Kerékpárokban alkalmazható elektromos hibrid kerékagy technológia – műszaki kihívások a fejlesztésben és a gyártástechnológiában

Bell Márton okl. gépészmérnök, Kabai Domokos okl. közl. mérnök, dr. Kőfalvi Gyula, okl. közl. mérnök,

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

Abstract: Az elektromos mobilitás forradalma az elmúlt évtizedben a közlekedés szinte minden szegmensét átalakította, beleértve a hagyományosan emberi erőre épülő kerékpáripart is. A villamos rásegítéssel működő rendszerek – az e-bike-ok, pedelec típusok és hibrid hajtású járművek – a technológiai innovációk egyik legdinamikusabban fejlődő területét jelentik. Ezek a rendszerek nem pusztán kényelmi kiegészítések: stratégiai szerepet töltenek be az energiahatékony, fenntartható és alacsony károsanyag-kibocsátású közlekedés megvalósításában. A gyors urbanizáció, a városi közlekedés túlterheltsége és a környezeti terhelés csökkentésének igénye új típusú, intelligens hajtásrendszerek fejlesztését ösztönzik, amelyek az emberi erő és a villamos energia optimális kombinációját célozzák.

1. BEVEZETÉS

A fejlesztések egyik leginnovatívabb iránya a hibrid kerékagy-technológia, amelyben a hajtás és az energia-visszanyerés funkciói közvetlenül a kerékbe integrált egységben valósulnak meg. Ez a megoldás a mechanikai és elektromos energiaáramlás szoros összekapcsolását teszi lehetővé, minimalizálva a veszteségeket és egyszerűsítve a szerkezeti felépítést. Az elektromos hibrid kerékagy célja, hogy az emberi pedálozásból származó mechanikai energiát és az akkumulátorból származó villamos energiát egy egységes, intelligens rendszerben kezelje, amely valós idejű vezérléssel alkalmazkodik a terheléshez, a sebességhez és a terepviszonyokhoz.

A technológiai alapelv két fő konstrukciós megközelítést különböztet meg: a párhuzamos és a soros hibrid rendszert.
A párhuzamos hibrid rendszerben az elektromos motor közvetlenül a mechanikai hajtásláncba kapcsolódik, így az emberi és elektromos energia egyidejűleg járul hozzá a hajtáshoz. Ez a megoldás a hagyományos láncjajtásra épül, miközben lehetőséget ad a motor nyomatéktámogatására, illetve regeneratív fékezésre is.
A soros hibrid ezzel szemben egy generátoros pedálrendszert alkalmaz: az emberi erő először elektromos energiává alakul, majd ezt a motor alakítja vissza forgatónyomatékká. Bár ennek a megoldásnak az összhatásfoka jellemzően alacsonyabb, lehetőséget ad a mechanikai elemek elhagyására, a hajtáslánc egyszerűsítésére, valamint az energiaáramlás teljes digitális szabályozására.

Mindkét rendszer esetében a fejlesztési cél azonos: optimális hatásfok, kedvező tömeg/teljesítmény arány, alacsony karbantartási igény és magas felhasználói komfort elérése. A hibrid kerékagy ugyanakkor nem csupán hajtástechnikai, hanem komplex interdiszciplináris feladat is, amelyben a gépészeti, elektrotechnikai, vezérléstechnikai és anyagtudományi ismeretek összehangolt alkalmazása szükséges. A kis méretű, mégis nagy nyomatékot biztosító motor kialakítása, a hőelvezetés megoldása, a csapágyazás és a rezgéscsillapítás integrált kezelése mind komoly mérnöki kihívást jelent.

Az energia-visszanyerés (rekuperáció) hatékony megvalósítása külön figyelmet igényel. A rendszernek képesnek kell lennie a kinetikus energia elektromos energiává alakítására anélkül, hogy ez a fékezési komfortot vagy a biztonságot rontaná. Ehhez korszerű teljesítményelektronikai egységek, precíziós szenzorok és adaptív vezérlő algoritmusok szükségesek. Az energiatárolás és a cellamenedzsment szintén kritikus tényező: a kis méretű akkumulátorok nagy ciklusélettartama és az alacsony tömeg fenntartása közötti kompromisszum a fejlesztés egyik legfontosabb kérdése.

