

Hibrid járművek energiaellátásának optimalizálása

S Z A K D O L G O Z A T

Kádár Tibor
Gépjárműtechnikai specializáció

Debrecen
2026

Tartalomjegyzék

Jelölések jegyzéke	IV
1 Bevezetés	1
2 A hibrid hajtás alapelvei	2
2.1 Belső égésű motor szerepe.....	2
2.2 Elektromotor funkciói	3
2.2.1 Jármű meghajtása.....	3
2.2.2 Energia visszanyerés	3
2.3 Akkumulátorok típusai	3
2.3.1 Elektrokémiai akkumulátorok.....	3
2.3.2 Ultrakapacitások	4
2.3.3 Nagysebességű landkerek	4
3 A hibrid hajtású járművek jelenlegi rendszerei	7
3.1 A jelenlegi alkalmazott rendszerek áttekintése.....	7
3.1.1 Teljes hibridek (Full Hybrid) működése	7
3.1.2 Plug-in hibridek (PHEV) jellemzői.....	8
3.1.3 Lágyhibridek (Mild Hybrid) szerepe	9
3.1.4 Soros,párhuzamos és vegyes rendszerek összehasonlítása	10
4 Az energia-visszanyerési technológiák összehasonlítása	15
4.1 Regeneratív fékezési rendszerek	15
4.1.1 Elektromotoros regeneráció.....	15
4.1.2 Hidraulikus fékenergia visszanyerés.....	15
4.2 Hőenergia visszanyerési rendszerek.....	16
4.2.1 Kipufogógáz hőenergia visszanyerés	16
4.2.2 Termoelektromos generátorok alkalmazása	17
4.3 Az energia-visszanyerési rendszerek hatékonysági összehasonlítása .	17
5 Egy hibrid jármű energiafelhasználásának szimulációja egy adott vezetési ciklusban	19
5.1 A szimulációs környezet és eszközüik bemutatása.....	19

5.1.1	MATLAB/Simulink alapú modellezés.....	19
5.2	A kiválsztott vezetési ciklus leírása	20
5.2.1	WLTC ciklus leírása.....	20
5.3	A modell felépítése.....	21
5.3.1	A modellben alkalmazott blokkok	21
5.3.2	A rendszer összekapcsolása.....	24
5.3.3	Járműparaméterek	24
5.3.4	Hajtáslánc paraméterek	25
5.3.5	A model egyszerűsítései és feltételezései.....	25
5.4	Szimulációs eredmények kiértékelése.....	26
5.4.1	Energiafogyasztási profil.....	27
5.4.2	Visszanyert energia mennyiség	28
5.4.3	Kezdeti töltöttségi szint hatásvizsgálata.....	28
5.4.4	A szimuláció eredményeinek értelmezése.....	28
6	Fejlesztési irányok.....	31
6.1	Az energiafogyasztás csökkentésének lehetőségei	31
6.1.1	Energiagazdálkodási algoritmusok fejlesztése	31
6.1.2	Energiagazdálkodási stratégiák összehasonlítása	32
6.2	A visszanyerhető energia növelésének módszerei	33
6.2.1	Fejlettebb regeneratív fékrendszerek.....	34
6.3	Saját fejlesztési javaslat.....	36
6.3.1	Mesterséges intelligencia (MI) használata	37
6.3.2	Mesterséges intelligencia alapú prediktív energiamenedzsment ...	38
6.3.3	A mesterséges intelligencia várható hatása	39
7	Összegzés.....	41
8	Irodalomjegyzék.....	43

Jelölések jegyzéke

v	[m/s]	sebesség
a	[m/s ²]	gyorsulás
m	[kg]	tömeg
F	[N]	erő
P	[W]	teljesítmény
P_{req}	[W]	szükséges teljesítmény
t	[s]	idő
SOC	[-]	akkumulátor töltöttségi szint

1 Bevezetés

A közúti közlekedés napjaink egyik legnagyobb környezeti és energetikai kihívását jelenti. A fosszilis energiahordozókra épülő közlekedési rendszerek nemcsak a globális szén-dioxid-kibocsátásban játszanak jelentős szerepet, hanem hozzájárulnak a levegőminőség romlásához és az energiabiztonsági problémákhoz is. Az ezekre adott egyik legfontosabb technológiai válasz a hibrid hajtású járművek fejlesztése, amelyek a belső égésű motorokat és az elektromos hajtásokat ötvözve törekednek az üzemanyag-fogyasztás és a károsanyag-kibocsátás csökkentésére.

A hibrid hajtás működésének és energiaellátásának optimalizálása összetett feladat, amely magában foglalja a különböző energiaforrások (belső égésű motor, villanymotor, akkumulátor, fékenergia stb.) hatékony összehangolását. Különös jelentőséggel bírnak azok a rendszerek, amelyek képesek a mozgási vagy hőenergia visszanyerésére és újrafelhasználására. Emellett a különféle hibrid architektúrák mint például a soros, párhuzamos vagy vegyes rendszerek – sajátos előnyökkel és korlátokkal rendelkeznek, amelyek részletes elemzést igényelnek.

A dolgozat célja, hogy részletesen bemutassa a hibrid hajtású járművek energiaellátási rendszerét, annak komponenseit és működési elveit. Kiemelt figyelmet kapnak az energia-visszanyerési technológiák, azok hatékonysága, valamint a különböző hibrid rendszerek összehasonlítása. A kutatás során egy konkrét vezetési ciklus alapján szimulációs környezetben is vizsgálatra kerül egy hibrid jármű energiafelhasználása. A dolgozat végén javaslatot tesz olyan fejlesztési irányokra különösen mesterséges intelligencia alapú megoldásokra, amelyek tovább növelhetik a hibrid rendszerek hatékonyságát és fenntarthatóságát.

2 A hibrid hajtás alapelvei

Az alapelv, amelynek alapján minden olyan jármű működik, amelyben hibrid hajtás található, az, hogy az energia szempontjából különböző forrásokat kombinálnak, így növelik a hajtáskapcsolat hatékonyságát, csökkentik az üzemanyag-fogyasztást és kevesebb káros anyagot bocsátanak ki. Ebben a formában a jármű egy belső égésű motorból, általában benzin- vagy dízelmotorból, valamint egy vagy több elektromotorból áll, amelyek egyidejűleg biztosítják a jármű mozgását.

2.1 Belső égésű motor szerepe

A hibrid járművekben a belső égésű motor (ICE) szerepe többrétű, és a hibrid rendszer konkrét kialakításától, valamint az aktuális üzemmódtól függ. Általánosságban elmondható, hogy a hibrid autó egy belső égésű motorral és egy villanymotorral is rendelkezik. A cél az, hogy a két meghajtás kombinálásával kihasználják mindkét rendszer előnyeit és kiküszöböljék a hátrányokat.[1]

A hagyományos járművekhez hasonlóan jó teljesítményt és hosszú hatótávolságot biztosít, kihasználva az üzemanyag nagy energiasűrűségét. Képes önállóan hajtani a járművet, különösen nagyobb sebességeknél, hosszabb utakon, vagy amikor az akkumulátor lemerült.[1]

A belső égésű motor szerepe hozzájárul az akkumulátor töltéséhez is. A belső égésű motor meghajthatja a villamos gépet, ami így generátor üzembe kerül, és tölti az energiatároló egységet (akkumulátort). Ez történhet egyhelyben állva, völgymenetben vagy ereszkedéskor, amikor nincs szükség vonóerőre. Történhet úgy is, hogy a belső égésű motor több nyomatékot szolgáltat, mint amennyi a hajtáshoz szükséges, és a többlet teljesítményt a villamos gép használja fel az akkumulátorok töltésére.[2]

A hibrid rendszernek köszönhetően a belső égésű motor alacsony fordulatszámon megmutatkozó kedvezőtlen és kevésbé hatékony üzemi körülményeit a villanymotor egyenletes nyomatékleadása kompenzálja. Míg a hagyományos járművekben a belső égésű motor hatásfoka széles fordulatszám- és nyomatéktartományban mozog, a hibrideknél a cél, hogy a motor a számára kedvező üzemi körülmények között működjön. [2]

2.2 Elektromotor funkciói

Az elektromotor a hibrid járművekben számos funkciót tölt be, gyakran együttműködve a belső égésű motorral.

2.2.1 Jármű meghajtása

Képes önállóan hajtani a járművet, különösen alacsony sebességeknél, városi forgalomban vagy olyan területeken, ahol szigorúak a károsanyag-kibocsátási szabályok.[1]

Közösen hajtja a járművet a belső égésű motorral a „hibrid üzemmódban”. Ez akkor fordul elő, ha a nagy teljesítményre van szükség, mint például hirtelen gyorsításkor vagy meredek hegyen való haladáskor.[1]

2.2.2 Energia visszanyerés

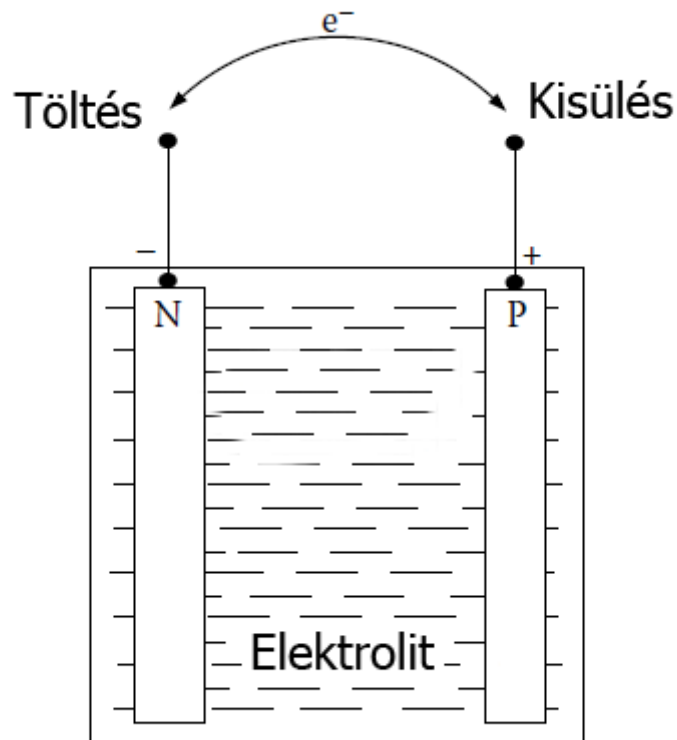
Villamos gépként működve visszatáplálja az energia az akkumulátorba fékezés vagy lassítás során.[1] Ez a folyamat a jármű mozgási energiáját amely leggyakrabban a lejtőn fordul elő, át alakítja villamos energiává.

2.3 Akkumulátorok típusai

A hibrid és hibrid-elektromos járművek, valamint a tisztán elektromos járművek meghajtásához a többféle energiaforrást, különösen energiatároló egységeket alkalmaznak. Ezek közé tartoznak az elektrokémiai akkumulátorok, az ultrakapacitások (más néven szuperkondenzátorok), és a nagysebességű landkerekek. A jármű működése során keletkező energiaigény dinamikusan változik a gyorsulástól, lassulástól, emelkedőtől vagy ereszkedéstől.[1]

2.3.1 Elektrokémiai akkumulátorok

Elektrokémiai akkumulátorok olyan elektrokémiai eszközök, amely kémiai úton létrehozott elektromos energiát állítanak. Az akkumulátor több energia cellából áll. A cella egy egész és önálló egység, amely elektrokémiai tulajdonságokkal rendelkezik. Alapból egy akkumulátor cella három főbb részből áll: két elektrodát (pozitív és negatív) és az elektrolit, amiben az elektrodák el vannak belemérítve. [1]



1. ábra Akkumulátor főbb részei [1]

Néhány elektrokémiai akkumulátor amik vannak: Savas akkumulátorok, Nikkel-kadmium (Ni-Cd), Nikkel-vas (Ni-Fe), Nikkel-fémhidrid (Ni-MH), Lítium-ion (Li-ion), Lítium-polimer (Li-polimer) stb.

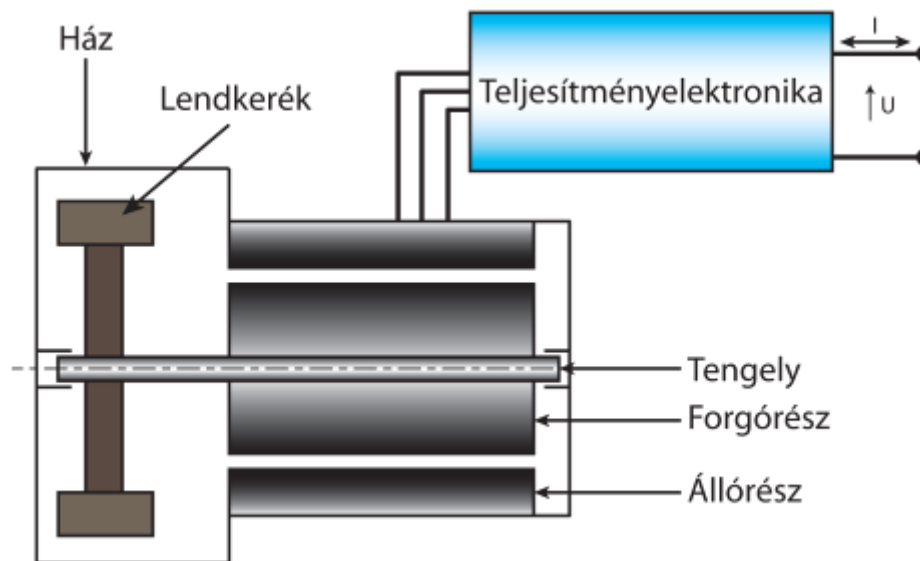
2.3.2 Ultrakapacitások

Az ultrakapacitások (más néven szuperkondenzátorok) szintén energiatárolóként alkalmazhatók a hibrid és elektromos járművekben. Különösen hasznosak a gyakori start/stop műveletek és az energiacsúcsok (gyorsítás, hegymenet) kezelésére. Az akkumulátorok csak részben képesek befogadni a fékezés során visszatáplált energiát, míg az ultrakapacitások nagy töltésmennyiséget tudnak tárolni rövid idő alatt. Ezeket a tárolt töltéseket az energiacsúcsoknál használják fel, így képesek "kisimítani" a csúcsokat. Teljes hibrid rendszerekben is alkalmazhatók energiatárolásra. [1]

