Precíziós bolygóművek méretcsökkentésének lehetőségei kerékpároknál

dr. Kőfalvi Gyula, okl. közl. mérnök

Emika Zrt.
(e-mail ibkcrash@gmail.com)

Abstract: A kerékpárok hajtóműveiben egyre nagyobb szerepet kapnak az epiciklikus, azaz bolygóműves mechanizmusok, melyek kompakt méretük és magas hatékonyságuk révén ideálisak a modern – főként elektromos és városi – kerékpárokban. A méret- és tömegredukció folyamatos fejlesztési cél, mivel ez növeli a hatásfokot, javítja az energiafelhasználást és komfortosabbá teszi a kerékpárt. A szakma előtt álló kihívások: miként csökkenthető a bolygómű, illetve a teljes váltórendszer mérete a teljesítmény rovására történő kompromisszumok nélkül.

1. BEVEZETÉS

A bolygóművek klasszikus felépítése: napkerék, bolygókerék(ek), hordozó/hajtókar és gyűrűkerék. Szakmai szempontból előnyük a terhelés egyenletes eloszlása és a magas nyomatéksűrűség, ami lehetővé teszi, hogy kisebb, könnyebb modulokban jelenjenek meg akár egy kerékpár agyváltójában vagy motorjában. A geometriai optimalizációval a fogasszámok, modulméret, tengelyek elhelyezése, osztókörök és profilok mind-mind tovább finomíthatók.

2. BOLYGÓMŰVEK SZERKEZETI SAJÁTOSSÁGAI ÉS A TERVEZÉSI SZEMPONTOK

A bolygóműves hajtások a kerékpáriparban a kompakt méret, a nagy nyomatéksűrűség és a kiváló hatásfok együttes igényére adnak választ. A szerkezet alapvető elemei – napkerék, bolygókerekek, bolygóhordozó és gyűrűkerék – koaxiálisan rendeződnek el, ami a helytakarékos nyomatékátvitelt teszi lehetővé. A hajtás lényege, hogy a terhelés több fogpáron, párhuzamosan oszlik el, így kisebb fogmérettel és kisebb tengelytávolsággal is magas nyomaték továbbítható. E tulajdonság miatt a bolygóművek ideálisak az elektromos kerékpárok középmotoros egységeiben vagy agyváltós rendszereiben, ahol korlátozott beépítési hely áll rendelkezésre.

A tervezés során kiemelt szerepet kap a **geometriai optimalizálás**. Az áttételi arány, a fogszámok aránya ($i=1+Z_g/Z_{si}=1+Z_g/Z_{si}=1+Z_g/Z_s$), a bolygók száma és elrendezése mind hatással vannak a méretre és a nyomatékátvitel egyenletességére. A három bolygókerekes konfiguráció a leggyakoribb, mert a mechanikai egyensúly és a térbeli kihasználtság kedvező kompromisszumát nyújtja.

A nagyobb bolygószám egyenletesebb terheléseloszlást biztosít, de növeli a súlyt és a gyártási komplexitást.

A **fogazat kialakítása** szintén kritikus tényező: az evolvens profil mellett egyre gyakoribbak az **aszimmetrikus fogprofilok**, amelyek az egyirányú hajtásirányhoz optimalizálják a terhelésátadást. Az ilyen profilok 8–12%-os fogszélesség-csökkentést tesznek lehetővé azonos nyomatéktűrés mellett, ami a kompakt kivitel egyik legfontosabb tervezési eszköze. A foggyök geometriájának finomítása – fillet radius, undercut minimalizálás – hozzájárul a feszültségcsúcsok csökkentéséhez, így vékonyabb fogtestek is alkalmazhatók.

A **bolygóhordozó szerkezeti kialakítása** a méretcsökkentés egyik kulcspontja.

A bolygóhordozó szerkezeti kialakítása a precíziós bolygóművek méretcsökkentésében:

A bolygóművek egyik kulcseleme a **bolygóhordozó** (planet carrier), amely a bolygókerekeket tartja és továbbítja a nyomatékot a kimenő tengely felé. A hordozó szerkezeti kialakítása meghatározza a hajtás **merevségét, tömegét, dinamikai viselkedését** és közvetlenül befolyásolja a bolygómű méretét is. A méretcsökkentés tehát nem csupán a fogaskerekek, hanem a hordozó optimalizálásán múlik.

