



DEBRECENI EGYETEM
MŰSZAKI KAR
GÉPÉSZMÉRNÖKI TANSZÉK

UNIVERSITY OF DEBRECEN
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL
ENGINEERING

YASA AXIÁLIS FLUXUSÚ VILLANYMOTOR
ALKALMAZÁSA GÉPJÁRMŰVEK
HAJTÁSLÁNCAIBAN
SZAKDOLGOZAT

Böszörményi Imre
Gépjárműtechnikai specializáció

Debrecen
2026

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék	II
Jelölések jegyzéke	IV
1 Bevezetés	1
2 Szakirodalmi áttekintés	2
2.1 Fontos szerzők	2
2.2 Uralkodó teóriák és hipotézisek	3
2.3 Felmerülő kutatási kérdések	3
2.4 Hasznos módszerek és eljárások	4
2.5 Kritikai értékelés	5
3 A ma használt technológia bemutatása	6
3.1 Egyenáramú motorok	6
3.2 Váltakozóáramú motorok	7
3.2.1 Háromfázisú aszinkronmotorok	7
3.2.2 Háromfázisú szinkronmotorok	8
4 YASA (Yokeless And Segmented Armature) motor működési elve, szerkezete, előnyei és hátrányai	9
5 YASA motorok elhelyezése elektromos hajtásokban	13
5.1 Hagyományos elhelyezés	13
5.2 Kerékagyba helyezett motorok (Motor to wheel)	16
5.2.1 A kerékagymotoros hajtás műszaki előnyei	17
5.2.2 Az agymotoros hajtás eddigi fő korlátjai	17
5.2.3 A YASA motor, mint lehetséges áttörési technológia	19

5.2.4	A rugózatlan tömeg hatásának numerikus és szimulációs vizsgálata	19
5.2.5	Gyorsulási példaszámítás	23
5.2.6	Energiafogyasztás és hatótáv becslése.....	24
5.2.7	Az agymotoros hajtás, mint tömegsemleges alternatíva	25
6	YASA motorok elhelyezése hibrid hajtásokban.....	30
6.1	Koenigsegg Regera – három YASA motoros hibrid	31
6.2	Ferrari SF90 Stradale – első Ferrari PHEV YASA motorral.....	32
6.3	Ferrari 296 GTB – kompakt PHEV architektúra YASA MGU-K-val.....	33
6.4	Lamborghini Revuelto és Temerario – YASA alapú első e-axle	34
6.5	A YASA-alapú hibrid hypercar-ok fő előnyei	35
7	Belsőégésű motorok kiváltása YASA motorokkal (Restomod)	37
7.1	Porsche 912E/911 restomod – referenciaalkalmazás YASA motorral	37
7.2	Hátsókerék-hajtású platformok	40
7.3	Elsőkerék-hajtású restomod – FWD platformok villamosítása.....	43
7.4	Tömegeloszlás és hajtáslánc-koncepciók összehasonlítása.....	44
7.5	Összehasonlítás elterjedt EV-konverziós hajtásrendszerekkel	45
7.6	Összegzés – YASA motorok szerepe a restomod villamosításban....	47
8	Motorsport	48
8.1	Gyorsulási példaszámítás Forma–E Gen3-at alapul véve	49
8.2	Energiafogyasztás és hatótáv becslése	50
8.2.1	Gördülési ellenállás (Formula–E Gen3, $\Delta m = 100$ kg)	50
8.2.2	Gyorsítások és fékezések (kinetikus energia, $\Delta m = 100$ kg)	52
8.2.3	Összesített többletenergia-igény és hatás a versenyre.....	54
9	Fejlesztendő területek.....	56
10	Következtetés	58
	Irodalomjegyzék	60

Jelölések jegyzéke

$m [kg]$	tömeg
$m_s [kg]$	rugózott tömeg
$m_u [kg]$	rugózatlan tömeg
$k_s \left[\frac{N}{m}\right]$	felfüggesztési rugóállandó
$k_t \left[\frac{N}{m}\right]$	gumiabroncs-rugóállandó
$f_u [Hz]$	rugózatlan tömeg sajátfrekvenciája
$P [W]$	teljesítmény
$P_g [W]$	gördülési ellenállás teljesítményigénye
$E_g [J]$	gördülési ellenállásból származó energiafelhasználás
$E_{kin} [J]$	kinetikus energia
$t [s]$	idő
$s [km]$	megtett út
$v \left[\frac{m}{s}\right]$	sebességvektor
$a \left[\frac{m}{s^2}\right]$	gyorsulás
$g \left[\frac{m}{s^2}\right]$	gravitációs gyorsulás
$\mu_0 [-]$	tapadási súrlódási tényező
$\mu_g [-]$	gördülési ellenállási tényező
$F_g [N]$	gördülési ellenállási erő
$r [m]$	kerék sugara
$F_e [N]$	gördülési ellenállási erő első keréken
$F_h [N]$	gördülési ellenállási erő hátsó keréken
$T [Nm]$	gördülési ellenállási nyomaték

T_e [Nm]	első keréken mért nyomaték
T_h [Nm]	hátsó keréken mért nyomaték
T_k [Nm]	keréken mért nyomaték
P_e [W]	gördülési ellenállás teljesítményigénye első keréken
P_h [W]	gördülési ellenállás teljesítményigénye hátsó keréken
ω [rad/s]	szögsebesség
n [1/min]	fordulatszám
η_{regen} [–]	fékerő visszatáplálás hatásfoka
E_{batt} [J]	kizárólag az akkumulátorból kinyert energia gyorsításkor
E_o [J]	Formula–E Gen3 fajlagos energiafelhasználása

1 Bevezetés

Az autóipar az elmúlt évtizedekben jelentős paradigmaváltáson ment keresztül, amelynek középpontjában az elektromos hajtásrendszerek fejlesztése áll. A globális környezetvédelmi előírások szigorodása, valamint a fosszilis üzemanyagok elérhetőségének csökkenése miatt az elektromos járművek (EV-k) iránti kereslet rohamosan nő [1]. Ez arra ösztönzi a gyártókat, hogy innovatív hajtásrendszereket fejlesszenek, amelyekkel fel tudják venni a versenyt a belsőégésű motorral szerelt gépjárművekkel.

Ebben a kontextusban az elektromos motorok kulcsszerepet játszanak, hiszen meghatározzák a járművek teljesítményét, hatékonyságát és megbízhatóságát. A hagyományos radiál fluxusú motorokkal (RFPM – radial-flux permanent magnet motors) szemben az axiál fluxusú villanymotorok (AFPM – axial-flux permanent magnet motors), különösen a YASA által fejlesztett topológiák, jelentős előrelépést kínálnak a teljesítménysűrűség, a nyomatéksűrűség, a hatásfok, valamint a kompakt méret és tömeg tekintetében [16][18][27].

Jelen szakdolgozat célja, hogy átfogóan bemutassa a YASA axiál fluxusú villanymotorok technológiáját, összehasonlítsa azokat a jelenlegi, hagyományos motorokkal, és elemezze alkalmazási lehetőségeiket elektromos és elektrifikált járművekben. A dolgozat során részletesen tárgyaljuk a motorok szerkezetét, működési elvét, valamint a különböző beépítési és konstrukciós lehetőségeket. Emellett menetdinamikai és hatótáv-számításokkal szemléltetjük a technológia gyakorlati előnyeit.

Kiemelt fókuszot kap a kerékagyba épített motorok (in-wheel drive) és a YASA-topológia összevetése elektromos személygépkocsikban: áttekintjük, miért nem történt meg eddig az agymotoros hajtás széles körű elterjedése, milyen műszaki akadályok jelentkeznek (rugózatlan tömeg, hőelvezetés, megbízhatóság), és hogyan kínálhat erre megoldást a YASA technológia. A kutatás eredményei hozzájárulhatnak az elektromos hajtásrendszerek fejlesztéséhez és a fenntartható közlekedés előmozdításához, különös tekintettel a YASA motorok innovatív jellemzőire, mint a kompakt méret, a magas teljesítménysűrűség és a hatékony hűtés [19][27][28].

2 Szakirodalmi áttekintés

Az elektromos járművek (EV-k) villamos hajtásláncának fejlesztése során kulcsfontosságú a motorok teljesítményének, hatásfokának és tömegének optimalizálása. A hagyományos, radiál fluxusú villanymotorok (RFPM) hosszú ideje meghatározó szerepet töltenek be az iparban, ám az utóbbi években fokozott figyelmet kaptak az axiál fluxusú gépek, különösen a YASA által fejlesztett konstrukciók [16][18]. E kritikai irodalmi áttekintés célja, hogy részletesen bemutassa a két motorfajta összehasonlítását a legfrissebb szakirodalom alapján, kitérve a jelentős szerzők munkáira, az uralkodó teóriákra, módszerekre, valamint a felmerülő kérdésekre és kritikákra.

2.1 Fontos szerzők

A radiál fluxusú villanymotorok témakörében meghatározó munkát végzett Vas (1998) [26], aki az indukciós gépek szabályozási kérdéseit tárgyalja, valamint Krishnan (2001) [25], aki a szinkron motorok korszerű hajtásainak átfogó elemzését nyújtja. További jelentős szerző Jahns (2004) [24], aki a belső mágneses motorok fluxusgyengítési üzemiállapotait vizsgálta és azok optimalizálására mutatott be eljárásokat.

Az axiál fluxusú motorok területén Khwaja M. Rahman (2006) [20] úttörő szerepet játszott az első elektromos járművekbe szánt konstrukciók kidolgozásában. H. Polinder (2001) [21] a gépek mágneses és mechanikai tulajdonságait hasonlította össze különféle hajtási alkalmazásokban. Boldea és Tutelea (2010) [22] összefoglaló tanulmányukban rendszerezik az axiál fluxusú motorok topológiáit és azok működési elveit.

Az ipari megvalósítás terén a YASA által publikált műszaki anyagok és szabadalmak (pl. Woolmer, 2006 [18], Camilleri et al., 2012 [19]) kulcsfontosságúak. Az in-wheel hajtások átfogó áttekintését Deepak et al. (2023) adják [15], míg az AFPM gépek részletes strukturális- és vezérlésorientált áttekintését Hao et al. (2022) mutatja be [16].

2.2 Uralkodó teóriák és hipotézisek

A szakirodalomban széles körben elfogadott nézet, hogy az axiál fluxusú motorok (AFPM) nagyobb nyomatéksűrűséget biztosítanak, köszönhetően annak, hogy a mágneses fluxus az axiális irányban halad, így rövidebb mágneses úttal és kisebb vasvesztéssel lehet számolni [16][18][20]. Ezzel szemben a radiális motorokban a fluxus a tengelyre merőlegesen terjed, ami hosszabb mágneses útvonalat eredményez.

Az AFPM motorok előnyének tekintik még a lemezes felépítést, amely modulárisan skálázható, illetve a hatékonyabb hűtést, mivel a rotor- és statorlapok közelebb esnek a hőelvezető felületekhez [16][19][22]. Woolmer (2006) [18] szerint a YASA motorok különlegessége a közvetlen folyadékűtés (jellemzően olaj), amely lehetővé teszi a motorok nagy teljesítményű, kompakt kialakítását.

Ugyanakkor több szerző rámutat, hogy ezek az előnyök nem feltétlenül jelentkeznek minden alkalmazási környezetben. A mágneses telítődés, az axiális erők és a forgórészek szerkezeti integritása kihívást jelent, különösen nagyobb teljesítmények esetén [16][24]. Továbbá az axiálfluxusú gépek érzékenyebbek a gyártási pontatlanságokra és az egyenetlen mágneses térre [21][22].

2.3 Felmerülő kutatási kérdések

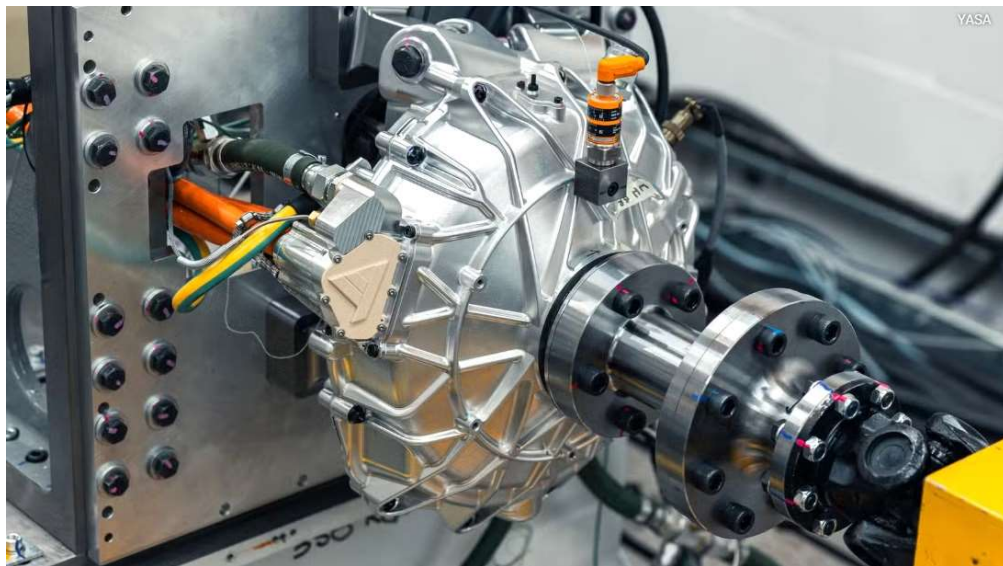
A jelenlegi kutatások középpontjában az AFPM gépek teljesítményének, hűtési lehetőségeinek és hosszú távú megbízhatóságának vizsgálata áll [15][16]. Az egyik kulcskérdés, hogy az axiálmotorok skálázhatósága milyen kompromisszumokkal jár, például a tömeg, költség vagy karbantartás tekintetében [22]. A kutatók vizsgálják továbbá, hogy miként lehet az axiál fluxusú kialakítást tömeggyártásban gazdaságosan előállítani [18][21].

Másik lényeges kérdés a vezérlési stratégiák adaptálása az AFPM topológiához. Mivel a motor szerkezeti szimmetriája és mágneses viselkedése eltér a hagyományos gépektől, új szabályozási algoritmusok és érzékelőelhelyezések kidolgozása válik szükségessé [16][26].

2.4 Hasznos módszerek és eljárások

A numerikus szimuláció, különösen a végeselemes (FEM) mágneses analízis, alapvető módszer a topológia optimalizálására. Az AFPM gépeknél különösen fontos a háromdimenziós térbeli modellezés, mivel a mágneses tér nem szimmetrikus a rotor és állórész tengelye mentén [16][20]. Emellett a CFD-alapú hőanalízis segíti a hűtési rendszer méretezését, amit Woolmer (2013) [23] és Camilleri et al. (2012) [19] is részletesen bemutatott a YASA motorok fejlesztése során.

Laboratóriumi méréseknél az egyik legfontosabb eszköz a dinamométeres vizsgálat, amely lehetővé teszi a nyomaték-, hatásfok- és veszteségi karakterisztikák precíz meghatározását [15][25]. Ezek mellett a vibrációs analízis és a termográfias vizsgálatok is egyre gyakoribbak a motorok diagnosztikájában [16][19].



1. ábra YASA tesztpad [54]

2.5 Kritikai értékelés

Annak ellenére, hogy a szakirodalom az axiálmotorokat gyakran nagy hatékonysággal és nyomatéksűrűséggel jellemzi, ezek az adatok gyakran laboratóriumi körülmények között, nem szabványos protokollok szerint keletkeznek. Woolmer (2013) [23] dokumentumaiban például nem szerepel pontosan, hogy a megadott hatásfokértékek tartalmazzák-e a hűtés energiaigényét. Ez torzíthatja az összehasonlítást a RFPM motorokkal, ahol az ipari szabványok szerint dokumentált mérési eredmények állnak rendelkezésre [3][25].

Ráadásul az AFPM gépek szerkezeti kialakítása gyakran komplexebb, ami gyártási és szerelési szempontból hátrányos. A mágnesek pozicionálása, az axiális erők kiegyenlítése és a hővezetési útvonalak optimalizálása mind olyan területek, ahol az RFPM gépek egyszerűbb konstrukciója előnyt jelenthet [18][24].

Egyes tanulmányok, például Boldea és Tutelea (2010) [22], arra is rámutatnak, hogy az axiálmotorok különösen érzékenyek a mágneses telítődésre és a hőmérséklet emelkedésére, ami korlátozza a tartós teljesítménytartományt. Ezért az ilyen gépek inkább rövid távú nagy teljesítmény-leadást igénylő alkalmazásokban – mint sportautók vagy drónok – válnak előnyössé, szemben a folyamatos üzemű alkalmazásokkal, ahol a hőstabilitás kritikus tényező.

Egyre több kutatás foglalkozik továbbá azzal, hogyan lehet az AFPM motorokat integrálni a jármű architektúrájába oly módon, hogy azok ne csak hatékonyak, de megbízhatóak és költséghatékonyak is legyenek. Itt jelentős potenciál rejlik az integrált hajtáslánc-megoldásokban, ahol az inverter, vezérlőelektronika és motor egy szerkezeti egységet alkot [15][23].

