

MODERN FOGASKERÉK-MODELLEZÉSI ELJÁRÁSOK ÖSSZEHASONLÍTÓ TANULMÁNYA

COMPARATIVE STUDY OF MODERN GEAR MODELLING METHODS

Tolvaly-Roşca Ferenc¹, Forgó Zoltán²

¹*Sapientia EMTE, Műszaki és Humán Tudományok Kar Marosvásárhely, Gépész-mérnöki Tanszék, Cím: 540485, Románia, Segeşevári út, 1C, Telefon / Fax: +40 265 206 210/+40 265 206 211, tferi@ms.sapientia.ro*

²*Sapientia EMTE, Műszaki és Humán Tudományok Kar Marosvásárhely, Gépész-mérnöki Tanszék, Cím: 540485, Románia, Segeşevári út, 1C, Telefon / Fax: +40 265 206 210/+40 265 206 211, zforgo@ms.sapientia.ro*

Abstract

After the exponentially increased possibilities offered by the information technology in engineering, a novel and modern modeling method was implemented in gearing studies: study in virtual environment using Computer Aided Design. Nowadays there are numerous gears modeling methods used for different studies of gearing processes in virtual environment. They were developed using various CAD techniques, even from the first moment when CAD was defined and used. Many authors published their work regarding particular CAD techniques applied in developing gear solid or surfaces models. All published works are based only on few basically methods. Most of this methods were used or even developed by the authors of the present paper, but the advantages or disadvantages of different methods are not present in the literature, as well the comparative study of those methods are missing. The paper compares some basic gear modeling CAD methods trough given real gear modeling solutions, proposed and used by the authors in over 13 years of experience of gear modeling in virtual environment.

Keywords: CAD, gear modelling, comparative study

Összefoglalás

A számítástechnika alkalmazási lehetőségeinek exponenciális növekedésével a mérnöki fejlesztésekben egy új és modern fogaskerék-hajtás-vizsgálati módszer alakult ki: virtuális környezetben való modellezés, a számítógépes tervezés eszközeit alkalmazva. Napjainkban számos modellezési eljárás létezik, amelyeket virtuális környezetben végzett fogaskerék-modellezési és hajtásvizsgálatára dolgoztak ki már a számítógépes tervezés fogalmának a legelső megfogalmazásától kezdve. Számos szerző publikált eredményeket ezen a téren, egyedi elgondolásokat alkalmazva a fogaskerekek test- vagy felületi modelljeinek a megépítésére. Az alkalmazott módszerek valóban egypár alapvető modellezési eljárás alapszanak. Ezen alapmódszereket a jelen dolgozat szerzői számos esetben alkalmazták, és új módszereket is kidolgoztak. A szakirodalomban az alapvető modellezési eljárások összehasonlítása nincs jelen, ezek előnyeinek és hátrányainak összehasonlító számbavétele a szerzők fő célja. Több mint 13 év tapasztalatai alapján, adott fogaskerék-hajtás és modellezési feladatokon keresztül hasonlítjuk össze az eljárásokat, kiemelve azok előnyeit és hátrányait.

Kulcsszavak: számítógépes tervezés, fogaskerék-modellezés, összehasonlító tanulmány

1. Fogaskerék-modellezés virtuális környezetben

A számítástechnika fejlődésével egyre alkalmazottabb eszköze vált a fizikai jelenségek és valós események modellezése virtuális környezetben. Az időjárás előrejelzéstől a csillagászati jelenségeken keresztül a gépészeti tervezésig minden emberi tevékenység vagy ennek az eredménye modellezve van néhány egyszerű ok miatt:

- a fizikai jelenség egyáltalán nem volt még valóságban megfigyelve: a modellezése irányt adhat akár elméleti számításokra is;
- előző megfigyelések alapján modellezve egy jelenséget jövőbeli valószínű választ vizsgálunk;
- költséges mérnöki fejlesztések modellezése: anyagi költségek csökkentése céljából valós kísérletek vagy prototípusgyártás előtt felméri a tervezett eszközök várható viselkedését virtuális környezetben.