A klasszikus hordozó kialakítások **három fő csoportba sorolhatók**:

1. **Kétlemezes csavarozott hordozó**, ahol a bolygótengelyeket két párhuzamos lemez fogja közre. Ez hagyományosan acélból vagy alumíniumból készül, nagy merevségű, de viszonylag nehéz.

2. **Monoblokk vagy integrált hordozó**, ahol a bolygótengelyek a fő testbe vannak bepréselve vagy egy darabból készülnek. Ez csökkenti a szerelési pontatlanságot,

növeli a koncentrikusságot és akár 15–20%-os tömegcsökkenést tesz lehetővé.

3. **Kompozit–fém hibrid hordozó**, amelynél a teherhordó elemek fémek, míg a szerkezeti merevítő vagy burkolati részek könnyű kompozitból (pl. CF/PEEK) készülnek. E megoldás különösen kedvelt a kerékpáriparban, ahol a tömeg és a rezgéscsillapítás kiemelt szerepet kap.

A bolygóhordozó tervezésének egyik legfontosabb szempontja a **geometriai merevség–tömeg arány optimalizálása**. A **végeselemes analízisek (FEA)** és **topológiai optimalizációs módszerek** segítségével a hordozó alakja a terhelési útvonalak mentén formálható: a felesleges anyagrészek eltávolításával akár **25–30%-os tömegcsökkenés** érhető el a hagyományos lemezszerkezethez képest. A **generatív design** alkalmazása különösen ígéretes, mivel olyan organikus szerkezeteket hoz létre, amelyek hagyományos megmunkálással nem, de **additív gyártással (SLM, DMLS)** előállíthatók.

A hordozó csapágyfészkeinek elhelyezése és a bolygótengelyek illesztési pontossága alapvetően meghatározza a bolygómű működési zajszintjét és élettartamát. Precíziós kerékpáros bolygóműveknél a tengelyek **0,01–0,02 mm-es pozíciós tűréssel** készülnek, a hordozólemez pedig **0,05 mm alatti síkfutási eltéréssel** gyártandó. Az ilyen pontosságú kivitel lehetővé teszi a **minimális holtjátékot** és a **kisebb osztókörátmérőt**, amely közvetlenül a hajtómű méretcsökkenését eredményezi.

A bolygóhordozók anyagválasztása szintén fejlődik: a **nagy szilárdságú alumíniumötvözetek (pl. EN AW 7075-T6)** és **szénszál-erősítésű kompozitok** egyre gyakoribbak, mivel kis sűrűség mellett is magas hajlítószilárdságot biztosítanak. A **karbantartásmentes, kenés nélküli** rendszerekben a hordozóba **bepréselt szárazperselyek** vagy **tribopolimer bélések** biztosítják a gördülési kapcsolatot a bolygótengelyekkel.

Összességében a bolygóhordozó fejlesztése a precíziós bolygómű méretcsökkentésének egyik legnagyobb potenciállal bíró területe. A **hibrid szerkezetek**, az **additív gyártás**, valamint a **digitális optimalizálás** lehetővé teszik, hogy a jövő kerékpár-hajtóművei kisebbek, könnyebbek, csendesebbek és hatékonyabbak legyenek – miközben megtartják a precíziós hajtásokra jellemző pontosságot és tartósságot.

A ház és a hajtómű integrációja a precíziós bolygóművek méretcsökkentésében kerékpároknál

A bolygóműves hajtások fejlesztésében az egyik legnagyobb méret- és tömegcsökkentési potenciál a **szerkezeti integrációban**, különösen a **ház és a hajtómű egységének összevonásában** rejlik. A hagyományos konstrukciókban a hajtómű különálló szerkezeti egységként kerül beépítésre, önálló csapágyazással, zárófedéllel és burkolattal. Ezzel szemben az új generációs, precíziós bolygóműves rendszerekben a **ház maga is a hajtásrendszer funkcionális eleme**, amely egyszerre lát el **szerkezeti, hűtési és csapágyazási feladatokat**.