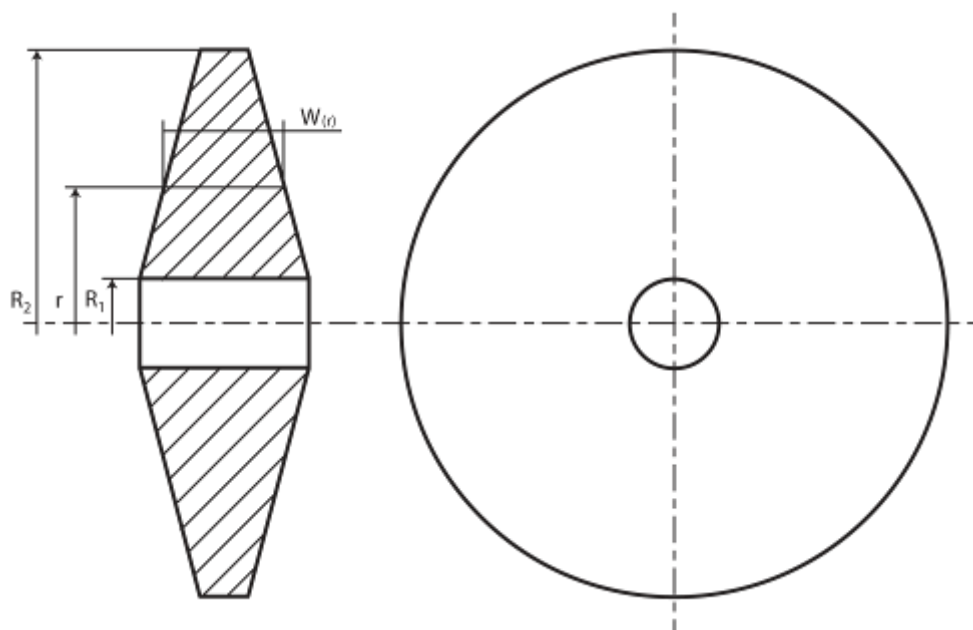
2.3.3 Nagysebességű lendkerekek

A nagysebességű lendkerekek kinetikai energia tárolására szolgálnak. A forgó lendkerék kinetikus energiát tárol, amely a lendkerék tehetetlenségi nyomatékától

és szögsebességétől függ. Az energiakapacitás növelhető a szögsebességgel, geometriával és tömeggel. Egyes prototípusok akár 60 000 fordulat/perces fordulatszámmal forognak. A lendkerék meghajtásához és az energia visszatáplálásához fokozatmentesen változtatható váltóműre (CVT) van szükség. Általában villamos gépet használnak az energiabe- és kimenetként, amely átalakítja a mechanikai energiát villamos energiává vagy fordítva. Ezt a megoldást mechanikus energiatárolónak is nevezik.[1]



2.ábra Lendkerék elvi ábra [1]



3.ábra Tipikus landkerék geometriája [1]

3 A hibrid hajtású járművek jelenlegi rendszerei

A mai hibrid elektromos járművek (HEV) a belsőégésű motork és az elektromos hajtások legkorszerűbb integrációját képviselik, egyre kifinomultabb mechatronikai, energetikai és szoftvere vezérlésekkel kiegészítve. A jelenlegi rendszerek elsődleges feladata az emisszió csökkentése, az üzemanyag-hatékonyság maximalizálása és a vezetési dinamika javítása anélkül, hogy a hatótávolság szenvedne.[5]

3.1 A jelenlegi alkalmazott rendszerek áttekintése

A hibrid járművek olyan autók, amelyek a meghajtáshoz szükséges energiát több, egymástól eltérő elven működő energiaforrásból nyerik. A legerjedtebb megvalósítás a belső égésű motor (ICE) és a villanymotor kombinációja. Ez a párosítás lehetővé teszi mindkét technológia előnyeinek kihasználását, miközben minimalizálják a hátrányaikat. A hibrid rendszer lényege az energiafelhasználás optimalizálása, a károsanyag-kibocsátás csökkentése, az üzemanyag-hatékonyság javítása és a jármű teljesítményének növelése. [3]

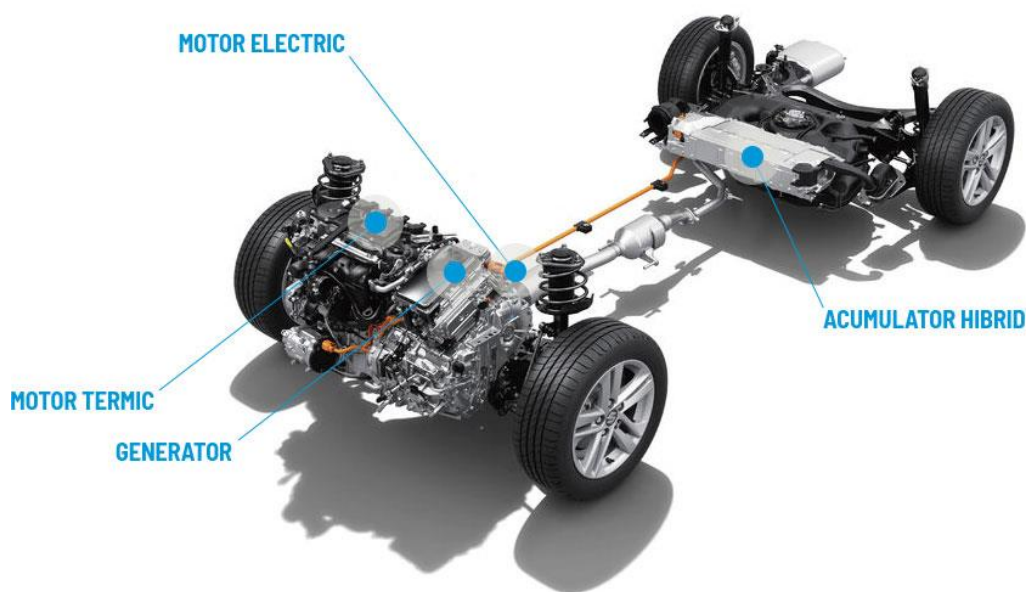
A hibrid elektromos járműveket (HEV) napjainkban különböző szempontok szerint csoportosítják, például a hibridizáció foka vagy a hajtáslánc architektúrája szerint. A hibridizáció foka alapján megkülönböztethetők mikrohibridek, enyhe hibridek (mild hibridek), rásegítőhibridek (power assist hibridek), teljes hibridek (full hibridek) és konnektoros hibridek (plug-in hibridek). A hajtáslánc felépítése szerint pedig soros, párhuzamos, soros-párhuzamos (vegyes) vagy komplex hibridekről beszélhetünk. [2]

3.1.1 Teljes hibridek (Full Hybrid) működése

A teljes hibrid, más néven full hibrid vagy teljes értékű hibrid, olyan jármű, amely bármikor képes akár akkumulátorról (tisztán villamos hajtással), akár belső égésű motorral, akár mindkettővel meghajtva menni.[2]

Működése: Tisztán villamos hajtás: Lehetséges, különösen álló helyzetből induláskor, enyhe gyorsításkor vagy városi forgalomban[4], amikor csak a villamos gép hajtja a járművet, a belső égésű motor le van választva vagy nem működik. Ilyenkor a jármű csendesen és lokális emisszió nélkül közlekedik.[1] Hibrid üzemmód: A belső égésű motor és a villamos gép közösen szolgáltatja a szükséges

nyomatékot a jármű hajtására. A vezérlőegység dönti el a nyomatékelosztást a két hajtóegység között.[1] Villamos rásegítés: Ha megnő a nyomatékigény (pl. intenzív gyorsításkor vagy emelkedőn), a villamos gép támogatja a belső égésű motort pozitív nyomatékkal. Gyorsításkor, a belsőégésű motor alacsonyabb fordulatszámanál, a villamos gép szolgáltathat nagyobb nyomatékot.[5] Akkumulátor és töltés:Nagyobb kapacitású akkumulátorra van szükség a tisztán elektromos üzemmódhoz.Az akkumulátor menet közben töltődik: egyrészt a belső égésű motor által hajtott generátorról, másrészt fékezéskor az energiavisszatöltő rendszer (rekuperáció) segítségével. A fékezési energiát a rendszer visszatáplálja az akkumulátorba.[2] A full hibridek akkumulátora általában nem tölthető külső forrásból. A legtöbb full hibrid modellre ez igaz.A rendszer általában 40% és 60% közötti töltöttségi szinten tartja az akkumulátort az élettartam maximalizálása érdekében. A villamos hajtás rendszer 200-350V vagy akár 200-650V feszültségen működhet.[5]

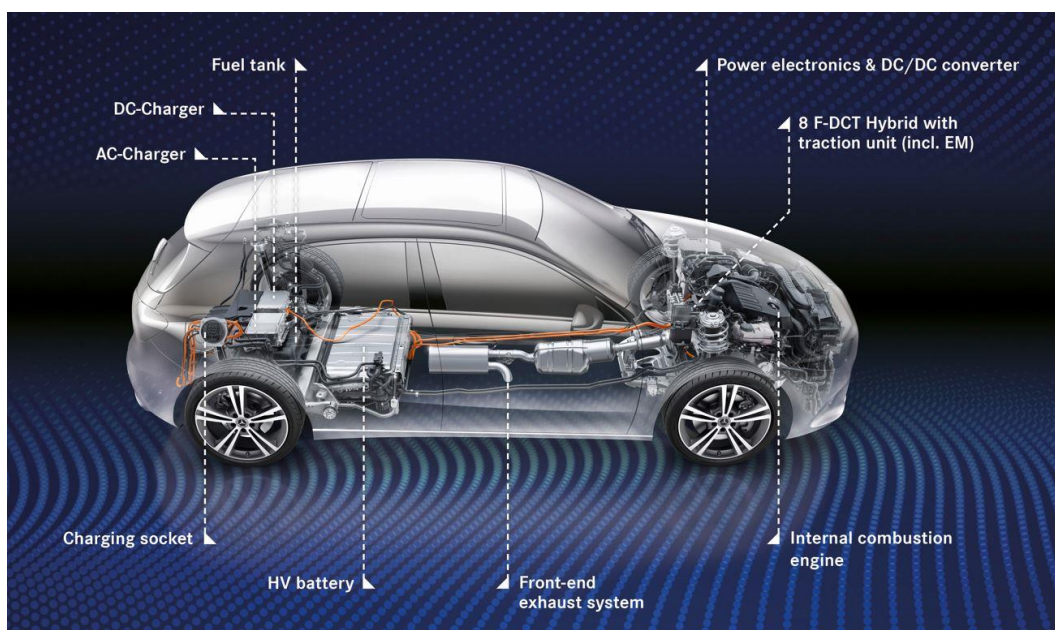


4.ábra Full Hybrid [6]

3.1.2 Plug-in hibridek (PHEV) jellemzői

A plug-in hibrid (PHEV) a tölthető full hibridet jelenti. Fejlettebb lépcsőfoknak számít a hibrid autók között.[4]

Jellemzők: Az akkumulátor pakk nemcsak visszatáplálás révén (belső hálózatról vagy rekuperációval) tölthető, hanem külső forrásból is (például hálózati csatlakozóból, otthon, munkahelyen vagy nyilvános töltőponton). A külső töltés speciális csatlakozón keresztül történik.[1] Nagyobb kapacitású akkumulátorral rendelkezik a full hibridekhez képest, gyakran Li-ion. Ez lehetővé teszi a hosszabb tisztán elektromos hatótávot, ami a vezetési körülményektől függően jellemzően 30-60 km, de 20-50 km vagy akár 300 km is lehet bizonyos modelleknél.[7] Képes hosszabb távon is tisztán elektromos üzemmódban közlekedni. Használható rugalmasan: elektromosan a rövidebb, városi utakon a fogyasztás és károsanyag-kibocsátás csökkentése érdekében, és a belső égésű motor áll rendelkezésre a hosszabb utakra.[8] Tisztán elektromos hajtásra is képes, de tartós teljesítménykiegészítésre is alkalmas. Külső áramforrásról töltve nemcsak üzemanyagköltségen lehet spórolni, hanem a benzinfogyasztás is csökken. Nem tudnak lemerülni, hiszen visszatöltenek fékezésnél/lassításnál, és elektromos energia hiányában a belső égésű motort használják.[7]



5.ábra Plug-in hibrid [6]

3.1.3 Lágyhibridek (Mild Hybrid) szerepe

A lágy hibrid, vagy mild hybrid, lényegében egy enyhén hibridizált hagyományos jármű.[5]

Szerepe: A villanymotor részt vesz a hajtásban, de önálló hajtásra nem képes. Inkább ráségítő szerepet tölt be.[2] Leginkább az elindításkor, gyorsításkor,

hegymenetkor van szerepe. Intenzív gyorsításkor vagy előzéskor segíti a belső égésű motort. Energiát tárol a fékezéskor visszanyert energiából (rekuperáció). Ezt az energiát használja fel a rásegítéshez. Lehetővé teszi a hatékony start/stop funkciót. Megálláskor, fékezéskor, guruláskor leáll a belső égésű motor, de gyorsan és tisztán újraindul. A villanymotor a befecskendezés előtt felpörgetheti a belső égésű motort az üzemi fordulatszámra. Meghajtja a segédrendszereket (vízpumpát, légkondicionálót), így azok akkor is működhetnek, ha a belső égésű motor áll.[2]

Akkumulátor és rendszer: Kicsi akkumulátort használ, gyakran 12V-os vagy 48V-os rendszerrel. A villamos gép gyakran a főtengellyel közvetlen kapcsolatban áll (pl. ISG - Integrated Starter Generator), nincs külső töltési lehetőség.[5]

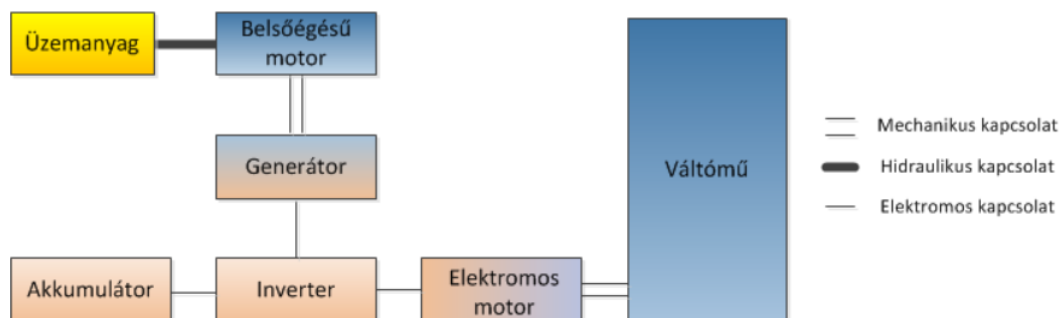
3.1.4 Soros, párhuzamos és vegyes rendszerek összehasonlítása

Ezek a kategóriák a belső égésű motor és a villanymotor jármű hajtásláncához való kapcsolódását írják le:[1]

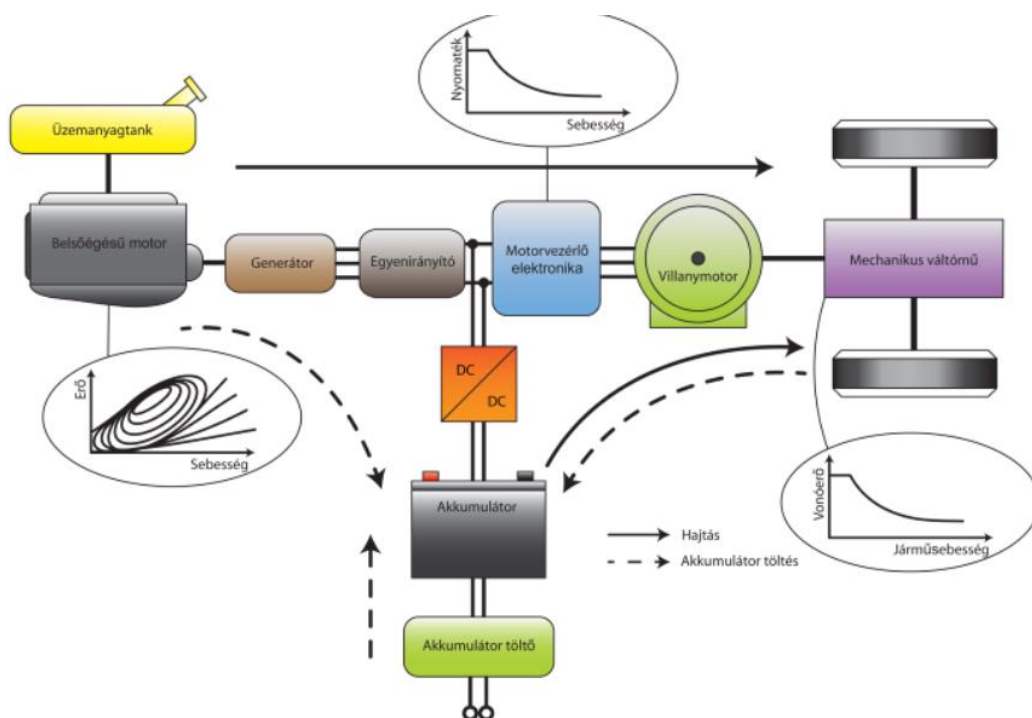
A soros hibrid esetben a két erőforrás energiája egyetlen hajtóműben (a villamos gépben) fut össze, és kizárólag ez hajtja meg a jármű kerekét. A belsőégésű motor mechanikusan nincs összekötve a kerekkel; feladata mindössze egy generátor meghajtása, amely az elektronikus átalakítón keresztül az akkumulátorokat és a villamos motort látja el árammal.