A fogaskerék-kutatások és -fejlesztések terén igen elterjedt a harmadikként felsorolt eljárás. A meglévő fogaskerék-hajtások fejlesztését vagy új típusú hajtások prototípusgyártását megelőzően modellezzük, és megvizsgáljuk, hogy a várható eredmények igazolják-e a további költségeket.

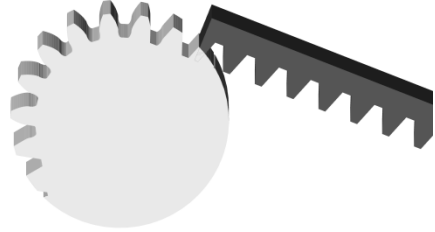
A fogaskerekek virtuális környezetben való modellezését széles körben való elterjedése okán számos publikációban megtaláljuk.

1.1. Fogaskerekek megjelenítése és vizualizálása, gyártásszimuláció

A fogaskerekek virtuális gyártása, „vágása” vagy a forgácsleválasztás folyamata azonnali szemléltetési vagy akár gyártási hibák vagy nehézségek azonosítására alkalmas eszköz [1], [2], [3], [4], [5].

A dolgozat egyik szerzője 2003-ban foglalkozott az ún. „mervetest kivonásának módszerével” [2]. A 2004-es Sapiientia EMTE Tudományos Diákköri Konferenciá-

ra egy fogasléc és egy henger használatával, profileltolás lehetőségével egyenes fogú hengeres fogaskereket generáltunk (1 ábra).

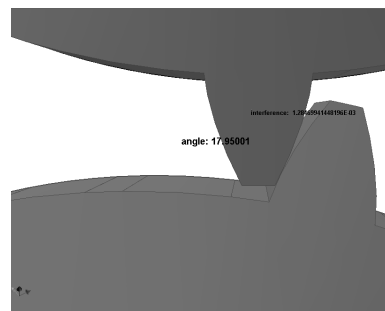


1. ábra. Egy korai, egyenes fogú hengeres fogaskerék generálása (2003)

Ha az eljárást csupán vizuális szimulációs célokra használjuk, nem igényel semmilyen felületi pontosságot, a generált mozgások lépései lehetnek tetszőlegesek.

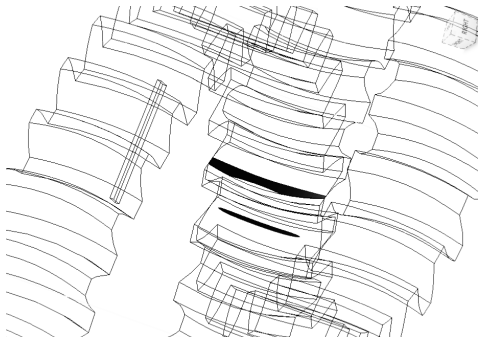
1.2. Hajtáspontosság- és kopás-vizsgálat, kontakt- és végelelelemzés, hordkép-tanulmányozás

Virtuális környezetben, ha pontos felületi- vagy testmodellel rendelkezünk, viszonylag pontos szimulációs eredményeket érhetünk el a hajtáspontosság-vizsgálatban [6, 7, 8]. Itt akár elméleti fogaskerék-hajtások testmodelljeinek hajtáspontosságát is összehasonlíthatjuk gyártásban lévő fogaskerék-hajtásokhoz (2. ábra).



2. ábra. Hajtáspontosság-vizsgálat virtuális környezetben

A hordkép tanulmányozása céljából [9, 10] is pontos modelleket kell használni, a test- vagy felületi modellek megfelelő pontossága teszi lehetővé a hordképek felbecsülését, illetve a tervezésben célként kitűzött hordkép azonnali becslését (**3. ábra**).