A **ház–hajtómű integráció** legfőbb előnye, hogy megszünteti a párhuzamosan jelenlévő falvastagságokat, illesztéseket és rögzítési pontokat, ezáltal akár **15–25%-os térfogat- és 20–30%-os tömegcsökkenést** tesz lehetővé. A csapágyfészkek és a fogaskerekek tengelyei közvetlenül a motorburkolatba vagy a középrész öntvényébe integrálhatók, ezáltal csökken a geometriai lánchossz, és nő a rendszer merevsége. A csökkentett alkatrészszám ráadásul minimalizálja a gyártási tűrésekből eredő illesztési hibákat és a zajforrásokat, ami különösen fontos az elektromos hajtások csendes működéséhez.

Az **anyagválasztás** kulcsfontosságú: a motorház és a hajtómű közös egysége gyakran **alumínium-szilícium ötvözetből** vagy **kompozit–fém hibrid szerkezetből** készül. Ezek a megoldások egyszerre biztosítják a megfelelő hővezetést és mechanikai merevséget, miközben csökkentik a tömeget. Egyre elterjedtebb a **magnéziumalapú ház** alkalmazása, amely 30%-kal könnyebb az alumíniumnál, ugyanakkor megfelelő rezgéscsillapítást nyújt. A polimer-kompozit házaknál a súlycsökkenés még nagyobb (akár 50%), de ezeknél külön figyelmet igényel a hőelvezetés és a csapágyazási pontosság.

A **gyártástechnológiai integráció** szintén kulcselem: additív gyártással (pl. SLM vagy FDM) már olyan komplex házstruktúrák készíthetők, amelyekbe a **hűtőcsatornák**, **olajterelők**, vagy akár **érzékelőhelyek** is közvetlenül beépíthetők. Az így kialakított „monoblokk" hajtásmoduloknál nincs szükség utólagos összeépítésre, a ház és a hajtómű egyetlen funkcionális egységet alkot.

A kerékpáriparban ez az irányzat elsősorban az **e-bike középmotoros rendszereknél** terjedt el (pl. Bosch, Shimano, Emika prototípus), ahol a bolygómű a motor állórészével közös házba kerül. Az integráció előnye nemcsak a méretcsökkenés, hanem a **hatékonyabb hőelvezetés** és a **mechanikai zajcsillapítás** is. A kevesebb csatlakozási pont kevesebb meghibásodási lehetőséget jelent, ami a **karbantartásmentes működés** irányába mutat.

Összességében a ház és a hajtómű integrációja nem csupán geometriai racionalizálás, hanem **rendszerszintű optimalizálás**: egyesíti a szerkezeti merevséget, a hőmenedzsmentet, a zajcsillapítást és a gyártástechnológiai egyszerűsítést. Ennek eredményeként a jövő precíziós bolygóműves kerékpárhajtásai várhatóan **kompakt, moduláris, monoblokk egységek** lesznek, amelyek a legmagasabb nyomatéksűrűséget nyújtják a lehető legkisebb beépítési térfogat mellett.

Összességében a ház és a hajtómű integrációja nem csupán geometriai racionalizálás, hanem rendszerszintű optimalizálás: egyesíti a szerkezeti merevséget, a hőmenedzsmentet, a zajcsillapítást és a gyártástechnológiai egyszerűsítést. Ennek eredményeként a jövő precíziós bolygóműves kerékpárhajtásai várhatóan kompakt, moduláris, monoblokk egységek lesznek, amelyek a legmagasabb nyomatéksűrűséget nyújtják a lehető legkisebb beépítési térfogat mellett.

Összességében a bolygóművek szerkezeti sajátosságainak finomítása – a fogazat, a bolygók számának, a hordozó anyagának és az elrendezésnek optimalizálása – akár **25–30%-os méretcsökkentést** eredményezhet azonos nyomaték

mellett. Ez a precíziós tervezés kulcsa a jövő kompakt, nagy hatásfokú kerékpárhajtásainak fejlesztésében.

