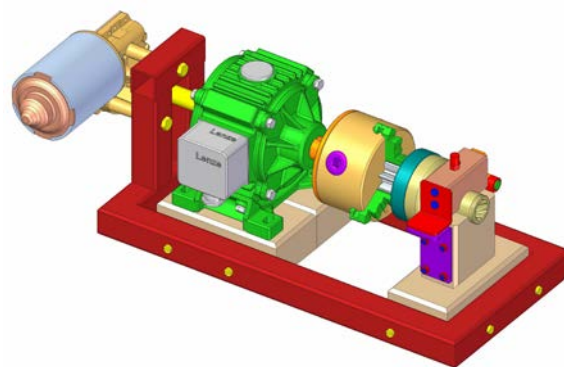
5. ábra. Külső csillagkerekű görgős szabadonfutó

A szabadonfutók elhasználódásának fokát csak olyan mérőműszerekkel lehet meghatározni, amelyek érzékelői a szerkezeten kívül találhatóak. A külső sérülések szemrevételezéssel határozhatók meg, a belső hibaforrások feltáráshoz pedig az alábbi lehetőségek állnak rendelkezésre: zajmérés, rezgésmérés, súrlódó nyomaték mérése, melegedés mérése, ultrahang- és rezgés vizsgálat, röntgen vizsgálat.

A szabadonfutók a passzív szerkezetek csoportjába sorolhatók, amelynek a következő funkciókat kell ellátnia:

- Lehetővé kell tenni a vizsgált szerkezet gyors cseréjét, hogy azonos típusú, nagy számú szabadonfutó összehasonlító vizsgálata elvégezhető legyen.
- Biztosítani kell, hogy a meghajtó egység működtetése közben fellépő zavaró hatások (pl.: akusztikai mérésnél a hajtás rezgései) ne befolyásolják a mérés eredményeit, vagy a hatás valamilyen módon szűrhető legyen.
- Minden körülmények között biztosítani kell a mérés reprodukálhatóságát.

A 6. ábrán látható mérőpad kizárólag az akusztikai zavaró hatások kiküszöbölésére készült.



6. ábra. A mérőpad 3D-s modellje

#### 4. NEMSZIMMETRIKUS FOGASKEREK SZEREPE A HAJTÁSTECHNIKÁBAN

A fogaskerékes hajtóművek fejlesztésében az elmúlt évtizedek a szabványokban is rögzített szimmetrikus fogalaktól való eltérést eredményezték. Ennek egyik oka, hogy a hajtásláncokba közvetlen irányváltó elemeket építettek be, ezzel a fogazott elempároknál elmaradhatott a forgásirányváltás. A másik ok az a kényszer, hogy a fogak terhelhetőségét a szokásostól eltérően konstrukciós megoldással is növelni kellett. Ez az igény vezetett a nemszimmetrikus fogalak kialakítására [5], melynek már a gyártástechnológiai lehetőségei is megteremtődtek a CNC megmunkáló gépeken.

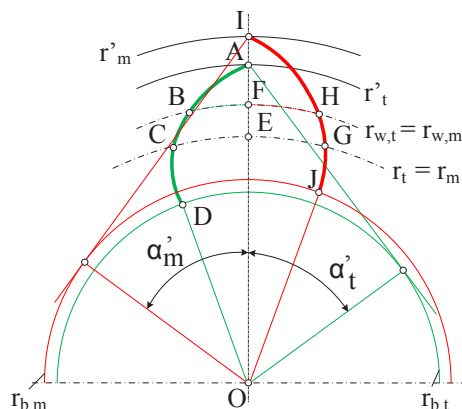
A fogaskerékpárok tervezésében a fogaloknak nagy jelentősége van. A jelentősége egyrészt a mozgásleképezés pontosságában, másrészt a terhelhetőség meghatározásában van.

A kinematikai mozgásleképezés mellett fontos szerepet bír a hajtás dinamikai viselkedése, melyet a fogmerekváltás változtatásával, valamint a foghézag szabályozásával lehet biztosítani. A szimmetrikus és a nemszimmetrikus alapprofil közötti különbséget [6] a működő és támasztó oldali paraméterek eltérése mutatja. Az ilyen alapprofilal generált fogak fogoldalainak ívelése és a fogtövek paraméterei változtathatók, ezzel befolyásolhatók az érintkezési- és fogtó feszültségek, ill. a kifáradási időtartamok (ciklusszámok).

