



ADAPTÍV SEBESSÉGTARTÓ RENDSZER FEJLESZTÉSE ÉS TESZTELÉSE KÜLÖNBÖZŐ HAJTÁSLÁNCOKHOZ

DEVELOPMENT AND TESTING OF ADAPTIVE CRUISE CONTROL SYSTEMS FOR DIFFERENT POWERTRAINS

Forgó Tamás

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Közlekedés-
és Járműirányítási Tanszék. Budapest, Magyarország, forgotamas3@gmail.com

Abstract

Due to the diversification of powertrains in the automotive industry, maximizing energy efficiency has become a core priority for driver assistance systems, alongside safety and comfort. My research aimed to develop a universal, energy-optimized adaptive cruise control (ACC) system operating optimally across internal combustion, hybrid, and purely electric vehicles. The scientific contribution of this research is a comprehensive simulation and validation framework that objectively demonstrates, via standardized metrics, the proposed control strategy's measurable energy savings in heterogeneous, simulated traffic conditions.

Keywords: *Adaptive Cruise Control (ACC), energy efficiency, powertrain technologies, simulation environment.*

Összefoglalás

A gépjárműipar hajtáslánc-diverzifikációja miatt a vezetéstámogató rendszereknél a biztonság és kényelem mellett az energiahatékonyság maximalizálása is prioritássá vált. Kutatásom célja egy univerzális, energia-optimalizált, adaptív sebességtartó automatika (ACC) kidolgozása volt, amely optimálisan működik belső égésű, hibrid és tisztán elektromos járművekben egyaránt. A kutatás tudományos hozzáadott értéke egy olyan komplex szimulációs és validációs keretrendszer létrehozása, amely standardizált metrikákkal, objektíven igazolja a javasolt szabályozás mérhető energiamegtakarítását heterogén, szimulált forgalmi viszonyok között.

Kulcsszavak: *adaptív sebességtartó automatika (ACC), energiahatékonyság, hajtáslánc-technológiák, szimulációs környezet.*

1. Bevezetés

A gépjárműipar napjainkban az egyik legjelentősebb átalakulásán megy keresztül. Ezt két, egymással szorosan összefonódó ötlet vezérli: alternatív hajtáslánc típusok kifejlesztése a belső égésű motorok (Internal Combustion Engine-ICE) helyett, valamint a járművek autonómiájának növelése. A károsanyagkibocsátás-normák szigorodása a belső égésű motorok fokozatos visszaszorulását és a hibrid, valamint a tisztán elektromos (Electric Vehicle- EV) hajtások térnyerését eredményezi, ezek mellett a biztonság és a

vezetési komfort iránti igény a fejlett vezetéstámogató rendszerek (Advanced Driver Assistance Systems – ADAS) széles körű elterjedését ösztönzi. Az ipari gyakorlatban a sebességtartó automatikák (tempomat, Cruise Control-CC) fejlesztése szigorú szabványok és biztonsági előírások szerint zajlik. A jelenleg piacon lévő ACC-rendszerek többsége feketedobozként kezeli a hajtásláncot: a vezérlő kimenete egy gyorsulási vagy lassulási igény, amelyet az alacsonyabb szintű motorvezérlő fordít le nyomatékgigénnyé [1]. Ez a megközelítés lehetővé teszi a modularitást, ugyanakkor

hatékonysági korlátokat is jelent. A szakirodalom áttekintése során azonosítható egy jelentős rés a hajtáslánccok és az ACC-rendszerek interakciójának vizsgálatában. A legtöbb publikáció vagy egyetlen specifikus hajtásláncre (főként EV vagy párhuzamos hibrid) fókuszál, vagy kizárólag az energiamenedzsment-stratégiák optimalizálását vizsgálja fix sebességprofil mellett [2, 3]. Hiányzik azonban az a szisztematikus megközelítés, amely egyetlen, rögzített paraméterű ACC-algoritmus hatását vizsgálná a teljes hajtáslánccspektrumon keresztül. Különösen kevés figyelem irányul a komplexebb hibrid architektúrákra, amelyek vezérlése nem triviális feladat az ACC dinamikus beavatkozásai során. További módszertani nehézséget jelent az eredmények összehasonlíthatósága: nehéz objektíven összevetni egy dízelmotoros jármű fogyasztáscsökkenését (l/100km) egy elektromos jármű energiamegtakarításával (kWh/100km), különösen, ha a forgalmi szituációk dinamikája is változik. Nincs egységes, dimenziótlan metrika, amely a beavatkozás hatékonyságát minősítené, függetlenül az energiahordozó típusától. Dolgozatomban, ezeknek a szemléleteknek megfelelően, saját fejlesztésű ACC-rendszert vizsgáltam, amelyet különböző járműtípusok és hajtáslánccok esetén, többféle forgalmi szituációban teszteltem. A szimulációk során az üzemanyag és elektromosenergia-fogyasztás vizsgálata volt a fő cél. Az eredményeket összehasonlítottam és kiértékeltem egy saját fejlesztésű keretrendszerben, hogy átfogó képet kapjak az ACC teljesítményéről és alkalmazhatóságáról. A dolgozat eredményei rámutatnak arra, hogy egyazon vezérlési logika milyen eltérő hatásfokkal működhet a hajtáslánctípustól függően, ezzel iránymutatást adva a jövőbeli hajtáslánccfüggő vezérlők fejlesztéséhez.