Előnyei azok hogy belsőégésű motor a jármű hajtásigényétől (sebességétől) függetlenül működhet, így folyamatosan a legoptimálisabb, legjobb hatásfokú és legalacsonyabb károsanyag-kibocsátású tartományában üzemelhet. Nincs szükség bonyolult többfokozatú sebességváltóra, az irányítás pedig a mechanikus szétválasztás miatt egyszerűbb.

Hátrányai azok hogy az energiát kétszer is át kell alakítani (mechanikusból elektromossá a generátorban, majd elektromosból mechanikussá a vontatómotorban), így a hatásfokok szorzódnak, ami jelentős energiaveszteséget okoz. A vontatómotort úgy kell méretezni, hogy önmagában is bírja a maximális terhelést, emellett a generátor extra súlyt és költséget jelent.[1]

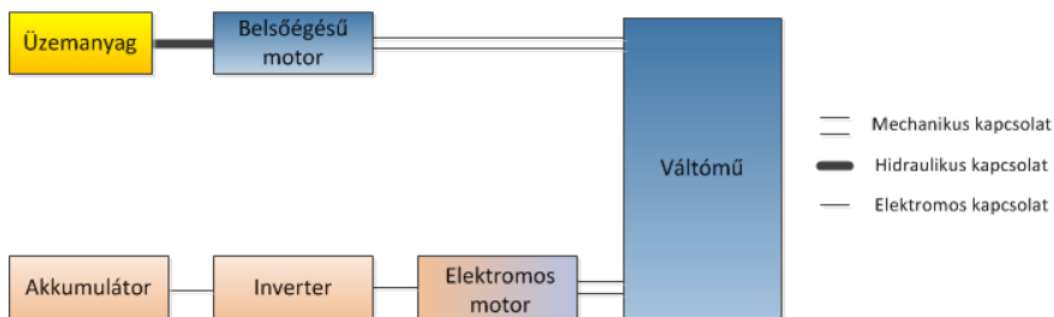


6. ábra Soros hibrid [1]



7. ábra Soros hibrid-elektromos hajtáslanc [1]

A párhuzamos hibridnél a belsőégésű motor nyomatéka egy mechanikus kapcsolaton (például sebességváltón) keresztül közvetlenül eljut a kerekekhez, miközben egy villamos motor is mechanikusan kapcsolódik a hajtáslánchoz, hogy besegítsen. A két erőforrás teljesítménye nyomaték- vagy sebességösszegzéssel adódik össze. [1]

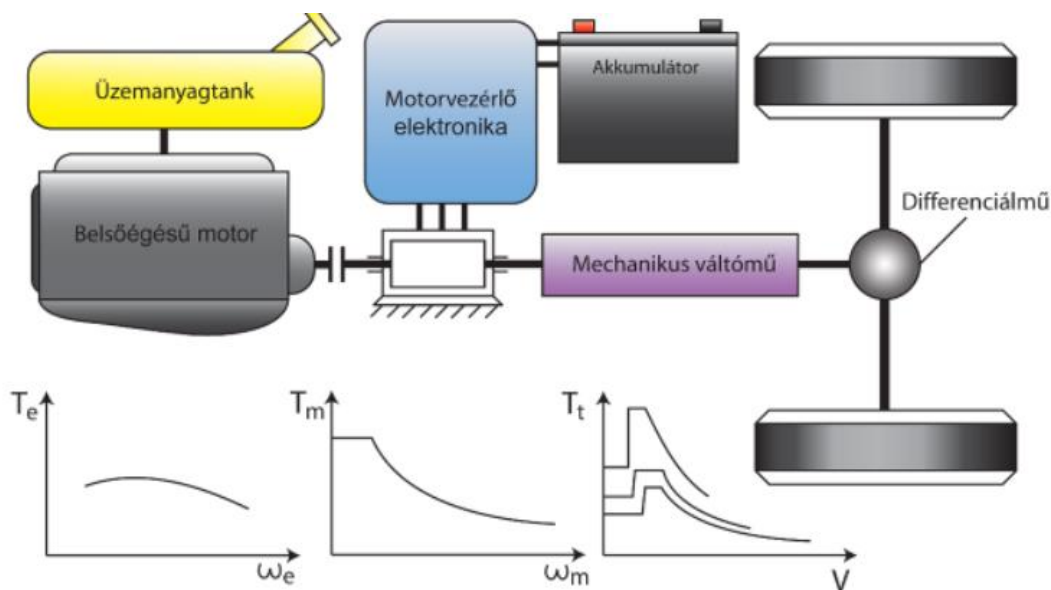


8. ábra Párhuzamos hibrid [1]

A párhuzamos hibridek felépítése nagyon sokféle lehet:

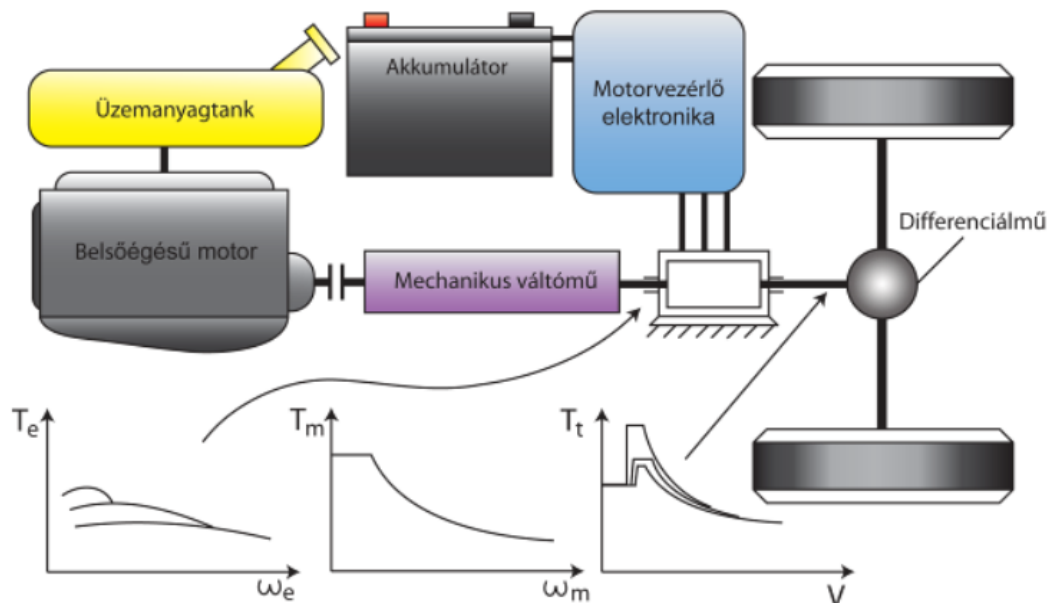
Egytengelyes konfigurációk Ezek az egyszerűbb és kisebb helyigényű kialakítások, ahol maga az elektromos motor forgórésze (rotorja) működik nyomaték-összegzőként. Attól függően, hogy a sebességváltó hol helyezkedik el a villamos géphez képest, két altípust különböztetünk meg:

“Pretransmission” (a villamos motor a sebességváltó előtt van): Ennél a megoldásnál a sebességváltó mind a belsőégésű motor, mind pedig az elektromos motor nyomatékát átalakítja, így a két erőforrás azonos fordulatszám-tartományban üzemel. Ezt a felépítést leggyakrabban kis méretű belsőégésű motorok esetén alkalmazzák, az úgynevezett "gyenge hibrid" (mildhibrid) hajtásláncoknál. Az elektromos motor ilyenkor többféle feladatot is ellát: részt vesz a motor beindításában, generátorként működik, rásegít a motor erejére, és visszanyeri a fékezési energiát.[1]



9. ábra „Pretransmission” egytengelyes nyomatékösszegző párhuzamos hibrid [1]

„Posttransmission” (a villamos motor a sebességváltó után van): Ebben a konfigurációban a sebességváltó kizárólag a belsőégésű motor nyomatékát tudja átalakítani, az elektromos motor nyomatéka viszont közvetlenül a hajtott kerekhez jut. Ezt a megoldást tipikusan akkor használják, ha egy nagy teljesítményű elektromos motor hosszú ideig egyetlen tartományban üzemel. A váltó feladata itt az, hogy a belsőégésű motor optimális kihasználását változtassa, növelve a jármű hatékonyságát és teljesítményét. Ennek a felépítésnek fontos jellemzője – és egyben hátránya –, hogy mivel az elektromos motor közvetlenül a kerekhez csatlakozik, a belsőégésű motor álló helyzetben nem tudja tölteni az akkumulátorokat generátor üzemmódban.[1]

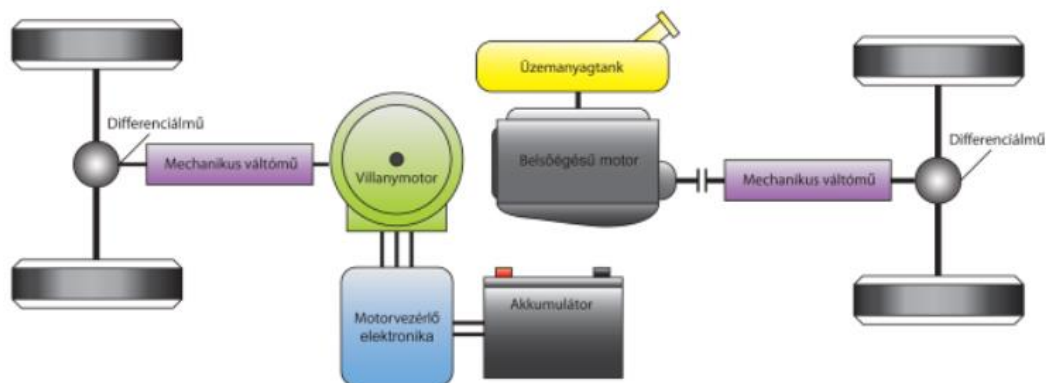


10.ábra „posttransmission” egytengelyes nyomatékösszező párhuzamos hibrid [1]

Elválasztott tengelyes (külön tengelyes) felépítés Ez a felépítés megtartja a hagyományos járművek bizonyos előnyeit, mivel a belsőégésű motort és a sebességváltót változatlanul hagyja az egyik tengelyen, az elektromos rendszert pedig egy másik tengelyre helyezi el. [1]

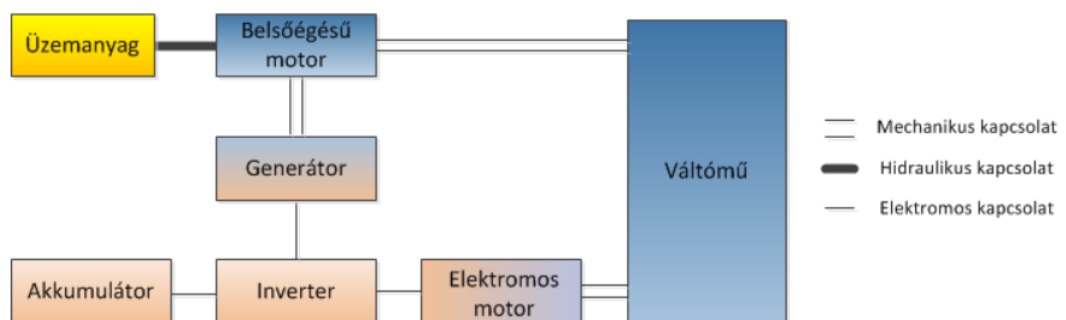
Előnyei hogy A külön tengelyre ható erőforrások lehetővé teszik a négykerék-meghajtást, ami csúszós utakon lényegesen nagyobb tapadást biztosít, és a kerekek között jobban elosztja a vonóerőt. Ez a felépítés teszi lehetővé azt az üzemmódot is, amelyben a belsőégésű motor hajtja a járművet az egyik tengelyen, míg a fékezést a másik tengelyre szerelt villamos gép végzi. [1]

Hátrányai hogy Az elektromos berendezések és az esetlegesen beépített differenciálmű nagyon sok helyet foglalnak el, ami érezhetően csökkentheti az utasok és a csomagok számára fenntartott teret. Ezt a helyproblémát úgy lehet orvosolni, ha egysebességes váltót használnak, az egy nagy elektromos motor helyett pedig két kisebbet építenek be közvetlenül a kerekekhez. A "posttransmission" megoldáshoz hasonlóan ennek is megvan az a hátránya, hogy a belsőégésű motor álló helyzetben nem képes az akkumulátorok töltésére.[1]



11.ábra Párhuzamos hibrid hajtás külön tengelyen [1]

Megosztott soros-párhuzamos hibrid vagy vegyes hibrid hajtás (Complex Hybrid): A soros és párhuzamos rendszerek elemeit kombinálja. Megfelelő összehangolással hozzák létre a két alapváltozatból. Gyakran Miller- vagy Atkinson-ciklusú motort alkalmaz, ami jobb hatásfokot biztosít. Ez a típus a legjobb a mechanikai és elektromos energia könnyű átalakítására egymásba. Ehhez differenciálműre is szükség van a teljesítményarány szabályozásához.[2]



