

Elektromos hajtású gépjárművek fejlesztésének és üzemeltetésének legfontosabb alapvetései, különös tekintettel a tömegközlekedés vonatkozásaira

DR. SIMONYI SÁNDOR

ügyvezető igazgató
(TRIGON Electronica Kft.)

PROF. DR. MATOLCSY MÁTYÁS

ny. fejlesztési főmérnök
(IKARUS)

A gépjárműfejlesztések kulcsszavai a fenntartható mobilitás, energiaellátás, környezetvédelem, működési veszteségek csökkentése, veszteségi energiák visszanyerése. E fogalmak aktualitása nem újkeletű, csupán a fenyegető problémák léte miatt erősebben rajzolódik ki. A fosszilis energiaforrások nagy részét belső égésű motorokban égetjük el. A kevésbé környezetszennyező közlekedés megvalósításához korszerű járművekre, alternatív üzemanyagokra és modern közlekedési rendszerekre van szükség. Kézenfekvő tehát, hogy jelen cikkünkben elsősorban a tömegközlekedést szolgáló alternatív hajtású járművek néhány kulcskérdésével foglalkozunk. Ezen cikk vezérvonala részben a konvencionális rendszerekkel való összehasonlítás, részben pedig az attól való eltérés kérdéseinek felvetése. E témakörön belül kiemelten foglalkozunk az elektromos hajtású járművek speciális kérdéseivel.

The key areas of vehicle development are sustainable mobility, energy supply, environment protection, reduction of operational losses, recovery of kinetic energy. These engineering doctrines are not completely new, they reveal stronger the threatening problem only. Great part of the fossil energy sources are burnt in internal combustion engines. Modern vehicles, alternative fuels and advanced transportation systems are needed towards less polluter traffic. It's obvious that this article focuses mainly on the use of electric vehicles in public transport. Leading idea of this article is partly comparison with conventional systems, partly raising the questions of their differences. We primarily deal with special questions of electric vehicles within this subject.

1. A GÉPJÁRMŰ-KÖZLEKEDÉS FEJLŐDÉSÉNEK MEGHATÁROZÓ SAROKKÖVEI

A globális klímaváltozás, a növekvő olaj- és nyersanyagárak, az egyre szigorodó emissziós normák, a közlekedésbiztonsággal kapcsolatos fokozódó követelmények a fenntartható mobilitás új megközelítését követelik meg.

Ahhoz, hogy megérthessük a globális klímaváltozás szempontjából alapvető folyamatokat, az egyes alternatív tüzelőanyagok és hajtások által nyújtott előnyöket-hátrányokat a holisztikus, vagy well-to-wheel (a „forrástól a kerékig”) típusú megközelítés követendő. Az **1. táblázatban** a konvencionális, a hibrid és az elektromos jármű teljes életciklusára vonatkozó CO₂-kibocsátás arányt szemlélítjük. [1]

A táblázatból láthatjuk, hogy az elektromos hajtást tartalmazó járművek ökológiai lábnyoma kedvezőbb annak ellenére, hogy a szükséges energiatárolók előállítása, újrafeldolgozása az esetek

többségében környezetszennyező. Az alacsonyabb üzemi emisszió a járművek célszerű felhasználhatósági körét meghatározza. Teljesen elektromos hajtású gépjárművek lokálisan nulla emisszióval rendelkeznek (ZEV – Zero Emission Vehicle), ezáltal elsősorban városi (tömeg)közlekedésben történő alkalmazásuk indokolt. Tényerésük lassúságának oka a jelenlegi energiatárolással összefüggő korlátozott hatótáv, a magas vételár, az új technológiával szemben lévő vásárlói bizalmatlanság és a teljes életciklusukra vetített ökológiai lábnyom felemás megítélése.

2. A GÉPJÁRMŰ-TECHNOLÓGIÁK FEJLŐDÉSÉNEK NÉHÁNY FONTOS ÉS RELEVÁNS IRÁNYA

2.1 Konvencionális hajtások

Az uralkodó gépjármű-hajtástechnológia jelenleg egyértelműen a konvencionális üzemen alapul. A komponensek

	BECSÜLT CO ₂ -EMISSZIÓ A TELJES ÉLETCIKLUS ALATT [TONNA]	BECSÜLT CO ₂ -EMISSZIÓ A GYÁRTÁS ALATT [TONNA]	A GYÁRTÁS KÖZBENI CO ₂ -EMISSZIÓ ARÁNYA A TELJES ÉLETCIKLUS CO ₂ -EMISSZIÓJÁHOZ KÉPEST [%]
Konvencionális hajtású jármű (benzín- vagy dízelmotorral szerelt)	24	5,6	23
Hibrid jármű	21	6,5	31
Plug-in hibrid jármű	19	6,7	35
Akkumulátoros elektromos jármű	19	8,8	46

A közölt adatok 2015 járműre vonatkoznak 150 000 km-es futásteljesítményt alapul véve, 10% etanol és 500 g/kWh használata mellett

1. táblázat: különböző hajtású járművek CO₂-kibocsátása teljes életciklusuk során



permanens fejlesztése során egyre javulnak a hatékonysági mutatók és csökken a környezetszennyezés mértéke. Ez a folyamat a további időszakokra is előrevetíthető. Emellett látni kell, hogy a konvencionális hajtású járművek területegységre vetített sűrűségének növekedésével súlyos ökológiai problémák következnek be. E probléma kezelésére a járműfejlesztés iránya újabb technológiák kidolgozására is irányul, melynek célja egy alternatív kínálat biztosítása. Ezt legmarkánsabban az elektromos hajtás társításával vagy kizárólagossá tételével igyekezzenek kezelni.

2.2 Hibrid és elektromos gépjárművek várható térnyerése

A hibrid és elektromos járművek mérsékelt ökológiai előnyeit kissé árnyékolja ezen technológiát alkalmazó járművek teljes – a fejlesztési költségeket is magában foglaló – életciklusára kivetített fajlagos költsége. Ezzel kapcsolatosan csupán személgépjárművek vonatkozásában rendelkezünk adatokkal [2], mely szerint a konvencionális hajtású járművek költsége a teljes életciklus során 0,5...0,75 \$/mérőföld, hibrid járművek költsége ugyanebben a vonatkozásban pedig 3...3,3 \$/mérőföld között van. A kereslet várható növekedésének alapvető tényezője, hogy a gyártási költségek csökkenjenek, a szélesebb körű alkalmazás feltételei megteremtődjenek és az élettartamra vetített összköltség csökkenésével az üzemeltető érdekelt legyen az alternatív hajtású járművek üzemeltetésében. Ezen feltételek akkor teljesülnek majd, ha a komponensek fejlesztése és iparszerű reprodukálása képes teljesíteni ezen követelményeket.

