

VOZSECH ISTVÁN*

FORGÓZÁRAK KÉNYSZERPÁLYÁI

II. RÉSZ



19. ÁBRA.
A G224LMG golyószóró szerelt zárszerkezete
(A szerző felvétele, a Gestamen Kutatás
Fejlesztés Zrt. engedélyével)

A tanulmány a forgó zárfejek vezérlését biztosító hengeres kényszerpályák kinematikai leírásával foglalkozik. A szerző, tanulmánya első részében a problémafelvetést követően az egyszerű és a lekerekített Z alakú kényszerpályák kinematikai viszonyait elemezte, majd megvizsgálta a gyorsulásfüggvénnyel adott és a szinuszhullám-gyorsulású kényszerpályák jellemzőit.

ELTOLT ZÉRUSPONTÚ, NEM SZIMMETRIKUS, AMPLITÚDÓ- ÉS FREKVENCIATRANSZFORMÁLT SZINUSZOID GYORSULÁSÚ KÉNYSZERPÁLYA

Tegyük fel a kérdést, hogy tudunk-e olyan pályaalakot találni, amely kielégíti az alábbi követelményeinket:

- A pálya bejárása során a vezetőcsap se ütés-, se lökészerű terhelést ne kapjon;
- Legyen a pálya fordító szakasza egyetlen függvénnyel leírható, amely egyben végtelen rendben folytonos;
- Legyen a pálya gyorsító, illetve lassító szakaszainak találkozási pontja általános helyzetű, azaz a szimmetria már nem megkötés.

Belátható, hogy bár a cikloidális pálya az első két megkötésünket kielégíti, de a harmadikat nem, mert a szinuszfüggvény jellegéből adódóan úgy az amplitúdó, mint a periódus állandó.

Felvetődik a kérdés, hogy alkalmasan megválasztott belső függvények segítségével módosítható-e úgy a szinuszhullám, hogy mind a frekvencia, mind az amplitúdó, a pálya bejárása során a független változó szerint folyamatosan módosuljon? A kérdés megválaszolása előtt tisztázni kell, hogy miért is van erre szükség.

Az egyszerű szinuszhullám a harmadik megkötésünket nem teljesíti, ezért ki kell terjesszük azt úgy, hogy a szinuszhullám központos szimmetriája eltűnjön, azaz a közbülső zérushely általános helyzetű legyen, a teljes hullámintervallum határain belül.

Térjünk vissza az elemi szinuszfüggvényre, és nézzük meg, hogy milyen belső függvényekkel tudjuk ezt elérni. Alapesetben a belső függvény a független változó, amely deriváltja állandó értékű, és ez igaz a szinuszoidokra is. Belátható, hogy konstans differenciálhányadosú belső függvényekkel dinamikusan a frekvenciát módosítani nem lehet, lehet azonban olyan függvényekkel, amelyeknek nem állandó a differenciálhányadosa, legalábbis a vizsgált első egész hullámon. Ha előírjuk a szigorú monotonitást, valamint elemi függvényekre szorít-

kozunk, akkor is szép számmal találhatunk megfelelőt attól függően, hogy melyik típussal van kedvünk dolgozni. Vegyük most az

$$f(t) = \sin(t^n) \quad (28)$$

függvényt. A belső hatványfüggvényről tudható, hogy ha $0 < n < 1$, akkor szigorúan monoton csökken, ha pedig $n > 1$, akkor növekszik. Az első esetben tehát folyamatosan növekvő, a másodikban folyamatosan csökkenő periódusidőt kapunk, tehát az első esetben a közbülső zéruspont a pálya kezdőpontja, a másodikban a végpontja felé tolódik.

Vegyük észre, hogy bár a közbülső zéruspontunkat – az n paraméter megfelelő megválasztásával – oda helyezhetjük, ahova szükséges, de ez a gyorsulásfüggvény nem fogja kielégíteni az első feltételünket, miszerint: „a pálya bejárása során a vezetőcsap se ütés-, se lökészerű terhelést ne kapjon”. Ekkor a szöggyorsulásfüggvény integrálja nem lehet nulla, a szimmetria elvesztése miatt, az integrálérték pedig maga a szögsebesség végértéke, azaz a pálya végén a vezetőcsap forgása nem fog a pálya hatására megállni, csapódni fog az egyenes szakaszba (lásd az I. részben közölt 11. ábra).