2. Elméleti alapok, felhasznált eszközök és módszertan

A modern járműipar, hasonlóan más ipari ágakhoz, napról napra fejlődik és formálódik. A tisztán belső égésű motorokkal meghajtott járművek korszaka úgy tűnik, hogy lejárt, hiszen a hibrid és elektromos hajtáslánccok egyre több és több teret hódítanak maguknak a piacon [4]. A kérdés, hogy ez miért történik, egy komplex válaszra vár, de egyszerűsítve természetvédelmi, kereskedelmi és politikai okai is vannak [5, 6, 7]. Alábbiakban az alternatív hajtáslánccok, fejlett vezetőtámogató rendszerek és az energiafogyasztás kérdéseit fogom tárgyalni.

2.1. Hajtáslánctípusok

2.1.1. Belső égésű motoros hajtáslánc

A jelenleg legelterjedtebb hajtáslánctípus a belső égésű motoros hajtáslánc [8]. Üzemanyagtól függően a motorok kialakítása eltérő lehet, de a hajtáslánc felépítése közel azonos, így beszélhetünk általánosságban a belsőégésű motoros hajtáslánccokról.

2.1.2. Párhuzamos hibrid hajtáslánc

Az egyik leggyakoribb hibrid típus a személyautók között a párhuzamos hibrid elektromos jármű (Parallel Hybrid Electric Vehicle - PHEV – *nem összetévesztendő a Plug-in Hybrid Electric Vehicle angol kifejezés rövidítésével*) [9]. A PHEV főként városi és elővárosi használatra kedvelt [10], hiszen alacsony sebességnél az elektromotor végzi a hajtás nagy részét, kevesebb üzemanyagot fogyaszt a jármű, így olcsóbb a közlekedés.

2.1.3. Soros hibrid hajtáslánc

A soros hibrid hajtás kevésbé elterjedt a gépjárművek körében, sajátos kialakításának és az adottságainak köszönhetően [11]. Leginkább városi kisautókban, valamint buszoknál alkalmazott [12, 13]. Ez annak tudható be, hogy a belső égésű motor nem hajtja a kerekeket közvetlenül, hanem csak egy generátort, amely a termelt energiát vagy a kerekek hajtására fordítja, vagy pedig eltárolja egy akkumulátorban.

2.1.4. Tengelyenkénti megosztású hibrid hajtáslánc

A tengelyenkénti megosztású hajtáslánccal ellátott jármű (Axle Split Hybrid Vehicle - ASHEV) komplexebb kialakítású, hiszen a két különböző tengelyt két különböző motor hajtja, egymástól mechanikailag függetlenül [14]. Egy elektronikus vezérlő hangolja össze a két hajtás működését. A jármű képes a két motort külön-külön (elsőkerék- vagy hátsókerék-hajtás) vagy egyszerre (összkerék-hajtás) működtetni.

2.1.5. Teljesítményosztásos hibrid hajtáslánc

A dolgozatban felsoroltak közül a legkevésbé hagyományos hajtáslánc a teljesítményosztásos hibrid (Power-Split Hybrid Electric Vehicle - PSHEV), amely hatalmas sikernek örvend napjainkban [15]. A rendszer ötvözi a soros és a párhuzamos hibridek architektúráját, különlegessége a bolygóalapú nyomatékelosztás [16].

2.1.6. Elektromos hajtáslánc

Egy elektromos jármű, a nevéből adódóan is, teljesen elektromos hajtáslánccal rendelkezik [17]. Ez egy egyre népszerűbb megoldás a közlekedésre [18], amelynek előnyei, hogy a felhasznált energia nagyon magas százaléka hasznos munkát tud végezni [19], zéró lokális emisszió, valamint a motor(ok) rugalmas elrendezésének köszönhetően kiváló nyomatékleadás [20, 21].

2.2. Vezetéstámogató rendszerek szabályozástechnikai megoldásai

Napjainkban a legtöbb autóba már számos vezést segítő rendszer is be van építve, sokszor már kötelező jelleggel [22].

2.2.1. Vezetéstámogató rendszerek

Példa egy vezést segítő rendszerre lehet a blokkolásgátló fékrendszer (Anti-Lock Braking System - ABS) [23] vagy a sávtartó asszisztencia (Lane Keeping Assist - LKA) [24]. Egy rendszer, amelyik ugyanúgy használható városban, mint azon kívül, nem más, mint a sebességtartó automata [25]. Ezt a funkciót bekapcsolva a járművezetőnek a kívánt sebesség elérése után nem kell a sebesség szabályozásával foglalkoznia, hiszen a beállított sebességet tartja a gépjármű. A CC-rendszer továbbfejlesztett verziója az adaptív sebességtartó automatika [26], ez annyiban különbözik a hagyományos sebességtartó rendszertől, hogy nem csupán tartja a beállított sebességet, hanem mindeközben biztonságos távolságot is tart az esetleges elől haladó járműhöz képest. Az ACC magas sebesség esetén is egy kényelmes utazási élményt kínál, mivel nem szükséges a sofőrnek a forgalom kis változásaira reagálnia, a városban pedig a forgalmi dugókban való közlekedés is elviselhetőbbé válhat. Bizonyos biztonsági és kényelmi megkövetései vannak az ACC-rendszernek. Például szigorúan előírt, hogy három másodperces követési távolságot kell betartania a járműnek [27], ezt a korlátozást figyelembe véve kell meghatározni a rendszernek, hogy milyen követési sebességet vegyen fel. Emellett az utasok kényelmének érdekében kötelező egy megengedett maximális gyorsulás- és lassulásmennyiséget meghatározni [28].