A gyártástechnológiai oldalról a hibrid kerékagy különösen magas integrációs fokot igényel. A kompakt kialakítás megköveteli a precíziós megmunkálást, az öntvény- és kompozit szerkezeti elemek pontos illesztését, valamint a mikroelektronikai modulok vibrációálló beépítését. Az alkatrészek kis helyen történő elrendezése miatt a gyártási toleranciák rendkívül szűkek, ami fokozott automatizáltságot és gépi minőségellenőrzést igényel. A hőkezelés, felületkezelés és rezgésvizsgálat a gyártási folyamat szerves része, mivel a kerékagyban keletkező hőterhelések és mechanikai igénybevételek hosszú távon jelentősen befolyásolják az élettartamot.

Az ipari fejlesztések az utóbbi években már túlmutatnak a laboratóriumi prototípusokon. Megjelentek olyan hibrid kerékagy-megoldások, amelyek moduláris kialakítással, önkalibráló szenzorrendszerekkel és okos vezérlési algoritmusokkal rendelkeznek, lehetővé téve a személyre szabott teljesítményprofilokat és a prediktív karbantartást. Ugyanakkor a tömeggyártásra való áttérés még számos kihívással szembesül, különösen az anyagválasztás, a hőtechnikai stabilitás és a költséghatékonyság területén.

Összességében az elektromos hibrid kerékagy technológia a modern kerékpáripar egyik legígéretesebb fejlesztési iránya, amely egyszerre szolgálja az energiahatékonyságot, a felhasználói élményt és a környezeti fenntarthatóságot. A jövő fejlesztéseinek kulcsa az integrált szemlélet: a mechanikai, elektronikai és szoftveres komponensek együttes optimalizálása révén valósulhat meg a nagy sorozatban is gazdaságosan gyártható, biztonságos és hosszú élettartamú hibrid hajtásrendszer, amely új mércét állíthat a városi és sportcélú kerékpározásban egyaránt.

2. FEJLESZTÉSI KIHÍVÁSOK

A fejlesztési nehézségek elsődleges forrása a rugózatlan tömeg növekedése. A kerékbe integrált motor, energiaátalakító elektronika és akkumulátor a jármű dinamikai jellemzőire közvetlen negatív hatással van, mivel a megnövekedett tömeg hátrányosan befolyásolja az úttartást és a lengéscsillapítás hatékonyságát. Ez különösen a nagy sebességen történő haladásnál és rossz minőségű útfelületeken válik kritikus tényezővé, ahol a fokozott tömeg jelentősen növeli a felfüggesztés terhelését. Ennek következményeként a futómű-tervezés, a kerékagy geometriája és anyagválasztása újraértékelést igényel.

Modern anyagtechnológiai megoldások között egyre elterjedtebbek a könnyített alumínium-mátrix kompozitok és karbonalapú szerkezeti elemek. Ezekkel akár 20–25%-os tömegcsökkentés érhető el, ugyanakkor a költségek és gyártási bonyolultság növekedése gazdaságossági szempontból komoly mérlegelést igényel. A gyártás során precíziós öntési technológiák, vákuumkompozit-formázás és CNC-megmunkálás kombinációját alkalmazzák, ami magas szintű minőségbiztosítást követel.

A vezérlőrendszer és energiaátalakítás a második legkritikusabb tényező. A hibrid kerékagyak szenzorokkal, nyomatékmérőkkel, fordulatszám-érzékelőkkel és kommunikációs modulokkal (például Bluetooth LE vagy CAN-busz interfésszel) működnek. Az érzékelők adatainak valós idejű feldolgozása és szinkronizálása fejlett beágyazott szoftverfejlesztést és nagy megbízhatóságú mikrovezérlőket igényel, amelyek képesek szélsőséges hőmérsékleti és rezgési környezetben stabilan üzemelni. A következő generációs rendszerek mesterséges intelligencia-algoritmusokat alkalmaznak a pedálnyomás mintázatainak felismerésére és a motorvezérlés adaptív hangolására, így a felhasználó számára természetesebb, energiatakarékosabb rásegítést biztosítanak.

A kompatibilitás is kulcskérdés. A gyártók számára komoly műszaki kihívást jelent, hogy a hibrid kerékagyak különféle vázszerkezetekhez, kerék-átmérőkhöz és felfogatási szabványokhoz illeszkedjenek. A tengelyátmérők eltérései, a tárcsafék-standardok sokfélesége, valamint az elektromos csatlakozótípusok diverzitása miatt a teljes körű szabványosítás jelenleg nem megvalósítható. E problémák enyhítésére fejlesztés alatt állnak moduláris adapterrendszerek, állítható villa- és hátsó háromszög-felfogatások, valamint univerzális csatlakozó-interfészek, amelyek lehetővé teszik a kerékagy gyors cseréjét és különböző biciklitípusokhoz való illesztését.