2.3 Hajtástechnológiai jövőképek

Jelen időszakban nem lehet privilegizált megoldást kiemelni az ismert technológiák közül. A jelen kor realitásaihoz igazodóan az bizonyosan állítható, hogy az egyes hajtástechnológiák alkalmazásának lehetőségét és célszerűségét a működési környezet határozza meg. Távolsági közlekedésben ma a konvencionális hajtás, kisvárosi, elővárosi forgalomban a hibrid, nagyvárosi forgalomban pedig az elektromos hajtás alkalmazása jár a legtöbb előnnyel. Ezért az autóbusz-fejlesztés legjobb stratégiája célszerűen a családélvű fejlesztés megvalósítása, amelyben megjelenik mindhárom hajtástechnológia alkalmazásának lehetősége. Az egyes „családtagok” közötti átjárhatóság pedig a legnagyobb mértékben biztosítva van. Ez különösen igaz az alvázrendszer fejlesztésére. A műszaki célszerűsége túl a családélvű alkalmazása a fejlesztési kockázatot minimalizálja, az értékesítési lehetőségeket szélesíti, a gyártó számára pedig kedvező piaci pozíciót hoz létre. Jól átgondolt struktúraépítéssel elérhetjük a gyártási költségek csökkenését is.

Távlatokban ezen elv megtartásával valószínűsíthető, hogy azon komponensek, melyek fejlettségi szintje még kívánalmókat hagy maga után, nagyívű fejlesztésen fog keresztülmenni. Ez azonban nem hoz alapvető struktúraváltást, de a családon belüli átrendeződést, hangsúly-átcsoportosítást bizonyára indukál majd.

A konvencionális hajtások vonatkozásában könyvtárnyi publikáció áll rendelkezésre. Ezért e helyen a lényegesen szerényebb ismeretanyaggal bíró alternatív hajtások egyes kérdéseivel foglalkozunk, melynek fókuszában a tisztán elektromos hajtású autóbuszok kulcskérdései állnak.

3. ELEKTROMOS HAJTÁSLÁNCÚ GÉPJÁRMŰVEK

1900-ban Ferdinand Porsche megalkotta az első forgalomban részt vevő elektromos hajtású autót (Porsche-Lohner Semper Vivus), melyben kerékagymotort alkalmazott. A technika akko-

ri állása azonban nem volt képes maradéktalanul kielégíteni az igényeket, ezért az újfajta hajtási mód széles körű elterjedésére nem került sor. A fejlődés mérföldköveinek említése nélkül kerekén száz év múlva az IKARUS-ban megszületett a döntés, hogy el kell kezdeni elektromos hajtású buszok fejlesztését, mert „10 éven belül” (azaz 2010-ben) minden technikai feltétel adott lesz a széles körű alkalmazáshoz. Nem az IKARUS stratégiáinak felkészültségével volt probléma, hanem a technika akkori állását nem követte az a várt fejlesztési tendencia, amelyről akkor a bizonyosság szintjén beszéltek, majdnem ugyanúgy, mint ma. Napjainkban sem jutottunk el arra a szintre, hogy nem kötőtpályás járművek mindennapi használatra erős korlátozások nélkül alkalmasak legyenek. A problémákat főként az energiatárolás megnyugtató megoldásának hiányából következő viszonylag alacsony hatótávolság és a feltöltés problémája jelenti. Ezen problémákat elhallgatni nem lehet, mert hasonlóan álommá válhat egy alapvetően kívánatos rendszer kialakítása. Egyébként az elektromos hajtás a legtisztább, legcsendesebb üzemet biztosítja. A zéró emissziójú járművek alkalmazásával járó előnyök városi közlekedésben hatványozódnak. Részben ezzel is magyarázható, hogy az elektromos hajtású autóbuszok fejlesztésével és üzemeltetésével kapcsolatban fokozódó igény tapasztalható. Ezért e területen végzett kutatás-fejlesztés, partneri együttműködési rendszer kialakítása soha nem volt idősebb, mint napjainkban.

Az elektromos hajtású járművek városi tömegközlekedésben történő üzemeltetésének előnyei:

- nulla lokális emisszió, mérsékelt zajterhelés
 - a meghajtó motor élettartama kb. kétszerese a belső égésű motornak, karbantartási költsége alacsony és környezetszennyező kenőanyagot nem kell használni
 - kötőtpályás járműveknél a regeneratív fékezéssel elérhető hálózati visszatáplálás akár a 30%-ot is eléri, saját energiaellátású járműveknél pedig a fékezési energiát a saját energiatárolók töltésére lehet fordítani
 - a hajtáslánc hatásfoka jó
 - alacsony fordulatszámú is finom szabályozható nagy vonóerővel rendelkezik
 - fékenergia-visszanyerés miatt alacsony a fékbetétkopás és az ebből adódó porterhelés
- Hátrányai:
- táphálózati infrastruktúra (felsővezeték-hálózat vagy töltési pontok) kiépítése szükséges
 - a trolibusz üzemeltetésének egyik kulcsproblémája a kötött nyomvonal és a stabil, biztonságos kapcsolat a felsővezetékkel
 - csupán az akkumulátorral és szuperkondenzátorral ellátott járművek hatótávja alacsony
 - magas beszerzési ár
 - az energiatárolók a folyamatos fejlesztés ellenére még nem tökéletesek, élettartamuk korlátozott.

4. AZ „E”-AUTÓBUSZ MINT RENDSZER

Az „E”-autóbusz a konvencionális hajtásláncú autóbuszhoz hasonlóan egy befelé zárt, kifelé nyitott közlekedőrendszer, melyet önállóan is intelligens alrendszerek alkotnak. Az alrendszerek egymással, a jármű vezetőjével, illetve esetenként külső irányítási rendszerekkel állnak kapcsolatban. Különböző autóbuszok lényegében azonos rendszerstruktúrát tartalmaznak, bár az egyes alrendszerek funkcióban hasonló, de felépítésüket tekintve eltérőek lehetnek. A **1. ábrán** egy „E”-autóbusz rendszerstruktúráját vázoljuk.