2.2.2. LQ-alapú szabályozás

Az LQ-szabályozás a modern irányításelmélet egyik alapvető módszere, amely az optimális szabályozási problémák megoldására szolgál. A módszer célja, hogy egy lineáris rendszert egy előírt referenciaérték körül stabilizáljon úgy,

hogy közben minimalizálja az állapotok és a vezérlési jelek kvadratikusan súlyozott költségét. Az optimális szabályozás tehát az állapotvektor lineáris visszacsatolásán alapul, amely garantálja a rendszer stabilitását és a költségminimalizálást. Az így kapott szabályozási törvény minden kezdeti állapot esetén biztosítja, hogy a rendszer az egyensúlyi helyzet felé konvergáljon. Az LQ-szabályozó előnyei közé tartozik az egyszerűség, a stabilitás garantálása, valamint az, hogy a módszer jól alkalmazható lineáris rendszerek széles körére [29]. Az LQ-szabályozónak két formája jelenhet meg: offline és online LQ [30]. Az offline LQ-szabályozó jellemzője, hogy a visszacsatolási mátrix előbb kerül kiszámításra. Így a szabályozó számítási igénye csökken, ezzel szemben, ha változnak a rendszer paraméterei, kevésbé rugalmas az offline kialakítás. Ezzel szemben az online LQ valós időben számolja ki a visszacsatolási mátrixot. Ez nagy számítási igényű, de a rendszer rugalmasabb és robusztusabb.

2.3. Felhasznált szoftverek

Tesztelés során a virtuális környezet lehetővé teszi a komplex forgalmi szituációk és a szabályozási algoritmusok biztonságos, reprodukálható és költséghatékony vizsgálatát. A szimulációk az IPG CarMaker szoftverben futottak. Ez egy fejlett járműdinamikai szimulációs szoftver, amelyet elsősorban autóiipari fejlesztésekhez és kutatásokhoz használnak. A program lehetővé teszi a teljes személygépjármű, az alrendszerek és a vezérlési környezet valóságos modelljének szimulációját. A CarMaker segítségével a mérnökök virtuális prototípusokat hozhatnak létre, így a fejlesztési folyamat korai szakaszában is tesztelhetők különböző koncepciók szimulációiban. A szoftver támogatja a járműdinamika, a hajtáslánc, a futómű és az ADAS-rendszerek részletes vizsgálatát. A CarMaker nyitott architektúrával rendelkezik, ezért könnyen kombinálható más mérnöki eszközökkel és környezetekkel. Ezek közül kiemelten fontos a Simulinkkel való összekapcsolhatósága, amely lehetővé teszi, hogy a felhasználók saját szabályozási algoritmusait közvetlenül a járműmodellben teszteljék [31]. A Simulinkben megírt vezérlők közvetlenül futtathatók a CarMaker szimulációs környezetében, így támogatja a hardver a hurokban (Hardware in-the-loop- HIL) és a szoftver a hurokban (Software-in-the-loop- SIL) teszteléseket is. Ennek köszönhetően a fejlesztők a valós vezérlőegységeket is bevonhatják a szimulációba [32].

2.4. Matematikai eszközök

Három paramétert vizsgálók (járműtípus, hajtáslánc és forgalmi szituáció), és minden kombinációhoz hat mérés áll rendelkezésre. Ez bőséges lehetőséget ad a statisztikai módszerek hatékony alkalmazására. Az adatok elemzésének alapvető lépése az átlag, a medián és a szórás meghatározása [33].

A dobozdiagram a leíró statisztika egyik alapvető grafikus eszköze, amely szemléletesen mutatja be egy adathalmaz eloszlását. Az ábra központi eleme a doboz, amely az első és a harmadik kvartilis közötti tartományt jelzi. A dobozban elhelyezett vonal a mediánt mutatja, amely a tipikus értéket reprezentálja. A doboz alatt és fölött a minimum- és maximumértékeket jelzik, míg az ezeken kívül eső pontok a kiugró adatok. A dobozdiagram előnye, hogy egyszerre ad információt a központi tendenciáról, a szóródásról és az esetleges szélsőségekről [34].

A sugárdiagram olyan grafikus ábrázolási forma, amely több változó értékeit egy közös közép-pontból kiinduló tengelyen jeleníti meg. Minden tengely egy-egy dimenziót képvisel, és az értékek összekötésével egy sokszög rajzolódik ki. Ez a sokszög vizuálisan mutatja meg, mennyire kiegyensúlyozott vagy éppen torz az adott profil. A sugárdiagram előnye, hogy egyszerre több szempontot lehet vele összehasonlítani. A poligon alakja és területe információt adhat az összesített teljesítményről: nagyobb, szabályosabb terület kiegyensúlyozott és magas szintű eredményt jelez, míg kisebb vagy torz alakzat a gyengébb vagy egyenetlen teljesítményt tükrözi. Emiatt a sugárdiagram különösen hasznos komplex rendszerek összehasonlításánál, ahol több dimenziót kell egyidejűleg figyelembe venni [35].

