

---

# Prehľad doterajšieho výskumu výroby harmonického prevodu

---

## Daniela Kepeň Harachová, Ing., PhD.\*

Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva, Strojnícka fakulta,  
Technická univerzita v Košiciach,  
Letná 9, 042 00 Košice.  
E-mail: daniela.harachova@tuke.sk, Tel.: + 421 55 602 2366

## Silvia Maláková, doc. Ing., PhD.

Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva, Strojnícka fakulta,  
Technická univerzita v Košiciach,  
Letná 9, 042 00 Košice.  
E-mail: silvia.malakova@tuke.sk, Tel.: + 421 55 602 2372

## Samuel Sivák, Ing.

Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva, Strojnícka fakulta,  
Technická univerzita v Košiciach,  
Letná 9, 042 00 Košice.  
E-mail: samuel.sivak@tuke.sk, Tel.: + 421 55 602 2355

## An overview of current research on harmonic gear

**Abstract:** Harmonic Drive, also called Harmonic Drive gear, harmonic gear, or strain wave gearing, mechanical speed-changing device, invented in the 1950s, that reduces the gear ratio of a rotary machine to increase torque. It operates on a principle different from that of conventional speed changers. Harmonic drive products are unique precision speed reducers playing important roles in robots, semiconductor manufacturing systems, factory automation equipment and furthermore, in aerospace equipment that may convey our human dreams.

**Keywords:** harmonic drive, flexible wheel, zero backlash gear, insertion the teeth.

---

## ÚVOD

Úlohou harmonickej prevodovky je vytvorenie vysokého prevodového pomeru prostredníctvom jedného stupňa. V dôsledku toho, že u harmonických prevodov je jeden člen poddajný, majú tieto prevody v porovnaní s planétovými prevodmi tri zvláštnosti:

- prvá zvláštnosť spočíva v tom, že v zábere a tým i prenose sa súčasne zúčastňuje väčší počet zubov. Čím väčšie zaťaženie sa bude prenášať poddajným členom, tým sa bude zväčšovať i jeho deformácia a teda i väčší počet zubov sa bude nachádzať v ozubenom zábere,
- druhá zvláštnosť harmonického prevodu spočíva v tom, že v dôsledku zmeneného tvaru poddajného kolesa od zaťaženia, alebo v dôsledku zvoleného tvaru vačky generátora dochádza k veľmi malému relatívnemu pohybu medzi zubami, nachádzajúcimi sa v ozubenom zábere,

- tretia zvláštnosť je tiež podmienená tvarom poddajného kolesa a spočíva v zmenšení uhlov tlaku v kinematickej dvojici generátor vln – poddajné koleso, čo sa prejaví na zmenšení trecích strát tejto dvojice v porovnaní unášač – satelit u planétového prevodu.

Z uvedených zvláštností harmonických prevodov vyplýva, že tieto prevody v porovnaní s planétovými prevodmi majú menšie rozmery a vyššiu účinnosť.

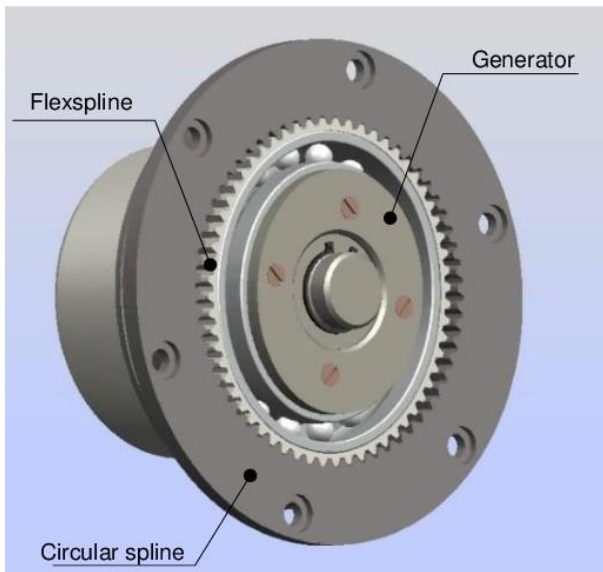
## 1 POPIS HARMONICKEJ PREVODOVKY

Harmonický ozubený prevod (obr. 1) je riešený ako plávajúci dvojnásobný vačkový generátor vln. Tá sa skladá z troch hlavných komponentov:

- generátor vln (*Wave Generator*),
- pružné ozubené koleso (*Flexspline*),
- tuhé ozubené koleso (*Circular Spline*).

