

Poligon fogaskerek tervezésének és gyártásának szoftveres támogatása, valamint használata fogaskerékszivattyúban

Software-Aided Design and Manufacturing of Polygon Gears and Their Application in Gear Pumps

LÓKI Dániel János¹, Dr. PÓKA György², Dr. BAKA Ernő³

¹Hallgató, Mechatronikai Mérnöki MSc.,

²Adjunktus, Gyártástudomány és -technológia Tanszék,

³Adjunktus, Gép- és Termék Tervezés Tanszék,

^{1,2,3}Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.
email: ¹lokidanieljanos@edu.bme.hu, ²poka.gyorgy@gpk.bme.hu, ³baka.erno@gt3.bme.hu

Abstract

One of the widely used devices for conveying liquid media is the gear pump, which is primarily applied in hydraulic systems for transporting high-viscosity materials, such as oils. The objective of this research is to develop a gear geometry that enables an increase in the volumetric flow rate of the pump. In the first part of the presentation, the fundamental geometric properties and manufacturing technologies of conventional external gear profiles are reviewed. This is followed by the introduction of their specially transformed, polygon-like configurations, along with the associated computer-aided modeling methods. The polygonal geometry is generated by applying a continuously varying profile shift along a circular contour, defined by a preselected function. The design process is supported by a proprietary, purpose-built software tool featuring an independent graphical user interface. The manufacture of the resulting geometries may require custom tooling, the design of which is also facilitated by the software. The program performs the necessary rolling transformations and computes tool geometries corresponding to various generating processes, including Maag, Pfauter, and Fellows methods. The calculated geometric data can be used directly for tool manufacturing, as well as for further 3D design and manufacturing preparation tasks. By employing polygonal gear geometries, the transmitted volume can be increased and a higher operating pressure range can be achieved, while avoiding the more complex and structurally less rigid designs characteristic of internal gear pumps.

Keywords: gear, gear pump, polygon, profile shift, gear hobbing

Kivonat

A folyékony közegek továbbításának egyik elterjedt eszköze a fogaskerékszivattyú, amelyet elsősorban nagy viszkozitású anyagok - például olaj - szállítására alkalmaznak hidraulikus berendezésekben. Fejlesztésem célja egy olyan fogaskerék-geometria megalkotása, amellyel a szivattyú térfogatárama növelhető. Az előadás első részében áttekintem a hagyományos külső fogazású fogaskerek alapvető geometriai tulajdonságait és gyártástechnológiáit. Ezt követően bemutatom ezek speciálisan transzformált, poligon jellegű kialakítását, valamint az ehhez kapcsolódó számítógépes modellezési módszereket. A poligon geometria létrehozása során egy körvonal mentén, előre megválasztott függvény szerint, folytonosan változó profileltolást alkalmazunk. A tervezési folyamatot egy saját fejlesztésű, önálló grafikus kezelőfelülettel rendelkező célszoftver támogatja. Az így létrehozott geometriák gyártása egyedi szerszámozást igényelhet, amely tervezésére a program szintén lehetőséget biztosít. A szoftver elvégzi a szükséges legördítési transzformációkat, és különböző lefejtő eljárásokhoz - Maag, Pfauter és Fellows - tartozó szerszámgeometriákat számít. A számított geometriai adatok felhasználhatók szerszámgyártásra, valamint további 3D tervezési és gyártás-előkészítési feladatokhoz. A poligon geometria alkalmazásával növelhető az átvitt térfogat és nagyobb nyomástartomány érhető el, miközben elkerülhető a belső fogazású szivattyúk bonyolultabb, valamint kisebb merevségű szerkezeti kialakítása.