A hőelvezetés és vízállóság biztosítása tovább bonyolítja a fejlesztést. A motor, a vezérlő elektronika és az akkumulátor folyamatos hőtermelése a zárt kerékagyban jelentős hőfelhalmozódáshoz vezethet. A hatékony hőmenedzsment érdekében a fejlesztők mikrocsatornás folyadékhűtéses rendszereket, hővezető pasztákat, nagy hatékonyságú hőelvezető kompozitokat, valamint kerámiabevonatokat tesztelnek. Ezzel párhuzamosan a vízszigetelés IP67–IP68 fokozatban történő megvalósítása kritikus, hiszen a kerék közvetlenül ki van téve csapadéknak, sárnak és porhatásoknak, amelyek hosszú távon korróziós és elektromos kontakt-hibákat okozhatnak.

Az akkumulátor-technológia jelenlegi korlátai – kapacitáscsökkenés az életciklus végén, újrahasznosíthatósági problémák, töltési infrastruktúra hiányosságai – szintén meghatározzák a hosszú távú fejlesztési stratégiákat. Jövőbeli irányként egyre nagyobb figyelem jut a szilárdtest-akkumulátoroknak, amelyek magasabb energiasűrűséget, gyorsabb töltést és hosszabb élettartamot kínálnak, valamint a gyorscserélhető moduláris energiatárolóknak, amelyek a felhasználói karbantartást és töltési folyamatokat egyszerűsítik.

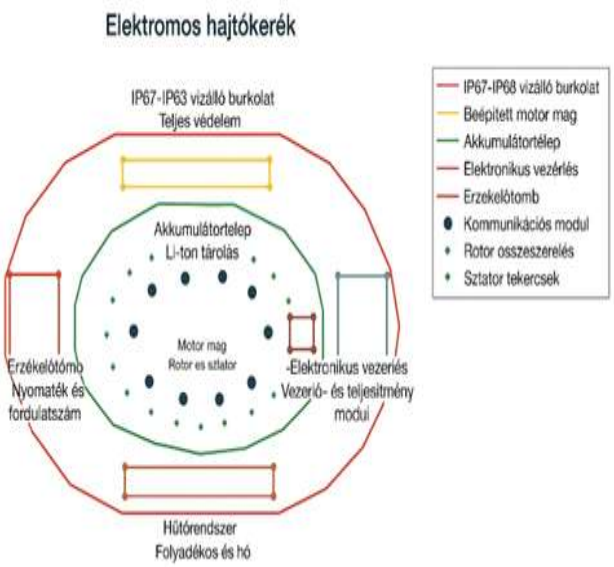
Végezetül, a gyártástechnológiai oldal sem mellőzhető: a pontos tűréshatárok, a komponensek vibrációs tesztelése, a tömegtermelés minőségellenőrzési protokolljai és a logisztikai

lánc optimalizálása egyaránt kulcsszerepet játszanak abban, hogy a fejlesztési koncepcióból valóban piacképes, megbízható, hosszú távon is fenntartható elektromos hibrid kerékagy szülessen.

Elektromos hibrid kerékagy fő szerkezeti egységei, amely ábrázolja a motor integrált egységeit, beleértve a következőket:

1. Beépített motor és tekercselés
2. Elektronikus vezérlőmodul
3. Akkumulátorcsomag
4. Szenzorok (nyomatékmérő, fordulatszám-érzékelő)
5. Kommunikációs modul (pl. Bluetooth LE)
6. Hőelvezető rendszer mikrocsatornás folyadékhűtéssel és hővezető pasztával
7. Vízzáró, IP67–IP68 szabvány szerinti burkolat

Az egységek egymáshoz való elhelyezkedése és csatlakozóik is jól követhetők az ábrán, amely a fejlesztési műszaki követelményeknek megfelelő módon mutatja be a kulcskomponenseket és funkciójukat.



1. ábra Elektromos hajtókerék részei

3. GYÁRTÁSTECNOLÓGIAI AKADÁLYOK

Az elektromos hibrid kerékagyak fejlesztése és gyártása a modern járműipar egyik legösszetettebb, legprecízebb feladata. Mivel e rendszerekben a mechanikai, elektromos és elektronikai komponensek szoros térbeli és funkcionális integrációban működnek, a gyártás során a legkisebb geometriai vagy szerelési hiba is jelentős teljesítményveszteséget, zajt, rezgést vagy meghibásodást okozhat. A siker kulcsa ezért a mikronos pontosságú megmunkálás, az automatizált gyártási folyamatok, valamint az adatvezérelt minőségbiztosítás.