Pružné koleso má vonkajšie ozubenie, tuhé koleso má vnútorné ozubenie. Obidve kolesá majú rovnaký modul a rozstup. Pružné koleso má menej zubov ako

tuhé koleso. Pôsobením generátora vln sa pružné koleso zdeformuje a zuby pružného kolesa sa zasunú do zubových medzier tuhého kolesa – dostanú sa do záberu.



Obr. 1. Harmonická prevodovka

### 1.1 Generátor vln

Generátor vln je vo väčšine prípadov vstupným členom a je namontovaný na vstupný hriadeľ prevodovky. Nepresnosti suložením vstupného hriadeľa sú čiastočne eliminované pripojením generátora vln harmonického prevodu. Skladá sa z viacerých prvkov (obr. 2), pričom jej kľúčovými elementami sú vačka a špeciálne pružné guľkové ložisko.



Obr. 2. Zostava generátora vln harmonického prevodu

Vačka, ktorá má špeciálne upravený tvar, je spojená s poháňaným unášačom pomocou *Oldhamovej* spojky. Tento spôsob montáže s využitím spojky umožní relatívny pohyb medzi vačkou a unášačom.

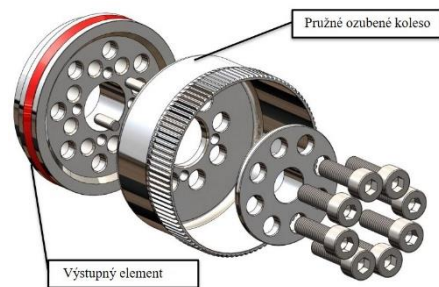
### 1.2 Pružné ozubené koleso

Pružné ozubené koleso je tvorené tenkostenným valcom, pričom na jeho vonkajšom okraji (otvorenom) sa nachádza vonkajšie ozubenie. Uzavretá časť valcovej nádoby je vo väčšine prípadov zosilnená, keďže sa k nej priamo pripája výstupný

hriadeľ prevodovky prenášajúci vysoké krútiace momenty.

Tvar pružného ozubeného kolesa závisí od typu vlnového generátora, ktorý sa zasúva pri montáži do otvorenej časti pružného ozubeného kolesa [1]. Obrázok 3 zobrazuje zostavu pružného ozubeného kolesa aj s montážou výstupného elementu prevodovky.

Skrz uzavretú časť valcovej nádoby sú vedené diery. Pomocou skrutiek vedených skrz tieto diery je následne primontovaný výstupný člen prevodového stupňa, ku ktorému sa dajú pripájať záťaže potrebným spôsobom.

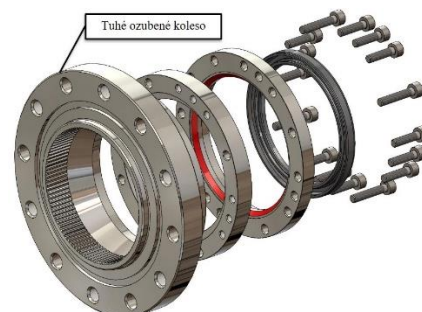


Obr. 3. Zostava pružného ozubeného kolesa harmonického prevodu

Pružné ozubené kolesa podlieha počas behu prevodovky neustálej deformácii od generátora vln a zároveň dochádza k viacnásobnému kontaktu v ozubení medzi pružným ozubeným kolesom a tuhým kolesom. Z tohto dôsledku je dôležitá správna voľba materiálu pružného ozubeného kolesa.