Kulcsszavak: fogaskerék, fogaskerékszivattyú, poligon, profileltolás, lefejtés

1. BEVEZETÉS

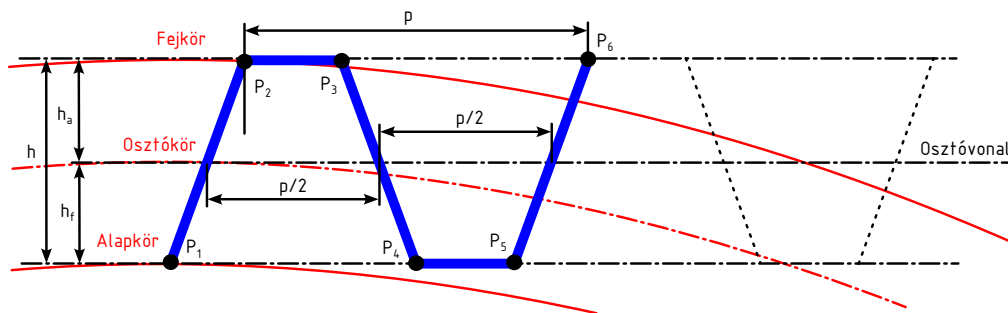
A folyékony közegek továbbítására az ipari fejlődés során számos műszaki megoldás született, amelyek közül az egyik, napjainkban is széles körben alkalmazott konstrukció a fogaskerékszivattyú. E térfogat-kiszorítás elvén működő berendezést elsősorban nagyobb viszkozitású közegek - különösen hidraulikaolajok - szállítására alkalmazzák. Robusztus felépítése, üzembiztossága és kedvező terhelhetőségi jellemzői miatt kiemelten elterjedt nagy teljesítményű erőgépek és ipari hidraulikus rendszerek folyadékellátásában.

A hagyományos külső fogazású fogaskerékszivattyúknál az egy fordulatra jutó szállított térfogatot döntően a fogárkok geometriája, a fogszám, a modul, valamint a szivattyú axiális mélysége határozza meg. Amennyiben a fogaskerék külső burkolója nem tisztán hengeres, hanem attól eltérő, poligon jellegű kialakítást kap, lehetőség nyílik a szivattyúház és a kerék közötti tér kihasználására is a közeg továbbításában. Jelen tanulmány célja egy olyan poligon fogazattal rendelkező fogaskerékgeometria bemutatása mely fogaskerékszivattyúban alkalmazva jelentős szállítótérfogat növekedést mutat a hagyományos megoldásokkal szemben.

2. FOGASKERÉK GEOMETRIA GENERÁLÁSA

2.1. Alapprofil szerkesztése

A generálógeometriaként alkalmazott fogasléc alapprofil kiszerkesztése a fogaskeréktechnikában alapvető alapadatok alapján történik. Ezek a modul (m), fogszám (z), profilszög (α) fejmagasságtényező (h_a^*) és lábhezagtényező (c^*). A fogasléc profil első öt pontját szükséges kiszámolni, az ezután következők mindig osztásnyi távolságra követik az őket megelőző azonos helyzetű pontokat. Addig szükséges folytatni az újabb pontok kiszámítását amíg a profil hossza el nem éri a legnagyobb gyártani kívánt kerék kerületét.

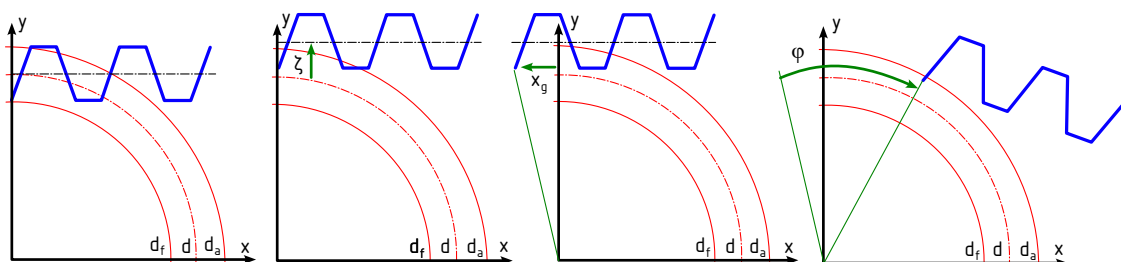


1. ábra. Fogasléc generálóprofil

2.2. Alapprofil legördítése

A generálóprofil egy osztókör ármérőjű körön gördül, legegyszerűbb ezt diszkrét pontokban kivitelezni. Minden választott középponti szöghöz az alapprofil pontjait transzformáljuk, az alapján adjuk meg az aktuális szögben álló profilt. [1] A legördítés a következő lépésekre bontható fel:

- Az alapgörbe egy választott pontja Y irányban mozdul el a gördülő kör sugarával. (valamint a profileltolás értékével)
- A pont ezután X irányban tolódik el az aktuális legördítéshez tartozó középponti szög által meghatározott ívhosszal.
- Utolsó lépésben az aktuális legördítéshez tartozó középponti szöggel fordul el az origó körül.