3. ábra. Hordképelemzés arkimédészi spirális vezérgörbésű fogaskerékajtás testmodelljein

Igen fontos kiemelni azt, hogy bármely virtuális vizsgálat minél pontosabb test- vagy felületi modelleket igényel, ez szükségessé teszi a fogláb és fogfej minél pontosabb modellezését is. Végelem-elemzés céljából, ha nem megfelelők a fogláb felületek, akkor hibás fogtőhajlítási feszültségeket kapunk.

2. Pontos test- és felületmodellek előállítása

A megfelelő pontosság elérése érdekében meg kell állapítani először is, hogy elsődleges cél a test- és felületi modellek minél pontosabb elkészítése, ha lehetséges, a fogaskerékek teljes térfogatában vagy legalább a fogazatoknál és azok környezetében.

Mielőtt megvizsgálánk a különböző modellezési eljárások pontosságát, meg kell állapítanunk ezeknek egy nagyon egyszerű csoportosítását, amely valójában teljességgel meghatározza előnyeiket és hátrányaikat.

Az összes fogaskerék felület- vagy testmodellezési eljárás, eltekintve a végső cél elérését célzó CAD-eljárások sokaságától, alapvetően 2 csoportra osztható:

- matematikai egyenletekből kiinduló modellezési eljárások;
- a generáló mozgásokon alapozó CAD-eljárások.

A matematikai egyenletekből kiinduló eljárások alapvetően kapcsolási egyenletekből indulnak ki, ezekkel meghatározhatók a fogfelületek parametrikus egyenletei. A fogfelületek egyenleteit felhasználva, a legváltozatosabb módon keverhető CAD-technikák alkalmazhatók a fogaskerékmodellek megépítésére [10, 11, 12].

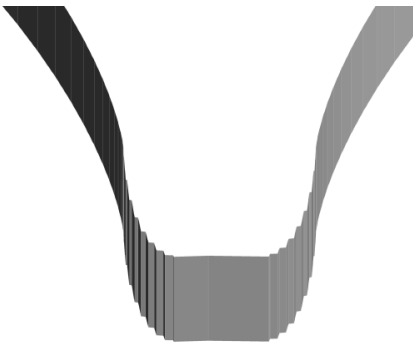
A szakirodalomban található legtöbb virtuális modellezési eljárás ezen a módszeren alapszik. A módszer vitathatatlannul legnagyobb előnye, hogy mivel matematikai eszközökön alapul, a fogaskerék-kapcsolás elméletét alkalmazza, az így épített fogaskerékmodellek, ha a megfelelő CAD-rendszert általában NURBS- vagy MESH-felületekre épült technikákkal egészítik ki, kiváló eredményhez vezethetnek.

Sajnos ennek a módszernek elég nagy hátrányai is vannak. Elsősorban, mivel a kapcsolási egyenletekből indulnak ki, a fogtő és a fogfej felületei egyszerűen mellőzve vannak, ezeket egyébként majd technológiai eljárások is befolyásolhatják. Az eljárás hátránya azonnal megfigyelhető a **3. ábrán**, ahol egyenletek hiányában a fogfej- és fogláb felületek találmokra vannak megépítve. Ezzel csak annyi a gond, ahogy az ábrán látszik, hogy a hordkép a fogfej- és foglábkapcsolásoknál hamis. Ennek javítása érdekében meg kellene állapítani a hiányzó felületek egyenleteit, amelyek további bonyolult matematikai eljárásokhoz vezetnének. Ezzel nem is lenne gond, ha érdemes lenne vele foglalkozni. Tudjuk azonban, hogy a nevezett felületeket szerszám- és technológiai megfontolásokból sokszor módosítják. Ezeknek a módosításoknak is

szeretnénk tudni a pontos hatását, lehetőleg ugyancsak virtuális környezetben. Ez többszöri matematikai számításokat és ismételt CAD-modellezési eljárásokat igényel minden módosítás esetében. A „találomra” becsült foglábfelületek végeelem-modellezésnél a valóságtól igen eltérő fogtőhajlító feszültségeket eredményezhetnek.