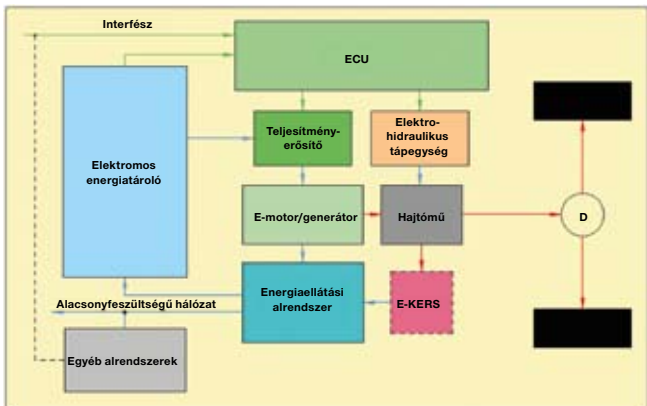


1. ábra: „E”-autóbusz alrendszerei

A továbbiakban az „E”-autóbusz azon két alrendszerével kívánunk foglalkozni, amelyek lényegesen eltérnek a konvencionális hajtásúaktól. Ezek a hajtási, valamint az energiaellátási és termomenedzsment-alrendszerek.

4.1 Hajtási alrendszer

Konvencionális járműveknél a hajtási alrendszer két részre bontható. A fogalom szűkebb értelmezése szerint a hajtási alrendszeren a hajtásláncot értjük, a bővebb értelmezés szerint ide soroljuk a segédhajtások körét is. Elektromos hajtású járműveknél tekintettel arra, hogy a segédhajtások nem törvényszerűen a főhajtásból ágaznak le, kissé más a helyzet. E tekintetben a decentralizált lokalitások a jellemzőek, vagyis nem kizárólag a főmotor feladata a segédhajtások biztosítása (szervoszivattyú, klíma-kompresszor, sűrített levegős hálózat kompresszora stb.). E helyen a



2. ábra: elektromos hajtási alrendszer

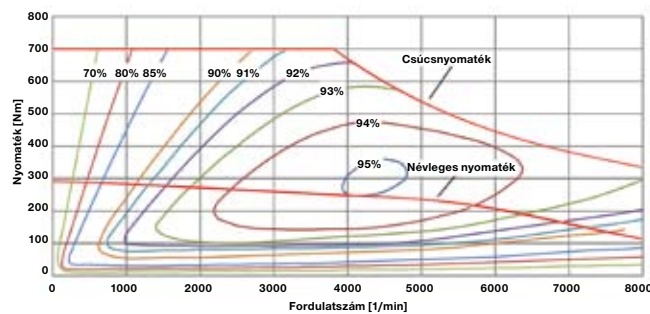
rendelkezésre álló hely korlátozott terjedelme miatt csupán az elektromos főhajtással, azon belül a hajtáslánc intelligens elemeivel foglalkozunk. Elvi, lehetséges kialakításának vázlatát a **2. ábrán** láthatjuk.

4.1.1 A hajtáslánc főbb komponensei

a, Elektromos forgógépek

A jármű erőforrásként alkalmazott motorok eltérő kivitelűek lehetnek. A hajtáshoz egyenáramú motor mellett többnyire háromfázisú aszinkron villanymotort építenek a járműbe, de a háromfázisú szinkron és külső gerjesztésű motorok is elterjedtek [3]. Az elektromos gépek közvetlen összehasonlítását a **2. táblázat** tartalmazza.

Az E-motor jó hatásfokú, nagy teljesítménysűrűségű és a járműhajtásra kedvező karakterisztikával rendelkezik. Nagy az indítónyomatéka, és az üzemi nyomatéka is széles fordulatszám-tartományban rendelkezésre áll. A villanymotor alkalmazása mellett szól kiemelkedő hatásfoka is, mely az üzemi tartományban meghaladja a belső égésű motorok hatásfokának kétszeresét. Áramfelvétele a leadott nyomatékkal arányos. Fordulatszama jól szabályozható. A **3. ábrán** példaként bemutatott állandó mágneses szinkron motor (PMSM) jelleggörbéjét láthatjuk. [4]



3. ábra: villanymotor nyomatéka, hatásfoka a fordulatszám függvényében

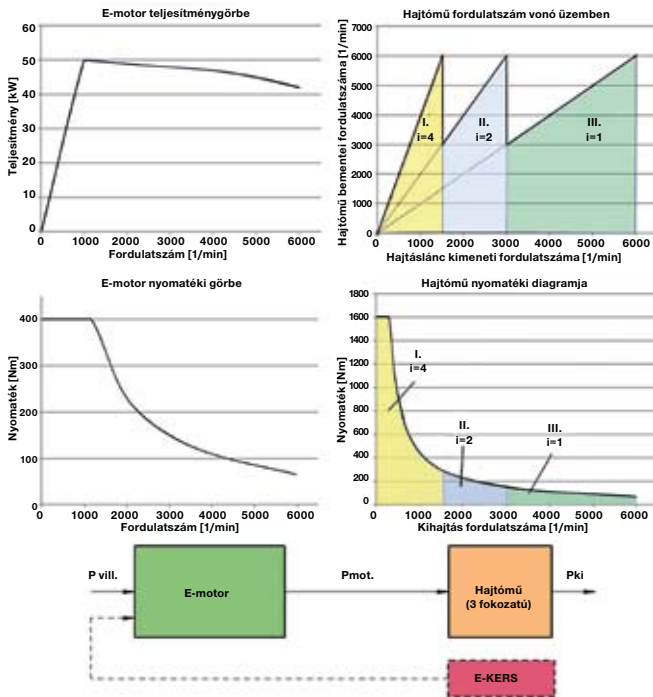
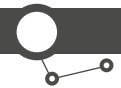
Alapvetően háromféle villanymotor-elhelyezési lehetőségről beszélhetünk. Lehetséges a központi, tengelyenkénti és kerékenkénti (kerékagymotor) elhelyezés.

