
Optimálny návrh výroby neštandardného ozubeného súkolesia

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

Optimal proposal of production of a non-standard gearing transmission

Abstract: Gears are among the most widely used transmission mechanisms, and the gear wheel has become a symbol of mechanical engineering. In operation, high demands are placed on the function of the gears. To achieve them, the production of gears plays an important role. Closely related to the production of gears are the specific questions of manufacturers, which method of gear production to choose. Consideration of economic initial costs, serial production, shape requirements of the gear ring and, last but not least, accuracy also led to the decision. The paper is devoted to the issue of manufacturing an elliptical gear with an asymmetric shape of the tooth profile.

Keywords: gearing, production, asymmetric tooth profile, electrospark cutting.

ÚVOD

Ozubené kolesá predstavujú dôležitý a nenahraditeľný prvok v základných zložkách mechanizmov. V súčasnosti sa okolo nás nachádzajú na každom kroku a sú neoddeliteľnou súčasťou nášho života a majú obrovské spektrum možností využitia. Najčastejšie sa však vyskytujú vo forme ozubeného prevodu [1-4]. Ozubené kolesá patria vďaka svojmu špecifickému tvaru medzi jedny z najzložitejších a technologicky najnáročnejších strojových súčiastky. Špecifický tvar ozubeného kolesa môžeme označiť ako ozubenie, ktoré je tvorené zubami. Zuby majú presne zadefinované rozmery, tvar, vlastnosti, rozloženie po obvode kolesa a sú na ich výrobu kladené veľmi veľké nároky [5]. Či už z hľadiska presnosti, výkonu, hlučnosti, životnosti a hlavne rýchlosti ich vyhotovenia [6-9]. Tieto neustále zvyšujúce sa nároky je možné ovplyvniť pomocou dokončovacích metód, primárne brúsením.

Oblasť výroby ozubenia napreduje vo vývoji rýchlym tempom a prešla za svojej existencie veľkým množstvom premien. Je to relatívne náročný technologický proces, pretože tvar zubov je zložitý a je presne definovaný jeho veľkosťou a funkciou [10]. Pred niekoľkými rokmi bola možná produkcia ozubenia iba základnými – konvenčnými metódami. Výroba ozubenia prebieha najčastejšie obrábaním.

Zuby vznikajú odoberaním zubovej medzere medzi jednotlivými zubami. Ozubenie sa získava frézovaním, obrázaním, preťahovaním alebo tvárnením. Na dosiahnutie čo najlepších stupňov presnosti povrchu sa použijú dokončovacie metódy obrábania ako je brúsenie, ševingovanie, lapovanie a zabiehanie.

V praxi čoraz častejšie nachádzajú uplatnenie aj neštandardné - atypické tvary ozubenia, pre výrobu ktorých nie je možné použiť tieto konvenčné metódy výroby ozubenia [11, 12]. Aj preto sa do povedomia v súčasnosti dostávajú aj nekonvenčné spôsoby výroby ozubenia, z ktorých je možné spomenúť napríklad rezanie plazmovým oblúkom, odoberanie laserom, prúdom vody alebo päťosovým obrábacím centrom.

Príspevok je venovaný výrobe neštandardného ozubeného kolesa, kde použitie konvenčných metód na výrobu ozubenia nie je vhodné a je potrebné použiť iný, nekonvenčný spôsob výroby.

1 NEŠTANDARDNÝ OZUBENÝ PREVOD

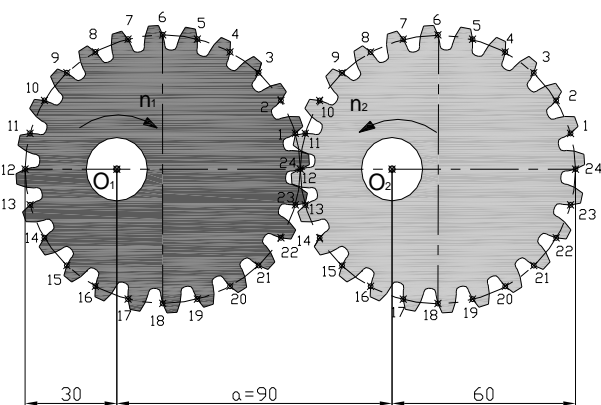
Najčastejšie sa v praxi používajú „štandardné“ ozubené prevody, ktoré môžeme charakterizovať konštantným prevodovým číslom. To znamená, že pri otáčaní hnacieho kolesa sa aj hnané koleso otáča rovnomerne, teda prevodové číslo musí byť počas

