



**Sapientia– Erdélyi Magyar
Tudományegyetem
Műszaki és Humántudományok Kar
Marosvásárhely**



Gépeszmérnöki Tanszék

Kúpfogaskerék lefejtése lécz-típusú szerszámmal

Sipos Bence

Gépeszmérnöki szak II. év

Sipos Bence, Sapientia EMTE, Marosvásárhely Műszaki és Humán Tudományok Kar, Gépeszmérnöki szak
II. év, siposbence93@gmail.com Témavezető: dr. Máté Márton egyetemi docens, Sapientia EMTE,
Marosvásárhely Műszaki és Humán Tudományok Kar, Gépeszmérnöki Tanszék, mmate@ms.sapientia.ro

1. Bevezető

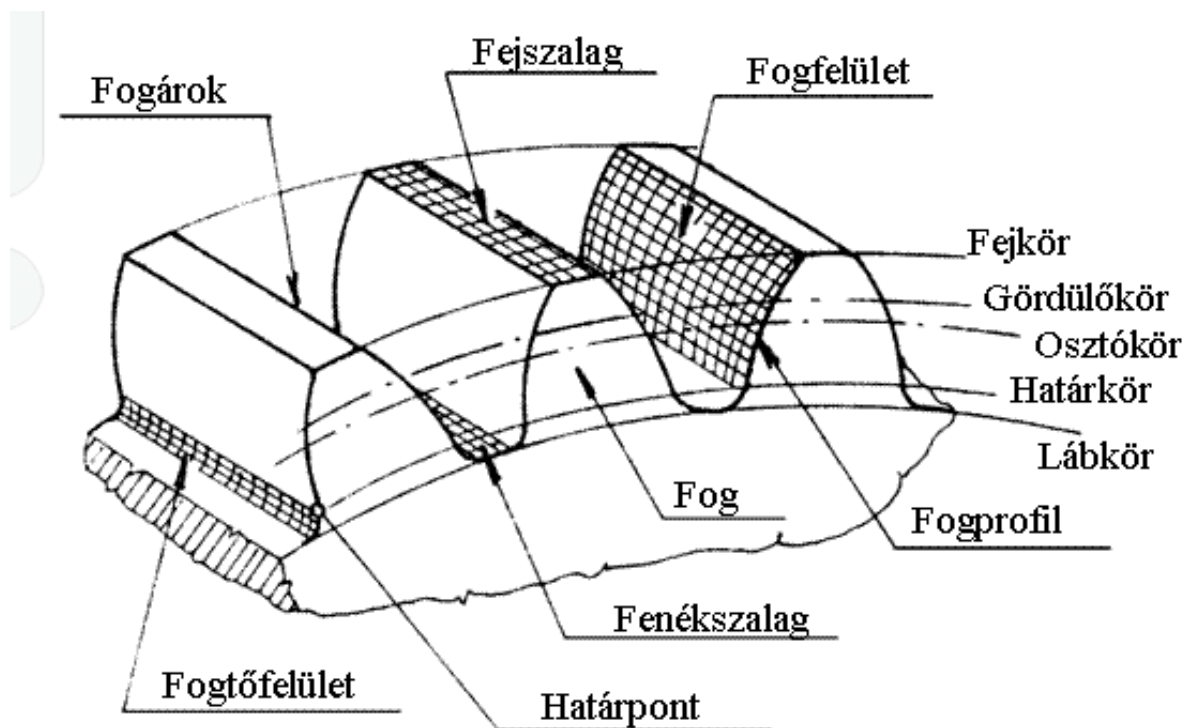
A fogaskerék feladata, hogy egy másik megfelelően elkészített alkatrésznek (általában egy másik fogaskeréknek) forgónyomatékot tudjon átadni. Az átadás során megváltoznak a mozgás jellemzői, mint például az iránya, nyomatéka, szögsebessége, esetleg jellege (forgómozgásról haladómozgásra vált). A fogaskerek fajtái nagyon változatosak. Lehetnek hengeres, kúp-, csiga- vagy hipoidkerekek, ezeken belül változhat a fogazat elhelyezkedése. A hengeres fogazatok esetében a valóságban is létezik belső és külső fogazat. Gyakorlatilag megvalósított a belső csigahajtás, a belső hipoidhajtás (spiroidhajtás), ámbar ezek inkább kutatómunkák eredményei, és ipari alkalmazásuk egyelőre csekély. A fog irányvonala szerint megkülönböztetjük az egyenes, a csavarvonalú, az ívelt (görbe) és a szembeforduló csavarvonalú vagy egyszerűbben nyílfogazatot.

A kutatásom során a hengeres-kúpos hajtás kapcsolásával foglalkozom. Különböző lehetőségeit vizsgálom, a hengeres és kúp fogaskerek kapcsolásának. A dolgozatomban ennek egy része kerül bemutatásra. Szimuláció segítségével próbálom szemléltetni egy szabvány szerint meghatározott léctípusú szerszám (fogasléc) által egy csonka kúpba (tányérkerékbe) vágott fogprofil. A kutatás jelenlegi részében, egy egyenes fogazású fogaslécet használok a kúp fogaskerék lefejtésére. Az így létrejött kúp fogaskerék kapcsolható lesz az ugyanezzel a szerszámmal lefejtett hengeres fogaskerékkel. A modellezés Autocad környezetben történik, a programot AutoLISP programozási nyelv használatával írtam meg. A program bemenő adatként bekéri a modult, a fogszámot, és a szélességet. Ezen adatok alapján generál egy fogaslécet és egy csonkakúpot, majd elvégzi a lefejtést. Így sikerül szemléltetnem 3D-ben a kúp fogaskeréken létrejött fogprofil.

2. Alapfogalmak

A klasszikus evolvens hengeres fogazat főbb geometriai elemeit az 1. ábrán szemléltettük. Az egyes geometriai elemek elkülönítik a fogazat működő részét a fogazat határoló részeitől. Jelen esetben a fogfelület – a fog azon része, ahol a hajtó és hajtott kerék érintkezik – az aktív rész: ezt a határkör és a fejkör határolja. A fogaskerék helyes kapcsolása

szempontjából igen fontos a fogfej határfelülete illetve a fogláb felület. A fogaskerék működés közbeni elkerülhetetlen deformációja következtében a valós kapcsolódó felületek torzulnak, emiatt különleges megmunkálási technológiák beiktatása szükséges. A deformáció mértéke azonban oly kevés, hogy a számításokat az elméleti fogalakkal végezzük.



