

SÍKKEREKES HULLÁMHAJTÓMŰ CSALÁD KÍSÉRLETI FEJLESZTÉSE ÉS PROTOTÍPUSGYÁRTÁSA A K.K.K. 99 KFT.-NÉL

Krisch Róbert

ügyvezető, K.K.K. 99 Kft.

9500 Celldömölk, Nagy Sándor tér 1., e-mail: info@kkk99.hu

Göncfalvi Balázs

projektvezető, K.K.K. 99 Kft.

9500 Celldömölk, Nagy Sándor tér 1., e-mail: info@kkk99.hu

Absztrakt

A síkkerekes hullámhajtóművek működési elve nagymértékben hasonlít a hagyományos hengeres kerekes hullámhajtóművekéhez, csupán az alapelemek kialakításában térnek el egymástól. Jelen cikk kísérleti síkkerekes hullámhajtóművek különböző változatainak kifejlesztését, valamint az elkészült hajtóműveken végzett tesztek és eredményeket hivatott bemutatni. A projekt a Gazdaságfejlesztési és Innovációs Operatív Program keretei között, a Nemzetgazdasági Minisztérium és az Európai Unió támogatásával jöhetett létre.

Kulcsszavak: kutatás-fejlesztés, hullámhajtómű, Nemzetgazdasági Minisztérium

Abstract

The functions of the principal members of a flat-wheel harmonic drive are similar to the functions of a traditional harmonic drive, but the feature of the flexible and the solid wheels are different. This paper reports the development and investigations of the pertain conditions of different variations of experimental flat wheel harmonic drives. The development project was sponsored by Ministry for National Economy and European Union.

Keywords: development and investigation, harmonic drive, Ministry for National Economy

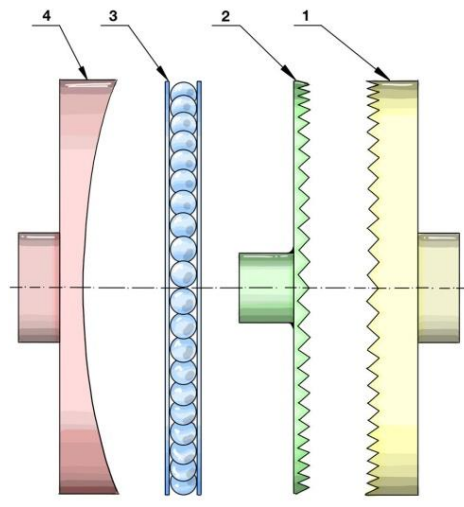
1. Bevezetés

A K.K.K. 99 Kft. a GINOP 2.1.7-15-2016-00507 sz. pályázat keretében támogatást nyert síkkerekes hullámhajtóművek fejlesztésére és prototípusainak legyártására. A fogazati paraméterek és az ideális deformált alak rögzítése mellett a fejlesztés tárgyát képező precíziós hajtásrendszerek alapelemeinek és főbb alkatrészeinek kialakítása nagymértékben befolyásolja a berendezés működését, illetve annak gyártási költségeit. Jelen cikk az ezen elemek kombinálásából előállítható potenciális hajtásrendszerek kifejlesztését mutatja be, egészen a tesztek elvégzéséig és kiértékeléséig. Célunk olyan síkkerekes hullámhajtóművek megtervezése, gyártása és tesztelése volt, amelyek a jelenleg kapható hengeres kerekes társaik alternatívájaként, versenytársaként szolgálhatnak.

