

UNIVERZA V LJUBLJANI

Fakulteta za elektrotehniko

Gorazd Lampič

**Analiza uvajanja električnih pogonov v različne vrste vozil in
zasnova pogona za sodobni mestni električni hibridni avto (SMEH)**

MAGISTRSKO DELO

Mentor: prof. dr. Tomaž Slivnik

Somentor: prof. dr. Janez Nastran

Ljubljana, 2006

Zahvala

Mentorju prof. dr. Tomažu Slivniku se zahvaljujem za vso pomoč tekom podiplomskega študija, somentorju prof. dr. Janezu Nastranu pa za spodbudo in napotke pri izdelavi magistrskega dela.

Andreju Deteli sem hvaležen za uvajanje v holistični način obravnavanja narave, širše razumevanje pomena tehnologije in znanje na področju električnih pogonov.

Celi družini se zahvaljujem za moralno in materialno podporo.

Robertu Žerjalu, Stojanu Markiču, Dušanu Teršiču, Mitji Klančiču, Igorju Kljunu in celi prototipni delavnici Iskre Avtoelektrike se zahvaljujem za sodelovanje pri razvoju novih električnih pogonov, Urošu Pavasoviču za vse nazorne skice električnih vozil, Mateju Guidu za fotografije, Stuartu Dohertyju za pomoč pri angleškem prevodu povzetka, vsem drugim prijateljem in sodelavcem pa za konstruktivne debate in spodbudo.

Kazalo

Povzetek	4
Abstract	5
Povzetek	6
1. Uvod	7
1.1 Razlaga osnovnih pojmov	8
1.2 Nove tehnologije na področju električnih vozil	9
1.2.1 Tehnologije vodika	9
1.2.2 Hibridni pogonski sistemi	9
1.2.3 Prehod na električni pogon	9
1.3 Ekološko-ekonomski vidiki vpeljave električnih avtomobilov	10
1.3.1 Škodljivost emisij	10
1.3.2 Emisije vozil	11
1.4 Motivacija za razvoj električnih vozil	12
2. Fizikalna analiza vožnje različnih vrst vozil	13
2.1 Osebni avtomobil	13
2.1.1 Podatki in vozne zahteve osebnega avtomobila	13
2.1.2 Sile, navori in frekvence pri vožnji osebnega avtomobila	15
2.1.3 Moč pogona osebnega avtomobila	16
2.2 Majhen mestni avtomobil	19
2.1.1 Podatki in vozne zahteve mestnega avtomobila	19
2.1.2 Sile, navori in frekvence pri vožnji mestnega avtomobila	20
2.1.3 Moč pogona mestnega avtomobila	21
2.3 Mestni avtobus	23
2.1.1 Podatki in vozne zahteve avtobusa	23
2.1.2 Sile, navori in frekvence pri vožnji avtobusa	24
2.1.3 Moč pogona avtobusa	25
2.4 Skuter	27
2.1.1 Podatki in vozne zahteve skuterja	27
2.1.2 Sile, navori in frekvence pri vožnji skuterja	28
2.1.3 Moč pogona skuterja	29
2.5 Ostala vozila	31
2.5.1 Kolo s pedali	31
2.5.2 Viličarji	31
2.5.3 Ultralahko letalo	31
2.6 Povzetek tehničnih razlik med posameznimi vrstami vozil	32

3.	Sodobne tehnologije na področju električnih vozil	34
3.1	Viri energije	34
3.1.1	Motorji z notranjim izgorevanjem	34
3.1.2	Akumulatorji	35
3.1.3	Gorivne celice	36
3.1.4	Kondenzatorji	37
3.1.5	Sončne celice	38
3.1.7	Ostali energijski viri	38
3.2	Vodik in druga goriva	38
3.2.1	Vodik v plinastem agregatnem stanju	39
3.2.2	Vodik v tekočem agregatnem stanju	40
3.2.3	Vodik v trdnem agregatnem stanju	40
3.2.4	Primerjava različnih goriv	41
3.3	Elektromotorji	41
3.3.1	»In-wheel« elektromotorji	42
3.4	Značilnosti novih tehnologij	42
4.	Pogonske arhitekture in primeri električnih vozil	43
4.1	Električna vozila z enim samim energijskim virom	43
4.1.1	Akumulatorska vozila	43
4.1.2	Vozila na gorivne celice	44
4.2	Hibridna vozila	44
4.2.1	Vzporedni hibrid - motor z notranjim izgorevanjem in akumulator	45
4.2.2	Zaporedni hibrid - motor z notranjim izgorevanjem in akumulator	46
4.3	Električni hibridi	46
4.3.1	Gorivna celica in akumulator	46
4.3.2	Gorivna celica in kondenzator	47
4.3.3	Akumulator in kondenzator	47
4.4	Direktni pogon	47
4.5	Značilnosti obstoječih električnih vozil	49
5.	Analiza možnih zasnov pogona	50
5.1	Preprosta pogonska arhitektura z enim samim virom energije	51
5.2	Klasični hibridni pogoni z motorjem z notranjim izgorevanjem	52
5.2.1	Energijska zaloga osebnega avtomobila	52
5.2.2	Energijska zaloga mestnega avtomobila	53
5.2.3	Energijska zaloga mestnega avtobusa	54
5.2.4	Energijska zaloga skuterja	54
5.2.5	Povzetek o zahtevah za sekundarni energijski vir	55
5.2.6	Možne zasnove klasičnih hibridnih pogonov	55
5.3	Električni hibridi	57
5.4	Razlogi za razvoj električnih mestnih avtomobilov	58

6.	Zasnova pogona v električnem mestnem avtomobilu SMEH	59
6.1	Zastavljeni cilji	59
6.2	Izbira elektromotorjev	59
6.2.1	Obremenjenost motorjev	59
6.3	Energijski vir	62
6.3.1	Moč	62
6.3.2	Energija	64
6.3.3	Koncept in komponente	65
6.4	Parametri vira energije	66
6.4.1	Klasični hibrid	67
6.4.2	Klasični hibrid brez brezemisijske avtonomije	68
6.4.3	Električni hibrid	69
6.5	Upravljanje energijskih virov	71
7.	Rezultati	72
7.1	Najpomembnejši elementi pri uveljavljanju različnih EV	72
7.2	Možne zasnove in parametri različnih EV	73
7.3	Kriteriji in parametri energijskih virov v mestnem avtomobilu	73
7.4	Klasični hibridni mestni avtomobil	74
7.5	SMEH	74
8.	Zaključek	76
9.	Viri	77
9.1	Električna vozila	77
9.2	Viri energije	77
9.3	Električni pogoni, krmilniki in elektronika	79
9.4	Arhitektura in optimizacija pogonov	80
9.5	Ekologija, ekonomija in družba	81
9.6	Energetika, materiali in ostalo	82
9.7	Patenti	83

Povzetek

Z analizo fizikalnih parametrov vožnje in karakteristikami sodobnih tehnologij sem izračunal izhodišča za parametre električnih pogonskih sistemov v različnih vozilih. Analiziral sem osebne avtomobile, mestne avtomobile, mestne avtobuse in skuterje, pri virih energije pa sem se osredotočil na motorje z notranjim izgorevanjem, gorivne celice, kondenzatorje ter štiri vrste akumulatorjev. Samostojni energijski viri se izkažejo za uporabne le pri skuterjih, pri ostalih aplikacijah pa predstavlja boljšo rešitev hibridni vir energije. Prehod s klasičnega na električni pogon prinese največje prednosti pri mestnih avtomobilih, kjer je razmerje med zahtevanima največjo in trajno močjo 9,68, z regenerativnim zaviralnim sistemom pa prihranimo 15% energije.

Zaradi zanimivih tehničnih, ekoloških in ekonomskih lastnosti sem se v podrobnejših analizah osredotočil na mestni avto, ki sem ga poimenoval SMEH (sodobni **mestni električni hibrid**). Upošteval sem spreminjajoči izkoristek elektromotorjev v različnih delovnih režimih in najbolj stroge vozne zahteve ter zasnoval sodoben pogonski sistem z direktnim pogonom. Predlagani energijski vir sestavljajo 4,9kW gorivna celica, 35,5kg težek litij-polimer akumulator in 104kg težek rezervoar s 3,2kg vodika v plinastem agregatnem stanju. SMEH doseže največjo hitrost prek 120km/h, trajno pa lahko vzdržuje hitrost prek 60km/h. Ima odlične pospeške, saj do 60km/h pospeši v 6s, do 100km/h pa v 14s. Prevozi lahko tudi klanec z naklonom prek 25%, odlikuje pa se tudi z nizko porabo energije 107,5Wh/km in nizko ceno vožnje 0,0313EUR/km (ob uporabi vodika) in celo 0,004EUR/km ob polnjenju iz omrežja.

Poleg osnovnih rezultatov sem prišel še do nekaterih splošnih spoznanj v povezavi z viri energije v hibridnih pogonskih sistemih. Primarni vir je lahko bistveno šibkejši od sekundarnega, kar v primeru uporabe gorivne celice izrazito zniža ceno. Med štirimi kriteriji za sekundarni vir energije se za najstrožjega v večini klasičnih hibridnih pogonov izkaže zagotavljanje zadostne brezemisijske avtonomije, med električnimi hibridi pa predstavlja največjo oviro specifična moč energijskega vira. Življenjska doba akumulatorjev predstavlja oviro le pri pogonu mestnega avtobusa, zaloga energije za kratkotrajno povečanje moči med samo vožnjo pa pri akumulatorjih ne predstavlja resne ovire. Kondenzatorji so odlični s stališča dolge življenjske dobe, vendar jih zaradi majhne zaloge energije še ne moremo učinkovito uporabiti samostojno.

Abstract

I have calculated the basic parameters of electric propulsion systems in different electric vehicles. The results are based on driving analysis of different types of vehicles (car, small urban car, bus and scooter) and characteristics of energy sources (internal combustion engines, fuel cells, capacitors and four different types of batteries). Hybrid propulsion is shown to be the best solution in all applications. However, a scooter can also be designed efficiently by a single energy source. The highest added value of transition from classical to electrical propulsion has been found in small urban cars, where ratio between peak and average required power is 9.68 and range of the vehicle can be increased by 15% by a regenerative braking system.

Due to technical, ecological and economic properties, I have analysed the urban car more in detail by taking into account changing the electric motor efficiency in different driving regimes. Optimum energy source can be designed by using 4.9kW fuel cell, 35.5kg of high specific power lithium-polymer battery, 104kg of hydrogen storage tanks with 3.2kg of gaseous hydrogen and four “in-wheel” motors. Such car can achieve top speed of 120km/h, continuous speed of 60km/h, it can accelerate from stand still to 60km/h in 6s and it reaches 100km/h in 14s. It is energy efficient since it spends only 107.5Wh/km. Driving cost per km are 0.0313EUR if hydrogen is used and 0.004EUR if it is charged directly from power grid.

Beside these basic results I have derived some other conclusions. The primary energy source in the hybrid system can be less powerful than the secondary source. This significantly reduce the cost if fuel cells are used. A zero emission range is the most restrictive criteria for the secondary energy source in classical hybrid propulsion system and peak power is the most restrictive in electrical hybrid systems. The lifetime of batteries may represent a possible difficulty only in an electric bus application. Batteries also contain enough energy for short periods of high power driving. Due to low energy density, capacitors can be efficiently used only in a combination with batteries.

Predgovor

V magistrskem delu bom proučil tehnične možnosti za uvajanje električnih pogonov v različna vozila in predstavil novo pogonsko arhitekturo za sodobni mestni električni avto.

Hibridni pogoni, tehnologije vodika in gorivnih celic ter druge tehnologije obetajo velik ekološki napredek, vendar v nekaterih tehničnih lastnosti še ne dosegajo uveljavljenih klasičnih tehnologij. Predvsem po dosegu oziroma avtonomiji so električna vozila, v primerjavi s klasičnimi, še v zelo podrejenem položaju. Razvoj na tem področju je usmerjen v izboljšave posameznih členov pogonskega sistema in optimizacijo pogonske arhitekture. Pestrost izbire komponent in možnosti povezovanj v različne arhitekture nam pri nekaterih vrstah vozil že sedaj omogoča razvoj konkurenčnega električnega vozila.

V uvodu bom pojasnil motivacijo za delo na področju električnih vozil, prednosti postopne elektrifikacije voznega parka in tehnične izzive, ki spremljajo raziskovalno in razvojno delo. Fizikalna analiza zakonitosti vožnje različnih vrst vozil, ki jo bom predstavil v drugem poglavju, nam bo služila za izhodišče pri zasnovi pogonskih sistemov. V tretjem poglavju bom predstavil splošne značilnosti novih tehnologij, v četrtem pa različne pogonske arhitekture in prototipe električnih vozil. Na osnovi tehničnih zahtev in obstoječih možnosti bom v petem poglavju izračunal približne parametre energijskih virov pogonskih sistemov posameznih vozil ter na osnovi prednosti, ki jih v posamezni aplikaciji prinese prehod na električni pogon, izbral vrsto vozila, pri kateri je nadaljnji razvoj trenutno najbolj upravičen.

Kot najzanimivejšo aplikacijo bom v šestem poglavju podrobneje obravnaval sodobni mestni električni hibridni avto in zanj zasnoval pogonsko arhitekturo z direktnim pogonom in zaporednim energijskim virom, v katerem prevladuje akumulator. Po srečno izbranih začetnicah in človeku ter okolju prijaznih lastnostih imenujmo to vozilo SMEH. Povzetek rezultatov sledi v sedmem poglavju, zaključil pa bom s predlogi za nadaljnje delo.

Zaradi preglednosti sem vire, ki sem jo uporabil pri raziskavah, pregledno zložil po posameznih tematikah, na enak način pa sem jih priložil tudi na zgoščenki. V besedilu se na vire sklicujem v oglatih oklepajih, kjer oznaki vira sledijo še avtorji in leto izida.

1. Uvod

Ekološki problemi od nas zahtevajo, nove tehnologije nam omogočajo, politično ekonomski dejavniki pa nas spodbujajo k razvoju, proizvodnji in uporabi prijaznejših in učinkovitejših prevoznih sredstev. Uspešna uveljavitev radikalnih inovacij v avtomobilski industriji zahteva široke in temeljite študije tehničnih, ekonomskih in družbenih dejavnikov. Pri razvoju električnih vozil so zaželjene sveže ideje, saj miselna obremenjenost z že uveljavljenimi koncepti zavira ustvarjalnost, ki je potrebna za realizacijo vseh prednosti prehoda na električne pogone. V magistrskem delu si bomo ogledali sodobne tehnologije in ekološko-ekonomske dejavnike ter zasnovali novo arhitekturo pogonskega sistema za električni mestni avtomobil.

Mednarodne študije vplivov na okolje kažejo, da je promet največji onesnaževalec zraka in da vpliva na podnebne spremembe ter zdravje ljudi, živali in rastlin. Zaradi pričakovane rasti motornega prometa v razvijajočih se državah, je razvoj okolju prijaznih električnih vozil pomemben korak za vse človeštvo.

Hitro razvijajoče se tehnologije vodika, gorivnih celic, sodobnih akumulatorjev, električnih pogonov ter novih materialov, obetajo postopno povečanje števila električnih prevoznih sredstev. Vsi večji avtomobilski proizvajalci razvijajo električna in hibridna vozila, ki se že ponašajo s spodobnimi voznimi lastnostmi.

Ovisnost od fosilnih goriv povzroča politične konflikte, težko obvladljive cene naftnih derivatov pa zavirajo gospodarsko rast. Geološke napovedi se razlikujejo le v količini zalog, vodenje gospodarstva ob zaostrovanju dostopnosti fosilnih goriv in njihovih cen pa predstavlja še nerešen izziv za vlade vseh držav. Mnoge razvite države se že zavedajo, da človeštvo potrebuje dolgoročno rešitev za prekinitev odvisnosti od fosilnih goriv in intenzivno spodbujajo raziskave in razvoj alternativnih virov in učinkovite rabe energije. Tudi mi prispevamo delček v tem mozaiku.

V magistrskem delu bom raziskal tehnične možnosti in širše družbene koristi vpeljave električnih pogonov v različne vrste vozil. Ekonomski, ekološki in tehnični dejavniki kažejo na dejstvo, da bi v evropskem prostoru v tem času največji preboj predstavljala uveljavitev preprostega ekološkega mestnega avtomobila. V ta namen bom podrobneje predstavil novo arhitekturo pogona za sodobni **mestni električni hibridni avtomobil (SMEH)**, ki na izviren način združuje dobre lastnosti obstoječih tehnologij. Optimalno tehnološko rešitev predstavlja direktni pogon brez mehanskih prenosov, ki ga napaja hibridni energijski vir, v katerem po moči prevladuje akumulator.

1.1 Razlaga osnovnih pojmov in okrajšav

električno vozilo (EV)	-vozilo z delnim ali celotnim električnim pogonom
klasično vozilo	-običajno vozilo s centralnim toplotnim motorjem
ICE	-motor z notranjim izgorevanjem
arhitektura pogona	-povezave med pogonskimi komponentami
hibridni pogon	-pogon z dvema ali več različnimi vrstami pogonov
hibridni vir energije	-kombinacija dveh ali več različnih virov energije
klasični hibrid	-hibrid z motorjem z notranjim izgorevanjem
električni hibrid	-hibrid z gorivno celico
vzporedni hibrid	-energija iz različnih virov teče vzporedno
zaporedni hibrid	-energija teče skozi vse vire zaporedno
primarni vir energije	-vir v hibridnem sistemu z večjo zalogo energije
sekundarni vir	-vir v hibridnem sistemu z manjšo zalogo energije
avtonomija	-doseg vozila z enim polnjenjem
brezemisijski doseg	-doseg vozila brez povzročanja emisij
gorivna celica (GC)	-elektro-kemijski element v katerem ob spajanju vodika in kisika nastaja električna energija
PEM	-tip nizko temperaturne GC (Proton Exchange Membrane)
PEFC	-isto kot PEM, le da tu iz besed (Polimer Electrolyte Fuel Cell)
SOFC	-tip visoko temperaturne gorivne celice (Solid Oxide Fuel Cell)
ICE	-motor z notranjim izgorevanjem (Internal Combustion Engine)
Li	-Litij
Pb	-Svinec
LiMH	-Litij metal hidrid
regenerativno zaviranje	-zavorni sistem, pri katerem lahko del sproščene energije uporabimo za polnjenje vira energije

1.2 Nove tehnologije na področju električnih vozil

V električnih in hibridnih vozilih se uveljavljajo predvsem novi energijski viri, nove pogonske arhitekture, izboljšani električni pogoni in sodobni materiali. Poglejmo si njihove najpomembnejše značilnosti.

1.2.1 Tehnologije vodika

Vodik najpogosteje pridobivamo z elektrolizo vode ali reformingom plinastih ogljikovodikov, uporabljamo pa ga za shranjevanje energije. Običajno ga shranjujemo pod visokim tlakom v plinastem stanju, kot tekočino pri nizkih temperaturah ali absorbiranega v trdnih snoveh.

Gorivna celica (GC) je bateriji podoben elektro-kemijski element, kateremu sprti dovajamo gorivo. Ob spajanju vodika s kisikom (uporabimo lahko kar zrak) v gorivni celici nastaja električna energija in stranski produkt voda. Srce gorivne celice predstavljajo membrana za prenos naboja, elektrodi, katalizator ter bipolarne plošče za prenos električnega toka in dovod goriva. Delovanje sistema omogočajo periferni sistemi, kot so elektronika, sistem za vpihavanje goriva in zraka, reformer in druge komponente.

1.2.2 Hibridni pogonski sistemi

Centralni motor mora klasičnemu vozilu zagotoviti dobre vozne lastnosti v najzahtevnejšem delovnem območju (visok navor in moč) kljub temu, da so ti pogoji med običajno vožnjo relativno redki. Največji del časa ostane velika moč motorja neizkoriščena, delovanje pri nizkih močeh pa je zaradi predimenzioniranosti manj učinkovito.

Hibridni pogonski sistem združuje več različnih tipov pogona (običajno dva), ki skupaj zagotavljajo učinkovito delovanje v različnih delovnih zahtevah. Trenutno so najbolj pogoste kombinacije vzporedno povezanega motorja z notranjim izgorevanjem in električnega pogona. Toplotni motor je lahko majhen, ob kratkotrajnih potrebah po večji moči pa mu pomaga elektromotor. Električni pogon lahko ob speljevanju ali ob počasnejši vožnji kratek čas deluje tudi samostojno.

Prednost hibridnega pogona je v boljšem izkoristku in posledično manjši porabi goriva, slabost pa v podvajanju komponent, kar vpliva predvsem na povišanje teže in cene vozila.

1.2.3 Prehod na električni pogon

Izjemne lastnosti tekočih fosilnih goriv in stoletni razvoj klasičnih vozil predstavljata visoke tehnične zahteve za uveljavitev novih tehnologij na področju avtomobilske industrije, zato je za učinkovit prehod na električni pogonski sistem potrebno izkoristiti vse prednosti novih tehnologij. Nove pogonske arhitekture in sodobne tehnologije omogočajo čistejše, tišje in cenejše delovanje, alternativne dizajne, v nekaterih aplikacijah pa tudi boljše vozne lastnosti in nižjo ceno vozila.

Največja slabost električnih vozil (EV) izvira iz nepoznavanja učinkovitega skladiščenja električne energije, odraža pa se v nizkem dosegu oziroma avtonomiji. Energija je v EV običajno shranjena v akumulatorjih, ki imajo pri današnji stopnji razvoja

50 do 200 krat manjšo energijsko gostoto kot tekoči ogljikovodiki, to pa kljub odličnim izkoristkom elektromotorjev še ne zagotavlja zadostne avtonomije. Najsodobnejša EV imajo energijo skladiščeno v obliki vodika, kar pa je nepraktično s stališča varnosti in distribucije.

Električni pogon se bo lahko najprej uveljavil v tistih vozilih, kjer je obstoječi klasični pogon najslabši. Tehnično gledano so to vozila z majhno močjo, ki ne potrebujejo velike avtonomije. Široka izbira pogonskih komponent (motor z notranjim izgorevanjem (ICE), gorivne celice, akumulatorji, kondenzatorji, različna goriva in metode skladiščenja, različni tipi elektromotorjev...) in različni načini povezovanja (vzporedno, zaporedno...) omogočajo veliko različnih pogonskih arhitektur. Z optimizacijo dimenzij pogonskih komponent lahko še dodatno izboljšamo splošne lastnosti vozila. Nove pogonske arhitekture omogočajo tudi večjo svobodo pri oblikovanju vozila, kar električnim vozilom omogoča dobre aerodinamične oblike in prijeten izgled.

1.3 Ekološko-ekonomski vidiki vpeljave električnih avtomobilov

Električna vozila predstavljajo realno rešitev za zmanjšanje onesnaževanja v prometu, obenem pa omogočajo smotnejšo rabo energije in neodvisnost od omejenih in po svetu neenakomerno porazdeljenih fosilnih goriv. Velik dolgoročni potencial predstavlja uporaba vozil z gorivnimi celicami in proizvodnja vodika iz obnovljivih virov energije. Za posameznika je odločitev za nakup in uporabo EV pogojena s tehničnimi in finančnimi dejavniki, med katerimi so najpogostejši cena vozila, cena vožnje in nakupni pogoji. Analize vpliva uporabe EV na družbo in okolje kažejo na upravičenost državnih spodbud za razvoj, proizvodnjo, prodajo in nakup vozil, saj bo njihova širša uporaba posredno in neposredno koristila celi družbi.

1.3.1 Škodljivost emisij

Ocena celotne škode emisij v prometu je kljub številnim podrobnim študijam še vedno težko izrazljiva v ekonomskem jeziku. Vrednote, kot so zdravje, mir in neokrnjena narava težko ovrednotimo z denarjem. Ker je ekologija eden izmed pomembnejših motivov razvoja EV, bom v tem poglavju prikazal metodologijo za ovrednotenje škode emisij, ki sta jo v svojem članku predstavila Funk in Rabl [E10, Funk in Rabl 1999].

Avtorja sta se v študiji omejila le na neposredno škodo, ki je posledica prezgodnjih smrti ljudi zaradi kroničnih in akutnih obolenj. V študijah vplivov škodljivih emisij na razvoj bolezni [Lipfert, 1994; Dockery in Pope III, 1994; Wilson in Spengler, 1996; Bascom in drugi, 1996] so se za najškodljivejše emisije izkazali drobni delci, ozon in SO₂, za direktni vpliv dušikovih oksidov pa je dokazov manj. Emisije škodujejo predvsem dihalom in ožilju, povzročajo pa tudi rakava obolenja. Zaradi pomanjkanja dokazov o nelinearnih funkcijah doza-odziv (exposure-response ali concentration-response) je v študiji upoštevana linearna zveza.

Pri ekonomski oceni škode emisij sta najtežje ovrednotena elementa vrednost človeškega življenja (VSL – Value of Statistical Life) in izgubljena leta (YOLL - Years of Life Lost), ki predstavljata družbeno pripravljenost za plačilo preprečevanja prezgodnjih smrti. Podobno kot v študiji evropske komisije o zunanji ceni energije [ExternE, 1995; ORNL/RFF, 1994 ter Rowe in drugi, 1995], sta avtorja uporabila

podatka 3,1 milijona EUR za VSL, za YOLL pa 83 tisoč EUR/leto za smrtne kronične bolezni ter 155 tisoč EUR/leto za akutne.

Med škodljivimi emisijami ločimo primarne, ki so škodljive same po sebi in sekundarne, ki nastanejo iz primarnih. Sekundarne škodljive emisije onesnažujejo širša območja v daljših časovnih intervalih, primarni polutanti pa so manj obstojni in zato omejeni na območje izpusta [E2, G. M. Hidy, 2002].