1. ábra[1] - Evolvens hengeres fogazat főbb geometriai elemei

Két fogaskerék közti kapcsolást, úgy kell megvalósítani, hogy ha a hajtó kerék állandó szögsebességgel forog akkor a hajtott kerék szögsebessége is állandó legyen. Ez a feltétel alapján a szögsebességek aránya is állandó lesz:

$$i_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \text{áll.} \quad (1)$$

Ha $i < 1$ akkor gyorsító, ha $i > 1$ akkor lassító áttételről van szó.

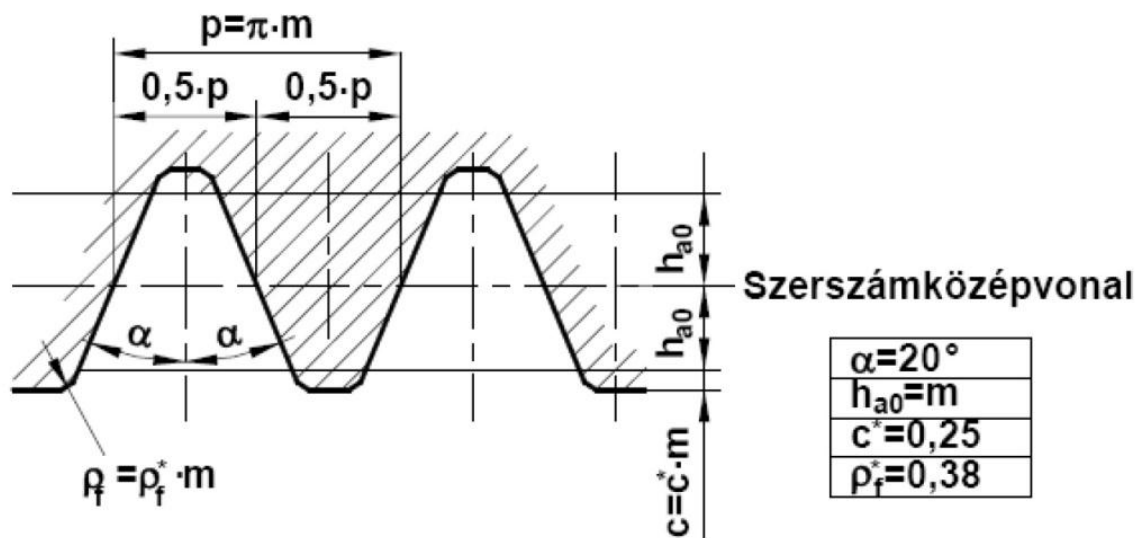
3. A fogazatlefejtés jellegzetességei

3.1. A lefejtő elem

A klasszikus evolvens hengeres hajtások lefejtő eleme a fogasléc. A fogasléc egy fogazott rúd, amely a fogaskerék egy speciális formájaként is felfogható, mint annak a fogaskeréknek egy véges hosszúságú szakasza, amelynek gördülőkörének sugara és fogainak száma végtelen.

Az evolvens fogprofilú fogaskereket szabványos fogasléccel generáljuk. Ha a szerszám osztóvonalát csúszásmentesen legördítjük a gyártandó kerék osztóköreán, akkor a fogasléc profilja által létrehozott görbesereg burkolójaként tekinthető az evolvens fogprofil.

A 2-es ábrán megtekinthetjük a Maag-féle léccel alakú szerszám alapprofilját:

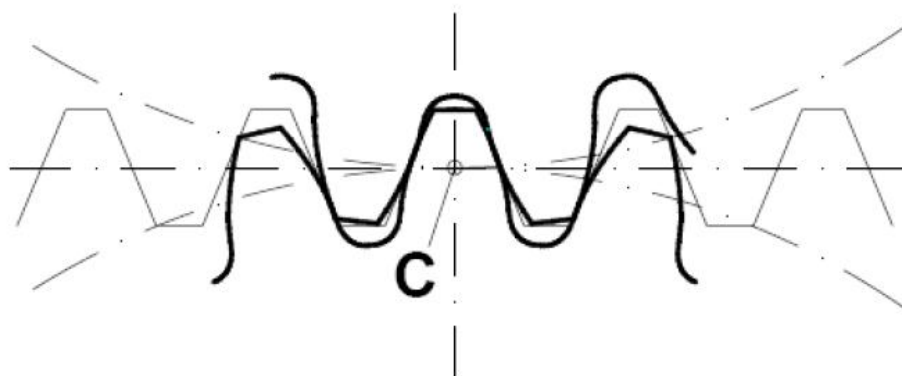


2. ábra - Maag-féle léccel alakú szerszám alapprofilja

Az egyenes profilú fogasléc lényeges eleme az α profilszög, amely a trapéz nem párhuzamos oldala és a szimmetriatengelye által bezárt szög. Evolvens fogazat lefejtése esetében a kapcsolóvonal mindig merőleges a közös érintőkre, a fogaskerék és a léccel kapcsolódási szöge állandó. Kizárólag az azonos profilú lécszerszám által generált

fogaskerek képesek egymással helyesen kapcsolódni. Amint ez a tény a [3]-as műben is fel van vezetve, a két léc úgy kapcsol, mint profil és ellenprofil. A Maag típusú egyenes profilú léc hatalmas előnye a két léctest egyenes profilból következő azonosságában rejlik: Bármely más, az evolvenstől eltérő típusú fogazat esetében a kapcsolódó fogazatok előállítására két különböző szerszám szükséges, míg az evolvenskerekek lefejtésére egyetlenegy léc típusú szerszám elegendő.

Jelen dolgozatban a kúpkerek forgó mozgását hangoljuk össze a léc elmozdulásával.



3. ábra - Azonos profilú lécszerszám által generált fogaskerekek kapcsolása

3.2. A hengeres-kúpos hajtás kúpkerekének lefejtése

A szakirodalomban a hengeres-kúpos hajtást igen elterjedten használják finommechanikában, könnyűiparban és ott, ahol kis térfogat mellett nagy nyomatókátvitel szükséges. Ilyen eset a helikopterek rotor tengelyének meghajtása is. Az irodalomban fellelhető kutatások a hengeres-kúpos hajtás lefejtését *metszőkerekkel*, azaz kerék típusú szerszámmal tárgyalják. [1]. F. L. Litvin két jelentős hátrányát említi meg ennek a hajtástípusnak. Leírja, hogy a kerek gyártásához nagy készletre van szükség metszőkerekéből, és a kerék fogainak hosszúsága korlátozott a fogak alámetszése és kihegyesedése miatt. Jelen dolgozatomban a kúpkerek generálásához Maag-féle léc típusú szerszámot használok. Figyelembe véve, hogy a léctípusú szerszámok esetében (csigamaró)