jednej otáčky konštantné. Zuby týchto „štandardných“ ozubených kolies na jednom ozubenom kolese majú rovnaký tvar a sú to zuby so symetrickým profilom (vo výnimočných prípadoch i s nesymetrickým profilom).

V praxi nachádzajú svoje uplatnenie aj ozubené prevody, ktorých prevodové číslo počas jednej otáčky nie je konštantné. Na základe požiadaviek z praxe bol vytvorený geometrický model ozubeného prevodu s plynule sa meniacim prevodovým číslom tak, aby daný prevod spĺňal podmienky správneho záberu. Ozubený prevod bol navrhnutý pre tieto konkrétne parametre:

- ozubené súkolesie tvorené dvoma identickými ozubenými kolesami,
- harmonicky sa opakujúce prevodové číslo v rozsahu u = od 0,5 cez 1,0 do 2,0 a späť na jedno otočenie spolu zaberajúcich ozubených kolies,
- počet zubov ozubených kolies $z_1 = z_2 = 24$,
- normalizovaná hodnota modulu ozubenia $m_n = 3,75$ mm,
- osová vzdialenosť $a = 90$ mm,
- určené pre jeden zmysel otáčania.

Súkolesie s plynule sa meniacim prevodovým číslom tvoria dve identické eliptické kolesá s excentricky uloženým stredom otáčania. Výsledný model tohto súkolesia vytvorený v programe *AutoCAD* je zobrazený na obr. 1.



Obr. 1. Model eliptického súkolesia

Ozubené súkolesie je tvorené dvojicou identických eliptických ozubených kolies, pričom stred otáčania je v jednom z ohnísk rozstupovej elipsy, teda jedná sa o excentricky uložené ozubené kolesá. Aktívna krivka profilu zubov je evolventa, kde na rozdiel od evolventnej časti boku zubov u „štandardných“ kruhových ozubených kolies, kde evolventou evolventy je základná kružnica, a tomto prípade je evolventou evolventy elipsa. Každý z dvanástich zubov ozubeného koleša je iný, ďalších dvanásť zubov toho istého koleša je rovnakých. Bočná krivka je evolventa, a je odlišná pre aktívnu a pasívnu stranu zuba. Jedná sa o ozubené kolesá s asymetrickým

profilom zubov, preto výroba takéhoto ozubenia nie je možná štandardnými výrobnými postupmi určenými pre čelné ozubené kolesá.

2 NEKONVENČNÉ SPÔSOBY VÝROBY OZUBENIA

Čelné ozubené koleso, ktorého každý zub je iný a profil zubov je asymetrický je nemožné vyrobiť štandardnými výrobnými postupmi. Tu prichádza so úvahy výroba ozubenia, kde sa použije *CAD* model navrhnutého ozubenia.

2.1 Výroba vodným lúčom

Tento spôsob výroby je známy aj ako *Water Jet (WJ)* - vodný lúč, *Water Jet Machining (WJM)* ako obrábanie vodným lúčom a *Abrasive Water Jet Machining (AWJM)* ako obrábanie vodným lúčom s abrazívom.

V procese *WJM* a *AWJM* sa využíva mechanická energia vody aj abrazívnych častíček na obrábanie. Typická hodnota veľkosti tlaku pre aplikáciu vodného lúča je 205 MPa ÷ 600 MPa. Pri dodaní vody s týmto tlakom prostredníctvom dýz, dochádza k transformácii potenciálnej energie na energiu kinematickú a zvyšuje sa rýchlosť vody až na 100 m·s⁻¹ a voda sa správa ako pevné teleso.