Tabela 1: Približna škoda v različnih okoljih izpuščenih emisij [E10, Funk in Rabl, 1999]

Snov	škoda [EUR/kg]
Toplogredni plini (CO ₂ ekvivalent)	0.029
Sekundarne emisije	
SO ₂ preko sulfatov	10,0
NO ₂ preko nitratov	14,5
NO ₂ preko ozona	1,5
Primarne emisije	
PM _{2.5} Pariz*	2190
PM _{2.5} avtocesta Pariz-Lyon*	159
PM _{2.5} francosko podeželje*	22
SO ₂ Pariz*	28
SO ₂ avtocesta Pariz-Lyon*	2,2
SO ₂ francosko podeželje*	0,3
CO Pariz*	0,02
CO avtocesta Pariz-Lyon*	0,002

*Škoda primarnih emisij je poleg narave snovi odvisna tudi od gostote naseljenosti na območju izpusta. V tabeli so predstavljeni približni denarni ekvivalenti škode, ki jih povzročajo izpusti različnih škodljivih emisij v različnih okoljih.

1.3.2 Emisije vozil

Iz podatkov o emisijah vozil tekom vožnje in njihove škodljivosti sta avtorja izračunala škodo, ki jo povzročajo različna vozila. Upoštevala sta podatke za Peugeot 106, ki je naprodaj s tremi različnimi pogoni – bencinskim, dizelskim in električnim. Pri novejših bencinskih avtomobilih so emisije manjše zaradi uporabe katalizatorja, pri novih dizelskih pa zaradi filtra trdnih delcev.

Tabela 2: Okoljska škoda vožnje različnih vrst vozil:

Vrsta vozila	škoda [EUR/km]	Največji vir škode
Dizel (nov)	0,19	PM _{2.5} *
Dizel (star)	0,51	PM _{2.5} *
Bencinski avto (nov)	0,01	CO ₂
Bencinski avto (star)	0,08	CO ₂

*PM_{2.5} so trdni delci premera do 2.5 mikronov

V tabeli so predstavljene približne ocene za škodo in največji vir škode, ki jo tekom vožnje povzročajo različna vozila. Upoštevana je le vožnja in ne tudi izdelava vozila. Za primerjavo imejmo v mislih strošek za gorivo, ki je v novih vozilih približno 0,07EUR/km.

Pri električnih vozilih je po izračunih avtorjev, ki sta upoštevala način pridobivanja električne energije v Franciji, okoljska škoda zanemarljivo majhna ($0,0006\text{EUR}/\text{km}$). Predvsem pri dizelskih vozilih je očitno, da okoljski stroški presegajo stroške za gorivo, ki znašajo »le« približno $0,06$ do $0,08\text{EUR}/\text{km}$.

Opisan pristop izračuna okoljskih prednosti EV ima seveda še mnogo pomanjkljivosti, saj bi lahko upoštevali še mnoge dodatne dejavnike. Promet namreč povzroča škodo tudi drugim bitjem in naravi, ne le ljudem. Prav tako nismo upoštevali hrupa in neprijetnega vonja ter s tem poslabšane kvalitete življenja. Po drugi strani pa nastajajočo škodo zmanjšujejo naravne absorpcijske sposobnosti naravnega okolja. Poleg samih emisij med vožnjo bi morali objektivno upoštevati tudi ekološko škodo, ki nastane pri proizvodnji akumulatorjev, kjer se uporablja tudi ekološko oporečne snovi. Kljub nepopolnosti je metoda izračuna ekološke škode zanimiva in nudi okvirne rezultate za nadaljnje delo.

1.4 Motivacija za razvoj električnih vozil

Z razvojem električnih vozil se ukvarjamo predvsem zaradi ekoloških prednosti, ki jih bo prinesla njihova širša uporaba. Radi bi se izognili neželjenim podnebnim spremembam in lokalnemu onesnaženju. Današnja tehnologija že skoraj omogoča izdelavo vozil nove generacije, ki bodo v primerjavi z obstoječimi boljša s stališča voznih lastnosti, prilagojenosti človeku in neoporečnega delovanja.

V naslednjem poglavju bomo s širšo fizikalno analizo vožnje različnih vozil raziskali tehnične zahteve za elektrifikacijo pogona v različnih vrstah vozil.

2. Fizikalna analiza vožnje različnih vrst vozil

V motornem prometu je prisotnih veliko vrst vozil, ki se po tehničnih lastnostih močno razlikujejo. S fizikalno analizo vožnje bomo za različna vozila izračunali najpomembnejše parametre pogonskih sistemov, na osnovi katerih bomo lahko ocenili tehnično zahtevnost razvoja in prednosti prehoda na električni pogon.

Razvoj je v prvih fazah najbolj smiseln v aplikacijah, kjer je dodana vrednost novega pogona v ekološkem in tržnem smislu največja. Analiza osnovnih tehničnih, ekonomskih in družbenih značilnosti posameznih tipov vozil predstavlja osnovo za izbiro aplikacije, kjer lahko z razvojnimi delom največ pripomoremo k izboljšanju prometnih razmer v svetu.

Za več vrst vozil bomo, na osnovi splošnih podatkov vozila (dimenzije, masa...) in tipičnih pogojev njegove uporabe, izračunali sile, navore, moči in energije, ki jih morajo zagotavljati motorji in viri energije. Kasneje bomo s temi podatki ovrednotili uporabnost sodobnih tehnologij v različnih aplikacijah, izbrali najzanimivejšo vrsto vozila in zanjo razvili optimalno pogonsko arhitekturo.

Analizirali bomo fizikalne značilnosti vožnje za osebni avtomobil, majhen mestni avtomobil, mestni avtobus in skuter, ki predstavljajo štiri pogoste vrste vozil različnih velikosti. Pri analizi osebnega avtomobila bom podrobneje predstavil izračune in način dela, pri ostalih aplikacijah pa se bom osredotočil predvsem na razlago rezultatov.

2.1 Osebni avtomobil

Osebna vozila obsegajo največji tržni delež avtomobilske industrije in predstavljajo največji vir onesnaževanja, zato pričakujemo, da je na to področje smiselno postopno vpeljati električne pogone. Novejša osebna vozila so po stoletnem razvoju že zelo izpopolnjena, največje pomanjkljivosti pa izvirajo iz slabega izkoristka motorjev z notranjim izgorevanjem in neželjenih emisij.

2.1.1 Podatki in vozne zahteve osebnega avtomobila

Dimenzije, maso ter ostale lastnosti vozila bom uporabil za izračun fizikalnih količin med vožnjo vozila. Pri osebnem avtomobilu se bom glede podatkov o vozilu zgledoval po običajnem vozilu srednjega cenovnega razreda.

Tabela 3: Lastnosti osebnega avtomobila

Masa praznega vozila	1255kg
Masa polnega vozila	1500kg
Površina sprednje ploskve	2.55m ²
Koeficient upora	0.26
Koeficient trenja	0.015
Polmer kolesa	0.28m

Osnovni podatki so podobni tipičnim vozilom srednjega cenovnega razreda, koeficient zračnega upora pa je majhen (tak kot pri Toyota Prius), saj se v električnih in hibridnih vozilih uveljavljajo dobre aerodinamične oblike..

Zahteve za pogonski sistem so močno odvisne od zahtevanih voznih lastnosti avtomobila. Za širši prodor na trg morajo biti vozne lastnosti električnega vozila v večini najpomembnejših karakteristik primerljive z voznimi lastnostmi obstoječih vozil, zato bom uporabil podatke, ki so primerljivi z današnjimi vozili srednjega velikostnega in cenovnega razreda.

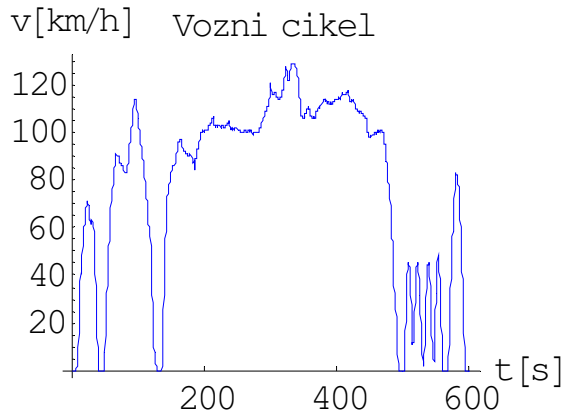
Tabela 4: Zahtevane vozne lastnosti osebnega avtomobila

Vozna lastnost	Vrednost
Najvišja hitrost	180km/h
Trajna hitrost	130km/h
Doseg	700km
Doseg brez emisij*	60km
Čas pospeševanja od 0 do 60km/h	6s
Čas pospeševanja od 0 do 100km/h	12s
Najstrmejši klanec	25%
Hitrost vožnje v 10% klanec	80km/h

* v primeru hibridnega pogona, v katerem deluje tudi motor z notranjim izgorevanjem, ločimo skupni doseg in doseg s samostojno uporabo električnega vira energije brez emisij.

Tipično vožnjo, oziroma pogoje delovanja, bom opisal z voznim ciklom, ki ponazarja spreminjanje hitrosti med vožnjo. Uporabil bom standardni vozni cikel, ki ga je za namene testiranja vozil razvila Ameriška agencija za varstvo okolja [F11, vozni cikli].

Graf 1: Standardni vozni cikel za osebni avtomobil



Tekom standardnega voznega cikla v desetih minutah s štirimi kratkimi postanki prevozimo malo manj kot trinajst kilometrov.

Na osnovi voznega cikla bomo izračunali zahtevane parametre pogonskega sistema (največja moč, največji navor, največja frekvenca...) in povprečne vrednosti moči in porabljene energije.

2.1.2 Sile, navori in frekvence pri vožnji osebnega avtomobila

V brezvetrju na ravni in položni cesti na avto delujejo sila pogona, sila zračnega upora in sila trenja. Sile izračunamo po enačbah mehanike:

$$F_{upora} = \frac{1}{2} S \cdot k_u \cdot \rho \cdot v^2 \quad (1)$$

$$F_{trenja} = m \cdot g \cdot k_t \quad (2)$$

S je površina sprednje ploskve vozila, k_u koeficient upora, ρ gostota zraka, v hitrost vozila, k_t koeficient trenja, g gravitacijski pospešek in m masa vozila.

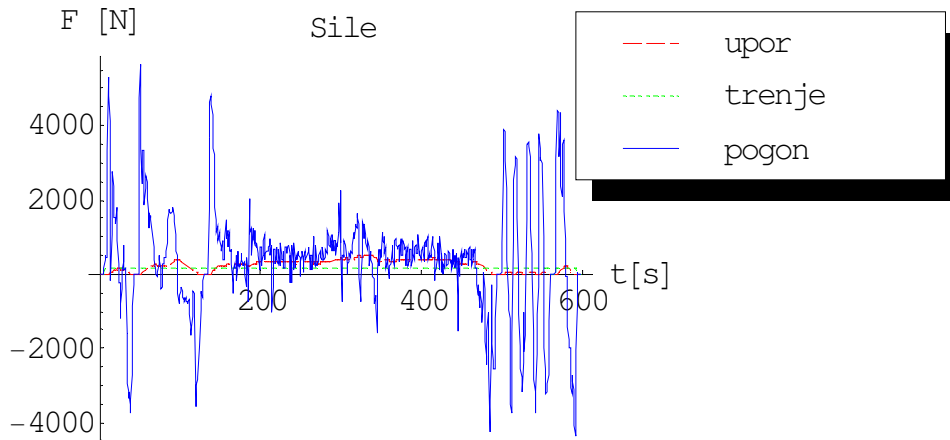
Silo pogona izračunamo iz podatkov o gibanju vozila z uporabo drugega Newtonovega zakona.

$$F_{pogona} = m \cdot a \quad (3)$$

pri čemer predstavlja a pospešek vozila.

Naslednji graf prikazuje velikosti sil pogona, upora in trenja tekom vožnje v režimu standardnega voznega cikla.

Graf 2: Sile na osebni avto med standardnim voznim ciklom



Med pospeševanjem je sila pogona izrazito večja od sile zračnega upora, ki sicer večinoma prevladuje nad silo trenja.

Sila pogona kompenzira zračni upor in trenje, obenem pa vozilu omogoča pospeševanje in zaviranje. Iz hitrosti, sil in dimenzij koles lahko izračunamo zahtevane navore in frekvence, ki so pomembni za zasnovno pogonskega sistema.

Tabela 5: Zahteve za pogon osebnega avtomobila

Količina	Vrednost
Največji navor tekom voznega cikla	1619Nm
Navor ob vožnji v najstrmejši klanec (25%)	1064Nm
Navor ob vožnji z najvišjo hitrostjo	320Nm
Navor za pospeševanje od 0 do 60km/h v 6 sekundah	1219Nm
Navor za pospeševanje od 0 do 100km/h v 12 sekundah	1042Nm
Najvišja frekvenca koles tekom voznega cikla	20,4Hz
Frekvenca vrtenja koles pri najvišji hitrosti	28,4Hz

S stališča navora predstavlja najstrožje omejitve sledenje dinamični vožnji v voznem ciklu. Izračunane frekvence so zanimive predvsem pri obravnavi direktnih pogonov brez prestav.

2.1.3 Moč pogona osebnega avtomobila

S poznavanjem sil in hitrosti bomo izračunali izhodno moč pogona, torej moč, ki se v celoti pretvori v gibanje vozila. Kasneje bomo v podrobnejši analizi parametrov vira energije, izračunali celotno moč in energijo, ki jo mora zagotavljati vir energije.

Moč izračunamo kot produkt sile in hitrosti vozila, torej:

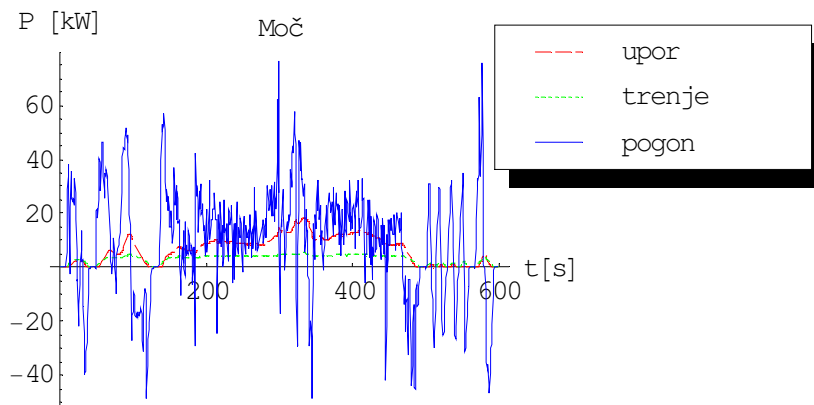
$$P_{pogona} = F_{pogona} \cdot v \quad (4)$$

$$P_{upora} = F_{upora} \cdot v \quad (5)$$

$$P_{trenja} = F_{trenja} \cdot v \quad (6)$$

Moč mora zadostovati za sledenje dinamiki voznega cikla, doseganje željene najvišje in trajne hitrosti ter za pospeševanje.

Graf 3: Moč med vožnjo osebnega avtomobila

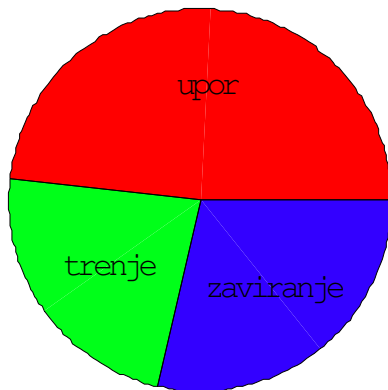


Graf prikazuje moč pogona in moči, ki se porabita za premagovanje trenja ter zračnega upora.

S stališča konstrukcije pogona nas sicer zanima predvsem moč, ki jo mora zagotavljati pogonski sistem, vendar je zanimivo tudi poznavanje kvantitativnih podatkov o izgubah, ki so posledica zračnega upora, trenja in zaviranja, saj nam to omogoča boljši pregled nad pomembnostjo posameznih dejavnikov pri konstrukciji vozila. Naslednji graf prikazuje razmerje porabljene moči za različne namene.

Graf 4: Poraba energije med vožnjo osebnega avtomobila

Poraba moči



Kljub nizkemu koeficientu zračnega upora (0,26) je pri standardni vožnji osebnega avtomobila še vedno največji del pogonske moči namenjen premagovanju zračnega upora.

V naslednji tabeli si pogledjmo izhodišča za obravnavo energijskih potreb osebnega avtomobila tekom voznega cikla.

Tabela 6: Moč in energija za vožnjo osebnega avtomobila tekom voznega cikla

Količina	Vrednost
največja moč	80,6kW
povprečna moč	13,6kW
časovni delež potrebe po moči nad 50kW	2,0% časa tipične vožnje
časovni delež potrebe po moči nad 20kW	37,4% časa tipične vožnje
časovni delež potrebe po moči nad 10kW	68,7% časa tipične vožnje
Energija na prevožen kilometer (brez reg. zaviranja)	176,3Wh
Energija na prevožen kilometer (z reg. zaviranjem)*	151,1Wh
Povečanje doseg z uporabo regenerativnega zaviranja	16,7%
Energija za doseganje celotnega dosega (700km)**	106kWh
Energija za doseganje dosega brez emisij (60km)**	9,1kWh

*Upoštevamo polovičen izkoristek pridobivanja energije, ki se sprosti med zaviranjem.

**Pri izračunu dosega upoštevamo regenerativni sistem zaviranja

Na tem mestu še nismo upoštevali izgub v elektromotorjih. Izračunali smo le mehanske moči in energije, ki se sprostijo med gibanjem vozila. V nadaljnjih analizah pa bomo upoštevali tudi skupni 85% izkoristek krmilnika in elektromotorjev.

Poleg zahtev v voznem ciklu izračunajmo zahtevano moč še po drugih kriterijih. Upoštevali bomo zahtevo za doseganje najvišje hitrosti (180km/h), vožnjo s trajno hitrostjo (130km/h), pospeševanje od mirovanja do 60km/h v šestih sekundah (približek enakomernega pospeševanja) in pospeševanje od 60 do 100km/h v nadaljnjih šestih sekundah.

V tabeli bomo poleg skupne vrednosti zahtevane moči zapisali še posamezne prispevke zračnega upora, trenja in pospeševanja. Na ta način si bomo lažje predstavljali kateri parametri zahtevanih voznih lastnosti predstavljajo največje zahteve za pogonski sistem.

Tabela 7: Dodatni pogoji za najvišjo in trajno moč vožnje osebnega avtomobila

Pogoj	Skupna moč [kW]	Zračni upor [kW]	Trenje [kW]	Pospeški [kW]
Najvišja hitrost	57,1	49,7	7,4	0
Pospeševanje 1*	73,7	1,8	2,5	69,4
Pospeševanje 2**	89,8	8,5	4,1	77,2
Trajna hitrost	24,0	18,7	5,3	0

*Enakomerno pospeševanje od mirovanja do 60km/h v 6 sekundah.

**Enakomerno pospeševanje od 60 do 100km/h v nadaljnjih 6 sekundah (skupaj 12 sekund)

Pri osebнем avtomobilu predstavlja najstrožjo zahtevo za moč pospeševanje. Moč, ki jo potrebujemo za premagovanje zračnega upora preseže 50kW šele pri 172km/h, trenje pa predstavlja večji del predvsem pri manjših hitrostih. S stališča porabe energije tekom dolge vožnje predstavlja zračni upor največji vir izgube energije, saj so pospeševanja pri običajni vožnji redkejša.

Med zahtevami za največjo moč (vozni cikel, najvišja hitrost in pospeševanje), predstavlja najstrožji pogoj pospeševanje (89,8kW), zato bo ta podatek merilo za nadaljnje izračune. Pri povprečni moči je moč za vzdrževanje trajne hitrosti višja od povprečne moči v voznem ciklu, zato bomo tudi tu uporabili zahtevo po 24,0kW stalne moči. Izračunane vrednosti nam bodo služile za primerjavo zahtevnosti zasnove pogonskih sistemov v različnih vrstah vozil.

2.2 Majhen mestni avtomobil

V zadnjem desetletju se v razvitem svetu vse bolj uveljavljajo manjši avtomobili, ki se uporabljajo skoraj izključno za mestno vožnjo. Ker so ta vozila lažja od večjih osebnih avtomobilov in ker je njihov pogonski sistem primerno šibkejši, lahko pričakujemo enostavnejšo vpeljavo električnega pogona.

2.1.1 Podatki in vozne zahteve mestnega avtomobila

Električni mestni avto je podoben majhnim bencinskim avtomobilom, uporaba lažjih materialov in sodobnih električnih pogonov z optimalno prilagojenimi velikostmi posameznih komponent pa omogoča tudi zmanjšanje teže vozila.

Tabela 8: Značilnosti mestnega avtomobila

Masa praznega vozila	600kg
Masa polnega vozila	750kg
Površina sprednje ploskve	2.2m ²
Koeficient upora*	0.35
Koeficient trenja	0.015
Polmer kolesa	0.25m

*Koeficient upora je slabši kot pri osebnem avtomobilu, saj je mestni avto krajši in je zračne tokovnice težje primerno speljati ob avtomobilu.

Vozne lastnosti morajo zagotavljati zanesljivo delovanje vozila v običajnih voznih režimih in tudi v izjemnih okoliščinah. Poleg počasne vožnje mora vozilo omogočati tudi kratek »izlet« na obvoznico ali regionalno cesto.

Tabela 9: Zahtevane vozne lastnosti mestnega avtomobila

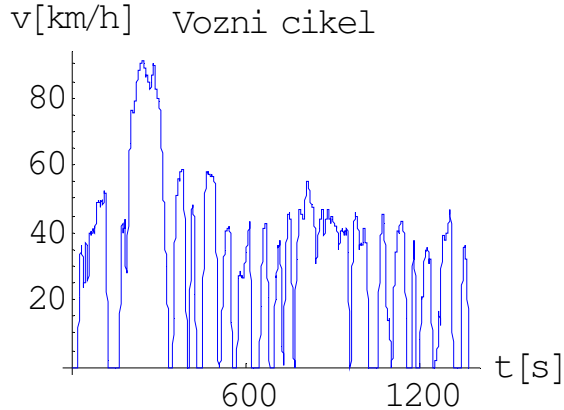
Vozna lastnost	Vrednost
Najvišja hitrost	120km/h
Trajna hitrost	60km/h
Doseg	500km
Doseg brez emisij*	100km
Čas pospeševanja od 0 do 60km/h	7s
Čas pospeševanja od 0 do 100km/h	16s
Najstrmejši klanec	25%
Hitrost vožnje v 10% klanec	70km/h

* v primeru hibridnega pogona, v katerem deluje tudi motor z notranjim izgorevanjem, ločimo skupni doseg in doseg s samostojno uporabo električnega pogona brez emisij.

Pri majhnem mestnem avtomobilu ne zahtevamo visoke najvišje in trajne hitrosti, saj vozilo zaradi relativno majhne mase in pomislekov glede varnosti ni namenjeno dolgotrajni hitri vožnji. Tudi doseg je lahko nekoliko manjši, saj je v mestih veliko možnosti za pogosto dolivanje goriva ali polnjenje akumulatorjev.

Za analizo dogajanja tekom vožnje bomo uporabili mednarodni standardni vozni cikel za mestno vožnjo [F11, vozni cikli], ki se od voznega cikla za osebni avto razlikuje predvsem po nižjih hitrostih in večjem številu postankov..

Graf 5: Standardni vozni cikel za mestni avto

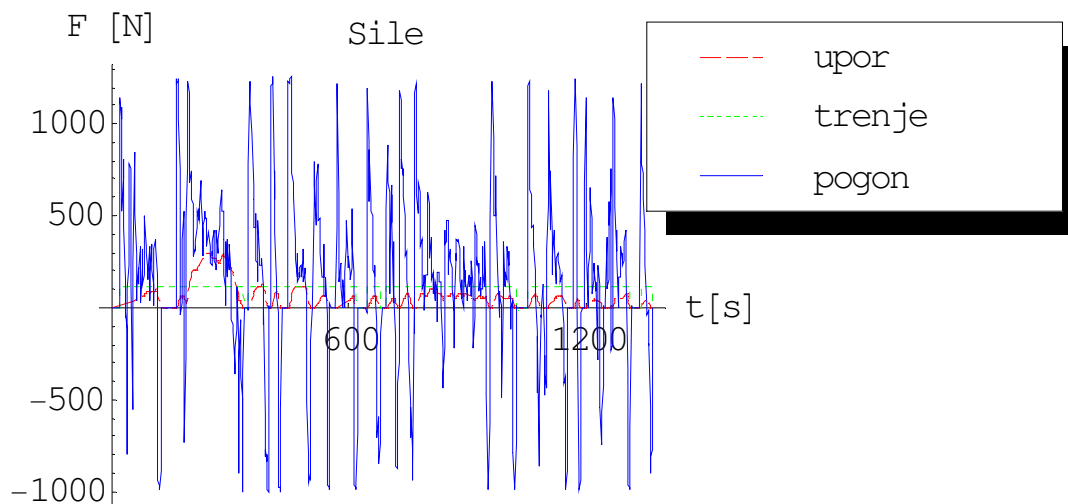


V dobrih dvajsetih minutah z osemnajstimi postanki prevozimo dvanajst kilometrov. Skupni čas postankov v mestnem voznem ciklu predstavlja približno eno petino časa vožnje. Ta podatek bomo kasneje uporabili pri izračunih povprečne moči, ki jo mora zagotavljati vir energije.

2.1.2 Sile, navori in frekvence pri vožnji mestnega avtomobila

Na enak način, kot pri osebnem avtomobilu, bomo tudi tu izračunali sile, navori in frekvence, ki so zanimive pri konstrukciji pogona.

Graf 6: Sile na majhen mestni avto med standardnim mestnim voznim ciklom



Sila pogona je izrazito večja od sile zračnega upora in trenja, opazimo pa lahko tudi, da je največja možna pogonska sila dosežena ob skoraj vsakem pospeševanju.