1. Precizitás és illesztési követelmények

A hibrid kerékagyak szerkezete jellemzően több, nagy pontosságot igénylő egységből áll: csapágyazás, mágneses rotor, stator, tengely, burkolat és tömítések.

Ezek az elemek nemcsak mechanikailag illeszkednek egymáshoz, hanem elektromágneses szempontból is meghatározóak. Például a rotor és a stator közötti légrés (air gap) vastagsága mindössze néhány tized milliméter, amelynek eltérése akár 2–3%-os hatásfokcsökkenést is okozhat. Ezért a precíziós CNC megmunkálás – többtengelyes marás, esztergálás és köszörülés – nélkülözhetetlen. A csapágyhelyek, tengelyfuratok és mágnesülések méretpontosságát ±2–5 µm tűrésben kell tartani, ami már a repülőgépipari gyakorlatokhoz közelít. Az illesztések precizitása különösen fontos a vibrációs stabilitás és a zajcsökkentés szempontjából. A forgórész dinamikus kiegyensúlyozása során minden alkatrészt külön azonosítóval látnak el, és a tömegeltéréseket mikrogrammos szinten korrigálják. Ezt általában automatikus kiegyensúlyozó állomások végzik, amelyek lézeres mérőrendszerrel és robotkaros korrekciós egységgel dolgoznak.

2. Automatizált szerelés és inline ellenőrzés

A hibrid agyak szerelése során a kézi munka szerepe minimalizált. Az automatizált szerelősorok nagy pontosságú, kameravezérlésű robotokat alkalmaznak, amelyek képesek a szenzorokat, mágnesgyűrűket és elektronikai modulokat ±0,05 mm pontossággal illeszteni. A szerelés után minden egyes egység inline minőségellenőrzésen megy keresztül, amely magában foglalja a geometriai méréseket, elektromos teszteket és hőérzékelő kalibrációkat. A korszerű gyártóüzemekben ma már elterjedtek a robotizált kalibrációs állomások, ahol lézeres triangulációs érzékelők és optikai interferométerek vizsgálják az alkatrészek pozícióját és a mágneses tengely szimmetriáját. Az ilyen automatizált kalibrációs folyamatok lehetővé teszik, hogy a gyártási hibák még a szerelés befejezése előtt azonosíthatók és korrigálhatók legyenek.

3. Minőségbiztosítás és diagnosztika

A minőségbiztosítás szerepe a hibrid hajtásrendszerek esetében stratégiai fontosságú. Minden legyártott egység többfázisú ellenőrzésen esik át:

Elektromos teljesítménymérés: a motor nyomatékát, hatásfokát, áramfelvételét és feszültségingadozásait dinamikus terhelés alatt vizsgálják.

Hőterheléses tesztek: a rotor és a stator hőprofilját infravörös kamerákkal rögzítik, hogy a hőelvezetés megfelelő legyen.

Vízállósági és porvédelmi próbák: az IP67 vagy IP68 szabvány szerinti vizsgálatok biztosítják, hogy a kerékagy hosszú távon ellenálljon a környezeti hatásoknak.

A szoftveres diagnosztika – ún. end-of-line (EoL) teszt – ma már ipari alapkövetelmény.

A rendszer adatbázisban rögzíti minden egyes motor paramétereit (nyomatékgörbe, hőprofil, rezgésadatok, szenzorkalibráció), amely lehetővé teszi a hibastatisztikák, trendek és prediktív karbantartási modellek kialakítását. Ezzel

a gyártó nemcsak a minőségbiztosítást, hanem a teljes élettartam-menedzsmentet is támogatja.

4. Anyagválasztási kihívások

A hibrid kerékagy egyik legnagyobb kihívása az anyagkompromisszum: a könnyű szerkezet, a magas szilárdság, a jó hővezetés és a mágneses tulajdonságok ritkán teljesülnek egyszerre. A burkolati és statorház-elemek gyártásához alumínium- és magnéziumötvözeteket, valamint nagy sűrűségű polimer-kompozitokat használnak. A mágneses kör elemeihez ritkaföldfém-alapú neodímium-vas-bór (NdFeB) mágnesek alkalmazása elterjedt, mivel ezek nagy energiasűrűséget biztosítanak kis tömeg mellett. Ugyanakkor az ilyen anyagok ára és geopolitikai elérhetősége miatt egyre több gyártó keres alternatívákat, például ferritmagos vagy mangán-alapú mágneses ötvözeteket, amelyek kevésbé érzékenyek a hőmérsékletváltozásra és újrahasznosíthatók. A hővezető paszták, bevonatok és kompozit rétegek alkalmazása kulcsszerepet játszik a hőelvezetésben, különösen zárt agyházak esetén. A csapágyak anyagát gyakran kerámia-hibrid megoldásokból választják (pl. Si_3N_4 golyók acél futógyűrűben), ami jelentősen csökkenti a súrlódást és növeli az élettartamot.