3 A ma használt technológia bemutatása

Az elektromos motorok működésének megértéséhez elengedhetetlen az áramtípusok alapvető ismerete. Két fő áramtípust különböztetünk meg: az egyenáramot (DC) és a váltakozóáramot (AC). Az egyenáram tárolásra alkalmas, így az autóiipari akkumulátorok – például a lítium-ion, nikkel-fémhidrid vagy ólmos-savas típusok – kizárólag egyenáramot biztosítanak [1][3]. Ezzel szemben a váltakozóáram hatékonyan továbbítható nagy távolságokra, ami az ipari és háztartási rendszerek alapjává teszi. Az elektromos járművekben az akkumulátorokból származó egyenáramot inverterek segítségével váltakozóárammá alakítják, hogy megfeleljen a modern motorok igényeinek, ami kulcsfontosságú a hajtásrendszerek tervezésében [4].

3.1 Egyenáramú motorok

Az egyenáramú (DC) motorok a korai elektromos járművek alapvető hajtásforrásai voltak. Ezek a motorok különösen a soros gerjesztés kivitelben nyújtottak kedvező nyomatékjellemzőket, amelyek ideálissá tették őket járműhajtásra. Alacsony fordulatszámon nagy nyomatékot biztosítanak, amely a fordulatszám növekedésével egyenletesen csökken, így nincs szükség sebességváltóra [2]. Ez a tulajdonság különösen előnyös volt a korai elektromos autókban, mivel egyszerűsítette a hajtásláncot és csökkentette a karbantartási igényeket. Ugyanakkor az egyenáramú motorok jelentős hátrányokkal is rendelkeznek. Azonos teljesítmény mellett nagyobbak és nehezebbek, mint váltakozóáramú társaik, hatásfokuk alacsonyabb (általában 70–85% között) [3], és a kommutátor nevű alkatrészük miatt magasabb a karbantartási igényük. A kommutátor fémszeletekből álló érintkező, amelyre szén vagy bronztömbök támaszkodnak, és ezek a forgás során elkopnak, szikrázást okozva [2].

Ezen hátrányok miatt az egyenáramú motorok ma már főként kisebb teljesítményű alkalmazásokban, például indítómotorokban, ablaktörlőkben vagy ülésmozgató mechanizmusokban találhatók meg az autókban. A modern elektromos járművek hajtásában azonban háttérbe szorultak a hatékonyabb alternatívák javára [3][25].

3.2 Váltakozóáramú motorok

A váltakozóáramú (AC) motorok az ipari alkalmazásokban már régóta bizonyítottak, és az elektronikai ipar fejlődésével az autópárhban is egyre elterjedtebbé váltak. Az inverterek és a vezérlőelektronika fejlődése lehetővé tette az akkumulátorok egyenáramának hatékony átalakítását és a motorok precízen szabályozott működtetését [3][4]. Az AC motorok magas hatásfokkal (85–97%), egyszerű felépítéssel és alacsony karbantartási igényvel rendelkeznek. Autópári felhasználásban a háromfázisú aszinkron- és szinkronmotorok terjedtek el [3][25].

3.2.1 Háromfázisú aszinkronmotorok

A háromfázisú aszinkronmotorok, más néven indukciós motorok, az egyik legelterjedtebb váltakozóáramú motorfajták az autópárhban. Felépítésük egyszerű: egy rézhuzalból készült tekercsekkel ellátott állórészből, egy forgórészből (kalickás vagy tekercselt), valamint két csapágyakat tartalmazó fedélből állnak [2]. A működés alapja az állórész forgó mágneses terének indukciós hatása a forgórészben, amely forgatónyomatékat generál. A forgórész fordulatszáma elmarad a mágneses térétől, innen az „aszinkron” elnevezés [25].

A háromfázisú aszinkronmotorok előnyei közé tartozik az egyszerű felépítés, a nagy indítónyomaték, a jó fordulatszám-szabályozhatóság és a visszatápláló fékezés képessége. Teljes terhelésnél hatásfokuk 85–97% között mozog, ami kiváló teljesítményt biztosít [3].

Hátrányaik azonban, hogy alacsony fordulatszámon a hatásfok jelentősen csökkenhet (akár 70% alá), a forgórész hajlamos a melegedésre, és magas fordulatszámon a nyomaték meredeken esik [4]. Ezeket a motorokat számos gyártó alkalmazza, például az Audi e-tron [5], a Mercedes EQC [6] és a Tesla Model S [7] modelljeiben.

A tekercselt forgórészű aszinkronmotorok csúszógyűrűs érintkezőkkel rendelkeznek, amelyek lehetővé teszik a motor indítását és vezérlését. Bár ezek a motorok nagyobb indítónyomatékat biztosítanak és túlterhelhetők, a csúszógyűrűk szikrázása és karbantartási igénye miatt nem elterjedtek az autópárhban [2].

3.2.2 Háromfázisú szinkronmotorok

A szinkronmotorok forgórésze a mágneses térrel azonos fordulatszámon forog, ami magasabb hatásfokot és precíz vezérlést biztosít. Három fő altípusuk van: állandó mágneses, tekercselt forgórészű és reluktancia szinkronmotorok [3][25].

Állandó mágneses szinkronmotorok (PMSM):

Az állandó mágneses szinkronmotorok (PMSM) forgórészébe ritka földfémekből (pl. neodímium) készült mágneseket építenek. Kiemelkedő hatásfokuk (94% felett), nagy teljesítménysűrűségük (1,5 kW/kg nagyságrend) és alacsony hőtermelésük ideálissá teszi őket elektromos járművekhez [3][16]. Az ilyen motorokat széles körben alkalmazzák, például az Audi e-tron GT [5], a BMW i3 [8], a Nissan Leaf [9] és a Tesla Model 3 [7] modellekben. A Porsche Taycan kétfokozatú sebességváltóval kompenzálja a magas fordulatszámú veszteségeket [10].

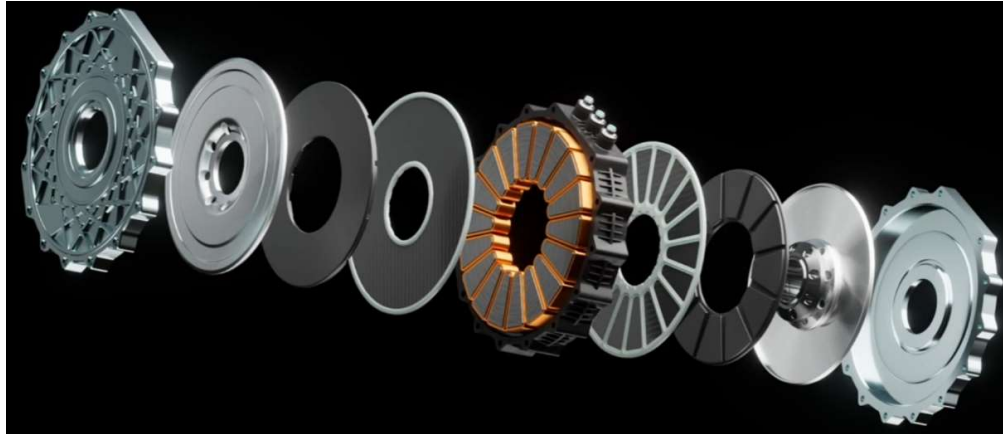
Tekercselt forgórészű szinkronmotorok:

E motorok elektromágneseket használnak állandó mágnesek helyett, amelyeket csúszógyűrűkön keresztül egyenáram táplál. Előnyük a ritka földfémek elhagyása és a magas fordulatszámon is stabil nyomaték. Az ilyen motorokat például a BMW iX3 [8] és a Renault Zoe [11] alkalmazza.

Reluktancia szinkronmotorok:

A reluktancia motorok a mágneses ellenállás különbségén alapulnak. A forgórész egyszerű vaslemezekből áll, íves üregekkel, amelyek szinkron forgást biztosítanak. A mágnessel támogatott szinkron reluktancia motorokat (PM-assisted SRM) a Tesla Model 3 [7] és a Toyota Prius [12] használja, ötvözve a reluktancia és PMSM előnyeit.

4 YASA (Yokeless And Segmented Armature) motor működési elve, szerkezete, előnyei és hátrányai



2. ábra YASA motor [27]

Működési elv:

A YASA-motor egy axiális fluxusú állandómágneses szinkronmotor (AFPM), amelyben a forgórész és az állórész közötti mágneses fluxus a forgástengellyel párhuzamosan halad, nem pedig merőlegesen, mint a hagyományos radiális motorok esetében [13].

A forgórész tárcsa alakú, körkörös elhelyezett állandó mágnesekkel van ellátva, a stator pedig gyűrű alakú, hengerre tekert tekercsekből áll. A tekercseken átfolyó váltóáram és a forgórész mágneses tere közötti Lorentz-erő hozza létre a forgatónyomatékot. Mivel a rotor sugara nagy, az általa létrehozott forgatónyomaték is jelentős ($T \approx I \cdot B \cdot R$) [13].

A YASA motor szinkron üzemű: a forgórész mechanikai szögsebessége a gerjesztő áram frekvenciájához kötött. Tipikusan két tárcsa alakú forgórész fog közre egy középső szegmentált állórészt (dual-rotor, single-stator AFPM topológia), de léteznek egyrotoros változatok is [16][18].

Szerkezeti felépítés:

A 2. ábrán jól látható, hogy az állórész nem tartalmaz körkörös vasmaggyűrűt, hanem radiális szegmensekbe rendezett, különálló tekercsek használ [18]. Ez a yokeless kialakítás azt jelenti, hogy a stator főként a tekercsek hordozására szolgáló hordozóelemből és szegmentált vasmagokból áll, amelyek között a mágneses erővonalak közvetlenül haladnak át. A forgórészek tárcsa alakúak, belső felületükön koncentrikusan elhelyezkedő állandó mágneselemek találhatók.



3. ábra Egy állórész két forgórész között [18]

A stator vasmagjaként gyakran porvas vagy lágy mágneses kompozit (SMC) anyagot alkalmaznak, amely lehetővé teszi a bonyolult, szegmentált formák nagy pontosságú gyártását [16][18]. Az eredmény az, hogy az állórész vasmagjának tömege lényegesen alacsonyabb a hagyományos axiális motorokhoz képest (egyes források szerint akár ~50–80%-kal kevesebb), ami növeli a motor nyomatéksűrűségét [16][18][27].

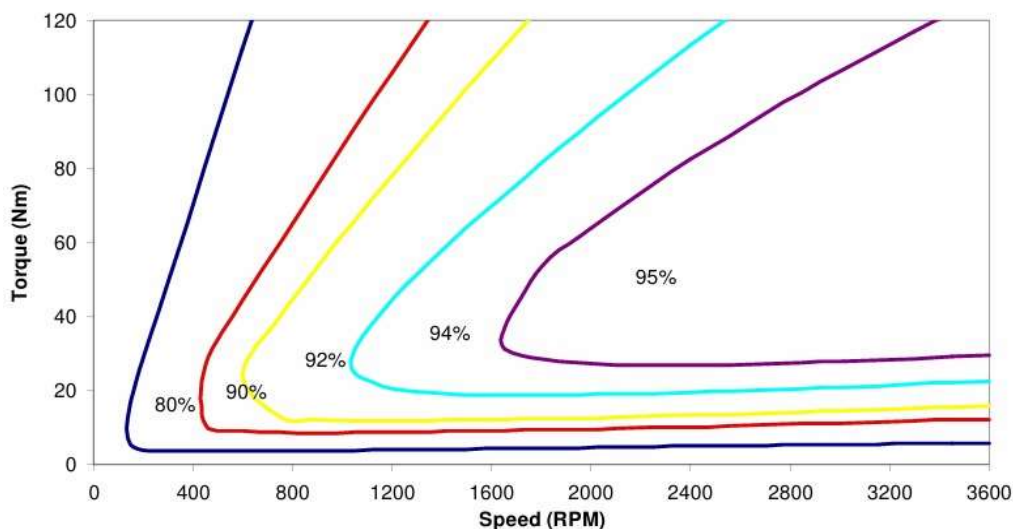
Előnyök:

Magas nyomatéksűrűség és teljesítménysűrűség: A YASA-topológia kiemelkedő nyomaték- és teljesítményműködést tesz lehetővé kis méret mellett. Például a Mercedes által alkalmazott YASA 750R motor csúcsteljesítménysűrűsége több mint 5 kW/kg, csúcnyomatéksűrűsége pedig 75 Nm/liter, a maximális hatásfoka pedig 95% fölött van [15].

2025 október 22.-én a YASA villanymotor újabb energiasűrűség rekordot állított fel. Ezúttal az előző modellnél 0,4 kg-al kisebb tömegű (12,7 kg) motorral sikerült 750 kW csúcsteljesítményt elérni, ami 59 kW/kg teljesítménysűrűséget jelent. A YASA becslése szerint az állandó teljesítmény ennek körülbelül az 50%-a [28]. Bár ez még nem sorozatértéktől, de nagyon jól szemlélteti a technológia fejlődését.

Az axiális kialakításból adódóan a rotor nagy átmérője miatt az elméleti forgatónyomaték adott fluxus és áram mellett jelentősen megnő, így a motor nagy sugárral rendelkező tengelytényező mellett képes nagy nyomatékot produkálni [17][18]. Emellett a stator tekercsei rövidebbek és kevesebb rézanyagot igényelnek, ami csökkenti az ohmos veszteséget [16][19].

Magas hatásfok: A vasanyag és rézhuzal csökkentett tömege, valamint a rövid mágneses útvonalak miatt az YASA motorok veszteségei alacsonyak. A vasalak hiánya és a koncentrált tekercselés hatékonyabb fluxusfelhasználást eredményez, ami magas üzemi hatásfokot tesz lehetővé [16]. Gyakorlati adatok szerint a YASA motorok hatásfoka (ideális körülmények között) elérheti az 95% feletti értékeket [15], ami a modern EV-motorok legjobb hatásfok-tartományába esik.



4. ábra Hatásfok tartományok [18]

Kompakt, könnyű szerkezet: Az YASA topológia tengelyirányú hossza (axial length) jelentősen kisebb, mint egy azonos teljesítményű radiális motornál, hiszen a motor lapos, „palacsinta” alakú. A stator vasfóliája drasztikusan lecsökkent (bizonyos adatok szerint akár ~50-80%-kal), így az állórész könnyebb, és a teljes motor tömege is csökken [13]. A gyártó szerint az axiál fluxusú konstrukció 2–3×-os teljesítménysűrűséget, valamint ~50%-kal kisebb térfogatot és tömeget

biztosíthat a radiális motorokhoz képest [27]. Ez kritikus előnyt jelent beépítési hely szűkössége esetén.

Hatékony hűtés: A YASA motorok fejlett folyadékhűtéses (jellemzően olajhűtéses) kialakítást használnak, amely közvetlen hőkapcsolatot biztosít a tekercsek és a hűtőközeg között [19]. A rövid, koncentrált tekercsek és a nagyfelületű rotor/stator felületek miatt a hővezetési útvonalak rövidek, ami növeli a tartós teljesítményt.

Hátrányok:

Nagy levegőrész és csökkent fluxusgyengítés: Az YASA kialakítás nagy átmérőjű forgórészei között a mágneses levegőrész is nagyobb, mint egy radiális motorban. Ennek következtében a tekercs-induktivitás alacsonyabb, és a motor kevésbé képes a mágneses tér mesterséges gyengítésére (flux-gyengítésre) nagy fordulatszám mellett [15]. Ez azt jelenti, hogy a motor sebességtartományának felső részén a teljesítménye gyorsabban csökkenhet, vagy magasabb áramot igényel az azonos teljesítményhez.

Gyártási és szerelési komplexitás: Az axiális fluxusú szerkezet hagyományosan nehezebben gyártható és szerelhető, mint a radiális megfelelője [14][22]. A szegmentált állórész és a lapos forgórészek összeszerelése komplex gyártástechnológiát igényel, különösen a pontos illesztések és a sokrétű mágnesek pozicionálása miatt. Emellett a hatékony hűtés kialakítása is kihívás, mert a tekercsek az állórész korongjai között, közel a forgórészekhez helyezkednek el. A YASA szakértői is megjegyzik, hogy az axiális motorok „hagyományosan nehezebben gyárthatók és hűthetők”, a cég egyik fő célja éppen ennek megváltoztatása [14][18].

Költség és anyagellátás: A YASA motorok ritkaföldfém mágneseket alkalmaznak, bár hatékonyabb fluxuskihasználásuk miatt egységnyi teljesítményre vetítve kevesebb mágnesanyagot igényelnek [18][27]. A ritkaföldfémek ára és elérhetősége azonban geopolitikai kockázatot jelenthet, amely befolyásolja a technológia költségszerkezetét.