12.ábra Soros-párhuzamos hibrid [1]

4 Az energia-visszanyerési technológiák összehasonlítása

4.1 Regeneratív fékezési rendszerek

4.1.1 Elektromotoros regeneráció

Az elektromotoros regeneráció egy energiavisszanyerő technológia, amelyet főként elektromos és hibrid elektromos járművekben alkalmaznak a mozgási energia hasznosítására fékezés során. A hagyományos fékezés során a jármű mozgási energiája súrlódás és hő formájábanvész el. Az elektromotoros regeneráció célja ezen energiapazarlás csökkentése. [9] Működési elve: Amikor a jármű vezetője fékezik, az elektromos motor, amely a kerekekhez kapcsolódik, megfordítja működését és generátorként kezd funkcionálni. Ekkor a jármű mozgási energiája (mechanikai energia) elektromos energiává alakul át. A keletkezett áramot ezután az autó akkumulátorában tárolják. Az így visszanyert és eltárolt energia később felhasználható a jármű gyorsítására, csökkentve a hagyományos motor terhelését. [9] Az elektromotoros regeneráció különösen előnyös városi vezetés esetén, ahol gyakoriak a megállások és elindulások, így jelentős energiamegtakarítási potenciált kínál. Az üzemanyag-fogyasztásban akár 30%-os megtakarítást is eredményezhet. Javítja a jármű általános üzemanyag-hatékonyságát és csökkenti a CO₂-kibocsátást. Meghosszabbítja a fékbetétek és féktárcsák élettartamát, mivel a regeneratív fékezés csökkenti a hagyományos súrlódásos fékek terhelését. [10]

4.1.2 Hidraulikus fékenergia visszanyerés

A hidraulikus fékenergia visszanyerés egy olyan energia-visszanyerő technológia, amely a jármű mozgási energiáját hasznosítja a fékezés során, ellentétben a hagyományos súrlódásos fékekkel, amelyek hő formájában pazarolják el ezt az energiát. Ez a technológia alternatívát kínál az elektromos regeneratív fékrendszerekhez képest, amelyek jelenleg dominálják a piacot. [9] Működési elv: A rendszer lényege, hogy fékezéskor a jármű kinetikus energiáját egy hidropneumatikus akkumulátorban tárolja. [9] A kerekek mechanikai energiája egy szivattyú/motor segítségével hidraulikus energiává alakul át, amelyet nagy nyomás alatt tárolnak. Az így tárolt energia később felhasználható a jármű gyorsítására, csökkentve a motor terhelését. [11] A lendkerekes energiatárolás (mechanikai)

elméletileg hatékonyabb lehet, mivel elkerüli az energiaátalakítási veszteségeket, amelyek az elektromos rendszerekben fellépnek (mechanikai>elektromos>mechanikai), mivel a lendkerék mechanikai energiát tárol és ad át közvetlenül.[10]

A hidraulikus hibrid regeneratív fékezésnek két fő típusa van:soros hidraulikus hibrid fékezés,Párhuzamos hidraulikus hibrid fékezés.

Soros hidraulikus hibrid fékezés: Ebben a felépítésben a motor nincs közvetlenül összekötve a kerekekkel. Ehelyett egy szivattyú/motor hajtja a járművet az akkumulátorból származó nagynyomású folyadék felhasználásával.Ez a rendszer képes leállítani a belső égésű motort, amikor az nincs használatban, például enyhe gyorsítás vagy rövid utak során. Üzemanyag-hatékonysági nyeresége 60-70% lehet, és az általános hatékonysága 70-80%.[9]

Párhuzamos hidraulikus hibrid fékezés: Itt a motor továbbra is a hagyományos sebességváltón keresztül hajtja a kerekeket, és a hidraulikus alkatrészek a hajtótengelyhez csatlakoznak, segítve a fékezést és a gyorsítást.[11] Ez a forma különösen hatékony nagy gyorsításoknál, amikor mind a hidraulikus rendszer, mind az motor egyidejűleg szolgáltat erőt.Üzemanyag-hatékonysági nyeresége 40% lehet, az általános hatékonysága pedig szintén 70-80%.A párhuzamos hibrid rendszert választották egy kutatás fókuszának, mivel közel azonos előnyöket kínál, mint a soros, de anélkül, hogy az extra hibrid vezérlő költségeivel járna.[9]

4.2 Hőenergia visszanyerési rendszerek

4.2.1 Kipufogógáz hőenergia visszanyerés

A kipufogógáz hőenergia visszanyerés (Exhaust Heat Recovery, EHR) egy olyan technológia, amely a belső égésű motorokból származó, egyébként veszendőbe menő hőenergiát hasznosítja újra. Ez a hőenergia általában az üzemanyag energiatartalmának jelentős részét képezi (például egy 4 ütemű Otto-ciklusú motor esetében akár 65%-át, míg dízelmotoroknál 55%-át). Az EHR rendszerek egyre nagyobb érdeklődésre tartanak számot, mivel hozzájárulnak a járművek hatékonyságának növeléséhez, az üzemanyag-fogyasztás csökkentéséhez és a károsanyag-kibocsátás mérsékléséhez.[12] Különös jelentősége hibrid járműveknél: A hőenergia visszanyerő rendszerek különösen fontosak a hibrid autók számára. Ennek oka, hogy a hibrid járművek célja az üzemanyag-hatékonyság maximalizálása és a károsanyag-kibocsátás minimalizálása. A visszanyert energia felhasználható elektromos energia tárolására, a hajtáslánc működésének javítására, valamint az akkumulátor felmelegítésére hideg éghajlaton.[13]

4.2.2 Termoelektromos generátorok alkalmazása

A termoelektromos generátorok (TEG-ek) alkalmazása elsősorban a hulladékhő-visszanyerő (WHR) rendszerekben történik, különösen a hibrid elektromos járművekben (HEV-ekben). A belső égésű motorok (ICE-ek) által elégetett üzemanyag energiájának körülbelül egyharmada hulladékhőként távozik a légkörbe. A TEG rendszerek célja, hogy ezt a hővesztést közvetlenül elektromos árammá alakítsák, ezzel javítva az ICE hatékonyságát és csökkentve az üzemanyag-fogyasztást.[14]

A TEG-ek előnye hibrid járművekben: Nincs mozgó mechanikus alkatrész, ami alacsony karbantartási igényt, kisebb méretet, könnyebb súlyt és zajtalan működést eredményez. A TEG-ek a hőmérséklet-különbség alapján működnek; minél nagyobb a hőmérséklet-különbség, annál több energiát termelnek. A TEG-et általában a kipufogórendszerben, a katalizátor előtt helyezik el, mivel ott érhető el a legmagasabb hőmérséklet. Ez a pont maximális hőmérséklet-különbséget biztosít, ami hatékonyabbá teszi a TEG-rendszert magasabb motorfordulatszámra és nyomatékon[14]

4.3 Az energia-visszanyerési rendszerek hatékonysági összehasonlítása

Az energia-visszanyerési rendszerek célja a járművekben elvesző energia újrahasznosítása, ezzel javítva az üzemanyag-hatékonyságot és csökkentve a károsanyag-kibocsátást. Az egyes technológiák hatékonysága különböző tényezőktől függ, mint például a jármű típusa, a vezetési környezet, a rendszer felépítése és az energiaátalakítás során fellépő veszteségek mértéke.

Az elektromotoros regeneráció különösen városi környezetben hatékony, ahol gyakori a fékezés és elindulás. Ebben az esetben a mozgási energia akár 30–40%-a is visszanyerhető, amit az akkumulátor tárol, és a jármű későbbi gyorsításához használ fel. Ez csökkenti a hagyományos motor terhelését és a fékrendszer kopását, miközben javítja az energiahatékonyságot.

A hidraulikus fékenergia visszanyerés, különösen a soros hibrid kialakításban, nagyobb energia-visszanyerési potenciált kínál, akár 60–80%-os hatékonysággal. Ez a rendszer jellemzően nehézgépjárművekben alkalmazott, ahol a nagy tömeg és a gyakori fékezés kedvez az energia tárolásának és újrahasznosításának. A párhuzamos rendszer valamivel alacsonyabb, de még mindig jelentős hatékonyságot nyújt, körülbelül 40%-os üzemanyag-megtakarítással.

A hőenergia-visszanyerő rendszerek, mint például a kipufogógáz-visszanyerés és a termoelektromos generátorok, a belső égésű motor működése közben keletkező hulladékhőt hasznosítják újra. Ezek a rendszerek általában kisebb mértékben járulnak hozzá az energiahatékonyság növeléséhez (jellemzően 5–10%-kal), viszont különösen fontosak a hibrid hajtású járműveknél, ahol a rendszer egészének optimalizálása a cél. A termoelektromos generátorok előnye, hogy mozgó alkatrészek nélkül működnek, így karbantartási igényük alacsony, azonban hatékonyságuk a hőmérséklet-különbségtől erősen függ.

Összességében elmondható, hogy míg a hidraulikus rendszerek kiemelkedő hatékonyságot kínálnak megfelelő környezetben, az elektromotoros regeneráció széles körben elterjedt és jól illeszkedik a városi közlekedéshez. A hőenergia-visszanyerő technológiák kisebb mértékben járulnak hozzá az üzemanyag-megtakarításhoz, de fontos kiegészítő szerepet töltenek be a belső égésű motorokkal felszerelt, vagy hibrid rendszerekben.

5 Egy hibrid jármű energiafelhasználásának szimulációja egy adott vezetési ciklusban

A fejezet célja, hogy bemutassa a MATLAB/Simulink környezetben létrehozott hibrid jármű szimulációs modeljét, annak felépítését, valamint a végrehajtott szimuláció eredményének kiértékelését. A vizsgálat fókuszában az akkumulátor töltöttségi szintjének (SOC) változása és a regeneratív fékezés hatékonysága áll.

5.1 A szimulációs környezet és eszközeik bemutatása

A jármű energia visszanyerési vizsgálatát a MathWorks által fejlesztett szoftvercsomagot használtam, a MATLAB-ot és azon belül egyik al programját a Simulink-et amelyben több fajta szimulációt végezhetünk el több ágon. A MATLAB ipari szabványnak számít a járműipari fejlesztésben.

5.1.1 MATLAB/Simulink alapú modellezés

A szimuláció alapját a MATLAB számítási környezet és a Simulink grafikus blokkdiagram alapú modellező eszköz adja. A Visszafelé számoló (Backward-Facing) modellezési módszert használtam. Ennek lényege az, hogy a szimuláció bemente a jármű előírt sebessége, és ebből számoljuk vissza a fizikai törvények alapján a szükséges vonóerőt, majd a teljesítményt, és végül az energiafogyasztást.

A Simulink előnye, hogy lehetővé teszi a dinamikus rendszerek (például akkumulátor töltés/merülés) időbeli viselkedésének vizsgálatát differenciálegyenletek grafikus megoldásával. A modellben főbb alkalmazott blokkok a következők:

Mathematical Operations: Alapműveletek a fizikai erők (légellenállás, gyorsítás) számítására használtam.

Integrator: Az akkumulátor töltöttségi szintjének (SOC) időbeli integrálására használtam.

Switch/Logic: A hajtás és a visszatöltési (regeneratív fékezés) közötti logikai döntés megvalósítására használtam.

5.2 A kiválsztott vezetési ciklus leírása

A szimuláció bemeneteként szabványos vezetési ciklust alkalmaztam, amely idő-sebesség függvényként írja le a jármű mozgását. Ez biztosítja, hogy az eredmények összehasonlíthatóak legyenek más mérésekkel, és reprezentálják a valós forgalmi körülményeket.

5.2.1 WLTC ciklus leírása

A WLTC (Worldwide Harmonized Light vehicles Test Cycle) ciklus a könnyűgépjárművek kibocsátásának és üzemanyag-fogyasztásának meghatározására szolgáló globálisan harmonizált szabvány.[16] A WLTC a tágabb WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure) eljárás része, amelyet az ENSZ EGB 15 számú globális műszaki szabályzata tartalmaz.[16]

A WLTC/WLTP felváltotta a korábbi, elavult NEDC (New European Driving Cycle) eljárást Európában 2017-2019 között.[16] Az új szabvány célja, hogy a laboratóriumi mérések jobban illeszkedjenek a valós és modern vezetési körülményekhez.[15] A WLTC magasabb átlag-és maximumsebességet, hosszabb távolságot és dinamikusabb gyorsulásokat/lassításokat tartalmaz.[15]

A leggyakrabban alkalmazott Class 3 ciklus (például a class 3b, $v_{max} \geq 120 \text{ km/h}$) négy, egymást követő fázisból áll, amelyek együtt egy 1800 másodperces (30 perces) tesztet alkotnak.[15]

WLTP Class 3b ciklus [16]

	Fázis	Időtartam,[s]	Maximum sebesség,[km/h]	Megtett távolság,[m]	Átlagsebesség megállással,[km/h]
1	Alacsony	589	56,5	3095	18,9
2	Közepes	433	76,6	4756	39,5
3	Magas	455		7162	56,7
4	Nagyon-magas	323	97,4	8254	92,0
5	Összesen	1800	-	23266	46,5

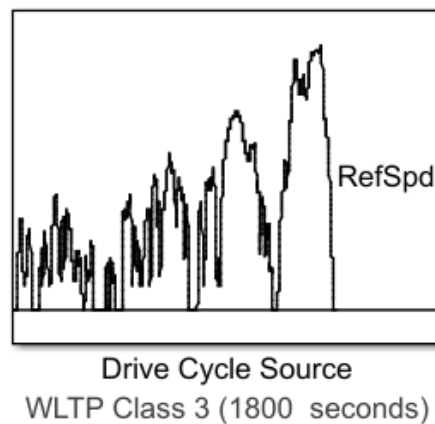
Az alacsony fázis városi araszolás, sok megállással. A közepes fázis városi/elővárosi haladás. A magas fázis országúti szakasz. A nagyon magas fázis autópályás szakasz.

5.3 A modell felépítése

A szimulációs modell szabványos Simulink blokkokból épük fel, amelyek mindegyike egy egy fizikai törvényszerűséget vagy logikai műveletet valósít meg. Az alábbiakban egyenként bemutatom a felhasznált blokkokat.

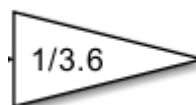
5.3.1 A modellben alkalmazott blokkok

Drive Cycle Source blokk a bemenetett biztosítja a szimulációnak. A blokk a WLTP class 3-ra van beállítva.



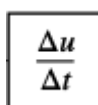
13. ábra Drive Cycle Source blokk

Gain (konverzió) blokk ami mértékegység átváltóként működik a szimulációban. A blokk 1/3.6 értéket kapott mivel a Drive Cycle Source kimenete km/h-ban áll, azonban a fizikai erők számítását m/s-ban van számítva.



