

# Kettős burkolás megközelítése és szimulálása CAD módszerrel

## CAD approach and simulation of a double meshing problem

*dr.TOLVALY-ROȘCA Ferenc<sup>1</sup> egyetemi docens,  
dr.MÁTÉ Márton<sup>2</sup> egyetemi docens, Hodgyai Nobert<sup>3</sup> tanszéki mérnök*

Sapientia EMTE, Műszaki és Humán tudományok Kar, Marosvásárhely, Gépészmérnöki Tanszék  
Str. Sighisoarei 1C., Târgu-Mureș/Corunca, Tel.: 0265-208170, fax: 0265-206211  
tferi@ms.sapientia.ro, mmate@ms.sapientia.ro, hodgyai@ms.sapientia.ro

### Abstract

*Generating cylindrical gears with Archimedean spiral shaped tooth line, with tangential displacement is a task under intensive development. From the mathematically formulated and solved problem to its implementation in practice, the process could be very long. It is well known that until the practical solutions, tasks and designs are implemented, many technical real details will influence the birth of a final product. Experimenting in practice these details could be very costly, if we do not use the ever-expanding toolbox of CAD at our disposal. The authors use CAD procedures, developed by themselves, to study the practical generation and simulation of a specific task, the double meshing.*

**Keywords:** Archimedean spiral shaped tooth line, CAD, simulation, double meshing

### Kivonat

*Az Archimédész-féle spirális vezérgörbájű fogazat tangenciális eltolással való generálása egy intenzív fejlesztés alatt lévő feladat. A matematikailag megfogalmazott és megoldott problémától, annak a gyakorlatba való ültetéséig, igen hosszú a folyamat. Jól ismert, hogy gépészeti gyakorlati megoldások, feladatok és tervek kivitelezéséig, nagyon sok műszaki valós részlet befolyásolja egy végső termék megszületését. Ezen részletek gyakorlati tapasztalata igen költséges lehetne, ha nem állna a rendelkezésünkre a számítógépes tervezés folyamatosan bővülő eszköztára. A szerzők az általuk kifejlesztett CAD eljárásokat alkalmazták egy sajátos feladat, a kettős burkolást jelentő, fogaskerék gyakorlati generálásának és szimulálásának a tanulmányozására.*

**Kulcsszavak:** Archimédész-féle spirális vezérgörbe, CAD közelítés, szimulálás, dupla burkolás

## 1. BEVEZETÉS

Az Arkhimédész-féle spirális fogirányvonalú hajtópár, ötvözi a hengeres evolvens kerek és az ívelt fogú kúpkerek előnyeit: tengelytáv-változásra nem érzékenyek, és a hordkép lokalizálása [1] megfelelő szerszámbeállítással könnyen megoldható. Sajátos geometriájából adódóan a kapcsolódás homorú-domború felületpárral történik. Ez a teherbírást lényegesen növeli. A megoldás előnyösebb, mint a Novikov-Wikdhaber fogazás [3], mert utóbbinál a profilok görbülete különböző, míg a vizsgált fogazat esetében a fogívek görbülete ellentétes előjelű.

A hajtópárt egyetlen származtatófelülettel származtatjuk, Olivier első módszere szerint. A származtató felületet egy marófejbe illesztett, három csoportba sorolt, csoportonként 5 késből álló,  $\alpha_0 = 20^\circ$ -os profilszögű él képviseli.

A szerszám forgó mozgása és tangenciális eltoló mozgás úgy van összehangolva a fogazott kerék forgásával, hogy a spirálhatást az eltolási sebességgel összegezzük [4, 5]. Következésképpen a lefejtést egy görbe fogirányvonalú fogasléc végzi, amelynek a görbülete folyamatosan változik. Emiatt a klasszikus burkolási elméletet a kettős burkolás módszerével kell helyettesíteni. ez utóbbinak a lényege abban áll, hogy a fogazott kerék fogfelülete nem a szerszámélek által közvetlenül létrehozott felületsereg burkolófelülete lesz. A szerszámélek, a marófej eltolás-paraméterrel meghatározott eltolási helyzetében, az  $\mathbf{r} = \mathbf{r}(u, \lambda, \varphi; s)$

egyparaméteres felületsereget írják le, melynek burkolója az  $\mathbf{r} = \mathbf{r}(u, \lambda, \varphi(u, \lambda); s)$  lesz. Ez,  $s$ -re, egy további felületsereget alkot, melynek burkolója lesz a fogfelület, azaz  $= \mathbf{r}(u, \lambda, \varphi(u, \lambda); s(u, \lambda))$ .