A probléma megoldására a kapott frekvenciamodulált függvényt amplitúdó szerint is modulálni kell. Válasszunk most az amplitúdómodulációra is egy hatványfüggvényt, ekkor formálisan a:

$$\int_{t_0}^{t_z} t^m \sin(t^n) dt = - \int_{t_z}^{t_p} t^m \sin(t^n) dt \quad (29)$$

egyenlet paraméteres megoldásával jutunk el, a most már valamennyi feltételt kielégítő gyorsulásfüggvényig.

Nézzük meg mindezt egy példán keresztül.

A módosított szinuszfüggvény tehát egyszerre változó frekvenciájú és változó amplitúdójú. Ezt az alábbi parametrikusan felírt gyorsulásfüggvény kielégíti, amely most a célfüggvényünk is egyben:

$$\beta(t) = a_0 t^{a_1} \cdot \sin(2\pi(a_2 t)^{a_3}). \quad (30)$$

A megoldáshoz daraboljuk szét a célfüggvényünket úgy, hogy a szinuszfüggvény belső függvényéből induljunk ki. Az a_2 konstans értéke legyen egységnyi, ekkor a hatványfüggvény szinuszfüggvényének egységnyi lesz a hullámhossza. Az első függvényünk – amely a változó frekvenciáért felelős – paraméteres alakja:

$$\beta_1(t) = 2\pi t^{a_3}. \quad (31)$$

*Okl. gépészmérnök. ORCID: 0000-0001-9818-7755



A kezdeti- és végértékek ismertek, valamint az aszimmetrikus félperiódusidő is, mivel továbbra is állandó axiális zársebességet feltételezünk.

A félperiódus idejére felírható, hogy a belső függvény helyettesítési értéke a szinuszfüggvény második zérushelye, azaz π , amelyből a_3 paraméter értéke kiszámítható:

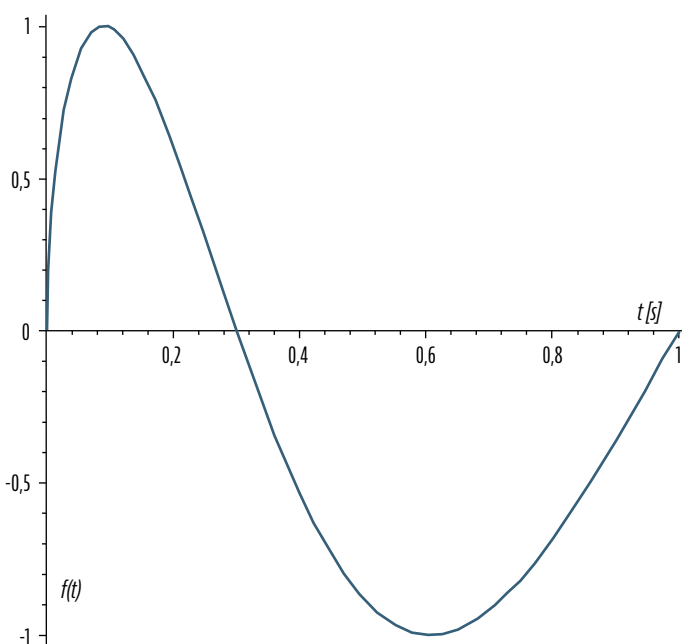
$$\beta 1(t_z) = 2\pi t_z^{a_3} = \pi, \quad (32)$$

$$a_3 = -\frac{\ln 2}{\ln t_z}. \quad (33)$$

A második részfüggvényünk a belső függvény szinuszfüggvénye:

$$\beta 2(t) = \sin(\beta 1(t)). \quad (34)$$

Nézzük meg a képét a 20. ábrán, ahol a pálya hosszának 30%-ánál található a zérus gyorsulás.



20. ÁBRA. Az első periódusban egység hullámhosszú, egységnyi amplitúdójú, eltolt zéruspontú gyorsulásfüggvény (A szerző szerkesztése)

A következő lépésben beállítjuk az első periódus pontos hullámhosszát, azaz megkeressük az a_2 paramétert.

Egységnyi sebességet feltételezve az idő és az elmozdulás szerinti függvények formailag azonosak, ezért az a_2 paraméter értéke azonos a pálya x tengely menti hosszának reciprokával, valamint a befutási idő számértéke azonos a pálya hosszával. Ezzel az értéke és jelentése is ismerté vált, most már csak a változó amplitúdóért felelős, és a kezdeti amplitúdó nagyságáért felelős a_1 paraméter értékét kell kiszámítani.

