

## Szakmai zárójelentés

### I.2. A kutatás eredményeit összefoglaló jelentés

#### 1. Térbeli hajtások jellemzőinek összefoglalása a nemzetközi szakirodalom és a saját eredményeink alapján. Az egyes jellemzők és a hajtás típusok közötti összefüggések rendszerezése, vizsgálati módszerek kidolgozása.

A hengeres és kúpos csigahajtások gyártásgeometriájának újszerű leírása került kimunkálásra. A gyakorlatban mindezidáig vannak közelítő megoldások, de a gyártási pontosság növelése érdekében ezen eljárások bővítésére irányult a munkánk, hiszen erre a tudomány és a technika fejlődése egyben lehetőséget is ad és igényt is támaszt.

A hagyományos menetkőszörű gépek változó tengelytáv mellett nem képesek dolgozni, így a kúpos csigák köszörülésekor az állandó szögsebesség a változó kerületi sebesség többek között profiltorzulást okoznak, valamint a nagyobb nyílásszögű kúpos felületek megmunkálására sem alkalmasak. Ezért volt indokolt a változó tengelytávval való megmunkálással foglalkozni. A kutatómunka során egy állandó emelkedésű hengeres és kúpos csavarfelületek geometriailag helyes megmunkálásához szükséges elmélet, azaz a hengeres, és a kúpos csavarfelületek, és a hozzájuk szükséges szerszámok gyártásgeometriájának kezelésére alkalmas **új kinematikai modellt kifejlesztése készült el** változó technológiai tengelytáv esetén. Az új kinematikai modellben a korábbiaktól eltérően az a technológiai tengelytáv gyártás közben változhat úgy, hogy a kúpos és a hengeres csavarfelület közös tengelyen vannak értelmezve. Ezen modell felfogás egy új CNC gép létezését feltételezi (szabadalmaztatása a jövőben esedékes), amellyel változó tengelytáv ( $a_1 = a_0 \pm p \cdot \varphi_1$ ) esetén a geometriailag helyes gyártás lehetséges.