### 1.3 Tuhé ozubené koleso

Najtuhší element prevodovky je tuhé ozubené koleso, ktoré je tvorené vnútorným ozubením a zároveň je konštruované tak, aby celej zostave harmonickej prevodovky zaručilo čo najväčšiu pevnosť. Ozubenie je obklopené hrubým oceľovým prstencom vyrobeného z ocelevej liatiny zvýšenej pevnosti (obr. 4).



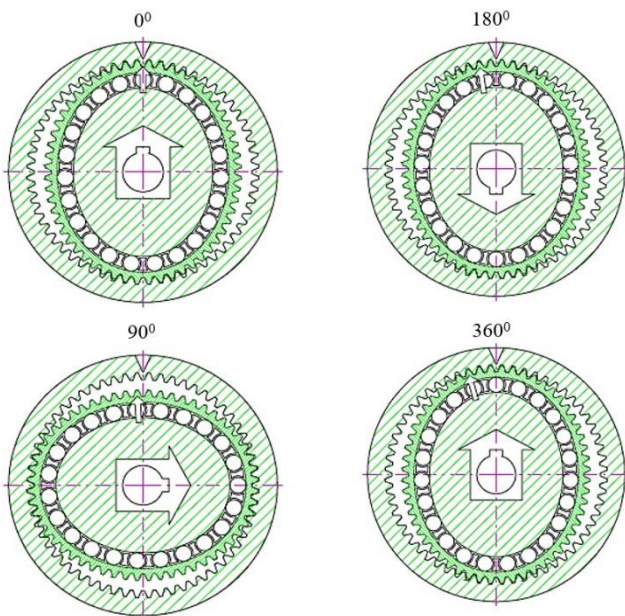
Obr. 4. Zostava tuhého ozubeného kolesa harmonického prevodu

Prstenec je na rozdiel od generátora vln kruhového tvaru a vo väčšine konfigurácii harmonického prevodu je počas celého chodu prevodovky v stabilnej

polohe, voči ktorej dochádza k rotačnému pohybu generátora vln a pružného kolesa.

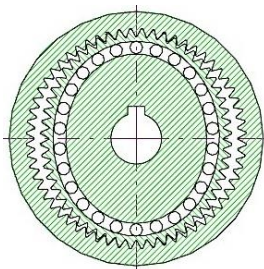
## 2 PRINCÍP PRÁCE HARMONICKEJ PREVODOVKY

1. Pružné koleso s vonkajším ozubením a počtom zubov o dva menšie ako tuhé koleso je deformované cez eliptický generátor vln, na ktorý je privádzaný vstupný otáčavý pohyb, a jeho zuby zapadajú do zubových medzier tuhého ozubeného kolesa v mieste hlavnej eliptickej osi (obr. 5).
2. Pri otáčaní generátora vln v smere hodinových ručičiek sa posúva záberová zóna s hlavnou eliptickou osou.
3. Pri otočení generátora vln o  $180^\circ$  v smere hodinových ručičiek sa relatívne posunie pružné koleso voči tuhému kolesu v opačnom smere o jeden zub.
4. Pri úplnom otočení generátora vln sa posunie pružné koleso o 2 zuby voči tuhému kolesu v opačnom smere.

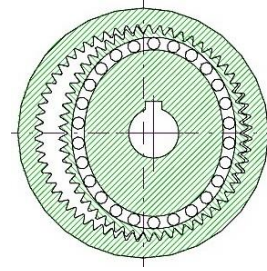


Obr. 5. Princíp práce harmonickej prevodovky

Pružné koleso má zaberat' s tuhým ozubeným kolesom po celej dĺžke, generátora vln musí byť umiestnený presne pod priestorom záberu. Pri montáži vlnového generátora je treba dbať, aby záber zubov bol rovnomerne rozložený na oboch stranách veľkej osi elipsy (obr. 6).