Egy poligon területének számítása a shoelace (Gauss-féle) képlettel azon az elven alapul, hogy a sokszög polárkoordinátáiból keresztszorzatok összegeként kapható meg a terület, majd ennek abszolút értékét felezzük. Tehát, ha adott n szögek száma, valamint a csúcok (x, y) koordinátái, az (1) egyenlet szerint kiszámítható a terület, amely egy mértékegység nélküli mennyiség, csupán összehasonlíthatósági célból létrehozva:

$$T = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^n (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \right|, \quad (1)$$

ahol: $x_{n+1} = x_1$ és $y_{n+1} = y_1$.

2.5. Módszertan

Dolgozatomban hat különböző típusú jármű fogyasztását vizsgáltam hat különböző hajtáslánccal, négyfajta forgalmi szituációban, ki- és bekapcsolt ACC-állapotban. A szimulációk paramétereit az 1., 2. és 3. táblázatok alapján választottam ki.

A járművek meghajtásához az adott szimuláció során szükséges üzemanyag és elektromos áram-fogyasztás felméréséhez első sorban egységesíteni kell a fogyasztás mértékegységét. Az üzemanyag-fogyasztás mértékegysége l/100km, míg az elektromos energia fogyasztásának a mértékegysége kWh/100km. Ezek között felállítható egy egységes váltószám, amely az üzemanyag-fogyasztást is kWh/100km egységben fejezi ki. [36, 37]

1. táblázat. A szimulációkban felhasznált járműveket ismertető táblázat.

Járműtípus	Járműmodell
Hatchback	Honda Fit
Szedán	BMW 5
Furgon	Mercedes Vito
Pickup	Toyota Tacoma
SUV	Volvo XC90
Kombi	Renault Megane

2. táblázat. A szimulációkban felhasznált hajtáslán-cokat ismertető táblázat.

Hajtáslánc típusa
ICE
PHEV
SHEV
ASHEV
PSHEV
EV

3. táblázat. A szimulációkban felhasznált forgalmi szituációkat ismertető táblázat.

Forgalmi szituáció
Követés sík autópályán
Követés sík országúton
Sebességcsökkentési zóna
Követés változó domborzatú autópályán

3. Megvalósítás

3.1. A Simulink ACC-rendszer

A CarMaker projekt létrehozásakor automatikusan létrejön a Simulink modell is. Ez teszi lehetővé a SIL-működést.

Egy adatbuszon érkeznek az előző szimulációs lépésből kiolvasott járműparaméterek, majd egy másik buszon lépnek ki a modellből a következő lépésbe. A kettő között hoztam létre az ACC-rendszert, amely kiolvassa a bejövő aktuális sebességet, valamint gáz- és fékpedálállásokat. Ezek mellett a rendszer bemeneteihez tartozik még a szimulált szenzor (az elől haladó járműhöz viszonyított távolságot és relatív sebességet adja meg) és az előre beállított referenciasebesség.

Az első főkomponense az ACC-rendszernek az aktiváló egység. Ha a jármű sebessége jelentősen a beállított érték alatt van, nem érdemes bekapcsolni a funkciót, hiszen a kontroller nagyon lassan állna be a referenciasebességre.

A következő elem a referenciasebesség-előállító egység. Ennek meghatározása két lépésben történik. Először a rendszer megvizsgálja, hogy a szenzor érzékel-e elől haladó járművet. Ha igen, a kívánt sebesség az elől haladó jármű sebességének értékét veszi fel, ha ez nem haladja meg az előre beállított sebességet. Ha nincsen jármű a szenzor előtt, akkor a kívánt sebesség az előre beállított sebesség lesz. A kívánt sebesség és az aktuális sebesség különbségéből hibát számít, tehát a szükséges gyorsítás vagy lassítás nagyságát. Második lépésben megvizsgálja a rendszer a kiszámított sebességkülönbség értékét. Ha ez egy minimumon vagy maximumon kívül található, az aktuális sebesség adott szélső értékkel megnövelt vagy csökkentett sebessége értékét veszi fel a referenciasebesség.

Az LQ-kontroller biztosítja a referenciasebesség eléréséhez szükséges gyorsulás kiszámítását. A bemenete a megállapított sebesség különbsége, kimenete egy gyorsulásérték. Offline LQ-szabályozót alkalmaztam, mivel a szimulációk számításai és időigénye túl magas lett volna online kontroller esetén. Így heurisztikus előtesztelések során megállapítottam a kontroller súlyait.

Az utolsó komponens a pedálállás-aktuátor alrendszer. Fő funkciója, hogy a megkapott gyorsulás értéket két tartományra osztja. A pozitív tartományban a gázpedálállás kerül meghatározásra, a negatív tartomány pedig a fékezés mértékét határozza meg. Ezentúl az alrendszer további összetevői egy kapcsoló, amely kikapcsolt ACC esetén a bemenetben megkapott pedálállásokat továbbítja, valamint egy fogyasztásoptimalizálásra beiktatott alrendszerem, amely egy másik jármű követése során, adott sebességkülönbségek esetén, nem avatkozik be semmilyen pedálállással, elkerülve a rövid idő alatt bekövetkező, nagymértékű gyorsításokat és lassításokat.

