



# FIATAL MŰSZAKIAK TUDOMÁNYOS ÜLÉSSZAKA XVIII.

Kolozsvár, 2013. március 21–22.

## A SZÉLTURBINÁK HAJTÓMŰVEIKBEN ALKALMAZOTT FOGASKEREK CNC FOGKÖSZÖRÜLÉSE

**GYENGE Csaba**

### **Abstract**

Within this paper the authors describe a new finishing technology for manufacturing the complex gears with special profile corrections used in modern transmissions. The new theoretical meshing method was tested in practical experiments, the results of which being also presented in this paper.

**Keywords:** wind turbines, CNC manufacturing of gears.

### **Összefoglalás**

A dolgozat keretében egy új simítási technológiát ismertetek, a korszerű hajtóművekben alkalmazott profilkorrekciós komplex fogaskerek nagy pontosságú megmunkálására. Az elméleti profilszármaztatási módszert gyakorlati kísérletekkel ellenőriztük és ezek eredményeit is bemutatom.

**Kulcsszavak:** szélturbinák, fogaskerek, fogköszörülés.

### **1. Bevezető**

Mint ismeretes, a megújuló energiaforrások szerepe folyamatosan növekszik és a Greenpeace felbecsülései szerint 2050-ben Románia energiájának 85%-át megújuló forrásokból kell fedezze.

A román Statisztikai Hivatal adatai szerint [5] 2011-ben a 63.252 GWh kitermelt villamos energia 40% hőerőművekből származott, 22%- vízerőművekből, 16%- atomerőművekből és csak 4% szélenergiából. Az előrejelzések 2013-ig a termelt villamos szélenergia megduplázódik és így, remélhetőleg, Románia világviszonylatban a 13. helyre kerül a szélenergia felhasználása szempontjából.

Ismeretes, hogy a szélturbina a szél energiáját egy lapátszerkezet segítségével forgó, mozgássá alakító és azt hasznosító szerkezet. A szélturbina nem igényel jelentősebb karbantartást, rendkívül megbízható, és nincsenek káros hatásai a környezetre nézve. Háromfázisú áramot termel, melyet kis veszteséggel szállíthatunk igen nagy távolságokra transzformátorok segítségével. Egy turbina lapátjainak fordulatszáma  $n=15...60/\text{min}$  tartományba esik. Ezt az aránylag kis fordulatszámot sebességnövelő (multiplikátor) hajtóművekkel emelik az áramfejlesztők által igényelt magas fordulatszámra.

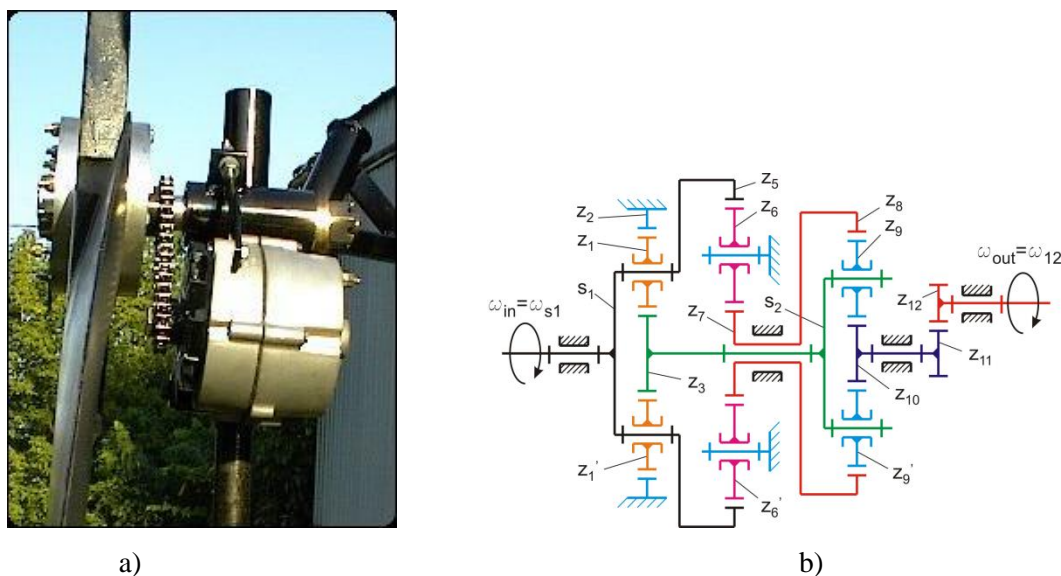
Egyelőre a szélturbinák felépítése meglehetősen bonyolult, az előállítási, valamint felszerelési költségeik továbbra is magasak, és az így előállított villamos energia ára egyelőre nagyobb, mint a hő- vagy vízerőművekben előállítotté. Viszont az állandóan csökkenő kőolaj- és széntartalékok arra

köteleznek, hogy minél intenzívebben foglalkozunk a szélturbinák további fejlesztésével. Kutató csoportunk, körülbelül 4 éve foglalkozik a szélturbináknál alkalmazott hajtóművek minőségi és gazdasági teljesítményének növelésével.