5 YASA motorok elhelyezése elektromos hajtásokban

5.1 Hagyományos elhelyezés



5. ábra E-axle elrendezés [52]

A leggyakrabban használt villanymotor-elrendezés a belsőégésű motorokhoz hasonlóan egy úgynevezett bölcsőben elhelyezett villanymotorból és az ahhoz tartozó egyszerűsített reduktorból/differenciálműből áll (e-axle, transaxle). Ugyanez az elrendezés használatos első-, hátsó- és összkerék-hajtás esetében egyaránt. Ez az elrendezés jól illeszkedik a meglévő járműplatformokhoz, de elektromos hajtás esetén több szempontból kompromisszumos:

Helyigény és térfeszteség: Elsőkerék-hajtásnál a bölcső + motor + reduktor gyakran az egész motorteret elfoglalja, ami korlátozza az utastér és a gyűrődőzónák optimalizálását. Hátsókerék-hajtásnál a transaxle a csomagter rovására jelentkezik.

Mechanikai komplexitás és tömeg: A differenciálmű mechanikai komponensei (fogaskerekek, ház, csapágyak) jelentős tömeget képviselnek, és súrlódási veszteségeket okoznak. Ez csökkenti a teljes hajtáslánc hatásfokát és növeli a karbantartási igényt.

Torque vectoring korlátai: A nyomaték elosztása tengelyen belül tipikusan mechanikus differenciálművel, esetleg elektronikus differenciálzárakkal történik, amelyek reakcióideje és szabadságfoka korlátozott a tisztán villamos nyomatékszabályozáshoz képest.

A YASA motorok kompakt méretükből adódóan kis helyigénnyel rendelkeznek, ezért alkalmazásuk jelentős hasznos tér megtakarításával járhat. A jelenleg kereskedelmi forgalomban kapható legkisebb, autóiipari célra fejlesztett YASA villanymotor átmérője kb. 305 mm, mélysége pedig 100–110 mm tartományba esik, tömege ~24 kg nagyságrendű (YM360) [50]. Ez azt jelenti, hogy már egy hagyományos differenciálmű helyére is akár két YASA motor integrálása is lehetséges ugyanazon tengely mentén, amelyek a mechanikus differenciálmű funkcióját villamos nyomaték-megosztással helyettesítik és a hagyományos villanymotor által elfoglalt tér felszabadul.



6. ábra AFPM és RFPM [27]

Példa tengelyszintű elrendezésre:

Tengelyenként két, egymástól független YASA motor, amelyek külön-külön kapcsolódnak a jobb és bal oldali féltengelyhez (rövid áttétellel vagy közvetlen kapcsolattal). A mechanikus differenciálmű elhagyható, a torque vectoring funkciót a két motor független vezérlése biztosítja.

A két motor összteljesítménye pl. $2 \times 125 \text{ kW} = 250 \text{ kW}$, miközben tömege $2 \times 24 \text{ kg} = 48 \text{ kg}$ nagyságrendű. Összehasonlításképpen a Tesla Model 3 hátsó e-motor-egysége differenciálművel együtt ~80 kg, és ~220 kW csúcsteljesítményt biztosít [7][29].



Tesla model 3 drive unit (used)

Engine specifications (estimated):

- peak power 220 kW
- peak motor torque 400 Nm = 3600+ Nm at the wheels
- max 18,000 RPM
- Input voltage 200-400 VDC
- Weight 80 kg
- Dimensions approx. 676 x 554 x 353 mm

€ 1.990,00

Ex. VAT

2 in stock (can be backordered)

- 1 +

ADD TO CART

7. ábra Tesla Model 3 hajtómű [29]

Ezzel csökken a rendszer mechanikai komplexitása: nincs klasszikus differenciálmű, kevesebb fogaskerék.

Nő a szabályozhatóság: villamos úton finoman szabályozható a tengely jobb/bal oldali nyomatéka (direkt torque vectoring).

Javul a beépíthetőség: a lapos motorok kisebb térfogaton elférnek, a motortér és a csomagter szabadabban alakítható.

Mérnöki megfontolások hagyományos elhelyezés esetén:

A bölcső szerkezetét úgy kell méretezni, hogy két, nagy nyomatékot leadó motor reakciónyomatékát biztonságosan felvegye (fáradási vizsgálat, FEM).

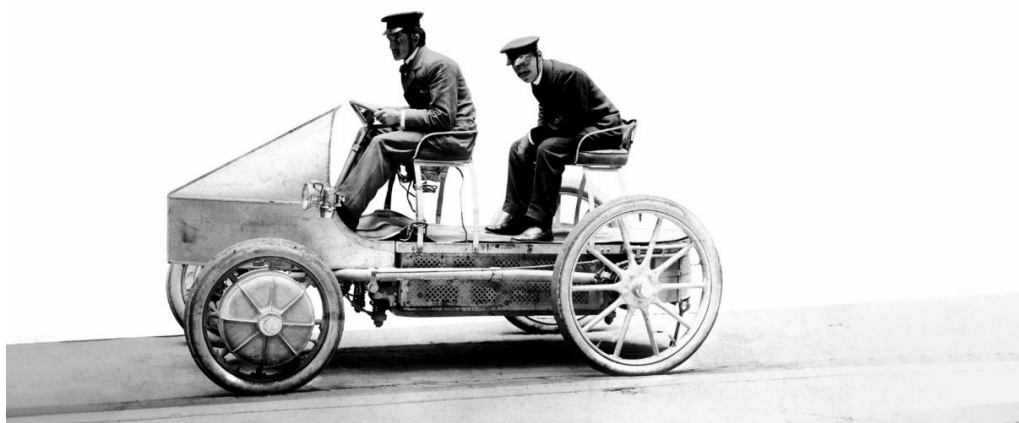
A két motor hajtásának szinkronizálását (nyomaték, fordulatszám) a vezérlőelektronika végzi, amelynek robusztus szabályozási algoritmusokra (pl. modellalapú nyomatékelosztás, hibadetektálás) van szüksége.

A hűtőkör kialakítható közös olajhurokkal, de a két motor termikus szimmetriáját biztosítani kell (áramkiosztás, hőmérséklet-felügyelet).

Ez az elrendezés jól mutatja, hogy a YASA motorok az e-axle architektúra helyettesítésében is komoly potenciállal bírnak.

5.2 Kerékagyba helyezett motorok (Motor to wheel)

Már az első automobillal egyidőben felmerült az elektromos kerékagymotorok (in-wheel motor) használatának ötlete, de a villamosenergia-tárolás kezdeti nehézségei miatt a belsőégésű motorral hajtott járművek vették át az uralmat. A 19–20. század fordulóján több kísérleti jármű is készült kerékagymotorral (pl. a Lohner-Porsche), azonban az akkumulátortechnológia alacsony energiasűrűsége miatt ezek a megoldások nem tudtak versenyképes alternatívát nyújtani [2][20].



8. Lohner-Porsche [53]

Napjainkban a helyzet megváltozott: az akkumulátorok energiasűrűsége nagyságrendekkel nőtt, az inverter- és vezérléstechnika kiforrott, így a kerékbe épített hajtás ismét reális opcióként merült fel. Ennek ellenére szériagyártású személyautókban az agymotoros hajtás még mindig ritka, inkább kísérleti járművekben, koncepcióautókban és speciális alkalmazásokban (pl. könnyű EV-k, napelemes demonstrátorok) találkozhatunk vele [15].

5.2.1 A kerékagymotoros hajtás műszaki előnyei

A kerékagyba épített villanymotor koncepciója több egyértelmű előnyt kínál elektromos járműben [15][21]:

Hajtáslánc-egyszerűsítés:

Nincs szükség hosszú kardántengelyre, központi differenciálműre, bonyolult mechanikus áttételekre. A nyomaték közvetlenül a keréken keletkezik, a mechanikai veszteségek minimálisra csökkenthetők.

Rugalmasság a járműarchitektúrában:

A központi hajtáselemek elhagyásával nagyobb szabadság nyílik az akkumulátorpakk és az utastér elrendezésére. Lehetőség nyílik teljesen sík padlós, moduláris platformok kialakítására.

Nyomatékvektor-szabályozás kerékszínten:

Mivel minden kerék önálló motorral rendelkezik, az egyes kerekek nyomatéka külön-külön szabályozható. Ez lehetővé teszi a torque vectoring megvalósítását, amely javítja a menetstabilitást, a kanyarodási tulajdonságokat és a tapadás kihasználását.

Regeneratív fékezés a keréknél:

A fékenergia-visszatáplálás közvetlenül a keréknél valósul meg, így csökkenthető a mechanikus fékek terhelése és kopása.

Ezek az előnyök papíron nagyon vonzóvá teszik az agymotoros hajtást, különösen városi EV-k és nagyfokú menetdinamikai szabadságot igénylő járművek esetén.

5.2.2 Az agymotoros hajtás eddigi fő korlátjai

A gyakorlati megvalósítás során azonban több, egymással összefüggő műszaki probléma lépett fel, amelyek évtizedekig akadályozták az áttörést [15][21]:

Rugózatlan tömeg növekedése

A kerékben elhelyezett motor a futómű rugózatlan tömegét jelentősen növeli. Ha egy 20–25 kg-os kerékhez hozzáadunk egy 20–30 kg-os agymotort, a rugózatlan tömeg akár duplájára nőhet.

Ez a következő negatív hatásokkal jár:

- rontja a menetkomfortot (a kerék nehezebben követi az útegyenetlenségeket),

- csökkentheti a tapadást rossz úton,
- szigorúbb igényeket támaszt a lengéscsillapítással és a futóműgeometriával szemben.

Hűtés és termikus terhelés

A kerékbe zárt motor hűtése nehezebb, mint egy karosszériába épített hajtómotoré. A kerékagyban korlátozott a tér folyadékhűtésre, a fékezésekből származó hőterhelés ráadásul ugyanebben a térben jelenik meg. A hőfűtés korlátozza a tartós teljesítményt, különösen nagy sebességű vagy emelkedős üzem esetén [15][19].

Környezeti igénybevétel és megbízhatóság

A kerék közvetlenül ki van téve:

- rezgéseknek, ütődéseknek (kátyúk, járdaszegély),
- szennyeződéseknek (por, víz, só),
- szélsőséges hőmérsékletváltozásoknak.

Az agymotornak e környezetben kell hosszú távon, nagy megbízhatósággal működni. A csapágyazás, a szigetelés és a tömítések minősége kulcskérdés, ami növeli a költségeket.

Gyártási és integrációs költségek

Az agymotor jelenleg speciális, viszonylag kis sorozatú termék. A motor + inverter + fék integrációja egyetlen kerékmodulba bonyolult, ami jelentős fejlesztési és gyártási költséggel jár [15]. A nagy autógyártók eddig elsősorban a központi e-axle koncepciót preferálták, mivel az jobban illeszthető meglévő platformjaikhoz, és a beszállítói lánc is ehhez alkalmazkodott.

Rendszerszintű kompromisszumok

A kerékagyban lévő motor baleset esetén sérülékenyebb lehet, egy defekt vagy felni-sérülés a motor sérülését is könnyedén maga után vonhatja. Emellett a kormányzott kerekekbe integrált motor bonyolíthatja a kormánymű és a fék elrendezését.

Ezek a tényezők magyarázzák, hogy az agymotoros hajtás miért nem terjedt el széles körben a nagy sorozatú személyautókban – mindeddig.

5.2.3 A YASA motor, mint lehetséges áttörési technológia

A YASA axiál fluxusú motorja több olyan tulajdonsággal rendelkezik, amely közvetlenül a fenti korlátokra ad választ:

Kiemelkedő teljesítménysűrűség → kisebb rugózatlan tömeg

Ha egy in-wheel motor fajlagos csúcsteljesítménye 2–5 kW/kg (jelenlegi fejlett radiál in-wheel motorok), akkor egy 50 kW-os agymotor tömege 10–25 kg.

Ezzel szemben, a jövőbeli skálázhatóságot feltételezve egy YASA-jellegű AFPM gép 10 kW/kg körüli sorozatértett fajlagos teljesítménysűrűséggel számolva (ez a jelenlegi csúcsmodell 16,95%-a), ugyanezt 5 kg körüli többlettömeggel tudná biztosítani. Viszonyításképpen az EMRAX 188 AFPM motor 60 kW-os csúcs- és 37 kW-os állandó teljesítmény mellett 7,1 kg tömeggel rendelkezik [51].

Konkrét példa (nagyságrendi összehasonlítás):

$4 \times 50 \text{ kW}$ hagyományos agymotor $\rightarrow 4 \times 20 \text{ kg} \approx 80 \text{ kg}$ plusz rugózatlan tömeg.

$4 \times 50 \text{ kW}$ YASA-topológiájú agymotor $\rightarrow 4 \times 5 \text{ kg} \approx 20 \text{ kg}$ plusz rugózatlan tömeg.

A különbség $\sim 60 \text{ kg}$, ami már menetdinamikai szempontból kritikus. Ez azt jelenti, hogy a futómű hangolásával (rugó, lengéscsillapító) a YASA-alapú agymotoros futómű a hagyományos megoldásokhoz hasonló komfort és úttartás mellett valósítható meg.

5.2.4 A rugózatlan tömeg hatásának numerikus és szimulációs vizsgálata

Negyedjármű-modell paraméterei (közepes méretű családi autó):

$$m_s = 400 \text{ [kg]},$$

$$m_u = 50 \text{ [kg]},$$

$$k_s = 30000 \text{ [N/m]},$$

$$k_t = 200000 \text{ [N/m]}.$$

A rugózatlan tömeg sajátfrekvenciája (lengéscsillapítás figyelmen kívül hagyásával):

$$f_u = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_s + k_t}{m_u}}. \quad (1)$$

Vizsgált esetek

Alapeset: $m_u = 50$ [kg]

Hagyományos agymotor: $m_u = 70$ [kg]

YASA agymotor (jövőbeli skálázhatóságot feltételezve): $m_u = 55$ [kg]

YASA jelenleg kapható agymotor ($P_{konstans} \approx 375$ [kW]): $m_u = 62,7$ [kg]

Eredmények:

$$f_{u,50} \approx 10.79 \text{ [Hz]}$$

$$f_{u,70} \approx 9.12 \text{ [Hz]}$$

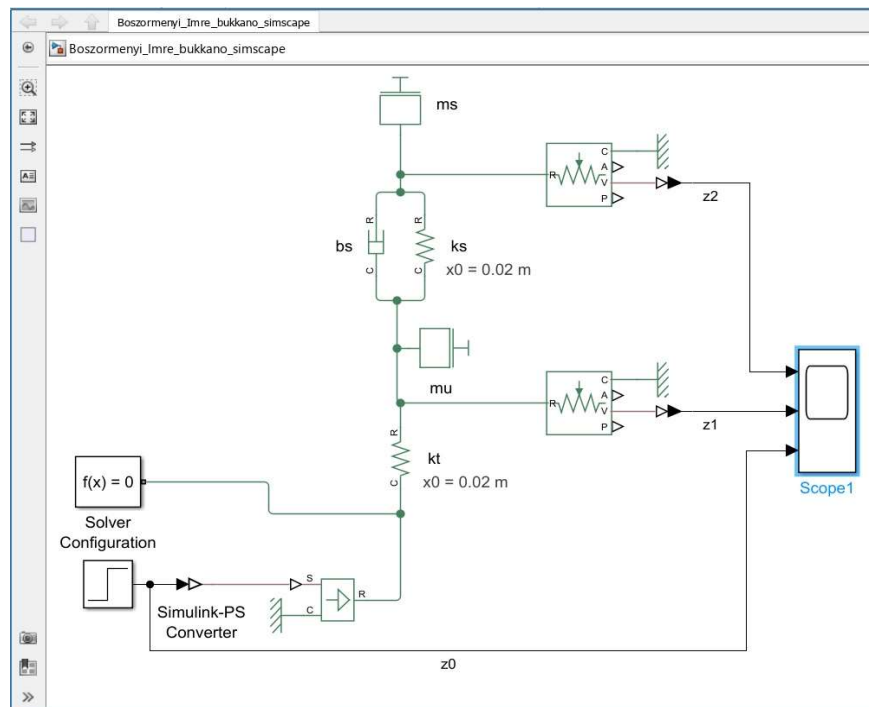
$$f_{u,55} \approx 10.29 \text{ [Hz]}$$

$$f_{u,62.7} \approx 9.64 \text{ [Hz]}$$

Az azonos teljesítményű YASA megoldás 4.63%-os csökkenést okoz, ami futóműhangolással könnyedén kompenzálható, szemben a hagyományos motoros megoldás 15.48%-os eltéréssel.