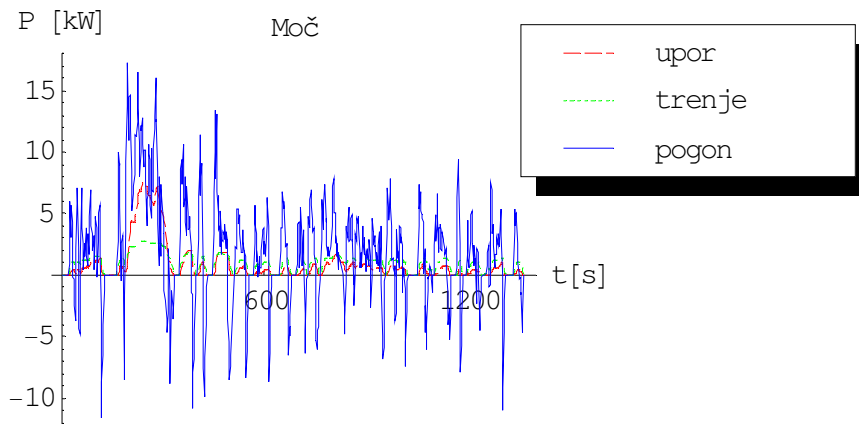
Tabela 10: Zahteve za pogonski sistem majhnega mestnega avtomobila tekom standardnega voznega cikla

Količina	Vrednost
Največji navor tekom voznega cikla	318Nm
Navor ob vožnji v najstrmejši klanec (25%)	496Nm
Navor ob vožnji z najvišjo hitrostjo	155Nm
Navor za pospeševanje od 0 do 60 km/h v 7 sekundah	485Nm
Navor za pospeševanje od 0 do 100 km/h v 16 sekundah	319Nm
Najvišja frekvenca koles tekom voznega cikla	12,4Hz
Frekvenca vrtenja koles pri najvišji hitrosti	16,1Hz

S stališča navora predstavlja najstrožjo omejitev hitro pospeševanje, skupni navor pa je dva do trikrat manjši kot v primeru večjega osebnega avtomobila.

2.1.3 Moč pogona mestnega avtomobila

Graf 7: Moč med vožnjo majhnega mestnega avtomobila

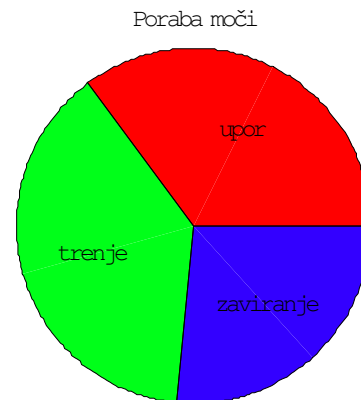


Največjo moč zahteva pospeševanje, zračni upor in trenje pa sta približno enakovredna.

Porazdelitev porabe moči je zaradi drugačnih lastnosti vozila in počasnejše ter bolj dinamične vožnje nekoliko drugačna kot v primeru osebnega avtomobila.

Graf 8: Poraba energije med vožnjo mestnega avtomobila

Zanimivo je, da se približno enake količine energije porabijo za zaviranje, premagovanje trenja in premagovanje upora. To pomeni, da je pri konstrukciji vozila vsem tem elementom smiselno posvetiti enako pozornosti.



V naslednji tabeli si pogledimo izhodišča za obravnavo energijskih potreb majhnega mestnega avtomobila.

Tabela 11: Moč in energija za vožnjo majhnega mestnega avtomobila

Količina	Vrednost
Največja moč	17,5kW
Povprečna moč	2,5kW
Časovni delež potrebe po moči nad 10kW	4,6% časa tipične vožnje
Časovni delež potrebe po moči nad 5kW	23,0% časa tipične vožnje
Časovni delež potrebe po moči nad 2kW	56,0% časa tipične vožnje
Energija na prevožen kilometer (brez reg. zaviranja)	80,0Wh
Energija na prevožen kilometer (z reg. zaviranjem)*	69,4Wh
Povečanje dosega z uporabo regenerativnega zaviranja	15,3%
Energija za doseganje celotnega dosega (500km)**	34,7kWh
Energija za doseganje dosega brez emisij (100km)**	6,9kWh

*Upoštevamo polovičen izkoristek rekuperacije energije, ki se sprosti med zaviranjem.

**Upoštevamo povečan doseg z regenerativnim sistemom zaviranja

Poleg zahtev po največji moči tekom voznega cikla, mora pogon zagotavljati tudi zadostno moč za doseganje trajne in najvišje hitrosti ter za pospeševanje.

Tabela 12: Ostali pogoji za najvišjo in trajno moč

Pogoj	Skupna moč [kW]	Zračni upor [kW]	Trenje [kW]	Pospeški [kW]
Najvišja hitrost	20,8	17,1	3,7	0
Pospeševanje 1*	33,7	2,1	1,8	29,8
Pospeševanje 2**	38,7	9,9	3,1	25,7
Trajna hitrost	4,0	2,15	1,85	0

*Enakomerno pospeševanje od mirovanja do 60km/h v 7 sekundah.

**Enakomerno pospeševanje od 60 do 100km/h v nadaljnjih 9 sekundah (skupaj 16 sekund)

Najstrožji pogoj za največjo moč izhaja iz potreb pri pospeševanju, kjer potrebujemo 38,7kW moči. Za vzdrževanje trajne hitrosti potrebujemo 4kW moči, kar je tudi več od povprečne hitrosti v voznem ciklu.

2.3 Mestni avtobus

Večja vozila so morda primerna za uveljavitev električnih pogonov, saj je v njih več prostora za gorivo in vir energije. Mestni avtobusi pa so zanimivi tudi s stališča mestnih oblasti, ki lahko spodbujajo sodobne, okolju prijazne tehnologije. V javnem prometu so tudi stroški ureditev črpališč novih goriv nižji, poklicni šoferji pa imajo tudi manj težav s prilagajanjem.

2.1.1 Podatki in vozne zahteve avtobusa

Dimenzije avtobusa smo povzeli po obstoječem prototipu električnega avtobusa, ki ga preizkušajo na Švedskem [A3, Foleksson in drugi, 2003]

Tabela 13: Značilnosti vozila

Masa polnega vozila	13000kg
Površina sprednje ploskve	8,0m ²
Koeficient upora	0.5
Koeficient trenja	0.015
Polmer kolesa	0.4m

Avtobusi se med seboj po tehničnih značilnostih zelo razlikujejo, vzeli pa smo podatke, ki so primerljivi z avtobusi v drugih študijah in predstavljajo običajen mestni avtobus, kakršne poznamo tudi pri nas.

Tabela 14: Zahtevane vozne lastnosti mestnega avtobusa

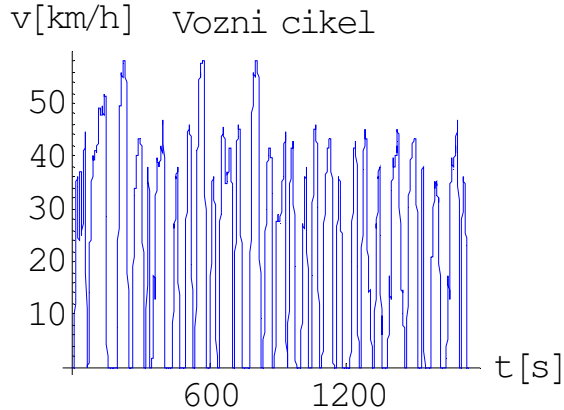
Vozna lastnost	Vrednost
Najvišja hitrost	90km/h
Trajna hitrost	60km/h
Doseg	800km
Doseg brez emisij*	200km
Čas pospeševanja od 0 do 40km/h	8s
Čas pospeševanja od 0 do 60km/h	14s
Najstrmejši klanec	20%
Hitrost vožnje v 10% klanec	40km/h

* v primeru hibridnega pogona, v katerem deluje motor z notranjim izgorevanjem, ločimo skupni doseg in doseg z uporabo le električnega vira energije, ki ob delovanju ne povzroča emisij.

Pri zahtevah po najvišji in trajni hitrosti sem upošteval dejstvo, da avtobusi občasno vozijo tudi na primestnih relacijah. Doseg brez emisij sem določil po občutku, saj brezemisijška vozila še niso uveljavljena, tako da nimamo na voljo primernih zgledov. Vsekakor obstajajo na področju javnega mestnega prometa mnoge inovativne rešitve za polnjenje akumulatorjev ali dolivanje goriva. Polnjenje akumulatorjev na končnih postajah, bi sicer podaljšalo njihove postanke in zahtevalo dodatno infrastrukturo, a obenem tudi bistveno zmanjšalo potrebno zalogo energije na vozilu samem. Infrastruktura bi bila primerna tudi za druga električna vozila.

Spreminjanje hitrosti tekom vožnje opišimo z za mestne avtobuse značilnim voznim ciklom, ki vsebuje še večje število postankov kot vozni cikel za mestne avtomobile[F11].

Graf 9: Standardni vozni cikel mestnega avtobusa (Braunschwig driving cycle)

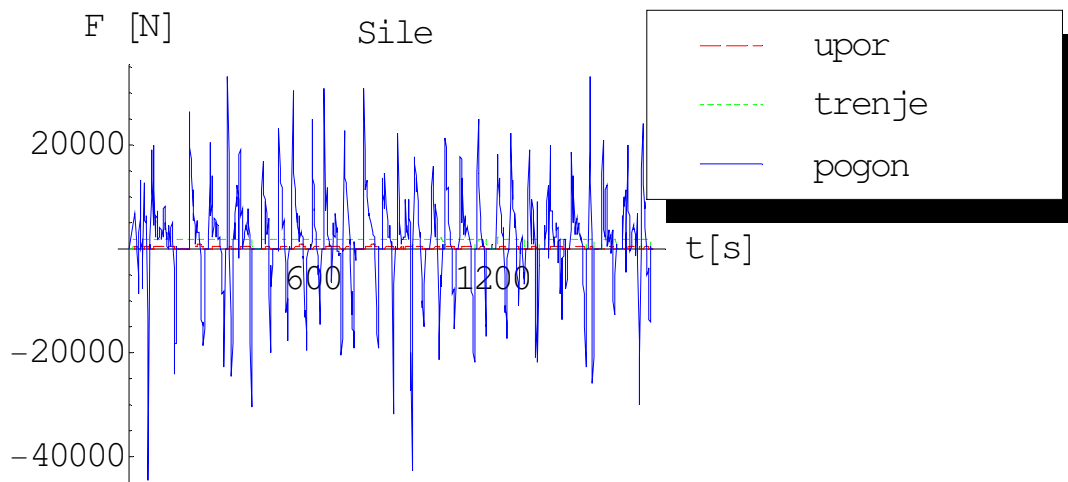


Skupni čas postankov v mestnem voznem ciklu predstavljajo četrtno skupnega časa vožnje. Osemindvajset postankov v malo manj kot enajstih prevoženih kilometrih pa je tudi značilno za vožnjo mestnih avtobusov.

2.1.2 Sile, navori in frekvence pri vožnji avtobusa

Na isti način, kot pri osebnem avtomobilu, bomo tudi tu prikazali sile ter izračunali navore in frekvence, ki so zanimivi pri konstrukciji pogona.

Graf 10: Sile na mestni avtobus med vožnjo v standardnem voznem ciklu



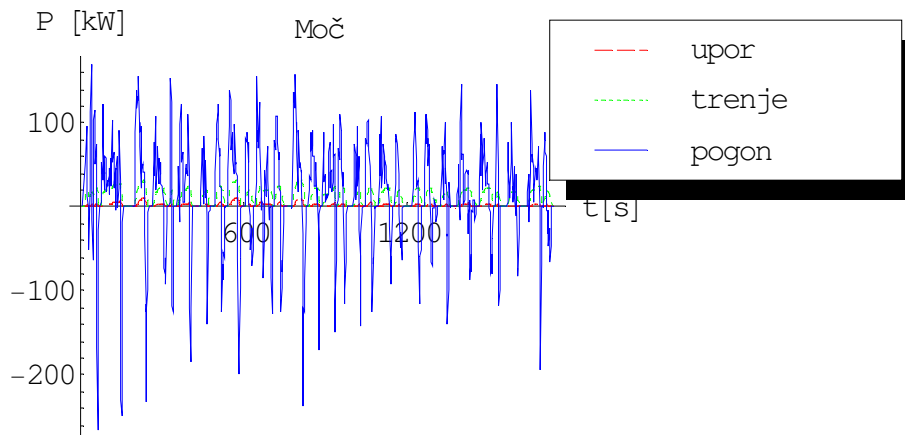
Zaradi velike mase predstavlja pospeševanje daleč najstrožjo zahtevo za pogonsko silo in navor tekom voznega cikla.

Tabela 15: Zahteve za pogonski sistem mestnega avtobusa

Količina	Vrednost
Največji navor tekom voznega cikla	13341Nm
Navor ob vožnji v najstrmejši klanec (20%)	10273Nm
Navor ob vožnji z najvišjo hitrostjo	1365Nm
Navor za pospeševanje od 0 do 40 km/h v 8 sekundah	8027Nm
Navor za pospeševanje od 0 do 60 km/h v 12 sekundah	7050Nm
Najvišja frekvenca koles tekom voznega cikla	6,43Hz
Frekvenca vrtenja koles pri najvišji hitrosti	9,94Hz

2.1.3 Moč pogona avtobusa

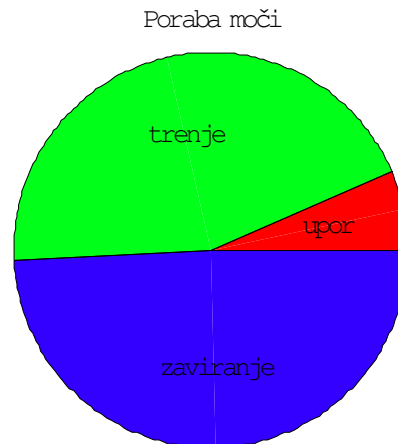
Graf 11: Moč med vožnjo mestnega avtobusa



Pojemki so pri avtobusih nekoliko večji kot pospeški, zato so tudi ekstremi moči med zaviranjem večji kot med pospeševanjem. Zadostno moč za zaviranje lahko seveda dosežemo s kombinacijo elektromagnetnih in mehanskih zavor, ki so zaradi varnosti v električnih vozilih vedno predvidene.

Graf 12: Poraba moči

Zaradi velike pogostosti ustavljanj in velike mase, se največ moči sprosti med zaviranjem, primerljiva je izguba moči zaradi trenja, zračni upor pa je skoraj zanemarljiv.



V naslednji tabeli si spet pogledajmo izhodišča za obravnavo energijskih potreb majhnega mestnega avtobusa.

Tabela 16: Energija in moč za vožnjo mestnega avtobusa

Količina	Vrednost
Največja moč	216kW
Povprečna moč (brez reg, cel čas)	27kW
Časovni delež potrebe po moči nad 100kW	10,3% časa tipične vožnje
Časovni delež potrebe po moči nad 50kW	35,0% časa tipične vožnje
Časovni delež potrebe po moči nad 20kW	56,2% časa tipične vožnje
Energija na prevožen kilometer (brez reg. zaviranja)	1200Wh
Energija na prevožen kilometer (z reg. zaviranjem)*	905Wh
Povečanje dosega z uporabo regenerativnega zaviranja	32,7%
Energija za doseganje celotnega dosega (800km)**	724kWh
Energija za doseganje dosega brez emisij (200km)**	181kWh

*Upoštevamo polovičen izkoristek pridobivanja energije, ki se sprostí med zaviranjem.

**Upoštevamo povečan doseg z regenerativnim sistemom zaviranja

Rezultati se skladajo tudi s tujimi študijami, v primeru analize električnih avtobusov [A3, Folkesson, 2003], je povečanje avtonomije zaradi regenerativnega zaviranja podobno kot v našem izračunu (28%).

Tabela 17: Ostali pogoji za najvišjo in trajno moč

Pogoj	Skupna moč [kW]	Zračni upor [kW]	Trenje [kW]	Pospeški [kW]
Najvišja hitrost	85,3	37,5	47,8	0
Pospeševanje 1*	225,1	3,3	21,3	200,6
Pospeševanje 2**	243,6	11,1	31,9	200,6
Trajna hitrost	43,0	11,1	31,9	0

*Enakomerno pospeševanje od mirovanja do 40km/h v 8 sekundah.

**Enakomerno pospeševanje od 40 do 60km/h v nadaljnjih 6 sekundah (skupaj 16 sekund)

Najstrožja pogoja za največjo in trajno moč sta pospeševanje in vzdrževanje trajne hitrosti (243,6kW in 43kW).

2.4 Skuter

Motorna kolesa z majhnimi kolesi oziroma skuterji, so predvsem v Aziji zelo uveljavljena prevozna sredstva, ki vozniku omogočajo hiter prevoz v urbanih okoljih in enostavno parkiranje. Po mnogih lastnostih presegajo avtomobile, njihova glavna pomanjkljivost pa je v strožjih zahtevah za obvladovanje (vožnjo) vozila, slabši varnosti in odvisnosti uporabe od vremenskih pogojev.

2.1.1 Podatki in vozne zahteve skuterja

Na isti način kot v prejšnjih primerih si pogledimo najpomembnejša dejstva in rezultate osnovne analize.

Tabela 18: Značilnosti vozila

Masa praznega vozila	50kg
Masa polnega vozila	120kg
Površina sprednje ploskve	0,65m ²
Koeficient upora	1
Koeficient trenja	0.02
Polmer kolesa	0.25m

Vozne lastnosti analiziranega skuterja so nekoliko zahtevnejše kot pri podobnih študijah [A2, Caraoło in drugi, 2006], saj pričakujemo, da bo zasnova pogona za to aplikacijo enostavna tudi ob upoštevanju strožjih zahtev.

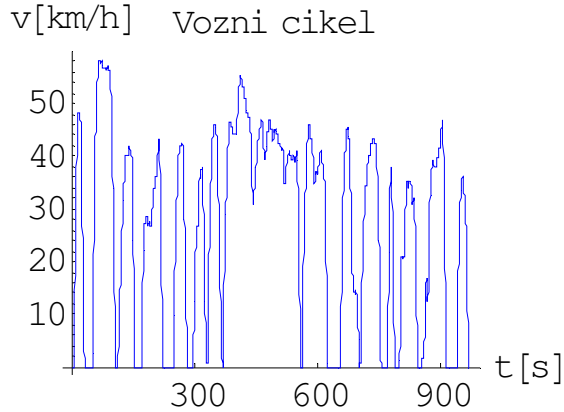
Tabela 19: Zahtevane vozne lastnosti skuterja

Vozna lastnost	Vrednost
Najvišja hitrost	70km/h
Trajna hitrost	50km/h
Doseg	100km
Doseg brez emisij*	60km
Čas pospeševanja od 0 do 40km/h	4s
Čas pospeševanja od 0 do 60km/h	6s
Najstrmejši klanec	20%
Hitrost vožnje v 10% klanec	40km/h

* v primeru hibridnega pogona, v katerem deluje tudi motor z notranjim izgorevanjem, ločimo skupni doseg in doseg s samostojno uporabo električnega vira energije brez emisij.

Uporabili bomo podoben cikel kot za vožnjo majhnega mestnega avtomobila, saj vozili vozita v zelo podobnih razmerah, izpustili smo le najhitrejši del, kjer vozilo vozi po avtocesti, kjer lahki skuterji ne smejo voziti.

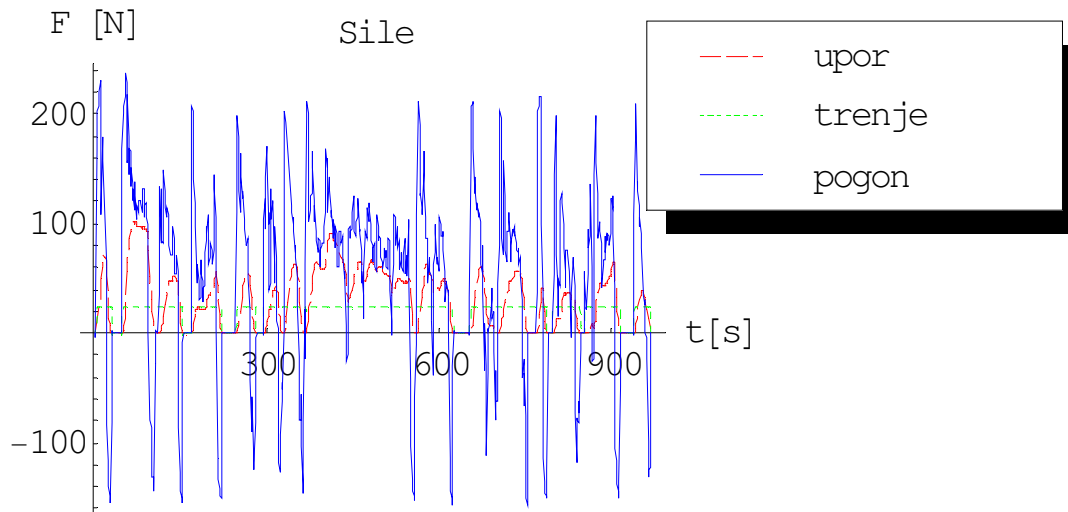
Graf 13: Vozni cikel za skuter



Dolžina voznega cikla je 7km, v šestnajstih minutah potovanja pa vozilo tekom štirinajstih postankov stoji tri minute.

2.1.2 Sile, navori in frekvence pri vožnji skuterja

Graf 14: Sile na lahek skuter med mestnim voznim ciklom



Sila zračnega upora je tudi med pospeševanjem primerljiva s silo pospeševanja. Pri vseh ostalih vozilih je bila bistveno manjša.

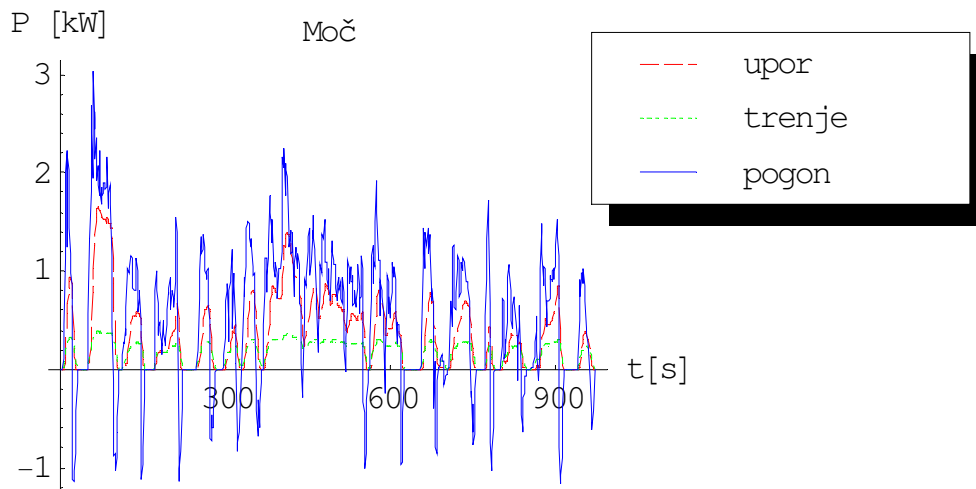
Tabela 20: Zahteve za pogonski sistem skuterja

Količina	Vrednost
Največji navor tekom voznega cikla	62,0Nm
Navor ob vožnji v najstrmejši klanec (20%)	70,9Nm
Navor ob vožnji z najvišjo hitrostjo	42,7Nm
Navor za pospeševanje od 0 do 40km/h v 4 sekundah	94Nm
Navor za pospeševanje od 0 do 60km/h v 6 sekundah	99Nm
Najvišja frekvenca koles tekom voznega cikla	10,3Hz
Frekvenca vrtenja koles pri najvišji hitrosti	12,4Hz

S stališča navora predstavlja najstrožjo omejitev hitro pospeševanje.

2.1.3 Moč pogona skuterja

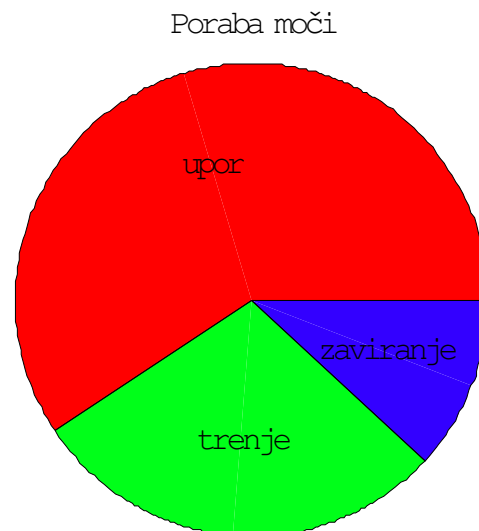
Graf 15: Moč med vožnjo skuterja



Moč za premagovanje zračnega upora obsega skoraj celotno moč pogona.

Graf 16: Poraba energije pogona

Največ moči se porabi za premagovanje zračnega upora, zavedati pa se moramo, da vožnji po klancih, zato lahko ob uporabi na valovitem terenu pričakujemo večji delež moči zaviranja.



Izhodišča za obravnavo energijskih potreb lahkega skuterja.

Tabela 21: Energija in moč za vožnjo skuterja

Količina	Vrednost
Največja moč	3030W
Povprečna moč	604W
Časovni delež potrebe po moči nad 2kW	2,4% časa tipične vožnje
Časovni delež potrebe po moči nad 1kW	27,4% časa tipične vožnje
Časovni delež potrebe po moči nad 500W	58,7% časa tipične vožnje
Energija na prevožen kilometer (brez reg. zaviranja)	22,8Wh
Energija na prevožen kilometer (z reg. zaviranjem)*	21,1Wh
Povečanje dosega z uporabo regenerativnega zaviranja	7,7%
Energija za doseganje celotnega dosega (100km)**	2,1kWh
Energija za doseganje dosega brez emisij (60km)**	1,3kWh

*Upoštevamo polovičen izkoristek rekuperacije energije, ki se sprosti med zaviranjem.

**Upoštevamo povečan doseg z regenerativnim sistemom zaviranja

Tabela 22: Ostali pogoji za najvišjo in trajno moč

Pogoj	Skupna moč [kW]	Zračni upor [kW]	Trenje [kW]	Pospeški [kW]
Najvišja hitrost	3,3	2,9	0,4	0
Pospeševanje 1*	4,5	0,5	0,3	3,7
Pospeševanje 2**	7,8	1,8	0,4	5,6
Trajna hitrost	1,4	1,1	0,3	0

*Enakomerno pospeševanje od mirovanja do 40km/h v 4 sekundah.

**Enakomerno pospeševanje od 40 do 60km/h v nadaljnjih 2 sekundah (skupaj 6 sekund)

Največjo moč potrebujemo pri agresivnem pospeševanju, za običajno dinamično vožnjo in vzdrževanje trajne hitrosti, pa je moč precej manjša.