A következőkben röviden ismertetem ezirányú elméleti és kísérleti kutatásaink eredményeit.

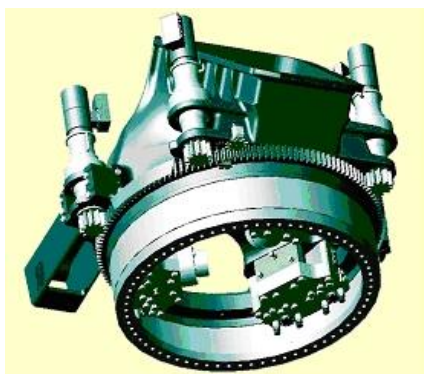
## 2. A szélturbináknál alkalmazott hajtóművek konstruktív és funkcionális jellemzői

A statisztikák szerint, [5] jelenleg az áramellátó rendszerekhez kapcsolt szélerőművek nagy része vízszintes tengelyű. A lapátok viszonylag alacsony sebességgel forgó tengelye a fordulatszámokszorozó hajtóműhöz kapcsolódik, amely tengelykapcsoló és fékrendszeren keresztül hajtja meg a generátort. Általában a fordulatonövelésre bolygó típusú hajtóműveket használnak, (1.ábra) amelyekkel nagy áttételi arányokat lehet elérni aránylag kis térfogattal.



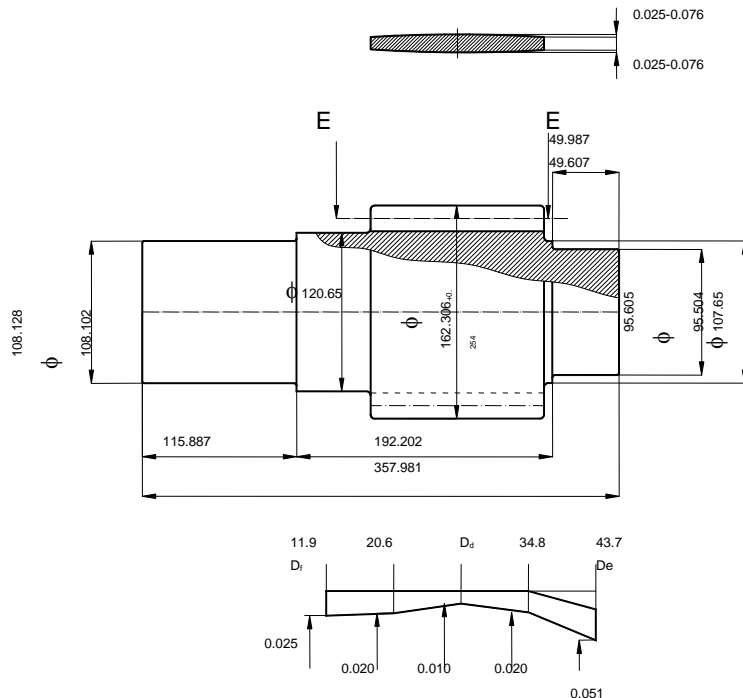
1. ábra. Szélturbinánál alkalmazott két lépcsős bolygóhajtómű :  
a) részlet b) mozgástani séma.

Szintén aránylag bonyolult fogaskerék rendszert alkalmaznak a szélirányba való forgatás érdekében (2. ábra).



2. ábra. A szélirányba forgató motorok és a gondola felerősítő karima

Gyakorlati kutatásaink keretében aránylag nagy modulú ( $m=8\ldots 14$ ), külső fogazatú profilkorrekciós hengeres fogaskerek simítási technológiájával foglalkoztunk (3. ábra).



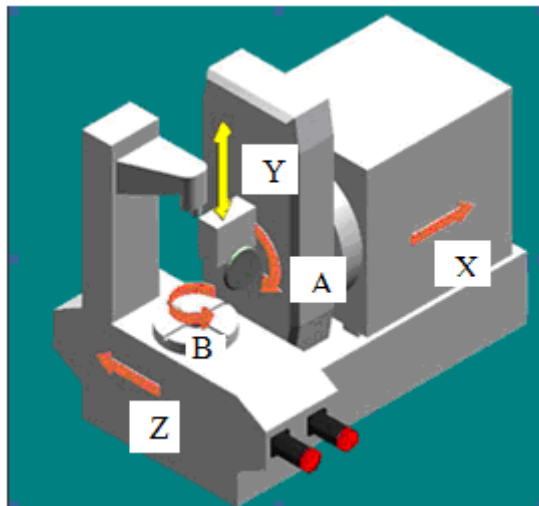
3.ábra. Profilkorrekciós fogaskerék műhelyrajza

### 3. Új technológia profilkorrekciós hengeres fogaskerek simítására

A szélturbinák hajtóműveiben alkalmazott különleges külső fogazatú fogaskerek a követelményeknek megfelelő simítása céljából a nagyváradi EMSIL TECHTRANS, valamint a szatmárnémeti UNIO cégekkel közösen felújítottunk egy hagyományos NILLES típusú fogkőszörűgépet. Ezt FANUC CNC berendezéssel láttuk el (4. ábra) annak érdekében, hogy számvezérlésű lefejtőfogkőszörűlést tudjunk megvalósítani.