3.2. Fogyasztásértékek kiértékelése

Ki- és bekapcsolt ACC-vel, minden típus – hajtáslánc – szituáció kombinációban három-három szimulációt futtattam. Az azonos paraméterekkel rendelkező szimulációkból kiolvasott fogyasztásokat átlagoltam, vizsgálva azt is, hogy mennyi idő alatt ért végig a jármű a szimuláción. A szimulációs idők között sosem volt lényeges különbség, ezért a későbbiekben annak vizsgálatától eltekintettem. Az azonos paraméterekkel rendelkező szimulációk átlagfogyasztásaiból megállapítottam egy százalékos különbséget a ki- és bekapcsolt ACC-vel futott szimulációk között. Ennek a nagysága adja meg az általam meghatározott jósági tényező értéket (k_e), amely 1 és 9 között vesz fel értékeket a **4. táblázat** szerint. A jósági tényező segítségével egységesen összehasonlítható az ACC hatékonysága a különböző paraméterrel rendelkező szimulációk között.

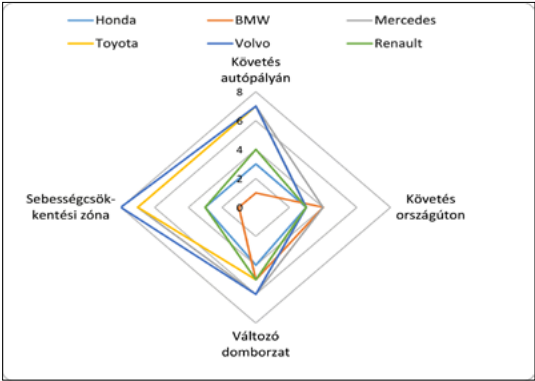
4. táblázat. A k_e érték meghatározására használt segéd táblázat.

Százalékos különbségtartomány	k_e	Százalékos különbségtartomány	k_e
$(-\infty, -14]$	1	$(2, 6]$	6
$(-14, -10]$	2	$(6, 10]$	7
$(-10, -6]$	3	$(10, 14]$	8
$(-6, -2]$	4	$(14, +\infty)$	9
$(-2, 2]$	5		

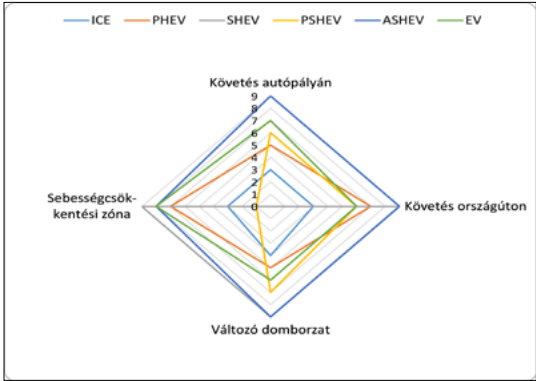
4. Eredmények

A hat különböző hajtáslánc típushoz (ICE – I, PHEV – P, SHEV – S, ASHEV – AS, PSHEV – PS, EV-E) sugárdiagram szerkeszthető. A diagramok területei megadják, hogy miként viszonyulnak egymáshoz a hajtáslánc típusok performanciái. Négy forgalmi szituációban, hat járműtípussal (Honda – H, BMW – B, Mercedes – M, Toyota – T, Volvo – V, Renault – R) vizsgáltam a hajtásláncok közötti különbséget, ezek eredményét az **5. táblázat** mutatja be. Egy tipikus sugárdiagram az **1. ábrán** látható, ez a belsőégésű motoros szimulációk összehasonlítását mutatja be.

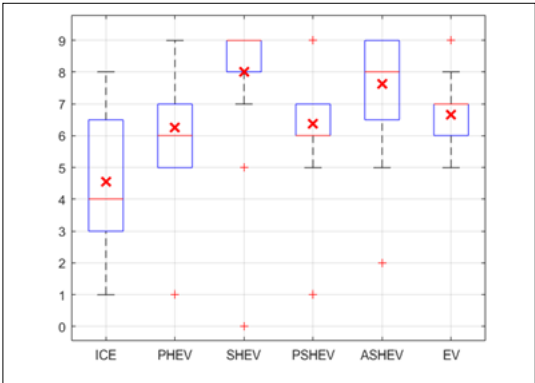
A különböző hajtásláncok teljesítménye a **2. ábrán** látható. A dobozdiagramban hét kiugró érték jelenik meg. Ezek közül az egyik esetben a jármű nem tudta teljesíteni a szimulációt, hiszen lemerült az akkumulátora. Egy hajtáslánc típus kivételével mindegyik 5-ös átlagos jóság fölött van, tehát kedvezőbb az energiafogyasztás, mint kikapcsolt ACC-vel.