Obr. 6. Správne



Obr. 7. Nesprávne

Chybná montáž sa prejavuje zvýšeným vstupným krútiacim momentom a nerovnomerným hlučným chodom prevodovky (obr. 7).

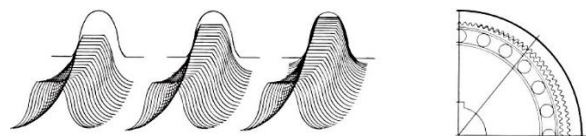
### 2.1 Ozubenie v harmonickej prevodovkách

Zo začiatku bolo pri harmonickej prevodovkách používané ozubenie s lichobežníkovými zubmi. Tieto prevodovky mali v zábere 15 % ÷ 20 % zubov, čo umožňovalo prenášať relatívne vysoký krútiaci moment [6]. Dochádzalo tu ale k opotrebovaniu zubov, hlavne ich špičiek, a následkom toho sa znižovala presnosť a opakovateľnosť (obr. 9).



Obr. 9. Pôvodné ozubenie harmonickej prevodovky

Z dôvodu zvyšovania nárokov na presnosť bol vyvinutý nový typ ozubenia pre harmonickej prevodovky označovaný ako „IH“ (obr. 10). U tohto nového typu ozubenia má bok zuba tvar evolventy a zlepšujú sa tým samozrejme vlastnosti ozubenia. Vďaka tomu, že je tu v zábere až 30 % zubov dochádza k ďalšiemu navýšeniu prenositeľného krútiaceho momentu, zvýšeniu torznej tuhosti a tiež zvýšeniu životnosti prevodu. Ďalej má tento typ nulový mŕtvý chod a z toho vyplývajúci presnosť a opakovateľnosť.



Obr. 10. Nový typ ozubenia „IH“

## 3 VLASTNOSTI HARMONICKÝCH PREVODOVKY

Harmonickej prevodovky sa vyznačujú možnosťou vysokého prevodového pomeru. V jednom stupni je možné dosiahnuť s komponentmi harmonickej prevodovky prevodový pomer až 160, pritom sú tieto prevodovky menšie a ľahšie ako klasické prevodové mechanizmy.



### 3.1 Účinnosť prevodu

Účinnosť zostavy komponentov harmonických prevodoviek je funkciou mnohých pracovných podmienok. Medzi hlavné činitele ovplyvňujúce účinnosť patria:

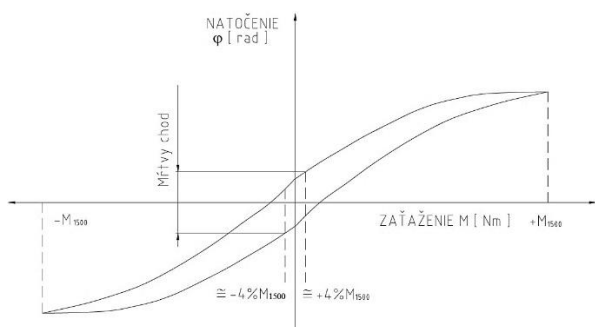
- zaťaženie prevodu,
- množstvo a viskozita použitého mazacieho prostriedku,
- vstupné otáčky.

Vyššia účinnosť sa dosahuje pri nižších otáčkach, nižšej viskozite oleja a pri vyšších prevodoch. Pri splnení týchto podmienok môže byť účinnosť až 90 %.

### 3.2 Mŕtvy chod (backlash) a tuhosť prevodu

Princíp fungovania *HP* je založený na mechanizme rotačne eliptickej deformácie *FS* pomocou eliptického *WG* a následným odvaľovaním ozubenia. Tento mechanizmus však v sebe skrýva dva zdroje nelineárneho chovania harmonického prevodu:

- tuhosť prevodu,
- mŕtvy chod.



Obr. 11. Mŕtvy chod a tuhosť harmonickej prevodovky

Obrázok 11 [4] predstavuje záznam torznej tuhosti harmonického prevodu pri fixovanom vstupe. Jej hodnota sa mení s veľkosťou zaťaženia prevodu. So zväčšujúcim sa zaťažením sa dostáva vplyvom deformácii do záberu stále väčší počet zubov a torzná tuhosť sa zvyšuje.