b, Hajtómű

Az E-motor általi direkt hajtás is megvalósítható, sőt kezdetben csak ez volt a jellemző. A tömeg, hatásfok, teljesítmény, áramfelvétel optimalizálásának érdekében azonban célszerű hajtóművet is beiktatni a hajtásláncba. Az E-motor karakterisztikájának köszönhetően alacsony (2-3) fokozatszámú, erőfolyam-megszakítás nélküli hajtóműre van szükség, amely

	KEFÉS DC MOTOR (BCD)	ASZINKRON GÉPEK	ÁLLANDÓ MÁGNESES KEFENÉLKÜLI MOTOR (BLDC)	ÁLLANDÓ MÁGNESES SZINKRON MOTOR (PMSM)	RELUKTANCIA MOTOR (SRM)
Hatásfok	--	+	+	++	++
Max. fordulatszám	--	++	+	++	++
Helyigény	--	+	+	++	+
Tömeg	--	+	+	++	+
Meghajtóelektronika költségigénye	++	+	++	+	+
Ár	-	++	-	--	++
Jelmagyarázat	-- : előnytelen - : kevésbé előnytelen + : előnyös ++ : kiemelkedő				

2. táblázat: elektromos gépek jellemzői

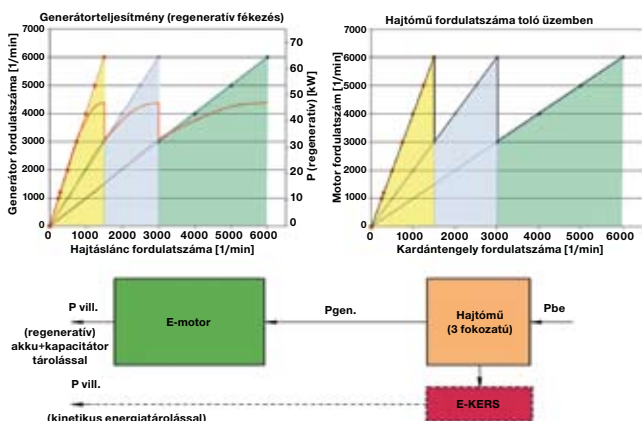


4. ábra: elektromos hajtás jellemzői vonó üzemben

célszerűen egy szerkezeti egységet képez a motorral. A hajtómű vonóüzemi jellemzőit a 4. ábrán, a tolóüzemet az 5. ábrán láthatjuk.

Az ábrákon látható jelleggörbék általunk önkényesen választott, háromfokozatú hajtóműre igazak. Konkrét esetben a hajtómotor nyomatékkészletét a hajtás nyomatékigényével kell összevetni, és az energetikai szempontok figyelembevételével kell meghatározni a fokozatok számát és a módosítás optimális értékét.

A jármű energiafelhasználásának szempontjából az egyik legkritikusabb üzemlállapot az elindulás. A konvencionális hajtáshoz képest itt két komoly előnyt rögzíthetünk. Az egyik, hogy a villanymotornak a 0 fordulatszám is üzemlállapota lehet, ezért értelemsszerűen felesleges a tengelykapcsoló beépítése. A másik előny pedig az, hogy nagy indítónyomatékkal rendelkezik, így már alacsony fordulaton és viszonylag széles fordulatszám-tartományban nagy nyomaték kifejtésére képes, tehát kvázi leképezi a jármű vonóerőigényét.



5. ábra: elektromechanikus hajtás tolóüzemben

Az E-motort generátoros üzemmódban alkalmazva a jármű mozgási energiája villamos energiává konvertálható, amely tolóüzemben kifejezetten előnyös. Lejtmenetben, ill. a jármű fékezésekor a veszteségi energiát hasznosító retarderként működik, így az energia-visszanyerésen kívül az üzemi fékberendezés igénybevételét és kopását is csökkenti.

Hajtómű közbeiktatásával a nyomaték-fordulatszám konverzió tovább javítható. Vonóüzemben úgy növeli a hajtónyomatékokat, hogy csökkenhet a felvett áram, ill. kisebb teljesítményű motor is megfelelővé válhat. Tolóüzemben a generátorként működő villamos gép a visszakapcsolások révén magasabb fordulatszámmal forog mint a kardántengely, és a magasabb fordulatszám hatékonyabb generátorműködést eredményez.

A hajtómű kialakítására egy további lépés is elképzelhető, ez pedig a kinetikai energia-visszanyerő rendszer (KERS) beépítése. Az 5. ábrán szaggatott vonallal jelöltük. Ezen egységek és a hozzájuk tartozó kiszolgálórészek hálózatba való összekötésével hozzuk létre a hajtási alrendszert.

4.2 Tápenergia-ellátó alrendszer (energiatároló, szabályzó- és átalakítómenedzsment)

A tisztán elektromos hajtású járművek a villamosenergia-ellátás módja szerint lehetnek hálózathoz kötöttek, saját energiátárolóval rendelkezők, ill. léteznek ezek célszerű kombinációi is.

a, Hálózathoz kötött energiaellátás

Hálózathoz kötött elektromos hajtású jármű a működéséhez szükséges energiát külső hálózatról kapja, mellyel üzem közben folyamatos kontaktusban áll. Legismertebb képviselője a trolibusz. A kötőpályás közötti közlekedési eszközök alkalmazása csakis tömegközlekedési járművek körében jöhet szóba.

b, Teljes energiátárolás

Teljes energiátárolás esetén a jármű az energiaigényét a járműben elhelyezett energiátároló-csomagból fedezi. A tárolóegységek energiátöltése történhet telephelyi töltőállomáson telepített energiahálózatról, de ismertek olyan megoldások is, ahol a lemerült akkumulátorokat egyszerűen feltöltöttökre cserélik. A jármű fékezése közbeni energia-visszatáplálás segítségével veszteségi energia visszanyeréssel szintén tölthetők az energiátárolók.