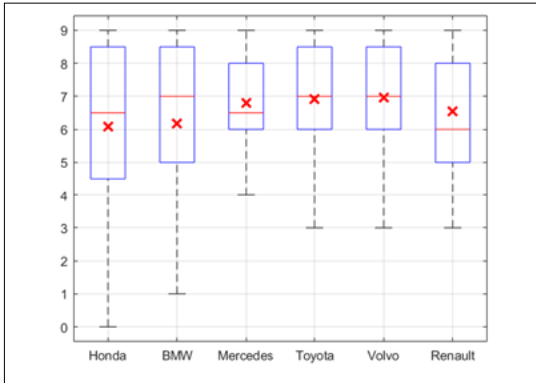
1. ábra. Az ICE sugárdiagramja különböző járműtípusok és forgalmi szituációk alapján



3. ábra. Hatchback sugárdiagramja különböző hajtáslánctípusok és forgalmi szituációk alapján



2. ábra. A hajtáslánck alapján összehasonlított eredmények dobozdiagram segítségével



4. ábra. A járműtípusok alapján összehasonlított eredmények dobozdiagram segítségével

5. táblázat. A különböző hajtáslánctípusok alapján összehasonlított szimulációk sugárdiagramjainak területei

	I	P	S	AS	PS	E
H	21	70	81	45	153	91
B	15	70	136	84	93	84
M	71	82	127	90	102	78
T	60	90	117	96	108	97
V	71	84	153	82	96	97
R	27	66	144	82	135	84

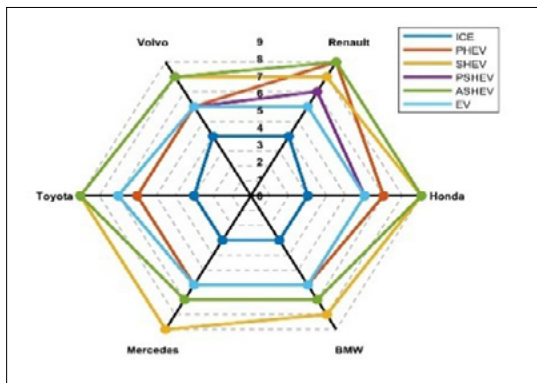
Hasonlóan az előbbiekhöz, a különböző járműtípusok összehasonlításában is alkalmazható a sugárdiagram terület-összehasonlítás módszere. A járműtípusok közötti különbséget négy forgalmi szituációban, hat hajtáslánctípussal (ICE – I, PHEV – P, SHEV – S, ASHEV – AS, PSHEV – PS, EV-E) végeztem, az eredményt a 6. táblázat szemlélteti. A hatchback-típusú jármű sugárdiagramja a 3. ábrán látható.

6. táblázat. A különböző járműtípusok alapján összehasonlított szimulációk sugárdiagramjainak területei

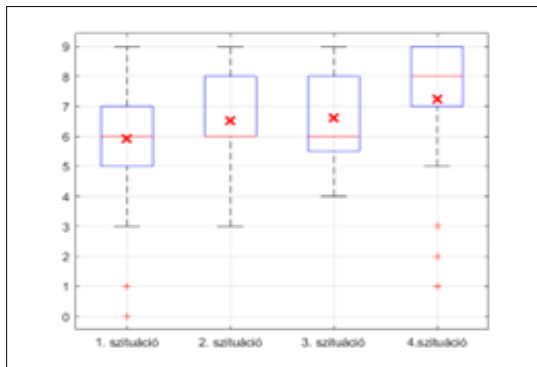
	H	B	M	T	V	R
I	21	15	71	60	71	27
P	70	70	82	90	94	66
S	81	136	127	117	153	144
AS	45	84	90	96	82	82
PS	153	93	102	108	96	135
E	91	84	78	97	97	84

A különböző hajtáslánck teljesítménye a 4. ábrán látható. Az összes autótípus átlagos jóssága 6 és 7 között van, szóval átlagosan 2–10%-kal jobb az autók fogyasztása, ha be van kapcsolva az ACC-rendszer. Ez azt jelenti, hogy kiegyensúlyozottan működik az ACC-rendszer, járműtípustól függetlenül. A forgalmi szituációösszehasonlításakor is a fentiek szerint jártam el. A négy szituációt (köve-

tés autópályán – 1., követés országúton – 2., követés változó domborzatú autópályán – 3., sebességcsökkentési zóna – 4.) hat járműtípus esetén, rendre hat hajtáslánc típussal (ICE – I, PHEV – P, SHEV – S, ASHEV – AS, PSHEV – PS, EV – E) vizsgáltam, aminek az eredményét a 7. táblázat ismerteti. A követés országúton elnevezésű forgalmi szituáció sugárdiagramját az 5. ábra mutatja be.



5. ábra. Követés országúton nevű forgalmi szituáció sugárdiagramja különböző hajtáslánc típusok és járműtípusok alapján



6. ábra. A forgalmi szituációk alapján összehasonlított eredmények dobozdiagram segítségével.

7. táblázat. A különböző forgalmi szituációk alapján összehasonlított szimulációk sugárdiagramjainak területei.

	1.	2.	3.	4.
I	64	29	69	64
P	64	115	91	139
S	90	187	180	210
AS	88	103	104	130
PS	148	173	141	143
E	99	98	110	159

A különböző forgalmi szituációkban elért teljesítmények a 6. ábrán láthatók. Az összes forgalmi szituáció esetén legalább 2%-os növekedést tapasztalható, tehát az esetek többségében a jószág 6. A 4. szituációban kiemelkedően magas a teljesítmény mutató, valamint az 1. szituációban a legalacsonyabb ez. A 2. és 3. szituációban egymáshoz nagyon közeli a jellemző. Ebből a szórásból azt a következtetést lehet levonni, hogy az ACC-rendszer nem működik kiegyensúlyozottan a forgalmi szituációkat tekintve.