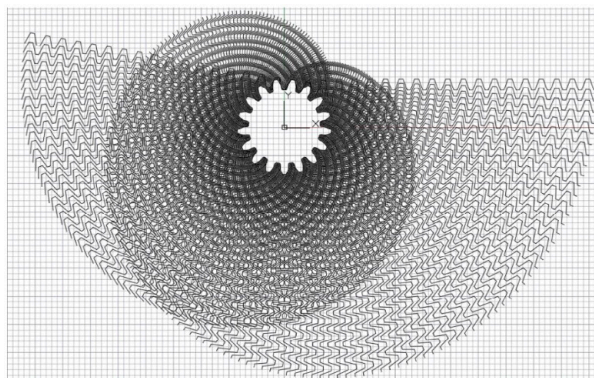


2. ábra. Generálóléc legördítés

A szerszám alapgörbe pontjait (u, v) segédkoordináta rendszerben értelmezve $P(u_1; v_1)$ pont pályája a munkadarab koordináta rendszerében körevolvenst ír le, ez a

$$\begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 + R_g \cdot \varphi \\ v_1 + R_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

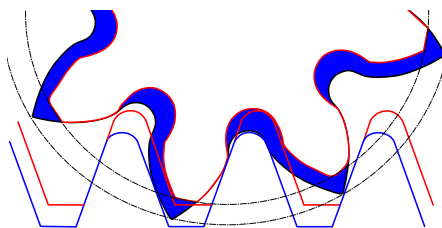
mátrixegyenlettel adható meg. A megfelelő darabszámban és sűrűségben legördített alaprofilok a 3. ábrán látható módon jelenítik meg a tervezett gépelemet.



3. ábra. Legördítéssel készített fogaskerék kontúr

2.3. Profileltolás

A profileltolás azt fejezi ki, hogy a fogazat elméleti osztóköréhez képest a fogprofil radiális irányban elvan-e tolva a referencia fogazathoz viszonyítva. A referencia fogazat az amikor a generáló fogasléc osztóvonala gördül a fogaskerék osztókörén. Segítségével kompenzált fogazat készíthető, bizonyos mértékig kiküszöbölhetők az alámetszés vagy a fogak kihegyesedésének hatásai. [4]



4. ábra. Legördítéssel készített fogaskerék kontúr

2.4. Változó profileltolás

Amennyiben a profileltolás a fogaskerék körül nem körszimmetrikusan, hanem a burkolókör mentén a középponti szög szerinti függvény alapján jelentkezik, úgy változó profileltolásról beszélhetünk, a jellegét pedig egy betétfüggvény határozza meg. A megfelelő betétfüggvénnyel, például a $\xi(\varphi) = \cos(n \cdot \varphi) \cdot s$ összefüggéssel lehetőség nyílik sokszög burkolójú gépelemeket kiszerkeszteni. Az ezen az elven készített poligon fogaskerekek láthatók az 5., 6. és 7. ábrákon.

3. POLIGON FOGASKEREKEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

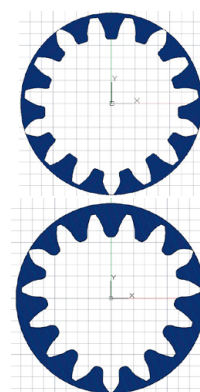
A gépelemek összehasonlításának fókuszában a tanulmány szempontjából lényeges szivattyúban előállítható fordulatonkénti geometriai szállítótérfogat nagysága áll. A geometriai szállítótérfogat megegyezik a szivattyúház belső fala és a fogaskerék kontúrja közti tér és a fogaskerék vastagságának szorzatával. Ez kizárólag geometriai számítás, nem veszi figyelembe a nyomásviszonyokat, a fogaskerekek palást vagy homlokfelületén visszaáramló közeget vagy a szállított közeg hullámzó jellegét. Az összehasonlítás egyszerűsége érdekében minden vizsgált fogaskerék vastagsága most 1 és két dimenzióban szállítóterületük értelmezett.

Több elvégzett számítás alapján is megállapítható, hogy a poligon fogaskerekek közül a kör alakú legnagyobb mértékben eltérő három oldalú poligon rendelkezik a legnagyobb geometriai szállítótérfogattal. Közel teljesen azonos átmérő mellett, azonos fogszámon a három oldalú poligon mintegy 12%-al teljesített jobban mint a vele összehasonlított ötoldalú poligon. A számítás paramétereit az 1. táblázat tartalmazza.