Ehhez a harmadik részfüggvényünk, amely a_1 -hez szükséges:

$$\beta 3(t) = t^{a_1} \cdot \beta 2(t), \quad (35)$$

és a negyedik, amely az a_0 paraméterhez nélkülözhetetlen:

$$\beta 4(t) = a_0 \beta 3(t). \quad (36)$$

a_1 kiszámításához már szükségünk van a szögsebességre, mivel a szöggyorsulást kell integrálnunk paraméteresen, a_0 -hoz pedig a szögelfordulás függvényre, mert az egyenleteket a pálya végértékére kell felírunk.

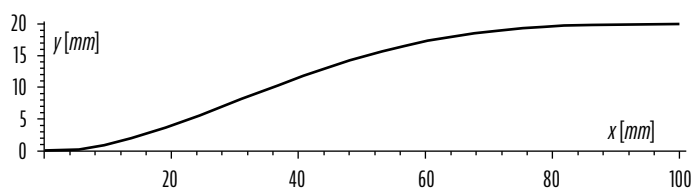
A feladat látszólag egyszerű, de okoz némi nehézséget, hogy mindaddig analitikusan meg tudtuk határozni a primitívfüggvényeket, de itt a szögelfordulás-függvény esetében ez nem járható, mert nem létezik zárt alakú primitívfüggvénye.⁹

A feladatot analitikus módszerekkel nem tudjuk megoldani, ezért át kell térjünk a numerikus módszerek használatára, amely azonban a későbbiekben tárgyalt CAD-kompatibilitást erősen lekorlátozza.

Tudjuk, hogy a pálya kezdő- és végpontjában a szögsebesség zérus, ezért a szöggyorsulásfüggvény integrálterülete is zérus. A végpontban értelmezett zérus szögsebességre írható egyenlet megadásához fel kell írunk a parametrikus szöggyorsulás-függvény numerikus integrálértékét a pálya végén. Ehhez fel kell osztanunk a pályát a kívánt pontosság-hoz illeszkedő részekre, majd az első periódus intervallumán numerikusan integrálnunk kell a szöggyorsulásfüggvényt. A kapott paraméteres integrálértéket zérusra megoldva határozzuk meg a_1 értékét.

Az útfüggvény meghatározása hasonló az előzőhöz, numerikusan kell integrálnunk a sebességfüggvényt, szintén paraméteresen. Itt a kapott paraméteres integrálértéket a pálya szögelfordulásának végértékére oldjuk meg, ezzel a_0 értéke is ismerté válik.

Nézzük meg egy 1000 mm hosszú és 20 mm ívfordítású pálya (a szemléletesebb ábrázolásmód miatti) síkba kiforgatott képét (21. ábra), y irányú sebesség- és gyorsulásfüggvényét (22. és 23. ábra), egységnyi zársebesség mellett.



21. ÁBRA. Eltolt zéruspontú, nem szimmetrikus, amplitúdó- és frekvenciatranszformált szinusoid gyorsulású kényszerpálya kiterített alakja (A szerző szerkesztése)