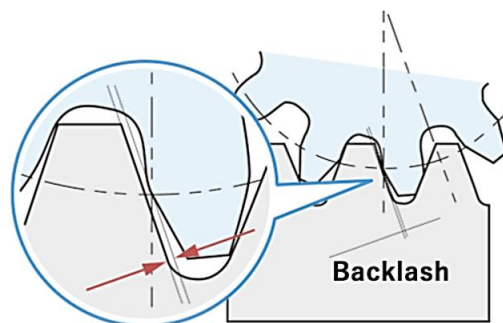
Mŕtvy chod (*Backlash*) (obr. 12) medzi zubami ozubenia je prítomný v ozubených prevodoch z rozličných dôvodov:

- zabezpečenie dostatočného mazania medzi zubami,
- eliminovanie príliš veľkého kontaktu v ozubení a prípadného zadrhnutie ozubenia.

#### 3.2.1 Výrobné chyby a nepresnosti

*Backlash* je definovaný ako prebytočná vôľa medzi odvaľujúcimi sa zubami (obr. 6 [21]) oproti ideálnemu prípadu odvaľovania evolventného profilu, kedy uvažujeme ideálny stav bez vôle. V praxi sa mŕtveho chodu dosiahne úpravou profilu ozubenia

alebo zmenou (zvýšením) osovej vzdialenosti medzi dvojicou ozubených kolies. Maximálna hodnota mŕtveho chodu je pre harmonické prevody  $v_{max} = 8,7 \cdot 10^{-4}$ , tzn. 3 uhlové minúty [21]. Z tohto vyplýva, že harmonické prevody sú veľmi presné, čo je tiež jednou z ich predností.



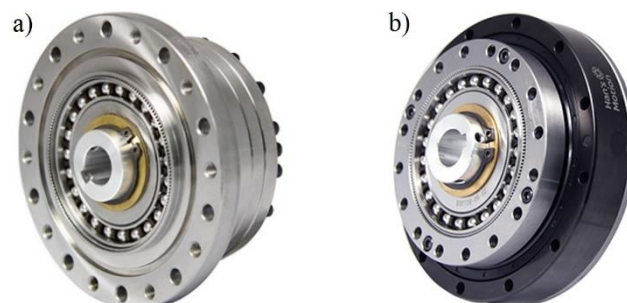
Obr. 12. Mŕtvy chod (*Backlash*)

## 5 ZÁKLADNÉ TYPY HARMONICKÝCH PREVODOVIEK (HP)

Tak, ako sa postupne vyvíjal trh a jeho požiadavky, tak sa aj harmonické prevody museli zdokonaľovať. Vývoj sa sústredil na presnosť, efektívnosť, zvyšovanie prenášaného krútiaceho momentu a životnosť komponentov. Ďalej boli vyvinuté komponenty veľmi tenké pre úsporu miesta a tiež komponenty s možnosťou vedenia hriadeľa stredom celku. Teraz si priblížime možnosti a vlastnosti jednotlivých komponentov.

Typ *HP* série *HMCG* - skladá z troch základných komponentov: flexibilný prevod, pevný prevod a generátor vln. Flexibilný prevod je štandardná konštrukcia v tvare pohára a jeho vstupný hriadeľ priamo spolupracuje s vnútorným otvorom generátora vln a spája sa s ním pomocou plochého kľúča alebo upevňovacej skrutky (obr. 13a).

*HP* série *HMHG* - patrí k štandardnej štruktúre dutého lemovania a celá konštrukcia je kompaktná. Jeho vstupný hriadeľ je spojený s vnútorným otvorom generátora vln cez *Oldhamovu* spojku (obr. 14b)).