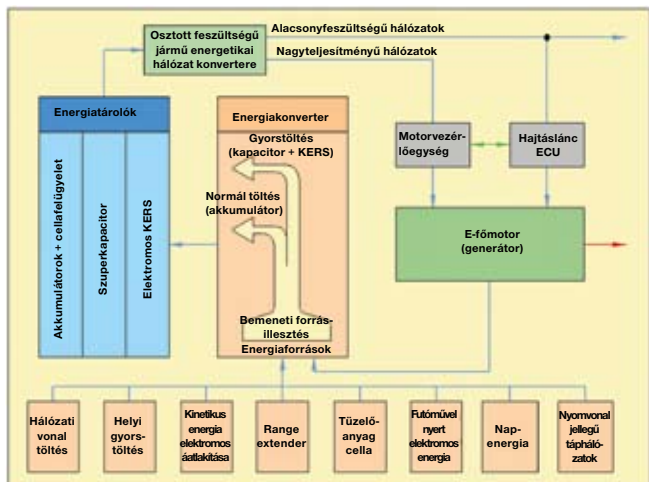
c, Részbeni energiátárolás

A részbeni energiátárolás a lokális és a hálózathoz kötött megoldásokat egyesíti. Akkumulátor mellett szuperkondenzátort alkalmazva a jármű tömegét csökkenteni lehet, és a töltés időigénye is rövidül. Ezért gyakori (akár buszmegállóban történő) a gyorsöltés alkalmazása. E célra a buszöbölben elhelyezett felső tápellátó síneket vagy alsó, főként kontakt nélküli, ún. csatló töltőpontokat alakítanak ki. A töltés a buszöbölben történő várakozás alatt, pl. a busz áramszedőjén keresztül történhet. Elindulás előtt az áramszedő a busz tetősíkjába visszahúzódik. A megoldás előnye jó hatásfokában és relatív egyszerűségében rejlik. Pl. Hongkongban a Kowloon Motor Bus folytatott ilyen irányú teszteleseket.

Emellett léteznek olyan vegyes megoldások, ahol a villamos energia járművön való előállítását range extenderrel vagy üzemanyagcellával oldják meg. Ezek nem energiaforrások, hanem olyan kompakt szerkezeti egységek, amelyek termodinamikai, illetve elektrokémiai folyamatok eredményeként elektromos energiát állítanak elő.

4.2.1 A tápenergia-ellátó alrendszer felépítése

A tárolóelem(ek)nek alkalmasnak kell lenni a rövid ideig tartó nagy intenzitású energiaimpulzusok és a hosszú ideig tartó alacsony szintű energiák fogadására. Elektromos hajtású járműveknél ez



6. ábra: tápenergia-ellátó alrendszer

a kissé bonyolult és összetett folyamat egy önálló alrendszerben ölt testet. A 6. ábrán a termomenedzsment nélküli alrendszert mutatjuk be. (A termomenedzsment elvi ismertetésére egy külön alfejezetben kerül sor.)

Az energia-előállítás zöld kivitelezésével (nap-, szél-, víz-, geotermikus energia felhasználása) az elektromos jármű emissziója abszolút értékben is konvergálhat a nullához, de iparszerű alkalmazása ma még csak „egy jó gondolat”.

4.2.1 Elektromosenergia-tárolás-járművekben

Teljes vagy részbeni energiatárolású elektromos járművekben az elektromos energia tárolására akkumulátorokat, szuperkapacitorokat, ill. kinetikus energiatárolót alkalmaznak.

a, Akkumulátorok

Az akkumulátorok hosszan tartó, alacsony intenzitású elektromos energia tárolására alkalmasak. Nagy energia-, de alacsony teljesítménysűrűséggel jellemezhetők. A gépjárművekbe szerelt, több száz volt feszültségű szolgáltató akkumulátoregységek blokkokból, a blokkok pedig cellákból állnak.

A különféle akkumulátorok jellemzőit [5] a 3. táblázatban foglaltuk össze:

Akkumulátorok alkalmazásának jellemzői:

- Nagy energiasűrűség, nagy tömeg
- Előállítása drága (ritkaföldfémek alkalmazása)
- Korlátozott töltési sebesség
- Környezeti hatásokra, üzemi körülményre és az igénybevétel minőségére érzékeny, élettartama rövid (~5–7 év)

Akkumulátortechnológia megoldatlan kérdései:

- Méret, tömeg csökkentése
- Energia- és teljesítménysűrűség-növelés

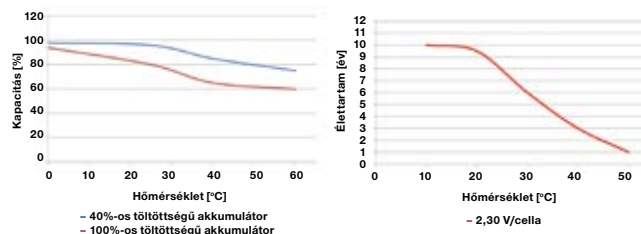
AKKUMULÁTOR	CELLAFESZÜLTÉG [V]	TÖLTÉSI-KISÜLÉSI CIKLUSOK SZÁMA	ÖNKISÜLÉS [%/HÓ]	ENERGIASŰRŰSÉG [WH/KG]	HATÁSFOK [%]
Ólom	2,1	500–800	3,4	30–40	70–92
Zárt ólom	2,1	500–800	-	30–40	70–92
Nikkel-kadmium (NiCd)	1,2	1500	20	40–60	70–90
Nikkel-metál-hidrid (NiMH)	1,2	1000	20	30–80	66
Lítium-ion (Li-ion)	3,7	1200	5,1	160	99,9
Lítium-polimer (Li-polymer)	3,7	500–1000	-	130–200	99,8

3. táblázat: akkumulátorok jellemzői

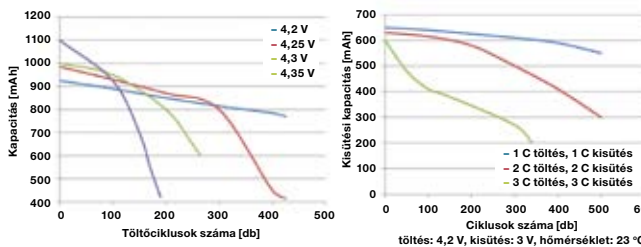
- Utókezelés, újrahasonosíthatóság
- Gyorsöltés megoldása

Az akkumulátorok élettartamát befolyásoló tényezők:

Az akkumulátorok élettartamát alapvetően a működési környezet hőmérséklete, a töltés és a kisülés minősége határozza meg [6] (Lásd 7. és 8. ábrákat).