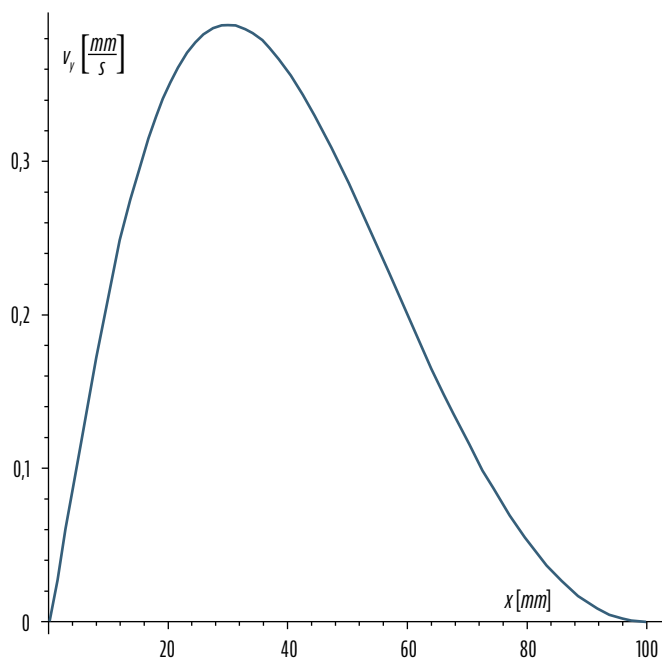
CAD-CAM KOMPATIBILITÁS

Manapság a 3D-s test- és felületmodellezést biztosító CAD-rendszerek a tervezőmérnöki gyakorlatban egyeduralgokká váltak, lényegében okafogyottá téve a hagyományos papíralapú, valamint a számítógépes 2D-s tervezést. A modern gépipart meghatározó – egy-két speciális területet nem ide számítva, de az alkatrész- és szerszámgártást kiváltképp –, CNC¹⁰-szerszámgépek nem működtethetők a CAD-modellekből dolgozó CAM¹¹-rendszerek nélkül, ezért különösen fontos, hogy az elképzelt konstrukciók CAD-modelljeit elő tudjuk állítani, a virtuális 3 dimenziós vektortérben. Ez az esetek döntő többségében (például tengelyszerű vagy paralelepipedon jellegű alkatrészek) nem okoz különösebb problémát, de a nem egyenesekből és körívekből (mint analitikus görbékből) származtatott felületek megvalósítására csak az utóbbi 10-15 évben, a kereskedelmi CAD-rendszereken belül nyílt direkt lehetőségünk. Az is igaz továbbá, hogy azok az alkatrészek (például vezértárcsák), amelyek dolgozó felületei matematikai függvé-

⁹ Itt meg kell jegyezni, hogy a magasabb rendű polinompályákat mindig tudjuk analitikusan kezelni, de a magasabb rendű tagok együtthatói igen kis számok, ezért a CAD-rendszer számábrázolási korlátossága miatt használatuk csak látszólag célravezető. Ezek a numerikus hibák a pályakapcsolódásoknál figyelhetők meg, ahol az egyenes és az emelő pályaszakasz egyszerűen nem fog kapcsolódni az elfogadható hibahatáron belül.

¹⁰ Computer Numerical Control – számítógéppel vezérelt, itt számítógéppel vezérelt szerszámgép.

¹¹ Computer Aided Manufacturing – számítógéppel támogatott megmunkálás.



22. ÁBRA. Eltolt zéruspontú, nem szimmetrikus, amplitúdó- és frekvenciatranszformált szinuszoid gyorsulású kényszerpálya y irányú sebessége, egységnyi zársebesség esetén (A szerző szerkesztése)

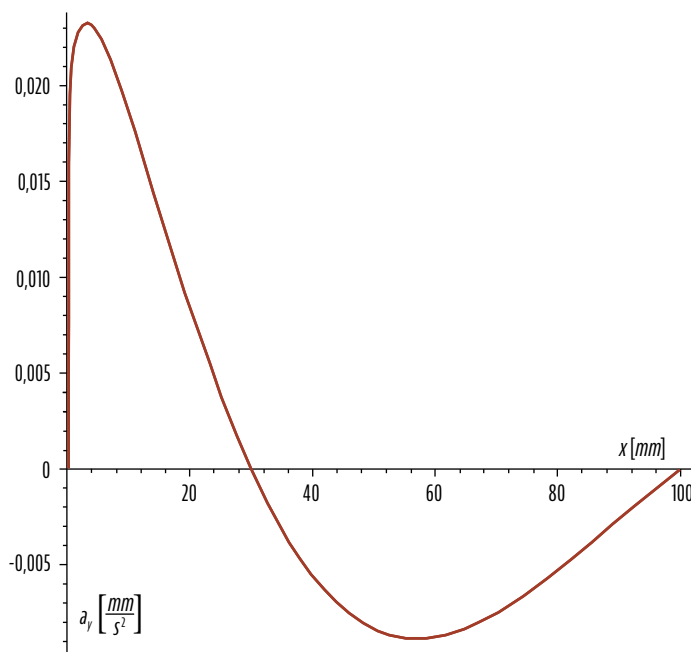
nyekkel meghatározottak, egyre inkább eltűntek a műszaki gyakorlatból. És nemcsak a műszaki gyakorlatból, de már az ezek tervezéséhez szükséges elméleti ismereteket sem oktatják az 1990-es évek elejétől egyetemünkön. Ezek ok-okozati összefüggések, mert a CNC-technológia elterjedésével a mechanikus automata szerszámgépek, mint a görbepályás vezértárcsák fő „felhasználói”, szintén ritkaságszámba mennek. De néhány szakterület maradt, ahol mégis szükségesek az analitikus, de nem elemi felületeket tartalmazó gépelemek alkalmazása. Az egyik ilyen, a teljesen mechanikusan működő automata fegyverek, ahol a forgó és lineáris mozgást egyaránt megvalósító kényszerpályákat tartalmazó alkatrészpárok döntő fontosságúak.