A kettős burkolás modellje a valósághoz sokkal közelebb áll, mintha a felvetett sajátos esetre a kétparaméteres burkolás elvét alkalmaznánk. A kettős burkolás analitikus megoldása igen bonyolult számításokat kíván. Emiatt numerikus szimuláció módszerével próbálkozunk.

A CAD módszerek alkalmazása a fogaskerek tanulóanyagában és fejlesztésében nagy népszerűségnek örvend. Ez köszönhető elsősorban az eljárások, modellezések vagy szimulációk igen alacsony gazdasági igénye miatt. Kis hozzáértéssel a programozás terén, egy jobb személyi számítógéppel és egy adag ötletességgel számos fogaskerék generálási, ellenőrzési, gyártásszimulációs vagy akár hajtáspontosságvizsgálat is megoldható – rövid idő alatt [2, 3, 4, 6, 7]. A szerzők számos ilyen alkalmazást fejlesztettek és próbáltak ki az elmúlt 20 év alatt [6, 7].

A [6]-ban alkalmazott eljárást a szakirodalomban való első ismertetés előtt már használtuk, egyenesfogú hengeres fogaskerek generálására, 2005-től a Forgácsolás és Felületgenerálás tantárgyak laboratóriumi gyakorlatának részeként. Az eljárás egyszerű lineáris és forgó mozgások kombinációjaként, a szerszám és az előgyártmány között, a valóságban is létrejövő, relatív mozgásokat szimulálja. Ezen mozgások, diszkrét szög- és lineáris lépésekkel végzett, forgó- és egyenes vonalmenti elmozdulások kombinációjaként történnek. Minden egyes mozgássor lépési után egy merevtest kivonást végzünk, szimulálva a gyártási folyamatot és végeredményként a kész terméket jól megközelítő merevtest modell kapunk.

Az eljárás generálási ideje a szükséges pontosság növelésével exponenciálisan nő [7]. Az általunk “merevtest kivonásos” módszernek nevezett eljárás igen időigényes. Csökkentett fogszám és az előgyártmány töredék szakaszára korlátolt generálása is, akár több órát vesz igénybe, hasznos modellezési pontosság mellett.

Ezen módszer javítására fejlesztettük ki a “vegyes modellezési” eljárást, amelyet első alkalommal a [7]-ben ismertettünk. Megtartottuk a relatív generáló mozgássorokat, korlátolt számú pontokat határoztunk meg a vágóéleken, ezeknek a relatív, lépésenként való mozgásával egy térfogat-pontfelhőt generáltunk. Az így kapott pontfelhő burkolófelületét meghatározva, gyakorlatilag, a modellezett fogaskerék felületén lévő pontok hálózatát határozhatjuk meg. A javasolt módszer azonban akadályba ütközött, semmi addig ismert matematikai vagy informatikai alkalmazás vagy algoritmus nem volt alkalmas kiszűrni a felesleges (a burkolófelületen belül található) pontok halmazát. Végül is egy saját algoritmust készítettünk, amely alkalmas volt (kielégítő módon) a feladatot megoldani. Az így kapott ponthalmazra spline görbéket generáltunk, ezekre pedig NURBS felületeket építettünk. Az új generálási eljárás 1-2 perc alatt képes generálni a fogaskerék fogai között lévő pontok halmazát, majd újabb 1-2 perc alatt lefut a szűrőalgoritmus. Az eljárás befejezésére néhány egyszerű AutoLISP program generálja a görbéket és a burkolófelületet. Ezt egy merevtest vágásra használva megkapjuk a modellezett fogaskereket. A lefutáshoz szükséges idő töredéke az első módszerhez szükséges lefutási időhöz képest. Az eljárás fejlesztés alatt van, igyekszünk a szűrőalgoritmust tökéletesíteni, a pontosság növelése érdekében. Egy másik hátránya a módszernek, hogy korlátolt a rugalmasága: minden módosítást, ami a generáló szerszámok geometriáját vagy pozicionálását jelenti, kézzel kell újra szerkeszteni minden egyes alkalommal. Ennek javítására is komoly lépéseket tettünk, de az új eljárás még munkát igényel a rugalmasság javítása érdekében.