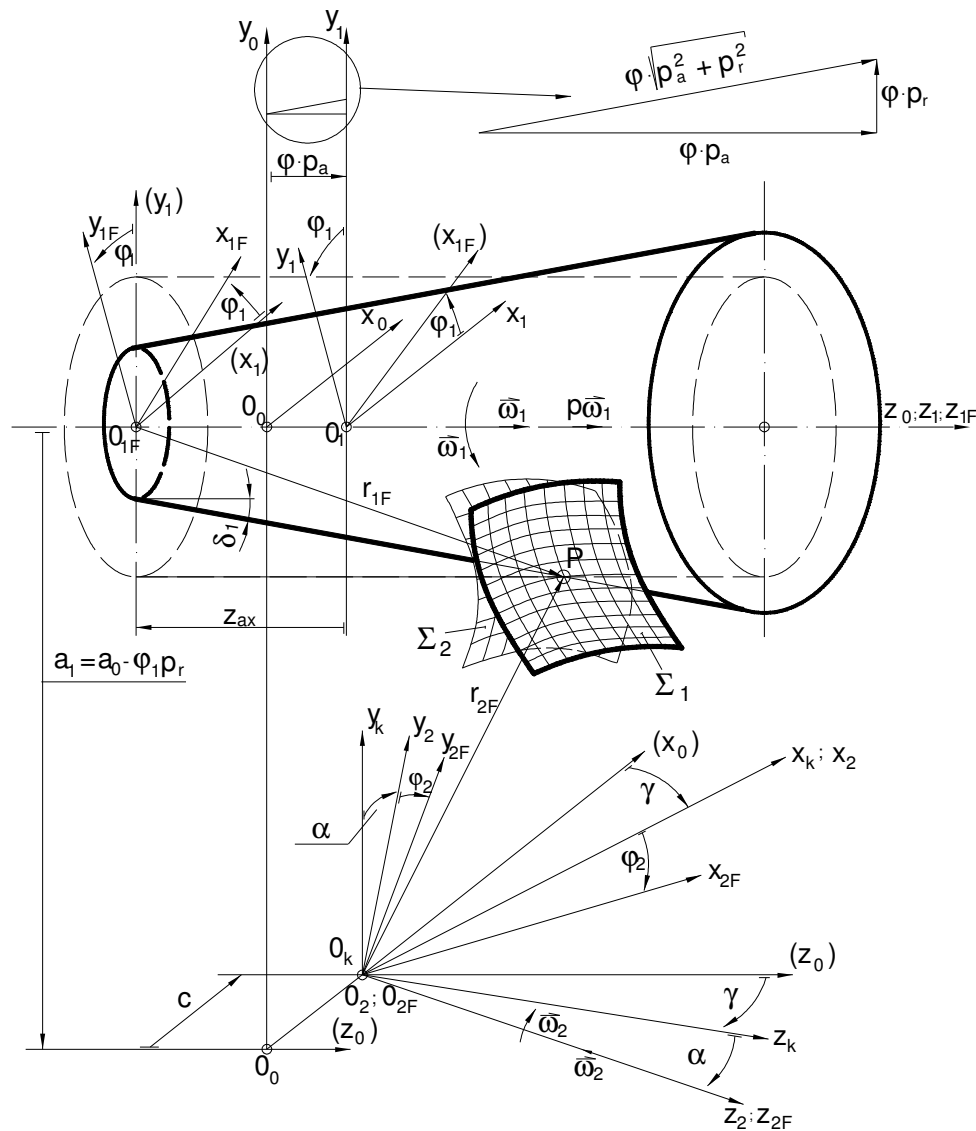
#### *A feladat megoldásának módszere:*

A hengeres és kúpos csavarfelületek és szerszámaik geometriájának vizsgálatára a Dudás-féle összevont általános matematikai modell (HeliMAT) ismeretében lett egy új kinematikai modell került kifejlesztésre, amely alkalmas a hengeres és kúpos csigahajtások, és megmunkálásuk egy matematikai modellben való kezelésére a hengeres és kúpos csigák azonos tengelyvonala esetén (1. ábra).

#### **Az alkalmazott jelölések és koordináta-rendszerek:**

|             |  |
|-------------|--|
| $a=a_1$     | a szerszám koordináta - rendszere ( $O_2$ ) kezdőpontjának y irányú koordinátája a $K_0$ álló koordináta-rendszerben   |
| c           | a szerszám koordináta - rendszere ( $O_2$ ) kezdőpontjának x irányú koordinátája a $K_0$ álló koordináta-rendszerben, a szerszám kiemelés távolsága (pl. konvolut vagy evolvens csiga esetén a torokhenger, illetve alaphenger sugara) |
| $z_{ax}$    | a csiga álló koordináta-rendszere kezdőpontjának $z_1 \equiv z_{1F}$ tengelymenti koordinátája a csiga forgó koordinátarendszerében  |
| $\varphi_1$ | a csavarfelület elfordulásának szöge, (szögelfordulási-, burkolási-, ill. mozgás-paraméter)  |
| $\varphi_2$ | a szerszám elfordulásának szöge (maró v. köszörűkorong)  |
| $i_{21}$    | $i_{21} = \varphi_2 / \varphi_1$ áttétel   |
| $\gamma$    | a szerszámnak a – hengeres csavarfelület osztóhengeri menetemelkedési szögével való – bedöntése  |

- $\alpha$  a szerszámnak a csavarfelület profiljára való döntésének a szöge, a jellegzetes metszetben (pl: evolvens csavarfelület köszörülése sík homloklfelületű köszörűkoronggal)
- $p$  a menetemelkedés csavarparamétere
- $p_a$  az axiális irányú csavarparaméter
- $p_r$  radiális irányú csavarparaméter



**1. ábra: Koordináta-rendszerek kapcsolata hengeres, illetve kúpos csavarfelületek és szerszámaik gyártásméletének általános vizsgálatánál**

**A koordináta-rendszerek az alábbiak szerint értelmezettek:**

- $K_0(x_0, y_0, z_0)$  álló koordináta-rendszer, a megmunkáló szerszám gép koordináta-rendszere
- $K_1(x_1, y_1, z_1)$  a lineáris mozgást végző gépasztalhoz kötött koordináta-rendszer
- $K_{1F}(x_{1F}, y_{1F}, z_{1F})$  csavarmozgást végző koordináta-rendszer, a csavarfelület koordináta-rendszere, melyben meghatározásra kerül a csavarfelület  $\eta, \vartheta$  paraméteres egyenlete

- $K_2(x_2, y_2, z_2)$  álló koordináta-rendszer, a szerszám koordináta-rendszere, melynek  $z_2$  tengelye egybeesik a korong  $z_{2F}$  tengelyével.
- $K_{2F}(x_{2F}, y_{2F}, z_{2F})$  a szerszámhoz kötött forgó koordináta-rendszer
- $K_k(x_k, y_k, z_k)$  segéd koordináta-rendszer
- $K_{sz1}(\xi, \eta, \zeta)$  a generálgörbe koordináta-rendszere

A kinematikai modell kimunkálására alkalmazott matematikai eszközök, úgy, mint a homogén koordinátákat alkalmazó transzformációs mátrixok műveleteinek- mátrix-mátrix, mátrix-vektor szorzások- eredményének ellenőrzése a DERIVE szoftverrel megtörtént.