14. ábra Gain blokk átváltó funkcióval

Derivative blokk (deriváló blokk) amit gyorsulás számítására van használva, mivel a sebességjel idő szerinti deriváltját képezi. A kimenete a jármű pillanatnyi gyorsulása lesz.



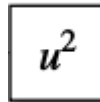
15.ábra Derivative blokk

Gain (tömeg) blokk de azuttal a jármű tömegét ábrázolja.Ez 1500kg ra van állítva.



16.ábra Gain blokk tömeg funkcióval

Math Function blokk egy matematikai függvény blokk ami négyzetre emelésre van állítva.Ez a blokk a légellenállás számításához szükséges, mivel ez a sebesség négyzetével arányos.



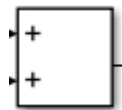
17.ábra Math Function blokk

Gain (légellenélás) blokk ami léellenállási együthatótt képviseli.Ez 0.4-re van beállítva és ez az érték összevontan tartalmazza a levegő sűrűségét,a légellenálási alaktényezőt és a homlokfelületet.



18.ábra Gain blokk léellenélási együtható funkcióval

Add (összegzés) blokk összeadja a a tehetetlenségi erőt és a légellenálást.



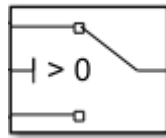
19.ábra Add blokk

Product (szorzás) blokk összeszoroza a sebességet és az erőt aminek az eredménye mechanikai teljesítményt lesz.



20.ábra Product blokk

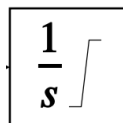
Switch (vezérlő logika) blokk ami feltélteltől függően engedi át az egyik vagy másik bemeneti jelet,ez valósítja meg a hibrid stratégiát.



21.ábra Switch blokk

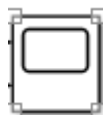
Gain (akkumulátor kapacitás) blokk ez a blokk az akkumulátor kapacitását és az energiáramlás irányát képviseli.Ennek értéke az akkumulátor méretének a reciprokát tartalmazza negatív előjellel.Ez a blokk számolja át a teljesítményt (Watt) úgy,hogy a hajtás csökkentse,a visszatöltés pedig növelje az akkumulátor töltöttségi szintjét (SOC).

Integrator blokk végzia az idővel összegzést,vagyis kiszámolja az akkumulátor pillanatnyi töltöttségi szintjét a SOC-ot.A bemenő jelet folyamatosan hozzáadja a kezdeti értékhez.A blokk 0.6-os kezdőértékre van beállítva,ami azt jelenti hogy a szimuláció 60%-os töltöttséggel indul.



22.ábra Integrator blokk

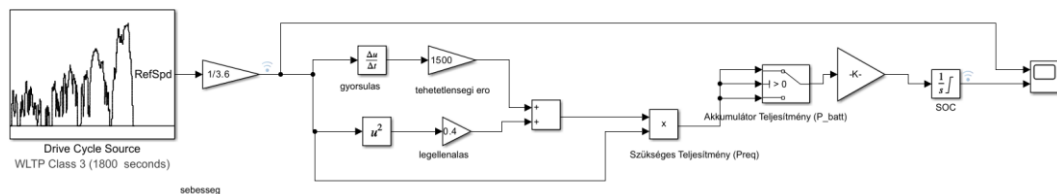
Scope blokk ez jeleníti meg a szimuláció végeredményeit grafikus formában.A blokk fogadja a kiszámított jeleket,és kirajzolja őket egy időfüggő grafikonra.



23.ábra Scope blokk

5.3.2 A rendszer összekapcsolása

A blokkokat a “Backward-facing” elvnek megfelelően, a fizikai ok-okozati láncot követve kötöttem össze a következő képen: az elején a Drive Cycle Source biztosítja a sebesség alapjelet, amelyet a Gain(1/3.6) azonnal m/s-ra konvertálja. Ezt a sebességjelet három irányba vezetjük. Egyrészt a Derivative blokkba a gyorsulás kinyeréséhez, amit a tömeg Gain (1500) szoroz meg, létrehozva a tehetetlenségi erőt. Másrészt a Math Function(u^2) blokkba, amit a légellenállás Gain(0.4) követ, létrehozva a légellenállási erőt. Harmadrészt közvetlenül a teljesítmény számításához. A kétféle erőt az Add blokk összegzi. Az összegzett erőt és a sebességet a Product blokkban szorozzuk össze, így megkapjuk a Szükséges Teljesítményt(P_req). Ez a teljesítményjel fut be a Switch vezérlő bemenetére és alsó ágára is. A Switch felső ága (hajtás esetére) egy 0-a értékű konstanssal van lezárva (belső ágasú motor üzemmód), míg az alsó ág (fékezés) engedi át a negatív teljesítményt az akkumulátor felé. A Switch kimenete áthalad a kapacitás Gain blokkon, majd az Integrator blokkba jut, amely folyamatosan számítja az aktuális SOC értéket. Végezetül az integrator kimenetét a Scope blokkba kötjük a kiértékeléshez.



24. ábra teljes modell

5.3.3 Járműparaméterek

A szimuláció során egy átlagos személygépjármű paramétereit vettem alapul a menetellenállások számításához. A mozgáshoz szükséges vonóerőt a tehetetlenségi erő, a légellenállás és a gördülési ellenállás összege adja:

$$F_{\text{összes}} = m * a + \frac{1}{2} * \rho * C_d * A * v^2 + m * g * C_r \quad (1)$$

A modellben használt állandók:

Tömeg(m): 1500 kg

Légellenállási együttható (C_d): 0.3

Homlofelület (A): 2.2 m^2

Levegő sűrűsége (ρ): 1.225 kg/m^3

Akkumulátor kapacitás: 15 kWh

5.3.4 Hajtáslánc paraméterek

A modell egyszerűsített hajtáslánc logikát követ. A "Switch" blokk valósítja meg az energia-menedzsmentet a következő képen:

Hajtás fázis ($P_{req} > 0$): Ha a járműnek pozitív teljesítményre van szüksége, azt az akkumulátorból fedezi. A modell jelenlegi beállítása szerint az elektromos hajtás dominál.

Fékezés fázis ($P_{req} < 0$): Ha a szükséges teljesítmény negatív, a rendszer generátor üzemmódba vált. A mozgási energiát a rendszer vissztáplálja az akkumulátorba ez a regeneratív fékezés.

5.3.5 A model egyszerűsítései és feltételezései

A szimulációs modell elkészítése során több egyszerűsítést is alkalmaztam annak érdekében, hogy a hibrid jármű energiafelhasználása áttekinthető és jól értelmezhető legyen. A modell célja nem egy konkrét jármű teljes pontosságú leképezése volt, hanem annak bemutatása, hogy egy adott vezetési ciklus során hogyan változik a szükséges hajtási teljesítmény, az akkumulátor töltöttségi szintje és a regeneratív fékezésből visszanyerhető energia.[23]

A modell egyik legfontosabb egyszerűsítése, hogy a hajtáslánc veszteségeit állandó vagy elhanyagolt értéként kezeli. A valóságban a villanymotor, az inverter, az akkumulátor, a mechanikus áttételek és a csapágyazások mind rendelkeznek saját veszteséggel. Ezek a veszteségek az üzemi ponttól, a fordulatszámtól, a terheléstől és a hőmérséklettől is függnének. A modellben ezek részletes figyelembevétele helyett az energiaáramlás fő irányai kerültek előtérbe.[23]

További egyszerűsítés, hogy az akkumulátor viselkedése ideális energiatárolóként jelenik meg. A valós akkumulátorokban a belső ellenállás, a hőmérséklet, az öregedés, a töltési és kisütési hatások, valamint a megengedett áramkorlátok is befolyásolják a tényleges működést. Nagy teljesítményű gyorsításkor vagy intenzív regeneratív fékezéskor az akkumulátor nem minden esetben képes az energia korlátlan felvételére vagy leadására. Ezért a valós járművekben az akkumulátorvezérlő rendszer folyamatosan figyeli az áramot, a feszültséget, a cellahőmérsékletet és a töltöttségi szintet.[23]

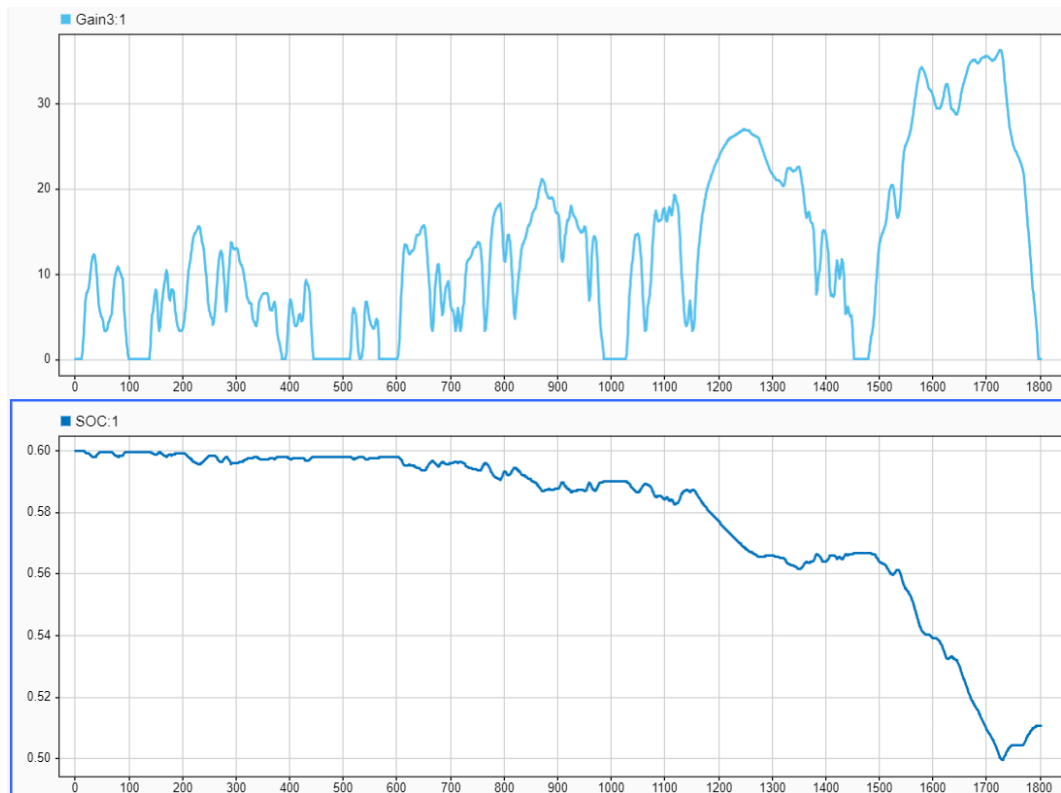
A modell a regeneratív fékezést is egyszerűsített módon kezeli. A valóságban a fékeenergia-visszanyerés mértékét több tényező korlátozza. Ilyen tényező például az akkumulátor aktuális töltöttségi szintje, a tapadási viszony, a fékezési intenzitás, a villamos gép maximális generátorteljesítménye és a járműstabilitási rendszerek működése. Ha például az akkumulátor közel teljesen feltöltött állapotban van, akkor a rendszer nem tudja befogadni a teljes visszanyerhető energiát, ezért a súrlódó fékek nagyobb szerepet kapnak.

A légellenállás és a tehetetlenségi erő figyelembevétele ugyanakkor elegendő ahhoz, hogy a vezetési ciklus különböző szakaszainak energiaigénye összehasonlítható legyen. A modell jól szemlélteti, hogy alacsony sebességnél a gyorsítások és lassítások hatása a jelentősebb, míg nagy sebességnél a légellenállás válik meghatározóvá. Ez a hibrid járművek energiafelhasználásának egyik legfontosabb jellemzője.

Összességében a modell megfelelő alapot biztosít az energiafelhasználás tendenciáinak vizsgálatához. Bár a valós járművek működése ennél összetettebb, a szimuláció alkalmas arra, hogy bemutassa a hibrid hajtás alapvető energetikai folyamatait, valamint a regeneratív fékezés és az akkumulátortöltöttség kapcsolatát.

5.4 Szimulációs eredmények kiértékelése

A modell teljes megerősítéséhez, 1800 másodperces WLTP Class 3 vezetési ciklust futtattam le. A szimuláció kezdeti feltételeként az akkumulátor szintje 60-ra állítottam be. A szimulációs eredményeket a 18. ábra foglalja össze, ahol a felső grafikon a jármű sebességprofilját, az alsó pedig az akkumulátor töltöttségi szintjének a változását mutatja be az idő függvényében.



25.ábra Szimuláció eredmények

5.4.1 Energiafogyasztási profil

Az SOC görbe lefutása három jellegzetes szakaszra bontható, amelyek tükrözik a fizikai terhelés változását:

Városi és elővárosi szakasz (0-1100s): A ciklus első felében a jármű sebessége ritkán lépi túl a 15 m/s (54 km/h) értéket. Ezen a hosszú szakaszon a SOC görbe csökkenése rendkívül mérésenkelt: 1100 másodperc alatt az érték mindössze 0.60-ról kb. 0.58-ra csökkent. Ez a magas hatékonyság a légellenállás hiányának és a gyakori visszatöltésének köszönhető. A görbe nem sima, hanem folyamatosan hullámzik: minden gyorsításnál egy rövid fékezés következik, ami stabilizálja az energiaszintet.

Országúti szakasz (1100-1500s): Ahogy a sebesség eléri a 20-25 m/s (70-90 km/h) tartományt, a görbe esése felgyorsul. Itt már láthatóan dominálni kezd a légellenállás, és kevesebb a fékezési lehetőség.

Autópálya szakasz (1500-1750s): Ez a szimulációnak a legfotósabb része hiszen amikor a jármű eléri a csúcsebességet (kb. 36 m/s, azaz 130 km/h megközelítőleg), az SOC görbe szint függőleges zuhanásba kezd. A grafikonon látható, hogy ezen a rövid, kb. 250 másodperces szakaszon az akkumulátor többlet

merült (0,56-ról 0,50-re esett), mint a megelőző 25 percben összesen. Ez a szászerűen igazolja a modellt: a sebesség megduplázása a légellenállási erőt a négyszeresére, a teljesítményigényt pedig a nyolcszorosára növelte.

5.4.2 Visszanyert energia mennyiség

A szimulációs modell egyik legfontosabb célkitűzése a regeneratív fékezés hatékonyságának vizsgálata volt. A modellben az alkalmazott vezárló logika (a Switch blokk) érzékeli a negatív teljesítményigényt és ilyenkor a hajtásláncot generátor üzemmódba kapcsolja.

A visszanyert energia mennyisége két fő tényezőtől függ: a jármű tömegétől és a fékezés előtti sebességtől.

Két féle visszanyerés figyelhető meg:

Minimális visszanyert energia: A városi szakaszban (0-1000 s) látható apró, felfelé ívelő tüskék az SOC görbén. Ezek egyenként kis energiát jelentenek, a ciklus során történő gyakori ismétlődésük jelentősen lassítja az akkumulátor merülését, ami javítja a városi hatékonyságot.