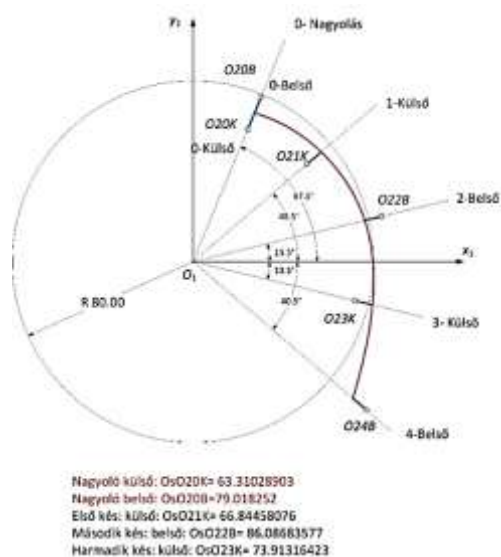
## 2. A DUPLA BURKOLÁS SZIMULÁLÁSA

Az Arkhimédész-féle spirális fogirányvonalú hajtópár tangenciális előtolással való generálása egy matematikailag is igen bonyolult, dupla burkolást jelentő matematikai számítás. Várhatóan a gyakorlati kivitelezése is sajátos nehézségeket fog majd jelenteni. Ezek gyártásban való felmérése és javítása igen költséges lehet. Ilyenkor természetesen a számítógépes környezetben való generálás és szimulálás az első, és egyben a legegyszerűbb megoldás.

Ennek érdekében felmértük, hogy a vegyes modellezési módszer, jelenlegi fejlesztési állapotában, nem elég rugalmas. Egy-két modellezési beállítás esetén kielégő pontosságú modellt kapunk, de figyelembe véve, hogy körülbelül 15 szerszám esetén, az ismételt változtatások és próbálkozások igényében az eljárás pillanatnyi állapotában még nem a legjobb választás. Ezen megfontolásból a merevtest kivonásos módszert alkalmaztuk.

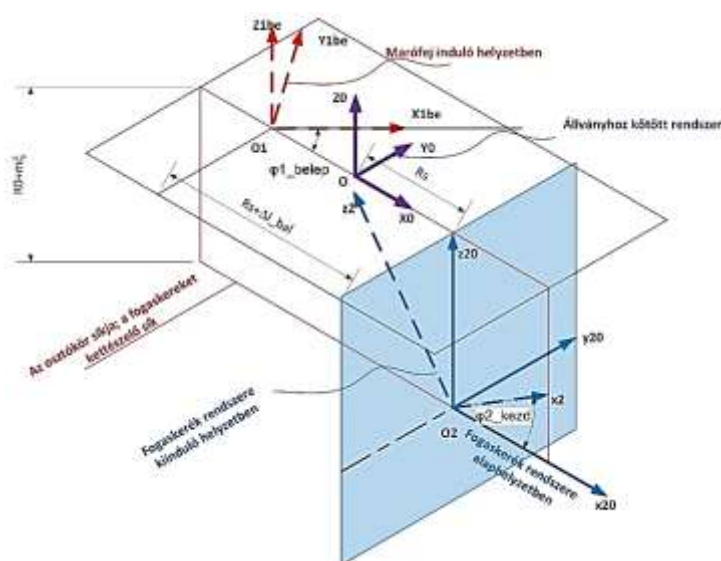
Az egyes forgácsoló szerszámok vágóél profiljait pontosan modelleztük, az élszögeket csak megközelítettük, ugyanis a modellezés végeredményét ezek nem- vagy csak nagyon kismértékben befolyásolják. Három típusú szerszámot használtunk: nagyoló-, belső- és külső simítókéseket. A 15-15 darab kés ötösével, 120°-os osztásban kapnak helyet a szerszámtartóban. A szerszámokat különbözőképpen a két fogaskerék estén, jól meghatározott sorrendben, pozícióban és csoportokban kell elhelyezni a szerszámtartóban (1. ábra). Minden javasolt megoldás esetén ez a sorrend változhat, az egyes szerszámtípusok