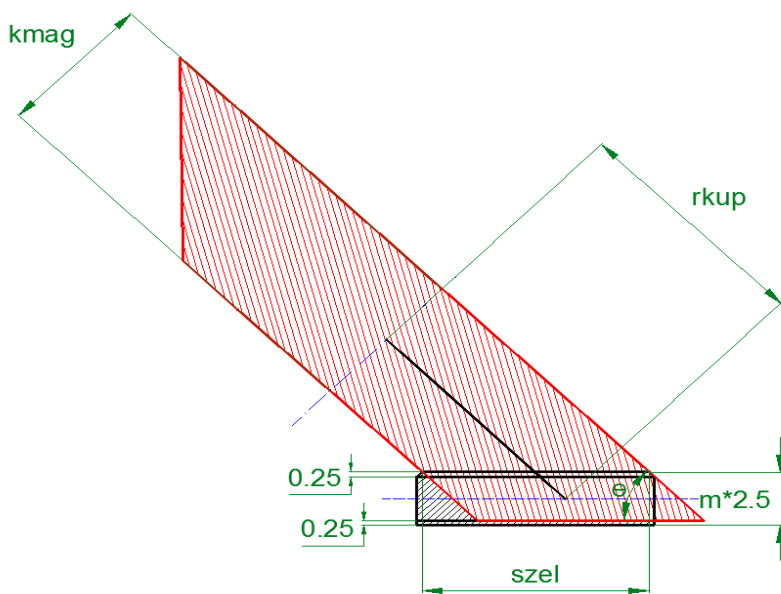
a forgácsolás hatékonysága nagyobb, célszerűnek találom a léccel való lefejtés tanulmányozását. A lécc-kúpkerék kapcsolódásának elvi vázlata a 4-es ábrán található. A hajtás gördülő elemei a lécc osztósíkja és az kerék osztókúpja. A hengeres fogaskerekkel ellentétben jelen hajtás esetében, az osztósík és az osztókúp csúszva gördülnek le egymáson. Az osztókúpon létezik egyetlen kör, amely a lécc osztósíkján csúszásmentesen gördül le; ez lesz a kúpkerék gördülőkör, melyet az evolvens kerek osztókörének képletével számolunk:

$$r_{kup} = \frac{z \cdot p}{2 \cdot \pi} \quad (2)$$

A fogmagasságot a generátorra merőlegesen határozzuk meg. A hengeres-kúpos hajtás állandó fogmagasságú tehát a lábkúp, a fejkúp és az osztókúp generátorai párhuzamosak.

A fogaslécet a lécc határvonaláig, azaz 2.25 modul mélyen süllyesztem bele a csonkakúpba. Ismertnek tekintjük a szerszám-lécc modulját (m), szélességét ($szel$), a kívánt fogszámot (z), és a kúp palástja és az alapkör által bezárt szöget (θ). Ezen paraméterekkel kiszámolom a csonkakúp paramétereit.

A gördülőkör helyzete a fogszélesség-szakaszhoz viszonyítva elméletileg végtelen beállítást enged meg. Ez lehetővé tesz egy a klasszikus profileltolással, geometriai szemlélettel egyenértékű módosítást, amely szintén fogalak módosításhoz vezet. Ehhez hozzájárul a kapcsolódó fogaskerék saját profileltolása. A két módosítás lehetőséget ad az optimális kapcsolódás feltételeinek megteremtésére.



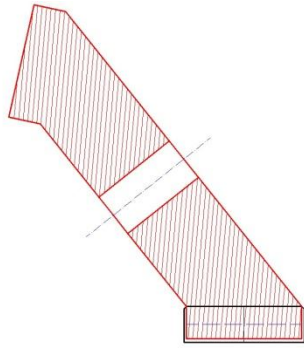
4. ábra - lécs-kúpkerék kapcsolódásának elvi vázlata

A kúp magasságát k_{mag} -al jelölöm. Értékét a lécs szélességnek és a θ szögnek ismeretében
a :

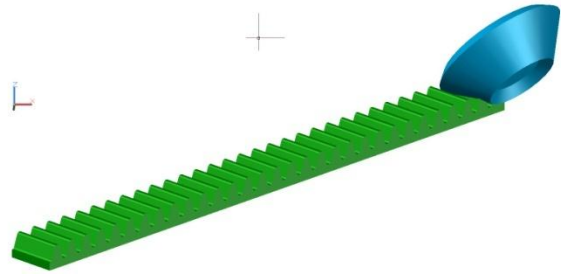
$$k_{mag} = szel \cdot \sin \theta \quad (3)$$

összefüggéssel számítom.

A kapott értékekkel meghatározhatjuk a tányérkerék (kúpkerék) előgyártmányának jellegzetes méreteit, amelyek szükségesek a szimuláció elvégzéséhez.



5. ábra - *léc-tányérkerék kapcsolódásának elvi vázlata*



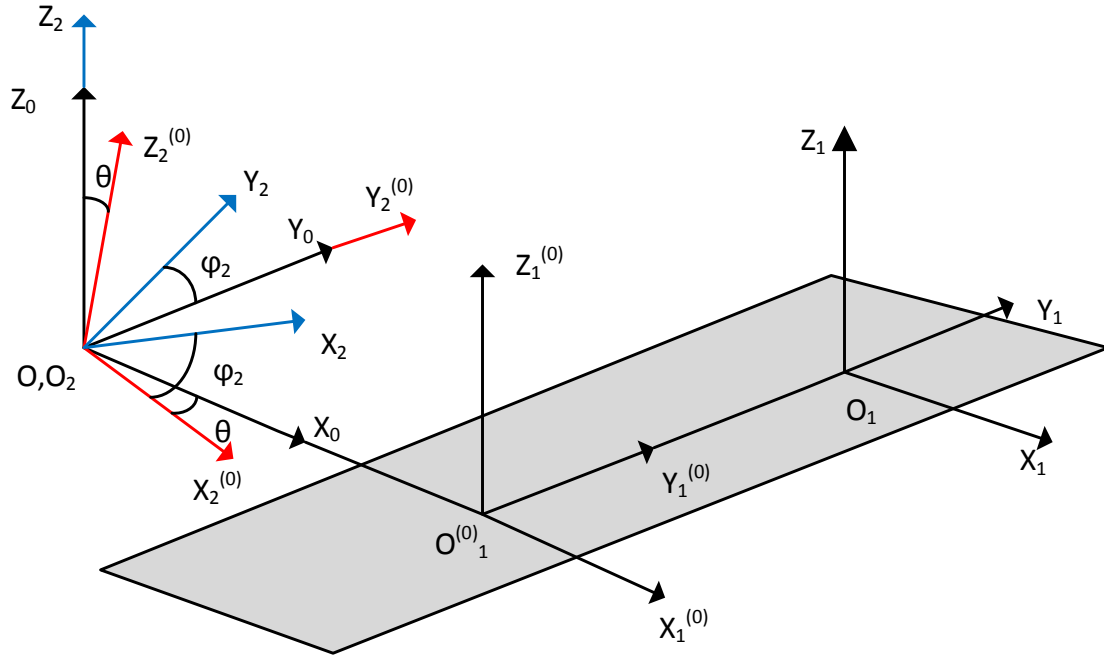
6. ábra – *léc-tányérkerék kapcsolódásának testmodellje*

A tányérkereket a fogaslécen az előbbiekben kifejtett módon legördítve kapjuk meg a kívánt fogprofil. A módszer bármilyen hengeres kerékkel kapcsolódó kúpfogaskerekre alkalmazható.