5. Fenntarthatóság és körforgásos gyártás

A modern kerékpáriparban a fenntartható gyártás ma már nem opcionális, hanem stratégiai követelmény. A ritkaföldfém-mentes motorok és az újrahasznosítható burkolatok mellett a gyártók ökodesign szemléletet alkalmaznak: a komponensek szétszerelhetősége, újrahasznosíthatósága és moduláris felépítése kulcstényező. A zöld gyártási folyamatok – például a vízbázisú hűtőfolyadékok, az alacsony emissziójú hőkezelés és a hulladékhő-visszanyerés – egyre szélesebb körben terjednek. A szénlábnyom-csökkentés érdekében több európai gyártó áttért a lokalizált beszállítói hálózatokra, csökkentve a szállításból eredő környezeti terhelést.

6. Digitalizáció, digital twin és gyártástervezés

A hibrid kerékagyak gyártása a digitalizációs átmenet egyik legjobb példája. A digitális ikermodell (digital twin) technológia lehetővé teszi, hogy a teljes gyártási folyamat – a tervezéstől a sorozatgyártásig – valós időben szimulálható és optimalizálható legyen. A mérnökök már a prototípus-fázisban virtuális környezetben elemzik a szerelési hibákat, deformációkat és hőtérképeket, ezáltal csökkentik a fizikai próbák számát és költségét. A digitális ikrekhez kapcsolódó IoT-szenzorhálózatok adatokat gyűjtenek a gyártás közben fellépő rezgésekről, hőingadozásokról és elektromos paraméterekről. Ezeket az adatokat gépi tanulás alapú algoritmusok értékelik, amelyek előrejelzik a várható hibákat, például a csapágykopást vagy a mágneses tér eltolódását. Így a gyártás nem csupán minőségellenőrzött, hanem önoptimalizáló folyamattá válik.

7. Beszállítói integráció és együttfejlesztés (co-engineering)

A hibrid hajtások összetettsége miatt a beszállítói lánc integrálása létfontosságú. A motorok, elektronikák, akkumulátorok, szoftverek és mechanikai komponensek különböző szakterületekhez tartoznak, ezért a siker kulcsa az együttfejlesztés (co-engineering). A vezető gyártók közös platformokat hoznak létre, ahol a beszállítók már a tervezés korai szakaszában részt vesznek a konstrukciós döntésekben. Ezzel csökkenthetők a kompatibilitási problémák, lerövidíthető a fejlesztési ciklus, és megelőzhetők az utólagos módosításokból eredő többletköltségek.

Összegezve, a hibrid kerékagyak gyártása a korszerű ipari technológia egyik csúcsterülete, ahol a mikronos gépészeti pontosság, a digitalizált gyártásirányítás és a fenntarthatósági szemlélet egységben működik.

A gyártástechnológiai akadályok leküzdése nem csupán mérnöki, hanem rendszerszintű kihívás: a precíziós megmunkálás, az automatizált kalibráció, az anyaginnováció és a digitális gyártási modellek integrált alkalmazása nélkül a hibrid hajtások tömeges, gazdaságos előállítása nem lenne megvalósítható. A jövő fejlődési iránya egyértelműen az adatvezérelt, fenntartható, intelligens gyártás, amely lehetővé teszi, hogy a hibrid kerékagy-technológia széles körben elérhetővé váljon a városi közlekedés és a sportcélú kerékpározás világában egyaránt.

4. JÖVŐBENI IRÁNYOK

A kutatási és fejlesztési trendek egyértelműen a **könnyített szerkezetű, intelligens és önszabályozó hibrid kerékagy-rendszerek** felé mutatnak. A fejlesztők célja olyan integrált egységek létrehozása, amelyek nem csupán hajtásra képesek, hanem aktívan részt vesznek az energia-visszanyerésben, az állapotfigyelésben és a prediktív vezérlésben is. Az új generációs hibrid kerékagyak már nem tekinthetők pusztán mechanikai-elektromos átalakítóknak: komplex mechatronikai rendszerek, amelyek valós időben reagálnak a felhasználói és környezeti paraméterek változásaira.