2.5 Ostala vozila

S stališča uvajanja električnih pogonov so zanimiva tudi druga vozila, kjer so ponekod električni pogoni že prisotni. Značilnosti teh vozil bomo obravnavali manj podrobno, saj v globalnem smislu razvoj na teh področju ne bo prinesel bistvenega zmanjšanja onesnaževanja.

2.5.1 Kolo s pedali

Kolo (bicikel) je v svetovnem merilu najširše uporabljeno prevozno sredstvo, saj za nizko ceno na enostaven, prijeten in zdravju koristen način omogoča prevoz na krajše razdalje. Še širšo uporabo v urbanih okoljih zavira nepraktičnost prevoza večje količine prtljage, fizični napor, relativno nizka potovalna hitrost, pogostost kraj, odvisnost uporabe od vremenskih razmer ter ponekod tudi neurejena infrastruktura kolesarskih stez.

Električni pogon za kolo je enostaven, saj zahteva le okoli 200W moči, nekaj več kot 100Wh energije in do 50Nm navora, kar lahko dosežemo že s preizkušenimi in uveljavljenimi komponentami. Električno kolo je sicer nekoliko težje od klasičnega, vendar omogoča manj naporno in nekoliko hitrejšo vožnjo. Z uporabo sodobnih akumulatorjev in brezkrtačnih motorjev bodo električna kolesa postala še bolj zanimiva za širšo uporabo, ne bodo pa nadomestila večjih vozil.

2.5.2 Viličar

Viličarji, ki delujejo v zaprtih prostorih, morajo delovati brez emisij, zato so v njih že dalj časa prisotni električni pogoni. Še več, v njih se že uveljavljajo gorivne celice, katerih prednost je enostavno polnjenje, ki je časovno manj potratno kot menjanje akumulatorjev.

Viličarji morajo biti dovolj težki, da so med prevozom težkih bremen dovolj stabilni, zato so masivni pogoni celo zaželjeni. Na tem področju gre razvoj predvsem v smeri izboljšav izkoristka pogonskega sistema in znižanje proizvodnje cene.

2.5.3 Ultralahko letalo

Električni pogoni se bodo morda uveljavili v letalski industriji prej kot na cestah. Sliši se skoraj neverjetno, vendar so z energijskega stališča lahka letala bistveno manj potratna kot osebni avtomobili. Zračni upor je manjši, trenja in zaviranje ni, krila pa pri hitrostih nad 70km/h omogočajo dovolj veliko dvizžno silo za let.

Kratkoročno so električni pogoni zanimivi predvsem v ultralahkih in jadralnih letalih z motorjem, kjer je potrebna moč za vzletanje približno 20kW, za vodoravni let s hitrostjo okoli 150km/h pa zadostuje že okoli 4kW moči. V primerjavi z mestnim avtomobilom to predstavlja približno dvakrat večjo povprečno moč, a obenem dvakrat manjšo porabo energije na enoto prevožene razdalje.

V nadaljevanju magistrskega dela se bom omejil na cestna vozila, saj bi bila natančna analiza letal preobsežna.

2.6 Povzetek tehničnih razlik med posameznimi vrstami vozil

Osnovne tehnične značilnosti pogonskega sistema nam bodo skupaj s podatki o stanju tehnologije služile za ovrednotenje možnosti vpeljave električnih pogonov v različne vrste vozil. Med najpomembnejše parametre štejmo predvsem največjo in povprečno moč, celotni doseg in doseg brez emisij. Razmerje med povprečno močjo in največjo močjo, povečanje dosega z vpeljavo regenerativnega zaviranja ter največji navor pa nam lahko služijo za boljšo predstavo in detaljne izračune.

Tabela 23: Primerjava osnovnih parametrov vožnje različnih vrst vozil:

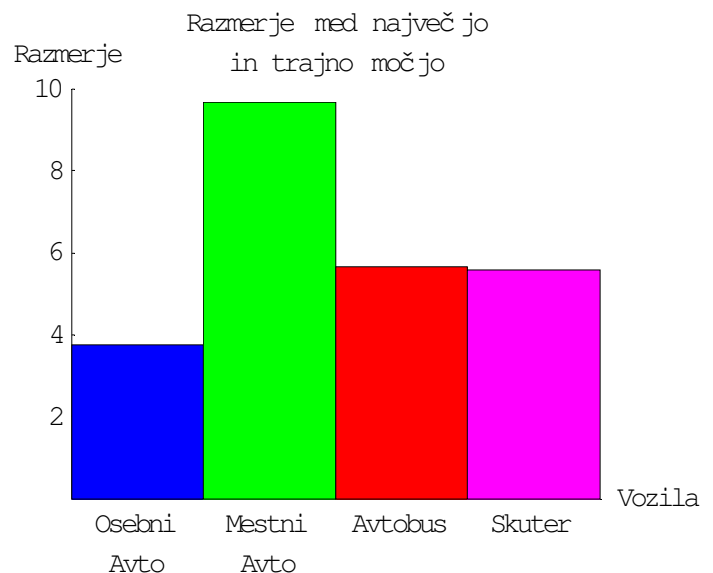
	Največja moč [kW]	Trajna moč [kW]	Razmerje med največjo in trajno močjo	Energija za brezemisijski doseg [kWh]	Energija za cel doseg [kWh]	Izboljšanje z regenerativnim zaviralnim sistemom [%]	Največji navor [Nm]
Osebni avto	89,8	24,0	3,74	10,7	125	16,7	1619
Mestni avto	38,7	4	9,68	8,1	40,8	15,3	485
Mestni avtobus	243,6	43	5,67	213	852	32,7	13341
Skuter	7,8	1,4	5,57	1,5	2,5	7,7	99

Na osnovi teh podatkov o zahtevah za pogon bom v petem poglavju predstavil možnosti za izdelavo vozil posamezne vrste.

Razmerje med največjo in povprečno močjo predstavlja potencialne pridobitve vpeljave hibridnih sistemov, kjer lahko za kratkotrajno povečanje moči uporabimo sekundarni pogon.

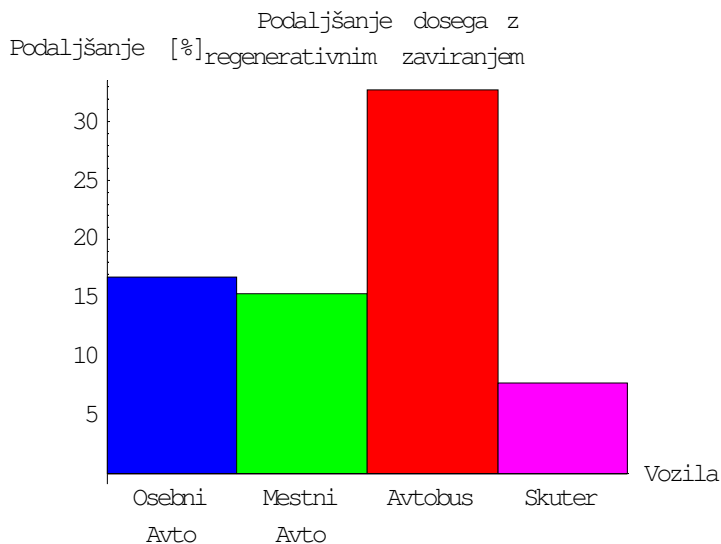
Graf 17: Razmerje med zahtevami za največjo in trajno moč v različnih vozilih

Razmerje med največjo kratkotrajno močjo in trajno močjo je v mestnih avtomobilih skoraj deset (9,68). Smiselna je torej zasnova hibridnega pogona, kjer veliko kratkotrajno moč zagotovi sekundarni energijski vir, primarni, ki zagotavlja zadostno trajno moč, pa je lahko manjši, lažji in cenejši. Pri običajnih osebnih avtomobilih je tudi povprečna moč relativno visoka (3,74 krat manjša od največje) avtobusi in skuterji pa so po tem kriteriju nekje vmes (5,67 in 5,57).



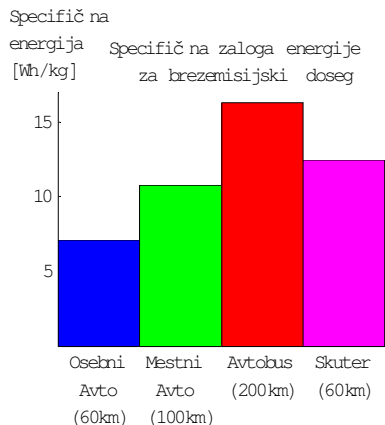
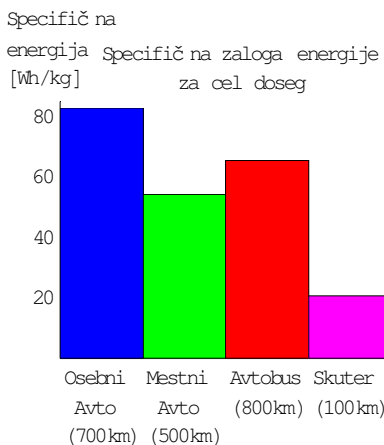
Graf 18: Učinek regenerativnega zaviranja pri različnih vozilih

Največ energije lahko z regenerativnim zaviralnim sistemom prihranimo v mestnem avtobusu (32%), nekoliko manj pri osebnih in mestnih avtomobilih (16% in 15%), najmanj pa pri skuterjih (7,7%). Električni pogoni bi torej pri mestnih avtobusih lahko izdatno povečali njihovo energijsko učinkovitost.



Poleg analiz možnosti za hibridizacijo pogona si pogledjmo tudi razmerje med zalogo energije in maso vozila.

Graf 19 in 20: Specifična zaloga energije vozila za cel in za brezemisijski doseg.



Za vsako vrsto vozila sem izračunal razmerje med skupno zalogo energije za cel in brezemisijski doseg ter maso vozila. Pri vsakem vozilu je zapisan tudi upoštevan doseg. Če upoštevamo še podatke o energijskih gostotah akumulatorjev (med 40 in 200Wh/kg), tekočih ogljikovodikov (10kWh/kg) in vodika (1kWh/kg – v plinastem stanju pod visokim tlakom), hitro vidimo najočitnejše omejitve in rešitve pri zasnovah pogonov. Energijska gostota osebnih in mestnih avtomobilov ter avtobusov bi morala biti skoraj taka, kot je energijska gostota akumulatorjev. To seveda ni izvedljivo, saj bi akumulator obsegal večji del mase vozila, rešitev pa predstavlja uporaba tekočih goriv in tehnologij vodika ter gorivnih celic. Zadosten brezemisijski doseg pa lahko zagotovimo tudi z relativno majhnim akumulatorjem.

3. Sodobne tehnologije na področju električnih vozil

Intenzivni razvoj tehnologij EV odpira mnoge možnosti za razvoj vozil, vendar velika ponudba različnih komponent v kombinaciji z različnimi potrebami pri različnih vrstah vozil predstavlja zmedo pri snovanju pogonskih sistemov. S poznavanjem kvantitativnih zahtev pogonskih sistemov v različnih vozilih in s splošnimi lastnostmi posameznih tehnologij EV, bomo ovrednotili možnosti za uspešno zasnovano posameznih vrst vozil.

3.1 Viri energije

Najpomembnejše tehnične lastnosti vira energije so zaloga energije, moč, masa, prostornina, izkoristek, ekološki vpliv, vzdržljivost in odzivnosti. Za uveljavitev v industrijski uporabi in kasneje v vsakodnevem življenju pa so pomembni tudi kriteriji kot so cena, enostavnost uporabe, razširjenost tehnologije in seveda stanje razvoja konkurenčnih tehnologij.

3.1.1 Motorji z notranjim izgorevanjem

V avtomobilskih motorjih z notranjim izgorevanjem kemično energijo fosilnih goriv pretvarjamo v mehansko energijo. V optimalni delovni točki je izkoristek že blizu teoretične omejitve entropijskega zakona. Radikalnih inovacij in izboljšav v tej že uveljavljeni tehnologiji ne pričakujemo. Z uporabo mehanskih prestav lahko motor vseskozi zagotavlja primeren navor, slabemu izkoristku v režimu izredno majhnih ali velikih moči pa se ne moremo izogniti.

Najpomembnejše tehnične odlike motorjev z notranjim izgorevanjem so velika moč, nizka masa in enostavno delovanje ter dolgoletna masovna proizvodnja, ki omogoča tudi nizko ceno in visoko stopnjo zanesljivosti. Možnost uporabe različnih fosilnih goriv in ostalih tekočih ogljikovodikov omogoča veliko zalogo energije in zadovoljiv doseg.

Slabosti motorjev na notranje izgorevanje so povezane z relativno slabim izkoristkom (še posebej pri nizkih obremenitvah), škodljivimi emisijami in zaradi odvisnosti od omejenih količin fosilnih goriv.

V prehodnem obdobju postopnega uveljavljanja električnih pogonov, bodo motorji na notranje izgorevanje igrali vidno vlogo v hibridnih pogonskih sistemih, kjer bodo uporabni predvsem zaradi velike energijske gostote, ki jo omogoča uporaba tekočih goriv.

Gostota moči motorjev na notranje izgorevanje je nekoliko odvisna od velikosti motorja, pri naših izračunih pa bomo upoštevali podatek 313W/kg [D2, Galadi in drugi, 2001]. Za zalogo energije bomo upoštevali 20% izkoristek (delovanje blizu optimalne delovne točke) in energijsko gostoto goriva 10kWh/kg , skupaj torej 2kWh/kg .

3.1.2 Akumulatorji

Akumulatorje sestavlja več zaporedno ali vzporedno povezanih baterij, ki so elektrokemijski elementi za shranjevanje električne energije. Pri analizi EV nas zanimajo izključno akumulatorji, ki jih lahko večkrat napolnimo. Poznamo jih več vrst, osnovani pa so na različnih kemijskih elementih. V naslednji preglednici si pogledjmo njihove najpomembnejše značilnosti.

Tabela 24: Značilnosti različnih vrst akumulatorjev

Vrsta baterije	Specifična energija [Wh/kg]	Specifična moč [W/kg]	Izkoristek polnjenja [%]	št. ciklov	Cena [EUR/kg]	Cena energije [EUR/kWh]	Cena moči [EUR/kW]
Pb	35-50 (40)	150-500 (400)	80-95 (90)	500-1000	2,4	60	6
NiMH	35-95 (50)	200-900 (500)	70	750-1200	32	640	80
Li-ion	80-180 (110*)	200-400 (200*)	95	1000	66	600	330
Li-polimer	140-200 (180**)	500-1000 (900**)	95-98 (96)	500-1000	162	900	180

(...) - V oklepajih so zapisane izbrane vrednosti, ki jih bom uporabil v nadaljnjih izračunih

* Podatki za akumulatorje proizvajalca E-One Moli

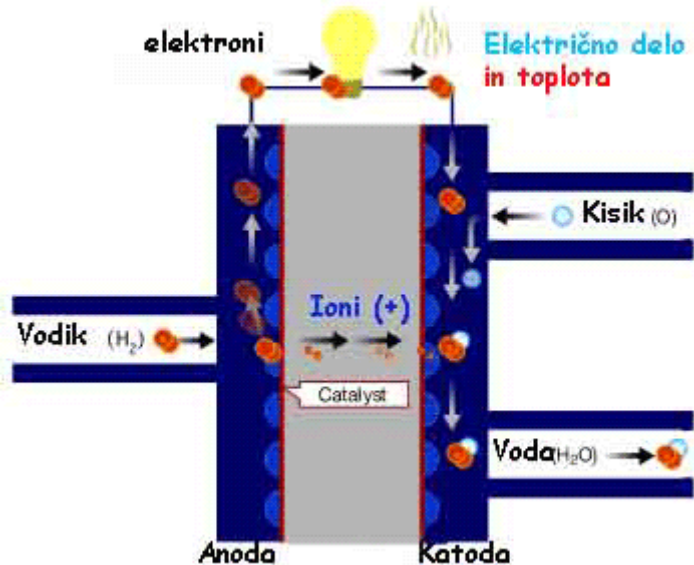
**Podatki od proizvajalca Kokam

Poleg omenjenih vrst akumulatorjev so zanimivi še visokotemperaturni VRLA akumulatorji, ki delujejo pri 270 do 350 stopinjah Celzija in se odlikujejo po energijski gostoti okoli 169Wh/kg [B13, Dustmann in drugi, 2004]. Kljub cenejši energiji in moči pridobljeni iz svinčevih baterij se v EV uveljavljajo predvsem baterije z veliko energijsko gostoto, ki vozilom zagotavljajo večjo avtonomijo. Novi materiali in proizvodnji postopki v litijevih akumulatorjih obetajo znižanje cene do približno 30EUR/kg [B2, Livshitsin drugi, 2001]. Primerjava cen baterij iz različnih virov [A2, Ceraolo in drugi, 2006], kaže na nestabilnost, saj so po naših podatkih, ki so pridobljeni neposredno od proizvajalcev, cene približno 20% nižje kot drugod. Po drugi strani pa znotraj posameznih vrst akumulatorjev, obstajajo različni kakovostni razredi, ki se cenovno znatno razlikujejo. Predvsem pri NiMH akumulatorjih je na trgu prisotnih več različnih tipov, ki se razlikujejo po specifični gostoti energije in moči. V Toyoti Prius se uporablja baterije z višjo specifično močjo in manjšo zalogo energije, kot pri najpogostejše uporabljenih NiMH baterijah [B4, Kohler in drugi 2002]. Razvoj baterij z visoko energijsko gostoto se vztrajno nadaljuje, napredek pa je občuten tudi na področju življenjske dobe, kjer so litijeve baterije še leta 1997 dosegale le približno tretjino današnje življenjske dobe [B3, Baudry in drugi, 1997].

3.1.3 Gorivne celice

Gorivne celice so elektro-kemijski elementi v katerih ob spajanju vodika in kisika nastajata električna energija in voda. Vodik moramo imeti shranjen na vozilu, kisik pa lahko sproti zajemamo iz zraka. Naslednja shema prikazuje delovanje nizekotemperaturne gorivne celice tipa PEM (Proton Exchange Membrane), ki je poleg visokotemperaturne gorivne celice tipa SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) najpogosteje prisotna v prototipih električnih vozil. PEM gorivne celice se uveljavljajo v osebnih vozilih in vozilih manjše moči, SOFC pa predvsem v sistemih, ki električno energijo dovajajo kontinuirano [B1, Kluiters in drugi, 1999].

Slika 1: Delovanje gorivne celice



Gorivo (vodik) dovedemo v bližino anode, kjer oksidira (odda elektron). Elektron potuje po elektrodi in žicah, preko porabnika do katode. Kation, ki ostane po oksidaciji (H^+), potuje do katode preko elektrolita. Na katodi se združijo elektron, kation (H^+) in kisik, ki ga dovajamo v bližino katode. Nastane voda, ki jo odvedemo. Celotno reakcijo lahko zapišemo kot $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$, energija, ki se ob tem sprosti, pomnožena z izkoristkom, se porabi za opravljanje električnega dela, npr. pogon elektromotorja.

Za učinkovito delovanje gorivne celice sta ključna premišljena izbira in priprava materialov. Če želimo doseči visoko specifično moč, morata biti stični površini med anodo, elektrolitom in gorivom ter katodo, elektrolitom in reducentom, čim večji. Stično površino se poveča z natančno obdelavo materiala, tako, da dobimo čim bolj porozne strukture z veliko površino. Dovajanje plinov mora biti smotrno speljano, tako, da čim večji delež plina pride v stik z elektrodama in elektrolitom.

Poznamo več tipov gorivnih celic, podatki o osnovnih lastnostih PEFC in SOFC, ki se najpogosteje uporabljajo v avtomobilski industriji pa so zbrani v naslednji tabeli.

Tabela 25: Primerjava osnovnih lastnosti PEFC in SOFC [16,17,18,19,21]

Tip	Elektrolit	Temperatura delovanja	Izkoristek	Gostota energije	Gorivo	Uporaba
PEM ali PEFC	Polimerna membrana	50-100 °C	35-55%	3.8-13.5 kW/m ² in 1kW/l	H ₂	Avtomobili, avtobusi,...
SOFC	Keramika iz cirkonijevih oksidov	600-1000 °C	50-65% 75% z uporabo odvečne toplote	1.5-5 kW/m ²	H ₂ /CH ₄ / ostali ogljikovo diki	Predvsem večje moči. Elektrarne-Toplarnne, tovornjaki,...

Gorivne celice tipa PEM dosegajo specifično gostoto moči okoli 1kW/kg, kar je primerljivo z litijevimi baterijami. Za ceno bomo vzeli približek 1000EUR/kW, čeprav se danes cene gibljejo še okoli 4000EUR/kW. Zaradi globalnih interesov pričakujemo, da bo tehnologija kmalu dovolj zrela, da bo ob večji proizvodnji lahko dosegla omenjeno ceno.

3.1.4 Kondenzatorji

V kondenzatorju ločeno shranimo pozitivni in negativni električni naboj, ob sklenitvi električnega kroga pa dobimo električni tok. Kondenzatorji se odlikujejo po visoki specifični moči, odličnem izkoristku in dolgi življenjski dobi, žal pa je gostota shranjene energije prenizka, da bi lahko kondenzatorji sami električnemu vozilu zagotavljali zadosten doseg.

Tabela 26: Primerjava kondenzatorjev in Li-polimer baterij

Lastnost\Tehnologija	Li-Polimer	Kondenzatorji*
Energijska gostota [Wh/kg]	180	5,6
Gostota moči [W/kg]	900	10400
Življenjska doba [št ciklov, kWh/kg]	1000, 180	1000000, 5600
Cena na enoto mase [EUR/kg]	162	400
Cena na enoto energije [EUR/kWh]	900	71000
Cena na enoto moči [EUR/kW]	180	38
Cena na celotno pretečeno energijo [EUR/kWh]	0,9	0,071

* Podatki proizvajalca Maxwell [B35, Maxwell datasheet]

V primerjavi z litij-polimer baterijami so kondenzatorji odločno boljši s stališča visoke moči in življenjske dobe, slabši pa so za shranjevanje energije.

3.1.5 Sončne celice

Sončna svetloba je najbolj neposreden vir energije, ki jo s sončnimi celicami lahko pretvorimo v električno energijo. Moč, ki jo proizvajajo, je odvisna od intenzitete in valovne dolžine vpadne svetlobe, velikosti njihove površine, naklona proti vpadni poti svetlobe in izkoristka energijske pretvorbe.

Večina tehnologij sončnih celic temelji na polprevodniških elementih iz silicija, za njihovo proizvodnjo pa porabimo približno toliko energije, kot jo sončne celice proizvedejo v nekaj letih, oziroma desetih odstotkih svoje življenjske dobe. V zadnjih letih se v razvoju uveljavljajo tudi organski materiali, ki obetajo pocenitev in razširitev tehnologije.

Izkoristek pretvorbe svetlobne energije v električno, je v običajnih silicijevih sončnih celicah okoli deset odstoten, kar pomeni, da lahko s kvadratnim metrom površine v sončnem vremenu proizvedemo približno 100W električne moči. V večini primerov sončne celice same po sebi ne zadostijo energijskih potreb vozila, lahko pa kot vir ekološko neoporečne in poceni energije postanejo koristen dodatek.

3.1.6 Ostali energijski viri

V daljni prihodnosti se lahko nadejamo tudi razvoja in uporabe alternativnih energijskih virov kot so vztrajniki, mikroturbine in termo-ionski pretvorniki.

Sodobni vztrajniki se vrtijo z velikimi frekvencami in omogočajo shranjevanje mehanske energije, ki jo lahko porabimo za pogon vozila. V kombinaciji z drugimi viri energije so uporabni v redkih primerih regenerativnih zaviralnih sistemov. S stališča energijske gostote so primerljivi s kondenzatorji, posebej pa je v vsaki aplikaciji potrebno upoštevati tudi njihovo vrtilno količino.

Keramične mikroturbine izkoriščajo energijo eksplozivnih mešanic plinov in delujejo pri zelo visokih temperaturah, kjer je teoretična meja Karnotovega izkoristka višja. Delujejo pri visokih obratih in so zaradi dobrega izkoristka v optimalni delovni točki dolgoročno zanimive kot vir mehanske energije v električnem generatorju.

Termo-ionski pretvorniki so manj raziskani, a teoretično, na osnovi temperaturnih razlik, omogočajo pretvarjanje toplote v električno energijo.

3.2 Vodik in druga goriva

Energijski viri na vozilih v gibanje ali električno energijo pretvarjajo energijo, ki je na kemični način shranjena v gorivu. S stališča uporabnosti za EV se goriva razlikujejo po energijski gostoti, enostavnosti uporabe (čas polnjenja, nevarnost eksplozije, toksičnost...) in načinu pridobivanja iz primarnih energijskih virov (celoten izkoristek pretvorbe energije).

V EV se uporablja predvsem vodik, ki je shranjen v plinastem ali tekočem agregatnem stanju, redko tudi že v sistemih, kjer je absorbiran v trdni snovi. Alternativna možnost za shranjevanje vodika je tudi v shranjevanju tekočih ogljikovodikov, iz katerih v reformerju na vozilu pridobivamo vodik.

3.2.1 Vodik v plinastem agregatnem stanju

Pri običajnem zračnem tlaku je gostota vodika le $0,09 \text{ kg/m}^3$, vrelišče je pri temperaturi $-253 \text{ }^\circ\text{C}$ ali 20K in sežigna toplota vodika je 120 MJ/kg .

Če želimo doseči veliko energijsko gostoto, moramo vodik v plinastem stanju shraniti pod dovolj visokim tlakom. Pri velikih tlakih, zaradi odstopanja od idealne plinske enačbe, gostota plina ne raste več linearno s tlakom, zato je razmerje gostot pri tlakih 700 in 200 barov le 2,7 in ne 3,5, kakor bi napovedala plinska enačba. Praktična posledica omenjenega dejstva je nesmotrnost shranjevanja pri tlakih preko 700 barov. Trenutno so standardni tlaki shranjevanja med 350 in 700 barov. V naslednji tabeli si pogledimo nekatere podatke o vodiku pri različnih tlakih.