Szerkezeti példák:

- Shimano, Bosch, Rohloff, Igus és a magyar Emika fejlesztései eltérő szerkezeti megoldásokat alkalmaznak, ami megmutatkozik a mechanikai hatékonyságban és a beépíthetőségben is.
- Az egyes rendszerekben a központi napkerék mellet 2-5 bolygókerék található, ami a terheléseloszlást, de egyben a tömeg- és térfogatcsökkentés lehetőségét is befolyásolja.

Anyagválasztás, hőkezelési technikák és gyártástechnológia

A hajtómű tömegének csökkentése érdekében fejlődnek a felhasznált anyagok: a klasszikus ötvözött acélok mellett megjelennek a műszaki polimerek, alumínium, kompozitok, részben 3D nyomtatott műanyag-frakciók. A modern hőkezelés – pl. vákuumkarbonitálás, nitridáció, edzés – révén a fogaskerekek vékonyabbak lehetnek, de tartósabbak is. Innovatív gyártási metódusok a komplex geometria nagy precizitású kivitelezéséhez járulnak hozzá (CNC, SLS/SLM nyomtatás, görgős profilmarás).

Anyag-összehasonlítás táblázat

Megoldás	Anyag	Sűrűség (g/c)	Hőkezelhe-tőség	Tipikus vastagság (mm)	Tartós-ság	Példa
Acél	Ötvözött acél	7,7	kiváló	3-5	nagyon jó	Shimano, Rohloff
Polimer	PEEK/ nylon	1,41-1,8	gyenge	4-8	közepes	Igus
Kompozit	CF/PEEK	1,5-2,2	változó	2-6	jó	Bosch, Igus

3. FOGASKERÉK-GEOMETRIAI FEJLESZTÉSEK ÉS OPTIMALIZÁCIÓS ALGORITMUSOK A PRECIZIÓS BOLYGÓMŰVEK MÉRETCSÖKKENTÉSÉBEN

A precíziós bolygóművek méretcsökkentésének egyik legkritikusabb területe a **fogaskerék-geometria fejlesztése** és annak **numerikus optimalizálása**. A bolygóművekben a fogazat geometriája közvetlenül meghatározza a **nyomatékátviteli hatékonyságot, a zajszintet, a súrlódási veszteséget és az élettartamot**. A modern tervezés ezért már nem kizárólag empirikus úton történik, hanem **számítógépes algoritmusokkal támogatott, többcélú optimalizálási folyamat** eredménye.
A hagyományos **evolvens fogprofil** mellett ma egyre elterjedtebbek a **hibrid és aszimmetrikus fogazatok**, amelyeknél a hajtási és visszahajtási oldalak különböző görbületi sugárral rendelkeznek. Mivel kerékpáros hajtásokban a nyomaték döntően egyirányú, az aszimmetrikus profil lehetővé teszi, hogy a hajtási oldalon nagyobb teherbírású, míg az ellentétes oldalon vékonyabb, könnyebb fogszerkezet alakuljon ki. Ezzel az elvvel akár **10–15%-os tömegcsökkenés** is elérhető a hajtókerék szintjén, miközben a biztonsági tényező nem csökken.
A **fogszám-arányok** optimalizálása – különösen a nap- és gyűrűkerék közötti kapcsolatban – kulcsfontosságú a méret minimalizálásában. A kisebb osztókör-átmérő és finommodulú fogazat nagyobb fogszámot enged ugyanazon térfogat mellett, ami egyenletesebb terheléseloszlást eredményez. A **modul 0,8–1,25 mm** tartományban jellemző a kerékpáros hajtásoknál, míg a fogoldalak közötti mikroprofilozás 2–4 µm pontosságot igényel, amit CNC-marás vagy szikraforgácsolás biztosít.
A geometriai optimalizáció során alkalmazott **végeselemes analízis (FEA)** segíti a kontaktfeszültségek, a foggyök-hajlítás és a súrlódási hőeloszlás modellezését. Ezzel pontosan meghatározható, hogy mely fogrészek terhelhetők túl a megengedett érték felett. Az optimalizálási folyamat során több célfüggvény egyidejű kezelése szükséges – például **minimális tömeg, maximális nyomatéktűrés és alacsony zaj**.
Az utóbbi években a **genetikus algoritmusok (GA, NSGA-II)** és a **mesterséges intelligencia alapú optimalizációs módszerek** terjedtek el. Ezek képesek több ezer lehetséges fogprofil-variációt értékelni, és olyan konfigurációkat választani, amelyek a legkedvezőbb kompromisszumot adják a terhelhetőség és méret között. A mesterséges intelligenciával támogatott modellek az iterációs folyamatot akár **50–70%-kal lerövidítik**, és 20–30%-os térfogatcsökkenést is eredményezhetnek a végleges hajtóműegységben.
A **bolygókerék-hordozók és gyűrűk topológiai optimalizálása** szintén jelentős hatással bír. A belső üregezés, rácsos erősítések és változó keresztmetszetek a terhelésút mentén minimalizálják az anyagfelhasználást. A generatív design algoritmusok (pl. Autodesk Fusion 360, ANSYS OptiStruct) képesek az adott nyomatékeloszlás alapján új, nem intuitív geometriai megoldásokat létrehozni, amelyek a klasszikus konstrukcióknál akár **25%-kal kisebb tömeget** eredményeznek azonos nyomatékkapacitás mellett.
Összességében a fogaskerék-geometriai fejlesztések és optimalizációs algoritmusok integrált alkalmazása a precíziós bolygóművek esetében **új dimenziót nyitott a hajtómű-miniatürizálásban**. Az így előállított rendszerek nemcsak könnyebbek és kisebbek, hanem csendesebbek, hosszabb élettartamúak és energiahatékonyabbak is – pontosan azok a tulajdonságok, amelyek a **kerékpáros hajtások jövőbeli generációiban** meghatározóvá válnak.