2. A síkkerekes hullámhajtómű alapelemei és működése

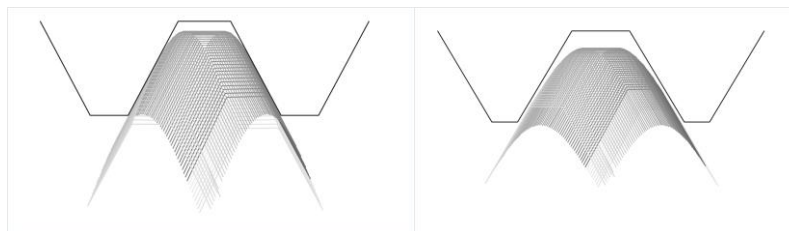
A vizsgált síkkerekes hullámhajtómű tulajdonképpen a hengeres kerekes fogaskerék-hullámhajtómű (harmonic-drove.com) egy speciális változatának tekinthető, amelyben a behajtó oldalon forgó mozgást végző, bütyökfelülettel ellátott hullámgenerátor (4) egy rugalmas axiális csapágyon keresztül (3) deformálja a szintén rugalmas hullámkerék (2), amely ezáltal a merev kerékkal (1) kapcsolódik. Ezek a hajtómű ún. alapelemei, amelyek koaxiális elrendezésűek, és az 1. ábrán láthatók.

Kéthullámú hajtómű esetében a fogazott elemek kapcsolódása két ellentétes oldalon jön létre, amelynek következménye, hogy a hullámgenerátor egy körülfordulása a rugalmas tagon csupán két fogosztásnyi elmozdulást eredményez. Megállapítható, hogy ez a kialakítás meglehetősen nagy áttételt (akár $i = 80-320$) eredményezhet. (Krisch, 2010)



1. ábra. A síkkerekes hullámhajtómű alapelemei: merev kerék (1), hullámkerék (2), rugalmas csapágy (3,) bütykös hullámgenerátor (4)

A megfelelő működéshez elkerülhetetlen, hogy a rugalmas és merev kerék kapcsolódásának paraméterei (deformáció mértéke, fogprofilok, foghézagok nagysága stb.) biztosítsák a két fogazott alapelem fogfej-ütközés és fogfej-interferencia nélküli kapcsolódását. A fogazat geometriája egy korábbi tanulmányban (Krisch, 2010) összeállított fogkapcsolódási és deformációs modellen, illetve egy ehhez köthető kutatásunk (Kardos és Krisch, 2018) alapján került kialakításra, a rugalmas kerék deformált alakjának pontos megismeréséhez pedig vége-selemes módszert alkalmaztunk.



2. ábra. Hullámkerék egy fogának pályája a merevkerék fogárkában külső (bal) és belső (jobb) peremen terheletlen állapotban

3. Fejlesztési fázisok ismertetése

Az analitikus és véges elemes számítások eredményeinek validálásához a valós körülmények között elvégzett tesztek nélkülözhetetlenek, ezért a kutatás fejlesztési projekt célja tesztelt prototípusok előállítását volt. A vizsgálatokhoz szükséges alkatrészek gyártását koncepcionális tervezési fázis előzte meg, amelynek során gyárthatósági, szerelhetőségi, illetve további, költségekhez köthető szempontok szerint kerültek kiválasztásra a legjobbnak ítélt alkatrész-geometriák és elemkombinációk. Ezt követően a működést befolyásoló részegységekből több verzió is legyártásra került, amelyeket kombinálva összesen 7 db különböző hajtómű változat tesztelését végezhetjük el. Az eredmények ismeretében meghatározható az egyes alkatrészek működésre gyakorolt hatása, széleskörű képet kaphatunk a fejlesztés tárgyát képező hajtóműtípusok főbb tulajdonságairól, előnyeiről-hátrányairól. Ezen ismeretek hozzájárulnak a hajtóművek piaci pozicionálásához és a lehetséges alkalmazási területek feltárásához.