4. A lécs-kúpkerék kapcsolódási egyenlete

A kapcsolódási egyenletet a fogaslécéhez kapcsolt koordináta rendszerben írjuk föl. Az álványhoz kötött, a léchez kötött és a megmunkálandó kerékhez kötött S0, S1, illetve S2 derékszögű koordináta-rendszerek a 7. ábrán láthatók. A relatív sebesség a lécs elmozdulási sebességéből és a fogazandó kerék saját tengelye körüli forgásából adódik. Az ábra alapján felírható, hogy:

$$\vec{v}_1^{(1)} = \omega_2 \cdot r_{d_2} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$



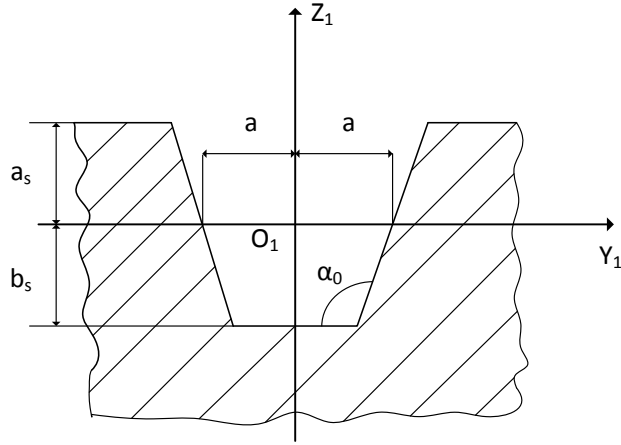
7. ábra – Az állványhoz, a léchez és a megmunkálандó kerékhez kötött derékszögű koordináta rendszerek

A kerékhez csatolt pont sebessége S1-ben a szögsebesség–vektor átviteli nyomatékának alkalmazásával a következő lesz:

$$\vec{v}_1^{(2)} = \vec{\omega}_{0_1}^{(2)} \times \vec{r}_1 + \vec{0_1 0_2} \times \vec{\omega}_{0_1}^{(2)} \quad (5)$$

Kifejtett állapotban a relatív sebesség a következő lesz:

$$\vec{v}_1^{(12)} = \begin{pmatrix} (y_1 + r_{d_2} \cdot \varphi_2) \cdot \cos\theta \\ -x_1 \cdot \cos\theta + z_1 \cdot \sin\theta \\ -y_1 \cdot \sin\theta - r_{d_2} \cdot \varphi_2 \cdot \cos\theta \end{pmatrix} \quad (6)$$



8. ábra – *A fogasléc alaprofilja*

A normálvektorok felírása a 8-as ábra alapján azonnal adódik:

$$\begin{cases} n_1^{(j)} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\cos\alpha_0 \\ \sin\alpha_0 \end{pmatrix} \\ n_1^{(b)} = \begin{pmatrix} 0 \\ \cos\alpha_0 \\ \sin\alpha_0 \end{pmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

Szintén a 8-as ábra alapján a generáló felületek egyenletei a következők:

$$\begin{cases} \Sigma_j \begin{cases} x_1 = u \\ y_1 = v \cdot \operatorname{tg}\alpha + a \\ z_1 = v \end{cases} \\ \Sigma_b \begin{cases} x_1 = u \\ y_1 = -a - v \cdot \operatorname{tg}\alpha \\ z_1 = v \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

A műveletek elvégzése után megfigyelhető, hogy a kapcsolódási egyenletek lineárisak u , v és φ_2 paraméterekben:

$$\begin{cases} (u \cdot \cos\theta + v \cdot \sin\theta) \cdot (-\cos\alpha_0) + [-(v \cdot \tan\alpha_0 + a)\sin\theta - r_{d_2} \cdot \varphi_2 \cdot \cos\theta] \cdot \sin\alpha_0 = 0 \\ (-u \cdot \cos\theta + v \cdot \sin\theta) \cdot \cos\alpha_0 + [(a + v \cdot \tan\alpha_0) \cdot \sin\theta - r_{d_2} \cdot \varphi_2 \cdot \cos\theta] \cdot \sin\alpha_0 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

5. A származtató felületsereg mátrixos egyenletei

A származtató felületsereg mátrixos egyenletei a 7. ábra alapján felírható koordináta transzformációk alapján a következő lesz:

$$\underline{\mathbf{r}}_2 = \mathbf{M}_{22^0} \mathbf{M}_{2^0 0} \mathbf{M}_{01^0} \mathbf{M}_{1^0 1} \underline{\mathbf{r}}_1 \quad (10)$$

ahol:

$$M_{22^0} = \begin{pmatrix} \cos\varphi_2 & \sin\varphi_2 & 0 & 0 \\ -\sin\varphi_2 & \cos\varphi_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$M_{2^0 0} = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$M_{01^0} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{r_{d_2}}{\cos\theta} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$M_{1^0 1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & r_{d_2} \cdot \varphi_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

6. Az alámetszés analitikus vizsgálata

Ismert [3, 4, 5], hogy a burkoló felületen nem jelenik meg az alámetszés amennyiben a burkolt felületből kizárjuk azokat a pontokat, amelyekben a burkolt felülethez viszonyított relatív sebesség nulla. Az érintkezési pont abszolút sebessége:

$$\vec{v}_1^{(absz)} = \vec{v}_1^{(r1)} + \vec{v}_1^{(sz1)} = \vec{v}_1^{(r2)} + \vec{v}_1^{(sz2)} \quad (15)$$

ahonnan:

$$\vec{v}_1^{(r2)} = \vec{v}_1^{(12)} + \vec{v}_1^{(r1)} \quad (16)$$

A származtató felülethez viszonyított relatív sebességek az (8). egyenletek u és v paramétere-ken keresztüli idő szerinti deriválásával állítjuk elő. A továbbiakban a relatív sebesség koordinátáit csak a jobb származtató felületre adjuk meg:

$$\vec{v}_{r1}^{(1)} = \begin{pmatrix} \frac{du}{dt} \\ tg\alpha \cdot \frac{dv}{dt} \\ \frac{dv}{dt} \end{pmatrix} \quad (17)$$