Tabela 27: podatki o vodiku

Tlak [bar]	1,0132	200	400	700
Temperatura [K]	273,15	300	300	300
Gostota [kg/m^3]	0,09	14,5	25,95	39,55
Gostota energije [MJ/kg]	120	120	120	120
Gostota energije [MJ/l]	0,0108	1,74	3,11	4,75

Posode, kjer je gorivo shranjeno pod visokim pritiskom so jeklene ali iz kompozitnih materialov. V naslednji tabeli si pogledimo približne podatke o lastnostih različnih posod za gorivo.

Tabela 28: Povzetek lastnosti tipičnih posod za gorivo

Količina\Material	Jeklo	Kompozit 200bar	Kompozit 400bar	Kompozit 700bar
Notranja prostornina [l]	50	50	50	50
Tlak [bar]	200	200	400	700
Premer [mm]	220	300	300	300
Dolžina [mm]	1600	1000	1000	1000
Teža [kg]	70	25	45	85
Shranjena energija v 50l [MJ]	87	87	155,5	237,5
Shranjena energija v 50l [kWh]	24	24	43	66
Masa shranjenega vodika [kg]	0,7	0,7	1,4	2
Specifična energijska gostota [kWh/kg]	0,35	0,96	0,96	0,78
Specifična energijska gostota [kWh/l]	0,48	0,48	0,86	1,32

Iz podatkov v zgornji tabeli je razvidno, da so kompozitne posode za gorivo boljše, predvsem kar zadeva masne gostote energije. Njihova glavna slabost je cena. Masa same posode raste hitreje kot tlak, poleg tega pa gostota vodika raste počasneje kot tlak. Zato je masna gostota shranjene energije ugodnejša pri nižjih tlakih, volumska pa pri višjih.

Zanimivo je tudi izračunati energijo, ki jo porabimo, da vodik stisnemo do visokih tlakov. Pri stiskanju do 700 barov in ob predpostavki, da pri stiskanju ne izgubljam energije, porabimo približno 5% energije, ki je sicer shranjena v vodiku.

3.2.2 Vodik v tekočem agregatnem stanju

Vodik lahko ohladimo pod vrelišče (-253°C oziroma 20K) in ga s tem utekočinimo in povečamo njegovo prostorninsko energijsko gostoto. Težava pri uporabi tekočega vodika je predvsem ohranjanje nizke temperature in polnjenje posode z gorivom. Nizko temperaturo vzdržujemo s pomočjo dobre izolacije, ki omogoča večtedensko shranjevanje brez vrenja in izgub vodika. Črpalne naprave so zelo zapletene, saj je potrebno poskrbeti za nepropustnost stika avtomobil-črpalka in za zelo dobro toplotno izolacijo.

Energija, ki jo potrebujemo, da vodik utekočinimo, je približno 30% celotne energijske vrednosti. V primerjavi s stisnjanim plinastim vodikom, kjer je ta delež energije okoli 5% je to precej več.

3.2.3 Vodik v trdnem agregatnem stanju

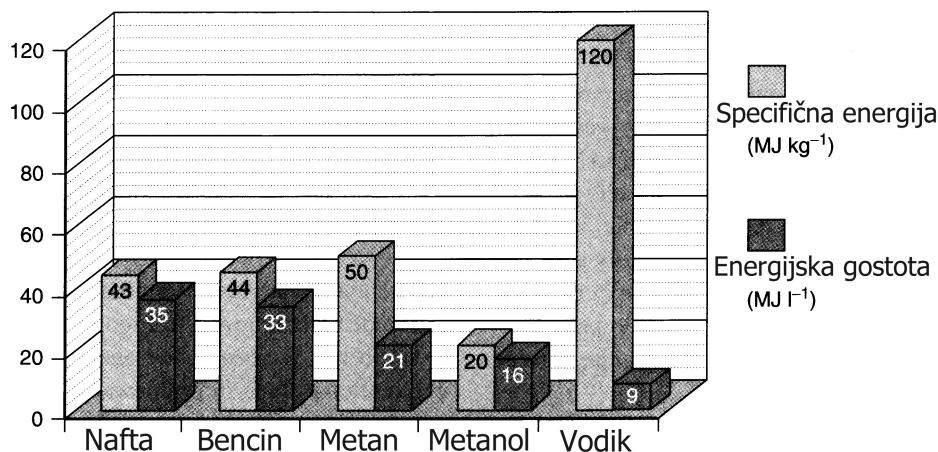
Vodik lahko shranjujemo tudi v trdnem agregatnem stanju. Ena možnost je shranjevanje znotraj nekaterih kovin, pri čemer kovinski hidrid reverzibilno hidrira ali dehidrira. Druga možnost pa je shranjevanje vodika v umetno pripravljenih »kemijskih hidridih«, ki ob reakciji z vodo sprostijo vodik. Novejše raziskave so usmerjene predvsem v absorpcijo vodika na ogljikove nanostrukture, ki obetajo zanimive rezultate.

Cilj, ki ga je postavil ameriški oddelek za energijo, je doseči 6,5 masnih odstotkov reverzibilno shranjenega vodika [B20, Kowalczyk in drugi, 2005], kar je približno dvakrat več od shranjevanja v kompozitnih rezervoarjih pod tlaki okoli 700bar , kjer dosežemo vrednosti okoli 3,1%. Trenutno najbolj perspektivne metode shranjevanja v trdni obliki dosegajo med 1,8 in 3,8 masnih procentov [B22, Li in drugi, 2005 in B21, Lueking in drugi, 2004], teoretično pa shranjevanje v ogljikovih nanostrukturah omogoča do 14% masni delež vodika [B24, Meregalli in drugi, 2001]. Shranjevanje v ogljikovih nanocevkah sicer prinaša dobre teoretične in tudi praktične rezultate, vendar je izdelava nanocevk še bistveno predraga, da bi sploh lahko razmišljali o komercializaciji te tehnologije [B23, Bungler in drugi, 2001]. Posebno pozornost pri uporabi nanomaterialov moramo posvetiti tudi zdravstveni varnosti, saj so nanodelci zelo škodljivi za respiratorni sistem ljudi, živali in rastlin.

3.2.4 Primerjava različnih goriv

Naslednji graf prikazuje specifične energijske gostote različnih goriv v tekočem agregatnem stanju.

Graf 21: Energijska gostota posameznih goriv [B36]



Prikaz energijskih gostot različnih goriv (masna in volumska). Podatki za vodik veljajo za tekoče agregatno stanje.

Tekoči vodik ima zelo veliko masno gostoto energije, a precej nižjo volumsko gostoto energije. To pomeni, da bi v vozilu posoda z gorivom zavzela več prostora, bila pa bi lažja. Če upoštevamo, da je izkoristek vozila z gorivnimi celicami precej večji od običajnih vozil z motorji na notranje izgorevanje, vidimo da tudi razlika v prostornini ni občutna. V primerjavi z vodikom pod visokim tlakom ima utekočinjeni vodik precej večjo energijsko gostoto (volumsko seveda, masna je enaka).

Ker se v prototipih EV najbolj uveljavlja skladiščenje vodika v plinastem agregatnem stanju bomo za gostoto energije uporabljali podatek 960Wh/kg

3.3 Elektromotorji

Elektromotorji omogočajo pretvorbo električne energije v mehansko. Konstrukcije različnih vrst elektromotorjev se odražajo v različnih karakteristikah med katerimi so med najpomembnejšimi izkoristek, specifični navor (razmerje med navorom in maso) in način napajanja.

Kljub bolj zapletenemu krmiljenju se za pogon električnih vozil večinoma uporabljajo asinhronski in sinhronski brezkrtačni motorji, katerih izkoristek je bistveno višji kot pri krtačnih motorjih. Visok izkoristek pretvorbe shranjene energije je pri električnih vozilih izjemnega pomena, saj ravno shranjevanje zadostne količine energije predstavlja največji problem uvajanja električnih vozil. Predvsem sinhronski motorji s permanentnimi magneti, pri katerih v rotorju ni ohmskih izgub, imajo odlične izkoristke, njihova slaba stran pa so dragi redko-zemeljski magnetni materiali.

3.3.1 »In-wheel« elektromotorji

V vozilih predstavljajo mehanski prenosni znaten del cene in teže vozila saj obsegajo približno 4,75% skupne cene [B8, Yang in drugi, 2002], masni delež pa je še nekajkrat večji. Obenem prenosni predstavljajo dodatno poslabšani energijski izkoristek (5 do 15%) [B39, Brett in drugi, 2006], zavzamejo velik del prostora in predstavljajo vir možnih obrab in okvar. Z električnim pogonom lahko, za razliko od klasičnega, realiziramo tudi koncept direktnega pogona, pri katerem so motorji nameščeni v kolesih in tako predstavljajo edini gibljivi del pogona. Take elektromotorje s tujkama imenujemo hub ali in-wheel motorji.

In-wheel motorji se v električnih vozilih že počasi uveljavljajo, v električnih kolesih in mestnih dvokolesnikih so prisotni že nekaj let, poskusno pa so uporabni tudi že v prototipih električnih avtomobilov.

Najpomembnejša lastnost, ki jo morajo izpolnjevati in-wheel motorji, je nizka masa, saj bi pretežno kolo med vožnjo povzročalo preveč vibracij. Seveda pa mora, tako kot velja za centralne motorje, tudi direktni pogon zagotavljati dober izkoristek, vzdržljivost in navor.

3.5 Značilnosti novih tehnologij

Nove tehnologije temeljijo predvsem na uporabi novih materialov in omogočajo predvsem čistejše, tišje in varčnejše delovanje. V razvoju so na področjih, kjer je v preteklosti prevladovala mehanika, sedaj v ospredju fizika materialov, kemija, elektrotehnika in mehatronika. Pomembni elementi postajajo predvsem nizka teža, majhen volumen in dober energijski izkoristek. Večina komponent je prilagojena za modularno povezovanje, manj pa je tudi gibajočih delov.

Razvoj akumulatorjev gre v smeri iskanja rešitev z visoko energijsko gostoto, specifično močjo in daljšo življenjsko dobo. Najsodobnejše litij-polimer akumulatorji imajo zadovoljivo specifično moč (900W/kg) in življenjsko dobo (1000 ciklov), problem pa predstavlja še vedno premajhna energijska gostota 200Wh/kg in cena prek 150EUR/kg.

Gorivne celice so predvsem predrage, po tehničnih karakteristikah pa so, z izjemo življenjske dobe (nekaj tisoč ur), že nad nivojem motorjev z notranjim izgorevanjem. Na tem področju predstavlja največjo težavo shranjevanje vodika, kjer so trenutno najpogosteje v uporabi visokotlačni rezervoarji (700 barov), vse več raziskav pa poteka v smeri shranjevanja v trdnih snoveh. Kombinacije različnih virov energije so prisotne v mnogih različnih pogonskih sistemih.

Na področju elektromotorjev so v ospredju sinhronski motorji z dobrim izkoristkom in majhno maso, ki se vse pogosteje uporabljajo v direktnih pogonih. Zvišuje se tudi napajalna napetost, ki v avtomobilih dosega tudi do 500V, kar je pomembno predvsem pri snovanju krmilnikov.

Poleg razvoja pogonskih komponent je velik poudarek tudi na novih, lažjih in varnejših materialih za karoserijo vozila, boljših pnevmatikah, bolj aerodinamičnih oblikah in energijsko varčnejših drugih komponentah, ki so v pomoč vozniku in potniku.

4. Pogonske arhitekture in primeri električnih vozil

Za učinkovito energijsko oskrbo vozila lahko na različne načine povežemo več manjših energijskih virov s specifičnimi odlikami in pomanjkljivostmi. Motorje z notranjim izgorevanjem in gorivne celice običajno uporabljamo kot primarni vir energije, ki zagotavlja velik doseg, kondenzatorje in akumulatorje pa kot sekundarni energijski vir, učinkovit pri zagotavljanju velike kratkotrajne moči. Poglejmo si nekaj primerov obstoječih vozil z najzanimivejšimi podatki.

4.1 Električna vozila z enim samim energijskim virom

Najenostavnejši pogon vsebuje en sam energijski vir, ki v nekaterih primerih učinkovito zagotavlja primerno zalogo energije in kratkotrajno moč.

4.1.1 Akumulatorska vozila

V najpreprostejšem pogonskem sistemu akumulator napaja elektromotor, ki preko mehanskih prenosov vrti kolesa. Tak pogon je v avtomobilski industriji prisoten že od devetnajstega stoletja, dobro pa se izkaže zaradi preproste konstrukcije in dobrega izkoristka. V večini primerov akumulatorji ne zagotavljajo zadostne zaloge energije za primeren doseg vozila, velika teža akumulatorjev poslabša vozne lastnosti, ob uporabi najsodobnejših akumulatorjev pa predstavlja največjo težavo visoka cena.

Akumulatorski pogon se je že uveljavil v električnih kolesih in skuterjih, v manjši meri pa je prisoten tudi že v električnih avtomobilih.

Sliki 2 in 3: Mestni avto GEM in Venturi Fetish



Preprost mestni električni avto GEM je primeren za vožnjo v toplem vremenu. 180kg svinčevih akumulatorjev mu omogoča avtonomijo 48 km in največjo hitrost 40km/h.



1100kg težko športno vozilo Venturi Fetish poganja centralni elektromotor s 180kW moči in navorom 220Nm, ki omogoča najvišjo hitrostjo 170km/h in pospeške do 100km/h v 4,5 sekunde. V 350kg litijevih (li-ion) akumulatorjev je shranjenih 58kWh energije, kar vozilu zagotavlja avtonomijo 300km. Cena vozila je 450.000EUR, proizvodnja pa je omejena na 25 vozil.

4.1.2 Vozila na gorivne celice

V novejših prototipih električnih vozil se uveljavljajo gorivne celice, ki so s stališča energijske gostote izrazito boljše od akumulatorjev. V zadnjih letih poteka največ raziskav in razvoja na področju materialov (bipolarne plošče, membrane, katalizator) ter sistemov za shranjevanje in dovod vodika. Širša uveljavitev gorivnih celic je pogojena s specifično močjo, izkoristkom, vzdržljivostjo in tudi s proizvodno ceno. Serijska proizvodnja vozil pa je odvisna tudi od proizvodnje vodika in izgradnje infrastrukture za prenos vodika.

Slika 4 in 5: Daimler Chrysler in GM



Daimler-Chryslerjev prototip temelji na konstrukciji Mercedesa serije A, vgrajena gorivna celica z 72kW moči in 65kW elektromotor z navorom 210Nm pa zadoščata za najvišjo hitrost 140km/h. V dveh rezervoarjih je pod pritiskom 350 barov shranjenega 1.7kg vodika, kar omogoča doseg 150km.



General Motors je na osnovi dizajna Opla Zafire razvil že tretjo generacijo prototipov vozila na gorivne celice (HydroGen3). 92kg težak centralni električni motor poganja sprednja kolesa z močjo do 60kW in navorom 215Nm (prestavno razmerje 8.67:1). Vozilo lahko doseže hitrost 160km/h, do 100km/h pa pospeši v 16 sekundah. 4,6 kg vodika omogoča avtonomijo 400km, preizkušajo pa sistem shranjevanja plinastem (700barov) in v tekočem agregatnem stanju.

4.2 Hibridna vozila

Energijske potrebe vozila se tekom dinamične vožnje zelo spreminjajo, en sam vir energije pa v izrazito spreminjajočih se pogojih delovanja ne deluje z optimalno učinkovitostjo. S povezavo več različnih virov energije v hibridni pogonski sistem želimo izkoristiti dobre lastnosti posameznih komponent.

S primarnim virom energije poskrbimo za zadostno zalogo energije, s sekundarnim pa za zadostno moč. Hibridni viri se razlikujejo po načinu povezave komponent in različnih uporabljenih komponentah.

4.2.1 Vzporedni hibrid - motor z notranjim izgorevanjem in akumulator

Motorji z notranjim izgorevanjem so v vozilih odločno prevladovali v dvajsetem stoletju, v zadnjih letih pa smo že priča postopnemu uveljavljanju hibridnih vozil, ki združujejo prednosti kombinacij klasičnih in sodobnih tehnologij.

V vzporednem hibridu mehanski in električni pogon ločeno dodajata navor na pogonsko os vozila. Tržno najuspešnejše hibridno vozilo je Toyota Prius, v katerem bencinskemu motorju z dodatnim navorom pomaga električni pogon, ki ga napajajo akumulatorji.

Slika 6: Toyota Prius



Toyota Prius poganjata 1,5 litrski bencinski motor s 66kW moči in sinhronski motor s permanentnimi magneti z močjo 50kW, ki dobiva energijo iz NiMH akumulatorjev.

Slika 7: Toyota RX400h



RX400h ima poleg 155kW bencinskega motorja še dva sinhronski elektromotorja in sicer 123kW na prednji in 50kW na zadnji osi.

4.2.2 Zaporedni hibrid - motor z notranjim izgorevanjem in akumulator

V zaporednem hibridu vozilo poganja le električni pogon, drugi vir pa skrbi za energijsko oskrbo. Tovrstni motorji se že dolgo uporabljajo v večjih vozilih kot so ladje, vlaki in velika gradbena vozila. Motor z notranjim izgorevanjem lahko deluje enakomerno v optimalni delovni točki, kjer ima najboljši izkoristek in poganja generator, ki napaja akumulator.

Slika 8: Ford Escort Series Hybrid

V zaporednem pogonu gre vsa mehanska moč preko električnega pogona. Forda poganja 32kW indukcijski motor, energijo pa mu zagotavljata motor z notranjim izgorevanjem na avtoplin (15kW), in 144 voltni sistem NiMH akumulatorjev.



4.3 Električni hibridi

Hibridni pogoni, ki vsebujejo motorje z notranjim izgorevanjem, predstavljajo prehodno stopnjo do električnih hibridov, kjer so v pogonu prisotne le električne komponente. Primarni vir energije so najpogosteje gorivne celice, sekundarni pa akumulatorji ali kondenzatorji.

4.3.1 Gorivna celica in akumulator

Slika 9: Toyota Fine-N [A8]



Naslednik Toyotinega Priusa bo model Fine-N, kjer bo motor z notranjim izgorevanjem nadomestila gorivna celica. Natančni tehnični podatki prototipa še niso znani.

4.3.2 Gorivna celica in kondenzator

Pri Hondi so razvili električni hibridni pogonski sistem z gorivno celico in kondenzatorji. V 150 litrskem rezervoarju je pod tlakom 350 barov shranjenega 3.75kg vodika, kar zadostuje za 430km vožnje. 80kW elektromotor poganja prednjo pogonsko os in vozilo požene do 150km/h.

Slika 10: Honda



4.3.3 Akumulator in kondenzator

S kondenzatorjem lahko podaljšamo življenjsko dobo akumulatorjev, od katerih pri pogonu ne zahtevamo visoke moči. Zaradi relativno nizke energijske gostote akumulatorjev in še nižje energijske gostote kondenzatorjev so ti sistemi uporabni le v aplikacijah na vozilih nizke moči, kot so skuterji in podobna vozila.

Zaradi potrebe po podaljševanju življenjske dobe akumulatorjev, se vse bolj uveljavljajo kombinacije akumulatorjev in kondenzatorjev kot kombiniranega sekundarnega vira energije v električnih vozilih.

4.4 Direktni pogon

Bistvo direktnega pogona (DD - direct drive) je v tem, da ima vsako pogonsko kolo svoj lastni elektromotor, ki je brez kakršnih koli dodatnih mehanskih prenosov vgrajen neposredno v kolo. Tako rotor elektromotorja postane že kar del pogonskega (aktivnega) kolesa. Električni dvokolesnik ima motor v pestu enega kolesa, elektromobil pa ima štiri motorje, po enega v platišču vsakega kolesa. Vsi elementi mehanskega prenosa torej odpadejo, preostanejo samo kolesa, kot edini gibljivi del pogonskega sistema. Motor za DD pogone vozil mora izpolnjevati dve navidez težko združljivi zahtevi. Biti mora dovolj lahek, da ga lahko vgradimo neposredno v kolo in imeti mora dovolj velik navor, da zadosti zahtevanim voznim lastnostim.

Zaradi dodatne mase, ki jo v aktivnih kolesih predstavljajo elektromotorji, je veliko raziskav usmerjenih v zasnove vpetja [G3, Bridgestone, 2005; G8, SCIENCE AND TECHNOLOGY CORPORATION, 2002], amortizacije [G2, Toyota, 2006] in zaščite [G11, Audi, 2002]. Nekatere inovativne rešitve, kljub nekoliko manjšemu izkoristku, še vedno vsebujejo tudi prestave [G1, Hitachi, 2006], katerih glavna prednost je enostavnejša zasnova in cenejša izdelava krmilne elektronike ter manj stroge zahteve za največji navor motorja.

Oglejmo si koncept direktnega pogona apliciran na primer električnega avtomobila in pri tem naštejmo njegove glavne prednosti:

- Centralni element vozila zdaj ni več motor, temveč mikroprocesor, ki uravnava delovanje vseh štirih motorjev. Elektronsko krmiljen pogon na štiri kolesa omogoča dobro oprijemanje ceste, zato je vozilo veliko varnejše kot klasični avto.
- V avtomobilih s centralnim motorjem se veliko energije izgubi v kompliciranem sistemu mehanskih prenosov, v električnem vozilu nove generacije pa teh izgub v mehanskih prenosih seveda ni. Mehanska energija se sprošča šele na tistem mestu, kjer je potrebna – to je ob stiku s cesto.
- Ker so kolesa avtonomna, so možne nove gibalne funkcije, na primer obračanje na mestu ali vožnja vstran [G6, Toyota, 2004]. To utegne priti prav pri vozilih za mestno vožnjo.
- V primeri s klasičnimi avtomobili ima DD elektromobil manjše število sestavnih delov (na primer, odpadejo klasični mehanski prenosi s številnimi zobniki, pa že sam bencinski motor ima nekaj tisoč sestavnih delov). Torej bo to vozilo cenejše od današnjih avtomobilov, takoj ko se bodo ustalili novi tehnološki postopki.
- To vozilo je tudi zelo lahko. Celotni mehanski pogonski sistem skupaj (štirje elektromotorji) tehta le kakih 20kg. Izdelamo lahko varen štirisedežnik z maso pod 600 kg. To nadalje prispeva k odlični ekonomiji vozila.
- Ker se motorji umaknejo v kolesa, so možne nove oblikovne rešitve vozila, s poudarkom na človeku prijazni obliki in na izboljšani aerodinamiki. Nosilci in karoserija se lahko združita v enotno samonosilno kapsulo iz novih materialov, ki dobro absorbirajo odvečno energijo ob morebitnem trku. Ta kapsula je osvobodena nošenja gibljivih delov (edini gibljivi del so kolesa, pripeta nanjo) in je zato lahko povsem prilagojena trem osnovnim funkcijam: povečani varnosti, dobremu počutju in optimalni aerodinamiki.

Poglejmo si nekaj primerov vozil z že implementiranim direktnim pogonom.

Slika 11: Peugeot in njegov in-wheel motor



V Peugeotovem Quarku so v vseh štirih kolesih nameščeni 15kg težki elektromotorji nazivne moči 10kW (kratkotrajno 28kW). 360g vodika je pod 700bari shranjenega v 9 litrskem rezervoarju, kar omogoča avtonomijo okoli 100km, pri varčni vožnji celo do 130km.

Pri Mitsubishiju imajo tudi že izdelan prototip vozila z direktnim pogonom.

Slika 12: Mitsubishi in njegov in-wheel motor [A7]



S štirimi 50kW in-wheel motorji (vsak 518Nm navora), lahko 1590kg teški Mitsubishi Lancer doseže hitrost 180km/h, Li-ionske baterije s 33,7kWh električne energije pa mu omogočajo 250km avtonomije.

4.5 Značilnosti obstoječih električnih vozil

Na cestah so danes prisotni predvsem hibridni avtomobili, ki uporabljajo preizkušeno tehnologijo toplotnih motorjev v kombinaciji z dodatnim električnim pogonom. Zaradi nizke avtonomije, visoke cene in neurejene infrastrukture črpališč za polnjenje z vodikom, so čisto električni avtomobili še vedno omejeni predvsem na prototipno preizkušanje.

Splošne lastnosti prototipov električnih vozil so predvsem v nizki avtonomiji in nekoliko preveliki teži. Prepogosto se v razvoju uporablja obstoječa bencinska vozila, ki jih le nadgradijo z električnim pogonom. Boljše rezultate dosegajo prototipi, kjer je celo vozilo prilagojeno novemu pogonu.

Poleg avtomobilov pa je na cestah in kolesarskih stezah vedno več manjših vozil, kjer lahko s preizkušenimi akumulatorji in enostavnimi krtačnimi elektromotorji že naredimo električno vozilo z odličnimi voznimi lastnostmi.

5. Analiza možnih zasnov pogona

V tem poglavju si bomo pogledali okvirne izračune glede tehničnih možnosti za vpeljavo pogonov v različne vrste vozil. V pomoč nam bodo fizikalne analize vožnje iz drugega poglavja, karakteristike novih tehnologij iz tretjega poglavja in opis arhitektur pogonskih sistemov iz četrtega.

Za vsako vrsto vozila bomo približno izračunali parametre pogonskega sistema in ocenili kakšne so tehnične in ekonomske možnosti za uveljavitev različnih arhitektur. Na tem mestu nas bo zanimal predvsem vir energije, ki predstavlja največjo oviro za uveljavitev električnih vozil. Na koncu bomo izbrali eno vrsto vozila, za katero bomo v nadaljevanju podrobneje zasnovali pogonski sistem.

Pogonski sistem mora vozilu zagotoviti zadovoljive vozne lastnosti, ki smo jih definirali že pri fizikalni analizi vožnje. Na tem mestu se bomo omejili na parametre energijskega vira, ki mora zagotavljati predvsem zadostno

- največjo moč,
- zalogo energije za zahtevano avtonomijo vozila in
- zalogo energije za kratkotrajno vožnjo z večjo močjo.

Kot rezultat si bomo pogledali maso in ceno pogonskega sistema za primere različnih vozil, različnih pogonskih arhitektur in različne izbire komponent. V nekaterih primerih bo očitno, da zasnova pogona na izbrani način ni izvedljiva, saj bi bil pogon pretežek. Cene pogona so le informativne, osnovane pa so na današnjih ponudbah za različne komponente. V kasnejši podrobnejši analizi bomo dinamično upoštevali tudi spreminjajoč izkoristek pogonskega sistema, na tem mestu pa bomo predpostavili, da je skupni izkoristek električnega pogonskega sistema (krmilnik in elektromotor) enak 85%.