A koordináta rendszer tengelyeinek szerepe:

- **X** tengely: a munkadarab tengely radiális beállítása;
- **Y** tengely: hosszirányú profilkorrekciók megvalósítására, valamint ferdefogú kerek köszörülésére;
- **Z** tengely: a gördítéshez szükséges tangenciális mozgás;
- **A** tengely: a munkadarab és koszorútárcsa tengelyek közti szög beállítása;
- **B** tengely: a gördítéshez szükséges munkadarab forgása.



4.ábra. A CNC fogköszörűgép koordináta rendszere

Általában egy fogárok lefejtő köszörüléséhez az 1. táblázatban feltüntetett műveletelemek szükségesek.

1 táblázat. Egy fogárok köszörüléséhez szükséges alap műveletelemek

A műveletlem száma	Műveletlem elnevezése
f0	A szerszám megfelelő beállítása az előmunkált fogárokba
f1	Beforgatás a bal fogoldal kezdőpontjába
f2	A szerszám és az előnagyolt bal fogoldal közötti játék kiiktatása
f3	A bal fogoldal köszörülése
f4	Átgördítés a jobb fogoldalra
f5	A szerszám és az előnagyolt jobb fogoldal közötti játék megszüntetése
f6	A jobb fogoldal köszörülése
f7	Egy foggal való osztás

Amint a táblázatból látható a 8 műveletből csak kettő aktív, de a gyakorlati megvalósítás érdekében valamennyi műveletlem legördülési paramétereit meg kell határozni.

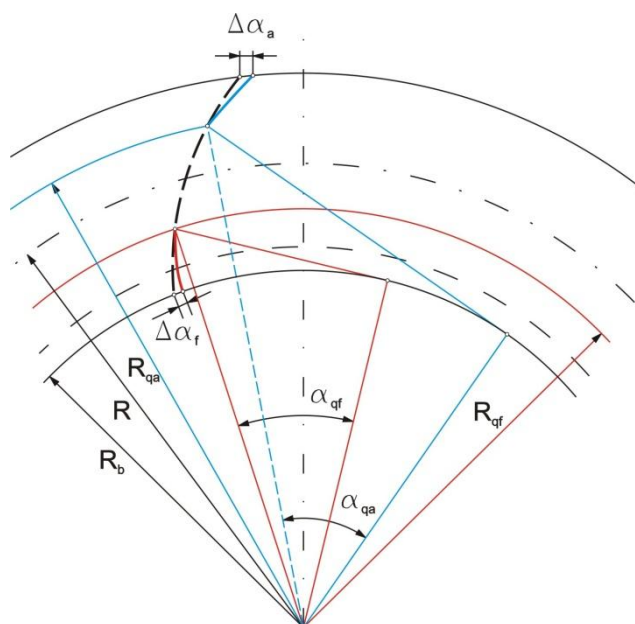
Ennek érdekében 6 algoritmust fejlesztettünk ki úgy, hogy valamennyi gyakorlatilag létező fogazatot megfelelően meglehessen köszörülni (2. táblázat).

2. táblázat. Kifejlesztett algoritmusok hengeres fogaskerek CNC köszörülésére

Szám	Algoritmus kódja	Elnevezése	Alkalmazási terület
1	Ag. 1.1.	Általános algoritmus profíleltolós dőltfogú fogaskerek számára	$R_f \leq R_b \cos \alpha_t$ $\alpha_t \neq \alpha_s$
2	Ag. 1.m	Módosított algoritmus profíleltolós és profilkorrektós dőltfogú fogaskerek	$R_f \leq R_b \cos \alpha_t$ $\alpha_t \neq \alpha_s$

		számára	
3	<b>Ag. 1m.x</b>	Módosított algoritmus profileltolásos és profilkorrekciós AGMA fogaskerekek számára	$R_f \leq R_b \cos \alpha_t$ $\alpha_t \neq \alpha_s$
4	<b>Bg. 1.1</b>	Általános algoritmus profilkorrekció nélküli egyenesfogú fogaskerekek számára	$R_f \geq R_b \cos \alpha_t$ $\alpha_t \neq \alpha_s$
5	<b>Bg. 1.m</b>	Módosított algoritmus profileltolásos és profilkorrekciós egyenesfogú fogaskerekek számára	$R_f \geq R_b \cos \alpha_t$ $\alpha_t \neq \alpha_s$
6	<b>Bg. 1.m.x</b>	Módosított algoritmus profileltolásos és profilkorrekciós AGMA ferdefogú fogaskerekek számára	$R_f \geq R_b \cos \alpha_t$ $\alpha_t \neq \alpha_s$

A profilkorrekciós fogazatok köszörülésénél az  $f_3$  és  $f_6$  műveletelemek három részre bomlanak az 5. ábrán feltüntetett fogkialakítási megoldás érdekében.