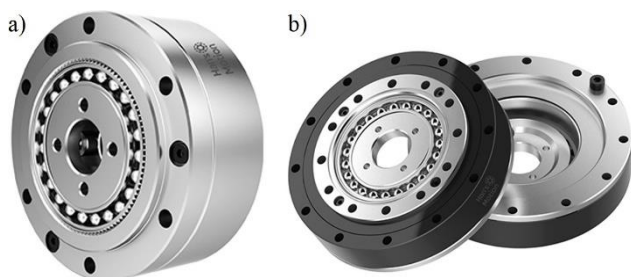


Obr. 13. a) *HP HMCG-II-E*, b) *HP HMHG-II*

Séria *HMCD* so záväzkom k nízkej hmotnosti a kompaktným rozmerom harmonickej prevodovky nielen zdedí výhody tradičných produktov, ale tiež realizuje odvážny tvarový dizajn založený na požiadavkách trhu. Štruktúru je ľahká a kompaktná,

takže *HP* je veľmi vhodný na použitie ako koncový spoj robota a redukcia klienta (obr. 14a)).

Séria *HMHD* je typ, kde sa presadzuje plochá štruktúra prevodu. Jeho axiálna dĺžka je polovičná ako u série *HMHG*. Pružné koleso využíva ultratenkú dutú prírubovú štruktúru a jej výstupná strana je inštalovaná s vysoko pevným krížovým valčekovým ložiskom. Vhodné pre aplikácie s požiadavkou na plochý dizajn (obr. 15b)).

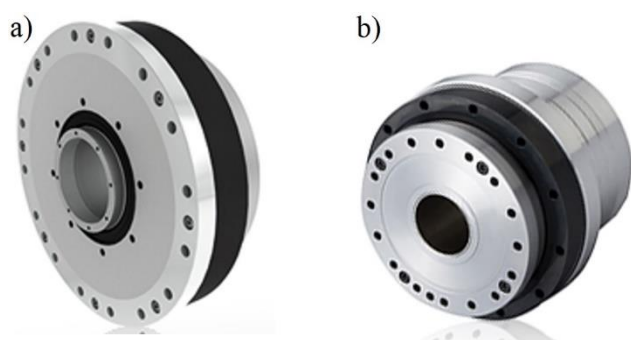


Obr. 14. a) *HP HMCD-II*, b) *HP HMHD-III* Jednoduchá jednotka

Bolo predstavených niekoľko nových sérií prevodoviek *Low Weight Harmonic Drive*, ktoré využívajú ľahké materiály krytu a optimalizovaný dizajn.

Prevodovky *CSG-LW* a *CSF-LW* sú o 30 % ľahšie ako predchádzajúce konštrukcie bez zníženia menovitého krútiaceho momentu alebo výraznej zmeny rozmerov rozhrania. Zahŕňajú súpravu komponentov *HP* v odľahčenom kryte a majú integrované vysokokapacitné krížové valčekové ložisko a výstupnú prírubu na podporu zaťaženia.

*SHG-LW* a *SHF-LW* (obr. 15a)) sú kompaktné prevodovky s dutým hriadeľom, ktoré sú o 20 % ľahšie ako štandardné jednotky *SHF*. Okrem funkcie dutého hriadeľa obsahuje prevodovka vysokokapacitné krížové valčekové ložisko a výstupnú prírubu na priamu montáž záťaže bez potreby dodatočného podporného ložiska.

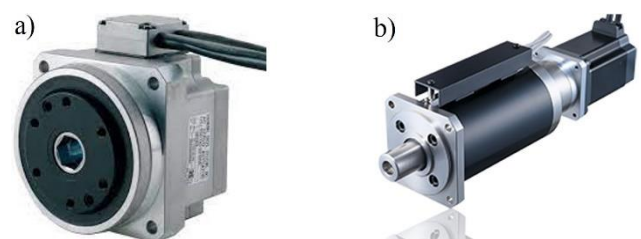


Obr. 15. a) *HP SHG-14-UH-LW*, b) *HP SHA-20*

*AC* servopohony série *SHA* poskytujú vysoký krútiaci moment. Tieto servopohony s dutým hriadeľom využívajú presné prevody *Harmonic Drive*® v kombinácii s bezkomutátorovým servomotorom a magnetickým absolútnym enkodérom. Pohon *SHA-20* (obr. 15b)) je najmenším pohonom v sérii *SHA*. Pohon s priemerom iba 94 mm a dĺžkou 108 mm

poskytuje maximálny krútiaci moment až 120 Nm [7]. Vyznačuje sa 17 mm dutým hriadeľom a robustným krížovým valčekovým ložiskom schopným niesť momentové zaťaženie 187 Nm.