5. Következtetések

Minden járműtípusra, hajtáslánc típusra és forgalmi szituációra minél nagyobb és minél egymáshoz közelebb sugárdiagram-összterület-értékek jelentik egy univerzálisan sikeres ACC-tervezést.

Mind a három vizsgált paraméter esetében kiszámítottam a maximális lehetséges területek összegét, majd megvizsgáltam, hogy az elért összterületek a három esetben hogyan viszonyulnak az adott maximumhoz, megadva egy végső teljesség (T_v) mutatót. Ennek eredménye a 8. táblázatban látható. Mindegyik teljességmutató 50% fölött van, ami energiahatékonyság-javulásként értelmezve kb. 4.6%-os növekedést jelent. Tehát kijelenthető, hogy a tervezett ACC-rendszer sikeres, de bőven van hely még a fejlődésnek.

8. táblázat. T_v -értékek a három vizsgált paraméter esetén.

Vizsgált paraméter	T_v (%)
Járműtípus	54.66
Hajtáslánc típus	54.67
Forgalmi szituáció	55.64

A továbbfejlesztés terén többféle módon lehetne elindulni. Egyrészt, az ACC tovább hangolható egy specifikus vagy több paraméterre. De az ACC-rendszer is további fejlesztéseknek vethető alá, mint például egy teljes longitudinális önvezető rendszerré alakítás (nagy gyorsítási és lassítási szituációk hatékony leereagálása, start/stop funkció stb.), vagy pedig laterális modellbe való implementálás (oldalirányú gyorsulás figyelembevétele). Az LQ-kontroller is tovább fejleszthető több bemeneti paraméter létrehozásával, például pedálállás-különbség, vagy gyorsuláskülönbség. Egy másik továbbfejlesztési irány a teljesítmény mutató komplexitásának növelése, például a károsanyagkibocsátás-vizsgálat vagy a hajtóanyag előállításának a költsége.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Rajamani R.: *Vehicle Dynamics and Control*. 2. kiadás. Springer Science & Business Media, New York, NY, USA, 2011.
- [2] Guanetti J., Kim Y., Borrelli F.: *Control of Connected and Automated Vehicles: State of the Art and Future Challenges*. Annual Review of Control, Robotics and Autonomous Systems, 45. (2018) 18–40. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2018.04.011>
- [3] Zhou Q., Du J., Zhao D.: *Integrated Energy Management and Control of Hybrid Electric Vehicles: A Review*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 21/6. (2019) 2576–2589. <https://doi.org/10.1109/ITITS.2019.2917454>
- [4] Enstrat.hu: *Az elektromos és a hibrid autók értékesítési részaránya Magyarországon*. 2024. <https://www.enstrat.hu/blog/az-elektromos-es-a-hibrid-autok-ertekesitesi-reszaranya-magyarorszagon> (letöltve: 2025. 12. 15.).
- [5] Ministry of Natural Resources Canada, AutoSmart - learn the facts: Fuel Consumption and CO₂. 2014. (letöltve: 2025. 12. 15.). https://natural-resources.canada.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/oe/pdf/transportation/fuel-efficient-technologies/autosmart_factsheet_6_e.pdf
- [6] BEUC – The European Consumer Organisation, A Turning Point for Consumers' Electric Mobility. 2025. (letöltve: 2025. 12. 15.). https://www.beuc.eu/sites/default/files/publications/BEUC-X-2025-078%20TCO%20Study_Automotive%20Dialogue_Summary.pdf
- [7] European Commission, Fit for 55 Package. 2021. https://ec.europa.eu/clima/policies/fit-for-55_hu (letöltve: 2025. 12. 15.).
- [8] van Basshuysen R., Schäfer F.: *Internal Combustion Engine Handbook: Basics, Components, Systems and Perspectives*. SAE International, 2016.
- [9] Spierling T., Lents C.: *Parallel Hybrid Propulsion System for a Regional Turboprop: Conceptual Design and Benefits Analysis*. In: 2019 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS). 2019. 1–7. <https://doi.org/10.2514/6.2019-4466>
- [10] Capata R.: *Urban and Extra-Urban Hybrid Vehicles: A Technological Review*. Energies, 11/11. (2018) 2924. <https://doi.org/10.3390/en11112924>
- [11] Trapp C., Böhme M.: *Innovative, Modular Serial Hybrid Concept for a Highly Efficient, Clean Automotive Powertrain*. In: 22. Internationales Stuttgarter Symposium. (Szerk.: Bargende M., Reuss H.-C., Wagner A.). Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2022. 124–141.
- [12] Nissan Motor Co. Ltd.: *e-Power System for Pure Electric Drive in Nissan Note* Technical Review. Nissan Technical Review, 87/SP2. (2021) https://www.nissan-global.com/EN/TECHNICAL-REVIEW/pdf/topic/NISSAN_TECHNICAL_REVIEW_87_En_SP2.pdf (letöltve: 2025. 10. 01.).
- [13] Benevieri A. és tsai.: *Series Architecture on Hybrid Electric Vehicles: A Review*. Energies, 14/22. (2020) 7672. <https://doi.org/10.3390/en14227672>
- [14] Zulkifli S. A. és tsai.: *Impact of Motor Size & Efficiency on Acceleration, Fuel Consumption & Emissions of Split-Axle Through-the-Road Parallel Hybrid Electric Vehicle*. In: Automotive Engineering and Mobility Research. Trans Tech Publications Ltd, 663. 2014. 498–503. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.663.498>
- [15] Liu J., Peng H.: *Modeling and Control of a Power-Split Hybrid Vehicle*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 16/6. (2008) 1242–1251.
- [16] Xue H., Li L.: *Motion, Static Force, and Efficiency Analysis of Planetary Gear Transmission Based on Graph Theory*. Applied Sciences, 13/19. (2022) 10983. <https://doi.org/10.3390/app131910983>
- [17] Bayindir K. Ç., Gözükcük M. A., Teke A.: *A Comprehensive Overview of Hybrid Electric Vehicle: Powertrain Configurations, Powertrain Control Techniques and Electronic Control Units*. Energy Conversion and Management, 52/2. (2011) 1305–1313. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.09.028>
- [18] International Energy Agency, Global EV Outlook 2025. Paris, 2025. (letöltve: 2025. 12. 15.). <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>
- [19] Gobbi M. és tsai.: *Traction Motors for Electric Vehicles: Maximization of Mechanical Efficiency – A Review*. Applied Energy, 357. (2024) 122496. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122496>
- [20] Requia W. J. és tsai.: *How Clean are Electric Vehicles? Evidence-Based Review of the Effects of Electric Mobility on Air Pollutants, Greenhouse Gas Emissions and Human Health*. Atmospheric Environment, 185. (2018) 64–77. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.04.040>
- [21] Chan C. C.: *The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles*. Proceedings of the IEEE, 95/4. (2007) 704–718. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2007.892489>
- [22] European Commission – European Road Safety Charter, Mandatory Drivers Assistance Systems Expected to Help Save over 25,000 Lives by 2038. 2024. <https://roadsafety-charter.ec.europa.eu/content/mandatory-drivers-assistance-systems-expected-help-save-over-25000-lives-2038> (letöltve: 2025. 10. 08.).
- [23] Koylu H., Tural E.: *Experimental Study on Braking and Stability Performance during Low Speed Braking with ABS under Critical Road Conditions*. Engineering Science and Technology, an International Journal, 24/5. (2021) 1224–1238. <https://doi.org/10.1016/j.jestech.2021.02.001>
- [24] Li B. és tsai.: *Lane-Keeping System Design Considering Driver's Nervousness via Scene Analysis*. IET Intelligent Transport Systems, 14/10. (2020) 1171–1182. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2019.0518>