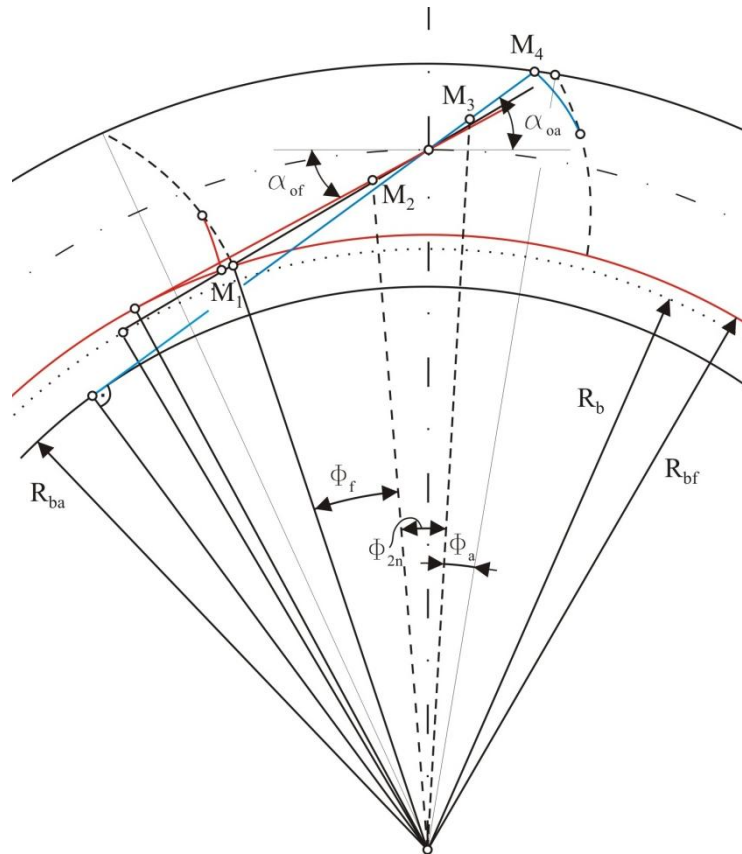
**5.ábra.** Az általunk javasolt módszer a profilkorrekciós fogfelület megvalósítására.

A profilkorrekciók jellegzetes paraméterei a következők :

- $\Delta \alpha_a$  - fogfej profilkorrekció nagysága a fejkörön;
- $\Delta \alpha_f$  – fogláb korrekció nagysága a lábkörön;
- $R_{qa}$  – fogfej korrekció kezdete;
- $R_{qf}$  – fogláb korrekció kezdete.

#### 4. A profilkorrekciós fogazatok folytonos burkolása és köszörülésére kifejlesztett módszer

A profilkorrekciós fogaskerek folytonos köszörülése céljából, a fogprofil burkolását három különböző paraméterű evolvens szakasszal oldottam meg (6. ábra).