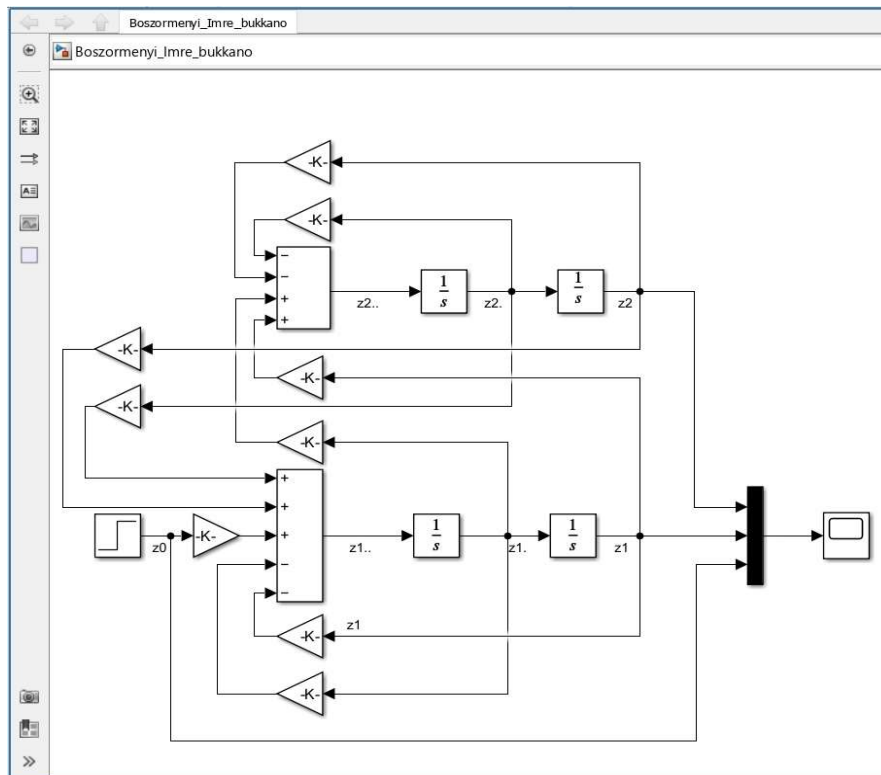
Simulink segítségével szimuláltam egy 5 cm magas szintkülönbséget a felfüggesztés elmozdulásának vizsgálata érdekében.

Negyedjáromű-modell sematikus ábra Simscape-ben:



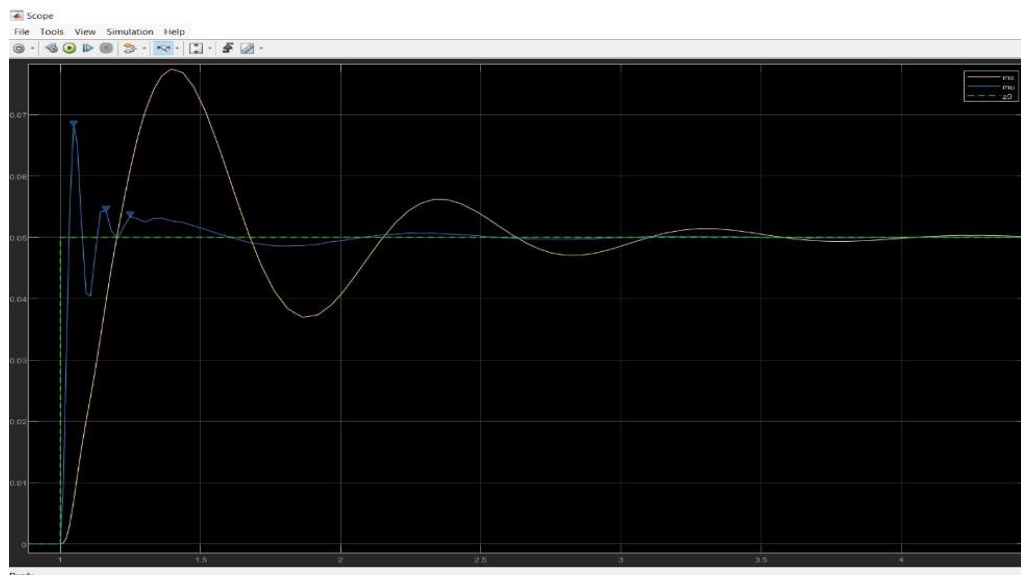
9. ábra. Negyedjáromű-modell sematikus ábra Simscape-ben

Negyedjáromű-modell Simulink-ben leprogramozva:



10. ábra. Negyedjáromű-modell Simulink-ben leprogramozva

Az alapeset ($m_u = 50$ [kg]) grafikonja:



11. ábra. $m_u = 50$ [kg]

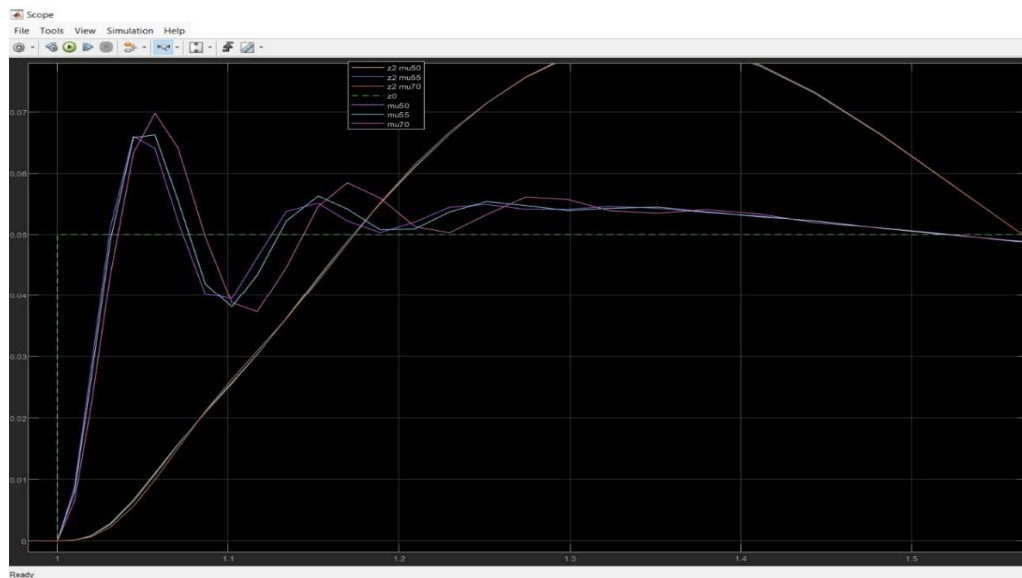
Ezután megvizsgáltam a rugózatlan tömeg (m_u) és a rugózott tömeg (m_s) elmozdulásának változását a rugózatlan tömeg növekedésével.

Három esetet vizsgáltam:

$$m_{u1} = 50 \text{ [kg]},$$

$$m_{u2} = 55 \text{ [kg]},$$

$$m_{u3} = 70 \text{ [kg]},$$



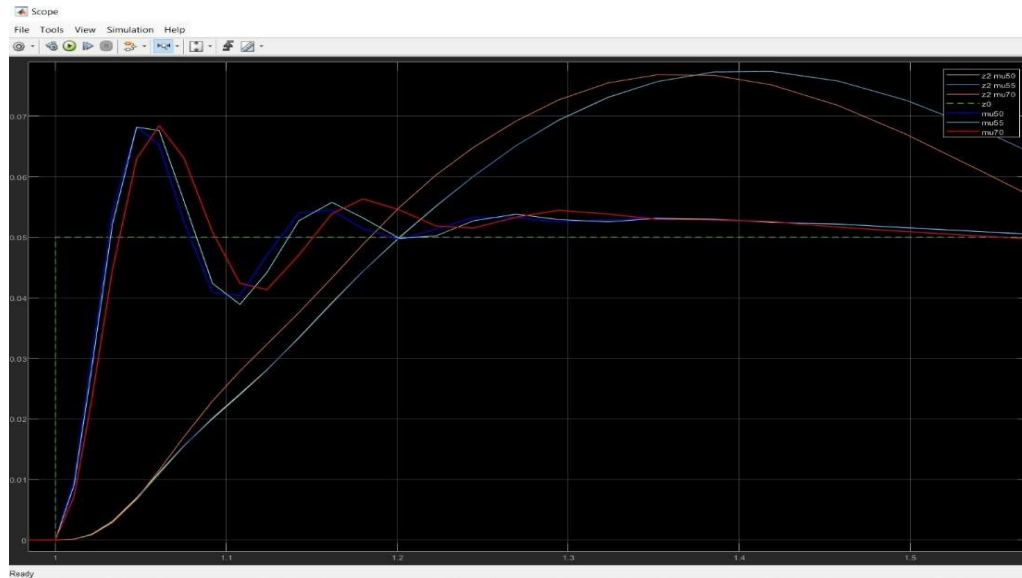
12. ábra. A három eset ugyanazon a grafikonon

A három eset ugyanazon a grafikonon történő ábrázolásával láthatjuk, hogy a rugózott tömeg (m_s) értékei fedik egymást, a változás elhanyagolható, tehát a menetkomfort nem, vagy csak minimális mértékben változik.

A rugózatlan tömeg elmozdulásának grafikonja viszont m_{u3} esetében mind amplitúdójában, mind hullámhosszában nagy mértékben változik, ami egyértelműen szemlélteti, hogy a kapcsolat az útburkolattal hosszabb időre szűnik meg, mint a másik két esetben. Ez a jármű úttartásában érezhető negatív változást okoz.

A rugóerő és a lengéscsillapítás 20%-os növelésével a rugózatlan tömeg kimozdulásának az amplitúdóját sikerült csökkentenem viszont a nagyobb rugózatlan tömeg nagyobb tehetlenségi erejéből adódóan a kezdeti kimozdulás hullámhossza nem csökkent.

A rugóerő és a lengéscsillapítás növelése a rugózott tömeg hullámhosszának csökkenését is okozta, ami pedig negatív hatással van a menetkomfortra.



13. ábra. A rugóerő és a lengéscsillapítás 20%-os növelése

5.2.5 Gyorsulási példaszámítás

Járműtömegek:

$$m_0 = 1800 \text{ [kg]},$$

$$m_1 = 1880 \text{ [kg]},$$

$$m_2 = 1820 \text{ [kg]}.$$

Összteljesítmény:

$$P = 200 \text{ [kW]} = 200000 \text{ [W]}$$

A teljesítménykorlátos gyorsulás:

$$a = \frac{P}{m \cdot v}. \quad (2)$$

100 km/h:

$$v = 27.778 \text{ [m/s]}.$$

Gyorsulási értékek

$$a_0 = 4 \text{ [m/s}^2\text{]},$$

$$a_1 = 3,83 \text{ [m/s}^2\text{]},$$

$$a_2 = 3,96 \text{ [m/s}^2\text{]}.$$

Az alapeset 0–100 km/h gyorsulása:

$$t_0 = \frac{\Delta v}{a} = \frac{27,778}{4} = 6,94 \text{ [s]}$$

Hagyományos agymotor esetén:

$$t_1 = \frac{\Delta v}{a} = \frac{27,778}{3,83} = 7,25 \text{ [s]}$$

YASA agymotor esetén:

$$t_2 = \frac{\Delta v}{a} = \frac{27,778}{3,96} = 7,01 \text{ [s]}$$

A YASA-motoros verzió szinte egyenértékű a központi motoros hajtással.

5.2.6 Energiafogyasztás és hatótáv becslése

Gördülési ellenállás aszfalton ($\mu_g = 0,012$):

$$F_g = \mu_g m g \tag{3}$$

A kétfajta agymotoros megoldás tömegkülönbsége:

$$\Delta m = 60 \text{ [kg]}.$$

100 km/h-nál:

$$\Delta P_g = \mu_g \Delta m g v$$

$$\Delta P_g = 0,012 * 60 * 9,81 * 27,778 \approx 0.196 \text{ [kW]}.$$

Energiakülönbség 100 km-en:

$$\Delta E_g \approx 0.196 \text{ [kWh/100 km]}.$$

Városi gyorsítások

Kinetikus energia:

$$\Delta E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \Delta m v^2. \quad (4)$$

0–50 km/h: $\Delta E_{\text{kin}} \approx 5787 \text{ J/gyorsítás} \approx 1.6 \text{ Wh/gyorsítás}$.

300 gyorsítás / 100 km:

$$\Delta E_{\text{city}} \approx 0.48 \text{ [kWh/100 km]}.$$

Hatótávkülönbség 300 gyorsítás / 100 km mellett (60 kWh akkumulátor)

Hagyományos agymotor becsült városi fogyasztása:

$$18 \text{ kWh/100 km} \Rightarrow 333 \text{ [km]}$$

YASA agymotorral:

$$17.52 \text{ kWh/100 km} \Rightarrow 342,25 \text{ [km]}$$

kb. 9 km hatótáv-előny YASA motorral.

5.2.7 Az agymotoros hajtás, mint tömegsemleges alternatíva

További rugózatlan tömeg megspórolásához a hagyományos hajtáslánc elemeit kell megvizsgálnunk. A regeneratív fékezés lehetővé teszi az üzemi fék méreteinek csökkentését mivel teljesítménytől függően a fékenergiát akár teljes mértékben képes elnyelni a villanymotor.

Ennek a számszerű vizsgálatához egy 3500kg megengedett legnagyobb össztömegű személygépkocsi 200 km/h-ról történő vészfékezését veszem alapul.

$$m = 3500 \text{ [kg]}$$

$$v = 55.56 \text{ [m/s]}$$

$$a = 8 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

A kerék sugara (265/35 R22):

$$r = 0,37 \text{ [m]}$$

A $8 \text{ [m/s}^2\text{]}$ -os maximális lassuláshoz szükséges erő:

$$F = m a \quad (5)$$

$$F = 3500 * 8 = 28000 \text{ [N]}$$

Arányosítva az első és hátsó tengely közötti 60-40%-os fékerőelosztás egy kerékre kiszámítva:

$$F_e = \frac{28000 * 0,6}{2} = 8400 \text{ [N]}$$

$$F_h = \frac{28000 * 0,4}{2} = 5600 \text{ [N]}$$

A maximális lassuláshoz szükséges forgatónyomaték kerekenként:

$$T = F r \quad (6)$$

$$T_e = 8400 * 0,37 = 3108 \text{ [Nm]}$$

$$T_h = 5600 * 0,37 = 2072 \text{ [Nm]}$$

A maximális lassuláshoz szükséges legnagyobb teljesítmény kerekenként:

$$P_e = F_e v \quad (7)$$

$$P_e = 8400 * 55,56 = 466704 \text{ [W]} = 466,7 \text{ [kW]}$$

$$P_h = F_h v \quad (8)$$

$$P_h = 5600 * 55,56 = 311136 \text{ [W]} = 311,14 \text{ [kW]}$$

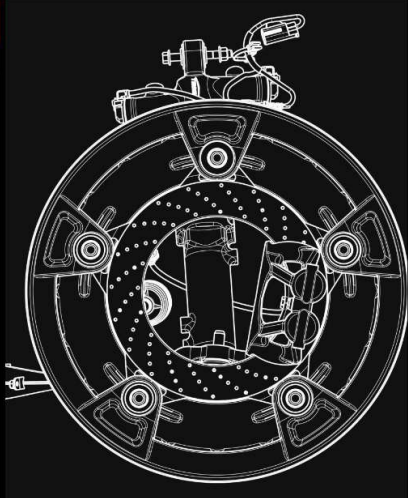
Az s-Drive YASA topológiájú villanymotorra épülő innovatív megoldása csak a villanymotor teljesítményével nem képes kezelni egy ekkora tömegű személygépkocsi vészfékezését 200 km/h sebességről, viszont a fék megtartásával a rendszer fék teljesítménye bőségesen elegendő a feladat ellátásához.

A motor és a fék a felnibe történő integrálásával és ezek méreteinek optimalizálásával sikerült a rugózatlan tömeget 50 kg alá csökkenteniük, ami már felveszi a versenyt a hagyományos hajtáslánc menetdinamikai tulajdonságaival.



14. ábra s-DRIVE in wheel motor [55]

s-DRIVE		
Parameter	Standard	Performance
Wheel Size	Above 19"	Above 19"
Peak Power	150 kW	250 kW
Continuous Power	70 kW	120 kW
Torque	500 Nm	800 Nm
Cooling	Air-cooled	Liquid-cooled
Top Speed - RPM	Up to 2000 RPM	Up to 3500 RPM
Ground Speed 19" wheel	~250 km/h	~440 km/h
Unsprung Weight: (motor + brake + wheel + tire)	~55 kg	~45 kg
Power/Weight kW/kg (Full Drivetrain)	2.5 (Peak)	5.5 (Peak)
Dynamic Load	2700kg	2700kg
Wheel	Aluminium	Carbon Fiber
Brakes	Standard (Iron)	Carbon Ceramic



15. ábra s-DRIVE products [55]

Ezzel szemben a YASA saját fejlesztésű agymotor koncepciója elegendő teljesítménnyel rendelkezik a hagyományos fékrendszer teljes mértékű kiváltásához.

Az alapjául szolgáló 12,7 kg tömegű motor egy 5,5 kg tömegű bolygóműves áttételezéssel (6,2:1) és integrált kerékcsapággal együtt alkot egy egységet.



16. ábra YASA in wheel motor [54]

A motor maximális teljesítménye 750 kW, ami önmagában is elegendő mind az első kerék (466,7 kW), mind a hátsó kerék (311,14 kW) vészfékezésére.