7. ábra: hőmérséklet hatása az akkumulátor élettartamára



8. ábra: töltés és kisülés áramerősségének hatása az akkumulátor élettartamára

Az akkumulátor hőmérsékletének növekedésével csökken a várható élettartama, de az ideális hőmérséklettől alacsonyabb hőfokon történő üzemeltetés is károsan hat.

Az akkumulátorokra vonatkozó fenti ismeretanyag reményeink szerint nem tükrözi tökéletesen a jelenlegi helyzetet, mert ha így lenne, akkor lényegesen alacsonyabb ív elképzeléseket lehetne megfogalmazni a jövő elektromos hajtásával szemben, mint azt szeretnénk. Bizonyosan léteznek az akkumulátortechnológia fejlesztésének olyan eredményei, amelyek – lehet, hogy ma még nem iparérettek – de megalapozhatják az energiatárolás megnyugtató megoldását.

b, Ultrakapacitorok

Az ultrakapacitorok nagy teljesítmény- és alacsony energiasűrűségüknek köszönhetően rövid ideig tartó, magas intenzitású elektromos energia tárolására alkalmasak. A villamos energiát elektrosztatikusan tárolják. Mivel nem játszódik le bennük kémiai reakció, ezért ciklusszámuk akár az egymilliót is elérheti. Cellafeszültségük kialakítástól függően 2,5–2,7 V. A cellákból álló modulok jellemzően 16–125 V feszültségűek. Kapacitásuk akár



az 5000 F-ot is elérheti [7]. Energiasűrűségük alacsony (0,9–6 Wh/kg), ellenben teljesítménysűrűségük magas (1100–14 000 W/kg). Míg az akkumulátorok hosszabb ideig tudnak relatíve nagy energiaigényt egyenletesen kiszolgálni, addig az ultrakapacitorok rövid ideig tartó nagy teljesítmény leadására alkalmasak. A környezeti hőmérséklet változására kevésbé érzékenyek, mint az akkumulátorok, a töltésük és a kisütésük hatásfoka magasabb, nem érzékenyek hirtelen fellépő nagy áramokra és az úgynevezett mikro- és mélykisütésekre sem. Az akkumulátorok maximálisan várható 5–7 év élettartamával szemben az ultrakapacitorok élettartama összemérhető a jármű életciklusával. Jól kiegészíthetik egymást az akkumulátorokkal.

c, KERS (Kinetic Energy Recovery System)

KERS-rendszerrel felszerelt hajtáslánc fő erőssége a nagy teljesítménysűrűség, a viszonylag kis tömeg és kubatúra. Az F1-es Williams Team munkájának köszönhetően napjainkban már hatékonyra vált ez a régen ismert technológia, mely a veszteségi energiák kinetikus formában történő tárolására alkalmas. A rendszer működésének lényege, hogy tartós lejtmenet vagy fékezés esetén a jármű „felesleges” mozgási energiáját a lendkerék nagy fordulatszámra való felpörgetésére fordítják, mely kinetikus energia formájában kerül tárolásra. A jármű elindulásakor vagy gyorsításakor ezt az energiát visszatáplálják a rendszerbe. Rövid ideig tartó, magas intenzitású energia, mechanikus (elektromechanikus) tárolására alkalmas. Alapvetően kétféle irányvonal – illetve ezek kombinációja – bontakozott ki a rendszer fejlesztése során.

Az egyik megoldásban tolóüzemben a lendkereket tengelykapcsolón és hajtóművön keresztül felpörgetik, majd ugyanezen az erőfolyamláncon a kinetikus energiát visszavezetik a hajtásláncba. Ez a megoldás a tengelykapcsoló és a folyamatosan változtatható áttételű egység (CVT) igen nagy mechanikai igénybevételét okozza, különösen ott, ahol jelentős energiamennyiség tárolására van szükség. Ennek ellenére CVT-vel társított KERS alkalmazható autóbuszokban is. Ilyen megoldást mutatott be a Torotrak–Allison a kísérleti Flybuszon, ahol a KERS segítségével a járművet fel lehet gyorsítani álló helyzetből a főmotor használata nélkül. [8]

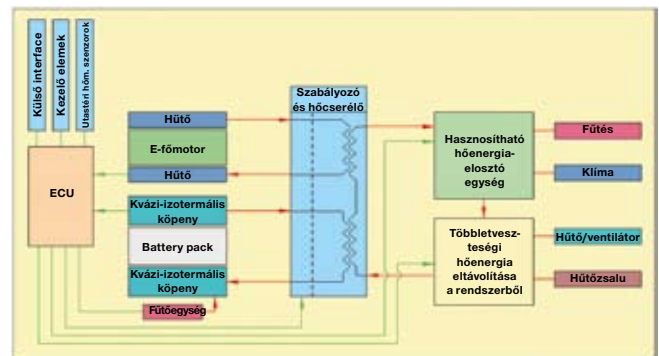
A másik megoldásnál a lendkerék tulajdonképpen egy nagy fordulatszámú villamos forgógép rotorja. Az energiatárolás úgy történik, hogy toló üzemben a hajtáslánc generátora által keltett elektromos árammal felpörgetik a KERS lendkerekeit. Energia-visszavezetéskor pedig a KERS nagy sebességgel forgó rotorjának mozgási energiája generátoros üzemben a hajtáslánc villanymotorját táplálva a jármű hajtására fordítódik. Ez utóbbi energia-visszanyerés sokkal finomabban szabályozható. A KERS fejlesztési iránya egyértelműen ez utóbbi módszer alkalmazásával képzelhető el.

Megjegyezni kívánjuk, hogy a KERS alkalmazásának gondolata mintegy 25–30 évvel ezelőtt már felmerült az IKARUS-ban is, de akkor még szerkezeti problémák miatt nem lehetett elérni magas lendkerék-fordulatszámot, ezért a tárolható energia is kevés lett volna. A másik probléma az volt, hogy a technika adott színvonalán csupán mechanikus nyomtatékvitelben lehetett gondolkodni a sokkal jobb elektromos átvitel helyett.