6. ábra. A fogoldal burkolása három evolvens szakasszal

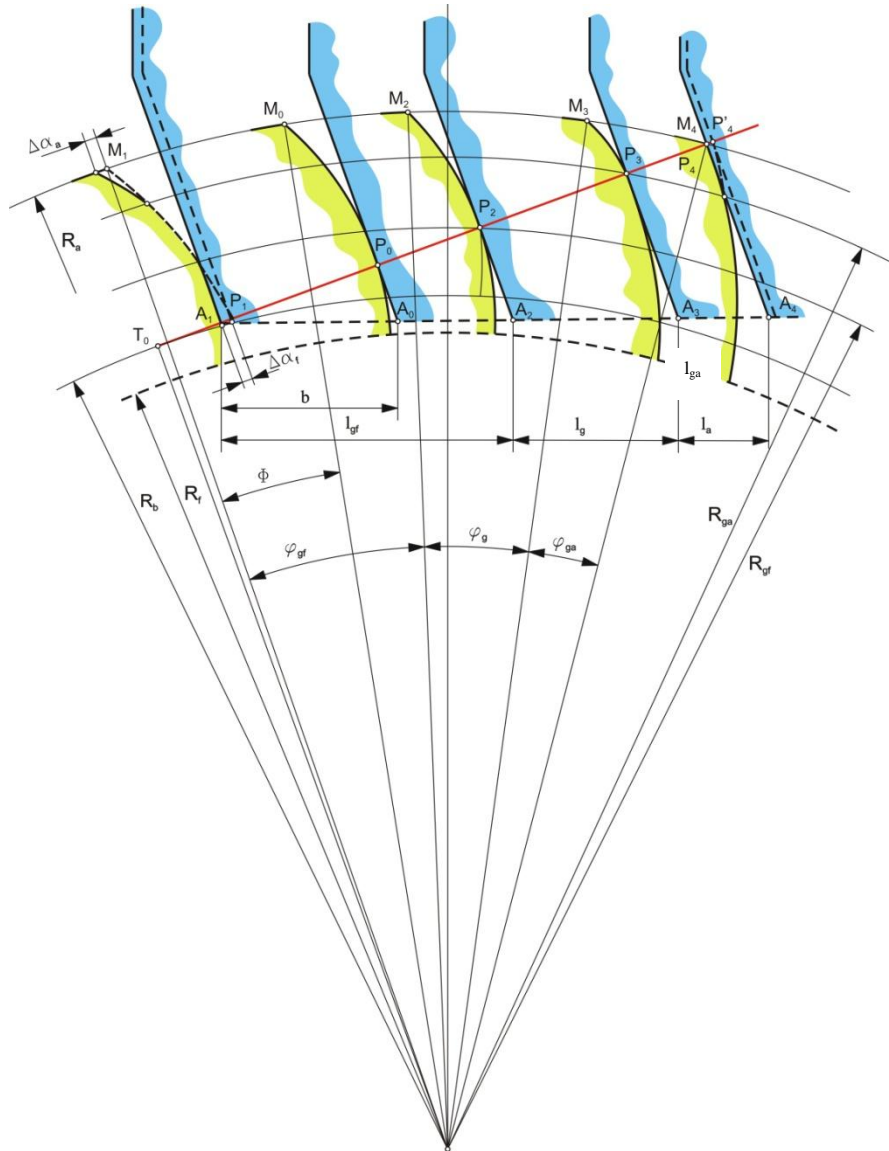
A három szakasz CNC vezérléssel való burkolása céljából változó nagyságú legördülési sebességet alkalmaztam. Így a kapcsolóvonal is három szakaszból áll:  $\overline{M_1M_2}, \overline{M_2M_3}, \overline{M_3M_4}$  és a burkolás  $R_{bf}, R_b, R_{ba}$  sugarú alapkörökön történik.

A CNC vezérlés programozása érdekében meg kellett határozni az **OZ** tengely irányban való  $l_{gf}, l_g, l_{ga}$  mozgásokat, valamint a **B** tengely körüli  $\varphi_{gf}, \varphi_g, \varphi_{ga}$  forgásokat (7. ábra).

A fenti paraméterek meghatározása céljából részletes algoritmusokat dolgoztunk ki különböző típusú fogaskerek számára (lásd. 2. táblázat)

A 3. táblázatban a DIN szabványok szerint kilakított egyenes fogú fogaskerekek köszörüléséhez szükséges paraméterek meghatározásához felépített egyenleteket foglaltam össze abban az esetben, amikor  $R_f \geq R_b \cos \alpha_t$  és a fogazat  $\alpha_t$  homlokkapcsolószöge nem egyenlő a köszörűszerszám  $\alpha_s$  profilszögével.

A kifejlesztett eljárás egyik előnye éppen az, hogy bármilyen kapcsolószögű fogazatot meglehetősen könnyű ugyanazzal a tárcsaalakú köszörűszerszámmal.



7. ábra. A köszörű szerszám és fogoldal jellegzetes relatív helyzete

3. táblázat. A programozáshoz szükséges paraméterek meghatározása

Szakasz	Z irányú tangenciális elmozdulás	B tengely körüli forgás
Lábszakasz	$l_{gf} = - \left[ \frac{1}{\cos \alpha_s} \left( \sqrt{R_{af}^2 - R_b^2} + \Delta \alpha_f \right) \right]$	$\varphi_{gf} = \frac{\sqrt{R_{af}^2 - R_b^2}}{R_b} - \frac{\Delta \alpha_f}{R_f}$
Közép szakasz	$l_g = - \frac{1}{\cos \alpha_s} \left[ \sqrt{R_{qa}^2 - R_b^2} - \sqrt{R_{gf}^2 - R_b^2} \right]$	$\varphi_g = \frac{\sqrt{R_{qa}^2 - R_b^2} - \sqrt{R_{gf}^2 - R_b^2}}{R_b}$
Fejszakasz	$l_{ga} = - \left[ \frac{\sqrt{R_a^2 - R_b^2} - \sqrt{R_g^2 - R_b^2}}{\cos \alpha_s} - \Delta \alpha_a \right]$	$\varphi_{ga} = \frac{\sqrt{R_a^2 - R_b^2} - \sqrt{R_{qa}^2 - R_b^2}}{R_b} - \frac{\Delta \alpha_a}{R_a} + \Delta \alpha_f$

A mozgások ellenőrzése céljából a *legördülési sebességet* a következő képlettel határozzuk meg:

$v_r = \frac{b}{\phi}$ ,  $\left[ \frac{mm}{rad} \right]$ , ahol  $b$  - a tangenciális (**Z** irányú mozgás nagysága);  $\Phi$ - a **B** tengelykörüli forgás nagysága.