Makró visszanyert energia: A ciklus végén (kb. 1750 s-nál) amikor a jármű 131 km/h sebességről állóra fékezik, az SOC görbén egy jelentős ugrásszerű emelkedés látható. A szimuláció során az SOC értéke ezen a ponton (pl. 0.50-ről 0.51-re) emelkedett vissza. Ez azt bizonyítja, hogy a nagy sebességnél felhalmozott mozgási energia jelentős része sikeresen visszanyerhető és elektromos energiaként tárolható.

5.4.3 Kezdeti töltöttségi szint hatásvizsgálata

A modell megerősítése során megvizsgáltam a rendszer viselkedését különböző kezdeti töltöttségi szintek mellett is. A szimulációk igazolták, hogy alacsonyabb kezdeti szint (például 50%) esetén a WLTP ciklus nagy sebességű, a nagyon magas fázisban kritikus kockázatot jelent a teljes lemerüléshez. Ezzel szemben a 100-os töltöttséggel történő indítás a rendszer nem képes a ciklus elején jelentkező regeneratív fékezési energiát befogadni, ami visszanyert energia elvesztéséhez vezet, csökkentve ezzel a jármű teljes ciklus vetített energiahatékonyságát.

5.4.4 A szimuláció eredményeinek értelmezése

A szimulációs modell elkészítése során több egyszerűsítést is alkalmaztam annak érdekében, hogy a hibrid jármű energiafelhasználása áttekinthető és jól értelmezhető legyen. A modell célja nem egy konkrét jármű teljes pontosságú leképezése volt, hanem annak bemutatása, hogy egy adott vezetési ciklus során

hogyan változik a szükséges hajtási teljesítmény, az akkumulátor töltöttségi szintje és a regeneratív fékezésből visszanyerhető energia. Az energiamenedzsment-stratégiák (EMS) alapvető feladata pontosan ezen energiaáramlások és eloszlások optimalizálása a hajtóegységek között.[23] A modell egyik legfontosabb egyszerűsítése, hogy a hajtáslánc veszteségeit állandó vagy elhanyagolt értéként kezeli. A valóságban a villanymotor, az inverter, az akkumulátor, a mechanikus áttételek és a csapágyszorítások mind rendelkeznek saját veszteséggel. Ezek a veszteségek az üzemi ponttól, a fordulatszámától, a terheléstől és a hőmérséklettől is függenek. A szakirodalomban a villanymotorok pontos modellezésére olyan statikus hatásfok-térképeket (efficiency map) használnak, amelyek figyelembe veszik a fordulatszám és a nyomaték függvényében változó hatékonyságot, mind hajtási, mind generátoros (visszatöltési) üzemmódban. A modellben ezek részletes figyelembevétele helyett az energiaáramlás fő irányai kerültek előtérbe.[24] További egyszerűsítés, hogy az akkumulátor viselkedése ideális energiatárolóként jelenik meg. A valós akkumulátorokban a belső ellenállás, a polarizációs ellenállás, a hőmérséklet, az öregedés, a töltési és kisütési hatásfok, valamint a megengedett áramkorlátok is befolyásolják a tényleges működést.[24] A tudományos kutatásokban alkalmazott akkumulátormodellek (például a PNGV egyenértékű áramköri modell) igazolják, hogy a belső ellenállás és az üresjáratú feszültség közvetlenül a töltöttségi szinttől (SOC) függ. Nagy teljesítményű gyorsításkor vagy intenzív regeneratív fékezéskor az akkumulátor nem minden esetben képes az energia korlátlan felvételére vagy leadására, mivel a valós rendszerek szigorú fizikai határokkal rendelkeznek. Egy tipikus hibrid modellben például a 107 kW-os villanymotoros csúcsteljesítményhez képest az akkumulátor maximális töltési/kisütési korlátja csupán 39 kW.[24] Ezért a valós járművekben az akkumulátorvezérlő rendszer és a komplex EMS folyamatosan figyeli a komponensek korlátait.[23] A modell a regeneratív fékezést is egyszerűsített módon kezeli. A valóságban a fékeenergia-visszanyerés mértékét több tényező korlátozza. Ilyen tényező például az akkumulátor aktuális töltöttségi szintje, a tapadási viszony, a fékezési intenzitás és a villamos gép maximális generátorkapacitása. Ha például az akkumulátor közel teljesen feltöltött állapotban van, akkor a rendszer nem tudja befogadni a teljes visszanyerhető energiát, ezért a súrlódó fékek nagyobb szerepet kapnak.[24] A légellenállás és a tehetetlenségi erő figyelembevétele ugyanakkor elegendő ahhoz, hogy a vezetési ciklus különböző szakaszainak energiaigénye összehasonlítható legyen. A járművekre ható teljesítményigényt leíró fizikai egyenletek igazolják, hogy a szükséges vonóerőt alapvetően a gyorsulásból fakadó tehetetlenségi ellenállás, valamint a sebesség négyzetével (így a pillanatnyi teljesítményigénynél a sebesség köbével) arányos légellenállás határozza meg.[24] A modell jól szemlélteti, hogy alacsony

sebességnél – például a WLTC tesztciklus 56,5 km/h maximális sebességű, sűrű megállásokkal tarkított "alacsony" fázisában. A gyorsítások és lassítások hatása a jelentősebb. Ezzel szemben nagy sebességnél, mint amilyen a WLTC 131,3 km/h-s csúcsebességet is elérő "nagyon magas" szakasza. A légellenállás válik abszolút meghatározóvá. Ez a hibrid járművek energiafelhasználásának egyik legfontosabb jellemzője.[16] Összességében a modell megfelelő alapot biztosít az energiafelhasználás tendenciáinak vizsgálatához. Bár a valós járművek működése ennél összetettebb amit a legújabb, gépi tanulásra (Machine Learning) és megerősítéses tanulásra (Reinforcement Learning) épülő, többváltozós energiamenedzsment stratégiák is alátámasztanak.[25]

6 Fejlesztési irányok

A hibrid járművek fejlesztésének fő célja az energiafelhasználás minimalizálása és a rendszer általános hatékonyságának növelése. Ez a folyamat magában foglalja a szoftveres vezérlési stratégiák fejlesztésében, mind a hardveres architektúrák, különösen a fékrendszerek és az energiatárolók fejlesztésében.

6.1 Az energiafogyasztás csökkentésének lehetőségei

Az energiafogyasztás csökkentése előszörban a belső égésű motor és az elektromos motor közötti teljesítményelosztás intelligens szabályozásával érhető el.

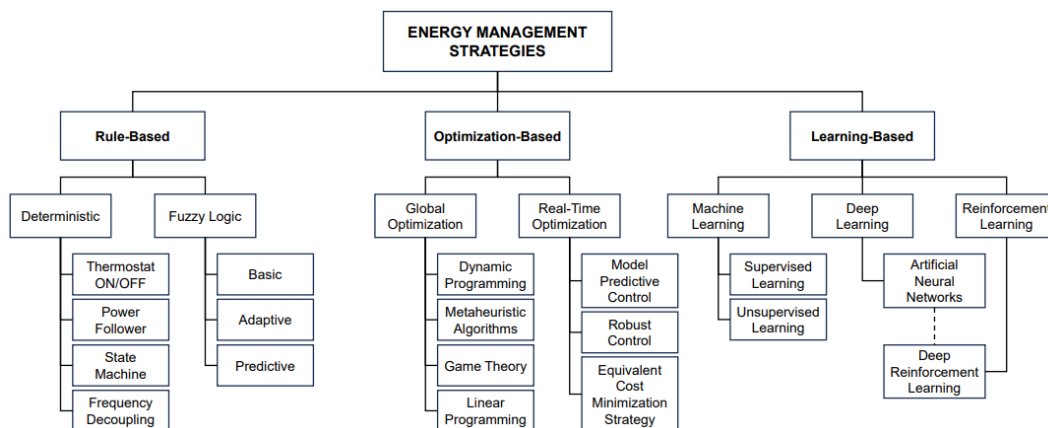
6.1.1 Energiagazdálkodási algoritmusok fejlesztése

Az enegiamenedzsment-stratégiák fejlődése három fő kategóriákba sorolható: szabályalapú (Rule-Based), optimalizáció-alapú (Optimization-Based) és tanulás-alapú (Learning-Based) megközelítések. [17]

Szabályalapú rendszerek meghaladása: A korai hibrid rendszerek determinisztikus szabályokat vagy fuzzy logikát alkalmaztak, amelyek bár egyszerűek és robusztusak, nem képesek alkalmazkodni a dinamikus változó vezetési körülményekhez, így nem garantálják az optimális üzemanyag-felhasználást. [18]

Valós idejű optimalizáció (Real-Time Optimization): A fejlesztések egyik iránya az olyan algoritmusok, mint az ECMS (Equivalent Consumption Minimization Strategy) és az MPC (Model Predictive Control) alkalmazása. Az MPC képes előre jelezni a jövőbeli állapotokat egy gördülő időablakban, és ennek megfelelően optimalizálni az energiafogyasztást, figyelembe véve a rendszer korlátait. [17]

Globális optimalizáció: A dinamikus programozás (DP) képes megtalálni a globális optimumot egy teljes vezetési ciklusra, számítási igénye miatt valós időben nem alkalmazható. Ugyanakkor mintaként szolgálhat más, valós idejű algoritmusok tanításához. [18]



26.ábra Az EMS-ek osztályozása [17]

Hibrid stratégiák: A legújabb trendek a különböző módszerek kombinálását javasolják, hogy kiegyensúlyozzák a számítási költségeket és az energiahatékonyságot. [18]

6.1.2 Energiagazdálkodási stratégiák összehasonlítása

A hibrid járművek (HEV) működésének egyik legfontosabb kérdése az energiazdálkodás, amelynek fő célja az üzemanyag-fogyasztás és a károsanyag-kibocsátás minimalizálása, miközben kielégíti a vezető teljesítményigényét. Az energiamenedzsment-rendszer (EMS) feladata annak eldöntése, hogy az adott pillanatban a belső égésű motor, a villamos motor vagy a kettő kombinációja biztosítsa a szükséges teljesítményt a különböző vezetési szituációkban. [23] A döntésnek figyelembe kell vennie a jármű sebességét, az akkumulátor töltöttségi szintjét (SOC), a teljesítményigényt, az útviszonyokat és a komponensek fizikai korlátait. [23]

A hibrid járművek energiamenedzsment-stratégiáit általában három fő csoportba sorolja: szabályalapú (Rule-Based), optimalizáció-alapú (Optimization-Based) és tanulásalapú (Learning-Based) módszerekre. [23]

A szabályalapú vezérlések legnagyobb előnye az egyszerűségük és az átláthatóságuk. Ezeknél a rendszereknél a vezérlő előre meghatározott, mérnöki szakértelemre és heurisztikára épülő logika alapján működik, ami leírja, hogy az egyes szituációkban milyen intézkedéseket kell tenni. Kis számítási igényük miatt könnyen alkalmazhatók a kereskedelmi járművekben. Ezek a rendszerek rendkívül megbízhatók, de hátrányuk, hogy nem elég rugalmasak a dinamikus változó vezetési helyzetekhez, így hatékonyságuk fogyasztáscsökkentés terén sok esetben elmarad a valódi matematikai optimalizációval elérhető eredményektől. [23]

Az optimalizáció-alapú módszerek fejlettebb megközelítést alkalmaznak, mivel a problémát matematikai optimalizációs feladatként kezelik. Ide tartozik például a modell prediktív szabályozás (MPC) és a dinamikus programozás (DP). Ezek a stratégiák a rendszerdinamika és a jövőbeli vezetési feltételek előzetes matematikai ismeretére támaszkodva a beállított peremfeltételek mellett próbálják optimalizálni a jármű működését, minimalizálva az üzemanyag-fogyasztást és a kibocsátást. Bár lényegesen jobb energiahatékonyságot biztosítanak, alkalmazásukat gyakran nehezíti a hatalmas számítási igény és a jövőbeli hajtási adatok iránti elengedhetetlen szükséglet.[23]

A tanulásalapú módszerek a legújabb fejlesztési irányok közé tartoznak, és magukba foglalják a felügyelt gépi tanulást (Machine Learning) és a megerősítéses tanulást (Reinforcement Learning). Ezek a rendszerek képesek hatalmas mennyiségű történelmi adat és valós idejű visszacsatolás alapján megtanulni az optimális stratégiát. A megerősítéses tanulás (RL) például próba-szerencse alapon, a környezettel való interakciók és jutalmazások révén sajátítja el a legjobb vezérlést, anélkül, hogy a rendszer dinamikájának előzetes, pontos matematikai ismeretére lenne szüksége. Ez a képesség különösen alkalmassá teszi őket a valós idejű adaptációra a folyamatosan változó forgalmi körülmények, vezetői viselkedések és útviszonyok között.[23] A különböző energiamenedzsment-stratégiák összehasonlítása alapján megállapítható, hogy önmagában nincs egyetlen, minden helyzetben tökéletes megoldás. A szabályalapú rendszerek a stabilitást és az egyszerűséget nyújtják, az optimalizációs módszerek a maximális elméleti hatékonyságot biztosítják, míg a tanulásalapú rendszerek a kiemelkedő alkalmazkodóképességgel és az önálló tanulóssal tűnnek ki, feloldva az előző két módszer számítási és optimalizációs korlátait. A jövőben várhatóan ezek kombinációja, az úgynevezett hibrid modellek terjednek el, amelyek ötvözik a gépi tanulási algoritmusok intelligenciáját a hagyományos szabályozási taktikák megbízhatóságával a teljesítmény és a robusztusság egyidejű maximalizálása érdekében.[23]

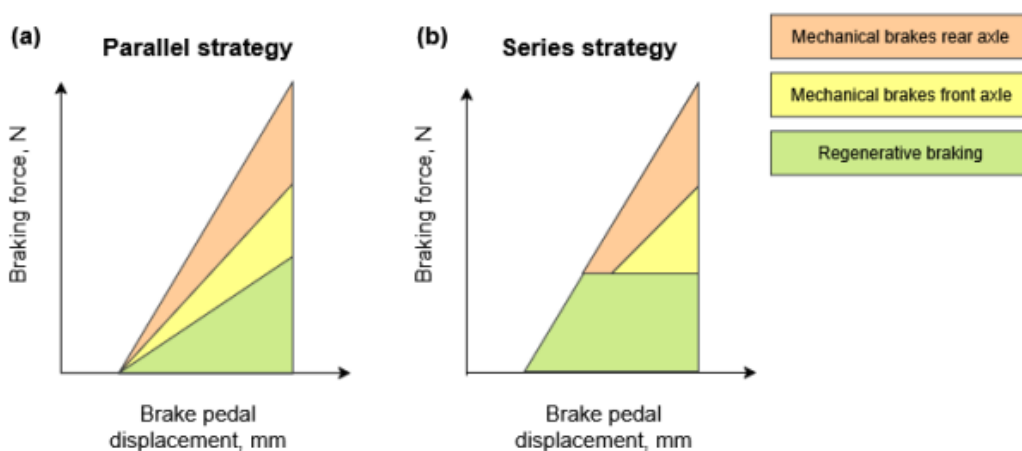
6.2 A visszanyerhető energia növelésének módszerei

A regeneratív fékezés lehető teszi a mozgási energia elektromos alakítását lassítás közben, ami kritikus a hibrid járművek hatótávolságának növeléséhez. A modern rendszerek célja, hogy maximalizálják a visszanyert energiát anélkül, hogy veszélyeztetnék a jármű stabilitását vagy a fékhatást.