A CAD-rendszereket fejlesztő cégek, a korai CAD-rendszerek ezen hiányosságait érzékelvén, több alkalmazást is fejlesztettek, ezen feladatok megoldásainak támogatására. Ezek főként vezértárcsa-tervező modulok, de szinte minden CAD-rendszerben (10-15 éve) megjelent, az úgynevezett „egyenletvezérelt görbe”, mint térgörbékészítő lehetőség, amely a kezdetekben még csak síkgörbék tervezésére volt alkalmas. Ezek használatával a tervező, az általa megadott görbék tudja a CAD saját \mathbb{R}^3 virtuális világában objektumként elhelyezni, amelyek segítségével felületeket, testeket tud létrehozni, azaz generálni tudja a korábban nem megalkotható 3D-s alkatrészmódellet. Ezeket az alkatrészmódelleteket a CAM-rendszer már értelmezi, és a megfelelő CNC-szerszám gép számára gyárthatóvá tudja tenni.

Fontos látni azonban, hogy a tervezőnek saját magának kell ezeket a generálógörbéknek az egyenleteit megadni, amelyeket előtte ki kell tudnia számítani, mert ebben a CAD-rendszer semmilyen segítséget nem ad.

Látni kell azt is, hogy mi az előzőekben a pályafelületnek csak az egyik generátorát adtuk meg, jelesül azt, amelyik nem triviális, ugyanis az azok megadását a CAD-rendszeren belül végezzük.

Nézzük meg most, hogy hogyan is alakul ki egy cikloidális pálya a Solid Edge¹² rendszerben:



23. ÁBRA. Eltolt zéruspontú, nem szimmetrikus, amplitúdó- és frekvenciatranszformált szinuszoid gyorsulású kényszerpálya y irányú gyorsulása, egységnyi zársebesség esetén (A szerző szerkesztése)

A pálya végértéki elfordításának a szögértéke (φ_v), és az ahhoz tartozó axiális távolság (x_v), tervezési paraméter, azaz ismert adat. Ismert adat továbbá a forgó zárfej szárátmérője és ebből annak sugara (ρ). A térgörbe tehát a ρ sugarú hengerfelületen fog elhelyezkedni, $P_s[0 \ 0 \ \rho]^T$ start- és $P_v[x_v \ \rho \sin \varphi_v \ \rho \cos \varphi_v]^T$ végpozícióban. A köztes pozíciókra igaz, hogy egységnyi zársebesség esetén a (21) képlet szerint állíthatók elő, amelyből, ha elhagyjuk az egységnyi sebességet és most már áttérünk a fizikai tartalom nélküli t független változóra (mert ez a SolidEdge beépített független változója), akkor a térgörbe helyvektora:

$$\mathbf{r}(t) = \begin{bmatrix} t \\ \rho \sin(\varphi(t)) \\ \rho \cos(\varphi(t)) \end{bmatrix}. \quad (37)$$

A szögelfordulás függvényt ki tudjuk számítani a (24) szerint:

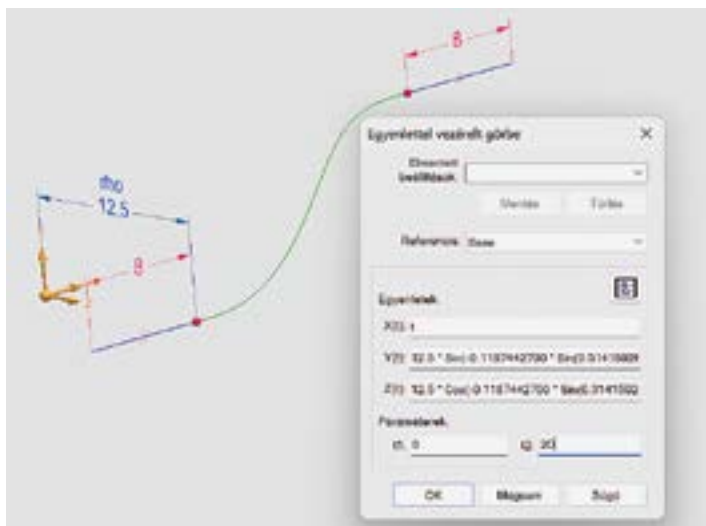
$$\varphi(t) = -\frac{b_1 \sin(b_2 t)}{b_2^2} + C_\omega t + C_\varphi, \quad (24)$$