Ez a sebesség kis- de lényeges mértékben változik a fog mentén (lásd az 5 táblázatot).

## 5. Gyakorlati kísérletek és tesztelések

A gyakorlati kutatásaink keretében ( a Szatmárnémeti UNIO gépgyárban ) 8...12 modulú és  $z = 14...60$  fogszámú, különböző típusú fogaskerekeket készítettünk és ellenőriztünk. A jellegzetes teszt fogaskerekek adatai az 4. táblázatban láthatók.

4. táblázat. A teszt fogaskerekek alapadatai

Szám	Típus	$m_n$	$z$	$\alpha$	$\beta$	Profil eltolás	Profil korrekciók
1. kerék	DIN	12	18	$20^0$	0	0	-
2. kerék	AGMA	10,808511	30	$28^0$	0	0	$\Delta\alpha_f = 0,027$ $\Delta\alpha_a = 0,033$
3. kerék	DIN	8	70	$20^0$	$10^0$ (balos)	$x = -0,411$	-
4. kerék	DIN	8	16	$20^0$	$10^0$ (jobbos)	$x = 0,411$	-
5. kerék	DIN	12	14	20	0	0	-
6. kerék	AGMA	10,948275 (DP-2,32)	18	$25^0$	0	0	$\Delta\alpha_f = \Delta\alpha_a = 0,038$

Példaképpen a 5. táblázatban 2. számú, ANSI/AGMA 2000.ABB szabvány szerint tervezett komplex profilkorrekciós teszt fogaskerék programozásához meghatározott paramétereket ismertetem.

A fogazat jellemző adatai:

$$z = 30, m = 10,808, R = 162,128, R_a = 173,798, R_b = 143,15053, R_f = 148,646, \square \alpha = 28^0, \alpha_s = 20^0$$

$$\Delta\alpha_f = 0,027, \Delta\alpha_a = 0,034$$

$$R_{qa} = 168,25631, R_{qf} = 155,69823, R_H = 151,53168$$

5. táblázat. 2.számú próba fogazat programozási adatai



Szám	Elnevezés	Szakasz	B tengely körüli forgatás ( fokban)	Z tengelyirányú mozgás, mm	Gördülési sebesség mm/fok
0	Központosítás	-	-	-	-
1.	Begördítés a BAL oldal kezdőpontjára	-	$\Phi^* = - 7,58278$	$b^* = + 21,4618$	<b>2,8300</b>
2	Oldaljáték kiiktatása	-	-	$\Delta_g = B_{fog} - B_{sz}$	-
3.	Bal oldal köszörülése	láb	$\varphi_{qf} = + 4,60081$	$l_{qf} = - 13,103669$	<b>2,8435</b>
		közép	$\varphi_g = + 10,88033$	$l_g = - 30,787725$	<b>2,82966</b>
		fej	$\varphi_{ga} = +4,04636$	$l_{ga} = - 11,51588$	<b>2,84597</b>
4	Átgördülés a jobb oldalra	-	$\square \Phi^* = - 7,58278$	$\Delta b = 12,480037$	<b>2,8303</b>
5	Oldaljáték kiiktatása	-	--	$2 \Delta_g$	
6	Bal oldal köszörülése	láb	$\varphi_{qf} = - 4,60081$	$l_{qf} = + 13,10366$	<b>2,8435</b>
		közép	$\varphi_g = - 10,8803$	$l_g = + 30,7877$	<b>2,82966</b>
		fej	$\varphi_{ga} = - 4,04636$	$l_{ga} = +11,51588$	<b>2,84597</b>