6.2.1 Fejlettebb regeneratív fékrendszerek

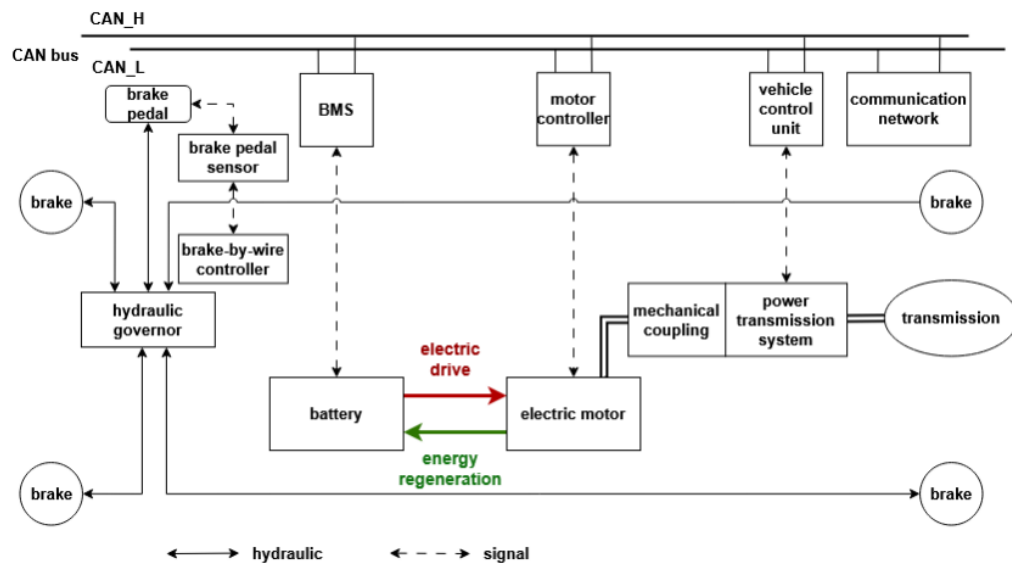
A technológia fejlődése több területen teszi lehetővé a hatékonyság növelését:

Soros és párhuzamos fékrendszerek: A soros rendszerek (ahol a fékpedál és a hidraulika között nincs közvetlen mechanikai kapcsolat) lehetővé teszik, hogy a lassítási igényt elsődlegesen az elektromos motor elégítse ki, és a súrlódó fékek csak szükséges esetén lépjenek működésbe. Ez magasabb energia visszanyerést tesz lehetővé a párhuzamos rendszerekkel szemben, ahol a két fék fékrendszer egyszerre működik. [19][20]



27. ábra Párhuzamos, Soros fékezési stratégia [19]

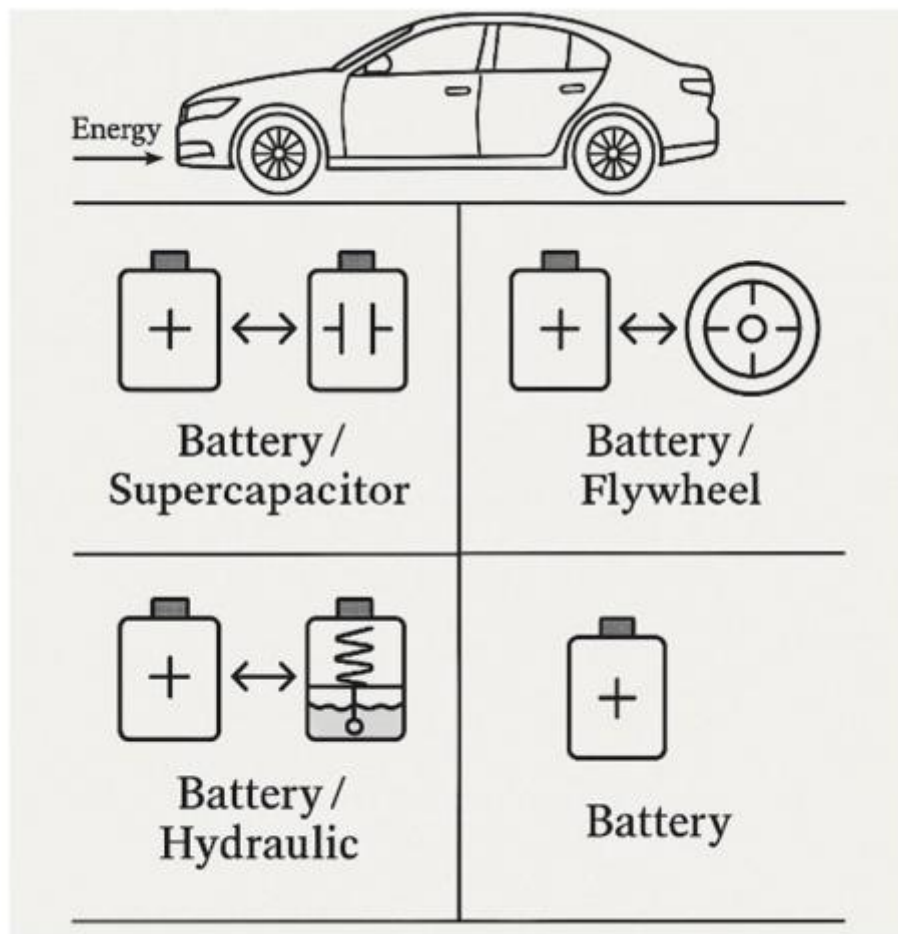
Brake-By-Wire (Elektronikus fékrendszerek): Ez a technológia megszünteti a fizikai kapcsolatot a pedál és a féknyergek között, lehetővé téve a féerő precíz, kerekenkénti elosztását. A vezérlőegység (ECU) dinamikus szabályozza a regeneratív és súrlódó fékezés arányát, növelve a visszanyerés hatékonyságát és a jármű stabilitását (pl. ABS integráció révén) [19]



28. ábra Brake-by-wire rendszer felépítése [19]

Kerékagy-motorok(In-Whell Motors):Az ilyen elrendezésű járművekben a közvetlen hajtás miatt a fékezési energia visszanyerése hatékonyabb lehet, mivel a terhelésátvitel függvényében optimalizálható a fékerő eloszlása a tengelyek között.Kutatások szerint az összkerékajtású,kerékagy-motors rendszerek akár 23-31%-kal több energiát nyerhetnek vissza. [19]

Hibrid energiatároló rendszerek (HESS):A regeneratív fékezés során keletkező nagy teljesítménycsúcsokat a hagyományos Li-ion akkumulátorok nehezen tudják elnyelni a karosodás veszélye nélkül.A szuperkondenzátorok (ultrakapacitork) beépítése lehetővé teszi a hirtelen felszabaduló fékezési energia gyors tárolását, amely később gyorsításra lehet felhasználni, tehermentesítve az akkumulátort. [19][20]



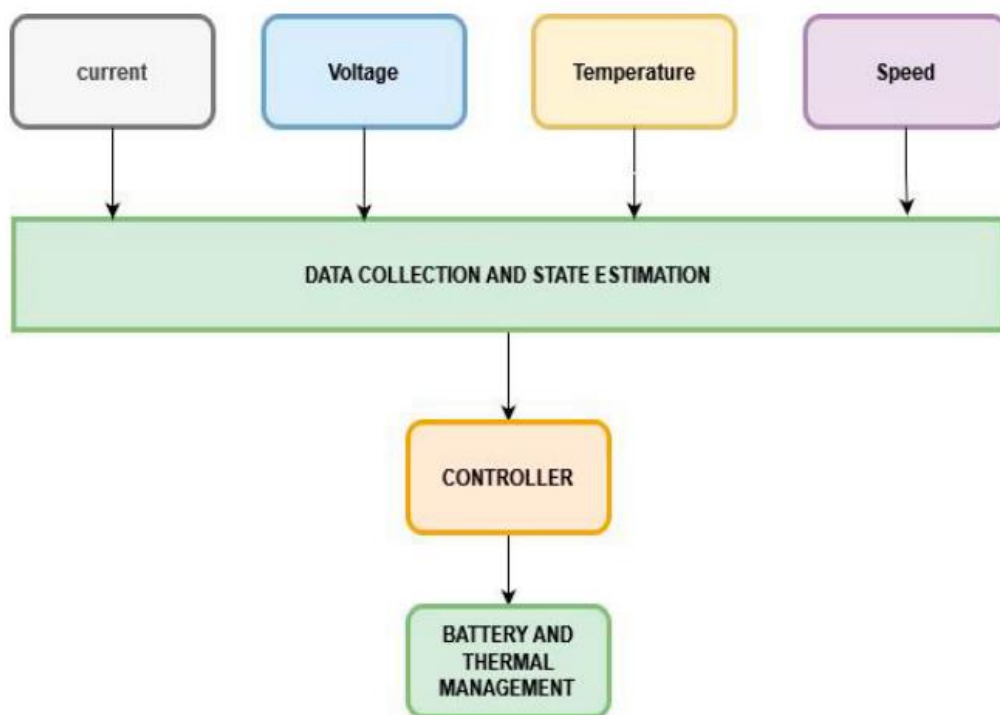
29.ábra HESS az elektromos járművek regeneratív fékezésében [19]

6.3 Saját fejlesztési javaslat

A modern, fejlett világban egyre nagyobb szerepet kap a mesterséges intelligencia (MI) alkalmazása a mérnöki rendszerekben. A közlekedési szektorban különösen a hibrid és elektromos járművek esetében az MI alapú megoldások jelentős potenciált kínálnak az energiafelhasználás csökkentésére, a hatásfok növelésére és a károsanyag kibocsátás csökkentésére. A hibrid járművek energiaellátása összetett rendszer, amely több energiaforrás (belső égésű motor, villanymotor, akkumulátor) összehangolt működését igényli. A hagyományos, előre programozott vezérlési stratégiák nem minden esetben képesek optimálisan reagálni a változó környezeti és vezérlési körülményekre. Ennek kiküszöbölésére egy MI alapú vezérlési stratégia alkalmazása jelentős előrelépést jelenthet.

6.3.1 Mesterséges intelligencia (MI) használata

Javaslatom a Megerősítéssel Tanulás (Reinforcement Learning-RL) és a Mély Tanulás (Deep Learning) széleskörű integrációja a hibrid járművek energiamenedzsmentjében. Az RL alapú vezérlés képes önállóan megtanulni az optimális stratégiát a környezettel való interakció anélkül, hogy előzetes modellre lenne szüksége. [17][18]



30. ábra MI vezérelt energiamenedzsment rendszer architektúrája [22]

A javaslat konkrét elemei a következők:

Prediktív energiamenedzsment: Az MI algoritmusok képesek feldolgozni a történelmi vezetési adatokat, valamint a valós idejű forgalmi és domborzati információkat. Ez lehetővé teszi a rendszer számára, hogy előre jelezze az energiaigényt, és proaktívan ossza el a teljesítményt (pl. az akkumulátor töltöttségének előkészítése egy emelkedő előtt vagy regenerálás tervezése egy piros lámpa közlekedtével). [21]

Személyre szabott vezetési profilok: A gépi tanulás (ML) segítségével a rendszer felismerheti a vezető stílusát (agresszív vagy takarékos) és ehhez igazíthatja a regeneratív fékezés intenzitását és a motorhasználatot, növelve a kényelmet és a hatékonyságot. [22]

Valós idejű alkalmazkodás és karbantartás: Az MI alapú prediktív karbantartás(predictive maintenance) képes előre jelezni az alkatrészek (pl. akkumulátor, motor stb.) meghibásodását a szenzoradatok elemzésével, minimalizálva az állásidőt és növelve a jármű élettartamát. [21]

6.3.2 Mesterséges intelligencia alapú prediktív energiamenedzsment

A mesterséges intelligencia alkalmazása a hibrid járművekben azért lehet fontos fejlesztési irány, mert a jármű energiafelhasználását egyszerre több tényező is befolyásolja. Ilyen például az akkumulátor töltöttségi szintje, a jármű sebessége, a gyorsítás mértéke, az útviszonyok, a forgalmi helyzet, az út emelkedése vagy lejtése, valamint a vezető vezetési stílusa. Egy hagyományos, előre beállított szabályok alapján működő vezérlés ezeket a tényezőket csak korlátozottan tudja figyelembe venni, ezért bizonyos helyzetekben nem mindig a legkedvezőbb energiafelhasználást eredményezi. Az MI-alapú prediktív energiamenedzsment lényege, hogy a rendszer nemcsak az adott pillanatban fennálló állapotot vizsgálja, hanem megpróbál előre következtetni a következő útszakasz energiaigényére is. Ha a jármű rendelkezik navigációs adatokkal, forgalmi információkkal vagy az útvonal domborzati adataival, akkor a vezérlés előre fel tud készülni a várható terhelésre. Például egy hosszabb emelkedő előtt célszerű lehet magasabb akkumulátortöltöttséget fenntartani, míg egy lejtős vagy városi szakasz előtt hasznos lehet szabad kapacitást hagyni az akkumulátorban a fékezés során visszanyerhető energia számára. A megerősítéses tanulás alkalmazása azért előnyös, mert a vezérlő nem kizárólag előre megírt szabályok szerint működik, hanem a korábbi működési tapasztalatok alapján képes javítani a döntésein. A hibrid jármű esetében a rendszer figyelembe veheti például az akkumulátor töltöttségi szintjét, a jármű sebességét, a gyorsulást, a motor aktuális üzemi állapotát és a vezető teljesítményigényét. Ezek alapján dönthet arról, hogy mikor használja inkább a villamos motort, mikor kapcsolja be a belső égésű motort, illetve milyen mértékben alkalmazza a regeneratív fékezést. Az ilyen tanuló algoritmusok célja, hogy a jármű működése hosszabb távon kedvezőbb legyen. A rendszer akkor működik jól, ha csökkenti az üzemanyag-fogyasztást, mérsékli a károsanyag-kibocsátást, kíméli az akkumulátort, és közben a vezetési komfortot sem rontja. Ez azt jelenti, hogy az energiamenedzsmentnek nemcsak a fogyasztás csökkentésére kell törekednie, hanem arra is, hogy a jármű vezethetősége és üzembiztonsága megfelelő maradjon. A mesterséges intelligencia további előnye, hogy képes lehet felismerni a vezető vezetési szokásait. Egy nyugodtabban, takarékosabban vezető személy esetében a rendszer más energiastratégiát alkalmazhat, mint egy dinamikusabban gyorsító vezetőnél. Ha például a vezérlés azt érzékeli, hogy a

vezető gyakran kér nagy teljesítményt, akkor nagyobb energiatartalékot tarthat fenn az akkumulátorban. Egy egyenletesebben vezető felhasználónál viszont előnyösebb lehet az üzemanyag-takarékosabb működés előtérbe helyezése. Fontos azonban, hogy az MI-alapú vezérlés járműipari alkalmazása csak megfelelő biztonsági korlátok mellett képzelhető el. A rendszer nem hozhat olyan döntést, amely túlterheli az akkumulátort, kedvezőtlen hőmérsékleti tartományba kényszeríti a hajtásláncot, vagy veszélyezteti a jármű stabilitását. Emiatt az MI-alapú energiamenedzsmentet célszerű hagyományos biztonsági vezérlésekkel együtt alkalmazni. Így a mesterséges intelligencia az energiafelhasználás optimalizálását segíti, miközben a jármű biztonságos működéséhez szükséges határértékeket a vezérlőrendszer minden esetben betartja.