Különböző oldalszámú poligon fogaskerek összehasonlítása

1. táblázat

	Ötszög poligon	Háromszög poligon
Fogság [db]	15	15
Modul [mm]	9	8
Fejmagasság tényező [-]	1	1
Lábházag tényező [-]	0,1	0,1
Profilszög [°]	20	20
Oldalak száma [db]	5	3
Befoglaló / Fejkorátmérő [mm]	155,54	157,98
Betétfüggvény	$\xi(\varphi) = -\cos(n \cdot \varphi) \cdot 1,8$	$\xi(\varphi) = -\cos(n \cdot \varphi) \cdot 3$
F. kerék által lefedett terület [mm ²]	13 738,74	13 727,04
Befoglaló kör területe [mm ²]	19 001,78	19 602,66
Fordulatonkénti szállító terület [mm ²]	5 263,04	5 875,62



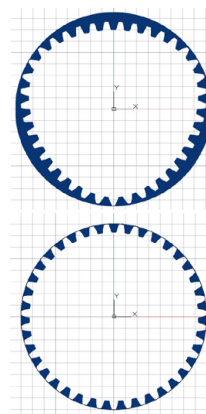
5. ábra. Fogaskerek

A második összehasonlításban azonos, nagy fogságú fogaskerek szerepelnek. A fogalakot meghatározó paraméterek azonosak de a burkolókör átmérője kiadódó. Megállapítható, hogy ebben az esetben a különbség a vizsgált gépelemek szállító területei között különösen nagy, közel 250%-os. A számítás paramétereit a 2. táblázat tartalmazza.

Azonos, nagy fogságú poligon- és körkerék összehasonlítása

2. táblázat

	Háromszög poligon	Körkerék
Fogság [db]	39	39
Modul [mm]	4	4
Fejmagasság tényező [-]	0,8	0,8
Lábházag tényező [-]	0,25	0,25
Profilszög [°]	20	20
Oldalak száma [db]	3	kör alakú
Befoglaló / Fejkorátmérő [mm]	170,4	158,4
Betétfüggvény	$\xi(\varphi) = -\cos(n \cdot \varphi) \cdot 4$	nincs profileltolás
F. kerék által lefedett terület [mm ²]	18 679,06	17 928,23
Befoglaló kör területe [mm ²]	22 804,92	19 606,66
Fordulatonkénti szállító terület [mm ²]	4 125,86	1 678,433



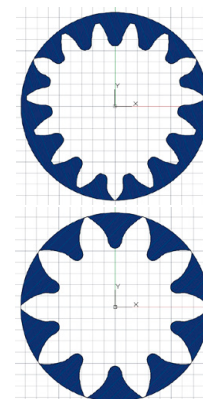
6. ábra. Fogaskerek

A harmadik összehasonlításban közel azonos fejkörátmérőjű, az iparban legelterjedtebb fogságtartományú, 10-15 fog közti fogaskerek szerepelnek. Látható, hogy egy megfelelően megválasztott betétfüggvénnyel ebben az esetben is mintegy 8% előnye van a poligon fogaskeréknek a hagyományos körkerékkel szemben. A számítás paramétereit a 3. táblázat tartalmazza.

Kis fogságú poligon- és körkerék összehasonlítása

3. táblázat

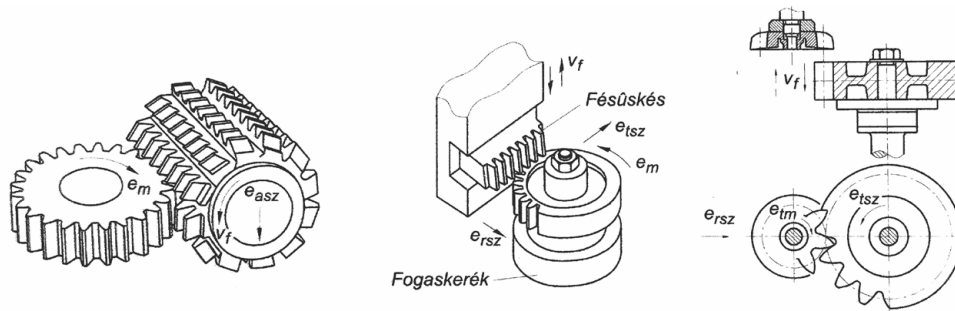
	Háromszög poligon	Körkerék
Fogság [db]	15	10
Modul [mm]	10	14
Fejmagasság tényező [-]	1	1
Lábházag tényező [-]	0,1	0,25
Profilszög [°]	30	30
Oldalak száma [db]	3	kör alakú
Befoglaló / Fejkorátmérő [mm]	169	168,02
Betétfüggvény	$\xi(\varphi) = \frac{r(1 - 0,06^2)}{1 + 0,06 \cos(n\varphi)} - r - 5$	nincs profileltolás
F. kerék által lefedett terület [mm ²]	14 648,54	14 972,8
Befoglaló kör területe [mm ²]	22 431,76	22 172,90
Fordulatonkénti szállító terület [mm ²]	7 783,22	7 200,10