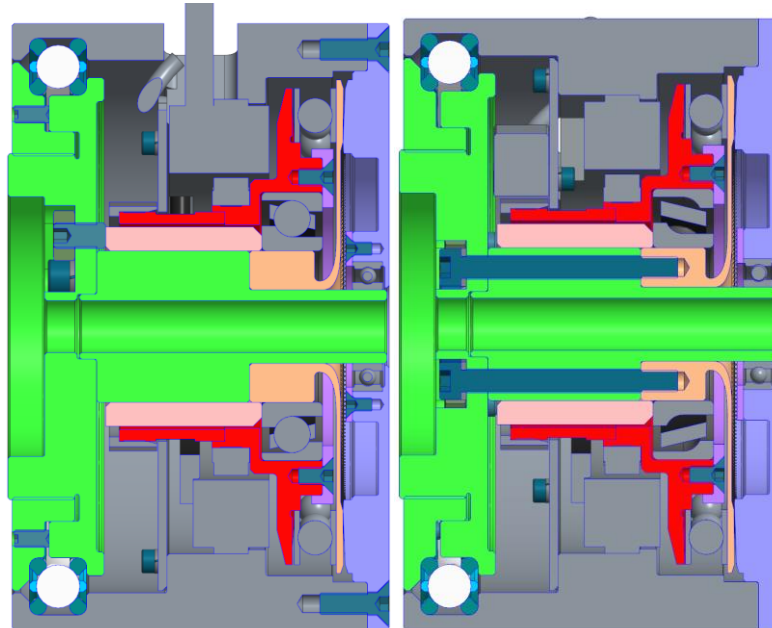
3. ábra. A kísérleti sikkerekes hullámhajtómű robbantott ábrája

4. Koncepcionális tervezés, kiválasztott hajtómű kombinációk

Az irodalomkutatás során különböző precíziós hajtómű típusok összehasonlító elemzésére és értékelésére került sor. Ennek keretei között kiválasztottuk a megtartandó műszaki megoldásokat és kombinációkat, amelyek az élettartamra vetítve költséghatékonyan elégítik ki az előírt követelményeket, valamint kereskedelmi tételek, anyagok, kenőanyagok, kötőelemek terén is széles választék állt rendelkezésünkre.

Első lépésként az 1. ábrán bemutatott négy alapelem megfelelő csapágyazásáról kellett gondoskodni. Ezt követően egy sztátor és egy rotor gyűrűből álló ún. nyomatékmotor került beépítésre, amely igen kompakt kialakítású, ugyanakkor kizárólag a gyártó által előírt szigorú kritériumok szerint építhető be. Végül a hajtóműház folyamatos fejlesztésével, illesztőfelületek és állítási lehetőségek kialakításával, elektronikai elemek és szenzorok integrálásával állt össze a végleges hajtómű koncepció, amelynek metszeti képe a 4. ábrán látható. Fontos megjegyezni, hogy a hajtómű megfelelő merevségét különleges, ún. drótcsapágyazással biztosítottuk.

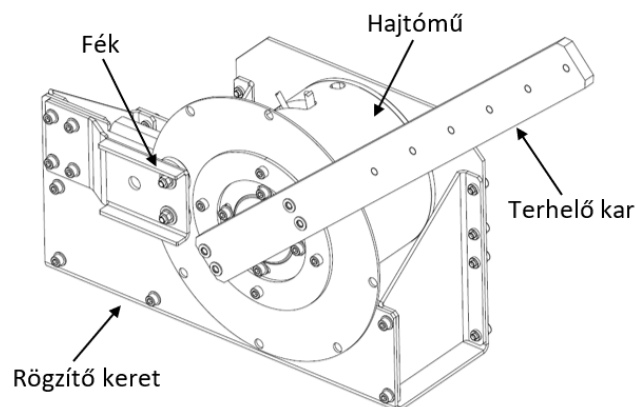
Az alapelemek közül több típus is legyártásra került, így 120 és 160-as áttételű hajtómű is összeállítható, a hullámgenerátorok eltérő bütyökfelülettel, a rugalmas csapágyak pedig többféle gyűrűvel és horonymélységgel készültek el. Mindemellett három különböző jeladó típus, illetve bordázott és bordázatlan hajtóműházak is rendelkezésünkre álltak.



4. ábra. A kísérleti sikkerekes hullámhajtómű végleges verziójának metszete

5. Mérési összeállítás és alkalmazott mérőeszközök

A hajtóműkombinációk azonos körülmények között történő vizsgálatához összeállításra került egy robusztus tesztkeret, amely az 5. ábrán látható. A lemez vázra szerelt hajtásrendszerek járatás közben acél féktárcsán és réz fékpfókon keresztül-, egy merev acél kar segítségével pedig álló helyzetben és kis mozgástartományon terhelhetők.