Geometriai optimalizáció eredménye

- Egy átlagos kerékpár bolygómű konstrukció mérete 25-30%-kal csökkenthető a fogásmegoszlás és fogprofil variálásával.
- A kétfokozatú bolygóművek sokszor elegendők a szokásos áttételek eléréséhez, szemben a korábbi

háromfokozatú változatokkal, ezzel jelentős hely- és tömegmegtakarítás érhető el.

Mechanikai kontaktusok, felületvédelem, működési élettartam

Az élettartamot befolyásoló tényezők: a kapcsolatfelületek minősége, felületkezelés, kenés vagy annak elhagyása, valamint a rezgéscsillapítás. A szárazon futó polimer rendszereknél különösen fontos a mikroprofilozott fogazat, ami csökkenti a surlódást és kopást is. Az acél fogaskerekeknél elterjedt a DLC bevonat, nitridálás, amelyek az élettartamot, tartósságot növelik és lehetővé teszik a kisebb keresztmetszetet.

Mechanikai tartósság vizsgálatok

- Egyes ipari tesztek szerint a műanyag kompozit rendszerek már elérik a 40-60 ezer km-es tervezett futásteljesítményt agyváltóban.
- Az acélból készült fogaskerekek tartósabbak, de a műanyag összetétel miatt a súlyuk 30-50%-kal kisebb lehet, és zéró kenőanyagot igényelnek.

4. IPARI ALKALMAZÁSOK ÉS INNOVÁCIÓK

A fejlesztés élbolyában szerepelnek a Shimano STEPS, Bosch, Igus µ család, Rohloff Speedhub és magyar fejlesztésű Emika prototípusok, amelyek eltérő anyagokat, geometriai megoldásokat és felületkezeléseket alkalmaznak a méret és tömeg minimalizálásához. Az integrált váltómodulok (Bosch Active, Shimano STEPS) egyre kisebb helyigénnyel jelennek meg a modern elektromos kerékpárokban. Az Igus műanyag bolygóművek teljesen karbantartás-mentes, kisméretű rendszerek, míg a Rohloff levehető, acél-rendszerű agyváltó főként trekking, túrakerékpárokban használt.