4.2.3 Zártkörű termomenedzsment-alrendszer

Az alkalmazott nagy teljesítményű elektronikai komponensek működése közben jelentős disszipációs hőenergia keletkezik, melynek elvezetése, illetve lehetőség szerinti újrahasznosítása alapvető feladat. Az akkumulátorok tulajdonságainak ismertetésénél már tárgyalásra került, hogy optimális üzemelésükhöz megfelelő környezeti hőmérséklet szükséges. A termomenedzsment fő feladata ebből adódóan az akkumulátor-csomag, az inverter és a villanymotor(ok) szükség szerinti hűtése, a többlet hőenergia elvezetése. Ez történhet lég- vagy vízűtés segítségével. Az elektromos energiatárolók fűtésére is szükség lehet, biztosítva

az üzemi hőmérsékletre érzékeny egységek optimális termokörnyezetét. Az akkumulátor-csomag ezen megfontolás alapján kvázi-izotermális feltételeket biztosító köpennyel célszerű burkolni, amelyen belül az akkumulátorok használata közben termelődő hő elvezetése, valamint szükség esetén azok fűtése is megoldható. A termomenedzsment-egységbe rendelt komponensek körében a hőenergia az utastérfűtés, klimatizálás vonatkozásában hasznosul. A zártkörű termomenedzsment-alrendszer blokkvázlatát a 9. ábrán mutatjuk be. A zöld nyilak a szabályzó és vezérlőjelek, a piros nyilak, vonalak a hőenergia útját mutatják.



9. ábra: zártkörű termomenedzsment-alrendszer

5. Néhány, környezetünkben megismert elektromos hajtású autóbusz

a, IKARUS trolibuszok [9]

Az IKARUS nemcsak az autóbuszgyártásban volt az elsők között a gyártási volument illetően, hanem a trolibuszgyártásban is. Készültek szóló és csuklós trolibuszok is. Megjegyezzük, hogy az 1990-es évek közepén kifejlesztett 411T és 412T alacsony padlós típusnak megjelenésekor még nem volt versenytársa a piacon a jármű teljes hosszán alacsony padlószintje, léghűtéses invertere miatt (10. ábra).



10. ábra: IKARUS 411T és 412T

b, IKARUS-VKI 260/1 és 260/2 elektromos busz [10]

1971-ben a Villamosipari Kutató Intézet (VKI) 2 db elektromos busz megépítésére vállalkozott. A buszok alapjául az IKARUS 260.00 típus szolgált. A busz főhajtását villanymotor biztosította, melynek energiaellátására akkumulátorokat építettek be. Az autóbusz rendelkezett egy olyan segédhajtással is, melyhez hasonló ma is használnak trolibuszokban. Ezt egy Ford dízelmotorral hajtott egység biztosította. A villanymotor energia-visszatáplálás megvalósítására is alkalmas volt, igaz a technika csak szerény mértékben tette lehetővé. A busz eredeti főhajtóművét kicserélték a Rába szovjet trolibuszokhoz gyártott főhajtóművével. A generátor által termelt váltakozó áramot háromfázisú egyenirányító híd alakította egyenárammá. A villamos energiatárolást ólomakkumulátorokkal oldották meg, melyeket a Villamos Berendezés és Készülék Művek (VBKM) gyártotta. A két buszba eltérő teljesítményű motorokat építettek be, és ennek megfelelően az ezeket tápláló áramátalakítók is különböztek.



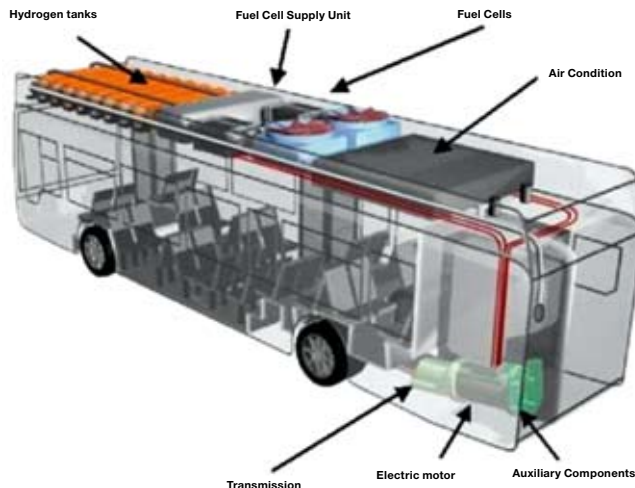
11. ábra: IKARUS-VKI elektromos autóbusz

Az IKARUS 260/1 elektromos buszban Ganz Villamosság Művek (GVM) TK 44 típusú, soros egyenáramú motor került alkalmazásra. A motort a VKI-ban kifejlesztett tirisztoros frekvenciaváltó táplálta. Az IKARUS 260/2 elektrobuszba (11. ábra) az Egyesült Villamosgépgyár (EVIG) RHX 225 V2 típusú, kétpólusú, rövidre zárt forgórészű aszinkron motorja került beépítésre. A legnagyobb motoráram 495 A volt 470 Nm indítónyomaték leadása esetén. 1976-ig ez volt a legnagyobb teljesítményű inverteres hajtás, ami Magyarországon készült. A busz legnagyobb sebessége 52 km/h, napi futásteljesítménye 240 km, a szállítható utasok megengedett száma 55 volt [11]. A csökkentett szállítható utasszám a hajtáslánc és az ólomakkumulátorok miatt megnövekedett önsúly terhére róható fel. A konvencionális hajtású IK 260 típusokhoz képest csak szerény üzemeltetési költségmegtakarítást értek el a próbaüzemek során. Utasokat soha nem szállított.

c, Mercedes tüzelőanyag-cellás busz

A tisztán elektromos hajtással működő buszok ígéretes képviselői a tüzelőanyag-cellás járművek. A személyautókkal ellentétben buszokon a tüzelőanyag-cella alkalmazása nagyobb szabadságfokkal és kedvezőbb fejlesztési és építési lehetőségekkel rendelkezik. A Mercedes-Benz már 1997-ben DC NEBUS (New Electric Bus) néven elindította első városi tüzelőanyag-cellás tömegközlekedési járművét. A busz második generációjára (CITARO, 12. ábra) 2002-ig kellett várni. Ez egyben az első kis szériás tüzelőanyag-cellás busz volt. [12]

A CITARO menetteljesítményére jellemző, hogy 0–50 km/h-ra 16 s alatt képes felgyorsulni. Központi aszinkron motorja 600 V feszültség mellett 195 kW névleges teljesítmény leadására ké-