Ak sa použije čistá voda, vodný lúč zvykne naberat' atmosférický vzduch a to znižuje reznú schopnosť. Preto sa pridávajú do vody chemické stabilizátory. Technológia sa využíva najmä pri rezaní mäkkých materiálov, ako sú plechy malých hrúbok, plasty, fólie [13, 14]. Pre odstránenie tohto nedostatku sa do vody pridávajú abrazívne častíčky, najčastejšie zrná oxidu hliníka, piesok alebo sklené guľôčky. Preto *AWJM* je určená na obrábanie tvrdších materiálov (obr. 2). Pri prekročení pevnosti materiálu tlakom čela lúča, lúč navodí v obrobní materiálu erózný proces.



Obr. 2. Príklad použitia výroby ozubenia vodným lúčom

Prednosťou využitia je vysoká účinnosť energie - až 85 %, možnosť využitia vo výbušných prostrediach, materiál stačí upínať len letmo, v materiály nedochádza k vzniku prasklín, kvôli malému počtu rezných hrán. Nedochádza k vzniku prachu, takže sa zaraďuje medzi ekologické technológie. Možná je zmena výroby za veľmi krátky čas, vysoká spoľahlivosť pri prevádzke a presnosť daného rozmeru (0,13 mm, opakovaná 0,025 mm). Najväčšou výhodou je neovplyvňovanie teploty rezaného materiálu.

Medzi nedostatky tejto technológie patrí kolísanie kvality rezu po reznej ploche a na mieste výstupu rezného vodného lúča. Je potrebné zabezpečiť ochranu oceľových polovýrobov pred koróziou.

2.2 Výroba plazmovým oblúkom

Táto metóda patrí v dnešnej dobe medzi najrozšírenejšie metódy tepelného delenia kovových materiálov. Používa sa plazma s hustotou $5 \cdot 10^5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ a teplota plazmy dosahuje teplotu až $30 \cdot 10^3 \text{ K}$. Plazmové rezanie sa používalo na rezanie nerezových ocelí s využitím interného plynu. Na delenie konštrukčných ocelí sa používa s pridaním kyslíka, ako ochranného plynu.

Plazma je tvorená elektrickým výbojom medzi anódou a katódou, teda nutnou podmienkou je ionizované médium. Tým môže byť plyn, ktorý je v podobe vodíka, kyslíka, argónu a podobne.

Pomocou plazmy a prúdenia plynu v dýze horáka sa táto energia presúva k povrchu deleného materiálu. Plazma vráza do materiálu a nastáva miestne natavovanie a čiastočné vyparovanie roztaveného kovu z povrchu materiálu a vzniká rezná stopa. Rezanie plazmou je veľmi rýchle.

Výroba ozubenia plazmovým oblúkom (obr. 3) má pozitívne ohlasy v strojárskych praxi. Prerezanie možné použiť rôzne druhy konštrukčných materiálov. Dôležité je si uvedomiť, že po výrobe ozubenia plazmovým oblúkom vznikne na povrchu ozubenia tepelne ovplyvnená oblasť, ktorá sa mení pôsobením plazmového lúča z hora nadol. Na začiatku hrúbky rezania je tepelné ovplyvnenie intenzívnejšie ako na konci, kde je pôsobenie tepla menšie.



Obr. 3. Časť ozubenia vyrobená plazmovým lúčom pri rôznej hrúbke ozubenia

K výhodám tejto metódy patrí vysoká rýchlosť rezania, možnosť rezania všetkých materiálov

a vysoká presnosť pri opakovaných rezoch. K nevýhodám patrí obmedzenie hrúbky rezaného materiálu, zošikmenie reznej plochy a vysoké náklady na diely pri plynovom chladení horáku.

2.3 Výroba laserovým zväzkom

Podstata tejto technológie delenia materiálu spočíva na energii, ktorá je dodávaná svetelným lúčom. V mieste dopadu na nepriehľadný materiál sa táto energia mení na energiu tepelnú, ktorá roztaví materiál v oblasti reznej roviny. Hustota reznej energie je okolo $105 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$ a priemer rezného lúča lasera je $1 \mu\text{m}$.



