

A fogazott hajtópárok elméleteinek és gyártástechnológiájának szoros kölcsönhatásban végbemenő fejlődése az utóbbi évtizedekben jelentős változás zajlott le a kitérő tengelyek közötti mozgás és teljesítmény átszarmaztatásra széles körben alkalmazott csigahajtópárok területén is. Az elméleti és kísérleti vizsgálatok egyértelműen bizonyították, hogy a teherbírás és a hatásfok lényeges javítása csak a folyadék súrlódás és az ennek kialakulását elősegítő érintkezési viszonyok biztosításával, valamint a pontosság javításával érhető el.

A csigahajtópárok kapcsolódási viszonyainak és a hibák kapcsolódási viszonyokra gyakorolt hatásainak a vizsgálatánál, valamint a hajtópár jellemzőinek ezek alapján történő optimalálásánál nehézséget okoz, hogy az érintkezési vonal a kapcsolódó elemek forgása közben mind álló, mind a mozgó térben a fogfelületek mentén vándorol, miközben változik az alakja és változnak az érintkezési pontokban a kinematikai viszonyok is, amelyeket nagy számú konstrukciós és technológiai paraméter befolyásol. Az elméleti vizsgálatok során további gondot okoz, hogy a gyakorlatban megvalósított hajtópárok, az alkalmazott geometriai, kinematikai modellektől eltérően nem egymásnak teljesen konjugáltjai, hanem hibátlanok és nem, tekinthetők ideális merev testnek. A felvetett problémák megoldása megkövetelte egyrészt az alkalmazott matematikai, geometriai és fizikai modellek továbbfejlesztését, másrészt a korszerű numerikus módszerek és számítástechnikai átfogó alkalmazását.

A kutatási program keretében az OTKA T-000655 és a T-014553 számú projektekben elért eredményekre építve és integrálva, azok folytatásaként továbbfejlesztésre került a hibátlan és merev elemekből álló ideális hajtópárok fogfelületeinek és kapcsolódás geometriájának matematikai leírására eddig bevált kinematikai-geometriai módszer és fogfelületek leképezési és alakítási mechanizmusában szerepet játszó paraméterek determinisztikus és valószínűségi változóként kezelt hibatagjainak a matematikai modellbe való beépítésével, valamint a mértékadó alakváltozások figyelembevételével. A kidolgozott matematikai modell és számítási eljárással lehetőség nyílik a hajtópár egyes elemein jelentkező egyedi fogazati hibák kiértékelésére, az összegezett fogazati hibákra gyakorolt hatásának elemzésére, a kapcsolódási és tribológiai, teherbírási viszonyok vizsgálatára.

A kutatómunka során a Litvin által publikált kinematikai módszert alkalmazva felállításra került a térbeli fogazott hajtópárok reprezentatív képviselőjének a hengeres csigahajtópároknak a determinisztikus hibatagokat is figyelembe vevő általános mozgásleképezési mechanizmusa, geometriai, matematikai modellje. A modell elkülönítve tartalmazza a statikus mozgásinformációk és a dinamikus mozgásinformációk hiba tagjait. Az utóbbiak közül első lépésként idealizált mozgásátszarmaztatást feltételezve a kinematikai viszonyokra jellemző tagokat hibamentesnek, illetve periodikus függvényekkel leírható hibatagokkal rendelkezőknek tételeztük fel.

A térbeli fogazatok leképezésére felállított modellt alkalmaztuk egy konkrét hajtópárra, a ZTA hengeres csigahajtópárra. Kidolgoztuk a ZTA hajtópár fogfelületeinek, sebességviszonyainak és kapcsolódási pontjainak a meghatározására alkalmas algoritmust és számítógépes programrendszert, amellyel több különböző fogazati paraméterrel rendelkező hajtópár vizsgálatát végeztük el.