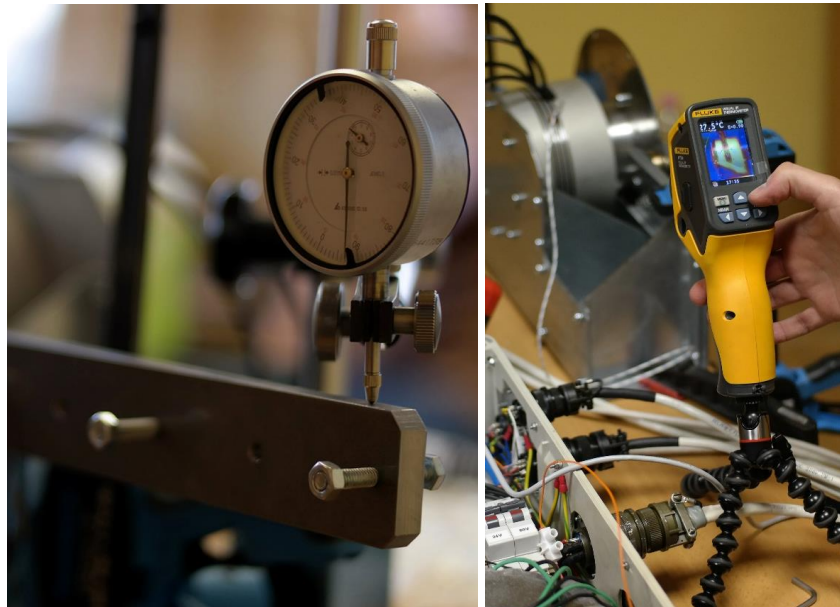
5. ábra. Kísérleti hajtásrendszerek vizsgálatára szolgáló tesztkeret

A terhelő kar végpontján finomtapintó mérőórával mérjük az elmozdulást. A rendszer merevségének meghatározásához és a hajtómű rugalmas deformációjának kiküszöböléséhez a hajtóműház helyére egy kielégítően merev, megegyező méretű elemet helyzetünk, amelyet egy kar segítségével külpontosan terhelünk. Ezzel megállapítottuk a rendszer (asztal, mérő keret, kar adapter,

kar) lehajlását, így ezen érték és a mért torziós merevség különbsége a hajtóművek tényleges torziós merevsége. A mérések során rögzítésre kerül a nyomaték tartásához szükséges áramerősség értéke, emellett a mért lehajlásértékekből adódik a hajtásrendszerek szögmerevsége.

Ugyanezen mérési elrendezésnél mérhető a visszaállási pontosság, amely a precíziós hajtásrendszerek esetében kulcsfontosságú paraméter. Ehhez rögzített terhelőnyomaték mellett vízszintes helyzetből -30° -ba, majd újra a kiindulási pozícióba vezérelve a motort finomtapintó segítségével mértük a függőleges irányú elmozdulást, illetve számítottuk a visszaállási szöghibát.

A hajtásrendszerek alkalmazási területei között szerepelnek olyan felhasználási módok, amelyeknél a hajtásrendszer tartós járatásnak van kitéve. Ennek szimulálásához fokozatosan növelt fordulatszám és állandó terhelés mellett vizsgáltuk a felvett áramerősséget, a hajtóműház- és a motor hőmérsékletét, valamint a hajtásrendszer zajszintjét. A hőmérséklet változását a multiméter ellenállás alapú hőszondájával, a hőmérséklet eloszlását pedig hőkamerával mértük. A zajszintet hangnyomásmérővel regisztráltuk, azonban itt fontos megjegyezni, hogy a kapott értékek tartalmazzák a környező szerelvények által felerősített rezgéseket is, így ezek csupán összehasonlításra alkalmasak.



6. ábra. Lehajlás és visszaállási pontosság mérése finomtapintóval, hőmérsékleteloszlás mérése hőkamerával

6. Mérési eredmények

A tesztek során hét különböző hajtómű-konfigurációt vizsgáltunk. Az eltérő verziók az alább látható konfigurációs táblázat elemeinek kiválasztásából és összeállításából épültek fel.