A második eljárás igen érdekes módon nem igényli a fogfelületek matematikai egyenleteit [1, 2, 3, 4, 5]. Ellenben ismernünk kell a valós gyártáshoz szükséges szerszám- és előgyártmány-mozgásokat. A merev testekkel modellezett szerszámok és előgyártmányok a valós generált mozgásnak megfelelő viszonyított mozgásokat végeznek, meghatározott diszkrét lépésekkel. Minél kisebbek ezek a lépések, annál pontosabb lesz a generált testmodell, ebbe beleértve mind a fogláb, mind a fogfej felületeit. Ezek után bármilyen szerszámmódosítás, bármely technológiai eljárás (például profíleltolások, hordósítás stb.) a generáló mozgások módosítása révén a végső testmodelleken is meg fog jelenni. Ez az eljárás vitathatatlan előnye!

A merev testek folytonos kivonásának az előnyei mellett sajnos igen súlyos hátrányai is vannak. Az egyik legjelentősebb az, hogy a diszkrét mozgáslépések miatt esetenként igen durva felületű testmodelleket eredményezhet (4. ábra).



4. ábra. A testkivonással nyert merev test felületei igen töredezettek is lehetnek

Az ábrán a foglábfelületeken látható lépcsős szerkezetek a relatív mozgások diszkrét értékétől függő térfogatfölsőségek. Ha csak esztétikai vonatkozásai lennének, nem jelentenének gondot, de gyökeresen befolyásolhatják mind a kontakt-, mind a végeelem-, mind a hordképvizsgálat eredményeit. Az eljárás másik igen nagy hátránya, hogy rendkívüli idő- és számítógépteljesítmény igényes. Ha több szerszámmal dolgozunk, vagy a szerszámok testmodelljei bonyolultabbak, igen jelentős (akár napok is) modellezési időre van szükség. Ha javítani szeretnénk a felületek pontosságán, egyúttal a testmodell pontosságán is, a mozgások lépéseit kellene kisebbekre venni. Azonban ennek igen nagy ára van! A modellezési idő exponenciálisan nő a lépések csökkentésével. Egy $z = 24$ foggal rendelkező egyenes hengeres fogaskerék fogasléccel való generálási idejét vizsgáltuk meg [13].

A vizsgálat a 2° ; 1° ; $0,5^\circ$ és $0,2^\circ$ lépésű előgyártmány elfordulási lépéssel megvalósított generálási időt mérte és hasonlította össze. A 2° -os lépésnél mért idő 21 sec volt, míg a $0,2^\circ$ -es lépésnél 2430 sec. A relatív mozgások lépéseinek 10%-ra való csökkentése a modellezési időt több mint 100 szorosára növelte!

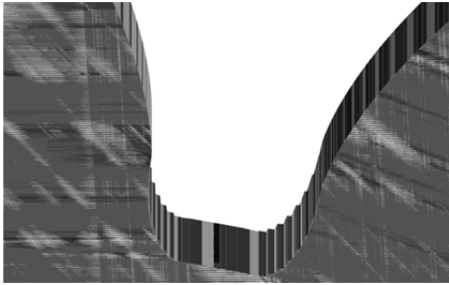
A merev testek kivonását használó módszerről megállapíthatjuk:

- bármilyen technológiai eljárás, profil- és szerszámmódosítás modellezhető, kiterjedt matematikai számítások használata nélkül;
- a tervezés vagy fejlesztés során nehézség nélkül ismételt módosítások építhetők be a modellekbe;
- a fogazatok láb- és fejfelületei igen kis hibahatárok között modellezhetők;
- a testmodellek felületi pontosságát nagymértékben befolyásolja a relatív mozgások lépéseinek nagysága;
- a mozgások lépésének csökkentésével exponenciálisan nő a számítógépes ge-

- nerálási idő, esetenként napokat jelentő számítógépes futási időre is;
- a lépések csökkentésével a modellek igen nagy adatmennyiséget jelentenek, ezek további használata igen nehézkésé válik.