5.1 Preprosta pogonska arhitektura z enim samim virom energije

Samostojni energijski vir mora zagotavljati zadostno avtonomijo in zadovoljive vozne lastnosti. Okvirne parametre energijskega vira bomo izračunali na osnovi tehničnih zahtev za pogonski sistem [tabela 23 (stran 32)] in lastnostih obstoječih tehnologij [tabele 24, 26 in 28 na straneh 35, 37,39].

Tabela 29: Predvideni masa in cena samostojnega energijskega vira v različnih vozilih

energijski vir\vozilo	Osebni avto	Mestni avto	Mestni avtobus	Skuter
Svinčev akumulator m za največjo moč [kg], m za zadostno zalogo energije [kg], Cena (strožji pogoj za maso) [EUR]	265 3125 7500	60 1020 2450	716 21300 51100	23,0 62,5 150
NiMH akumulator m za največjo moč [kg], m za zadostno zalogo energije [kg], Cena[EUR]	212 2500 80000	56 816 26100	573 17000 545000	18,3 50 1600
Li-ion akumulator m za največjo moč [kg], m za zadostno zalogo energije [kg], Cena[EUR]	528 1140 75000	141 370 24500	1433 7745 511000	46 22,7 1500
Li-polimer akumulator m za največjo moč [kg], m za zadostno zalogo energije [kg], Cena[EUR]	118 694 112500	32 227 36700	319 4733 767000	10,2 13,9 2250
FC m za največjo moč [kg], m za zadostno zalogo energije [kg], Cena[EUR]	106 260* 106000	28,2 85* 28200	286 1780* 243000	9,2 5,2* 7800
kondenzator m za največjo moč [kg], m za zadostno zalogo energije [kg], Cena[EUR]	10,1 22320 8930000	2,7 7286 2914000	27,5 152000 60800000	0,9 446 179000

*podatek za maso primerne posode z vodikom v plinastem stanju, ob upoštevanju energijske gostote 960Wh/kg in 50% izkoristka gorivne celice.

Za vsako vrsto vozila in energijski vir smo izračunali zahtevano maso energijskega vira za zagotavljanje največje moči in zadostne zaloge energije, strožji kriterij pa smo nato uporabili še pri informativnem izračunu cene vira energije.

Rdeče obarvane vrednosti predstavljajo tehnološko ali cenovno neizvedljive rešitve.

Neobarvane vrednosti so nevtralne.

Zeleno obarvane vrednosti so zanimive in izvedljive

Izračunane mase in cene različnih virov energije pri različnih vrstah vozil ponazarjajo težavnost preboja električnih pogonov z enim samim virom energije. Konstrukcija spodobnega avtomobila je praktično izvedljiva le z uporabo gorivnih celic, ki pa so trenutno še predrage. Pri zasnovi mestnih avtomobilov bi si lahko pomagali z gorivnimi celicami ali akumulatorji, če bi se le ti pocenili. Popuščanje pri zahtevani avtonomiji bi omogočalo enostavnejšo realizacijo, saj predstavlja ravno zaloga energije tu največjo oviro. Pri avtobusih lahko spet uporabimo le gorivno celico, za skuter pa so dobre vse vrste baterij, presenetljivo pa ravno v tem najšibkejšem vozilu, ta trenutek zaradi previsoke cene, uporaba gorivne celice ni smiselna. Po pričakovanju si s samostojno uporabo kondenzatorjev nikakor ne moremo pomagati.

5.2 Klasični hibridni pogoni z motorjem z notranjim izgorevanjem

Za sekundarni energijski vir, ki z veliko specifično močjo in čistim delovanjem v klasičnih hibridnih sistemih pomaga motorju z notranjim izgorevanjem, moramo upoštevati tudi tri dodatne pogoje:

- zagotoviti mora zadostno avtonomijo brez emisij,
- zadostno zalogo energije za kratkotrajno povečano moč vožnje in
- zdržati zahtevano življenjsko dobo.

Tabela 30: Zahtevana življenjska doba sekundarnega energijskega vira:

Vozilo	Življenjska doba [leta]	Letno prevožena razdalja [km]	Skupno prevožena razdalja [km]
Osebni avto	3	20000	60000
Mestni avto	3	20000	60000
Mestni avtobus	1	60000	60000
Skuter	3	10000	30000

Pri izračunu zahtevane življenjske dobe smo si izbrali zgornje vrednosti. Kasneje se bo izkazalo, da življenjska doba v večini primerov ne predstavlja najstrožjega kriterija za sekundarni vir energije.

Za vsako vrsto vozila bomo izračunali, kakšno zalogo energije mora zagotavljati sekundarni energijski vir in ob zasnovi pogona izbrali najstrožjega izmed treh pogojev.

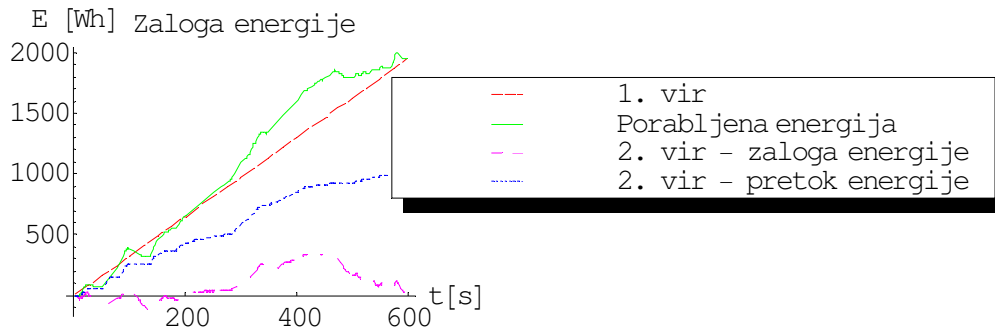
5.2.1 Energijska zaloga osebnega avtomobila

Za zagotovitev zadostne avtonomije brez emisij (60km) potrebujemo pri osebнем avtomobilu 10667Wh zaloge energije, kar se bo kasneje izkazalo za najstrožji pogoj.

Zalogo energije, ki jo potrebujemo za kratkotrajno povečano moč vožnje, bomo ocenili na osnovi voznega cikla. Predvideli bomo, da primarni energijski vir neprestano deluje z močjo, ki je enaka povprečni moči vožnje v voznem ciklu in izračunali energijo, ki jo mora zagotoviti sekundarni vir energije. V primeru osebnega avtomobila mora sekundarni vir energije zagotoviti najmanj 402Wh energije.

Zahtevo za zadostno življenjsko dobo sekundarnega energijskega vira bomo določili na osnovi energije, ki se ob običajni uporabi, torej v voznem ciklu, sprosti v sekundarnem energijskem viru. Gre za 102Wh/km, kar ob zahtevani življenjski dobi (60.000km) predstavlja 6141kWh.

Graf 22: Energija tekom voznega cikla pri osebnem avtomobilu

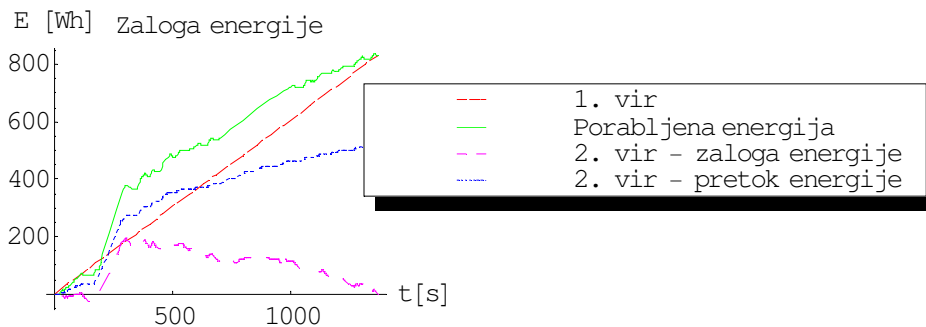


Rdeča krivulja prikazuje dovajanje energije s primarnim virom, zelena dejansko energijo, ki se porabi tekom vožnje, modra energijo, ki jo zagotavlja sekundarni vir energije in vijolična zahtevano stanje zaloge energije v sekundarnem viru.

5.2.2 Energijska zaloga mestnega avtomobila

Za zagotovitev zadostne avtonomije brez emisij (100km) potrebujemo pri mestnem avtomobilu 8163Wh zaloge energije, kar se bo tudi tu izkazalo za najstrožji pogoj. Za kratkotrajno povečanje moči potrebujemo najmanj 227Wh energije. Na vsak prevožen kilometer sekundarni vir v mestnem avtomobilu zagotovi 52Wh energije, kar tekom zahtevane življenjske dobe (60.000km) predstavlja 3106kWh energije.

Graf 23: Energija tekom voznega cikla pri mestnem avtomobilu

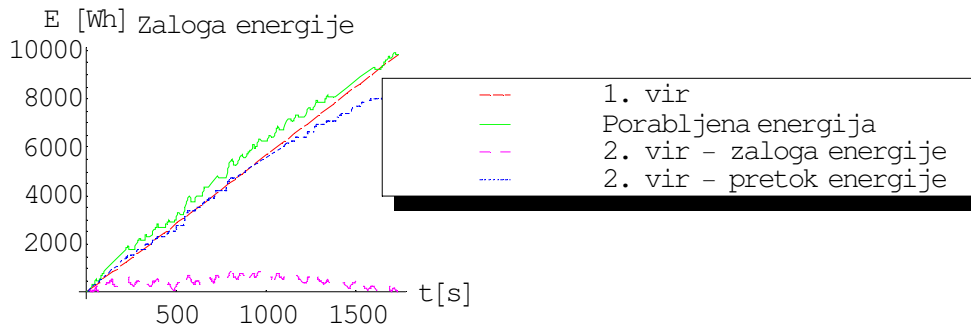


Rdeča krivulja prikazuje dovajanje energije s primarnim virom, zelena dejansko energijo, ki se porabi tekom vožnje, modra energijo, ki jo zagotavlja sekundarni vir energije in vijolična zahtevano stanje zaloge energije v sekundarnem viru.

5.2.3 Energijska zaloga mestnega avtobusa

Za zagotovitev zadostne avtonomije brez emisij (200km) potrebujemo pri mestnem avtobusu 213000Wh zaloge energije, kar se bo tudi tu izkazalo za najstrožji pogoj. Za kratkotrajno povečanje moči potrebujemo najmanj 1058Wh energije. Vsak kilometer sekundarni vir zagotovi 9224Wh energije, tekom cele življenjske dobe pa 92200kWh energije.

Graf 24: Energija tekom voznega cikla pri mestnem avtobusu

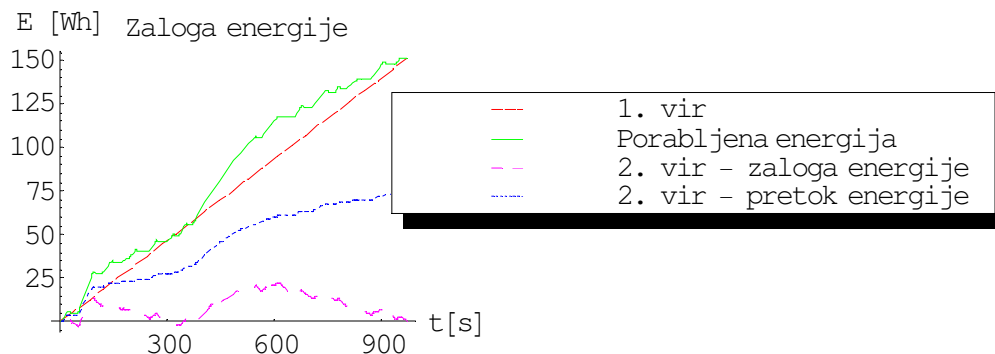


Oznake krivulj so enake kot pri prejšnjih grafih. Zahtevana vmesna zaloga energije je relativno majhna, kar je razumljivo, saj se sekundarni vir med pogostimi postanki pogosto napolni.

5.2.4 Energijska zaloga skuterja

Za zagotovitev zadostne avtonomije brez emisij (60km) potrebujemo pri skuterju 1492Wh zaloge energije. Za kratkotrajno povečanje moči potrebujemo le 26Wh energije. Vsak kilometer sekundarni vir zagotovi 12,4Wh energije, tekom cele življenjske dobe (30.000km) pa 371kWh energije.

Graf 25: Energija tekom voznega cikla pri skuterju



Oznake krivulj so enake kot pri prejšnjih grafih.

5.2.5 Povzetek o zahtevah za sekundarni energijski vir

Tabela 31: Zahtevana kapaciteta sekundarnega energijskega vira:

Zahteve za sekundarni vir vozilo	Energijska kapaciteta za zadostno avtonomijo brez emisij [Wh]	Energijska kapaciteta za kratkotrajno povečanje moči [Wh]	Vsa pretečena energija tekom cele življenjske dobe [kWh]
Osebni avto	10667	402	6141
Mestni avto	8160	227	3106
Mestni avtobus	213000	1058	92200
Skuter	1492	26	371

Tabela predstavlja zahtevane parametre za sekundarni energijski vir v različnih vozilih. Pri nadaljnjih izračunih bomo pri vsakem vozilu upoštevali najstrožjega izmed kriterijev.

V primeru klasičnih hibridov z motorji z notranjim izgorevanjem, predstavlja najstrožji pogoj za kapaciteto sekundarnega energijskega vira zahteva za brezemisijisko avtonomijo. Izsledke tabele bomo lahko koristno uporabili tudi pri električnih hibridnih pogonih.

5.2.6 Možne zasnove klasičnih hibridnih pogonov

Poglejmo si možne parametre klasičnih hibridnih virov energije z različnimi komponentami za različne vrste vozil. Maso motorja z notranjim izgorevanjem bomo izračunali na osnovi zahtevane povprečne moči, maso sekundarnega vira pa na osnovi najstrožjega pogoja izmed zadostne največje moči, brezemisijiske vožnje, življenjske dobe in energije za kratkotrajno povečano moč.

Za motor z notranjim izgorevanjem bomo upoštevali podatek 313W/kg in povprečen izkoristek 10%, za gorivo pa energijsko gostoto 10kWh/kg. Neodvisno od vrste sekundarnega vira energije dobimo pri vsaki aplikaciji enak rezultat za maso motorja in za maso goriva.

Tabela 32: Parametri primarnega in sekundarnega vira energije v klasičnem hibridnem pogonu

arhitektura\vozilo	Osebni avto	Mestni avto	Mestni avtobus	Skuter
Masa motorja z notranjim izgorevanjem [kg] Masa goriva [kg]	76,8 52,9	12,7 17,4	175,2 362	4,4 1,1
ICE+Svinčev akumulator m sek. vira A;B;C;D [kg] skupna masa [kg] Cena[EUR]	166;147;32;267 396 4480	40;77;15;204 234 1125	474;1384;251;5320 5862 21539	4,9;9,5;2,2;37 43 309
ICE+NiMH akumulator m sek. vira A;B;C;D [kg] skupna masa [kg] Cena[EUR]	133;99;25;213 343 10670	32;51;12;163 193 5860	380;923;201;4260 4800 145000	3,9;6,3;1,8;30 35 1170
ICE+Li-ion akumulator m sek vira A;B;C;D [kg] skupna masa [kg] Cena[EUR]	333;54;12;97 462 25800	80;27;6;74 110 5910	949;503;91;1936 2470 136550	10;3,7;0,8;13,6 19 1110
ICE+Li-poli. akumulator m sek. vira A;B;C;D [kg] skupna masa [kg] Cena[EUR]	74;33;7;59 204 15820	18;17;3;45 75 7980	211;308;56;1184 1720 200440	2,1;2;0,5;8,3 13,7 1560
ICE+kondenzator* m sek. vira A;B;C;D [kg] skupna masa [kg] Cena[EUR]	6;1;227;1905 2064 (357*) 766000 (167600*)	1,5;0,5;110;1460 1490 (140*) 584000 (56700*)	18;10;1790;38030 38570 (2327*) 1522000 (891200*)	0,2;0,1;16;266 272 (21,5*) 106800 (10800*)

*Pri kombinaciji motorja z notranjim izgorevanjem in kondenzatorji, je zaradi majhne energijske gostote sekundarnega vira energije nerealno zagotoviti dovolj veliko zalogo energije za zahtevan doseg brez emisij. Pri vsaki vrsti avtomobila (štirje stolpci) smo za vsako izbiro sekundarnega vira energije (pet vrstic) izračunali njegovo maso, ki zadosti naslednjim štirim kriterijem:

kriterij A: zadostna skupna moč

kriterij B: zadostna življenjska doba

kriterij C: zadostna zaloga energije za kratkotrajno povečanje moči

kriterij D: zadostna zaloga energije za brezemisijno vožnjo

Nato smo izbrali najstrožji pogoj in izračunali skupno maso in ceno vira energije. Večina rezultatov v tabeli kaže na uporabnost hibridnih pogonov tako s stališča skupne mase, kot tudi cene.

Za ta posebni primer, so v oklepajih zapisani rezultati brez zahteve po vožnji brez emisij.

Z **rdečo** barvo so označene nesprejemljivi parametri, z **zeleno** pa najbolj zanimive rešitve

S hibridnimi sistemi lahko zasnujemo tudi pogone močnejših vozil. V osebni vozilih se zdijo uporabni NiMH in nekoliko dražji litij-polimerni akumulatorji. Mestni avto lahko realiziramo z vsemi tipi akumulatorjev. V primeru mestnega avtobusa se v naši analizi, tako kot v študiji [A1, Tzenga, 2005], za najzanimivejšega izkaže hibridni sistem s sodobnimi akumulatorji. Pri skuterju je morda ocena za maso motorja z notranjim izgorevanjem, kjer smo privzeli podatek o specifični moči pri večjih motorjev, nekoliko preveč optimistična, poleg tega pa tudi hibridni pogon ne prinese bistvene prednosti v primerjavi s samostojnim energijskim virom.

Rezultati se ujemajo z drugimi študijami [B11, Xiao in drugi, 2003], ki kažejo na dejstvo, da kondenzatorji na tej stopnji razvoja, zaradi nizke energijske gostote, niso najprimernejši vir energije za električna vozila in da se litijeve baterije dobro obnesejo tudi v hibridnih sistemih.

5.3 Električni hibridi

Električni hibridi, za razliko od klasičnih, ne vsebujejo motorjev z notranjim izgorevanjem, ampak gorivno celico. S stališča iskanja optimalnih parametrov vira energije, je med gorivno celico in motorjem z notranjim izgorevanjem ključna razlika predvsem v brezemisijem delovanju, nekoliko večji gostoti moči in bistveno višji ceni. Pri energijski gostoti goriva bomo upoštevali tudi maso posode z gorivom [Tabela 28, stran 35] in uporabili podatek 960Wh/kg, za izkoristek gorivne celice pa bomo vzeli 50%. Metoda izračuna parametrov energijskega vira je podobna kot pri klasičnih hibridih, le da nam ni več potrebno upoštevati avtonomije brez emisij.

Tabela 33: mase primarnega in sekundarnega vira energije v električnem hibridnem pogonu

arhitektura\vozilo	Osebni avto	Mestni avto	Mestni avtobus	Skuter
Masa gorivne celice [kg]	28,3	4,7	64,5	1,6
Masa posode z gorivom in goriva [kg]	248,9	81,7	1703	5,0
FC+Svinčev akumulator m sek. vira A;B;C [kg]	203;148;232	45;77;15	576;1384;251	7,3;9,5;2,2
skupna masa [kg]	480	163	3150	25
cena[EUR]	28780	4860	67840	1660
FC+NiMH akumulator m sek. vira A;B;C [kg]	162;99;25	36;51;12	461;923;201	5,8;6,3;1,8
skupna masa [kg]	439	138	2691	18,9
cena[EUR]	33480	6320	94040	2010
FC+Li-ion akumulator m sek vira A;B;C [kg]	405;54;12	90;28;6	1152;503;91	14,5; 3; 0,8
skupna masa [kg]	683	177	2920	21,1
cena[EUR]	55050	10650	140550	2570
FC+Li-poli. akumulator m sek. vira A;B;C [kg]	90;33;7	20;17;3	256;308;56	3,2; 2; 0,5
skupna masa [kg]	357	106	2076	10,7
cena[EUR]	42880	7940	114340	2280
FC+kondenzator m sek. vira A;B;C [kg]	8; 1; 227	1,7; 0,5; 110	22;10;1791	0,3; 0,1; 15,7
skupna masa [kg]	504	196	3561	22,3
cena[EUR]	119000	48600	781000	7910

Pri vsaki vrsti avtomobila (štirje stolpci) smo za vsako izbiro sekundarnega vira energije (pet vrstic) izračunali njegovo maso, ki zadosti naslednjim trem kriterijem:

kriterij A: zadostna skupna moč

kriterij B: zadostna življenjska doba

kriterij C: zadostna zaloga energije za kratkotrajno povečanje moči

Nato smo izbrali najstrožji pogoj in izračunali skupno maso in ceno vira energije. Večina rezultatov v tabeli kaže na uporabnost hibridnih pogonov tako s stališča skupne mase, kot tudi cene.

Rdeče so obarvane nerealne možnosti, **zeleno** pa bolj zanimive.

Že prvi pogled na barve v tabeli pokaže, da obstaja veliko različnih rešitev za zasnovano električnega hibridnega pogona v vseh štirih vrstah vozil. Pri osebni avtomobilu je med najrealnejšimi možnostmi kombinacija z litij-polimernim in morda NiMH akumulatorjem. Ostale tri vrste vozil pa je realno možno zasnovati z vsemi kombinacijami komponent, celo s kondenzatorji.

5.4 Razlogi za razvoj električnih mestnih avtomobilov

Z aplikativnimi raziskavami in z razvojem želimo reševati najbolj pereče družbene probleme. S stališča zmanjševanja globalnega onesnaževanja bi bilo najbolj smiselno razvijati pogone za osebne avtomobile, vendar smo se s tehnično analizo prepričali, da je to najbolj zahtevno področje, saj lahko zaradi velikosti pogonu namenimo zelo omejen prostor, obenem pa mora pogon zagotavljati relativno veliko trajno in najvišjo moč.

Mestna vozila se zdijo zelo primerna izbira iz ekoloških razlogov, saj ravno primarne emisije v mestih povzročajo ljudem največ zdravstvenih težav. Med mestnimi avtobusi in avtomobili bi se odločili za slednje, saj jih je več in tudi tehnična realizacija je enostavnejša. Predvsem v velikem razmerju med najvišjo in povprečno močjo, ki je pri mestnih avtomobilih dvakrat večje kot pri ostalih vozilih, vidim velike možnosti za uveljavitev hibridnih pogonov. Poleg tega je avtonomija mestnih vozil lahko nekoliko manjša od ostalih, polnjenje akumulatorjev lahko poteka iz omrežja, pri majhnih hitrostih pa lahko v zasnovo tudi uspešno vključimo direktni pogon.

Manjša vozila, kot so skuterji in ostali dvokolesniki, so sicer zanimivi predvsem z ekoloških vidikov, kjer bi s čistejšimi električnimi pogoni nadomestili dvotaktne bencinske motorje, a razvoj pravzaprav ne zahteva novih inovacij, saj odlični električni skuterji že obstajajo. Odvisnost od vremenskih pogojev in tradicionalna navezanost na azijsko tržišče, kažeta na uveljavljanje električnih skuterjev predvsem v Aziji.

6. Zasnova pogona v električnem mestnem avtomobilu SMEH

Predvsem zaradi tehničnih in ekoloških lastnosti mestnega avtomobila sem se odločil zasnovati optimalni pogonski sistem, s katerim bomo izkoristili čim več prednosti prehoda na električni pogon. Zaradi velikega razmerja med zahtevano največjo in trajno močjo, je očitno, da bo najzanimivejši hibridni pogon. Mestni avto imenujmo sodobni mestni električni hibrid, na kratko Smeh.

6.1 Zastavljeni cilji

Smeh bo na trgu pozicioniran kot zmogljiv in uporaben ekološki avto, ki vozniku ponuja vse razkošje klasičnih vozil ter prijetnejšo in cenejšo vožnjo. V drugem poglavju smo pri fizikalni analizi vožnje [Tabela 9, stran 19] že omenili osnovne vozne zahteve, tu pa bomo dodali le še nekaj malo bolj specifičnih, ki so povezane predvsem z večjimi obremenitvami pri vožnji v klanec in v vetrovnih vremenskih pogojih.

Glede vožnje v klanec naj nam bo za merilo višinska razlika 500m, za katero mora imeti vozilo zadostno zalogo energije, da jo prevozi izključno z električnim pogonom.

Vozne lastnosti, kot so doseg, najvišja hitrost in trajna hitrost, se med vožnjo proti vetru, ki piha s hitrostjo 10m/s, ne smejo bistveno spremeniti.

6.2 Izbira elektromotorjev

V zadnjem obdobju se v prototipih EV najbolj uveljavljajo sinhronski motorji s permanentnimi magneti, vse pogosteje pa tudi direktni pogon. Če primerjamo težo in izkoristek direktnega in klasičnega pogona se direktni izkaže za boljšega.