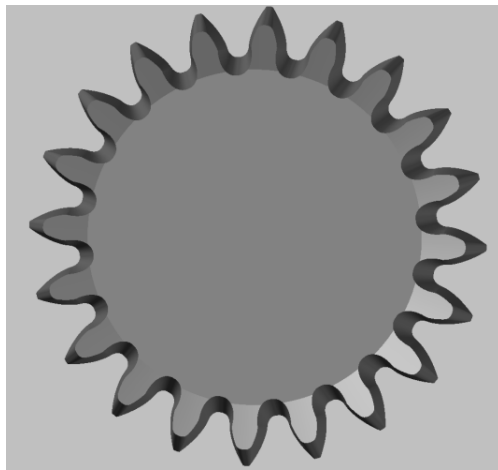
Felhasználva a kapcsolódási egyenlethez felírt relatív elmozdulási sebességet, ami nem más mint az érintkezési pont abszolút mozgásának különböző módon felírt szállítósebesség-összetevőinek különbsége, a kívánt feltétel a következő egyenletrendszerrel fejezhető ki:

$$\begin{cases} (v \cdot tg\alpha + a + r_{d_2} \cdot \varphi_2) \cdot \cos\theta = -\frac{du}{dt} \\ -u \cdot \cos\theta + v \cdot \sin\theta = -tg\alpha \cdot \frac{dv}{dt} \\ -(v \cdot tg\alpha + a) \cdot \sin\theta - r_{d_2} \cdot \varphi_2 \cdot \cos\theta = -\frac{dv}{dt} \end{cases} \quad (18)$$

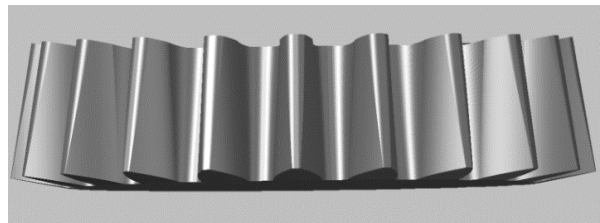
Ehhez az egyenlethez hozzácsatoljuk a (9). kapcsolódási egyenletek megfelelőjét. Észrevehető, hogy öt ismeretlenes, négy egyenlethből álló lineáris egyenletrendszert kapunk $u, v, \varphi_2, \frac{dv}{dt}, \frac{du}{dt}$ ismeretlenekben. Kiejtve a három fölösleges paramétert u -ban és v -ben lineáris összefüggést kapunk. Ennek a részletes tanulmányozását a kutatás egy további fázisában fogom végezni.

7. A fogak alámetszésének és kihegyesedésének tanulmányozása

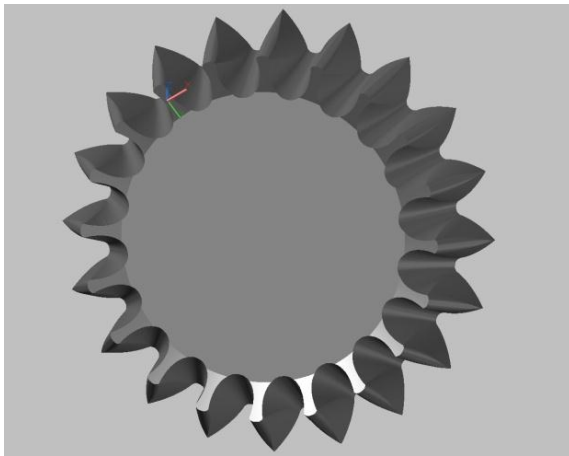
A jelen vizsgálatot különböző θ szögű, de ugyanakkora gördülőkörű kúpkerék leképezésére irányítottam. A fogszám $z=20$ fog, a θ szög pedig rendre $75^\circ, 50^\circ$ és 30° . A szimuláció eredményeképpen kapott testmodellek a 9., 10., 11., 12. ábrákon láthatók. A θ szög csökkentésével, a fogak kihegyesednek és méretük is csökken, kisebb lesz az aktív fogfelület. A végeredményül kapott tányérkerék kapcsolható lesz egy ugyanilyen modulú hengeres fogaskerékkel.



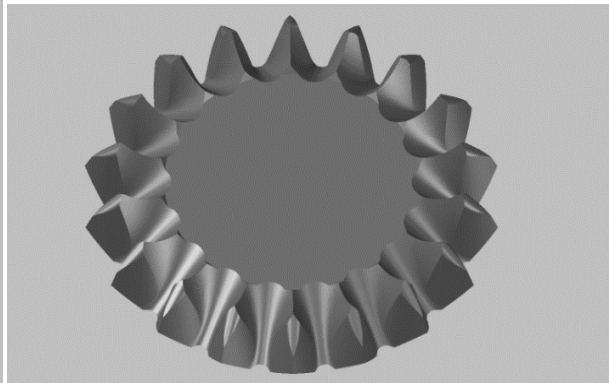
9. ábra – $\theta=75^\circ$ -os testmodell, főnézet



10. ábra – $\theta=75^\circ$ -os testmodell, oldalnézet



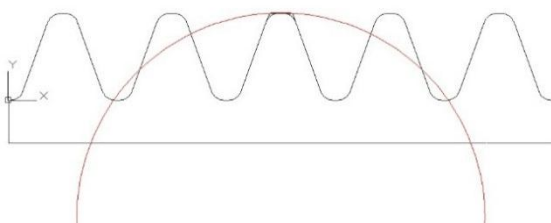
11. ábra - $\theta=50^\circ$ -os testmodell



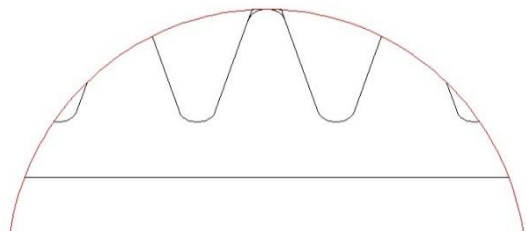
12. ábra - $\theta=30^\circ$ -os testmodell

A fogak alámetszését és kihegyesedését a fogszám növelésével is csökkenthetjük. Ez igen nagymértékben megnövelheti a tányérkerék méretét, ezért nem minden esetben alkalmazható a gyakorlatban. A túlzott kihegyesedés és alámetszés a lécszerű szerszámnak köszönhető. Ezzel a hagyományos léccel csak megfelelően nagy θ dőlésszögű, vagy nagy fogszámú, a használathoz megfelelő fogazattal rendelkező tányérkereket generálhatunk.