**Eredmény:** Korábbi, hengeres csigák, és szegnyereg elállítással kúpos csigák megmunkálása során fellépő problémának kiküszöbölésére - miszerint a menesztőszívvel történő forgásátadás a kúpos csigák megmunkálása esetében a munkadarabnál szögsebesség-ingadozást okoz, - olyan új kinematika matematikai leírását dolgoztunk ki, amelyben a tengelyek távolsága megmunkálás közben változva teszi lehetővé a kúpos csigaalak követését, kiiktatva ezáltal a csiga forgásának szögsebesség ingadozását.

A modell megfelelő paraméterválasztással alkalmas:

- hengeres és kúpos csavarfelületek forgásfelülettel (például köszörűkoronggal ( $f_3$ )) történő megmunkálásának elemzésére,
- hengeres és kúpos csigák ( $f_1$ ) és csigakerekek ( $f_2$ ) kapcsolódásának vizsgálatára, {9, 42}
- hengeres és kúpos lefejtőmaróval ( $f_4$ ) történő csigakerék fogazás modellezésére, függetlenül a csavarfelület profiljától,
- hengeres és kúpos lefejtőmarók ( $f_4$ ) és az azt megmunkáló forgás felületű szerszám (például csapos korong ( $f_3$ )) vizsgálatára.

## 2. A konjugált felületepárok szingularitás és alámetszés feltételeinek elemzése a geometria és gyártásgeometria vonatkozásában.

Az új kinematikai modellben a direkt eljárás folyamatában a hengeres csigák megmunkálása esetén a köszörűkorong kopásból adódó változó tengelytáv, egyben a korongprofil utánszabályozása miatt változatlan profil figyelembevételével a karakterisztikus görbe-változások vizsgálatának módsze került kimunkálásra, amely alapjául szolgálhat az alámetszés és az elhordás elkerülésének.

### A feladat megoldásának módszere

Az ismertett új kinematikai modellben kidolgozott direkt eljárás során adott csigaprofilhoz tartozó köszörűkorong kopásból adódó tengelytáv változását az érintkezés törvényeinek figyelembevételével végeztük el. A vizsgálat elvégzéséhez készült egy számítógépes program, melynek segítségével a következő vizsgálatok elvégzése vált lehetővé:

A korongkopásból a profil után szabályozásával változatlan korongprofil mellett az alámetszés, illetve elhordás elkerülésének céljából a tengelytáv változás határa állapítható meg.

A feladat kidolgozásra került a tengelymetszetben körív profilú csiga és az azt megmunkáló köszörűkorong esetére.

**Eredmény:** Meghatározásra került a direkt eljárás folyamatában a hengeres és kúpos csigák ( $f_1$ ) megmunkálásakor a köszörűkorong ( $f_3$ ) kopásból adódó változó tengelytáv figyelembevételével a karakterisztikus görbe-változások vizsgálatának módszere. Az

**ebből adódó karakterisztikus görbe-változások alapul szolgálnak a korongprofil utánszabályozásának beállításához. {47}**

Ennek a módszernek az kimunkálásával a köszörűkorong kopás határa vizsgálhatóvá vált. Ezt a problémát a kimunkált kinematikai matematikai modell, illetve a kifejlesztett számítógépes program révén konkrét esetek vizsgálatára alkalmasnak, azaz megoldottnak tekinthetjük.

### **3. Modifikációk jellegének és mértékének meghatározása. Modifikációk hatásának vizsgálata a kapcsolódás jellemzőire. Új geometriájú korszerű hajtások elemzése a hordkép lokalizálás szempontjából.**

**A kutatómunka során megfogalmazásra került probléma:** Az érintkezési viszonyok javításának és a teherbírás növelésének egyik módja a terhelés alatti érintkező felület hidrodinamikai szempontból kedvező tartományra való korlátozása, a **hordkép lokalizálása**.

A jelen munkában elkészült közös tengelyű hengeres és kúpos csigahajtások kinematikai modelljének matematikai leírása során a kapcsolódó felületekkel kívánunk foglalkozni.