Az analitikusan nehezen kezelhető kapcsolódási egyenlet numerikus megoldására a sorozatos közelítések módszerét alkalmaztuk, amelynek során rendkívül hosszú futási idő és konvergencia problémák jelentkeztek. Ezért a kapcsolódó elempárok érintkezési pontjainak a meghatározásához és a további vizsgálatokhoz szükséges görbületi viszonyok meghatározására a kinematikai módszer mellett megvizsgáltuk a differenciálgeometria módszer alkalmazásának a lehetőségét is. A két módszer a gyakorlat szempontjából azonos eredményre vezetett, de a differenciálgeometria módszerre épülő algoritmus és program gyorsabb, kevésbé érzékeny és stabilabb, továbbá a fogazati interferenciákra, szingularitásokra vonatkozó hasznos járulékos információkat szolgáltat. A kutatások során a vizsgált feladattól függően mindkét módszer alkalmazásra került. Így például a tisztán geometriai jellegű hibák vizsgálata során a kinematikai módszert részesítettük előnybe. Az ideális, gyártási és szerelési hibáktól mentes, csigahajtópárok elméletileg vonal mentén érintkeznek. A kapcsolódási helyzet függvényében mind a globális, mind az érintkezési vonalak mentén az ideális alakváltozás és az érintkezési feszültség is változik. Tekintettel a térbeli érintkezési viszonyokra, az érintkező felületek bonyolult geometriájára, különösen a nem vonalfelületű hajtópárok estében, az alakváltozások és az

érintkezési feszültség meghatározása, csak egyszerűsíthető felvetésekkel lehetséges. Az alakváltozások számítására két módszert próbáltunk ki:

Az egyik lehetséges megoldás, hogy állandónak tekintjük a térbeli érintkezési vonal mentén a fogfelületek merevtestszerű közeledését és egy végeelemes hatásmátrixos megoldási algoritmust alkalmazunk.

A másik szerint az egy adott kapcsolódási helyzethez tartozó érintkezési vonalak mentén a Hertz-féle nyomáelosztást állandónak vesszük és a fogazatok között fellépő súrlódást figyelmen kívül hagyjuk.

Az alakváltozások és az érintkezési feszültségek számítására egy négy modulból álló programrendszer került kidolgozásra:

- saját fejlesztésű C forrásnyelvű program a pillanatnyi érintkezési vonalak számítására, valamint az érintkezési vonal pontjaiban a felületi normális irányvektorának előállítására,
- CAD rendszer (Solid Works 2001.) alkalmazása a csiga és a csigakerék testmodelljeinek előállítására és a végeelem háló generálására,
- végeelem programrendszer (Cosmos/M 2.7) a feszültségek és alakváltozások meghatározására,
- saját fejlesztésű algoritmus a végeelem program eredményeiből a hatásmátrix előállítására, illetve az érintkezési nyomáeloszlás számítására.

A hajtópárok testmodelljei 3D-s CAD rendszerben kerültek felépítésre. A végeelem háló szintén a CAD-rendszerben automatikus hálógenerálással, 4 csomópontos tetraéder elemekből a kapcsolódásban lévő 2 fogpár felületein megfelelő sűrítéssel készült. A csiga végeelem-modellje 53200 elemet és 1300 csomópontot tartalmazott. A csigakerék végeelemes modellje a teljes kerék helyett csak 5 fogat vizsgált, mivel a többi kapcsolódáson kívül esik, merevítő hatásuk kicsi és a teljes kerék modellje olyan nagy csomópontszámot eredményezne, amelyet az alkalmazott végeelemes szoftver már nem tud kezelni. Így a végeelem-modell 3200 elemet és 7000 csomópontot tartalmazott. Peremfeltételként, a csigakerék nem modellezett részéhez kapcsolódó csomópontokban, merev rögzítés került megadásra. A terhelés a kerék esetében is az érintkezési vonalához lehető legközelebb eső csomópontokban, koncentrált erőként lett modellezve.

A peremfeltételek a csigatengelyen vezetőcsapágyas elrendezésnek megfelelően kerültek megadásra, tehát a csigatengely egyik végén a csomópontokban mind a radiális, mind a tengelyirányú elmozdulás zérus, míg a másik végén csak a radiális irányú elmozdulás van gátolva. Az egységnyi terhelés a hatásmátrix meghatározásához az érintkezési vonalához lehető legközelebb eső csomópontokban, koncentrált erőként lett megadva.