- [25] Chaudhary P., Chandratre A., Bhatjire A.: *Study of Cruise Control System Used Vehicle*. International Journal of Advanced Research in Science and Engineering. (2016) (letöltve: 2025. 12. 15.) https://www.ijarse.com/images/fullpdf/1459175279_248N.pdf.
- [26] MathWorks, Adaptive Cruise Control System Using Model Predictive Control. <https://www.mathworks.com/help/mpc/ug/adaptive-cruise-control-using-model-predictive-controller.html> (letöltve: 2025. 10. 08.).
- [27] Travelers Risk Control, 3-Second Rule for Safe Following Distance. 2024. <https://www.travelers.com/resources/auto/travel/3-second-rule-for-safe-following-distance> (letöltve: 2025. 12. 15.).
- [28] de Winkel K. N. és tsai.: *Standards for Passenger Comfort in Automated Vehicles: Acceleration and Jerk*. ScienceDirect, 2022.
- [29] Lewis F. L., Vrabie D., Syrmos V. L.: *Optimal control: Wiley Interscience Series in Systems and Control*. 3. ed. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2012.
- [30] Kirk D. E.: *Optimal Control Theory: an Introduction*. Dover Publications, Mineola, NY, 2004.
- [31] Arcidiacono A., ADAS Virtual Validation: ACC and AEB Case Study with IPG. 2018. (letöltve: 2025. 12. 15.) <https://webthesis.biblio.polito.it/8276/1/tesi.pdf>
- [32] IPG Automotive GmbH, CarMaker – Virtual Test Driving Software for Passenger Cars and Light-Duty Vehicles. 2025. <https://www.ipg-automotive.com/en/products-solutions/software/carmaker/> (letöltve: 2025. 11. 05.).
- [33] Massachusetts Institute of Technology, Introduction to Descriptive Statistics. 2015. https://web.mit.edu/~17.871/www/2015/02descriptive_stats_2015.pdf (letöltve: 2025. 11. 19.).
- [34] McLeod S.: *Reading a Box and Whisker Plot*. 2025. <https://www.simplypsychology.org/boxplots.html> (letöltve: 2025. 11. 19.).
- [35] FasterCapital: *Visualization Techniques: Radar Charts - Comparing Multivariate Data with Radar Charts*. 2025. (letöltve: 2025. 11. 19.).
- [36] Puma-Benavides D. S. és tsai.: *Comparative Analysis of Energy Consumption between Electric Vehicles and Combustion Engine Vehicles in High-Altitude Urban Traffic*. 2024. (letöltve: 2025. 12. 15.). <https://www.mdpi.com/2032-6653/15/8/355>
- [37] Muñoz P. és tsai.: *Comparative Analysis of Cost, Emissions and Fuel Consumption of Diesel, Natural Gas, Electric and Hydrogen Urban Buses*. Energy Conversion and Management, 257. (2022) 115412. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115412>