7. ábra. Fogaskerek

4. FOGASKEREK GYÁRTÁSA

Mivel a számított adatok alapján úgy mutatkozott van potenciál a speciális fogaskerek használatában, érdemes megvizsgálni azok gyárthatóságát is. A hagyományos fogaskerek gyártása lefejtő és profilozó eljárásokkal történhet. A lefejtő és profilozó forgácsoló eljárások közötti fő különbség a megmunkálás módjában és a szerszám-munkadarab interakcióban rejlik. Míg a profilozó eljárások során a szerszám adott profiljával egyszeri érintkezésben formálódik meg a kívánt alak, addig a lefejtő eljárásoknál a szerszám és a munkadarab relatív mozgásával fokozatosan, lépésenként alakul ki a profil. [5] A későbbiekben bemutatott szoftver a lefejtés elvén működő szerszámok geometriájának készítésére íródott így a továbbiakban ezekről lesz szó. A lefejtő eljárások között a 8. ábrán egy Pfauter lefejtőmaróval, Maag féle fésűskéssel és Fellows típusú metszőkerékkel végzett megmunkálás látható.



8. ábra. Lefejtő eljárások
sorban: Pfauter - Maag - Fellows [2]

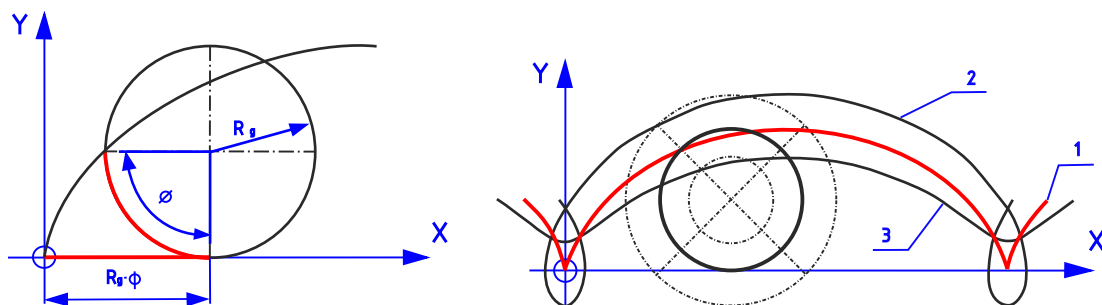
Mivel ezeket az eljárásokat évtizedekkel, esetenként egy évszázaddal ezelőtt, hagyományos körkerekekhez fejlesztették ki, speciális szerszámokra van hozzájuk szükség amikkel előállítják a poligon alak. A tanulmány következő részében az ezek megtervezését segítő szoftver algoritmusát ismertetem.

4.1. Speciális szerszámgeometriák tervezése

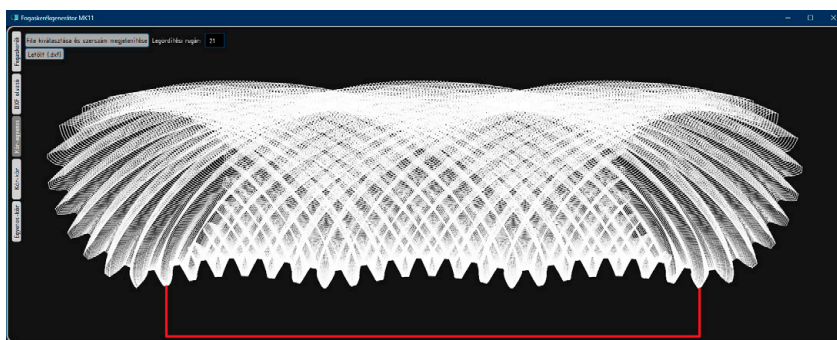
A Maag és Pfauter típusú szerszámokhoz egy kör-egyenes legördítés matematikai algoritmusának segítségével lehetséges normálmetszeti szerszámgeometriát generálni. A beolvasott gépelem pontjait egy megválasztott gördülőkörön, csúszásmentesen szükséges legördíteni egy egyenes mentén. Ezt a

$$\begin{bmatrix} \cos(-\varphi) & -\sin(-\varphi) \\ \sin(-\varphi) & \cos(-\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_g \varphi \\ R_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