A fogasléc optimalizálásával csökkenthető az alámetszés és a kihegyesedés. Egy körívvel elmetszve a lécpofit ideálisabb fogazat-méreteloszlást kapunk a generáláshoz. Az eljárás és az általa kapott aktív lécdarab profilja a 13. és 14. ábrákon látható.

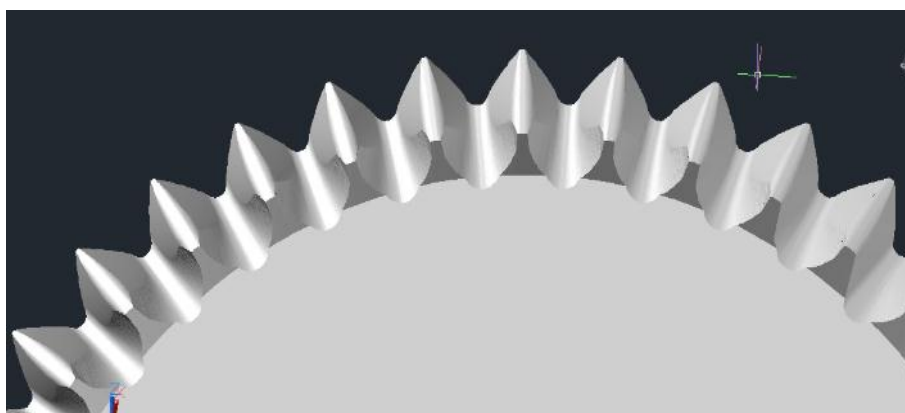


13. ábra – a fogasléc elmetszése a körívvel

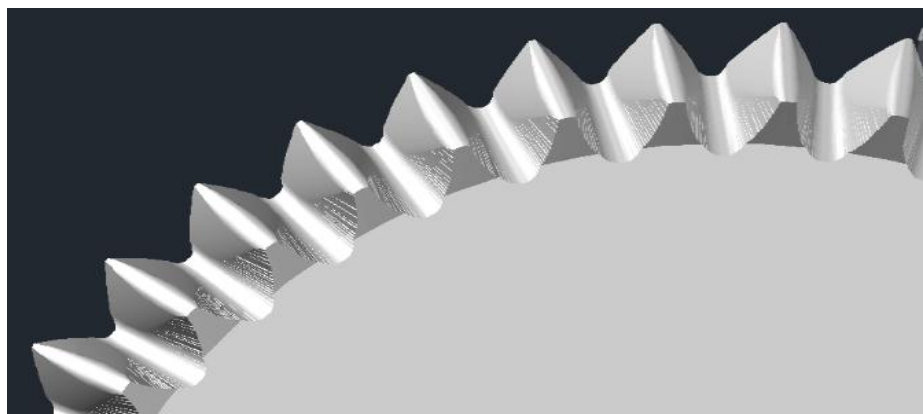


14. ábra – a metszés után kapott aktív lécdarab

Vizsgálatot végeztem két teljesen azonos paraméterekkel rendelkező tányérkerék ($\theta=40^\circ$, $m=3$, $z=40$) lefejtésekor. Az elsőt a normál léc-típusú szerszámmal fejtettem le, a másodikat az optimalizált, kör által korrigált kiterjedésű léccel generáltam. Az eredményül kapott kerekek fogazatát a 15. és 16. ábrán tekinthetjük meg. A fogasléc lemetszéséhez használt kör sugarának, a 4-es ábrán is feltüntetett, „rkup” értéket adtam. Ennek a körnek a sugarát is optimalizálni kell, melyet a θ szög és az „rkup” értéke határoz meg. Ezzel kapcsolatos számításaimat a kutatás következő fázisában fogom elvégezni. Feltételezem, hogy egy adott tányérkeréknek több hengeres kerékkel való kapcsolódása esetén a lefejtő szerszámot a legnagyobb fejkörsugarú fogaskerék szerint kell lehatárolni. Az általam használt értékkel végzett vizsgálat kielégítő testmodellekhez vezetett. Egy számítások, vagy szimulációk által optimalizált sugarú kör használatával, nagyobb mértékű javulást kaphatunk a fogalámetszés és kihegyesedés szempontjából.



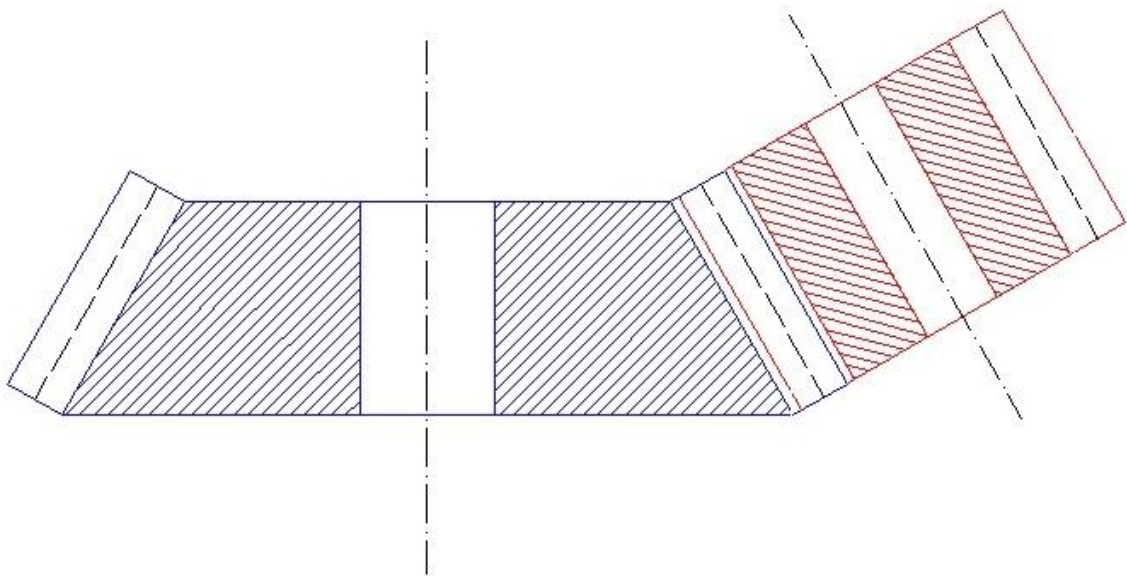
15. ábra – *hagyományos léccel lefejtett tányérkerék*