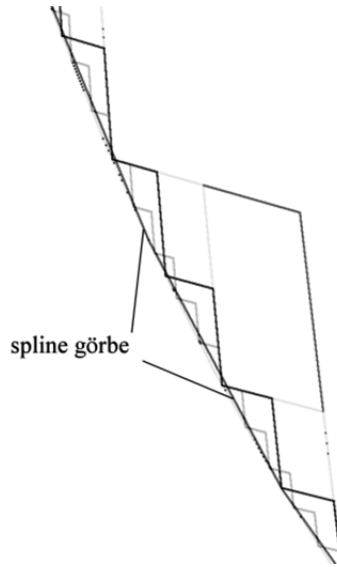
3. Megfigyelések és új fogaskerék-modellezési eljárás kidolgozása

A [13]-ban ismertetett adatok alapján észrevettük, hogy a „kivonásos módszer” generálási pontossága hogyan változik, ha a 2° , 1° , $0,5^\circ$ és $0,2^\circ$ lépésekkel generált testmodelleket egymásba helyeztük, és vizsgáltuk a fogfelületek eltéréseit (5. ábra).

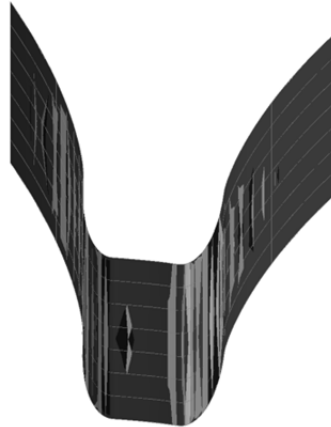


5. ábra. Az egymásra helyezett testmodellek, amelyeken jól láthatók a diszkrét lépésekből adódó lépcsők

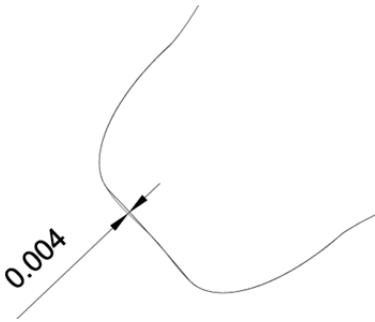
Ezután azonosítottuk a valós felületeken fekvő pontokat (5. ábra). Ezek a lépcsős szerkezetek alapján találhatóak amint a 6. ábrán jól megfigyelhető. Ezeken a pontokon keresztül Bézier-spline görbéket húztunk (6. ábra). Majd a spline görbéket NURBS-felületek építésére használtuk fel (7. ábra). A 4 lépéspontosságnak megfelelő NURBS-felületek eltéréseit vizsgáltuk, és megállapítottuk, hogy legnagyobbak a fogárok alján. De ennek értéke csak $4\ \mu\text{m}$! (8. ábra).



6. ábra. Különböző lépéspontossággal generált és egymásba helyezett hengeres fogaskerék-testmodellek profiljai



7. ábra. A 4 egymásra helyezett NURBS-felület árnyékolt modellje

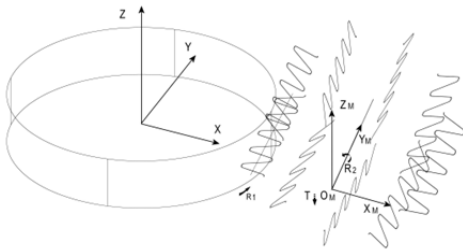


8. ábra. Az egymásra helyezett NURBS-fogfelületek maximális eltérése nem haladja meg a $4 \mu\text{m}$ -t

Ez a kis eltérés adta az ötletet, hogy próbáljunk a két bemutatott eljárástól eltérő modellezési módszert felépíteni, esetleg egy olyant, amelyik mindkettő előnyeit ki tudja használni.