A **rekuperációs energiahasznosítás** továbbfejlesztése a jövő egyik kulcsterülete. A modern rendszerek képesek a fékezés során keletkező kinetikus energiát hatékonyan visszanyerni, és azzal az akkumulátort részben vagy teljes mértékben újratölteni. A nagy energiasűrűségű akkumulátorcellák és a fejlett energiaáram-szabályozók lehetővé teszik, hogy a visszatáplált energia akár azonnal újra felhasználható legyen gyorsításkor vagy emelkedőn történő haladáskor. Ezzel a megoldással a hibrid kerékagy nemcsak hatékonyabbá, hanem energetikailag önfenntartóbbá is válik.

A **vezeték nélküli kommunikációs technológiák** – mint a Bluetooth Low Energy (BLE), a Wi-Fi Direct és a 5G-alapú adatkapcsolat – beépítése új dimenziókat nyit a diagnosztika és a felhasználói interakció terén. A valós idejű adatgyűjtés és távdiagnosztika révén a rendszer folyamatosan monitorozhatja a hőmérsékletet, az áramerősséget, a csapágykopást és a cellák állapotát, így időben képes jelezni az esetleges hibákat. Az

önellenőrző és önkalibráló funkciók a karbantartási igények minimalizálását szolgálják, ami különösen fontos a városi közösségi kerékpárrendszerek és a nagy futásteljesítményű használati modellek esetén.

A **mesterséges intelligencia (MI)** és a gépi tanulás (ML) alkalmazása a vezérlésben immár nemcsak kutatási koncepció, hanem valós fejlesztési irány. Az adaptív vezérlőrendszerek képesek felismerni a felhasználó pedálozási stílusát, terhelési mintázatait, sőt a terepviszonyokat is. Ezen adatok alapján a rendszer proaktívan állítja be a rásegítés mértékét, így növelve az energiahatékonyságot és a menetkomfortot. A mesterséges intelligencia által támogatott **prediktív karbantartás** (Predictive Maintenance) lehetővé teszi az alkatrészek elhasználódásának előrejelzését, ezáltal csökkenti a szervizidőt és az üzemeltetési költségeket, miközben növeli a rendszer élettartamát.

A **szabályozási környezet** szintén kulcsszerepet játszik a fejlesztési irányok kijelölésében. Az Európai Unió új akkumulátor-rendeletei (pl. 2019/1379/EU, valamint a 2023-ban hatályba lépett 2023/1542/EU) előírják a teljes életciklus-nyomon követést, az újrahasznosítási arányok növelését, valamint az akkumulátor-útlevél (Battery Passport) kötelező bevezetését. Ezek a követelmények közvetlenül érintik a hibrid kerékagy-rendszerek gyártóit, akiknek biztosítaniuk kell az anyagáramlás, az energiamérleg és az újrahasznosíthatóság teljes dokumentálását. A környezeti megfelelés (Environmental Compliance) így nem pusztán jogi előírás, hanem a piaci versenyképesség alapfeltétele.

Az **e-mobilitási infrastruktúra** fejlődése új lehetőségeket teremt a hibrid kerékpárok hálózatba integrálására. Az okosváros-fejlesztések (Smart City) keretében kiépülő **intelligens töltőpontok**, **városi energiahálózatok** és **adatvezérelt közlekedési rendszerek** képesek lesznek valós időben optimalizálni a kerékpárok energiaellátását és parkolási logisztikáját. A jövőben elképzelhető, hogy a hibrid kerékpárok automatikusan kommunikálnak az úthálózat-szenzorokkal és a közösségi közlekedési rendszerekkel, ezzel valós **multimodális mobilitási ökoszisztémát** hozva létre.

Hosszabb távon a hibrid kerékagyak fejlődése várhatóan a **szuperkönnyű kompozit anyagok**, a **szilárdtest-akkumulátorok**, valamint az **önjavító bevonatok** irányába tolódik el. Ezek a megoldások nemcsak a hatásfokot, hanem a megbízhatóságot és az élettartamot is javítják, miközben lehetőséget adnak a tömeggyártás költségcsökkentésére. A jövő elektromos hibrid kerékpárja tehát nemcsak közlekedési eszköz, hanem **intelligens, hálózatba kapcsolt energiamenedzsment-egység**, amely a fenntartható mobilitás egyik legfontosabb pillérévé válhat az okosvárosokban.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Az elektromos hibrid kerékagy-technológia a modern kerékpáripar egyik legdinamikusabban fejlődő területe, mivel segíti az energiahatékony, fenntartható és alacsony károsanyag-kibocsátású közlekedés megvalósítását. A fejlesztés motorja az urbanizáció, a városi közlekedés túlterheltsége és a környezeti terhelés csökkentésének igénye.