A hordkép alapvetően meghatározza a hordképes kenőfilm kialakulását és a hajtópár teherbírását, élettartamát, valamint a többi üzemi jellemzőit.

Bár a hajtópár típusa (geometriai kialakítása) ezeket a tulajdonságokat bizonyos határok között determinálja, de a hajtás típusára jellemző paraméterek célszerű megválasztásával az adott cél szerinti maximum, *a lehetséges intervallumon belül helyes tervezéssel elérhető, illetve több cél esetében van optimalizálásra lehetőség.*

**Célkitűzés:** Regressziós fogfelületek numerikus számítással kapott, a hordkép elhelyezkedését meghatározó pontjainak geometriai vizsgálata. A pontokkal **adott hordkép határoló görbéinek matematikai modellezése, érintkezési görbék elhelyezkedés meghatározása.**

A **hordkép** lokalizáláshoz a hajtás geometriai paraméterei és a hordkép geometriai paraméterei közötti kapcsolat vizsgálata.

#### ***A feladat megoldásának módszere***

A kapcsolódó csiga-csigakerékpár esetén az érintkezési vonalak elhelyezkedésére ható geometriai paraméterek vizsgálatához az új kinematikai modell matematikai leírása alapján számítógépes program készült.

Az érintkezési vonalak előállítását szolgáló számítógépes program működési elve:

A bemenetként átadott adatokból kiszámolja az eljárás megkezdéséhez szükséges implicit formájú egyenletrendszer. A kereső eljárás a peremfeltételeknek megfelelően kiszámolja az érintkezési pontokat a kerék fogfelületén. Az eredményül előállt ponthalmazt érintkezési görbék pontsorává alakítja. Meghatározásra került az érintkezési csomópontok helyzete és nyílásszöge, a hordképet meghatározó úgynevezett szélső pontsorra illeszkedő Bézier-görbe egyenlete, valamint a területarányok vizsgálata is megtörténik. Végül az eredményekből az optimális paramétereket kiválaszthatjuk.

**Eredmény:** Hordkép lokalizálás és geometriai paraméterek (az a tengelytáv, a p menetemelkedési paraméter, a csiga tengelymetszetbeli görbéjét meghatározó paraméterek, úgymint körív esetén a körív középpontjának és a csiga tengelyének a K távolsága, a körív  $\rho_{ax}$  sugara,  $x_2$  profileltolási tényező), valamint a kerék fogfelület és a hordkép területarányának kapcsolatát tártam fel az előírt kapcsolódási feltételek alapján.

A hordkép határ görbéit pontsor helyett Bézier-görbékkel írtuk fel, ezáltal a hordkép egésze analitikusan kezelhetővé vált.

## Megállapítottuk a csigahajtás tervezési, geometriai paramétereit a helyes kapcsolódás érdekében. {3}

### 4. Regressziós felületek geometriai vizsgálata, modellezése.

A hajtópár két tagja, illetve az egyik tag és megmunkáló szerszámra a viszonylagos mozgásban burkolja egymást, kapcsolódásuk az érintkezési vonal mentén történik.

A kinematikai modell kimunkálására alkalmazott matematikai eszközök, úgy, mint a homogén koordinátákat alkalmazó transzformációs mátrixok műveleteinek- mátrix-mátrix, mátrix-vektor szorzások- eredményének ellenőrzése DERIVE szoftverrel történt.

Az új kinematikai modellben, tengelymetszetben körívvel megadott profilgörbéjű csiga felületét megmunkáló szerszámfelület, a vizsgált esetben köszörűkorong, direkt módszer szerinti elemzése készült el a lineáris algebrai módszerek, a differenciálgeometriai módszerek alapján. A kapcsolódás elvén a csigát megmunkáló köszörűkorong karakterisztikus pontjai kerültek meghatározásra. Az implicit formájú karakterisztikus görbe pontjaihoz numerikus számítási módszerrel jutottunk. A pontsorból ponttranszformáció alkalmazásával számítottuk ki a korong profilgöbéjének pontjait. A profil legyártásakor az eljárás során megkapott pontsorra egy interpolációs Bézier-görbét, melyhez. programozástechnikai és gyátrásgeometriai szempontból egyszerre alkalmas, a [0,1] zárt intervallumra értelmezett húrhossz szerinti paraméterezést vezettünk be. A feladat megoldására számítógépes program készült. A hengeres, tengelymetszetben körív profilú csiga esetére egy példát dolgoztunk ki. A konkrét példa esetében a geometriai pontosságra vonatkozó vizsgálat elemzése jól rámutat a módszer helyességére, mely az NC vezérlésekhez a görbe ívének követése tekintetében pontosabb eredményt adhat.