*FHA* - tieto rotačné servopohony využívajú presné prevody *Harmonic Drive*® v kombinácii s výkonným bezkomutátorovým servomotorom a inkrementálnym kódovačom. *FHA* má nízky profilový faktor a má dutý hriadeľ cez stred výstupu. Táto vlastnosť dutého hriadeľa sa môže použiť na vedenie káblov, hadíc alebo laserov cez os rotácie (obr. 16a)).



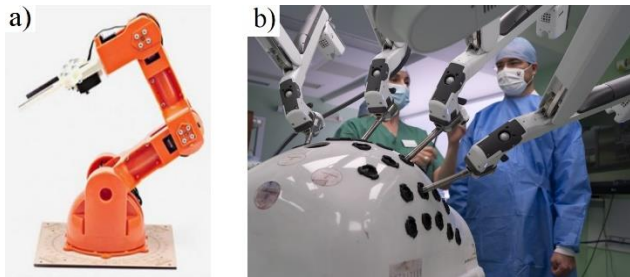
Obr. 16 a) pohon *FHA-C mini series*, b) pohon *LAH-80*

Lineárne pohony *LAH* sú dostupné v dvoch modeloch, *LAH-46* pre jednosmerné motory a *LAH-80* (obr. 16b)) pre krokové motory. Presná guľôčková skrutka poskytuje presnosť polohovania lepšiu ako 4 μm a opakovateľnosť 1 μm. Tento produkt je vhodný pre meracie prístroje, testovacie a kontrolné systémy, optické zariadenia, zariadenia na výrobu polovodičov a *LCD*.

## 6 HARMONICKÉ PREVODOVKY V PRAXI

Prevody a pohony *Harmonic Drive*® sa používajú v širokej škále aplikácií, z ktorých každá využíva inú charakteristiku technológie prevodov. Niektoré aplikácie závisia od nulovej vôle a vysokej presnosti polohy. Niektoré vyžadujú vysoký pomer krútiaceho momentu k hmotnosti. Ostatné závisia od jedinečných dostupných konfigurácií. Niektoré inštalácie využívajú všetky tieto atribúty. Priemyselná robotika (obr. 17a)) je jednou z hlavných oblastí použitia komponentov prevodovky *Harmonic Drive*®. Tieto aplikácie vyžadujú prevody s nulovou vôľou, s vysokou kapacitou krútiaceho momentu, vysokou torznou tuhosťou a vynikajúcou opakovateľnosť. Dizajn s dutým hriadeľom je tiež obľúbený, pretože umožňuje jednoduché, elegantné a spoľahlivé vedenie káblov. Prevodovky s veľkokapacitnými krížovými valčekovými ložiskami sa niekedy vyberajú kvôli ich kompaktnému tvaru a sú obzvlášť vhodné na použitie v osi robota, ktorá kladie na výstupné ložisko kľbu významné klopné momenty. Pokrok v oblasti medicínskeho vybavenia neustále zvyšoval požiadavky na vysoko presné riadenie pohybu. Príkladom toho sú prevodové jednotky používané v rotačných osiach stereotaktického manipulátora používaného na operácie mozgu (obr. 17b)).

Manipulátor je šesťosové robotické rameno, ktoré podporuje operačný mikroskop používaný chirurgom. Ako operácia postupuje, mikroskop prekrýva počítačové údaje o aktuálnom pohľade na operačnú oblasť, pričom funguje ako *head-up* displej, ktorý chirurga sprevádza počas operácie. Presnosť a spoľahlivosť *Harmonic Drive* sú rozhodujúce pre úspešné chirurgické zákroky.