Fő technológiai megközelítések

- Párhuzamos hibrid: Az elektromos motor közvetlenül kapcsolódik a mechanikai hajtásláncba, így az emberi és elektromos energia egyszerre járulnak hozzá a hajtáshoz. Ez lehetővé teszi a motor rásegítését és regeneratív fékezést is.

- Soros hibrid: Az emberi energia előbb elektromos energiává alakul, majd a motor forgatónyomatékká alakítja. Ez egyszerűsített hajtásláncot jelent, de általában alacsonyabb hatásfokot eredményez.

Műszaki kihívások a fejlesztésben

- Rugózatlan tömeg növekedése: Az integrált motor és akkumulátor rontja az úttartást és a lengéscsillapítás hatékonyságát, így a futómű, a kerékagy geometria és az anyagválasztás új tervezési szempontokat igényel. Modern anyagok, például alumínium-mátrix kompozitok vagy karbon szerkezeti elemek 20–25% tömegcsökkentést eredményezhetnek.

- Vezérlőrendszer és energiaátalakítás: Fejlett szenzorok, nyomatékmérők, kommunikációs modulok (Bluetooth, CAN-busz) precíz működést és fejlett szoftverfejlesztést, valamint nagy megbízhatóságú mikrovezérlőket követelnek. A jövő mesterséges intelligenciát alkalmaz az adaptív vezérlésre.

- Kompatibilitás: A különféle vázszerkezetekhez, fék- és tengely szabványokhoz való illeszthetőség moduláris adapterrendszerek, univerzális csatlakozók fejlesztését kívánja meg.

- Hőelvezetés és vízállóság: Mikrocsatornás folyadékhűtés, hővezető paszta és speciális bevonatok segítenek a motor keletkező hőjének elvezetésében; a vízzárás IP67–IP68 szabvány szerint alapkövetelmény.

- Akkumulátor-technológia: A kis tömegű, hosszú életciklusú akkumultorok, valamint a gyorscsere- és moduláris energiatárolók fejlesztése kulcsfontosságú.

Gyártástechnológiai akadályok

- Precíz CNC-megmunkálás, szűk tűrések és automatizált szerelési, minőségellenőrzési eljárások szükségesek. A minőségbiztosításban mesterséges intelligencia, digitális ikermodell (digital twin) és

automatizált tesztelő- és kalibrációs rendszerek támogatják a sorozatgyártást.

- Az anyagválasztás kompromisszumokat igényel a könnyű szerkezet, szilárdság és mágneses tulajdonságok között. Fenntartható, ritkaföldfém-mentes, újrahasznosítható komponensek egyre fontosabbak.

Jövőbeli irányok
A trendek a könnyített szerkezetek, mesterséges intelligenciával támogatott vezérlő rendszerek, fejlett energiatárolás és intelligens diagnosztika irányába mutatnak. Az európai szabályozások (pl. Battery Passport, újrahasznosítási előírások) közvetlenül befolyásolják a gyártók fejlesztési stratégiáit, miközben a smart city infrastruktúra és az IoT-hálózatok integrációja is egyre jelentősebb szerepet kap.

Összegezve, az elektromos hibrid kerékagy-technológia átfogó mérnöki, gyártástechnológiai és szoftveres fejlesztést kíván, amely a fenntartható és intelligens városi közlekedés kulcseleme lehet a közeljövőben.

Irodalomjegyzék

Szakirodalmi források

- Bell Márton, Kabai Domokos, dr. Kfalvi Gyula: Elektromos hibrid kerékagy technológia – műszaki kihívások a fejlesztésben és a gyártástechológiában (2025)
- Contò, Chiara; Bianchi, Nicola: E-Bike Motor Drive – A Review of Configurations and Capabilities. Energies (2023)
- Hung, N.B.: A review of history, development, design and research of electric bicycles. Energy (2020)
- Dhandapani, S.: Design, Fabrication and Analysis of Chassis for Electric Bike. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (2024)
- Tjandra, D.: Development of a High-Torque, Low-Cost Electric Bicycle Hub Motor. ETASR, 2025
- Artificial intelligence assisted electric bicycle modelling using BLDC hub motor principles. AIP Conference Proceedings (2025)
- IRJET: A Review of Hybrid Electric Bike, 2021
- Wang, S.M.: Analysis of technology acceptance and planned behavior for smart city shared e-bike adoption, PMC Open Access (2025)
- Lin, C.L.: Integrated Driving and Braking Control Unit for Electric Bikes. SAE International (2018)
- Divakaran, A.M. et al.: Heat Transfer Performance Enhancement on Wheel Hub Motor with Fin Adjoint Optimization. UK Heat Transfer Conference Proceedings (2024)
- Ušakovs, I.: Experimental Thermal Characterization of In-Wheel Electric Motor with Loop Heat Pipe Thermal Management. SSRN (2023)
- Advanced materials enabling HIgh-VOlume road transport applications of lightweight structural COMPosite parts (HIVOCOMP), EU CORDIS Final Report, 2011
- BicycleWarehouse.com: Advanced Composite Technology in E-bike Frame Construction, 2025
- Olayode, I.O.: Integration of e-bikes in public transportation based on accessibility. ScienceDirect, 2024