A kutatás során különböző fogazatokra, hibákra és terhelésekre, illetve az azoknak megfelelő merevtestszerű elmozdulás értékekre meghatároztuk a globális és lokális alakváltozásokat, valamint az érintkezési nyomáeloszlást.

Az állandó merevtestszerű közeledés a hajtópárok fogfelületei között azonban csak a felületek érintkezési vonalra merőleges síkmetszetében teljesül. A térbeli érintkezési vonalak mentén ez a valóságban nem állandó. Így a hatásmátrixra alapuló érintkezési algoritmus csak közelítőleg alkalmas a térbeli érintkezési probléma kezelésére. Lehetséges megoldásként a következők kínálóztak:

1. Végeselemes modellezés esetén, az érintkezési vonal mentén mindkét fogfelületpáron kontaktelemelek használata. Ez az eljárás igen jelentős számítógép kapacitást igényel, tekintettel arra, hogy az kapcsolómező tartományban az egy időpillanatban kapcsolatban lévő összes fogfelületpáron (általában 2-3 fogpár kapcsolódik) elég sűrű végeselem hálót kell generálni és a kontakt (GAP) elemeket a megfelelő csomópontok között megadni.
2. A kontaktelemelek használata elkerülhető olyan végeselem programrendszer használatával (pl. MSC Marc), amely képes speciális kontaktelemelek nélkül a testmodelleket felépítő háromdimenziós elemek közötti érintkezési probléma megoldására.

A fogfelületeket reprezentáló végeselemes modell felépítése a csiga esetén nem okozott problémát, viszont a csigakerék előállítására nem vonalfelületű hajtópárok esetében csak közelítő módszerekkel lehetséges. A kutatások során három módszer került kipróbálásra. Egyik ilyen módszer, hogy a különböző kapcsolódási helyzetekhez tartozó pillanatnyi érintkezési vonalakat a csigakerékhez rögzített vonatkoztatási rendszerbe transzformáltuk és a vonalakra egy közelítő burkolófelületet illesztettünk. A 3D-s CAD rendszerek alkalmasak ilyen probléma megoldására, viszont így csak a kapcsolómezőnek megfelelő fogfelület tartományokat lehetett előállítani. A kapcsolódáson kívül eső fogfelületek meghatározásához viszont a szerszámfelületet és mozgásviszonyait kellett szimulálni és az így előállt felületet illeszteni kell a kapcsolómező tartományba előállítottéhoz. Ezt úgy megoldani, hogy a felületek közötti átmenet szingularitásoktól mentes legyen, gyakorlatilag lehetetlen. Jóllehet a szingularitás mentesség a csigakerék felület esetében a gyakorlatban sem áll fenn, mivel a kapcsolódáson kívül eső felületeket az első és utolsó szerszámél kimetszi a burkolófelületből.

Másik vizsgált közelítés a csigakerék fogfelületének előállítására, hogy a csiga tengelyével párhuzamos síkmetszetekben tatározzuk meg a csigakerék fogfelületének metszészonalait, alkalmazva a fogkapcsolódás alaptörvényét. A csiga tengellyel párhuzamos metszeteihez mint 2 dimenziós fogprofilokhoz megszerkesszük a kapcsolóvonalat és az ellenprofil Reuleaux módszerével. Az így előállt csigakerék metszeteiből a csigakerék fog 3D-s modellje előállítható. Ennek a módszernek a megvalósítására is kidolgozásra került egy számítási program, amely alkalmas a csigakerék megfelelő pontjainak meghatározására, illetve a pontoknak a CAD-rendszerbe való exportálására ahol a pontokra a görbe illesztése, majd a görbékre a felület illesztése megvalósítható.