mátrixegyenlet írja le, ahol φ az aktuális legördítéshez tartozó középponti szög, u_1 és v_1 a munkadarab (u, v) koordináta rendszerében vett aktuálisan megfigyelt pontok koordinátái, R_g pedig a legördítési sugár. A legördített pont és az egyenes egymástól viszonyított pozíciójától függően a kirajzolódó görbe lehet csúcsos (1) hurkolt (2) és nyújtott (3) ciklois ahogy az a 9. ábrán is látható. A 10. ábra az ezen az elven kiserkesztett három oldalú poligon fogaskerek gyártásához alkalmas szerszámgeometriát mutatja a fejlesztéshez írt szoftver kezelőfelületén.



9. ábra. Ciklois görbék szerkesztése

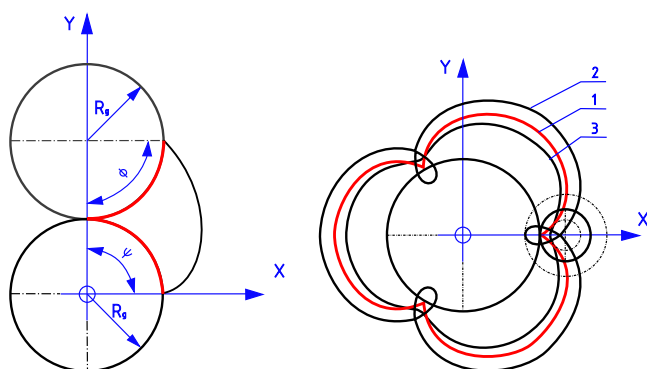


10. ábra. Ciklois görbék szerkesztése

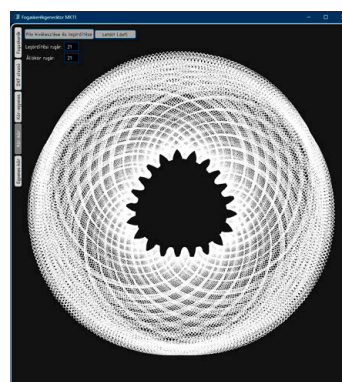
A Fellows típusú szerszám a kör körön történő legördítését leíró matematikai algoritmusával szerkeszthető. Az egymáson csúszásmentesen legördülő gördülőkörök egyes pontjainak pályáját, az azon elfoglalt helyzetét a

$$\begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_a + R_g \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

mátrix egyenlet írja le amiben a két együtt mozgó kör miatt már két legördítési sugár is megfigyelhető. A legördített pont és a körök egymástól viszonyított pozíciójától függően a kirajzolódó görbe lehet csúcsos, (1) hurkolt (2) és nyújtott (3) epiciklois ahogy azt a 11. ábra is szemlélteti. A 12. ábra az ezen az elven kiszerkesztett három oldalú poligon fogaskerék gyártásához alkalmas szerszámgeometriát mutatja a fejlesztéshez írt szoftver kezelőfelületén.



11. ábra. Ciklois görbék szerkesztése



12. ábra. Ciklois görbék szerkesztése

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A tanulmányban bemutatásra került egy olyan poligon fogaskerékgeometria melyel a fogaskerékszivattyú a hagyományos körkerekes változatánál nagyobb geometriai szállítótérfogatot képes elérni. A cikk ismerteti a változó profillelőással készített gépelemek szerkesztését valamint az azzal rendelkező fogaskerekek gyártásához szükséges szerszámgeometriák tervezését. Az itt bemutatott gépelemek fejlesztésében és használatában nagy potenciál van, a szivattyúban történő használaton túl különböző alternáló irányú vagy sebességű mozgások megvalósítására is alkalmas lehet valamint fogaskeréktömbben alkalmazva nagyon speciális mozgásviszonyokra is képes.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Mehmet YAZAR, Mithat YANIKÖREN - Spur gear design, manufacturing and noise analysis according to rolling method using complex numbers
- [2] Gépelemek 2. - Simon Vilmos, Kozma Mihály, Molnár László, Karsai Géza, Nguyen Huy Hoang, Király Csaba, Budapest, Műegyetemi Kiadó 2008
- [3] Gépelemek III. Fogaskerekek, második, javított kiadás, Dr. Vörös Imre, Tankönyvkiadó Budapest, 1977
- [4] Gépelemek 2. kötet, W. Tochtermann – F. Bodenstern, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1986
- [5] Beszéljünk a fogaskerekekről, Szeniczai Lajos, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1959