Tabela 34: direktni in klasični centralni pogon z mehanskimi prenosi

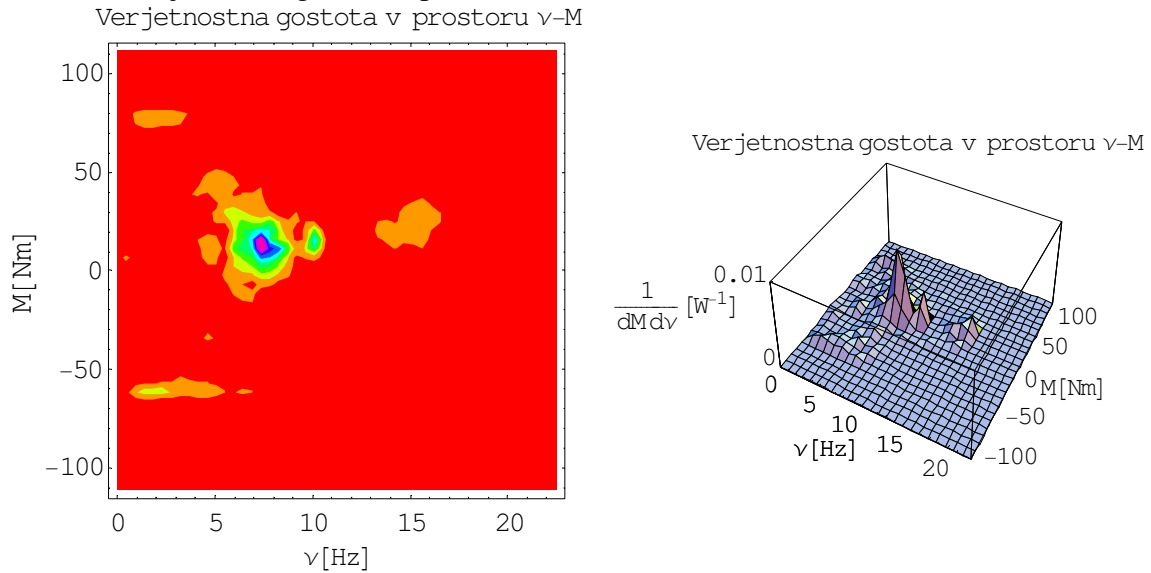
Količina\Tip pogona	Direktni	Centralni
Masa motorjev	4 x 9kg	30kg
Masa prenosov	0	50kg
Skupna masa pogona	36kg	80kg
Izkoristek motorjev	88%	96%
Izkoristek prenosov	100%	85%
Izkoristek celega pogona	88%	82%

Podatke smo izbrali na osnovi analiz novega elektromotorja Elaphe za direktni pogon in primerljivega centralnega motorja s štirikrat večjim navorom.*

6.2.1 Obremenjenost motorjev

Tekom voznega cikla elektromotorji delujejo v spremenljivih delovnih pogojih, med katerimi sta najpomembnejša frekvenca in navor. Definirali bomo nov pojem in sicer verjetnostno gostoto v prostoru frekvenc in navorov, ki ponazarja, kolikšni del skupnega časa motor deluje v danem področju navora in frekvence.

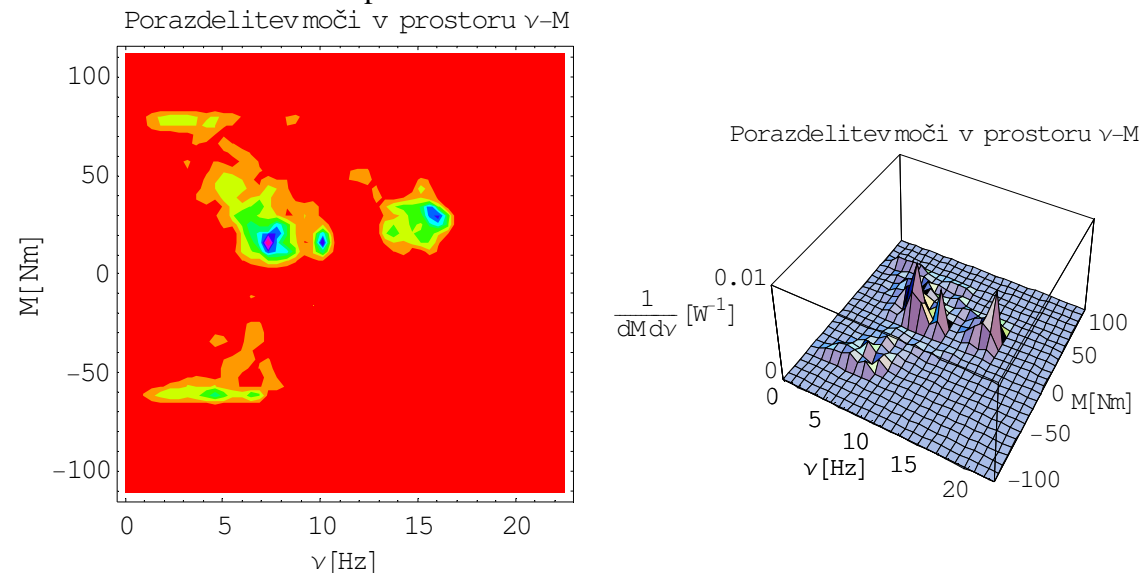
Graf 26: Verjetnostna gostota v prostoru frekvenc in navorov



Tekom vožnje v standardnem voznem ciklu motorji delujejo z različnim navorom pri različnih frekvencah. Časovna porazdelitev delovanja v različnih režimih nam pomaga pri optimizaciji izkoristka optimalnega elektromotorja.

Če verjetnostno gostoto v vsaki točki pomnožimo še s pripadajočo močjo, dobimo nov pojem in sicer porazdelitev moči po frekvenci in navoru, ki pove, kakšen delež energije se pretoči v določenem režimu delovanja motorja.

Graf 27: Porazdelitev moči po navoru in frekvencah

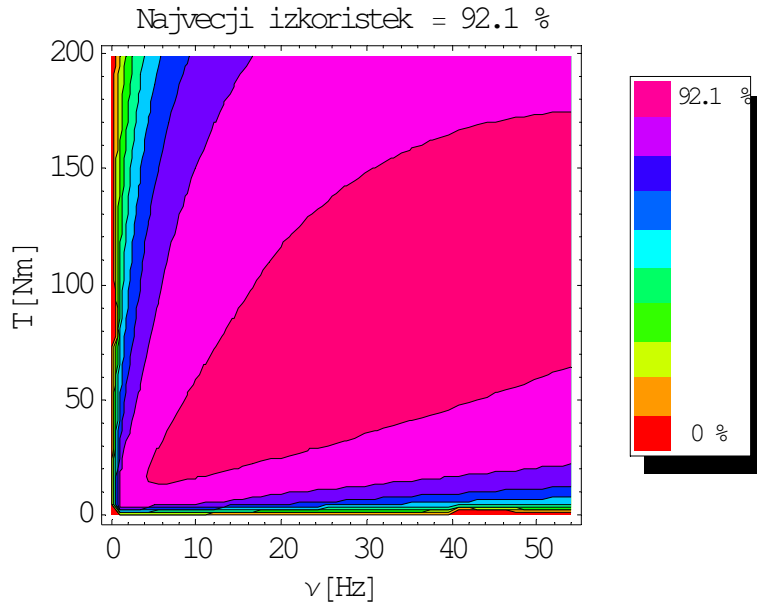


Pretok moči elektromotorja pri določenih pogojih delovanja

Ti grafi so pomembni pri konstrukciji optimalnega motorja, katerega izkoristek mora biti optimiziran na tak način, da je integral produkta školjčnega diagrama in porazdelitve moči po celem delovnem območju motorja največji.

Zaradi težavnega shranjevanja električne energije v vozilu, je visok izkoristek elektromotorjev zelo pomemben. Za nadaljnje izračune bomo uporabili parametre in-wheel motorja, ki je prilagojen za uporabo v omenjenih pogojih delovanja. Motor razvijamo v okviru Instituta Jožef Stefan, podjetja Sinteza in Iskre Avtoelektrike, za analize pa bomo uporabili te podatke predvsem zaradi dobrega poznavanja njegovega delovanja. Za konkurenčne motorje nismo našli natančnih podatkov o izkoristku v spremenljivih delovnih razmerah.

Graf 28: Izkoristek in-wheel elektromotorja



Največji izkoristek motorja je 92,1%. Na osrednjem območju pa presega 90%. Naslednje, vijolično, območje predstavlja delovne točke z izkoristkom nad 80%, pri vsakem naslednjem območju pa je izkoristek za 10% manjši. Za in-wheel motorje, kjer ni nobenih mehanskih prestav je dober izkoristek v širokem območju frekvenc in navorov ključnega pomena.

Kljub temu, da največji izkoristek presega 92%, je najpomembnejše merilo povprečen izkoristek tekom voznega cikla, ki ga izračunamo po naslednji enačbi in je v našem primeru enak 88%.

$$w = \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} \int_0^{v_{\max}} F(M, v) \cdot I(|M|, v) \cdot dM \cdot dv \quad (7)$$

Integracijske meje potekajo po navoru od najbolj negativnega med zaviranjem, do najvišjega med pospeševanjem, po frekvenci pa od nič pri mirovanju, do največje frekvence pri vožnji z največjo hitrostjo. Porazdelitev moči po navoru in frekvencah smo označili s funkcijo F [graf 27], pri izkoristku I pa smo navor tudi med zaviranjem vzeli za pozitivnega. Na osnovi prvih meritev krmilnika bomo za izgube v krmilniku upoštevali vrednost 3%.

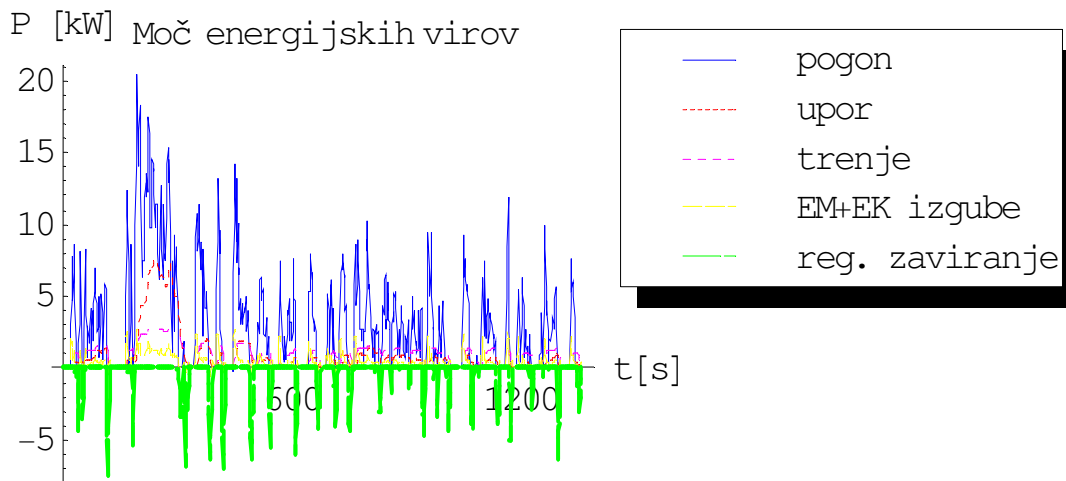
6.3 Energijski vir

V drugem poglavju smo ob fizikalni analizi vožnje izračunali mehanske moči in energije, ki se sprostijo tekom vožnje, na tem mestu pa bomo dinamično upoštevali spremenljiv izkoristek pogonskega sistema in izračunali energije in moči, ki jih mora zagotavljati vir energije.

6.3.1 Moč

Najpomembnejša količina je moč, ki jo mora zagotavljati energijski vir, da ob spreminjajočem se izkoristku elektromotorjev zagotovi zadostno izhodno moč pogona za sledenje vožnji standardnega voznega cikla. Poleg moči pogona smo izračunali še moč, ki jo lahko ponovno uporabimo, moči, ki se porabita za premagovanje upora in trenja ter električne in kemijske izgube, ki nastajajo v elektromotorjih in pri polnjenju baterij. V drugem poglavju smo izračunali moči, ki so potrebne za gibanje, tu pa smo izračunali moč, ki jo mora zagotavljati energijski vir. Upoštevajoč podatke o izkoristku motorja in spreminjanje frekvence in navora tekom voznega cikla lahko izračunamo zahteve za moč energijskega vira.

Graf 29: Moč tekom standardnega voznega cikla



Pri izračunu moči pogona smo upoštevali spreminjajoč izkoristek elektromotorjev. Poleg moči pogona so prikazane tudi moči, ki se porabijo za premagovanje zračnega upora, trenja, elektromehanske izgube v elektromotorju in elektro-kemijske izgube v akumulatorju ter moč regenerativnega zaviranja, ki jo lahko uporabimo za sprotno polnjenje akumulatorja.

Največja in povprečna moč tekom voznega cikla sta le dva izmed pogojev pri zasnovi pogona. Tako kot v okvirni fizikalni analizi vožnje bomo tudi tu glede največje moči upoštevali še moč pri pospeševanju in moč pri vožnji z najvišjo hitrostjo, pri trajni moči pa še moč pri vožnji z zahtevano trajno hitrostjo. Za izkoristek elektromotorjev bomo uporabili natančne vrednosti izkoristkov naših in-wheel elektromotorjev.

Ob vožnji z najvišjo hitrostjo (120km/h) mora vsak motor pri frekvenci 21,2Hz delovati z 39Nm navora, kjer imajo izkoristek 91,6%. Zahtevana moč energijskega vira je ob upoštevanju dodatnih treh odstotkih izgub v krmilniku tako 23,4kW.

Za vzdrževanje trajne hitrosti (60km/h) delujejo motorji pri frekvenci 10,1Hz z 14,9Nm, kjer delujejo z 89,4% izkoristkom in močjo 4,6kW.

Pri pospeševanju do 60km/h delujejo motorji z izkoristkom 84,6% (pri 10,6Hz in 121,5Nm navora), tako da je največja zahtevana moč tudi z upoštevanjem 3% izgub v krmilniku 39,5kW. Pri pospeševanju od 60 do 100km/h v 9 sekundah pa je izkoristek 91,2% (pri 17,7Hz in navoru 80,0Nm). Pri 100km/h potrebujemo za pospeševanje 40,2kW moči.

Tabela 35: Moč energijskih virov majhnega mestnega avtomobila

Količina	Vrednost
Največja moč tekom voznega cikla	20,8kW
Moč pri vožnji z najvišjo hitrostjo (120km/h)	23,4kW
Moč pri pospeševanju do 60km/h	40,7kW
Moč pri pospeševanju do 100km/h	39,5kW
Povprečna moč tekom voznega cikla	40,2kW
Moč za vožnjo s stalno hitrostjo (60km/h)	4,6kW
Časovni delež potrebe po moči nad 10kW	6% časa tipične vožnje
Časovni delež potrebe po moči nad 5kW	28% časa tipične vožnje
Časovni delež potrebe po moči nad 2kW	60% časa tipične vožnje

Tabela prikazuje različne parametre, ki so povezani z močjo pogonskega sistema mestnega avtomobila.

Najstrožji pogoj za najvišjo moč pogonskega sistema torej predstavlja pospeševanje, kjer potrebujemo nekaj več kot 40kW električne moči. Pri povprečni moči je najzahtevnejša vožnja s trajno hitrostjo, ki zahteva 4,6kW. Izkaže se tudi, da moč 40kW zadostuje tudi za zadovoljivo vožnjo v vetrovnih razmerah, kjer do hitrosti vetra okoli 10m/s ne pride do bistvenega poslabšanja voznih lastnosti.

Poleg moči, ki jo potrebujemo za samo vožnjo, moramo zagotoviti tudi zadostno moč za vse ostale sisteme na vozilu, kot so luči, klima in podobno. Povprečna ocena moči ostalih porabnikov je 800W [B39, Brett in drugi, 2006].

Povprečna moč energijskih virov mora biti torej vsaj 5,4kW, največja moč pa 41kW.

6.3.2 Energija

Poleg zagotavljanja zadostne moči, morajo energijski viri poskrbeti tudi za zadostno zalogo energije.

Tabela 36: Energija energijskih virov majhnega mestnega avtomobila

Količina	Vrednost
Energija na prevožen kilometer (brez regenerativnega zaviranja)	97,1Wh
Energija na prevožen kilometer (z regenerativnim zaviranjem)*	80,2Wh
Povečanje dosega z uporabo regenerativnega zaviranja	17,4%
Energija za doseganje celotnega dosega (500km)**	40,1kWh
Energija za doseganje dosega brez emisij (100km)**	8,0kWh

*Upoštevamo polovičen izkoristek rekuperacije energije, ki se sprosti med zaviranjem.

**Upoštevamo povečan doseg z regenerativnim sistemom zaviranja

Za nadaljnje izboljšave je potrebno tudi poznavanje razmerij moči, ki se porabljajo za premagovanje različnih sil. Poleg upora in trenja bomo izračunali še deleže energije, ki se pojavijo kot izgube v elektromotorju, krmilniku in akumulatorju ter energijo, s katero smo med zaviranjem ponovno napolnili akumulator.

Graf 30: Poraba energije

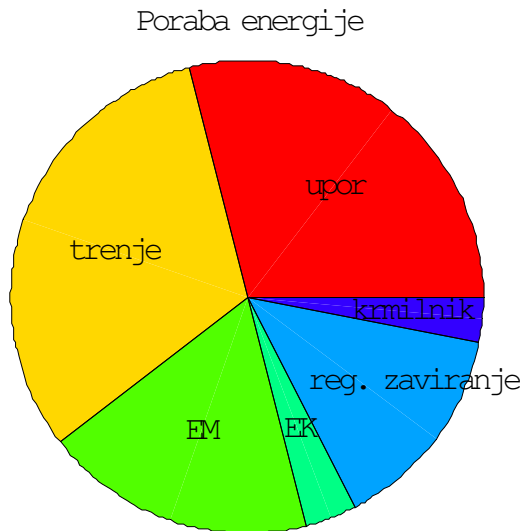
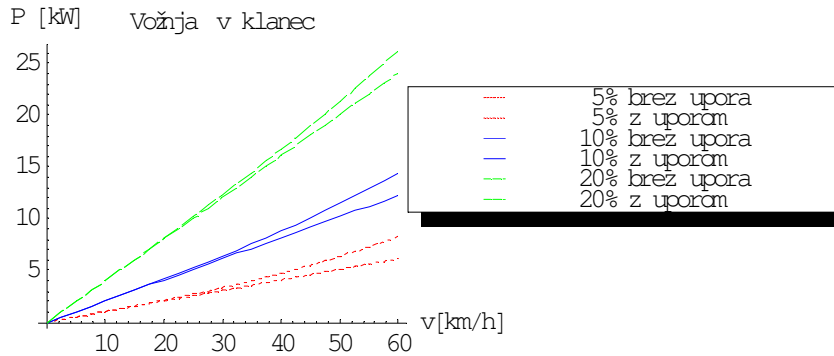


Tabela 37: Poraba energije

Namen porabe energije	Delež porabljene energije [%]
Premagovanje trenja	29,0
Premagovanje zračnega upora	31,5
Izgube v elektromotorju	18,5
Izgube v akumulatorju	3,6
Izgube v krmilniku	3
Regenerativno polnjenje akumulatorja	14,4

Izračunajmo še energijo, ki jo potrebujemo za vožnjo v klanec. Da bomo upoštevali res stroge pogoje, bomo predvideli vožnjo (30km/h) v strm klanec (20%). Izkaže se, da moč in zaloga energije pri vožnji v klanec nista problematični, saj potrebujemo le 16kW moči in 1330Wh energije (za višinsko razliko 500m), kar je manj kot pri ostalih kriterijih.

Graf 31: Moč pri vožnji v različno strme klanec z različnimi hitrostmi



Za vsako strmino klanca je prikazan del moči, ki se porabi za premagovanje strmine in trenja ter dodaten del moči za premagovanje zračnega upora.

6.3.3 Koncept in komponente

Zardi velike razlike v največji in povprečni moči je smiselno razmišljati o hibridnem viru električne energije. Potrebujemo primarni vir energije, ki lahko neprestano zagotavlja zahtevano povprečno moč in sekundarni vir za viške moči.

Za primarni vir energije bomo analizirali motorje z notranjim izgorevanjem in gorivno celico, kjer sicer več pričakujemo od slednje, saj svetovni trendi kažejo na hitro uveljavljanje te tehnologije v vozilih majhnih moči.

Pogon bomo realizirali direktno, torej z elektromotorji v kolesih. Glavni razlogi za uporabo koncepta direktnega pogona so v nižji masi vozila, boljšem izkoristku, manjši možnosti okvar in nekoliko nižji ceni. Cena mehanskih prenosov v vozilih namreč predstavlja približno 4,75% cene vozila [B8, Yang in drugi 2002].

Pri izbiri sekundarnega energijskega vira bomo upoštevali štiri tipe akumulatorjev in kondenzatorje.

6.4 Parametri vira energije

Na podoben način kot v drugem poglavju bomo za vsak par energijskih virov v hibridnem pogonu njuni velikosti izbrali na tak način, da z najnižjo ceno zadostimo vsem voznim zahtevam.

Do sedaj smo za maso SMEHa vedno upoštevali 750kg, pri tem, bolj natančnem izračunu, pa bomo upoštevali različne skupne mase vozila, ki so posledica uporabe komponent različnih kvalitiet. Masa vozila brez pogona in potnikov naj bo 400kg, masa potnikov 150kg, maso pogona pa predstavlja vsota mas primarnega vira energije, rezervoarja, goriva in sekundarnega vira energije. Če bi bila masa pogona 200kg, bi dobili vrednost, ki smo jo upoštevali v prejšnjih izračunih.

Največja zahtevana moč in poraba energije sta približno sorazmerni z maso vozila, saj sta z maso sorazmerna trenje in kinetična energija, zračni upor pa predstavlja pri pospeševanju 24%, pri običajni vožnji pa 31,5% izgube energije. Razliko v največji moči in porabi energije lahko torej izračunamo kot:

$$\Delta P_{MAX} = P_{MAX} \cdot (m_{nova} - 750kg) \cdot 0,76 \quad (8)$$

$$\Delta E = E_0 \cdot (m_{nova} - 750kg) \cdot 0,68 \quad (9)$$

Za vsak par primarnega in sekundarnega vira energije bomo izračunali mase vseh komponent, skupno maso, skupno ceno, porabo energije na prevožen kilometer, ceno prevoženega kilometra in skupno ceno nakupa vozila in vožnje.

Z upoštevanjem spremenjene mase bomo pri dimenzioniranju energijskih virov zadostili naslednjim kriterijem:

- trajna moč
- največja moč
- življenjska doba sekundarnega vira energije
- zaloga energije za kratkotrajno povečanje moči
- zaloga energije za zahtevano brezemisijsko avtonomijo

6.4.1 Klasični hibrid

Tabela 38: Parametri komponent pri konstrukciji klasičnega hibrida

Sekundarni vir	Pb	NiMH	Li-ion	Li-polimer	kondenzator
Izračunani parametri					
Masa primarnega vira energije (toplotni motor) [kg]	22,7	20,0	17,6	13,8	336,2
Masa goriva* (bencin) [kg]	24,4	21,8	19,4	15,6	314,8
Pogoji za sekundarni vir:					
-največja moč [kg]	114,9	81,1	178,6	31,0	65,5
-zadostna življenjska doba [kg]	56,9	33,9	16,4	8,09	5,2
-kratkotrajno povečanje moči [kg]	6,4	4,6	1,87	0,92	594
-brezemisijska vožnja [kg]	372,6	266,4	108	53,0	34354
Skupna masa [kg]	419,7	308	215,7	82,4	35005
Skupna cena [EUR]	2028	9526	12674	9276	13758673
Poraba energije [Wh/km]	149	133	119	95,41	1923
Cena vožnje [EUR/km]**	0,0488	0,0436	0,0389	0,0312	0,629
Skupna cena pogona in goriva po prevoženih 60000km [EUR]	4955	12142	15007	11150	13796458

*Upošteval sem 20% izkoristek motorja z notranjim izgorevanjem.

**Upoštevana cena goriva je 1EUR na liter.

V tabeli so predstavljeni parametri energijskih virov, ki zadostijo upoštevanim voznim zahtevam (najvišja hitrost, trajna hitrost, pospeški, avtonomija, brezemisijska avtonomija in sledenje dinamiki vožnje v voznem ciklu) in osnovni ekonomski parametri (cena pogona, cena vožnje). Upošteval sem spreminjajoč izkoristek elektromotorjev (odvisen od frekvence in navora) ter odvisnosti najvišje moči in porabe energije (odvisni od skupne mase vozila, ki sta pri različnih vrstah sekundarnega energijskega vira različni).

Z rdečo barvo so označeni najstrožji kriteriji pri sekundarnem energijskem viru. V vseh primerih, razen pri Li-ionskem akumulatorju je to brezemisijska avtonomija.

Kot kratkoročno in dolgoročno se za cenovno najugodnejšo varianto izkaže hibrid z motorjem z notranjim izgorevanjem in svinčevim akumulatorjem. Zanimivo je, da so Li-polimerni akumulatorji tudi po cenovnem vidiku bolj zanimivi od sicer cenejših NiMH in Li-ionskih, razlog pa tiči v nižji zahtevani masi za zadostitev pogoja brezemisijske avtonomije. Kondenzatorji ravno zaradi zahteve po brezemisijski avtonomiji sploh niso zanimivi za uporabo.

Med klasičnimi hibridi bi se pri izbiri akumulatorja odločali predvsem med svinčevim in Li-polimernim, pri čemer bi se verjetno odločili za slednje, saj bi skoraj 400kg svinčevih baterij zahtevalo večje spremembe pri izdelavi nosilnih elementov vozila. Kombinacija stare tehnologije motorjev z notranjim izgorevanjem in najsodobnejših Li-polimer akumulatorjev pa se tudi na prvi pogled ne zdi ravno smiselna izbira.

Ker je ravno brezemisijska avtonomija največje ozko grlo pri konstrukciji vozila, si pogledjmo parametre pogona še brez upoštevanja tega kriterija.

6.4.2 Klasični hibrid brez brezemisijске avtonomije

Tabela 39: Parametri komponent pri konstrukciji klasičnega hibrida brez upoštevanja kriterija brezemisijске avtonomije

sekundarni vir izračunani parametri	Pb	NiMH	Li-ion*	Li- polimer	kondenzator
masa primarnega vira energije (toplotni motor) [kg]	14.50	13.94	17.6*	12.99	12.91
masa goriva (bencin) [kg]	16.33	15.78	19.4*	14.8	14.73
pogoji za sekundarni vir:					
-največja moč [kg]	73.46	56.5	178.7*	29.25	2.52
-zadostna življenjska doba [kg]	38.10	24.5	16.49*	7.68	0.25
-kratkotrajno povečanje moči [kg]	4.311	3.33	1.87*	0.87	27.8
-brezemisijška vožnja [kg]*	0.	0.	0.	0.	0.
skupna masa pogona [kg]	104.29	86.2	215.7*	57.06	55.5
skupna cena [EUR]	901.18	2505	12675*	5388.7	11769
poraba energije [Wh/km]	99.78	96.4	118.8*	90.544	90.0
cena vožnje [EUR/km]	0.0327	0.0315	0.0389*	0.0296	0.0295
skupna cena pogona in goriva po prevoženih 60000km [EUR]	2860	4397	15007*	7167	13537

*V primeru Li-ionskega akumulatorja predstavlja za maso sekundarnega energijskega vira najstrožji pogoj zadostna največja moč in ne brezemisijška avtonomija, zato so rezultati enaki kot v prejšnji tabeli [Tabela 38].