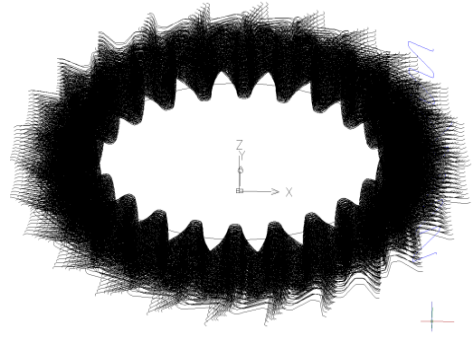
A megfigyelések alapján új modellezési módszert javasoltunk [14]. Megtartottuk a relatív mozgásokkal való generálást, de nem testmodelleket, hanem pontokat generáltunk. Ezekből a pontokból pedig kiszűrjük ki azokat, amelyek nem a fogfelületeken vannak, ezekre építjük fel a NURBS-felületeket, amelyekkel majd testmodelleket építhetünk.

Program készült a cél elérésére, amelyet a [14]-ben mutattunk be. Az eljárás alapelve, hogy a szerszámok profiljait használjuk csak a generálásra, megtartva a relatív elmozdulásokat a szerszám és a munkadarab között, mint a 9. ábrán. ([14] fig.2).



9. ábra. A javasolt modellezési eljárás is a generáló mozgásokon alapszik [14. fig.2.]

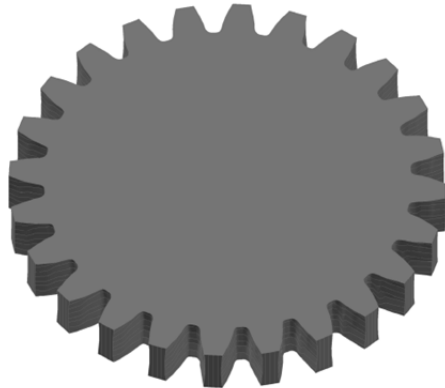
Az első generálás sok fölösleges, a többszöri vágás során a végső felületen nem található pontot eredményezett (10. ábra). Ezeket a pontokat természetesen el kell távolítani, a végső fogfelületeken nincsenek rajta.



10. ábra. Az új módszerrel való generálás után a szerszámélek kiemelt pontjai

Az új módszer eredményei még kiértékelés alatt vannak, illetve a fölösleges pontokat kiszűrő algoritmuson még dolgozunk.

Az első eredmények a merev test kivonásos módszeréhez hasonló testmodell szelvéletnek, pár perces futási idő alatt (11. ábra).



11. ábra. Az új modellezési eljárással nyert első fogaskerék-testmodell

3. Következtetések

A virtuális környezetben végzett fogaskerék-hajtás-vizsgálat igen sok módszert használ. Ezek mind megfelelő pontosságú fogaskerékmodelleket igényelnek. Alapos tapasztalat és megfigyelések alapján két alapvető módszer ismerhető fel, amellyel felület- és testmodellek építhetők. Ezen módszerek közül a matematikai egyenleteken alapuló módszer a legpontosabb, de csak a kapcsolódó fogfelületek építésére alkalmas, ismételt módosítások esetén. A második módszer a valós generáló mozgásokon alapszik, hiteles modelleket eredményez, de a felületek pontosságának növelésével drasztikusan nő a modellezési idő.

A két módszer ötvözéséből új módszert javasoltunk, amely a két módszer előnyeit használja, és töredékére csökkenti a modellezési időt.

Az új módszert „vegyes modellezési” eljárásnak neveztük el. Fejlesztése és a módszerrel generált fogaskerékmodellek pontosságának kiértékelése folyamatban van. Az eljárás egyelőre csak AutoCAD környezetben működik, de megfelelő eredmények esetén bármilyen CAD-környezetbe átvihető. Előnye, hogy még a szerszámok testmodelljére sincs szükségünk, elégséges ezeknek csak a profilját, illetve a vágóéleit ismerni. Ismételt módosításokra kiválóan alkalmas, a modellek generálási ideje töredéke a többi eljárás idejének.

Azonnali lépésként a generált modellek pontosságát kell megvizsgálni számadatokkal. Bármilyen elért pontosság a műszaki tervezésben és gyártásban használt pontosságokon belül kell legyen.