Obr. 17. a) priemyselný robot, b) robotických chirurgických systémov pri operácii nádoru v mozgu

## ZÁVER

Vyspelé mechatronické systémy dnešných polohovacích mechanizmov majú čoraz vyššie nároky na presnosť translačných a rotačných pohybov. Súčasťou mechatronického systému je taktiež riadiaca jednotka ovládajúca daný pohonový systém. Harmonické prevodovky majú široké uplatnenie v dôsledku špecifických a jedinečných vlastností vyplývajúcich z ich mechanizmu. Tento mechanizmus je založený na odvalovaní ozubeného kolesa. Má vynikajúce vlastnosti predovšetkým v ustálenom stave za konštantných otáčok a za vhodných okolitých podmienok. Tieto mechanizmy mimo ustálenej oblasti vykazujú veľmi nelineárnu charakteristiku a výrazne sa prejavuje kinematická chyba prevodu. Tieto charakteristiky sú zapríčinené z rozličných faktorov, predovšetkým z dôsledku konštrukcie prevodu.

Nelineárna torzná tuhosť prevodového mechanizmu spôsobuje problémy pre riadenie a reguláciu pohonovej sústavy. Táto problematika je aktuálna v mnohých oblastiach aplikácie harmonického prevodu, predovšetkým v aplikáciách s prioritou na presnosť polohovania.

## PodĎakovanie

Príspevok bol vypracovaný v rámci riešenia grantových projektov: 029TUKE-4/2021 „Implementácia moderných edukačných prístupov pri konštruovaní prevodových mechanizmov“ a VEGA 1/0528/20 „Riešenie nových prvkov ladenia mechanických sústav.“

## LITERATÚRA

- [1] IANICI, S. - IANICI, D. (2019): *Contributions to determining the trajectory of a point on the average fiber of the flexible wheel of a double harmonic transmission*. Analele Universitatii 'Eftimie Murgu' Vol. 26, no. 1, p. 99-106 ISSN: 1453-7397.
- [2] KRAJŇÁK, J. - URBANSKÝ, M. - ŽUĽOVÁ, L. (2022): *Investigation of air temperature change in the flexible element depending on connecting holes number during compressing of this element*. Projektowanie, badania i eksploatacja. - Bielsko-Biala (Poľsko) : Wydawnictwo naukowe Akademii techniczno-humanistycznej w Bielsku-Białej s. 299-306 [print]. - ISBN 978-83-66249-97-4
- [3] HARACHOVÁ, D. - MALÁKOVÁ, S. (2022): *Possibilities of use and characteristics of high-precision transmissions in machinery*. MM Science Journal. - Praha (Česko): MM Publishing Roč. 2022-November, s. 6014-6019 [print, online]. - ISSN 1803-1269.
- [4] *Katalóg HP RR SLOVAKIA* (2012).
- [5] CZECH, P. - ŁAZARZ, B. - TUROŃ, K. (2017): *Influence of conditions of vehicle motion on its economy*. Autobusy No. 6, p. 136-142 ISSN: 1509-5878.
- [6] *Katalóg - Harmonic Drive Gearbox - Harmonic Gearbox Solutions* (2018).
- [7] *Lightweight Harmonic Drive® Gears and Actuators Help Improve the Productivity of Factory Automation Systems*: online - [www.harmonicdrive.net](http://www.harmonicdrive.net)
- [8] CHEN, X. - LIU, Y. - XING, J. - LIN, S. - XU, W. (2014): *The parametric design of double-circular-arc tooth profile and its influence on the functional backlash of harmonicdrive*. Mech. Mach. Theory, roč. 73, s. 1–24.
- [9] NIKITIN Y. - BOŽEK P. - TURYGIN A. (2022): *Vibration diagnostics of spiroid gear*, Roč. 30, č. 1, s. 69. ISSN 2450-5781