Obr. 4. Výroba ozubenia laserom

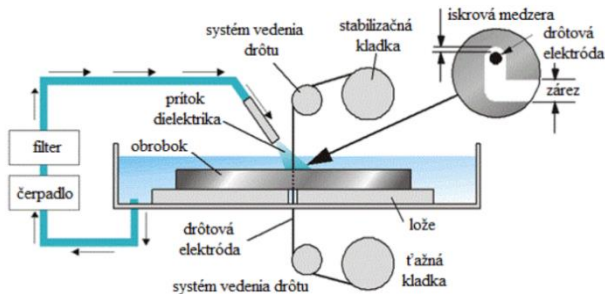
Pri použití na výrobu ozubenia (obr. 4) je dôležité pôsobenie energie lasera a materiálu deleného obrobku. Pohltenie energie absorpciou nastáva v dôsledku čiastočného odrazu lúča od deleného materiálu. Ukladanie absorbovanej energie je asi v $0,1 \mu\text{m}$ vrstve, ktoré neskôr z dôvodu tepelnej vodivosti vnika do deleného materiálu. Šírenie tekutého rozhrania do materiálu začína, ak je absorbovaná energia dosť vysoká na roztavenie materiálu.

2.4 Elektroiskrové obrábanie

Elektroiskrové obrábanie je spôsob *elektroerozívneho* obrábania elektricky vodivého materiálu. K odoberaniu materiálu dochádza pôsobením elektrickej iskry. Pri tomto spôsobe sa nástroj (elektroda) priblíži k obrobku na takú vzdialenosť, aby preskočila iskra medzi elektrodou a obrobkom. Iskra vytrhne z povrchu obrobku malú čiastočku roztaveného kovu. Pre zvýšenie účinku, zabráneniu elektrického oblúka, lokálnemu chladeniu sa celý tento proces odohráva v kvapaline (*dielektrikum*). Veľkosť a rýchlosť odoberania materiálu závisí od veľkosti medzery, a taktiež od vlastností materiálu obrobku a elektrody. Touto metódou možno obrábať každý vodivý materiál.

K *elektroerozívnemu* obrábaniu patrí *elektroerozívne* hĺbenie, *elektroerozívne* mikrodierovanie, *elektroerozívne* drôtové rezanie, *anodomechanické* rezanie a *elektrokontaktné* rezanie.

Elektroiskrové drôtové rezanie je progresívnou modifikáciou elektroiskrového obrábania. S prvým strojom pre drôtové rezanie prišla švajčiarska firma AGIE, ktorá použila ako prvá NC riadenie, tým sa proces zrýchlil a dosiahol presnejšie hodnoty. Dnes sa používa CNC riadiaci systém. Tato metóda umožňuje riadenie smeru, rýchlosti pohybu, rýchlosť odvíjania drôtu, sledovanie fyzikálnych vlastností a kontrolu prebiehajúcej elektroerózie.



Obr. 5. Princíp elektroiskrového drôtového rezania

Nástrojom drôtovej rezačky je tenký drôt, ktorý sa počas rezania neustále odvíja z cievky v zásobníku za pomoci špeciálneho podávacieho zariadenia, ktoré má taktiež funkciu šponovania drôtu, aby nedošlo k roztrhnutiu drôtu. Aby nedošlo k nepresnostiam, je drôt stále napínaný konštantnou ťahovou silou pomocou kladiek. Drôt sa pohybuje pomaly, v rozmedzí $2,5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ až $300 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, je riadený systémom stroja. Nástrojový drôt v priebehu procesu rezania môže byť použitý iba jedenkrát, následne po použití končí v zbernom mieste.

3 VÝROBA NEŠTANDARDNÉHO OZUBENIA

Pre technickú prípravu výroby je potrebné, aby ju zabezpečovala firma, ktorá sa špecializuje na vývoj a distribúciu CAM systémov a systémov pre automatizáciu programovania NC a CNC strojov. Voľba optimálneho spôsobu výroby je limitovaná podmienkami, ako je počet vyrobených kusov (bol vyrobený len jeden pár ozubených kolies), výroba mala byť zabezpečená technológiou bežne dostupnou v blízkom okolí a bez použitia prípadných nákladných prípravkov a náklady na technickú prípravu výroby a na výrobu funkčného modelu mali byť čo najmenšie.