Egy, minél kisebb fokszámú, és minél egyszerűbb függvénnyel leírható interpolációs görbét kell meghatározni, mely illeszkedik az adott pontokra az adott paraméterezés szerint. Egy lehetséges megoldás a sok közül az interpolációs Bézier-görbe.

Meg kell keresni azokat a  $\mathbf{b}_0, \mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{b}_n$  kontrollpontokat, amelyek által meghatározott Bézier-görbe az adott  $\mathbf{p}_0, \mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_n$  pontokon halad át, azaz

$$\mathbf{b}(u) = \sum_{j=0}^n B_j^n(u) \mathbf{b}_j, \quad (1)$$

ahol

$$B_j^n(u) = \binom{n}{j} u^j (1-u)^{n-j} \quad (2)$$

Bernstein polinomok. A következő lineáris inhomogén egyenletrendszert kapjuk:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{p}_0 \\ \mathbf{p}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{p}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_0^n(u_0) & B_1^n(u_0) & \cdots & B_n^n(u_0) \\ B_0^n(u_1) & B_1^n(u_1) & \cdots & B_n^n(u_1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_0^n(u_n) & B_1^n(u_n) & \cdots & B_n^n(u_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{b}_0 \\ \mathbf{b}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{b}_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

Az  $u_i \neq u_j$  feltétel egyértelmű megoldást biztosít minden  $\mathbf{b}_{i_0}$ -ra. Így megkapjuk a  $\mathbf{b}_{i_0}$  kontrollpontjait a  $\mathbf{p}_0, \mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_n$  pontokon áthaladó Bézier-görbének.

Adott az egyik tag felülete a forgó koordinátarendszerben:

$$\mathbf{r}_{1F} = \mathbf{r}_{1F}(\eta, \vartheta) \quad (4)$$

$$\mathbf{r}_{1F} = x_{1F}(\eta, \vartheta)\mathbf{e}_x + y_{1F}(\eta, \vartheta)\mathbf{e}_y + z_{1F}(\eta, \vartheta)\mathbf{e}_z \quad (5)$$

Ennek normálvektora:

$$\mathbf{n}_{1F} = \frac{\partial \mathbf{r}_{1F}}{\partial \eta} \times \frac{\partial \mathbf{r}_{1F}}{\partial \vartheta} \quad (6)$$

A két tag közötti relatív sebességvektor meghatározható:

$$\mathbf{v}_{1F}^{(12)} = \mathbf{M}_{1F,2F} \cdot \frac{d}{d_t} \mathbf{M}_{2F,1F} \cdot \mathbf{r}_{1F} \quad (7)$$

ahol  $\mathbf{M}_{1F,2F}$  és  $\mathbf{M}_{2F,1F}$  transzformációs mátrixok.

A felület egyenlete egy adott koordináta a rendszerben felírható és ebben az esetben a mért pontok koordinátái az egyenlet alapján meghatározhatók, majd az elméleti pontok koordinátaival összevetve határozhatók meg az eltérések. Ebben az esetben viszonylag kevés mérési pont alapján is elvégezhető a felület geometriai minősítése.

A kiértékelt eredmények nyújtsanak lehetőséget a hibás technológiai paraméterek meghatározására.

Megtörtént a kapcsolódási viszonyok meghatározása a hordkép vonatkozásában.

**Érintkezési vonalak elhelyezkedésére ható geometriai paraméterek vizsgálata tengelymetszetben körív profilú csiga és csigakerék vizsgálata esetén és a csomópontok elhelyezkedését vizsgáltuk.**

**Összegzésül elmondható, hogy a** hengeres és kúpos csiga fogfelületén lévő érintkezési pontok kiszámítására egy  $C^{++}$  nyelvű számítógépes program lett kifejlesztve. A kiszámított, szélső érintkezési pontokra Bézier görbét illesztettünk, melyek használatával az egész felületet analitikusan kezelhetőnek tekinthetjük arra az esetre, ha a görbe nem tartalmaz szinguláris pontot.

Ez azt jelenti, hogy a módszer akár a spiroid hajtások érintkezési felületének lokalizációjához és dimenzionálásához is új lehetőséget nyújthat a tervezés során.