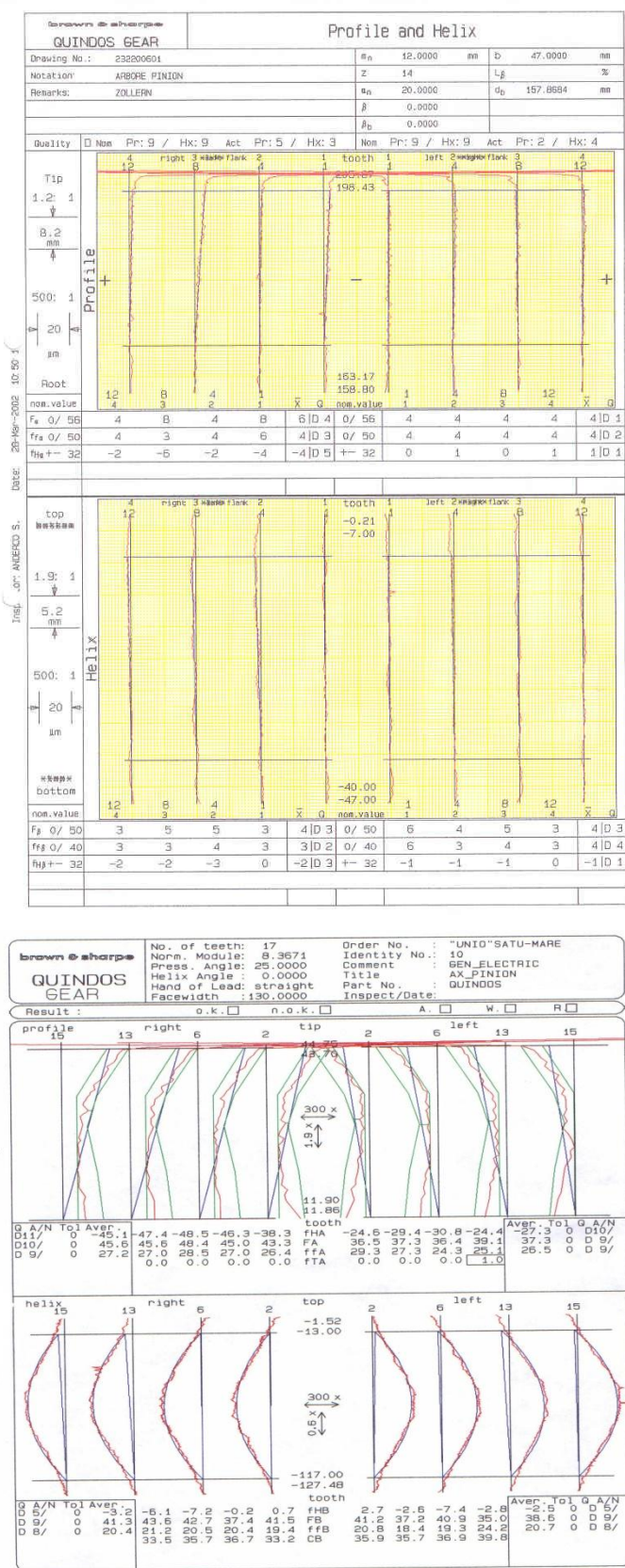
Az algoritmusok gyors megoldása érdekében megfelelő programokat állítottunk fel a MATHEMATIKA szoftver segítségével.

A legyártott fogaskerekeket egy GIBLI-TRAX digitális univerzális mérőközpont ellenőriztük a QUINDOS program segítségével (8.ábra).

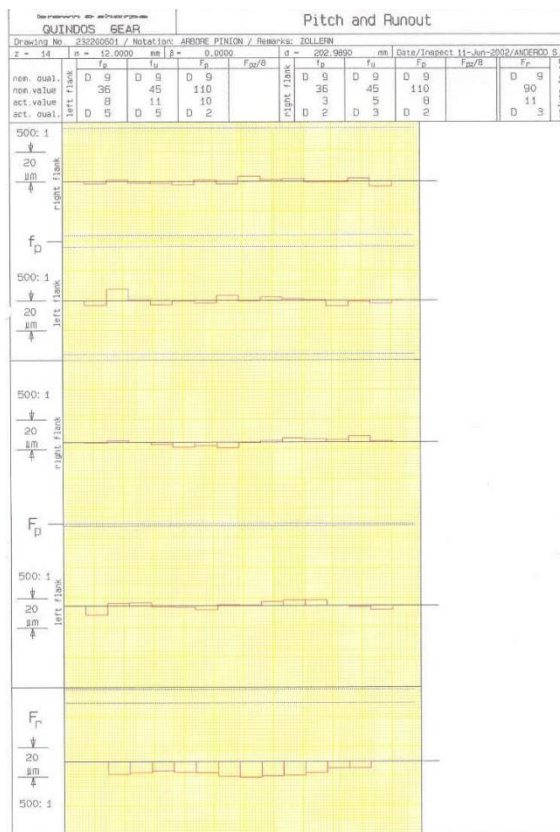


**8.ábra.** Az UNIO gyár tulajdonában lévő univerzális mérőközpont

A 9. ábrán két teszt fogaskerék normálmetszeti foggörbe és fogirány mérési diagramjai láthatók és a 10. ábrán egy z=14 fogú tesztkerék osztás és radiálütési diagramjai.