16. ábra – *módosított léccel lefejtett tányérkerék*

8. Hengeres és kúpfogaskerék kapcsolása

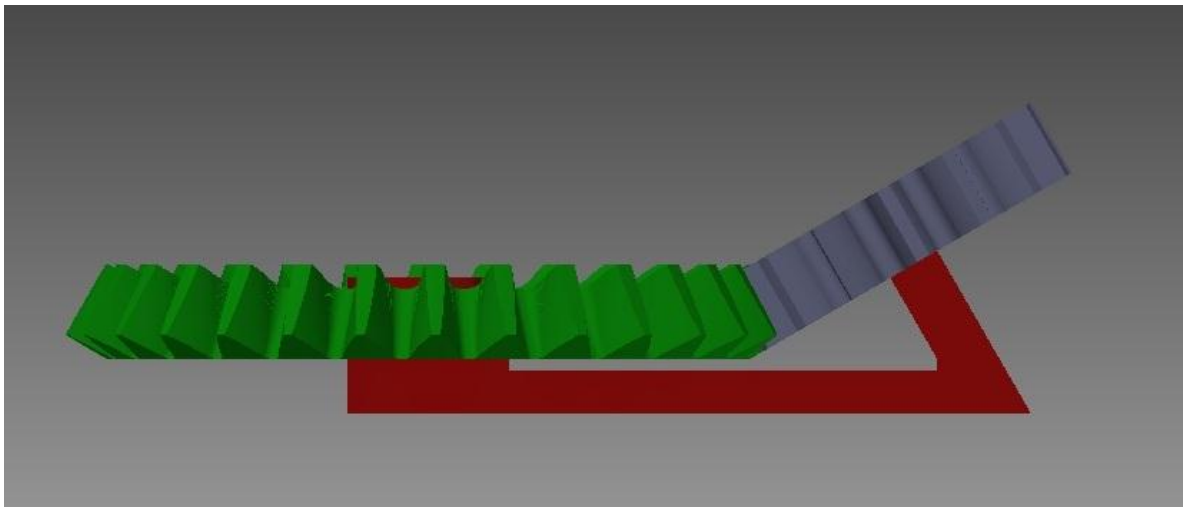
A program által, léccel lefejtett, megegyező modulú hengeres- és kúpfogaskerek kapcsolhatók lesznek egymással. A 17. ábrán látható a fogaskerek kapcsolódásának elvi vázlata. A tányérkerék metszetét sötétkéssel, míg a hengeres kerékét pirossal ábrázoltam. Látható, hogy egyik kerék esetében sincs alkalmazva profileltolás, ezért az osztóköröket jelölő szaggatott vonalak egybeesnek.



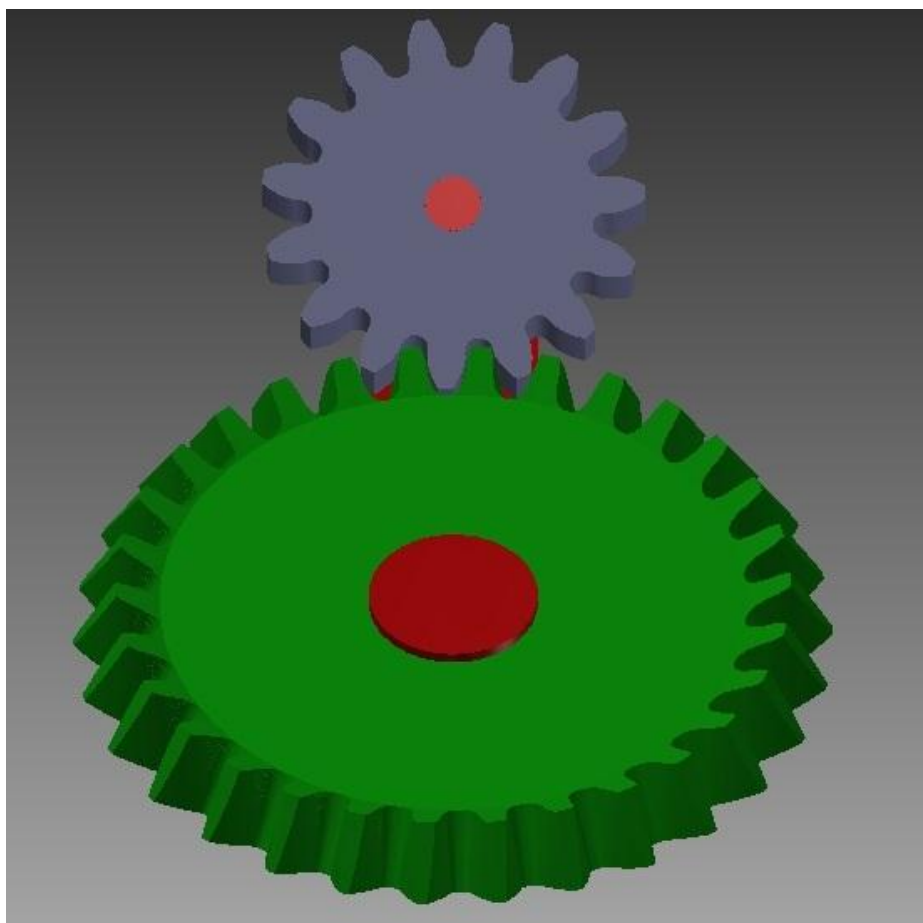
17. ábra – *A tányérkerék és a hengeres kerék kapcsolódásának elvi vázlata*

Ha rendelkezésre állnak a szükséges adatok(fogs szám, modul, θ szög és a fogszélesség) kiszámíthatjuk a fogaskerek tengelytávját. A számítások elvégzése után, elkészíthető az adott fogaskerek kapcsolódásának 3d-s modellje.

Példaként vettem egy $z=30$ fogs számú, $m=4$ modulú, $\theta=60^\circ$ -os dőlésszögű és 15cm fogszélességű tányérkerek, illetve egy $z=15$ fogs számú, $m=4$ modulú és 15cm fogszélességű hengeres fogaskereket. A szükséges számítások elvégzése után egy állványt készítettem, amelyen elhelyeztem a két fogaskereket. A 18. és 19. ábrán az előbbiekben leírt fogaskerek kapcsolódásának testmodellje tekinthető meg.



18. ábra – *A kúpos-hengere hajtás kapcsolódásának testmodellje*



19. ábra – *Tányérkerék(zöld) és hengeres fogaskerék(szürke) kapcsolódása*

9. A számítógépes szimuláció programjának szerkezete

Fogaskerékgyártás esetén a lefejtés a legelterjedtebb megmunkálási forma. A generálás során létrejövő fogprofil tanulmányozását nehézkessé teszik a bonyolult matematikai összefüggések. Ezek elkerülhetők, ha számítógépes szimulációt alkalmazunk a forgácsolási művelet során fellépő relatív elmozdulásra.