A nemszimmetrikus *általános tengelytávú* fogkapcsolásban fontos az elméleti hézagmentesség biztosítása, melyre csak az [6] irodalomban mutattak be általánosan használható összefüggést. Ennek meghatározásához a gördülőköri fogvastagságok ismerete szükségesek, melyek általánosan a 7. ábra segítségével az alábbi összefüggésekkel írható fel.

$$s_w = f_{w,t} + f_{w,m},$$

$$f_{w,t} = m \cdot \frac{\cos \alpha_t}{\cos \alpha_w} \left( \frac{\pi}{4} + x \cdot \operatorname{tg} \alpha_t + \frac{z}{2} (\operatorname{inv} \alpha_t - \operatorname{inv} \alpha_{w,t}) \right).$$



7. ábra. Fogvastagság értelmezése (BH ív)

A működő oldali fogvastagság rész az osztó és gördülőkörön ( $f_{w,m}$ ) hasonló módon írható fel, csak az inde-

xek jele változik meg. A két fogvastagság rész összege adja a tényleges fogvastagságot.

A fogaskeréken megvalósítandó profileltolás tényezőzők összege a hézagmentességi feltételből határozható meg

$$\sum_{i=1}^{i=2} x_i = x_1 + x_2 =$$

$$= \frac{z_1 + z_2}{2} \cdot \frac{\operatorname{inv} \alpha_m + \operatorname{inv} \alpha_t - (\operatorname{inv} \alpha_{w,m} + \operatorname{inv} \alpha_{w,t})}{\operatorname{tg} \alpha_m + \operatorname{tg} \alpha_t},$$

melyet ezt követően konstrukciós megfontolások alapján kell a kerekek között megosztani.

#### 5. A FOGHÉZAG HATÁSA A FOGASKERÉKKAPCSOLÓDÁS DINAMIKAI VISELKEDÉSÉRE

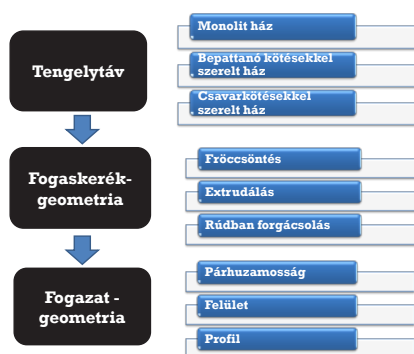
A fogaskerekek alkalmazásának fő oka, hogy számos a többi hajtásátvivő elemmel szembeni előnyös tulajdonsággal rendelkeznek, viszont a fogaskerekek működése során fellépő dinamikus hatások következtében néhány hátrányos tulajdonságuk is van, ezek közül a legfontosabbak a zaj és a lengés, ezért a fogaskerekekkel szemben támasztott elvárás a zajcsökkentés, mely szintén a fellépő dinamikus hatások csökkentését kívánja meg. A dinamikus hatások egy része a fogak rugalmas deformációjára, illetve az alaposztás- és a profilhibákra vezethető vissza. A nem-kívánt dinamikus hatások csökkentése érdekében a fogaskerék hajtások tervezésekor jelentőséggel bír a helyes foghézag megválasztása. A rosszul megválasztott foghézag akár a hajtás működésképtelenségét is okozhatja, de biztosan növeli a fellépő dinamikus hatásokat, és így a hajtás zajszintjét is.

A fogaskerekek vizsgálatok célszerű a kinematikai és dinamikai viszonyokat együtt kezelni, mivel maga a fogprofil, a tengelytáv, és e két tényező eredményeként a foghézag, valamint a terhelés következtében fellépő fogdeformáció hatással van a hajtás dinamikai viselkedésére. Ezért első lépésként a terhelés hatására létrejövő alakváltozást, majd a foghézag figyelembe vételével a kapcsolódási pontokat kell meghatározni. A kapcsolódási pontok ismeretében vizsgálható a hajtás dinamikai viselkedése [7]. A vizsgálat során a fogdeformáció meghatározásához a fogat egy változó keresztmetszetű tartóként modelleztük, míg a dinamikai vizsgálatok során a kapcsolódást egy rugóval (egyfogpár kapcsolódása során), illetve rugórendszerrel (több fogpár kapcsolódása), valamint egy sebességgel arányos csillapítással modelleztük. A fogaskerekek dinamikus viselkedését az előzőekben ismertetett modell alapján egy nem-lineáris differenciálegyenlettel lehet leírni [8]. Ezen mozgásegyenlet megoldásával a fogaskerék dinamikai viselkedése leírható, vizsgálható különböző terhelési esetek mellett. A mozgásegyenlet egy fontos paramétere a kapcsolódási merevség, mely a mozgásegyenlet nemlineáris jellegét is okozza. A kapcsolódási merevség leírásakor

figyelembe kell venni a foghézagot, valamint, hogy aktuálisan mely fogak vannak benne a kapcsolódásban. Fontos szempont a megfelelő lineárizálási módszer megválasztása, mivel az a kapott eredményeket nagyban befolyásolja.