12. ábra: Mercedes CITARO röntgenképe

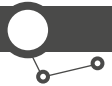
pes [4]. A hidrogéntartályok újratöltésének időszükséglete 15 perc. A hidrogén előállítása zöld energia alkalmazásával történt a jármű prototípusainak 2 éves tesztperiódusa során (Stockholm – vízenergia, Barcelona – napenergia, Hamburg – szélenergia, Reykjavík – geotermikus energia, Amszterdam – biomassza). A Mercedes mellett a Toyota (Toyota Hino) és a MAN (MAN NL-223) is bemutatott saját tüzelőanyag-cellás autóbust.

d, Cseh SOR EBN 10.5 elektromos autóbusz [13]

A járművet (13. ábra) a BKV Zrt. egy hétig tesztelte. Erőforrása 1 db 120 kW/400 V AC vízzel hűtött 3-fázisú aszinkron motor, melynek szabályzását korszerű technológiával oldották meg. A működéshez szükséges energiát 172 kWh kapacitású lítiumion $FePO_4$ akkumulátorok tárolják. Lassú töltése 32 A áramerősséggel 6–8 óra, speciális töltőt igénylő gyorsöltése pedig 250 A áramerősséggel egy óra alatt történhet. Minden harmadik gyorsöltést lassú töltésnek kell követnie az akkumulátorok kímélése érdekében. A műszakkezdéskor 100%-ban feltöltött akkumulátorok a nap végére 45%-os töltöttségi szintre estek vissza. Az autóbusz átlagos fogyasztása: 0,84 kWh/km volt a tesztidőszak alatt. Az autóbust a 120 kW-os motor kellő dinamikával mozgatta, a fékhatás megfelelő mértékű volt.



13. ábra: SOR EBN 10.5



e, A kínai BYD K9 –e BUS-12 [14]

Az eBUS-12 (**14. ábra**) egy kínai gyártó, a BYD terméke. A működéshez szükséges energiát LiFePo₄ akkumulátorok tárolják. Az akkumulátorok töltése a jármű gyártója által biztosított töltőberendezés segítségével lehetséges. Ezzel 63 A áramerősséggel 4 óra alatt tölthetők az akkumulátorok olyan szintre, mellyel – a terepviszonyoktól és az utasok számától függően – 200–250 km megtétele lehetséges rátöltés nélkül. Az energiaellátást áram-viszszatápláló fékrendszer is segíti. A 2x90 kW-os, vízhűtéses, 3 fázisú aszinkron motorok szabályozása szintén korszerű. A jármű végsebessége eléri az óránkénti 70 km/h-t. A jármű gyorsulása dinamikus, a forgalom ritmusa könnyen felvehető, könnyedén manőverezhető, menettulajdonságai jók, a gyorsulása egyenletes a tesztelő BKV Zrt. véleménye szerint.



14. ábra: BYD K9 elektromos autóbussz

6. KÖVETKEZTETÉSEK

A jövő járművét az energiatakarékosság, a csekély környezetterhelés, a kedvező ár és a megfelelő járműdinamika biztosítása jellemzi majd. Döntő mértékben újrahasznosítható anyagokat tartalmaz. A hajtáslánc kompakt felépítésű és csökkentett tömegű lesz. A környezetterhelés mérséklése céljából kenőanyagigénye minimális. Az elektromos és hibrid járművek esetén a fejlesztés fókuszában az elektromos energiaellátás áll, melynek forrása környezetbarát forrásokból származik. A hajtáslánc típusát illetően privilegizált megoldás nincs, a közeljövőben nem is lesz. A konvencionális hajtáslánc továbbra is domináns marad, de előnyben részesíthető alternatív megoldások már léteznek, amelyek látványos fejlődése jól érzékelhető. Egyre több és hosszabb városi közlekedési vonalon jelennek majd meg elektromos hajtású járművek, ami a beszerzési árak csökkenését fogja generálni.

Az autóbusszgyártók részéről ezért célszerűnek mutatkozik olyan moduláris autóbusszcsaládok kialakítása, melyek közös platformot, de eltérő hajtásláncot alkalmaznak, ezáltal széleskörűen lefedik az igényeket.

A téma összetettsége miatt e helyen csak rövid helyzetbemutatásra nyílt lehetőségünk. Igyekeztünk minden fontos tényezőre kitérni, bár egészen biztos, hogy egyes fejezetek, alfejezetek részletesebb kifejtése kívánatos lenne, de a terjedelmi korlátok miatt e helyen ezt nem tehetjük meg. Ennek ellenére levonhatjuk azt a következtetést, hogy a hibrid és teljesen elektromos hajtású járművek térnyerése a háttérpar fejlődésével vélhetően egyre gyorsuló ütemben valósul meg. Ebből következik, hogy elengedhetetlen és halaszthatatlan a kapcsolódó K+F, szakirányú oktatás-képzés, üzemeltetési és energiaellátási ismeretek megszerzése, ezen kompetenciakörök rendszerbe szervezése, mert e nélkül az új technika kutatás-fejlesztésében, megismerésében és fogadásában nem lehetünk versenyképesek. ●

IRODALOM

- [1] RICKO – UK Low Carbon Vehicle Partnership Announcing Report
- [2] CNWM Marketing Research – Dust to dust – Automotive Energy Use
- [3] Dr. Emőd István–Tölgyesi Zoltán–Zöldy Máté: Alternatív járműhajtások, Maróti Könyvkereskedés és Könyvkiadó Kft., Budapest, 2006
- [4] EVO Electric AF-250-5 katalógus
- [5] BME Villamosenergetikai Tanszék – Nemkonvencionális technikák és módszerek – Energiatárolás és szünetmentes ellátás – Akkumulátor (előadásvázlat)
- [6] Internet: www.mpoweruk.com
- [7] Maxwell Technologies – Ultracapacitors – Product Comparison Matrix.pdf
- [8] Internet: www.torotrak.com
- [9] Internet: www.inipius.blog.hu
- [10] Internet: www.omnibus.blog.hu
- [11] Prof. Dr. Matolcsy Mátýás, az IKARUS nyugalmazott főkonstruktórének személyes archívuma
- [12] Internet: www.murdoch.edu.au
- [13] Budapesti Közlekedési Vállalat Zrt. – SOR EBN 10.5 jelentés
- [14] Budapesti Közlekedési Vállalat Zrt. – Byd lezáró jelentés