A maximális nyomatékot még nem hozták nyilvánosságra, de a fordulatszám tartomány (0-14000 [1/m]) és az AFPM motorok jelleggörbéjének

ismeretében (maximális teljesítmény a fordulatszám tartomány 2/3-a környékén jelentkezik) megközelítő becslést tudunk végezni.

$$P = T \times \omega \quad (9)$$

Amennyiben a maximális teljesítmény $n = 10000$ [1/min]-nél jelentkezik:

$$\omega = n \frac{2\pi}{60} = 1047 [\text{rad/s}] \quad (10)$$

$$T = \frac{P}{1047} = 716,2 [\text{Nm}]$$



17. ábra YASA motor és bolygómű [54]

A bolygómű 6,2:1 áttételezését számításba véve, a kerékre gyakorolt maximális nyomaték:

$$T_k = 716,2 * 6,2 = 4440,44 [\text{Nm}]$$

Ez az érték a becslés pontatlanságait figyelembe véve is bőséges biztonsági tartalékot feltételez mind az első kerék ($T_e = 3108$ [Nm]), mind a hátsó kerék ($T_h = 2072$ [Nm]) esetében.

Összegzés – YASA motorok előnyei kerékagymotoros elrendezésnél

Lapos, nagy átmérőjű kialakítás → optimális kerékbe építhetőség

A YASA motor „palacsinta” alakja, nagy átmérője és kis axiális hossza jól illeszkedik a kerék felépítéséhez. A kerékagy és a felni közötti térben egy axiál motor geometriája jobban kihasználja a rendelkezésre álló sugarat, mint egy hengeres rádiálmotor, így áttétel nélkül is nagy keréknyomaték érhető el [17][18].

Fejlett folyadékhűtés → nagyobb tartós teljesítmény

A YASA motorok olajhűtéses kialakítása lehetővé teszi, hogy a tekercsek és a vasmag hőmérséklete üzemszerűen alacsonyan maradjon [19]. Ez különösen fontos agymotoros alkalmazásban, ahol a féktárcsa hőterhelése is a keréktérben jelentkezik. A folyadékhűtés a kerékagycsapágyon átvezetett forgó tömítésekkel és csőcsatlakozásokkal megoldható, bár kétségtelenül összetett feladat.

Integrálhatóság kerékmodulba

A YASA-motor kompakt mérete miatt egy „kerékmodul” létrehozása is lehetséges, amely magában foglalja:

- az agymotort (YASA AFPM),
- a fékrendszert (tárcsa + féknyereg),
- a kerékagycsapágyat,
- a keréksebesség-szenzorokat és
- adott esetben a teljesítményelektronikát (inverter) is.

Ez a moduláris koncepció jól illeszthető különböző járműplatformokhoz; a gyártó a modulból „kész” hajtott kereket vásárolhat.

Összefoglalva: a YASA technológia az agymotoros hajtás kritikus gyenge pontjára, a nagy rugózatlan tömegre és a korlátozott térre kínál műszaki megoldást a magas teljesítménysűrűség és lapos kialakítás révén. Ha az ipari validáció és a költségszint is kedvező irányba mozdul, reális esély van rá, hogy a jelenleg inkább csak demonstrációs jellegű kerékagymotoros hajtások egy része sorozatgyártású megoldássá váljon YASA-típusú motorokra építve [15][27][28].

6 YASA motorok elhelyezése hibrid hajtásokban

A hibrid elektromos járművek (HEV – Hybrid Electric Vehicle) hajtásláncának tervezésekor az egyik legfontosabb döntés, hogy a villamos gép(ek) hol és milyen funkcióval kerül(nek) beépítésre a hajtásláncba. A villamos gép elhelyezése meghatározza a rendszer hatásfokát, költségét, bonyolultságát, valamint a jármű vezetési élményét és emissziós jellemzőit.

A hagyományos radiál fluxusú villanymotorokhoz képest a YASA-topológiájú axiális fluxusú gépek kompakt, lapos kialakítása és nagy nyomaték és teljesítménysűrűsége különösen alkalmassá teszi őket hibrid hajtásokba történő integrációra, ahol a rendelkezésre álló beépítési tér általában szűk, a kívánt teljesítményszint viszont nagy.

A YASA által fejlesztett axiál fluxusú állandómágneses szinkron gépek jelenleg elsősorban a legfelső teljesítmény-kategóriában, az ún. hypercar szegmensben kerülnek sorozatgyártásban alkalmazásra. A technológia tipikus bevezetési útja jól látható: a nagy fajlagos teljesítményű, költséges, új konstrukciók először kisméretű, presztízsértékű szériákban jelennek meg, ahol a költség másodlagos, a nagy teljesítmény, kis tömeg és a minimális kompromisszum viszont kulcskövetelmény.

A motorok „tárcsa” kialakítása lehetővé teszi, hogy:

- a belsőégésű motor és a hajtómű közé,
- a főtengetyre motor-generátor egységként, vagy
- egy teljes első/hátsó e-axle egység részeként
- legyenek integrálhatók, anélkül, hogy jelentős tengelyirányú beépítési helyet igényelnének.

A következőkben három kiemelt hypercar-családot tekintünk át:

- Koenigsegg Regera – a YASA technológia egyik első, extrém teljesítményű alkalmazása;
- Ferrari SF90 Stradale és 296 GTB – Ferrari plug-in hibrid architektúrák;
- Lamborghini Revuelto és Temerario – YASA-alapú első e-axle megoldások.

6.1 Koenigsegg Regera – három YASA motoros hibrid

A Koenigsegg Regera egy limitált példányszámú, plug-in hibrid, amelynél a belsőégésű és villamos hajtásrendszer szoros integrációja különleges architektúrát eredményez (Koenigsegg Direct Drive, KDD) [55]. A hajtáslánc fő elemei:

- 5,0 literes, ikerturbós V8 belsőégésű motor (~1100 LE),
- három YASA állandómágneses axiálfluxusú gép:
- egy YASA 400 motor-generátor egység a V8 főtengetyén (start, generátor, torque-fill),
- két YASA 750 közvetlen hajtású villanymotor, közvetlenül a hátsó kerekekhez kapcsolva.

A két YASA 750 villanymotor összesen több száz kW villamos teljesítményt és mintegy 1600 Nm nagyságrendű össznyomatékot biztosít a hátsó tengelyen, míg a főtengetyre kapcsolt YASA 400 motor a nyomatékrés-kitöltést és az energia-visszatáplálást látja el [55].

A Regera teljes rendszerteljesítménye meghaladja az 1500 LE-t, miközben a jármű száraz tömege ~1,5 t tartományban marad, ami a fajlagos teljesítményt tekintve extrém érték [41].

A YASA motorok alkalmazásának fő előnyei itt:

- többfunkciós villamos gépek (MGU, hajtó motorok) egyetlen technológiai platformon,
- egyfokozatú, nagy hatásfokú direkt hajtás a hátsó kerekekhez, hagyományos, többlépcsős váltó nélkül,
- alacsony tömeg a villamos oldalon, ami lehetővé teszi, hogy a jármű össztömege a kategóriában kedvező maradjon.

A Regera jó példa arra, hogy a YASA motorok extrém teljesítményszint mellett is lehetővé teszik a mechanikai egyszerűsítést (nincs hagyományos váltó), minimális kompromisszummal a vezethetőség és komfort terén.

6.2 Ferrari SF90 Stradale – első Ferrari PHEV YASA motorral

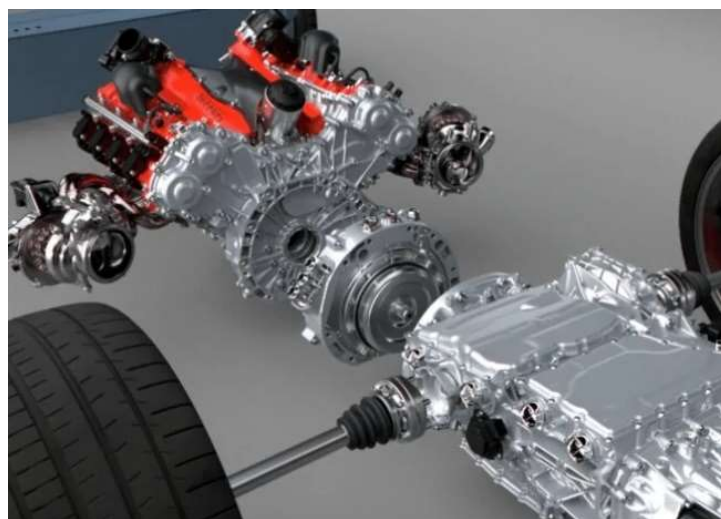
A Ferrari SF90 Stradale a gyártó első szériagyártású plug-in hibrid modellje, összesen ~1000 LE rendszerteljesítménnyel [56]. A hajtáslánc főbb elemei:

- 4,0 literes V8 turbómotor, kb. 780 LE,
- három villanymotor, ezek közül
- egy YASA axiál fluxusú motor a V8 és a nyolcfokozatú DCT közé integrálva,
- két további villanymotor az első tengelyen, egyenkénti hajtással (e-AWD, torque vectoring).

A YASA motor itt kulcsszerepet játszik:

- nagy nyomatékot biztosít alacsony fordulatszámon,
- lehetővé teszi a tiszta villamos üzemet és a „torque-fill” funkciót,
- vékony, tárcsaszerű kialakításával minimális mértékben növeli a hajtáslánc tengelyirányú méretét [56].

A Ferrari és a YASA közös kommunikációja szerint az SF90-ben alkalmazott egyedi axiálfluxusú motor ~14 kW/kg nagyságrendű teljesítménysűrűséget ér el, ami lehetővé teszi, hogy a teljes járműtömeg a kategóriában versenyképes maradjon, miközben a rendszerteljesítmény eléri az 1000 LE-t [56].



18. ábra YASA a motor és a váltó között [56]

6.3 Ferrari 296 GTB – kompakt PHEV architektúra YASA MGU-K-val

A Ferrari 296 GTB a gyártó második, YASA motorra épülő szériamodellje, amelynél egy 120° hengersizű, 3,0 literes, ikerturbós V6 motort kapcsoltak össze egy plug-in hibrid rendszerrel [57].

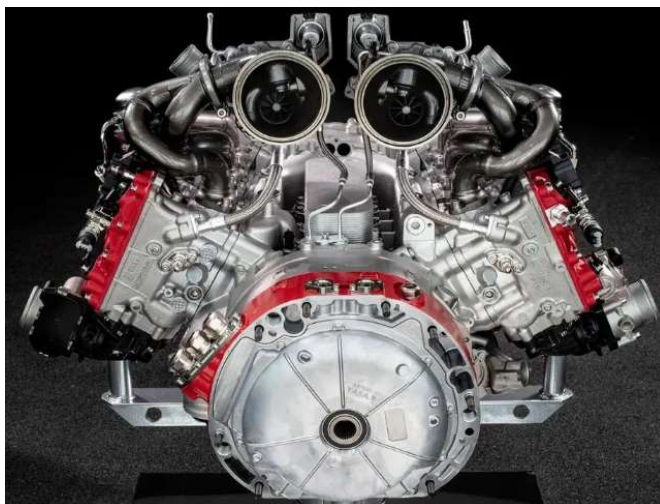
A hajtáslánc elemei:

- 120° V6 belsőégésű motor (~488 kW),
- egy YASA MGU-K típusú, axiál fluxusú villanymotor a motor és a 8 fokozatú DCT közé integrálva (P2),
- kb. 7,5 kWh kapacitású HV akkumulátor,
- hátsókerék-hajtású PHEV architektúra ~830 LE rendszerteljesítménnyel.
- A villamos gép teljesítménye ~120 kW nagyságrendű, kompakt, kettős rotor–egyszeres állórész felépítéssel [57].

Ez a megoldás:

- biztosítja a városi környezetben szükséges tiszta villamos üzemet,
- jelentős nyomatékrásegítést nyújt a V6 számára,
- mindezt úgy, hogy az egész hajtáslánc beépítési hossza csak csekély mértékben nő a tisztán belsőégésű konfigurációhoz képest.

A 296 GTB jól mutatja, hogy a YASA technológia nem csak „csúcshypercarokban”, hanem „kompaktabb” sportkupékban is életképes, miközben a teljesítmény/fogyasztás arány kedvező marad, és a vezetési élmény gyakorlatilag kompromisszummentes [57].



19. ábra YASA a 296 GTB-ben [57]

6.4 Lamborghini Revuelto és Temerario – YASA alapú első e-axle

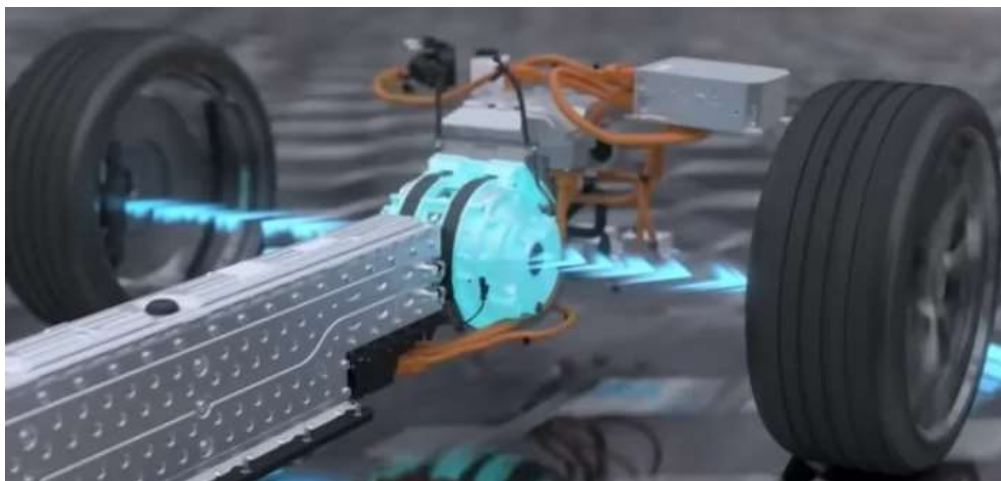
A Lamborghini a YASA-val együttműködésben fejlesztette ki legújabb, nagy teljesítményű hibrid modelljeinek első villamos tengelyét.

A Lamborghini Revuelto egy V12 plug-in hibrid hypercar, kb. 1015 LE rendszerteljesítménnyel. A hátsó tengelyt egy V12 szívómotor és egy villamos gép, az első tengelyt pedig két YASA axiálfluxusú motor hajtja, kerekekhez rendelt, torque vectoring képességgel. Egy-egy első motor csúcsteljesítménye 150 LE feletti, csúcnyomatéka ~300 Nm, miközben a motor tömege ~17 kg nagyságrendű, külső átmérője ~295 mm, vastagsága ~70 mm [43].

A Lamborghini Temerario a gyártó új V8-as, ikerturbós hibrid modellje, amelynél szintén három YASA axiálfluxusú motor dolgozik: kettő az első e-axle egységben, egy pedig hátul, a V8-cal integrálva. Az első motorok ~110 kW csúcsteljesítményűek, ~300 Nm maximális nyomatékkal, 10 000 1/min névleges fordulatszámig [44].

Mindkét esetben a YASA e-axle megoldás fő előnyei:

- nagyon kompakt első villamostengely, amely nem igényel hagyományos, nagyméretű differenciálművet,
- független kerékhatás és nyomatékvektorálás, amely jelentősen javítja a kanyardinamizmust és a tapadást,
- alacsony rugózatlan tömegre optimalizált motor-geometria (kis axiális méret, kedvező tömeg), ami fontos a futómű- és menetdinamika szempontjából.



20. ábra YASA twin motor front drive e-axle unit [43]

6.5 A YASA-alapú hibrid hypercar-ok fő előnyei

A fenti példák alapján a YASA axiál fluxusú motorok hypercar-alkalmazásainak főbb előnyei az alábbi pontokban foglalhatók össze:

Nagy teljesítménysűrűség, kis tömeg

A YASA motorok a gyártó közlése szerint a hagyományos radiálfluxusú gépekhez képest akár többszörös teljesítmény- és nyomatéksűrűséget érnek el.[28].

A legújabb prototípusok 40–60 kW/kg nagyságrendű csúcsteljesítmény/tömeg arányt érnek el, mindössze ~13 kg motor-tömeg mellett, ami jelenleg ipari rekordnak számít.

Hypercar környezetben ez azt jelenti, hogy a teljes hibrid rendszer (motorok, inverterek, akkumulátor) mellett is tartható egy viszonylag alacsony járműtömeg, ami a menetdinamika és a fékteljesítmény szempontjából kritikus.

Beépíthetőség és minimális kompromisszum

A „lapos”, tárcsaszzerű felépítés lehetővé teszi, hogy a villamos gép a belsőégésű motor és a váltó közé (Ferrari SF90, 296 GTB), a főtengelyre (Regera), vagy nagyon kompakt első e-axle egységbe (Revuelto, Temerario) integrálható legyen. Ennek eredményeként a karosszéria, az utastér és a csomagter csak minimális mértékben szorul áttervezésre, ami különösen fontos, ha meglévő platform villamosításáról van szó.

Funkcionális sokoldalúság (MGU, e-axle, torque vectoring)

A YASA motor használható MGU-ként (crankshaft motor-generátor – Koenigsegg Regera), P2 motor-váltó egységként (Ferrari 296, SF90), vagy teljes e-axle modulként (Lamborghini Revuelto/Temerario) [45].

A többmotoros konfigurációk lehetővé teszik a kerékenkénti nyomatékszabályozást, ami versenypályán jelentősen növeli a kanyarsebességet és a stabilitást.