Az új módszer még egy igen érdekes fejlesztési lehetőséget villant fel. Segítségével ismert felületek (például golyósanyák gördülőpályái) megmunkálására alkalmas szerszámprofilokat is meghatározhatunk.

Ezeket majd akár NC-megmunkálással kialakított szerszámprofilok készítésére is használhatjuk.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Mohan, L. V. and Shunmugam, M. S.: *CAD approach for simulation of generation machining and identification of contact lines*. Int. J. Mach. Tools Mf. 2004. 44(7–8). 717–723.
- [2] Bőjte Gy., Tolvaly-Roșca F.: *Hengeres fogaskerék fogasléc segítségével való generálásának a szemléltetése*. Tudományos Diákköri Konferencia, EMTE Sapientia, Marosvásárhely, 2004.
- [3] Chang, K. L.: *AutoLISP cutting simulation and error analysis*. Mach. Month. 2006. 373(2). 30–38.
- [4] Popa-Müller, I., Tolvaly-Roșca, F.: *A körív alakú kúpkerek generálásának szimulálása a Gleason-fogazógépen a generáló sikkerek segítségével*. The 17th International Conference on Mechanical Engineering, Gheorgheni, 2009. 331–335.
- [5] Bouzakis K.-D., Lili E., Michailidis N., Friderikos O.: *Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes: A critical synthesis of analysis methods*. CIRP Annals – Manufacturing Technology 2008. 57. 676–696.
- [6] Tolvaly-Roșca, F.: *Studiul preciziei angrenajelor conice prin metoda modelării parametrice solide. (Bevel gears precision study with solid parametrical modeling method, Phd Thesis)*. Universitatea Transilvania Brașov, 2006.
- [7] Tolvaly-Roșca, F., Hollanda, D., Száva, J., Kakucs, A., Forgó, Z.: *Contact Algorithm in VBA, for Kinematic Studies on Rigid, Solid Gear Models*. microCAD International Scientific Conference, march 2006. Miskolc, Hungary. 31–36.
- [8] Tolvaly-Roșca, F., Hollanda, D., Forgó, Z., Száva, J.: *Kinematic studies of straight bevel gears with octoid II, octoid I and exact involute profiles, using solid models*. Proceedings of the 7th International Conference Modern Technologies in Manufacturing, Cluj Napoca, 2005. 399–402.
- [9] Tolvaly-Roșca F.: *The Cad-Analysis Of The Contact By The Cylindrical Gears Having*

- Archimedic Spiral Shaped Teeth*. Inter-Eng 2012, Interdisciplinarity in Engineering, Tg. Mureş, Romania 2012. 130–135.
- [10] Máté M., Hollanda D., Tolvaly-Roşca F., Popa-Müller I.: *The Localization of the Contact Pattern by Spur Gears with Archimedean Tooth Line by Setting of Tangential Displacement*. The 21st International Conference on Mechanical Engineering 2013. Arad, Romania. 265–268.
- [11] Jehng W.K.: *Computer solid modeling technologies applied to develop and form mathematical parametric tooth profiles of bevel gear and skew gear sets*. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 122. 2002. 160–172.
- [12] Tolvaly-Roşca, F., Forgó, Z.: *Solid Modeling of Bevel Gears with Spherical Involute, Octoid I and Octoid II type profiles*. Proceedings of 11th, International Conference in Mechanical Engineering OGET 2005, Satu Mare, 2005. 332–335.
- [13] Tolvaly-Rosca F., Forgó Z.: *Gyorsított fogfelület-modellezési eljárás pontosságvizsgálata*. The 22nd International Conference on Mechanical Engineering, 2014. Sibiu, Romania. 415–418.
- [14] Tolvaly-Roşca F., Forgó Z.: *Mixed CAD Method to Develop Gear Surfaces Using the Relative Cutting Movements and NURBS Surfaces*. The 8th International Conference INTER-ENG 2014. Tg. Mureş, Romania. Megjelenés alatt. Under publishing.