így a kapott eredményeket közvetlenül be tudjuk írni a Solid Edge egyenletvezérelt görbékészítő moduljába, amely képernyőfelvételét a 24. ábrán láthatjuk.

Ezzel előállítottuk azt a térgörbét, amelyet a vezetőcsap hossz tengelye követni fog úgy, hogy közben a forgózár forgástengelyét is érinti, és arra minden pillanatban merőleges.

Mozgassuk most a vezetőcsap hossz tengelyét az általunk generált térgörbe, és a forgózár forgástengelye mentén, arra merőlegesen. Ezzel előállítottuk a vezetőcsap hossz tengelye által súrolt felületet (25. ábra kék felület), amelyet egyben a megmunkálószer szám tengelye is súrol. Ekkor már csak a vezetőcsap félátmérőjével meghatározott eltolásokat, valamint a félhengereket kell elkészíteni, és az ábra szerinti vágófelületet (25. ábra lazacszínű felület) „rá kell eresztetni” a zárkeret (25. ábra sárga test) modelljére.

¹² A Solid Edge egy 3D-s CAD/CAM/CAE tervezőszoftver az általános gépipar számára. A szoftver futtatása Microsoft Windows operációs rendszereken támogatott. A Solid Edge 2007-től a Siemens PLM Software terméke.



24. ÁBRA. A kiszámított skaláregyenletek megadása a Solid Edge rendszerben
(A szerző felvétele)

Ezzel a módszerrel minden, analitikusan adott pályageneráló függvénnyel előállított vezérpálya CAD-reprezentációja elkészíthető, de a nem analitikusak, mint például a legutóbb tárgyalt, numerikusan megoldott, eltolt zéruspontú szinuszoid nem. Ezek megvalósítására is léteznek módszerek, de ezek ismertetése nem elégítené ki a tudományos ismeretterjesztés kívánalmait, ezért itt ettől eltekintünk.

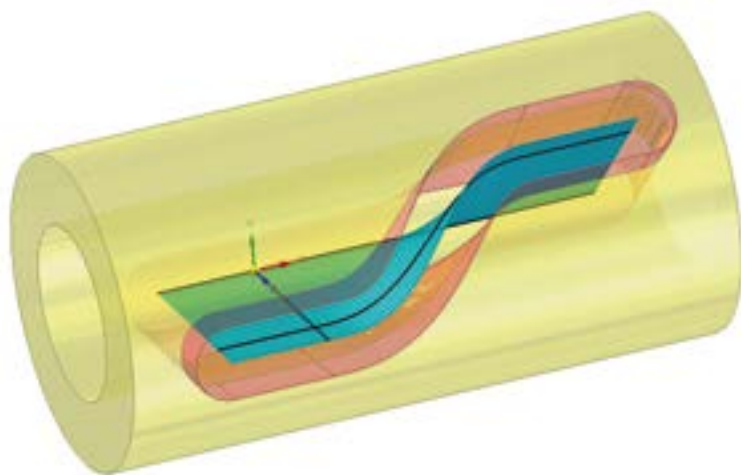
Ezzel a nem részletezett módszerekkel már a korai CAD-rendszerekben is lehetett találni megoldásokat, a tisztán numerikusan előállított felületek, testek generálására, amely módszerek a mostani fejlettebb rendszerekben is alkalmazhatók.

Az automata fegyverszerkezetek mechanizmusai között szép számmal találhatunk még egyéb, nem hengerfelületen forgó síkbeli kényszer mozgásokat is. Ezek tervezése és elemzése kissé más megközelítést igényel, valamint az ottani összefüggések, ha nem is bonyolultabbak, de mindenképpen érdekesebbek. Kifejtésükre egy másik tanulmányban teszünk kísérletet.