Magas hatásfok és versenypálya-alkalmasság

A magas hatásfokú axiálfluxusú PMSM gépek kisebb hőveszteséggel dolgoznak, ami kedvez a tartós pályaterhelésnek.

A Mercedes–AMG GT XX koncepció autó 40075 km-en és több mint 7 napon keresztül tartó folyamatos tesztje azt bizonyítja, hogy a technológia hosszú ideig képes fenntartani a közel csúcsteljesítményt megfelelő hűtés mellett [46].

A technológia elterjedése és jövőbeli skálázási potenciál

A YASA motorok jelenleg főként Ferrari, Lamborghini, Koenigsegg és más exkluzív gyártók hibrid super-/hypercarjaiban jelennek meg, de a Mercedes-csoporton belüli integrációval a technológia középtávon nagyobb darabszámú, szélesebb piaci szegmensekben is megjelenhet.

6.8 Hypercar alkalmazások, mint tesztpad és verseny cél

A dolgozat szempontjából a fenti járművek referencia- és tesztalkalmazásként értelmezhetők:

A hypercar-szegmensben a cél elsődlegesen a maximális rendszerteljesítmény és vezethetőség, miközben a tömegnövekedést és a beépítési kompromisszumokat minimálisra kell csökkenteni.

A bemutatott példák alapján reálisnak tekinthető 800–1000+ LE rendszerteljesítmény olyan hajtáslánc-architektúrával, ahol a villanymotor(ok) fajlagos teljesítménye legalább 10–15 kW/kg, a teljes járműtömeg pedig ~1,5 t nagyságrendben tartható.

Mindez összhangban van azzal az iparági trenddel, hogy az új villamos hajtástechnológiák először verseny- és hypercar környezetben jelennek meg, ahol a költség kevésbé, a teljesítmény és innováció viszont elsődleges, majd innen „szivárognak le” a nagyobb darabszámú járműszegmensek felé.



21. ábra Mercedes Concept AMG GT XX [58]

7 Belsőégésű motorok kiváltása YASA motorokkal (Restomod)

A restomod (restoration + modernization) olyan járműátalakítási koncepció, amelynek célja klasszikus gépjárművek restaurálása korszerű hajtás- és járműtechnikai rendszerek integrálásával. A villamosított restomod ezen koncepció speciális esete, amelyben a hagyományos belsőégésű motoros hajtásrendszert teljesen vagy részlegesen elektromos hajtás váltja ki, miközben a jármű karaktere, vizuális megjelenése és – lehetőség szerint – a vezetési élmény „klasszikus” jelleggel megőrződik.

Villamos restomod projektek esetén a cél általában nem csupán a lokális emisszió megszüntetése vagy a jármű teljesítményének növelése, hanem az, hogy a jármű kezelhetősége és visszajelzései az eredeti, analóg érzethez közelítsenek. Ide tartozik például a kézi sebességváltó (vagy annak érzetét utánozó vezérlési logika) megtartása, a kormányzás és fékrendszer túlzott elektronizáltságának elkerülése, valamint a jármű tömegének, tömegeloszlásának és menetdinamikai karakterének a gyári állapothoz közeli reprodukciója [30][31].

Mérnöki szempontból ez komplex tervezési feladat, mivel a belsőégésű motor, a sebességváltó és az üzemanyagrendszer eltávolításával gyakorlatilag a teljes hajtáslánc cserére kerül, miközben a karosszéria, a futómű és a fékrendszer általában csak korlátozott mértékben módosítható. A YASA típusú axiálfluxusú villamos gépek ebben a kontextusban azért kapnak kiemelt szerepet, mert magas teljesítménysűrűséggel, csekély tömeggel és kompakt, „lapos” geometriai kialakítással rendelkeznek, így olyan projektekhez különösen kedvezőek, ahol a beépítési tér, a tömeg és a tömegeloszlás kritikus tervezési paraméterek.

7.1 Porsche 912E/911 restomod – referenciaalkalmazás YASA motorral

A restomod-villamosítás egyik releváns referenciaalkalmazása Bazsó Gábor (Karotta) nevéhez köthető, '70-es évekbeli Porsche 912E („Gréta”) projektje, amelyben egy eredetileg 2,0 literes, kb. 86 LE teljesítményű, léghűtéses, hátsó boxermotoros klasszikus Porsche került teljesen elektromos hajtásra átépítésre [30].



22. ábra 912E és i3 akkupakk [30]

A projekt főbb műszaki jellemzői az alábbiak:

Az eredeti léghűtéses boxermotort egy axiálfluxusú, állandó mágneses gerjesztésű villamos motor váltotta ki, amely közvetlenül a gyári, 5 fokozatú kézi sebességváltó kuplungházához csatlakozik.

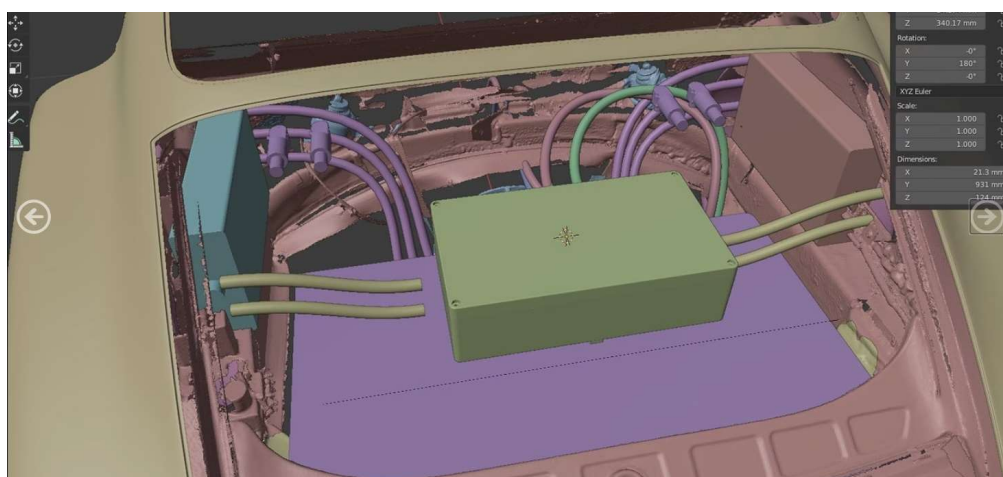
A motor tömege mindössze $\approx 22,3$ kg, miközben kb. 210 kW csúcsteljesítményt és ~ 500 Nm csúcsnyomatékot biztosít, amely már meghaladja a korabeli 911 Turbo benzinmotoros kivitel teljesítményét [30][59].



23. ábra EMRAX 268 [59]

A gyári 5 fokozatú kézi váltó és a hátsó differenciálmű változatlanul megmaradt. A vezető továbbra is használja a kuplungot és a váltókart, így a sebességfokozatváltás és a motorfék-érzet tekintetében a klasszikus vezetési élmény nagyrészt megőrződik [30].

A 42,2 kWh kapacitású akkumulátorcsomag két részre osztva került integrálásra: egyik modul az első csomagterben, másik a hátsó motortérben helyezkedik el, megközelítőleg 148–148 kg tömegaránnyal [30].



24. ábra Motortér szimuláció (a motor az akkupakk és inverter mögött) [59]

A beépítés eredményei az alábbiakban foglalhatók össze:

A jármű saját tömege ≈ 1204 kg, ami mindössze mintegy 100–120 kg növekményt jelent az eredeti 912E gyári tömegéhez (≈ 1080 –1100 kg) viszonyítva.

A tengelyterhelés eloszlása kb. 40:60% (első:hátsó tengely), amely gyakorlatilag megegyezik a gyári értékkel, így a hátsó motoros, farnehéz karakterisztika lényegében változatlanul megmarad [30].

A kompakt és kis tömegű EMRAX 268 motor alkalmazása miatt a hajtáslánc tömegének növekedése minimális, a tömegtöbblet döntő hányadát az akkumulátorpakk képviseli.

Az alkalmazás szemléletesen demonstrálja, hogy egy nagy teljesítményű, ám extrém kompakt axiálfluxusú villamos géppel a restomod projekt képes:

a korabeli vezérlési koncepció (kézi váltó, analóg pedálérzet) megtartására,

az eredeti súlyeloszlás közel pontos reprodukálására,

ezzel párhuzamosan a gyári állapotot jelentősen meghaladó teljesítményszint elérésére.

A projekt szakmai tanulsága, hogy egy villamosított klasszikus sportautó képes a belsőégésű hajtású járművekhez hasonló szubjektív élményt nyújtani, amennyiben a hajtáslánc, a tömegeloszlás és a kezelhetőség megfelelően megtervezett. Ebben a koncepcióban az axiál fluxusú motor kulcsfontosságú komponens [30].

7.2 Hátsókerék-hajtású platformok

Hátsókerék-hajtású (RWD) platformok villamosítása YASA motorokkal különösen ígéretes irány, mivel a klasszikus frontmotoros-hátsókerék-hajtású elrendezés (pl. BMW 3-as sorozat E30/E36/E46, Mazda MX-5) jól kombinálható nagy nyomatéksűrűségű, kis beépítési térigényű villamos motorokkal. Restomod cél esetén a tervezési prioritás, hogy a jármű viselkedése – így a súlyeloszlás, a kormányzási karakter és a hátsó tengelyen jelentkező, vezetési élmény szempontjából kedvező túlkormányozhatóság – a lehető legnagyobb mértékben megőrződjön.

Két fő hajtáslánc-koncepció különíthető el:

a) Egy motoros megoldás – YASA motor a belsőégésű motor helyén

Ebben a konfigurációban:

a belsőégésű motor helyére egy YASA villanymotor kerül,

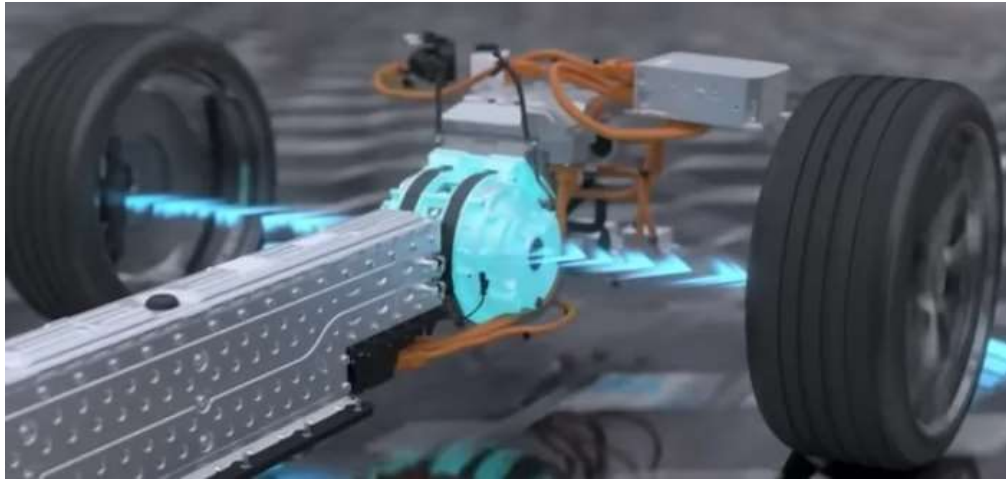
a kardántengely és a hátsó differenciálmű változatlanul megmarad,

a sebességváltó vagy szintén megmarad (klasszikus „shifter-élmény” megtartása), vagy fix áttételű reduktor egység váltja fel.

Ez a megoldás a hátsó híd szerkezeti kialakítását nem érinti, a gyári futóműgeometria megtartható. Hátránya, hogy a hajtáslánc egyes veszteségforrásai (sebességváltó + differenciálmű) megmaradnak, és a villamos torque vectoring nem valósítható meg.

b) Kétmotoros megoldás – a differenciálmű kiváltása két YASA motorral

A modernebb megközelítés szerint a hátsó tengelyen a mechanikus differenciálművet két, egymástól függetlenül vezérelt YASA motor helyettesíti, egy-egy motor csatlakozik a bal és a jobb féltengelyhez. Ez lényegében egy „elektromos differenciálmű”, azaz villamos úton megvalósított torque vectoring rendszer.



25. ábra YASA twin motor drive e-axle unit [43]

Fő műszaki jellemzők:

A gyári differenciálmű elhagyható, helyére a két YASA motor rögzíthető két jól megtervezett konzollal.

A féltengelyek közvetlenül, vagy rövid fix áttételű (esetleg bolygóműves) reduktoron keresztül csatlakoznak a motorok kimenő tengelyeihez.



26. ábra BMW E36 hátsó bölcső differenciálmű nélkül (saját, bontott alkatrész)



27. ábra Két EMRAX 228 méretű motor fogadására alkalmas (saját kép)

A kardántengely, váltó, belső égésű motor, üzemanyagtartály elhagyható, helyükre az akkumulátorok és az inverterek beszerelhetők.

A differenciálmű mechanikus nyomatékosztó funkcióját a két motor független, villamos szabályozása veszi át.

Előnyök:

Rendkívül gyors és precíz nyomatékelosztás, javított kanyarstabilitás és szabályozható diferálás a két kerék között („Limited Slip Differential”).

A hagyományos differenciálmű ($\approx 30\text{--}40\text{ kg}$) kiváltható két, egyenként $\sim 10\text{--}15\text{ kg}$ tömegű YASA motorral.

Csökken a hajtáslánc forgó tehetetlensége (nincs nagy koronakerék és kúpkerekes differenciálmű), ami javítja a gázreakciót és a dinamikus viselkedést.

Kihívások:

Nagyobb vezérlési komplexitás: a két motor szinkronizált nyomatékszabályozást, redundáns hibakezelést és az ABS/ESP rendszerekkel integrált szabályozási architektúrát igényel.

Mechanikai tervezési igény: a hátsó segédkeretet meg kell erősíteni ahhoz, hogy a két motor reakciónyomatékát biztonságosan felvegye (FEM-alapú szilárdsági és fáradási analízis szükséges).

BMW E46 típusú járműveknél, amelyek gyárilag közel 50:50% súlyelosztással és kb. 1400–1500 kg össztömeggel rendelkeznek, a két YASA motoros hátsó hajtás

lehetővé teszi a villamosítás utáni, továbbra is kiegyensúlyozott tengelyterhelés biztosítását. Ennek kulcsa az akkumulátormodulok megfelelő elosztása (motortér, kardánalagút, üzemanyagtank helye, hátsó ülés alatti tér).

Kisebb RWD platformok (BMW E30/E36, Mazda MX-5) esetén a rendelkezésre álló beépítési tér szűkebb, ugyanakkor a YASA motorok nagy átmérőjű, lapos kialakítása előnyös, a motor elhelyezhető a váltóharangban vagy a differenciálmű helyén, anélkül, hogy jelentős karosszéria-módosítás lenne szükséges. Kompromisszumot jelent, hogy az összesen beépíthető akkumulátor-kapacitás korlátozottabb, azonban restomod projektek esetén – tipikusan hétvégi, hobbi célú felhasználás mellett – ez általában elfogadható.

7.3 Elsőkerék-hajtású restomod – FWD platformok villamosítása

Elsőkerék-hajtású (FF) klasszikus járművek (pl. VW Golf, Honda Civic, Mini) villamosítása a szűk motortér és az első tengely eleve magas terhelése miatt még összetettebb feladat, mint RWD platformok esetén. A gyári elrendezésben a motor–váltó–differenciálmű rendszer egy kompakt transaxle egységben, keresztirányban helyezkedik el az első tengely előtt vagy felett.

Restomod jellegű átalakításnál az egyik leginkább reális megoldás az alábbi:

az eredeti transaxle ház részleges megtartása,

a belső fogaskeréksor eltávolítása,

a differenciálmű és a kihajtás megtartása,

YASA motor integrálása a váltóházba egy fix áttételű kapcsolat útján.

A Jaguar E-type Zero gyári villamosítása jól szemlélteti ezt a gondolatmenetet (noha hátsókerék-hajtású platformról van szó): az eredeti soros hathengeres motor helyére kb. 40 kWh kapacitású akkumulátorcsomag, a váltó helyére pedig egy 220 kW teljesítményű villanymotor és egy egyfokozatú reduktor került, amely a gyári kardántengelyt és differenciálművet hajtja; a rendszer össztömege az eredeti konfigurációhoz képest 46 kg-mal csökkent, és a futóművön nem volt szükség módosításra [31].

Egy hasonló elven működő FWD restomod megoldás esetén a YASA motor elhelyezhető a gyári váltó helyén (a féltengely-geometria változatlanul tartása mellett). A YASA motorok kis tengelyirányú mérete ($\approx 100\text{--}110\text{ mm}$) és $\sim 20\text{--}25\text{ kg}$ -os tömege (tipikus autóiipari kivitelek esetén) lehetővé teszi a hajtógép olyan

integrálását, hogy az első tengely terhelése csak mérsékelten növekedjen. Az akkumulátor tömegének hátrafelé történő áthelyezésével (pl. hátsó ülés alatti tér, üzemanyagtartály helye, csomagter) a kiinduló, kb. 60:40% arányú első:hátsó tengelyterhelés közel 50:50%-ra javítható, miközben a jármű össztömege csak mérsékelt mértékben növekszik.