száma és elhelyezése is módosítható kell legyen. Ez könnyedén megoldható, ha parametrikus modellként építjük meg a szerszámtartót és a szerszámcsoportokat, így a módosítások igen egyszerűek lesznek.



1. ábra. Egy első marófej kialakítás (2-es kerék)

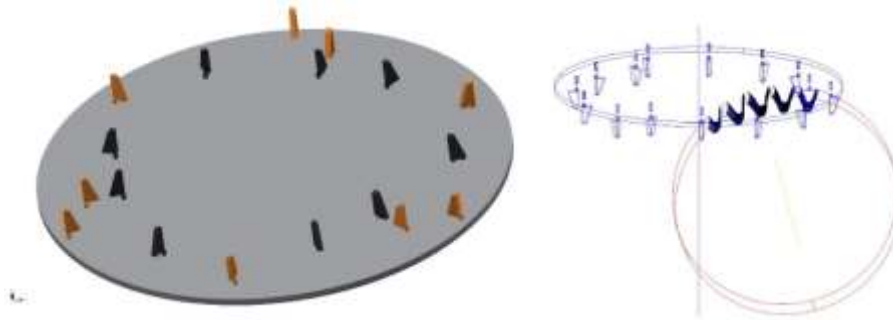
A generálási lépéseket a 2. ábra alapján határoztuk meg: az előgyártmányunk egy forgó-, a szerszámcsoportunk pedig egy forgó- és egy lineáris mozgást kell végeznie. Az egyes mozgások közötti kinematikai kapcsolat pedig matematikailag meghatározható.



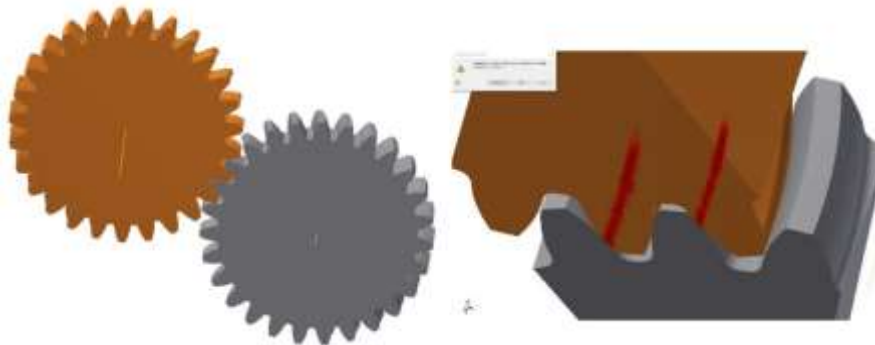
2. ábra. A generálómozgások vázlatja

A marófejet parametrikusan Autodesk Inventorban építettük meg. Az egyes szerszámok cserélhető egymás között, helyzetük változtatható másodpercek alatt (3. ábra bal oldali képe). Innen importáljuk az AutoCAD szimulációs környezetbe (3. ábra jobb oldali képe), ahol egy AutoLISP program futtatása végzi el a generálást. A program lefutása korlátozható az előgyártmány tetszőleges méretű elfordulására (esetünkben  $30^\circ$  és  $40^\circ$ ). A bemeneti mozgásparaméter a marófej forgása, ennek pontossága állítható: esetünkben  $1^\circ$ - $3^\circ$  gyors vizualizálásokra, és  $0.5^\circ$  nagyobb pontosság elérése érdekében.