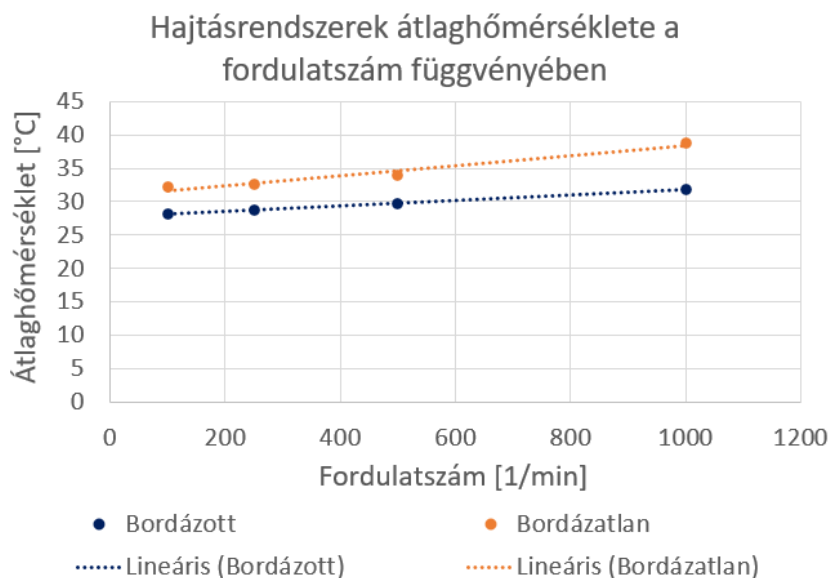
Az eredmények nyomon követhetősége érdekében egységes mérési jegyzőkönyvet állítottunk össze. A jegyzőkönyv minden esetben tartalmazza a hajtómű építőelemeinek jelölését, valamint a visszaállási pontossághoz, torziós merevséghez, és tartós járatáshoz kapcsolódó értékeket. Minden hajtómű mérése során digitális oszcilloszkópon volt lehetőségünk az áramfelvételhez, feszültséghez, forgási sebességhez és egyéb paraméterekhez tartozó cél és mért értékek közötti eltérést az idő függvényében nyomon követni. Megfigyelhető volt például, hogy magasabb fordulatszám

tartományok esetén erősebb szabályozásra van szükség, amelynek oka a ferdehatásvonalú csapágy enyhe ütésére volt visszavezethető.

1. táblázat. Hajtómű konfigurációs táblázat

Hullámgenerátor:	2° golyós	2.3° golyós	2° görgős
Csapágygyűrű:	1.25-0.4 mm		1.4-0.5 mm
Encoder:	Inkr. D20	Inkr. D80	Analóg+Idx
Áttétel:	120		160
Ház:	Bordázott		Bordázatlan

A mérések kiértékelésével számos értékes tapasztalatot szereztünk. Az analóg jeladóval szerelt verziók tesztelése megmutatta, hogy bár a hajtásrendszerek rövid ideig működtethetők, magasabb áramfelvétel és a hőmérséklet növekedése mellett a rendszer elveszti a fordulatszám visszacsatolás jelét, kiszámíthatatlanul viselkedik. Ezáltal valós eredményeket csupán a digitális jeladóval szerelt egységekből nyerhettünk. A 160-as áttételű hajtásrendszerek esetében ugyan valamivel magasabb áramfelvétel volt tapasztalható, azonban magas fordulaton is alacsonyabb zajjal járt a hajtóművek működése, mint a 120-as áttételűeké. A hőkamerás felvételeken tisztán látható, hogy a bordázott ház nagymértékben hozzájárul a motor hűtéséhez.