Na základe uvedených podmienok bol vytypovaný NC stroj pre elektroiskrové rezania (tzv. drôtiková rezačka) EIR 005 B s riadením RS-ER5. Aj keď ide o starší stroj výrobného zariadenia, predmetný stroj umožňuje vytvorenie skonštruovaného tvaru ozubených kolies s dodržaním predpokladanej potrebnej presnosti $0,01 \text{ mm}$ a drsnosti $R_a 1,6 \mu\text{m}$.

Základným problémom bolo vygenerovanie NC kódu zložitého tvaru ozubených kolies, ktorý nedovoľoval použiť bežný prístup pri tvorbe NC programov

ozubených kolies, keď sa popíše tvar jedného zuba a tento sa opakuje podľa požadovaného počtu zubov. Prichádzali do úvahy tri spôsoby prípravy NC kódu.

Prvým spôsobom je programovanie v NC kóde stroja. Vzhľadom na zložitosť tvaru vyžadujúceho si ako 300 blokov je tento spôsob komplikovaný a neprehľadný a pre predmetný stroj táto možnosť prakticky neprichádzala do úvahy.

Druhý spôsob vychádzal z využitia už existujúcej softvérovej podpory stroja. Opis vyrábaného eliptického kola obsahuje 48 priamkových častí a 192 kruhových oblúkov, ktoré by pri tomto spôsobe bolo nutné pracne zadefinovať (stred kružnice, polomer, počiatočný a koncový bod kružnicového oblúka, atď.), preto tento spôsob je časovo náročný na prípravu.

Posledný spôsob je založený na vytvorení postprocesora (prekladača) pre daný stroj v systéme CAM2000, ktorý je určený pre automatizáciu programovania NC strojov. Táto možnosť sa ukázala ako jednoznačne najefektívnejšia a technicky ďaleko najefektívnejšia. Bol vytvorený postprocesor pre elektroiskrové rezanie EIR 005 B s riadiacim systémom RS-ER5. Jeho úlohou bolo automatické vygenerovanie NC kódu pre navrhnutý tvar ozubených kolies. Takýmto spôsobom je možné počas niekoľkých minút vytvoriť veľmi komfortným spôsobom NC program pre ľubovoľný tvar požadovaného profilu.

Keďže dĺžka rezu každého ozubeného kola bola približne 532 mm , výroba každého kusa trvala 8 hodín pri odporúčanej hrúbke rezacieho drôtu $0,02 \text{ mm}$ a hrúbke skúšobných kolies 3 mm . Pri predpokladanom zväčšení hrúbky ozubených kolies na 15 mm by sa mohol tento čas zvýšiť až na 40 hodín. Takýto spôsob opakovanej výroby (či už kusovej alebo sériovej) samozrejme nie je dostatočne produktívny a v prípade, že bude definovaný predpokladaný počet požadovaných kolies, bude nutné zvoliť vhodnejšiu technológiu výroby.

Pri výrobe daného eliptického ozubeného kola sa môže použiť metóda práškovej metalurgie. Výrobky práškovej metalurgie patria v súčasnosti k tzv. „ekonomicky efektívnym“ výrobkom, pretože ich cena v porovnaní so súčiastkami vyrábanými napr. trieskovým obrábaním, môže byť až o $25\% \div 50\%$ nižšia. Pre práškovú metalurgiu je totiž charakteristické až 95% využitie materiálu dané výrobou súčiastky "na - hotovo" bez nákladov na opracovanie. Prášková metalurgia patrí medzi bezodpadové technológie, má charakter uzavretého cyklu a výstupom je už hotový výrobok pripravený na montáž. Je pre ňu charakteristická až 50% úspora energie a až 75% úspora na mzdách. Táto metóda je vhodná pri obrovských sériách, hromadnej výrobe.