## **5. A megmunkálást végző szerszámok (lefejtőmaró, köszörűkorong) profiltorzulásának ellenőrzése, mérési módszerei.**

Új mérési szoftvert fejlesztettünk ki, mely a csavarfelületek körasztal nélküli mérését teszi lehetővé. Ezen eljárással lehetőség nyílik a kúpszög, fogosztás, profilalakhiba és menetemelkedés mérésére a csiga illetve a csigakerék esetén. Megalkottuk a mérés matematikai modelljét is [58, 62].

A szerszámprofil változás pontosságra vonatkozó hatásvizsgálatának újszerű matematikai alapokra történő helyezése volt a munkánk célja. A numerikus úton számított véges számú ponttal reprezentált szerszámprofil – a korábbiaktól eltérően - egy **explicit** formájú függvénnyel történő leírásra.

**A kutatómunka során megfogalmazásra került probléma:** Az edzett csigák gyártásához szükséges köszörűkorong profil meghatározása – ezideig a hagyományos eljárással – pontonként történt, vagyis az adott, nagy számítási igényű iteratív numerikus módszerrel megtalált pontokat használták. Így **a korongprofil pontossága a számított pontok sűrűségétől is függ**, hiszen például a CNC körív interpoláció esetében az illeszkedő körívek meghatározásához a körívek kezdő és végpontjai a numerikus módszer által talált pontok szerint lettek meghatározva.

**Célkitűzés:** A numerikus módszerrel számított pontokra olyan interpolációs görbe illesztése, melynek segítségével az illeszkedő körívek kezdő és végpontjai az interpolációs görbe

görbületétől, azaz a másodrendű derivált függvényről függően hatékonyan tervezhetővé tehető.

A megfelelően meghatározott **explicit formájú matematikai függvénnyel** segítséget nyújtani a kívánt sűrűségű pontsor alkalmazásával a **gyártási pontosság javításában**.

**Eredmények:** A szerszámfelületek direkt módszer ( $(f_1)$  csiga és a hozzá tartozó ( $f_3$ ) köszörűkorong) szerinti vizsgálata során a numerikus elemzéssel szemben analitikus eljárást alkalmaztuk. A szerszámfelület leírására új összefüggést tártam fel. A felállított matematikai függvény lehetővé teszi az optimális sűrűségű pontsor előállítását tetszőleges koordináta tengelyen, ami a gyártási pontosság javulását eredményezi azáltal, hogy a profilpontokat egy interpolációs görbét leíró függvénnyel helyettesíti.

Meghatároztuk a kívánt közelítési pontossághoz az előnyös interpolációs görbe-típust, valamint a minimálisan szükséges profilpontok számát. Az eljárás alkalmazása nagyobb szabadságot biztosíthat a CNC körív interpoláció esetében az illeszkedő körívek végpontjainak oly módon történő megválasztására, hogy az a profil geometriai pontosságának javítása érdekében történjen.

A pontokkal adott profil helyettesítése Bézier-görbével történik.

A kidolgozott módszer egy korszerű CNC gép pályavezérléséhez nyújt megfelelő alapot, és további analitikus módszerek kifejlesztésére ad lehetőséget.

**6. Félkúpos különleges hajtások fejlesztésére (szabadalmaztatás lehetséges) [18] ill. spiroid extrém méretű csigahajtások fejlesztésére került sor [11].**

#### **7. FME elemzés**

A hajtópár fizikai modellezése nemlineáris feladat a probléma geometriai sajátosságai miatt. A kicsiny (merev test szerű) elmozdulások és a kis (rugalmas) alakváltozások egyaránt igen jelentősen befolyásolják az érintkezési normális irányát, ami nem hagyható figyelmen kívül a számítások során. A hajtópár feszültségállapotát és deformációját vizsgáltuk végeelem modellezéssel.

Modellünkkel kimutattuk az érintkezési pontokban, a fogtőben és a fogárookban, valamint a tengelyekben ébredő feszültségeket és deformációkat. Sikerült előkészítenünk több paraméteres sorozatszámításokat, amelyeket a jövőben tervezünk is megvalósítani [26, 27].

#### **8. Továbbfejlesztések:**

- **Csiga-, csigakerék-, és szerszám felületek kapcsolódásának elemzése a lefejtőmaró és csigakerék, ill. tányérkerék vonatkozásában.**
- **A szerszámok és hajtópárok korszerű minőségbiztosítása**
- **Holonikus rendszerépítés**
- **Különleges csigahajtások kapcsolódásának elemzése**
- **Eredmények publikálása, a gyártó elemek összeépítése (szabadalmaztatás tervezve) egy gyártható új szerszámgép (menetkösörű) állítható elő.**