7.4 Tömegeloszlás és hajtáslánc-koncepciók összehasonlítása

Restomod villamosítás során kiemelt tervezési szempont a tengelyterhelés alakulása és a tömegközéppont helyzete. A YASA motorok egyik legjelentősebb előnye, hogy kis tömegük révén a hajtáslánc fő komponensei viszonylag „szabadon” pozicionálhatók, ezért a jármű tömegeloszlása elsősorban az akkumulátormodulok elhelyezésével hangolható. Az alábbi tipikus elrendezések emelhetők ki:

Hátsó motoros sportautó (Porsche 911/912E): a gyári ~40:60% első:hátsó tengelyterhelés arány az EV restomod esetén is fenntartható, mivel a hátsó, ~22 kg tömegű YASA motor lényegesen könnyebb, mint az eredeti boxermotor, az akkumulátor pedig elöl–hátsó megosztva helyezhető el [30].

Frontmotoros, RWD szedán (BMW E46): az eredeti 50:50% arány villamosítás után is megközelíthető; az elülső motor+váltó tömegcsökkenését részben ellensúlyozza az első akkupakk, míg a hátsó tengelyre telepített két YASA motor és a hátsó akkumodulok a súlypontot enyhén hátrafelé tolhatják (~45:55%), ami sportosabb menetdinamikai karaktert eredményez.

FWD kompakt (pl. Honda Civic): a gyári ~60:40% első:hátsó tengelyterhelés arány az akkumulátor tömegének hátrafelé történő áthelyezésével közel 50:50%-ra javítható. Ez nagyobb stabilitást eredményez kanyarodás és fékezés során, ugyanakkor a hajtott első tengelyre kisebb tengelyterhelés jut, ami nem túl előnyös álló helyzetből történő gyorsítások alkalmával.

A fenti példák alapján megállapítható, hogy YASA motorok alkalmazásával az eredeti járműkarakter egyrészt megőrizhető (pl. 911 restomod), másrészt tudatosan módosítható (pl. FWD kompakt kiegyensúlyozottabbá tétele), miközben az össztömeg-növekedés a klasszikus restomod célkitűzésekkel összhangban mérsékelt szinten tartható.

7.5 Összehasonlítás elterjedt EV-konverziós hajtásrendszerekkel

A restomod piacon napjainkban több, széles körben használt hajtásrendszer-típus érhető el, amelyekhez a YASA motorok jól viszonyíthatók:

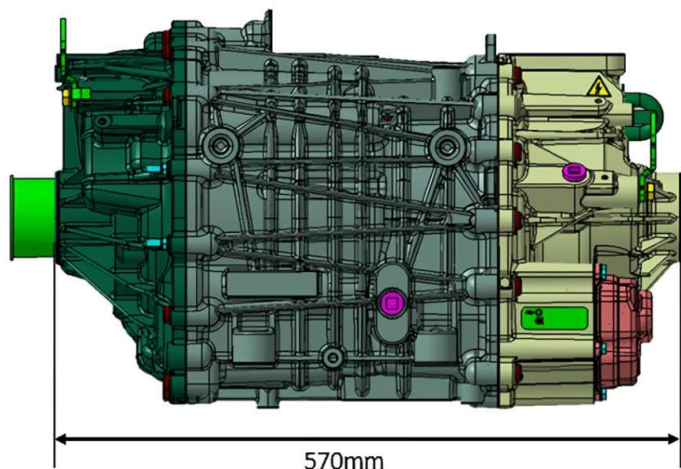
Tesla hajtóműegységek (Drive Unit): a Model S/3 integrált motor–inverter–áttétel–differenciál egységei (Small és Large Drive Unit) jellemzően 80–130 kg tömegűek, 150–300 kW tartományba eső teljesítménnyel, integrált fix áttétellel és differenciálművel [7][29]. Előnyük a kvázi „plug-and-play” jelleg, hátrányuk a nagy tömeg és a korlátozott beépítési rugalmasság (egy nagyméretű, kompakt egység).

NetGain Hyper9: elterjedt „hobbi” restomod motor, kb. 95 kW csúcsteljesítménnyel, ~173 Nm nyomatékkal, ~59 kg motortömeggel és ~4 kg invertertömeggel, tipikusan manuális váltó megtartásával alkalmazzák [35]. Teljesítménysűrűsége lényegesen elmarad a YASA motorokétól.



28. ábra NetGain Hyper9 [35]

Ford Eluminator crate motor (Mach-E alapú): gyárilag forgalmazott egység kb. 210 kW teljesítménnyel és ~430 Nm nyomatékkal, integrált 9,05:1 áttétellel, ~93 kg tömeggel; elsősorban klasszikus amerikai V8-as járművek restomod projektjeiben használják [36].



29. ábra Ford Eluminator [36]

A YASA motorokhoz viszonyítva (pl. 200 kW / ~20–25 kg tartományú kivitelek):

- a Tesla és az Eluminator egységek fajlagos teljesítménye tipikusan 2–3 kW/kg,

- a NetGain Hyper9 ~1,5–2 kW/kg tartományban,

- a YASA sorozatérett motorok pedig 5–10 kW/kg tartományban helyezkednek el, míg egyes prototípusok ennél is magasabb, akár ~59 kW/kg fajlagos értéket érnek el [27][28].

Restomod szempontból ez azt jelenti, hogy azonos teljesítményszint eléréséhez YASA motorral lényegesen kisebb és könnyebb hajtógép alkalmazható, ami:

- csökkenti a jármű össztömegét, vagy azonos tömeg mellett magasabb teljesítményszintet tesz lehetővé,

- megkönnyíti a beépítést (kisebb helyigény, kevesebb szükséges szerkezeti módosítás),

- jobban támogatja az eredeti futómű-karakter és súlyeloszlás megőrzését.

Nem véletlen, hogy több csúcskategóriás restomod és prémium EV-projekt (pl. Jaguar, Mercedes) a nagy energiasűrűségű, axiálfluxusú topológiák irányába mozdul el, még akkor is, ha ezek megoldási költség szintje jelenleg a piac felső szegmenséhez igazodik.

7.6 Összegzés – YASA motorok szerepe a restomod villamosításban

A restomod koncepció alapvető célja, hogy a klasszikus járművek karakterét és használati élményét a korszerű, lokálisan zéró emissziójú hajtásrendszerek mellett is megőrizze. A YASA axiálfluxusú villamos gépek ehhez több szempontból optimális műszaki platformot kínálnak:

nagy nyomaték- és teljesítménysűrűségük révén a hajtáslánc tömege és térfogata minimalizálható,

kompakt, lapos geometriai kialakításuknak köszönhetően a motor jellemzően a belsőégésű motor vagy a váltó helyére integrálható,

lehetővé teszik a kézi sebességváltó megtartását (klasszikus vezetési élmény) és alternatív, többmotoros torque vectoring hajtásláncok kialakítását is,

a jármű tömegeloszlásának finomhangolása elsősorban az akkumulátorok elhelyezésével végezhető, mivel a motor tömege csekély, így az eredeti menetdinamikai karakter reprodukciója mérnökiileg jól kezelhető feladat.

Ennek következtében a YASA motoros villamosítás nem pusztán környezetvédelmi szempontból tekinthető alternatívának, hanem olyan mérnöki eszköznek, amely biztosítja, hogy a klasszikus gépjárművek a belsőégésű korszakot követően is használhatók és élvezhetők maradjanak, miközben teljesítményben, határfokban és emissziós jellemzőkben is megfelelnek a korszerű követelményeknek.

8 Motorsport

Az axiális fluxusú villanymotorokat extrém körülmények között is próbára tették már, ami rávilágít a technológia versenysport potenciáljára. 2013-ban Lord Drayson egy átalakított Le Mans prototípus versenyautóban (Lola B12/69EV) négy YASA motort alkalmazva 850 hp összteljesítménnyel sebességi világrekordot állított fel: ez a tisztán elektromos versenygép 204 mph (328 km/h) csúcsebességet ért el, mindezt 1000 kg alatti tömeggel [32].

2015-ben a Drive eO PP03 lett az első elektromos autó, amely összetett győzelmet aratott a legendás Pikes Peak nemzetközi hegyiversenyen, ráadásul 25 másodperces előnnyel verte a második helyezettet. Ebben a kísérleti versenyautóban hat darab YASA-400 motor dolgozott, együttesen több mint 1000 kW (~1360 hp) csúcsteljesítménnyel és 2160 Nm nyomatékkal [33].



30. ábra Drive eO PP03 [60]

A versenyeken szerzett tapasztalatok szerint az axiális motorok fő előnye a motorsportban is a magas teljesítménysűrűség – kisebb és könnyebb motorokkal lehet elérni ugyanazt a hajtóerőt, így az autó tömegét csökkenteni lehet, vagy adott tömeg mellett erősebb hajtás építhető. A kisebb tömeg láncreakció-szerű előnyöket hoz: könnyebb motorral kisebb akkupakk is elég ugyanahhoz a versenytávhoz (hiszen kevesebb tömeget kell mozgatni), így az autó még tovább könnyíthető, ami a fékek, futómű terhelését is mérsékli. Egy villanyhajtású versenyautónál kritikus a tömeg és a súlyelosztás. Ebben az axiális motorok hatalmas előrelépést hozhatnak. Például a Forma-E jelenlegi Gen3-as autói 760 kg tömegűek (+ 80 kg pilóta), amiből a hajtásrendszer jelentős részt képvisel. A nagy fajlagos teljesítményű

axiális fluxusú motorokra optimalizált, új architektúrával elméletben akár több mint 100 kg-ot is meg lehetne takarítani az autó teljes tömegéből, ami óriási különbség a köridők szempontjából [34].

A motorsportban jelenleg az axiális motorok még kevésbé elterjedtek (részben a szabályok kötöttségei, részben az újdonságuk miatt), de a potenciál megvan bennük.

Le Mans Hypercar és LMDh kategóriákban is megjelentek már kompakt, nagy fajlagos teljesítményű villanymotorok az első tengelyen, de az alkalmazott motorok pontos topológiájáról (radiális vs. axiális fluxus) gyakran korlátozottan állnak rendelkezésre nyilvános adatok, így konkrét YASA-alkalmazás itt csak óvatosan említhető.

A Koenigsegg által fejlesztett Quark és Dark Matter motorok anyaghasználata (300M acél, üreges karbon rotor) egyértelműen a motorsport és repüléstechnika felé mutat: a Quark mindössze 28,5 kg tömegből 250 kW teljesítményt és 600 Nm nyomatékot ad le, míg a Dark Matter 39 kg tömeg mellett 600 kW (800 hp) teljesítményt és 1250 Nm nyomatékot biztosít [37][38].

Ez jól mutatja, hogy az axiális/„raxial” fluxusú motorok képesek a versenysportban elvárt extrém terhelések és hőmérsékletek kezelésére. A YASA egy külön céget (Evolito) is alapított az e-repülés területére, amely ultra magas teljesítményű, kis tömegű axiális fluxusú motorokat fejleszt a légiközlekedés számára. Az itt felhalmozott know-how közvetve az autósport fejlesztéseire is visszahat [39].

8.1 Gyorsulási példaszámítás Forma–E Gen3-at alapul véve

Járműtömegek:

$$m_0 = 840 \text{ [kg]}$$

$$m_1 = 740 \text{ [kg]}$$

Összteljesítmény:

$$P = 350 \text{ [kW]} = 350000 \text{ [W]}$$

A teljesítménykorlátos gyorsulás:

$$a = \frac{P}{m \cdot v}. \quad (11)$$

100 km/h:

$$v = 27.778 \text{ [m/s]}.$$

Gyorsulási értékek

$$a_0 = \frac{350000}{840 \cdot 27.778} = 15 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

$$a_1 = \frac{350000}{740 \cdot 27.778} = 17,027 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

Az alapeset 0–100 km/h gyorsulása:

$$t_0 = \frac{\Delta v}{a} = \frac{27.778 \text{ m/s}}{15 \text{ m/s}^2} \approx 1,851 \text{ [s]}$$

YASA motoros architektúra esetén:

$$t_1 = \frac{\Delta v}{a} = \frac{27.778 \text{ m/s}}{17,027 \text{ m/s}^2} \approx 1,631 \text{ [s]}$$

8.2 Energiafogyasztás és hatótáv becslése

8.2.1 Gördülési ellenállás (Formula–E Gen3, $\Delta m = 100 \text{ kg}$)

Alapképlet:

$$F_g = \mu_g m g \quad (12)$$

ahol

$$\mu_g$$

– gördülési ellenállási tényező,
m – a jármű tömege,

$$g = 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

– nehézségi gyorsulás.

Formula–E Gen3 nagyságrendi adatok [47]:

autó tömege:

$$m_{FE} \approx 760 \text{ [kg]}$$

pilóta minimum:

$$m_P \approx 80 \text{ [kg]}$$

Teljes versenytömeg:

$$m_0 \approx 760 + 80 = 840 \text{ [kg]}$$

Tegyük fel, hogy egy axiális fluxusú (YASA-jellegű) hajtás + optimalizált akkupakk miatt **100 kg tömegcsökkentés** érhető el:

$$\Delta m = 100 \text{ [kg]}, \quad m_1 = m_0 - \Delta m = 740 \text{ [kg]}.$$

A gördülési ellenállás tipikus tényezője jó minőségű aszfalt és sportabroncs esetén nagyságrendileg [48]

$$\mu_g = 0,013\text{--}0,015$$

Vegyük **konzervatívan** $\mu_g = 0,015$ értéket (lágyabb, tapadósabb gumi miatt).

A gördülési erő **különbsége** a két tömeg között:

$$\Delta F_g = \mu_g \Delta m g = 0,015 \cdot 100 \cdot 9,81 \approx 14,7 \text{ [N]}.$$

100 km/h-nál ($v = 27,78 \text{ m/s}$) a többlet teljesítményigény:

$$\Delta P_g = \Delta F_g \cdot v \approx 14,7 \cdot 27,78 \approx 409 \text{ [W]} \approx 0,41 \text{ [kW]}.$$

Ugyanez 200 km/h-nál ($v = 55,56 \text{ m/s}$):

$$\Delta P_g \approx 14,7 \cdot 55,56 \approx 818 \text{ [W]} \approx 0,82 \text{ [kW]}.$$

Mivel **adott úthosszra** (pl. 100 km) az idő $t = s/v$, a gördülési ellenállásból származó többletenergia:

$$\Delta E_g = \Delta F_g \cdot s = \mu_g \Delta m g s \tag{13}$$

– vagyis **nem függ a sebességtől**, csak a távolságtól.

100 km útra:

$$\Delta E_g = 0,015 \cdot 100 \cdot 9,81 \cdot 100\,000 \approx 1,47 \cdot 10^6 \text{ J} \approx 0,41 \text{ [kWh/100 km]}.$$

A Formula–E Gen3 autó hasznosítható versenyenergiája:

- akkumulátor: 47 kWh, ebből ~38,5 kWh használható versenyen
- hatótáv: ~94 km egy teljes energiakihasználással [42]

Fajlagos energiafelhasználás:

$$E_0 \approx \frac{38,5 \text{ [kWh]}}{94 \text{ [km]}} \approx 41 \text{ [kWh/100 km]}.$$

Ehhez viszonyítva a 100 kg-os tömegcsökkentés miatti **gördülési ellenállás-csökkenés**:

$$\frac{\Delta E_g}{E_0} \approx \frac{0,41}{41} \approx 1\%.$$

Tehát pusztán a gördülési ellenállás szempontjából **~1% energiamegtakarítás** érhető el 100 kg tömegcsökkentéssel.

8.2.2 Gyorsítások és fékezések (kinetikus energia, $\Delta m = 100 \text{ kg}$)

A jármű **kinetikus energiája**:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m v^2. \quad (14)$$

A tömegkülönbség miatti **plusz energiaigény** egy 0–v gyorsításnál:

$$\Delta E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \Delta m v^2.$$

Nézzük néhány releváns sebességet Formula–E szempontból:

- 0–100 km/h ($v = 27,78 \text{ m/s}$) (rajtnál, lassú kanyar kijárata):
$$\Delta E_{\text{kin},0-100} = \frac{1}{2} \cdot 100 \cdot 27,78^2 \approx 38,6 \text{ [kJ]} \approx 10,7 \text{ [Wh/gyorsítás]}.$$

- 0–150 km/h ($v = 41,67$ m/s) (tipikus erős kigyorsítás városi pályán):

$$\Delta E_{\text{kin},0-150} = \frac{1}{2} \cdot 100 \cdot 41,67^2 \approx 86,8 \text{ [kJ]} \approx 24,1 \text{ [Wh/gyorsítás]}.$$

- 0–200 km/h ($v = 55,56$ m/s) (extrém eset, hosszabb egyenes):

$$\Delta E_{\text{kin},0-200} \approx 154,3 \text{ [kJ]} \approx 42,9 \text{ [Wh/gyorsítás]}.$$

Ezek **mechanikai energiák** – ebből a villamos rendszerre jutó rész függ:

- a hajtáslánc hatásfokától (motor + inverter + hajtómű),
- illetve attól, hogy fékezéskor mennyit tudunk **viSSZanyerni** regeneratív fékezéssel.