9. ábra. A foggörbe és fogirány mérési diagramjai



10 ábra. A  $z = 14$  fogszámú tesztkerék osztás és radiál ütések mérési diagramjai

A 6. táblázatban az 1sz. tesztkerék mérési eredményei láthatók.

6. táblázat. Az 1. tesztkerék mért pontossági paramétere

Szám	Paraméter	Nominális érték 9 DIN $\mu\text{m}$	Mért eltérés, $\mu\text{m}$		Effektív pontossági osztály	
			Bal	Jobb	Bal	Jobb
1	Homlokosztás hiba $f_p$	36	8	3	5	2
2	Osztáslépés hiba $f_u$	45	11	5	5	3
3	Összegezett osztáshiba $F_p$	110	10	8	2	2
4	Radiális ütés $F_r$	90	11		3	
5	Összegezett profil hiba $F_\alpha$	0/56	4...8	4	4	4
6	Összegezett fogirány hiba $F_\beta$	0/50	3...6	3...5	3/4	3/4
7	Fogirányszög eltérés $f_{H\beta}$	$\pm 32$	0...-1	-2...-3	1	3
8	Fogirány alak eltérés $f_{f\beta}$	0/40	3...6	3...4	4	3

A táblázatban szereplő adatok értelmezése alapján a következőket állapíthatjuk meg:

- a mérések azt mutatják, hogy a kifejlesztett CNC eljárással készült fogaskerekek különböző pontossági paramétere a DIN 3962 szabvány szerint az 5 osztályba sorolhatók, ami véleményünk szerint igen biztató eredmény.

## 5. Következtetések

Amint a bevezetőben is említettem, a statisztikai előrejelzések szerint 2030-ban a világ összenergia szükséglete kb.50%-al lesz nagyobb a mostanihoz viszonyítva. A kőolaj és földgáz tartalékok, szintén az előrejelzések szerint, alig 2040...2070-ig tudják fedezni a szükségleteket (a kőszén tartalékok állítólag még 200 évig is megmaradnak).

A fentiek következtében, a szakemberek mind jobban kell figyeljenek a felújuló energiaforrásokra, és így mind nagyobb fejlődés észlelhető a szélenergiát felhasználó turbinák fejlesztésében és gyártásában.

A szélturbinák minél környezetkímélőbb működése és élettartalma nagy mértékben függ a beépített hajtóművektől is. Ezek szerint úgy értékelhetjük, hogy a fentiekben ismertetett ezirányú kutatásaink hozzájárulhatnak e turbinák felépítési és működési paramétereinek javításához.

Természetesen, eddigi eredményeink – egyelőre – csak a szóbanforgó fogazatok egyedi és kissorozatban való gyártására irányultak. A következőkben tovább kell fejlesszük a módszereinket annak érdekében, hogy a nagy sorozatgyártásban is eredményesen lehessen alkalmazni.

## Irodalom

- [1] Bonori, G.: *Optimum profile modifications of spur gears by means of genetic algorithms*, Journal of Sound and Vibration Volum 313, Issue 3-5,17 June 2008, 603-616 oldal.
- [2] Gyenge, Cs., Mera, M., Bâlc, N.: *Research on Calculating the Parameters Value for Modification the Longitudinal Profile of the Cylindrical Gears*, Poceedings of DAAAM 2001, 24-27 Okt. Jena. ISBN 3-901-19-4, 175-176 oldal.
- [3] Gyenge, Cs., Bob,M, Bob, D.: *Measurment of a spur gear on a BROWN&SHARPE GHIBLI TRAX machine using QUINDOS*. Anals of DAAAM for 2006 proceedings, Vienna. ISSN 1726-9679, 151-152 oldal.
- [4] Gyenge Cs., Bob, M., Ros, O.: *Some characteristic aspects regarding grinding of spur gears with profil modifications*. In: The 20th DAAAM INTERNATIONAL SYMPOSIUM "Intelligent Manufacturing & Automation, ISSN 1726-9679, 645-646 oldal.
- [5] Rafa A., Gyenge Cs.: *Some specific aspects regarding the manufacturing of renewable energy exploitation equipment*, MicroCAD International Scientific Conference. Miskolc 2010, ISBN 978-963-661-4. ISBN 978-963-661-823-0, 191-196 oldal.
- [6] Gyenge, Cs., Varga, A., Gyenge, Z., Szilágyi,Á.: *CNC és környezetbarát technológiák fejlesztése a hemgeres fogaskerekek korszerű gyártása céljából az Erdélyi gépipari vállalatokban*, Kutatási Tanulmány. SAPIENTIA Kutatási Programok Intézete, 2005.

**Gyenge Csaba**, PhD. Professzor emeritus

Kolozsvári Műszaki Egyetem; 400641 Cluj-Napoca; B-dul Muncii 103-105

Csaba.Gyenge@tcm.utcluj.ro