Ipari jelentések, piaci elemzések, konferencia-kiadványok

- Velo-city Conference, Future Urban Mobility and Smart City Infrastructures (2023)
- European Environment Agency (EEA): Sustainable Mobility & E-bike Sector Growth Report, 2023
- International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology: Design of EV Wheel for Bicycle, 2024
- Bike-Europe.com – Piaci elemzések, technológiai újdonságok, gyártástechnológia

Szabványok, akkumulátor, IoT, AI, smart city, recycling

- ISO/TS 4210-10:2020 – e-bike safety and performance standards, EN 15194:2017+A1:2023 (EU)
- UL 2849, UL 2271, UL 62133, ANSI/CAN/UL 2272 – USA elektromos rendszer és akkumulátor tanúsítás
- JIS (JP), GB (CN) országos szabványok Ázsiában

- IEC 62133 – nemzetközi akkumulátor biztonsági leírás
- EN 50604-1 – európai e-bike akkumulátor szabványosítás
- Regulation (EU) 2023/1542; Battery Passport; Battery Lifecycle & Recycling
- Sustainability rules for batteries and waste batteries – EUR-Lex (2025)

IoT, AI, integráció és energiamenedzsment

- Hidayat, M.N. et al.: Internet of Things (IoT) based monitoring system for hybrid powered E-bike charging station (IJPEDS, 2025)
- EU CORDIS, flashbattery.tech – Battery Regulation reporting, supply chain and end-of-life management

Digitális és szabályozási források

- www.europeanmobilityweek.eu – Innovációs esettanulmányok
- www.iso.org – Kerékpáripari és elektromos rendszerek szabványai
- www.bike-eu.com – E-bike piaci és technológiai hírek
- www.compliancegate.com – USA e-bike szabványok

1. https://pubs.aip.org/aip/acp/article/3263/1/100003/3359268/Artificial-intelligence-assisted-electric-bicycle
2. http://www.aaejournal.com/Comprehensive-review-on-evolution-progression-design-and-exploration-of-electric,191492,0,2.html
3. https://www.research.unipd.it/retrieve/0041de50-edea-43a8-97d9-f4ee922ab93c/energies-16-00160.pdf
4. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261919320100
5. https://www.etasr.com/index.php/ETASR/article/view/11472
6. https://www.irjet.net/archives/V8/i7/IRJET-V8I7414.pdf
7. https://movcan-bike.com/blogs/blog/global-e-bike-safety-standards-comparison-international-regulations-guide-2025
8. https://ijpeds.iaescore.com/index.php/IJPEDS/article/view/23561
9. http://cfd.mace.manchester.ac.uk/ukhtc21-proc/papers/P-1-9.pdf
10. https://cordis.europa.eu/project/id/246389/reporting/de
11. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12443759
12. https://www.flashbattery.tech/en/blog/eu-battery-regulation-obligations-updates/
13. https://www.sae.org/articles/integrated-driving-braking-control-unit-electric-bikes-10-02-03-0015
14. https://iarjset.com/wp-content/uploads/2024/09/IARJSET.2024.11839.pdf
15. https://www.compliancegate.com/e-bikes-safety-standards-united-states/
16. https://www.scribd.com/document/829848460/Internet-of-things-IoT-based-monitoring-system-for-hybrid-powered-E-bike-charging-station
17. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4385187
18. https://bicyclewarehouse.com/blogs/bicycling-tech/advanced-sl-composite-technology
19. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772586324000637
20. https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/sustainability-rules-for-batteries-and-waste-batteries.html
21. https://ppl-ai-file-upload.s3.amazonaws.com/web/direct-files/attachments/55510804/30c06f63-6e1d-4012-8502-947081d7b6b7/elektromos_hibrid_kerekagy_technologia_kihivasok.pdf