A Formula–E Gen3 autók akár a versenyen felhasznált energia ~50%-át is képesek visszatáplálni regeneratív fékezéssel (600 kW maximális össz-regenerációs képesség, első–hátsó tengely együtt) [49].

Reális, konzervatív feltételezésként vegyünk:

- $\eta_{\text{regen}} \approx 0,4$ (a fékezési energia ~40%-a jut vissza a nagyfeszültségű akkuba, a többi veszteség/hidraulikus fék).

Ekkor a **0–150 km/h** gyorsításnál a **nettó többletenergia-igény** az akkumulátor felől:

$$\begin{aligned} \Delta E_{\text{batt},0-150} &\approx (1 - \eta_{\text{regen}}) \cdot \Delta E_{\text{kin},0-150} \approx 0,6 \cdot 24,1 \text{ [Wh]} \\ &\approx 14,5 \text{ [Wh/gyorsítás]}. \end{aligned}$$

Ha 100 km versenytávra **N** darab ilyen nagy intenzitású gyorsítás jut (ez pályafüggő; városi FE-pályán simán lehet nagyságrendileg 50–100 komoly gyorsítás–fékezés ciklus):

$$\Delta E_{\text{city}}(N) \approx N \cdot \Delta E_{\text{batt},0-150} \approx N \cdot 14,5 \text{ [Wh]}.$$

Példa:

- ha $N=100$ nagy gyorsítás / 100 km (nagyon intenzív verseny, sok féktávval), akkor:

$$\Delta E_{\text{city}}(100) \approx 100 \cdot 14,5 \text{ Wh} \approx 1,45 \text{ [kWh/100 km]}$$

8.2.3 Összesített többletenergia-igény és hatás a versenyre

A 100 kg-os tömegkülönbség hatása 100 km-re:

1. Gördülési ellenállás:

$$\Delta E_g \approx 0,41 \text{ [kWh/100 km]}$$

2. Gyorsítások (példa: 100 db 0–150 km/h jellegű gyorsítás/100 km):

$$\Delta E_{\text{city}} \approx 1,45 \text{ [kWh/100 km]}$$

3. Összesített (példa):

$$\Delta E_{\text{össz}} \approx \Delta E_g + \Delta E_{\text{city}} \approx 0,41 + 1,45 \approx 1,86 \text{ [kWh/100 km]}$$

Ez a Formula–E Gen3 fajlagos energiafelhasználásához viszonyítva:

$$\frac{\Delta E_{\text{össz}}}{E_0} \approx \frac{1,86}{41} \approx 4,5\text{--}5\%.$$

Tehát a **100 kg tömegcsökkentés** (pl. axiális fluxusú, nagy fajlagos teljesítményű motorral és ennek megfelelően optimalizált akkukapacitással) **nagyságrendileg 3–5% energiamegtakarítást** jelenthet a teljes versenytávra – attól függően, hogy hány brutális gyorsítás–fékezés ciklus van egy adott pályán.

Fontos mellékszempontok:

- **Aerodinamikai ellenállás:**
közvetlenül **nem függ a tömegtől**, csak a sebességtől és a légellenállási paraméterektől ($C_d \cdot A$). A kevesebb tömeg azonban lehetővé teszi, hogy **ugyanannyi energia mellett magasabb átlagsebességet** lehessen fenntartani, vagy ugyanazt az átlagsebességet kevesebb energiával érjük el – ez stratégiai szinten jelenik meg.
- **Szintkülönbségek (potenciális energia):**
zárt pályán egy teljes körre $\sum \Delta h \approx 0$, tehát az emelkedőkön befektetett potenciális energia nagy részét lejtőn visszanyeri a jármű; itt is a regen hatásfoka a döntő. A tömeg hatása emiatt másodlagos a gördülési és kinetikus taghoz képest.
- **Regenerációs korlátok:**
nagyobb tömeg $\rightarrow$ nagyobb fékezési teljesítmény-igény $\rightarrow$ bizonyos szituációkban a **regenerációs teljesítménylimit (600 kW)** miatt nem minden energia nyerhető vissza, így a nehezebb autó hátrányba kerül energia-menedzsment szempontból is.

Összefoglalva: Formula–E kontextusban $\Delta m = 100 \text{ kg}$ nemcsak **kb. 13%-kal javítja a teljesítmény/tömeg arányt** (ezt a gyorsulási alfejezetben már kiszámoltuk), hanem **~3–5% körüli energiamegtakarítást** is hozhat egy teljes versenytávra, ha figyelembe vesszük a gördülési ellenállást és a gyorsítások–fékezések kinetikus energiáját, a regeneratív fékezés hatásfokával együtt. Ez nagyon jól illusztrálja, miért kritikus a tömegcsökkentés és a nagy fajlagos teljesítményű, axiális fluxusú motor használata a motorsportban.

9 Fejlesztendő területek

A YASA és általában az axiál fluxusú motorok számos előnye mellett több olyan terület is azonosítható, ahol további kutatás-fejlesztés szükséges a széleskörű, különösen a kerékagymotoros alkalmazásokhoz:

Gyárthatóság és költségcsökkentés

A szegmentált állórész és a nagy pontosságú mágnespozicionálás jelenleg költséges gyártást és szigorú minőségellenőrzést igényel [14][16][22].

Cél a gyártási folyamatok automatizálása, a hulladékanyag-arány csökkentése, a ciklusidők rövidítése.

A ritkaföldfém-felhasználás mérséklése, esetleg ritkaföldfém-mentes variánsok (pl. gerjesztett vagy reluktancia-alapú AFPM) kidolgozása.

Fluxusgyengítés és sebességtartomány

Az axiális gépeknél a nagy levegőzés és a topológiai sajátosságok miatt a fluxusgyengítés nehezebb, így a maximális járműsebesség korlátozott lehet adott feszültség szinten [24].

Kutatási irány a tekercsgeometria, mágneskiosztás és vezérlési algoritmusok optimalizálása a szélesebb sebességtartomány eléréséhez [16][24].

Integrált hűtés kerékagymotoros alkalmazásokhoz

Kerékagymotorban a hűtés különösen kihívásos: forgó csatlakozásokon keresztül kell a hűtőközeget be- és kivezetni, miközben a tömítettség és az élettartam kiemelt szempont [15][19].

További fejlesztések szükségesek a hűtőkör egyszerűsítésére (pl. levegő-olaj kombinált rendszerek, hőcsöves megoldások).

Rugózatlan tömeg és futómű-integráció

Bár a YASA fajlagos teljesítménye kedvező, az agymotoros konfigurációkban a plusz rugózatlan tömeg még mindig gondos futómű-hangolást igényel.

Aktív lengéscsillapítás, adaptív futóművek és fejlett szabályozási stratégiák integrálása szükséges ahhoz, hogy a kerékagymotoros hajtás a prémium komfort-elvárásokat is teljesítse [15].

Vezérlés és diagnosztika

Többmotoros (tengelyenként több, kerekenként egy) YASA alkalmazásokban komplex nyomatékelosztás-, slip-kontroll- és hőmenedzsment-algoritmusok szükségesek [16][26].

A rendszerdiagnosztika (online hibadetektálás, állapotfelügyelet) fejlesztése elengedhetetlen a biztonság és elérhetőség szempontjából.

Rendszerszintű optimalizáció

A motor, inverter, hajtáslánc-mechanika és járműszintű vezérlés együttes optimalizálása (co-design) várhatóan további hatékonyság-növelést és költségcsökkentést eredményezhet.

Ide tartozik a hőmenedzsment, a packaging és a járműtömeg-eloszlás integrált tervezése is.

10 Következtetés

A dolgozat célja az, hogy átfogó képet adjon a YASA (Yokeless And Segmented Armature) axiál fluxusú villanymotorok technológiájáról, összehasonlítsa azokat a ma használt, elsősorban radiál fluxusú motorokkal, és értékelje alkalmazhatóságukat különböző elektromos és hibrid hajtásrendszerekben.

A szakirodalmi áttekintés és a műszaki elemzés alapján megállapítható, hogy:

Az AFPM gépek, ezen belül a YASA topológia kiemelkedő nyomaték- és teljesítménysűrűséget biztosít, akár 2–3×-os értéket is a hagyományos RFPM gépekhez képest [16][18][27].

A YASA motorok kompakt, lapos kivitele és hatékony folyadékhűtése különösen alkalmassá teszi őket olyan alkalmazásokra, ahol a beépítési hely korlátozott, ugyanakkor nagy teljesítményre van szükség (sportautók, agymotoros hajtások, kompakt e-axle egységek).

A kerékagymotoros hajtások elterjedését eddig elsősorban a rugózatlan tömeg növekedése, a hűtési nehézségek, a megbízhatósági kérdések és a magas költség akadályozta [15]. A YASA technológia ezek közül több problémára is megoldást kínál a magas fajlagos teljesítménynek és a lapos, könnyű konstrukciónak köszönhetően.

A hibrid hajtásokban a YASA motorok nagy hatékonyságú starter-generator, illetve tengelyenkénti rásegítő motor szerepét tölthetik be, lehetővé téve a belsőégésű motorok teljesítményének csökkentését (downsizing), a fogyasztás és emisszió mérséklését.

A belsőégésű motorok teljes kiváltása esetén a YASA-topológiára épülő többmotoros, elosztott hajtásrendszerek új járműarchitektúrákat tesznek lehetővé, amelyekben a klasszikus „egy nagy motor” paradigma helyett tengelyenként vagy kerekenként elosztott hajtás valósul meg.

Ugyanakkor a technológia széleskörű ipari adaptációjához még számos kihívást kell megoldani: a gyártási költségek csökkentése, a fluxusgyengítés és sebességtartomány optimalizálása, a kerékagymotoros alkalmazások termikus és mechanikai integrációja, valamint a többmotoros rendszerek vezérlési-diagnosztikai kérdései mind intenzív kutatás-fejlesztési területek.

Összességében megállapítható, hogy a YASA motorok reális műszaki alternatívát kínálnak a hagyományos radiális motorokkal szemben, különösen ott, ahol a teljesítménysűrűség, a tömegcsökkentés és a kompakt beépíthetőség kiemelt

szerepet játszik. Ha a jelenleg zajló ipari projektek (pl. prémium gyártók nagy teljesítményű EV-i és hibrid modelljei) sikeresnek bizonyulnak, a YASA-topológia a következő évtizedben az elektromos hajtásrendszerek egyik meghatározó építőelemévé válhat, és hozzájárulhat ahhoz, hogy a kerékagyba integrált hajtások is kilépjenek a koncepciófázisból a sorozatgyártás világába.

Irodalomjegyzék

- [1] International Energy Agency (IEA). (2023). Global EV Outlook 2023. Paris: IEA.
- [2] Dr. Hörömpöly Imre, Dr. Kurutz Károly. (2010). Különleges autómotorok. Budapest: Műszaki Könyvkiadó.
- [3] Kraftfahrtechnisches Taschenbuch (Járműtechnikai kézikönyv, 28. kiadás). (2018). Berlin: Springer.
- [4] Számel László. (2015). Kapcsolt reluktancia motorok. http://www.mee.hu/files/images/5/Szamel_Laszlo-Kapcsolt_reluktancia.pdf.
- [5] Audi AG. (2023). Audi e-tron GT technical specifications. Ingolstadt: Audi.
- [6] Mercedes-Benz Group. (2023). Mercedes EQC technical data. Stuttgart: Mercedes Benz.
- [7] Tesla, Inc. (2023). Tesla Model S and Model 3 specifications. Palo Alto: Tesla.
- [8] BMW Group. (2023). BMW i3 and iX3 technical specifications. Munich: BMW.
- [9] Nissan Motor Corporation. (2023). Nissan Leaf technical data. Yokohama: Nissan.
- [10] Porsche AG. (2023). Porsche Taycan specifications. Stuttgart: Porsche.
- [11] Renault Group. (2023). Renault Zoe technical specifications. Boulogne-Billancourt: Renault.
- [12] Toyota Motor Corporation. (2023). Toyota Prius hybrid system. Toyota City: Toyota.
- [13] <https://www.electronicdesign.com/markets/automotive/article/21243040/electronic-design-the-lure-of-the-axial-flux-ev-motor>
- [14] <https://www.electrichybridvehicletechnology.com/features/feature-will-yasas-axial-flux-motor-revolutionise-the-bevs-of-the-future.html>
- [15] In-Wheel Motor Drive Systems for Electric Vehicles: State of the Art, Challenges, and Future Trends (2023) Kritika Deepak, Mohamed Amine Frikha, Yassine Benômar, Mohamed El Baghdadi and Omar Hegazy

- [16] A Review of Axial-Flux Permanent Magnet Motors: Topological Structures, Design, Optimization and Control Techniques (2022) Zhuo Hao, Yangyang Ma, Pengyu Wang, Geng Luo and Yisong Chen
- [17] Design Of Axial-Flux Permanent-Magnet Low-Speed Machines And Performance Comparison Between Radial-Flux And Axial-Flux Machines (2005) Asko Parviainen
- [18] T.J. Woolmer, M.D. McCulloch (2007): "Analysis of the Yokeless and Segmented Armature machine".
- [19] Investigation into the temperature profile of a liquid cooled YASA© AFPM machine (2012) R. Camilleri *, T. Woolmer **, A. Court ††, M.D. McCulloch†
- [20] Khwaja M. Rahman (2006): "Application of Direct-Drive Wheel Motor for Fuel Cell Electric and Hybrid Electric Vehicle Propulsion System".
- [21] M.R. Dubois, H. Polinder, J. A. Ferreira (2001): "Axial and Radial-Flux Permanent Magnet Generators for Direct-Drive Wind Turbines".
- [22] I. Boldea, M. Topor, F. Marignetti, S.I. Deaconu, and L.N. Tutelea (2010): "A Novel, Single Stator Dual PM Rotor, Synchronous Machine: topology, circuit model, controlled dynamics simulation and 3D FEM Analysis of Torque Production".
- [23] Woolmer, T. (2007): "A New Motor Topology for High Performance Applications Using SMC Materials".
- [24] Ayman M. EL-Refaie, Thomas M. Jahns (2005): "Optimal Flux Weakening in Surface PM Machines Using Fractional-Slot Concentrated Windings".
- [25] Krishnan, R. (2001): "Electric Motor Drives: Modeling, Analysis and Control".
- [26] Vas, P. (1998): "Sensorless vector and direct torque control".
- [27] <https://yasa.com/technology/>
- [28] <https://yasa.com/news/yasa-smashes-own-unofficial-power-density-world-record-pushing-state-of-the-art-electric-motor-to-staggering-new-59kw-kg-benchmark>
- [29] <https://eveurope.eu/en/product/tesla-model-3-motor-unit>

- [30] https://totalcar.hu/magazin/2021/03/25/hogy_micsinalszhulye_elektromos_porsche
- [31] <https://www.caranddriver.com/reviews/a22811722/jaguar-e-type-zero-electric-ev-vintage>
- [32] <https://yasa.com/applications/drayson-racing>
- [33] <https://yasa.com/news/yasa-powered-ev-is-fastest-overall-in-pikes-peak-qualifying>
- [34] <https://www.fiaformulae.com/en/news/487147>
- [35] <https://evolveelectrics.com/products/hyper-9-hv-motor-kit>
- [36] <https://performanceparts.ford.com/part/M-9000-MACHE>
- [37] <https://www.koenigsegg.com/quark-emotor>
- [38] <https://www.koenigsegg.com/dark-matter>
- [39] <https://evolito.aero/evolito-has-launched>
- [40] Polinder, H. et al. (2004): "Comparison of direct-drive generators for wind turbines".
- [41] <https://www.koenigsegg.com/technical-specifications-regera>
- [42] https://en.wikipedia.org/wiki/Formula_E_Gen3
- [43] <https://yasa.com/applications/lamborghini-revuelto/>
- [44] <https://yasa.com/applications/lamborghini-temerario/>
- [45] <https://yasa.com/automotive/>
- [46] <https://www.mercedes-amg.com/en/concept-amg-gt-xx>
- [47] <https://www.fiaformulae.com/en/news/487147>
- [48] <https://hpwizard.com/tire-friction-coefficient.html>
- [49] <https://fiaformulae.com/en/news/822039/everything-you-need-to-know-about-formula-e-s-latest-race-car-gen3-evo>
- [50] <https://yasa.com/yasa-series-motors/>
- [51] <https://emrax.com/e-motors/emrax-188/>
- [52] <https://insideevs.com/news/583976/expert-electric-car-battery-production-forecast/>
- [53] <https://newsroom.porsche.com/en/products/taycan/history-18563.html>

- [54] <https://carbuzz.com/mercedes-tech-eliminate-rear-brakes/>
- [55] <https://yasa.com/applications/koenigsegg/>
- [56] <https://yasa.com/applications/ferrari-sf90-stradale/>
- [57] <https://yasa.com/applications/ferrari-296gtb/>
- [58] <https://yasa.com/applications/concept-amg-gt-xx/>
- [59] <https://emrax.com/e-motors/emrax-268/>
- [60] <https://driveeo.com/pikes-peak/pp03/>