## 6. KISMÉRETŰ MŰANYAG FOGASKEREK FEJLESZTÉSI KÉRDÉSEI

A teszt alapú fejlesztésnél is alapvető fontosságú, hogy a fogaskerékpár vagy fogaskerékcsoport a fejlesztés során meghatározott minőségi és szilárdsági jellemzőknek megfelelően reprodukálható legyen. Ennek alapfeltétele, hogy a fejlesztési folyamat során (8. ábra) ezeket a jellemzőket helyesen rögzítsék. A fejlesztési lépéseken végighaladva meg kell határozni a tengelytávtól befolyásoló tényezőket és a hozzájuk tartozó tűréseket. Ügyelni kell rá, hogy több részből álló műanyag házaknál a ház darabjainak összeszerelése után is módosulhat a ház pontatlanságaiból adódó befelezések vagy a kötőelemek előfeszítése miatt. A kerekek alapvető geometriájának tűréseit általában a technológia határozza meg.



8. ábra. A fejlesztési folyamat elemei

A fejlesztési folyamat során a legbonyolultabb feladat a fogazatgeometria jellemzőinek meghatározása. A kis méretek miatt az egyes fogak torzulásai nehezen ismerhetők fel, így azok az összefüggések is, hogy egyes torzulások mit okozhatnak. Fröccsöntésnél szinte bármilyen irányú torzulás és geometriai hiba elképzelhető. Ezek egy része kiszűrhető mérlegeléssel (anyaghiányok felismerése), a súlyos geometriai hibák átforgatási nyomtatók vizsgálattal, azonban a lokális melegekedést okozó fogfelületi hibák felismerése nehézkes lehet. Ilyenek főként a fogfelület tengellyel párhuzamos alkotóinak párhuzamossági hibái, a fogfelület hullámossága vagy a profil eltérése az evolvenstől stb.. A kutatásaink folytatásában az ilyen hibák összeszerelt eszközökben okozott hatásaival és azok vizsgálhatóságával kívánunk foglalkozni.

A foghézag hatásának vizsgálata a teljes, hosszútávú kutatómunka egy nagyon fontos része, mivel ezen paraméternek nagy hatása van a fogaskerekek működésé-

re, dinamikus viselkedésére. A foghézag helyes, terhelési viszonyoknak megfelelő megválasztásával kapcsolatban jelenleg kevés, a mérnöki gyakorlatban is jól használható útmutatás található az irodalomban. A hosszútávú, vizsgálatok eredményeként a fogaskerekek, valamint maga a hajtás az adott elvárásoknak megfelelően optimalizálhatóak. Tehát adott fogprofil terhelés mellett modellezhető, hogy milyen dinamikus hatások fellépése várható, valamint a foghézag megváltoztatása, hogyan befolyásolja a hajtás dinamikus viselkedését. Az optimalizáció eredményeként az adott célra, a gazdaságossági követelményeket is figyelembe vevő, leginkább megfelelő fogaskerék kiválasztása is lehetővé válhat. Vagyis ezen folyamat egy részeként az optimális foghézag értékére is ajánlást lehet adni, akár adott profil, illetve terhelés mellett.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

A szerző köszöni továbbá kollégáinak (*Drágár Zsuzsa tanársegéd, Szűcs Renáta tanársegéd, Bihari János tanársegéd, Bihari Zoltán adjunktus, Kelemen László doktorandusz, Dr. Sente József egyetemi docens*) a cikk összeállításánál nyújtott segítségét.

## 7. IRODALOM

- [1] SZENTE J., KELEMEN L.: Domborított fogfelület előállítására kétparaméteres burkolással. *Gép.* LXIII. évf. 12. szám (2012). p. 57-60.
- [2] KELEMEN L., SZENTE J.: Analysis of gear meshing for gear couplings. *Advanced Engineering.* Vol. 6. No. 2. (2012). p. 171-182.
- [3] BERANEK, L. L.: Zajcsökkentés, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1967.
- [4] DÖMÖTÖR F.: Rezgésdiagnosztika I., Dunántúlváros, 2007.
- [5] A. KAPELEVICH: Geometry and design of involute spur gears with asymmetric teeth, *Mechanism and Machine Theory* 35 (2000) pp. 117-130.
- [6] DRÁGÁR ZS., KAMONDI L.: Design questions of gears with non-symmetric teeth, pp. 329-332, 13th International Conference on Tools, ICT-2012, March 2012, Hungary, Miskolc.
- [7] KAMONDI L., SZÚCS R.: Bevezetés a fogaskerék kapcsolódás végeelem módszerrel történő vizsgálati lehetőségeibe, *GÉP*, LXII. évf. 2011/11. III. Köt., pp: 37-39.
- [8] R. SZÚCS, L. KAMONDI L.: Analytical model for determine meshing stiffness of spur gears. *Design of Machines and Structures*, Volume 2, Number 2 (2012), pp: 123-135.
- [9] BIHARI J., KAMONDI L.: Kis méretű műanyag fogaskerekek vizsgálata, *GÉP*, LXII. évf. 2011/11. I. Köt., pp: 21-24