7. ábra. Bordázott és bordázatlan ház hőmérséklete a fordulatszám függvényében

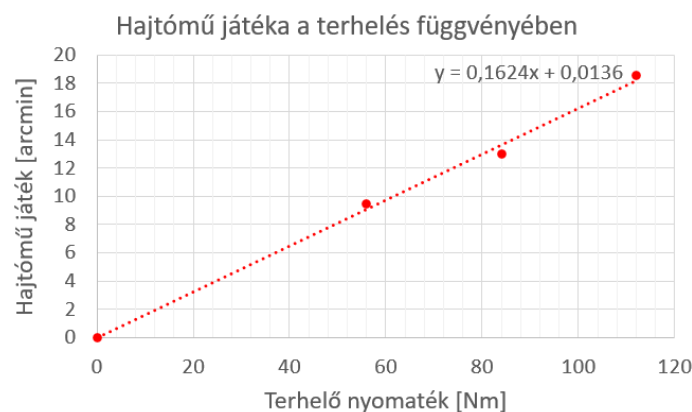
A visszaállási pontosság mérése megmutatta, hogy a nagyobb felbontású D80-as enkóder D20-asra történő cseréje semmilyen, a működést érdemben befolyásoló hatással nem járt, hiszen 160-as áttételű hajtóművek esetében több alkalommal is csekély, 1 szögperc alatti visszaállási hibát tapasztaltunk. A görgős ferdehatásvonalú csapágy szerelése nehézkes, és bár a hajtóművek zajszintje a beépítést

követően csökkent, a golyócsapágyakkal szerelt változatokhoz képest nagymértékű ütés és magas, ráadásul egyenetlenebb áramfelvétel volt tapasztalható.

7. Létjogosultság a piacon

Belátható, hogy a kereskedelmi forgalomban kapható precíziós hajtásrendszerek esetében a 120-as és 160-as áttétel igen magas érték, ezen a területen főként a bolygóműves hajtások terjedtek el. Tovább szűkíthető a konkurens termékek palettája, amennyiben figyelembe vesszük, hogy jelen hajtómű szervó hajtással szerelt, ezáltal önálló egységként telepíthető, ennek ellenére mindössze Ø133x100 [mm] befoglaló méretekkkel rendelkezik.

Az átlagos visszaállási pontosság 0,7 [szögperc], amely meglehetősen jó értéknek számít. A torziós merevség átlaga 6,2 [Nm/szögperc] feletti érték, amely megközelíti a Bonfiglioli precíziós bolygóművek (bonfiglioli.com) hasonló teljesítményű egységeinek szintjét.



8. ábra. Hajtómű játéka a terhelő nyomaték függvényében

A vizsgált hajtóművek egyik nagy előnye, hogy esetükben a fogazat kapcsolódása fokozatmentesen állítható, ezáltal a kihajtás teljesen játégmentessé tehető. Ezt jól szemlélteti a 8. ábra, amelyen látható, hogy a holtjáték 10 [Nm] terhelésig 2 [szögperc] alatt marad, amellyel megelőzi a Bonfiglioli hajtóművek 4-6 [szögperc]-es értékeit (bonfiglioli.com).

8. Összefoglalás és fejlesztési lehetőségek

A hullámhajtóművek tesztelése számos tapasztalattal járt, melyek hozzásegíthetnek újabb prototípusok, ezáltal egy kiforrottabb termék megalkotásához. Célul tűztük ki, hogy integráljunk olyan változtatásokat, amelyek javítják a berendezés paramétereit. Az axiális csapágyban alkalmazott kisebb átmérőjű gördülőelemekkel javíthatók a futási tulajdonságok, a fogazott elemek súrlódásának csökkentése érdekében pedig kézenfekvő megoldás lehet az olajkenés alkalmazása. Utóbbi esetében feladatunk a hajtásrendszer teljeskörű tömítettségét biztosítani, így csökkenthető a súrlódásból adódó veszteség és a hajtómű zajszintje, ráadásul ez a fejlesztés a hőelvezetésre is kedvező hatással lenne. A vizsgált hajtóművek mindegyike megegyező méretű, azonban az eltérő felhasználási igényekhez igazodva a későbbiekben akár egy termékcsalád összeállítására is van lehetőség.

Irodalom

- [1] www.harmonic-drive.com
- [2] Krisch, R. (2010). *Síkkerekes hullámhajtó-művek fejlesztése*. PhD értekezés, BME.
- [3] Kardos, Sz., Krisch, R. (2018). Síkkerekes hullámhajtómű fejlesztése a K.K.K. 99 Kft-nél. *GÉP*, LXIX(2018/4), 41.
- [4] www.bonfiglioli.com