Kompakt bolygóművek táblázata:

Típus	Anyag	Legkisebb átmérő	Tömeg (kg)	Max. terhelés (Nm)	Gyártó
Igus µ család	Polimer	52 mm	0,35	21	Igus
Shimano STEPS	Kompozit	60 mm	0,44	35	Shimano
Bosch Active	Acél/ kompozit	70 mm	0,51	42	Boschc
RCYL prototípus	Polimer	50 mm	0,29	18	Saját adatok

5. KUTATÁS-FEJLESZTÉSI TRENDEK, JÖVÖBENI IRÁNYOK INNOVÁCIÓK

Az automatizált konstrukciós optimalizálás (AI, numerikus szimulációk, generatív design), 3D nyomtatott, mikroprecíziós alkatrészek, karbantartásmentes hajtásláncok, valamint a digitalizált gyártási módszerek jelentik a fejlődés irányát. Az iparban megfigyelhető, hogy a bolygóművek fejlesztése egyre inkább beépül a teljes váltó-motor rendszerbe, minimalizálva az installációs helyigényt és optimalizálva a működési paramétereket.

6. PIACI TRENDEK

- 2026-ra prognosztizálható tovább erősödő polimer/kompozit részarány, kiterjesztett automatizált tervezéssel és mesterséges intelligenciával támogatott optimalizációval.
- A digitális modellezés, FEA-szimulációk alkalmazásával tovább csökken a prototípus-gyártás költsége és a tömeg.

7. KÖVETKEZTETÉSEK

A méretcsökkentés minden fejlesztési elemben megvalósítható: anyagkiválasztással, szerkezeti geometria optimalizációval, matematikai modellezéssel, gyártástechnológia korszerűsítésével, digitális szimulációval, valamint az automatizált kutatási eszközök bevonásával. Így a precíziós bolygóműves hajtóművek a jövő kerékpáriparának nélkülözhetetlen részévé válnak, hozzájárulva a könnyebb, tartósabb, karbantartásmentes, energiatakarékos új generációs kerékpárok terjedéséhez.

IRODALOM

[1] Neugart: Planetary Gear Reducerneugart https://www.neugart.com/en/planetary-gear-reducer

[2] Wikipedia: Epicyclic gearingwikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Epicyclic_gearing

[3] Igus: Planetary gears and their use in https://toolbox.igus.com/

[4] Optimization of Planetary Gear Box for High reduction ratio S.B.Nandeppagoudar, S.N. Shaikh1 and S.H. Gawande. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN:2320-334X, PP.39-50. www.iosrjournals.org

[5] Cyclingabout: Bicycle Gearbox Drivetrainscyclingabout https://www.cyclingabout.com/bicycle-gearbox-drivetrains-shimano-praxis-ratiox-fox-wrp/

[6] Aleksandar Marinković, Miloš Sedak, Tatjana Lazović and Maja Rosić Structural Optimisation of Planetary Gearbox Components, FME Transactions VOL. 53, No 1, 2025 ▪ 83

[7] A Parmar, P Ramkumar, K Shankar Macro geometry multi-objective optimization of planetary gearbox considering scuffing constraint Mechanism and Machine Theory, 2020•

Elsevier https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.104045

[8] Thomas Tallerico, ASA/TM-20220008843 Genetic Optimization of Planetary Gearboxes Based on Analytical Gearing Equations Glenn Research Center, Cleveland, Ohi. TECHNICAL PUBLICATION.pp. 19.

[9] Long Chang Hsieh ang Tzu Hsia Chen 2013 On the Design of Planetary Gear Reducerscientific https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.284-287.867

[10] Macfoxbike: Reduction Ratio for Electric Bicyclesmacfoxbike https://macfoxbike.com/blogs/knowledge/reduction-ratio

[11] Precíziós bolygókerekes hajtómű EP-standard szériareduktor https://reduktor.hu/termek/precizios-bolygokerekes-hajtomu-ep/

[12] SGR Gear: Design Applications and Selection Guidesgrgear https://www.sgrgear.com/news/industry-news/planetary-gear-reducers-design-applications-and-selection-guide.html