A teljes fogaskeréket egyetlen teljesen generált fog és fogárok körsokszorozásával kapjuk meg (4. ábra bal oldali képe), de kontaktvizsgálatokra akár 2-3 fog érintkezési vizsgálata is elégséges (4. ábra jobb oldali képe). Természetesen a generálások során a gyakorlatba nem ültethető, vagy akár olyan elméleti javaslatok is voltak, amelyek a szimulálás során kiderült, hogy tehetőek át gyakorlatba. Átgondolva a vizuális szimulálás sikertelen eredményeit, ezen javaslatokat így nagyon rövid idő elvethettük, újabbakat javasolhattunk és próbálhattunk ki nagyon rugalmas CAD megoldások párosításnak alkalmazásával.



3. ábra. Marófej (balra); A generált fogaszt részlet (jobbra)



4. ábra. A generált fogaskerékpár (balra); Hordképvizsgálat (jobbra)

### 3. KÖVETKEZTETÉSEK

Több generálást végeztünk a szerszámok konfigurációt módosítva az elméleti számítások és elgondolások alapján. Ezek egy része járható megoldásnak mutatkozott, illetve egyes megoldásokat kénytelenek voltunk elvetni: a szimulálás egyértelműen mutatta, hogy vagy hiba csúszott az elgondolásba vagy a virtuális gyakorlatba átültetve nem ad elfogadható megoldást. A fogaskerék hajtás testmodellje alkalmas hordkép becslésre. A kapott minták igazolják a fogazat típus kidolgozásakor megfogalmazott feltételezéseket és célokat. Ezek ellenőrzése és visszaigazolása megeremti a fogazat típus további fejlesztésének a folytatásához szükséges módosítások megtételét, majd annak a gyakorlatba való ültetését. Mivel az eredmények részletezése nem a jelen dolgozat témája, ezeket egy későbbi publikációban ismertetjük.

### IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Balajti Zs., *Examination and adjustment of the bearing pattern in case of helicoid drives*, 8th CIRP Conference on High Performance Cutting, Budapest, Hungary, June 25-27. 2018, Procedia CIRP, Volume 772018, 267-270.
- [2] Balajti Zs., Ábel J., *Edge geometry test method with correctly positioned CCD cameras for production geometrical development of a worm gear hob with arched profile*, Procedia Manufacturing Volume 51, 2020, 365-372.
- [3] F.L. Litvin, F. Pin-Hao, S.A. Lagutin, *Computerized Generation and Simulation of Meshing and Contact of New Type of Novikov-Wildhaber Helical Gears*, The University of Illinois at Chicago, Chicago, Illinois, National Aeronautics and Space Administration, [http://gearexpert.free.fr/fichiers\\_pdf/engrenage\\_Novikov\\_Wildhaber\\_NASA\\_report.pdf](http://gearexpert.free.fr/fichiers_pdf/engrenage_Novikov_Wildhaber_NASA_report.pdf).
- [4] Máté M., Hollanda D., *The Cutting of Cylindrical Gears Having Archimedean Spiral Shaped Tooth Line*, 13-th International Conference on Tools, 27-28 March 2012, Miskolc, 265-268.
- [5] Máté M., *The Micro-Geometric Model of the Toothflanks of a Cylindrical Gear with Archimedean Spiral Shaped Toothline*, 6th International Scientific and Expert Conference TEAM 2014, Kecskemét, 2014, 1-8.
- [6] Popa-Müller, I., Tolvaly-Rosca, F., *A körív alakú kúpkerék generálásának szimulálása a Gleason fogazógépen, a generáló síkkerék segítségével*, XVII Nemzetközi Gépész találkozó, Gyergyó, 2009, 331-335.
- [7] Tolvaly-Rosca F., Forgó Z., *Mixed CAD Method to Develop Gear Surfaces Using the Relative Cutting Movements and NURBS Surfaces*, Science Direct, Procedia Technology Volume 19, 2015, 20-27.