KÖVETKEZTETÉSEK

A legegyszerűbb pályák elemzésével megállapítottuk, hogy amennyiben a szerkezetünk működése során nem elhanyagolható mértékűek a dinamikai hatások, úgy nem elég a pályaalakot a szokásos módon (legtöbbször valamely létező konstrukció lemásolásával), megtervezni, hanem meg kell határozni az adott pályaalak kinematikai viszonyait a várható erőhatások ismerete érdekében. Vagy a tervezési alapadatok segítségével, az erőhatásokra optimalizált pályaalakot kell megadnunk –, mert ez sem nagyobb munka, mint az előző, különösen, ha a gépparkunk megvan annak gyártásához. Látni kell, hogy már a lekerekített Z pálya sem gyártható hagyományos szerszámgépen csak standard készülékekkel, azon csak egyszerű Z pálya gyártható, de az sem könnyen.

A CNC-gépek elterjedésével a gyártás kérdése lényegében megoldottnak tekinthető, de azt ne felejtjük el, hogy bármely forgózáratt vezérlő pálya előállításához legalább három és fél tengelyes¹³ szerszámgépre van szükségünk, de folyamatos megmunkálás esetén ez



25. ÁBRA. A szinuszoid pálya kialakulása CAD-rendszerben
(A szerző szerkesztése)

négyszögletű igényel. (Ekkor megmunkálás közben a munkadarabot forgatnunk kell tudni a forgózár forgástengelye körül, amely forgatás az egyenleteinkben szereplő φ szerinti szögforgatással azonos.)

Összességében kijelenthetjük, hogy:

- Az egyszerű Z pálya alkalmazása csak kézi mozgatás esetén indokolható, alkalmazása automata fegyvereknél szóba sem jöhet.
- A lekerekített Z pálya alkalmazása csak kis dinamikájú mozgatás esetén megengedhető, ahol az erőket kiszámítottuk, és ellenőriztük a keletkező feszültségeket.
- A rádiuszpálya alkalmazása nagy dinamikájú mozgatásra is megoldás lehet, de számítanunk kell az ütköző felületek felverődésére, ezért az erőket és a Hertz-féle érintkezési feszültségeket minden esetben számítani kell.
- A cikloidális vagy a legalább hatodfokú polinompálya optimális megoldás lehet, de a pályaalak előállítása idő- és számításigényes, amely megnöveli a tervezési időt, valamint a pálya inflexiók pontjában (a zérus gyorsulású pontban), és annak környékén jelentősen megnövekszik a nyomáshatás, amelyhez bár elméletileg kis gyorsítóerők társulnak (lásd az első részben közölt 12. ábrát), de gátolt forgatás esetén ez a vezetőcsap befeszüléséhez vagy töréséhez vezethet. Érdemes ezért a szokásosnál némileg hosszabb kireteszelési utat biztosítani, azaz a pályát laposítani.
- Az eltolt zéruspontú szinuszhullám, vagy legalább nyolcadfokú polinompálya megoldást kínál azon speciális fegyverkonstrukciók zár szerkezeteinél, ahol a tűzütetet a lehető legmagasabbra szeretnénk felemelni, ezért már tervezési szinten megengedjük rendszerünkben a korai nyitáshoz¹⁴ nevezett, hagyományosan azonban kerülendő jelenséget. A szinuszhullám pályaalak hátránya, hogy nem mindegyik CAD-rendszerben állítható elő (ráfordított munkaóra szempontjából), hatékonyan. A polinomiális pálya látszólag jó megoldás lehet, de a CAD-rendszerek számbázis pontossága korlátozza alkalmazhatóságukat, ezért a pálya nem minden esetben reprezentálható a leíró egyenletével. ■

¹³ Az egész tengelyek száma jelenti az adott szerszámgép megmunkálás közbeni, egymástól független kinematikai tengelyeinek számát. A fél tengely esetén csak a megmunkálás megszakisításával tudunk mozgást előidézni az adott tengely mentén, vagy körül.

¹⁴ Korai nyitáshoz nevezünk azt a jelenséget, amikor a gázdugattyú hatására hátraható zárkeret már akkor elkezd a zárfejet forgatni, amikor még a fegyvercsőben a löpörgázok nyomása jelentős, bár a lövedék már elhagyta azt. Ekkor a zárfej reteszelőfelületei a tokban lévővel összefeszült állapotban vannak, miközben a vezetőcsap már azokat egymáson elforgatja, jelentős túlterheléseket adva ezzel a kinematikai lánc valamennyi elemének.