6.3.3 A mesterséges intelligencia várható hatása

A mesterséges intelligencia alkalmazása a hibrid járművekben jelentős hatással lehet a jövő energiafelhasználására és a hajtáslánc működésére. A hibrid rendszer több egység összehangolt működéséből áll, ezért fontos, hogy a belső égésű motor, a villamos motor, az akkumulátor és a regeneratív fékrendszer a lehető legkedvezőbb módon működjön együtt. Az MI ebben nyújthat segítséget, mivel képes lehet nagy mennyiségű adat feldolgozására és a rendszer működésének folyamatos javítására. Az MI-alapú vezérlés egyik várható előnye, hogy pontosabban tud alkalmazkodni a különböző vezetési körülményekhez. Egy hibrid jármű másképpen viselkedik városi forgalomban, országúton vagy autópályán. Városban a gyakori fékezések és gyorsítások miatt fontos a regeneratív fékezés hatékony kihasználása, míg nagyobb sebességnél a légellenállás és a folyamatos teljesítményigény kerül előtérbe. A mesterséges intelligencia képes lehet felismerni ezeket a helyzeteket, és ennek megfelelően módosítani az energiaelosztást. A mesterséges intelligencia várhatóan a prediktív energiamenedzsment területén is fontos szerepet kaphat. Ez azt jelenti, hogy a jármű nemcsak az aktuális állapot alapján dönt, hanem figyelembe veszi a várható útvonalat, a forgalmat, az emelkedőket, lejtőket és a vezetési körülményeket is. Például egy emelkedő előtt célszerű lehet nagyobb akkumulátortartalékot fenntartani, míg egy lejtős vagy városi szakasz előtt előnyös lehet helyet hagyni az akkumulátorban a visszanyerhető fékezési energia számára. Az MI alkalmazása az akkumulátor élettartamára is kedvező hatással lehet. A vezérlés figyelheti az akkumulátor terhelését, hőmérsékletét és töltöttségi szintjét, majd ezek alapján úgy szabályozhatja a töltést és kisütést, hogy az kevésbé terhelje a rendszert. Ez hosszabb élettartamot és megbízhatóbb működést eredményezhet. Különösen fontos ez regeneratív fékezésnél, amikor rövid idő alatt nagy mennyiségű energia kerülhet vissza az akkumulátorba. A vezetési stílus felismerése szintén fontos

lehetőség. Egy takarékosan vezető felhasználónál a rendszer előnyben részesítheti az alacsony fogyasztású működést, míg egy dinamikusabban vezető személynél nagyobb teljesítménytartalékot tarthat fenn. Ezáltal a jármű működése jobban igazodhat a vezető szokásaihoz, miközben az energiafelhasználás is kedvezőbbé válhat. A mesterséges intelligencia azonban nemcsak az energiafogyasztás csökkentésében, hanem a biztonságosabb működésben is szerepet kaphat. Az MI-alapú rendszer előre felismerhet bizonyos kedvezőtlen állapotokat, például az akkumulátor túlterhelését vagy a hajtáslánc túlmelegedését. Ilyen esetben a vezérlés módosíthatja az energiaáramlást, és megakadályozhatja a rendszer túlzott igénybevételét.

7 Összegzés

Szaktervezésem célja a hibrid hajtású járművek energiaellátási rendszerének bemutatása és optimalizálási lehetőségeinek vizsgálata volt. A tervezés során áttekintettem a hibrid hajtás alapelveit, a belső égésű motor és a villamos hajtás együttműködését, valamint azokat az energiatároló megoldásokat, amelyek meghatározó szerepet játszanak a hibrid járművek működésében. A vizsgálat során külön figyelmet fordítottam az akkumulátorokra, az ultrakapacitásokra és a lendkerékes energiatárolásra, mivel ezek eltérő módon járulhatnak hozzá a jármű energiaellátásához.

A tervezés elméleti részében bemutattam a jelenleg alkalmazott hibrid rendszereket, köztük a teljes hibrideket, a plug-in hibrideket és a lágyhibrideket. Ezek mellett összehasonlítottam a soros, párhuzamos és vegyes hibrid hajtásláncokat is. A különböző rendszerek vizsgálata alapján megállapítható, hogy mindegyik felépítésnek megvannak a saját előnyei és korlátai. A soros rendszer egyszerűbb mechanikai kapcsolatot tesz lehetővé, a párhuzamos rendszer közvetlenebb hajtást biztosít, míg a vegyes hibrid rendszer a két megoldás előnyeit próbálja egyesíteni. Kiemelt szerepet kapott az energia-visszanyerési technológiák vizsgálata is. A regeneratív fékezés különösen fontos a hibrid járművek esetében, mert lehetővé teszi, hogy a fékezéskor egyébként hő formájában elvesző mozgási energia egy része visszakerüljön az akkumulátorba. A vizsgálat alapján az elektromotoros regeneráció a legelterjedtebb és legjobban alkalmazható megoldás a személygépjárművekben, különösen városi közlekedés során. A hidraulikus fékenergia-visszanyerés elsősorban nagyobb tömegű járműveknél lehet előnyös, míg a hőenergia-visszanyerő rendszerek inkább kiegészítő szerepet töltenek be.

A tervezés gyakorlati részében MATLAB/Simulink környezetben készített szimuláció segítségével vizsgáltam egy hibrid jármű energiafelhasználását WLTC vezetési ciklus alapján. A modell célja az volt, hogy bemutassa a jármű energiaigényének változását, az akkumulátor töltöttségi szintjének alakulását, valamint a regeneratív fékezés hatását. A szimuláció során alkalmazott egyszerűsítések ellenére a modell jól szemléltette a hibrid hajtás alapvető energetikai folyamatait. A szimulációs eredmények alapján megállapítható, hogy a hibrid járművek városi és elővárosi környezetben működnek a leghatékonyabban. Ennek oka, hogy ezekben a közlekedési helyzetekben gyakoriak a lassítások és megállások, így a regeneratív fékezés többször képes energiát visszatáplálni az akkumulátorba. A szimuláció során az SOC értéke az alacsonyabb sebességű szakaszokon csak mérsékelten csökkent, ami jól mutatja a visszanyerési folyamat

kedvező hatását. Nagyobb sebességű, autópálya jellegű haladásnál ezzel szemben az akkumulátor töltöttségi szintje gyorsabban csökkent. Ennek fő oka a légellenállás jelentős növekedése, amely nagy sebességnél már meghatározó terhelést jelent a hajtáslánc számára. A vizsgálat alapján egyértelműen látható, hogy a hibrid hajtás előnyei leginkább változó sebességű, gyakori fékezésekkel és gyorsításokkal járó közlekedésben érvényesülnek. A kezdeti akkumulátortöltöttség vizsgálata szintén fontos következtetésekhez vezetett. Túl alacsony töltöttségi szint esetén a nagyobb teljesítményigényű szakaszok kedvezőtlenül befolyásolhatják a rendszer működését, míg túl magas töltöttségi szintnél a regeneratív fékezés során visszanyerhető energia egy része nem hasznosítható. Ezért a hibrid járművek energiamenedzsment-rendszerének egyik fontos feladata az akkumulátor megfelelő üzemi tartományban tartása.

A fejlesztési irányok vizsgálata alapján megállapítható, hogy a hibrid járművek hatékonyságának további növelése nemcsak a hardveres elemek fejlesztésétől függ, hanem a vezérlési stratégiák fejlődésétől is. A fejlettebb regeneratív fékrendszerek, a hibrid energiatároló megoldások és a prediktív energiamenedzsment mind hozzájárulhatnak ahhoz, hogy a jármű energiafelhasználása kedvezőbb legyen. A mesterséges intelligencia alkalmazása különösen ígéretes lehetőség a hibrid járművek jövőbeli fejlesztésében. Az MI-alapú vezérlés képes lehet figyelembe venni a vezetési körülményeket, az útvonal jellemzőit, az akkumulátor állapotát és a vezető vezetési stílusát. Ezáltal a jármű nemcsak előre beállított szabályok alapján működhet, hanem alkalmazkodhat az aktuális és várható körülményekhez is. Ennek eredményeként javulhat az energiafelhasználás, növekedhet a visszanyert energia aránya, és csökkenhet az akkumulátor terhelése.

Összességében a dolgozat alapján megállapítható, hogy a hibrid járművek fontos átmenetet képeznek a hagyományos belső égésű motoros járművek és a teljesen elektromos hajtású járművek között. Megfelelő energiamenedzsmenttel, hatékony energia-visszanyeréssel és korszerű vezérlési megoldásokkal jelentősen csökkenthető az üzemanyag-fogyasztás és a károsanyag-kibocsátás. A jövőben a mesterséges intelligencián alapuló rendszerek további lehetőséget kínálhatnak arra, hogy a hibrid járművek működése még gazdaságosabbá, megbízhatóbbá és fenntarthatóbbá váljon.

8 Irodalomjegyzék

- [1] Hibrid-, hibrid-elektromos járművek, hajtásrendszerek architektúrája, szabályozása, menedzsmentje és energiaforrások

https://mogi.bme.hu/TAMOP/motor_eroatviteli_rendszerek_mechatronikaja/ch06.html#ch-VI.5

- [2] U.S Department of Energy/Office of Critical Minerals and Energy Innovation:*Hybrid Electric Vehicles*

<https://afdc.energy.gov/vehicles/electric-basics-hev>

- [3] Molnár Ibolya:*Elektromos járművek típusai és jellemzői, hibrid járművekben* 2014/2015

<https://muszakiesinformatikaineveles.wordpress.com/8-osztaly-uj/kozlekedes/elektromos-jarmuvek-tipusai-es-jellemzoi-hibrid-jarmuvek/>

- [4] A hibrid autók működése Eautótöltőkábel.hu 2021.03.12

<https://www.eautotoltokabel.hu/elektromos-auto-informaciok/a-hibrid-autok-mukodese/>

- [5] Pataki Melinda (Szerk.):*A hibrid hajtásról*

<https://tanulovezeto.eu/node/1265>

- [6] ALIAT AUTO:*Ce inseamna plug-in hybrid, mild-hybrid sau full-hybrid?* 2024

<https://www.aliat-auto.ro/stiri/cele-trei-tipuri-principale-de-autovehicule-hibride>

- [7] Schiller autó család :*Hibrid autók fajtái: Ismerd meg az összes hibrid hajtást!* 2018.11.25

<https://schiller.hu/blog/hibrid-autok-fajtai/>

- [8] Mi az a hibrid auto és hogyan működik? MitMokorHogyan 2025.02.27

<https://mitmikorhogyan.hu/mi-az-a-hibrid-auto-es-hogyan-mukodik/>

- [9] Joel Nana Yaw Ofori-Teiko:*Hydraulic Hybrid Regenerative Braking*, Ashesi University, 2020

- [10] Siddharth K.Patil: *Regenerative Breaking System in Automobiles*, Vishwakarma Institute of Information Technology, 2012

- [11] Chih-Keng Chen:*Regenerativ braking study for hydraulic hybrid vehicle* 2011
- [12] Bo Zhu, Yi Zhang, Dengping Wang: *Investigation of Engine Exhaust Heat Recovery Systems Utilizing Thermal Battery Technology*, 2024.10.21
- [13] Exhaust heat recovery system, Binuss aso school of engineering 2017/2018
<https://base.binus.ac.id/2018/05/01/exhaust-heat-recovery-system/>
- [14] Muhamad Shazrul bin Dzulkfli, Apostolos Pesyridis, and Dhruvil Gohil: *Thermoelectric Generation in Hybrid Electric Vehicles*, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Brunel University, 2020.07.20
- [15] International: Light-Duty: Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP), TransportPolicy.net
https://www.transportpolicy.net/standard/international-light-duty-worldwide-harmonized-light-vehicles-test-procedure-wltp/?utm_source=chatgpt.com
- [16] Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Cycle (WLTC) DieselNet-ECOpint Inc. 2019
<https://dieselnet.com/standards/cycles/wltp.php>
- [17] Álvaro Gómez-Barroso, Iban Vicente Makazaga, Ekaitz Zulueta: *Optimizing Hybrid Electric Vehicle Performance: A Detailed Overview of Energy Management Strategie* 2024.12.24
- [18] Bin Huang, Wenbin Yu, Minrui Ma, Xiaoxu Wei, Guangya Wang: *Artificial-Intelligence-Based Enegy Manadgement Strategies for Hybrid Electric Vehicles: A Compehensive Review* 2025.07.08
- [19] Emilia M. Szumska: *Regenerative Braking System in Electric Vehicles: A Comprehensive Review of Design, Control Strategies, and Efficiency Challenges* 2025.05.08
- [20] Huang Guozhong, Li Wenzhao, Gao Xuehong, Xiao Lingyun, Wang Yan, Dong Honglei: *Advancing the Regenerative Braking Systems of New Energy Vehicles: A Comprehensive State-of-the-Art Review* 2025.04.15
- [21] *The Role of AI in Future Hybrid Cars* John Underwood 2024.09.5
<https://www.hybridcarnews.org/the-role-of-ai-in-future-hybrid-cars/>
- [22] Kanagamalliga, Rajalingam, Karthik, Jerome Anto Rezin: *Analyzing the Impact of AI-Powered Energy Optimization in Electric Vehicles*, 2025

- [23] Julakha Jahan Jui, Mohd Ashraf Ahmad, M.M. Imran Molla, Muhammad Ikram Mohd Rashid: *Optimal energy management strategies for hybrid electric vehicles: A recent survey of machine learning approaches*, e-Prime, 2024
- [24] Chunhua Zheng, Dongfang Zhang, Yao Xiao, Wei Li: *Reinforcement learning-based energy management strategies of fuel cell hybrid vehicles with multi-objective control*, Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2025
- [25] Xueqin Lü, Yinbo Wu, Jie Lian, Yuangyang Zhang, Chao Chen, Peisong Wang, Lingzheng Meng: *Energy management of Hybrid electric vehicles: A review of energy optimization of fuel cell hybrid power system based on genetic algorithm*, Energy Reports, 2022