ZÁVER

Samotné ozubené kolesá prešli od svojho vzniku obrovským vývojom. Došlo k zmene ich tvarov, druhu použitých materiálov a podobne. Svoje uplatnenie nachádzajú ako štandardné tak aj neštandardné ozubené prevody v automobilovom, lodnom, leteckom či potravinárskom priemysle, ako i v ďalších odvetviach strojného priemyslu. Toto všestranné využitie ozubených kolies v každodennom živote viedlo k tvorbe veľkého množstva rôznych postupov a metód ich výroby. Každá použitá technológia a spôsob výroby odpovedá požiadavkám a nárokom na presnosť ozubenia a je závislá od parametrov a tvaru ozubenia.

Pod'akovanie

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

LITERATÚRA

- [1] ZHANG, Y. - MAO, K. - LEIGH, S. - SHAH, A. - CHAO, Z. (2020): *A parametric study of 3D printed polymer gears*. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 107, pp. 4481-4492.
- [2] CZECH, P. (2018): *Autonomous vehicles: basic issues*. In: Scientific Journal of Silesian University of Technology = Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej: Series Transport: Seria Transport., 100, pp. 15-22.
- [3] KOPAS, P. et al., (2019): *Fatigue characteristics of welded high strength steel in the low cycle region of loading*. In: MATEC Web of Conferences, Volume: 254, p. 1-10.
- [4] GREGA, R. - KRAJŇÁK, J. - MORAVIČ, M. (2018): *Experimental verification of the impact of a technical gas-using pneumatic coupling on torsional oscillation*. In: Scientific Journal of Silesian University of Technology = Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej: Series Transport: Seria Transport., č. 99, pp. 55-63.
- [5] SAPIETOVÁ, A. (2018) *Simplified computation methodology for contact forces on tapered rolling bearing with flexible parts*. In: Scientific Journal of Silesian University of Technology, Volume 99, pp. 177-182.

- [6] KULKA, J. a kol. (2018): *Failure analysis of the foundry crane to increase its working parameters*. In: Engineering Failure Analysis. No. 88, pp. 25-34.
- [7] MORAVEC, J. - KOPAS, P. - JAKUBOVIČOVÁ, L. - LEITNER, B. (2018): *Experimental casting of forging ingots from model material*. In: MMS 2017 MATEC Web of Conference, pp. 157.
- [8] CZECH, P. - ŁAZARZ, B. - TURONÍ, K. (2017): *Influence of conditions of vehicle motion on its economy*. In: Autobusy, No. 6, p. 136-142 ISSN: 1509-5878.
- [9] SÁGA, M. - MAJKO, J. - HANDRIK, M. - VAŠKO, M. - SAPIETOVÁ, A. (2020): *Proposal of Physical Model for Damage Simulation of Composite Structures Produced by 3D Printing*. In: ACTA PHYSICA POLONICA A, No. 2, Vol. 138 p. 245-248.
- [10] BUKOVSKÁ, Š. - MORAVEC, J. - SOLFRONK, P. - PEKÁREK, M. (2022): *Assessment of the Effect of Residual Stresses Arising in the HAZ of Welds on the Fatigue Life of S700MC Steel*. In: Metals, 12, 1890.
- [11] KRAJŇÁK, J. - URBANSKÝ, M. - ŽULOVÁ, L. (2022): *Investigation of air temperature change in the flexible element depending on connecting holes number during compressing of this element*. In: Projektowanie, badania i eksploatacja. - Bielsko-Biala (Poľsko): Wydawnictwo naukowe Akademii techniczno-humanistycznej w Bielsku-Białej p. 299-306.
- [12] MANTIČ, M. - KULKA, J. (2022): *Effect of notch geometry change on draw rod durability*. In: Engineering Failure Analysis. Amsterdam (Nemecko): Elsevier, Roč. 141, p. 1-12.
- [13] KUCZAJ, M. - WIECZOREK, A. N. - KONIECZNY, Ł. - BURDZIK, R. - WOJNAR, G. - FILIPOWICZ, K. - GŁUSZEK, G. (2023): *Research on Vibroactivity of Toothed Gears with Highly Flexible Metal Clutch under Variable Load Conditions*. In: Sensors, 23, 287.
- [14] HARACHOVÁ, D. - MALÁKOVÁ, S. (2022): *Possibilities of use and characteristics of high-precision transmissions in machinery*. In: MM Science Journal. - Praha (Česko): MM Publishing Roč. 2022, November, s. 6014-6019.