A szimulációt AutoLisp programozási nyelven írtam meg, melyet az Autocad szoftver segítségével jelenít meg. A megjelenítés a testkivonásos módszert alkalmazza, amely az Autocad szoftver jellegzetes művelete. A kivonás lényege abban áll, hogy az előre kigenerált, szabvány méretű szerszám és a tányérkerék áthatásának megfelelő térfogatot eltávolítja a tányérkerékből, úgy, hogy a keletkező testmodell határfelülete a tányérkerék és az áthatás határfelületéből áll össze. Míg a valóságban a kés folytonosan vágja ki az anyagot a munkadarabból, a szimuláció során csak bizonyos időpillanatokban történik meg a kivonás. Ezáltal a testmodell felülete nem lesz sima, a fogprofil lépcsőzetes formát fog kapni. Ha a lépést megfelelő finomságúra állítjuk, akkor ez a hiba elhanyagolható. A léptetés nagyságát a kerék elfordulási szöge határozza meg, aminek a szimuláció során a számítógép teljesítménye szab határt.

$$l_{\text{lépés}} = \theta \cdot r_{\text{kup}} \quad (19)$$

A különböző változóknak rendhagyó nevei (a fogasléc szélessége, a kúp magassága, illetve a gördülőkör sugara), a program írását rendkívül megkönnyítik. Ezáltal csökken az egyes műveletek hibás megírásának esélye is. A 20. ábrán megtekinthető egy részlet a programból, amelyet láthatjuk, a lécs és a kúpkerek modelljének elkészítéséhez szükséges számításokat.

```

(defun szamol ()
  (setq forg_szog 1)
  (setq halad (/ (* pi rkup forg_szog) 180))
  (setq h (* 2.5 m))
  (setq alfa (/ (* 20 pi) 180))
  (setq tanalfa (/ (sin alfa) (cos alfa)))
  (setq iksz (* h tanalfa))
  (setq ipsz (- (/ (* m pi) 2) (* h tanalfa)))
  (setq sug1 (sqrt (+ (* h h) (* (/ ipsz 2) (/ ipsz 2)))))
  (setq p1 (list 0 0))
  (setq p2 (list (+ (car p1) (/ ipsz 2)) (cadr p1)))
  (setq p3 (list (+ (car p2) iksz) (+ (cadr p2) h)))
  (setq p4 (list (+ (car p3) ipsz) (cadr p3)))
  (setq p5 (list (+ (car p2) (+ ipsz (* 2 iksz))) (cadr p2)))
  (setq p6 (list (+ (car p5) (/ ipsz 2)) (cadr p5)))

)

(defun szamol_kup ()
  (setq tetar (/ (* teta pi) 180))
  (setq ker (* z pi m))
  (setq rkup (/ ker (* 2 pi)))
  (setq kmag (* szel (sin tetar)))
  (setq rk (- rkup (+ (* m 1.25 (sin tetar)) (/ (* szel (cos tetar)) 2))))
  (setq rn (+ rk (* szel (cos tetar))))
  (setq p10 (list 0 (* m 0.25) (/ szel 2)))
  (setq p11 (list (car p10) (cadr p10) (+ (caddr p10) szel)))
  (setq p12 (list (car p10) (+ (cadr p11) (* m 2.25)) (caddr p11)))
  (setq p13 (list (car p10) (+ (cadr p12) (* rn (sin tetar))) (- (caddr p12) (* rn (cos tetar)))))
  (setq p14 (list (car p10) (+ (cadr p12) (* rk (sin tetar))) (- (caddr p10) (* rk (cos tetar)))))
  (setq p15 (list (car p10) (cadr p12) (caddr p10)))

)

```

20. ábra – részlet az AutoLisp programból

A program öt fő lépésből tevődik össze, melyek a következők:

- 1) inicializálás;
- 2) adatok bekérése;
- 3) a testmodellekhez és a szimulációhoz szükséges számítások elvégzése;
- 4) modellek elkészítése;
- 5) a szimuláció futtatása;

Ezzel az eljárással nagy pontosságú testmodellek készíthetők, ezért felhasználhatóak virtuális kinematikai, vagy dinamikai hajtásvizsgálatokra, vagy akár 3D nyomtató segítségével kézzelfogható testmodelleket is gyárthatunk.

10. Következtetések

Összegezve elmondhatom, hogy a különféle fogaskerekek kapcsolásának tanulmányozása nélkülözhetetlen új hajtások fejlesztésében, illetve létező hajtások hajtásparamétereinek javításában. Az előbbiekben bemutatott eljárás költsége nem túl magas és maga a program roppant rugalmas. A program finomítása által új funkciók is bevezethetők, mint a hajtás működésének vizsgálata valós körülmények között. A hordkép vizsgálata és a relatív csúszások tanulmányozása elengedhetetlenül szükséges a hajtás geometriai vizsgálatához.

Tudva, hogy ugyanazon egyenes profilú lécszerszám által generált fogaskerekek helyesen kapcsolódnak, a külső kúpos hengeres hajtás minden körülmények között megvalósítható. A számítógépes szimuláció segítségével képet kaphatunk a lefejtett fogaskerékről, anélkül, hogy a nehezen kezelhető matematikai összefüggéseket fel kelljen állítani, ám ezek feltétlenül szükségesek a mélyrehatóbb kapcsolódás vizsgálat elvégzésekor. Ezen egyenletek alapján újabb szimulációs modellek állíthatók fel, amelyek alapjai a jelen lefejtési modellel meg kell egyezzenek.

A továbbiakban a hajtás működésének szimulációja és az érintkező felületelemek megállapítása a cél.

11. Szakirodalom

- [1] Papp, I. Mechanizmusok elmélete, Scientia Kiadó, Kolozsvár, 2010.
- [2] Hollanda, D. Bazele aşchierii şi generării suprafeţelor. Universitatea Petru Maior Târgu Mureş, Târgu Mureş, 1996.
- [3] Litvin, F.L. A fogaskerékkapcsolás elmélete. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1974.
- [4] Litvin, F.L. Teoria angrenajelor şi geometria aplicată (trad. acad. dr. ing. Csibi V. e. a.) , Editura Dacia, Cluj Napoca, 2012.

Tartalom

1.	Bevezető.....	2
2.	Alapfogalmak.....	2
3.	A fogazatlefejtés jellegzetességei	4
3.1.	A lefejtő elem.....	4
3.2.	A hengeres-kúpos hajtás kúpkerekének lefejtése.....	5
4.	A lécz-kúpkerek kapcsolódási egyenlete	8
5.	A származtató felületsereg mátrixos egyenletei.....	11
6.	Az alámetszés analitikus vizsgálata	12
7.	A fogak alámetszésének és kihegyesedésének tanulmányozása	13
8.	Hengeres és kúpfogaskerek kapcsolása.....	16
9.	A számítógépes szimuláció programjának szerkezete	18
10.	Következtetések.....	20
11.	Szakirodalom.....	21