Harmadik lehetőség, hogy a csigafog normálmetszeti görbét, mint a csigakeréket megmunkáló ütőkés profilt alkalmazzuk a megfelelő kinematikai feltételek megadásával, a kerékfog testmodelljének előállítására. Gyakorlati alkalmazhatóság tekintetében az utóbbi módszer javasolható a csigakerék testmodelljének generálására, ugyanis a különböző, görbékre illesztett felületekkel gyakran pontossági problémák adódtak. Az alkalmazások meghatározása területén folytatott vizsgálatok alapján megállapítottuk, hogy a hatásmátrixon alapuló érintkezési algoritmus a végeselemes módszerének felhasználásával gyorsan konvergált, jól használható, a hajtópárok globális alakváltozásának, a csigatengely lehajlásának, a fogak deformációjának, valamint a fogtő feszültség vizsgálatához. A lokális alakváltozások meghatározásához és ahhoz, hogy pld. a tribológiai viszonyok elemzéséhez az érintkezési vonalra merőleges metszetben is meghatározzuk az érintkezési nyomáeloszlást, a bonyolult geometriájú, térbeli fogazatok esetében nehéz megfelelő sűrűségű elemfelosztást előállítani. A nagy csomópontszám rendkívül nagy számítógép háttérkapacitást és számítási időt igényel. További nehézség, hogy a különböző kapcsolódási helyzetekhez tartozó, különböző alakú érintkezési vonalokhoz mindig új hálót kell generálni.

Mivel a nagy teherbírású csigahajtópárok esetében a csigakerék általában bronzból, a csiga pedig edzett, kősörült acélból készül, így a hajtópárok között jelentős különbség mutatkozik a rugalmassági modulusz tekintetében. Ennek a különbségnek következtében a bejáratás során a lényegesen merevebb csiga gyakorlatilag utánmunkálja a csigakereket, mint azt a bejáratott hajtópárokon megfigyelhető kopásnyomok bizonyítják. Mivel a nagyobb terhelésű érintkezési vonalszakaszok erősebben kopnak, ezért bejáratás után az érintkezési vonalak mentén a kialakuló érintkezési feszültséget közelítőleg állandónak lehet tekinteni, ezért a tisztán geometriai vizsgálatokon túlmutató pld. a kenésállapot elemzéséhez ezt a modellt célszerű alkalmazni. Ennek az igazolására a kutatásokat kiterjesztettük az egyszerű geometriájú helyettesítő felületpárok vizsgálatára is. Az érintkező felületpárok helyettesítő modelljének a megválasztása érdekében megvizsgáltuk a henger-henger, henger-sík, kúp-sík és tömb-törusz elemi felületpárokkal történő helyettesítés lehetőségeit, amelyek közül az egyszerűbb kezelhetőség és az eredmények általánosan elfogadott henger-henger helyettesítő modell került alkalmazásra.

Az elvégzett kísérleti és numerikus vizsgálatok alapján megállapítottuk, hogy a kúp-sík elem párból álló helyettesítő modellek alkalmasak a változó sebesség és görbületi viszonyok lineáris közelítésére és pld. az ETHD kenési modellen alapuló tribológiai vizsgálatok elvégzésére, de a hibahatások elemzése szempontjából az egyszerűbb hengerpár modellhez képest az eredményekre gyakorolt hatásuk a hajtópár típusától függően változó.

A hibahatások és alakváltozások vizsgálatára kidolgozott algoritmus és programrendszer felépítése olyan, hogy előállítja és felhasználja a kapcsolódó elem párok 3D CAD testmodelljét. A fogazott elem párok testmodelljeinek STL fájlformátumban történő előállításával a számítógépes modelltől RPT eljárással lehetőség nyílt a hajtópárok különböző hibatagokkal terhelt fizikai hibatagokkal terhelt fizikai modelljeinek a létrehozására. Az RPT modellek geometriai mérési alapján megállapítottuk, hogy a rendelkezésre álló eljárás (3D nyomtatás) pontosságából adódóan a módszer a valóságnál nagyobb hibatagok esetén ugyan, de alkalmas a kidolgozott számítógépes eljárás helyességének a kísérleti igazolására, az egyes hibatagok hatásának szemléltetésére és vizsgálatára, amelyeket ZTA és ZK típusú csigákra végeztünk el.

A kidolgozott modellek, számítógépi programok továbbfejlesztésével és felhasználásával lehetőség nyílik a hibatagok hatásának elemzésére, az összegezett hibák becslésére és az optimális pontossági értékek, beállítási paraméterek, tűrések meghatározására.