** Brezemisijške avtonomije nismo upoštevali kot dodatni pogoj za vozno lastnost vozila. V tabeli so predstavljeni parametri energijskih virov, ki zadostijo upoštevanim voznim zahtevam (najvišja hitrost, trajna hitrost, pospeški, avtonomija in sledenje dinamiki vožnje v voznem ciklu) in osnovni ekonomski parametri (cena pogona, cena vožnje). Upošteval sem spreminjajoč izkoristek elektromotorjev (odvisen od frekvence in navora) ter odvisnosti najvišje moči in porabe energije (odvisni od skupne mase vozila, ki sta pri različnih vrstah vozil različni).

Z zeleno barvo sem označil najbolj smiselno izbiro komponent.

V primeru neupoštevanja zahteve po brezemisijški avtonomiji se za najzanimivejše sekundarne energijske vire izkažejo svinčevi akumulatorji, NiMH in Li-polimer so blizu, ob morebitni malenkostni pocenitvi kondenzatorjev ali povečanju njihove energijske gostote, pa bi bili tudi oni zelo zanimiva izbira.

Pri akumulatorjih predstavlja največje ozko grlo zadostna specifična moč, njihova življenjska doba pa bi v vseh primerih preseгла 100.000km vožnje. Kondenzatorji so najbolj omejeni pri energijski gostoti, ki je potrebna za zagotavljanje zadostne zaloge energije ob sledenju zahtevam voznega cikla.

Ob neupoštevanju zahtev po brezemisijški avtonomiji predstavljajo najbolj smiselno izbiro svinčevi akumulatorji, s katerimi na enostaven, preizkušen in relativno lahek način zadostimo vsem voznim potrebam. Poraba vozila bi bila 4,3l/100km, z izjemo brezemisijške vožnje pa bi se vozilo odlikovalo z vsemi drugimi zahtevanimi lastnostmi.

6.4.3 Električni hibrid

Za proizvodnjo vodika smo uporabili trenutno ceno električne energije, ki vsebuje stroške uporabe omrežja, stroške dobavitelja, ceno energije in davek na dodano vrednost ($0,044\text{EUR/kWh}$). Izkoristek elektrolize ter energija, ki jo porabimo za transport vodika in polnjenje pod visok tlak ter gorivne celice je 30% [F9, Hammerschlaga in drugi, 2005], za rezervo pa smo vzeli še dodatno sto odstotno obdavčitev. Tako pride cena 1kWh iz vodika nekoliko dražja kot je običajna električna energija ($0,29\text{EUR/kWh}$).

Tabela 40: Parametri komponent pri konstrukciji električnega hibrida

Sekundarni vir	Pb	NiMH	Li-ion	Li-polimer	Kondenzator
Izračunani parametri					
Masa primarnega vira energije [kg]	5.50	5.28	6.655	4.93	4.90
Masa goriva [kg]	118.3	114.4	140.60	107.5	106.8
Pogoji za sekundarni vir:					
-največja moč [kg]	88.97	68.48	215.48	35.5	3.053
-zadostna življenjska doba [kg]	45.19	29.10	19.52	9.12	0.292
-kratkotrajno povečanje moči [kg]	5.11	3.95	2.213	1.03	32.99
Skupna masa [kg]	212.8	188.1	362.73	147.9	144.7
Skupna cena [EUR]	5709.3	7479	20877	10685	18100
Energija na km [Wh/km]	118.35	114.4	140.59	107.5	106.8
Cena vožnje [EUR/km]	0.0345	0.0334	0.041	0.0313	0.0311
Skupna cena pogona in goriva po prevoženih 60000km [EUR]	7780	9480	23337	12565	19969

V tabeli so predstavljeni parametri energijskih virov, ki zadostijo upoštevanim voznim zahtevam (najvišja hitrost, trajna hitrost, pospeški, avtonomija in sledenje dinamiki vožnje v voznem ciklu) in osnovni ekonomski parametri (cena pogona, cena vožnje). Upošteval sem spreminjajoč izkoristek elektromotorjev (odvisen od frekvence in navora) ter odvisnosti najvišje moči in porabe energije (odvisni od skupne mase vozila, ki sta pri različnih vrstah vozil različni).

Z zeleno barvo sem označil najbolj smiselno izbiro komponent.

Zaradi višje cene gorivne celice v primerjavi z motorjem z notranjim izgorevanjem so relativne razlike med cenami pogonov z različnimi akumulatorji manjše. Svinčevi akumulatorji so cenovno najbolj zanimivi, Li-ionski so zaradi premajhne specifične moči nezanimivi, Li-polimer in NiMH bi bili zanimivi, še posebej če bi imeli nekoliko večjo specifično moč. Kondenzatorji se sicer trenutno zdijo nekoliko dražji, je pa res, da imajo med vsemi komponentami daleč najdaljšo življenjsko dobo. Razmerje med najstrožjim izmed treh pogojev za maso sekundarnega vira energije in zahtevane mase za zadostno življenjsko dobo, nam, pomnoženo z zahtevano življenjsko dobo, ki je 60.000km , da skupno življenjsko dobo sekundarnega vira. Vrednosti so prikazane v naslednji tabeli.

Tabela 41: Življenjska doba sekundarnega vira energije

Sekundarni vir	Pb	NiMH	Li-ion	Li-polimer	Kondenzator
Življenjska doba [1000km]	119	142	663	234	6827
Vrednost* po prevoženih 60.000km [EUR]	106	1260	12933	4274	13084
Diskontirana cena po prevoženih 60.000km [EUR]	7674	8220	10404	8291	6885

**Izračunana vrednost predstavlja ceno, ki je linearno odvisna od količine energije, ki jo lahko shranjujemo in porabljamo iz akumulatorja. Ob upoštevanju inflacije in drugih elementov bi prišli do manjših vrednosti.*

Z upoštevanjem ohranjanja vrednosti akumulatorjev, ki se odlikujejo z veliko energijsko gostoto in kondenzatorjev, ki zdržijo veliko število polnjenj in praznjenj, postane odločitev o izbiri sekundarnega vira energije še težja. Zaradi pričakovanega napredka tehnologije in modularne zasnove pogona, nisem preveč navdušen nad preveč dolgoročno rentabilnimi rešitvami, ki jih predstavlja uporaba Li-ionskih akumulatorjev in kondenzatorjev. Svinčevi akumulatorji se tudi ne zdijo primerni za kombiniranje z najsodobnejšimi gorivnimi celicami, med NiMH in Li-polimer akumulatorji pa je cenovno zanemarljiva razlika, tako da bi se odločil za slednjo, najsodobnejšo tehnologijo.

6.5 Upravljanje energijskih virov

Upravljanje energijskih virov (energy management) predstavlja pomemben element konstrukcije pogonskega sistema, najbolj pogost način pa je upravljanje z mehko logiko. V naši analizi smo možno dogajanje tekom vožnje opisali s šestimi možnostmi.

A: Če vozilo zavira in je moč regenerativnega zaviranja večja od potreb vozila, ki jih koristijo električni elementi na vozilu (800W) in je sekundarni vir poln:

-> oba vira sta izključena.

B: Če vozilo zavira in je moč regenerativnega zaviranja večja od potreb vozila, ki jih koristijo električni elementi na vozilu (800W) in sekundarni vir ni poln:

-> z odvečno energijo polnimo sekundarni vir.

C: Če vozilo zavira in je moč regenerativnega zaviranja manjša od potreb vozila, ki jih koristijo električni elementi na vozilu (800W):

-> dodatno energijo zagotovi sekundarni vir.

D: Če vozilo ne zavira in je zahtevana moč večja od moči primarnega vira:

-> Primarni vir deluje s polno močjo, sekundarni pa zagotovi ostalo.

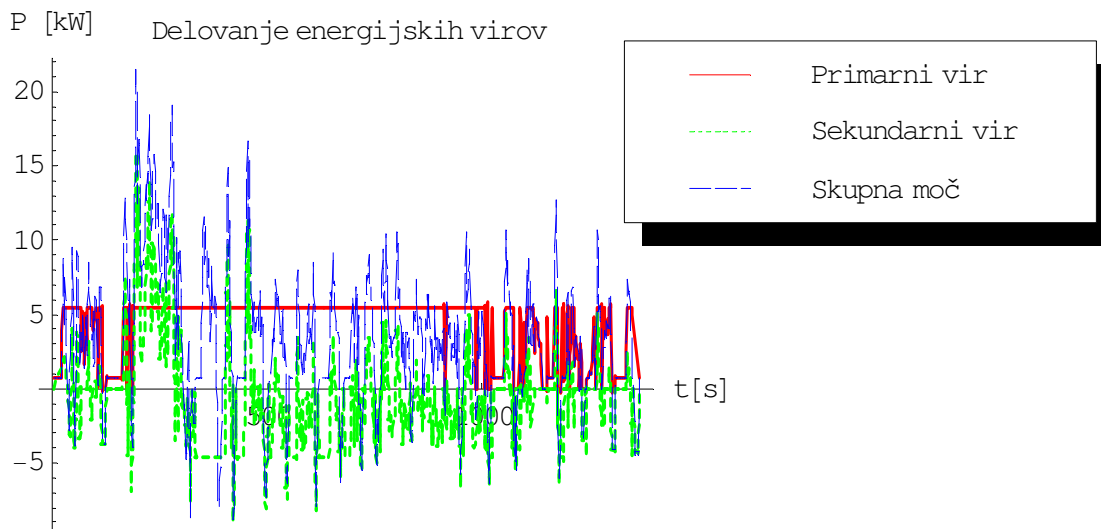
E: Če vozilo ne zavira, zahtevana moč je manjša od moči primarnega vira, sekundarni vir energije je poln:

-> Primarni vir deluje z zahtevano močjo, ki je manjša od njegove vršne moči.

F: Če vozilo ne zavira, zahtevana moč je manjša od moči primarnega vira, sekundarni vir energije ni poln:

-> Primarni vir deluje s polno močjo, ostanek moči se porabi za polnjenje sekundarnega.

Graf 32: Delovanje primarnega in sekundarnega energijskega vira



Graf prikazuje delovanje primarnega in sekundarnega energijskega vira ter skupno moč. Lepo se vidi, da mora primarni vir kar dolgo časa nepretrgoma delovati s polno močjo, da napolni sekundarni vir, ki je bil aktiven ob velikih močeh pri pospeševanju in hitri vožnji v začetnem delu voznega cikla. Negativne vrednosti predstavljajo pritek energije v sekundarni vir.

7. Rezultati

S splošno fizikalno analizo vožnje, različnih pogonskih arhitektur in karakteristik obstoječe tehnologije smo prišli do naslednjih rezultatov:

- I. Najpomembnejši elementi pri konstrukciji različnih vozil in možnosti za uveljavitev električnih pogonov v različnih vozilih.
- II. Predlogi možnih zasnov pogonskih arhitektur ter okvirnih parametrov komponent v različnih vrstah vozil.

Na ožjem področju analize zasnove mestnega avtomobila pa sem z bolj natančno metodo, ki upošteva tudi spreminjajoč izkoristek elektromotorjev, prišel do še bolj specifičnih rezultatov, ki so uporabni pri konstrukciji tovrstnih vozil in razvoju posameznih komponent:

- III. Zahteve po moči v primarnem viru energije in relativna pomembnost kriterijev za sekundarni vir energije pri konstrukciji hibridnega pogona.
- IV. Optimalni parametri energijskih virov v mestnem klasičnem hibridnem avtomobilu.
- V. Optimalni parametri energijskih virov v sodobnem mestnem električnem hibridu (SMEH)

7.1 Najpomembnejši elementi pri uveljavljanju različnih EV

Pri vožnji osebnega avtomobila je v povprečju zračni upor največji porabnik energije, najstrožje zahteve za kratkotrajno največjo moč pa se pojavijo pri pospeševanju. Razmerje med največjo in povprečno močjo (3,7) med vsemi analiziranimi vozili kaže najmanj obetavne možnosti za implikacijo hibridnega pogona.

Energija se v mestnem avtomobilu zelo enakomerno razporedi med zračni upor, trenje in zaviranje. Pri največji moči prevladuje pospeševanje, velik pa je tudi delež energije, ki ga moramo zagotavljati za delovanje raznih električnih naprav (15%), kot so luči in klimatska naprava. Veliko razmerje med najvišjo in povprečno močjo (9,7) je kot nalašč za zasnovo hibridnega pogonskega sistema.

Zaradi velike mase in dinamične vožnje se pri mestnem avtobusu skoraj vsa energije porabi za zaviranje in premagovanje trenja. Največja moč se rabi pri pospeševanju in je 5,7 krat večja od povprečne moči. Ker je tudi izboljšanje avtonomije z uporabo sistema regenerativnega sistema zaviranja občutno (32%), je vpeljava hibridnih pogonov zelo smiselna.

Pri vožnji skuterja nas najbolj ovira zračni upor, pospeševanje sicer zahteva daleč največ moči, ki je 5,6 krat večja od povprečne. Povečanje avtonomije z uporabo sistema regenerativnega zaviranja je med vsemi vozili najmanjše (7,7%).

Podrobnejši rezultati so zbrani v drugem poglavju, v tabeli 23 in grafih 17, 18, 19, 20 na straneh 32 in 33.

7.2 Možne zasnove in parametri različnih EV

Pogon z enim samim energijskim virom bi se učinkovito obnesel predvsem v skuterju, kjer bi lahko učinkovito uporabili vse različne vrste akumulatorjev in gorivno celico ter morda pri mestnem avtobusu s pogonom na gorivno celico. Tak avtobus sicer ne bi mogel izkoriščati energije, ki se sprosti med zaviranjem, tako da tovrstna zasnova ne bi bila najbolj smiselna. Pri vseh ostalih analiziranih vozilih pa bi bil energijski vir pretežak ali predrag.

Hibridni pogoni se pri vseh aplikacijah izkažejo za boljše, le pri skuterju morda zapleti s podvajanjem virov energije niso potrebni. Za sekundarni vir energije se v klasičnem hibridnem pogonu kot najstrožji pogoj izkažeta brezemisijaska avtonomija in največja moč, v redkih primerih (avtobus s svinčevim akumulatorjem), tudi življenjska doba. Kondenzatorji se v klasičnih hibridnih pogonih, zaradi nizke energijske gostote, ne obnesejo. Tudi cenovno so hibridni sistemi zanimivi v mnogih kombinacijah.

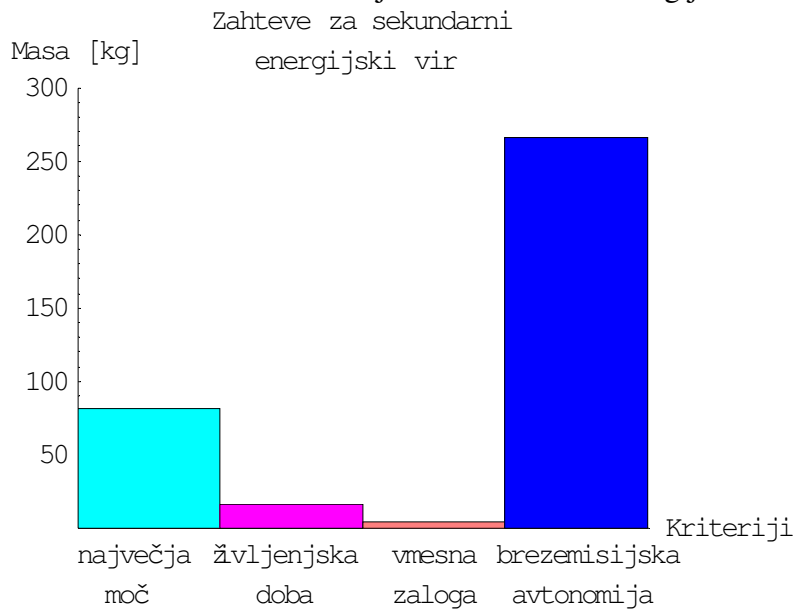
Električne hibride lahko zasnujemo z gorivnimi celicami relativno nizkih moči, kar zelo poceni pogonski sistem in zagotavlja dobre vozne lastnosti. Razlike v masi in ceni klasičnih in električnih hibridov sploh niso velike. Največje razlike prinese uporaba različnih tipov sekundarnih energijskih virov.

7.3 Kriteriji in parametri energijskih virov v mestnem avtomobilu

Na osnovi natančne fizikalne analize vožnje in različnih dodatnih kriterijev za zahteve energijskega vira (pospeševanje, trajna hitrost, vožnja v klanec...) sem izračunal, da lahko izdelamo majhen mestni avtomobil na precej bolj preprost način kot so obstoječi avtomobili. Ker zahteva mestna vožnja le majhno povprečno moč, lahko energijski vir zasnujemo na tak način, da ima primarni vir v hibridnem pogonu moč le $5,4kW$, kar je bistveno manj od običajnih manjših avtomobilov. Dodatno moč za pospeševanje, energijo za brezemisijasko vožnjo in energijo za kratkotrajna obdobja vožnje z nadpovprečno močjo lahko zagotovimo z dodatnimi akumulatorji ali celo kondenzatorji.

Na naslednji strani si pogledjmo graf, v katerem so prikazane mediane mas sekundarnega vira energije, ki zagotovi zadostno moč, zadostno življenjsko dobo, zadostno zalogo energije za kratkotrajno povečanje moči in energijo za brezemisijasko avtonomijo. Upoštevali smo pet različnih energijskih virov.

Graf 33: Pomembnost kriterijev za sekundarni energijski vir v mestnem avtomobilu



*Graf prikazuje mediano vrednosti različnih komponent (akumulatorji in kondenzator), ki zadostijo posameznim kriterijem. Mediana je v tem primeru zgovornejši kriterij kot povprečje, saj bi nesmiselne vrednosti nekaterih parametrov pri kondenzatorjih in svinčevih baterijah prikazali čudno sliko.

V večini primerov predstavlja daleč največjo omejitev brezemisijska avtonomija. Če ta kriterij izvzamemo ali pa če imamo na razpolago gorivno celico, postane najstrožji kriterij največja moč. Razvoj akumulatorjev je torej smiselno usmerjati nekoliko bolj v smer povečanja specifične moči, kot pa v povečanje energijske gostote in življenjske dobe.

7.4 Klasični hibridni mestni avtomobil

V bolj podrobni analizi je postalo jasno, da predstavlja sto kilometrska brezemisijska avtonomija prezahtevni pogoj za sekundarni energijski vir v klasičnem hibridnem pogonu, saj bi bila vozila predraga ali pa pretežka. V klasičnih hibridnih pogonih bi se bilo bolje zadovoljiti z nižjo brezemisijsko avtonomijo in zasnovati vozilo s 4,5kW motorjem z notranjim izgorevanjem in 73kg težkim svinčevim akumulatorjem. Cena takega pogona in same vožnje bi bila sprejemljiva, na tak način pa bi tudi učinkovito združili dobre lastnosti že preizkušenih tehnologij.

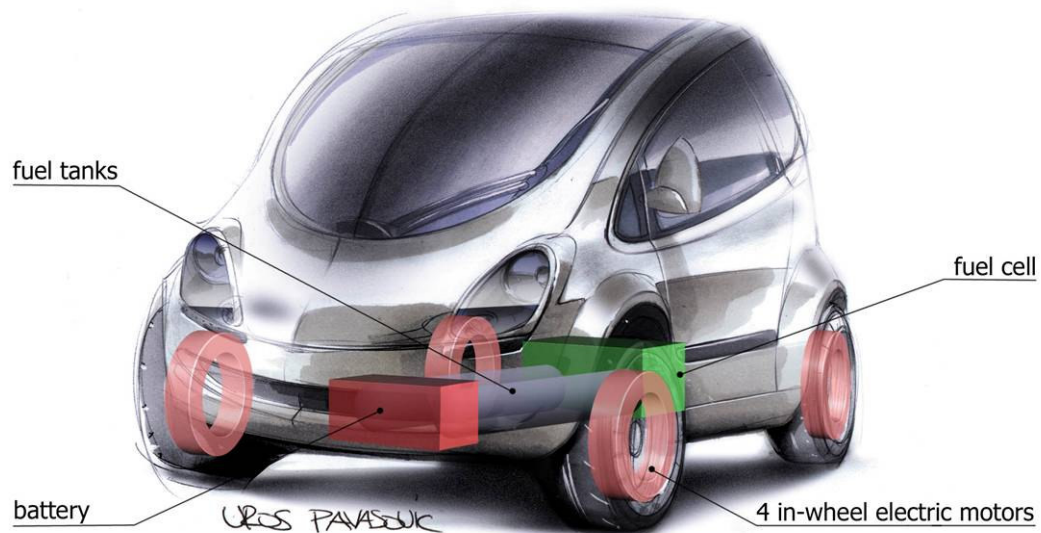
Uporaba NiMH in Li-polimer baterij je zanimiva predvsem zaradi velike specifične moči, kondenzatorji so trenutno še vedno predragi.

7.5 SMEH

Sodobni mestni električnih hibrid poganjajo štirje in-wheel motorji, ki dobivajo energijo iz hibridnega energijskega vira. 4,9kW gorivni celici pomaga 32kW Li-polimerni akumulator. V 104kg težkem rezervoarju ima pod visokim tlakom (npr 700 barov) shranjenega 3.2kg vodika, kar vozilu ob polovičnem izkoristku gorivne celice omogoča 500km avtonomije. Vožnja je v primerjavi z običajnimi avtomobili kljub višji ceni energije iz vodika cenejša, saj je poraba energije mestnega avtomobila, ki je prirejen za tovrstno uporabo mnogo manjša kot pri klasičnih mestnih avtomobilih s

predimenzioniranimi motorji. $0,0313\text{EUR}/\text{km}$ je pri današnjih cenah naftnih derivatov za dobro tretjino cenejši kot pri majhnih bencinskih avtomobilih s porabo $5\text{l}/100\text{km}$. Njegova cena bi bila ta trenutek sicer nekoliko večja od klasičnega in bi se s cenejšo vožnjo izenačila šele po približno 300.000 prevoženih kilometrih. Malenkostne pocenitve gorivnih celic in akumulatorjev, ki v tej zasnovi predstavljata podoben strošek, pa bi v kombinaciji z nižjimi stroški vzdrževanja, omogočile tudi ekonomske prednosti pred klasičnimi vozili.

Slika 13: Predlagan dizajn in pogonske komponente
(Avtor: Uroš Pavasovič, Royal College of Art)



Ker smo pri konstrukciji pogonskega sistema med več kriteriji za največjo moč upoštevali najstrožji pogoj, so njegove vozne lastnosti še nekoliko boljše od sprva zahtevanih. S stališča moči bi SMEH lahko dosegel hitrost približno $175\text{km}/\text{h}$, vendar bi tu nastopile že tudi druge tehnične zahteve, za katero SMEH ne bo prilagojen.

SMEH bo izkoriščal tudi možnost priložnostnega polnjenja iz omrežja, s čimer bi mu lahko zagotovili približno 50km avtonomije, kar je zelo zanimivo predvsem s stališča pocenitve vožnje. Električna energija iz omrežja bo namreč cenejša od tiste, ki bo pridobljena iz vodika, tako da se bo temu primerno pocenila tudi vožnja. Za polnjenje $35,5\text{kg}$ težke Li-polimer akumulatorja tekom noči (6ur), bi potrebovali približno 1kW električne moči, kar je sprejemljiva moč za domače omrežje. Različne tuje študije obremenjenosti električnih omrežji [F2, Webster in drugi, 1999; F3, Ford in drugi, 1995; F4, Kempton in Kubo, 2000] so v različnih državah pokazale, da bi s premišljenimi politikami, ob manjši splošni porabi energije v nočnem času, lahko pokrili potrebe po polnjenju vozil vseh prebivalcev.

8. Zaključek

Študija posega v dogajanje na področje avtomobilske in tudi širše transportne industrije, ki preko klasičnih hibridnih pogonov postopno prehaja v obdobje električnih pogonov. V manjših dvokolesnih vozilih, kjer je elektrifikacija pogona zaradi fizikalnih zakonitosti vožnje in stanja tehnologije bolj enostavna, je tudi na trgu že prisotnih veliko različnih izdelkov. Avtomobilska industrija se z izjemo prototipov, trenutno tržno usmerja predvsem na klasične hibridne pogone, ki so ekonomsko najbolj zanimivi. Gorivne celice in tehnologije vodika se uveljavljajo predvsem v večjih sistemih, kot so mestni avtobusi, kjer je njihova vgradnja najbolj enostavna in najbolj zanimiva za širšo družbo.

V naši študiji smo med različnimi aplikacijami električnih pogonov našli realno možnost za uveljavitev najsodobnejših tehnologij. Mestni avtomobili so zelo zanimivi s treh različnih vidikov, saj lahko uspešno nadomestijo obstoječa vozila:

- I. Tehnični vidik: visoko razmerje med največjo močjo in trajno močjo, nizka poraba energije, nizka zahtevana največja avtonomija...
- II. Ekološki vidik: Občutno zmanjšanje emisij v najbolj naseljenih območjih...
- III. Ekonomski vidik: Največja razlika v ceni prevoza, cenovno ugoden energijski vir, enostavna izgradnja infrastrukture...

SMEH je tipični predstavnik rušilnih inovacij, ki imajo potencial za postopno, a nezadržno uveljavljanje v družbi. Na preprost in cenovno ugoden način zadovolji osnovne potrebe uporabnikov. Čas za popolno elektrifikacijo voznega parka bo napočil šele po nadaljnjih tehničnih izboljšavah tehnologij vodika in uveljavitvi cenejših proizvodnih postopkov.

Študija pogonskih sistemov nam da dober vpogled v ozadje globalnega razvoja, tako da lažje razumemo trende in v ta namen prilagajamo posamezne komponente pogonskih sistemov, ki jih razvijamo in ki jih proizvaja naša industrija.

Metode, ki sem jih uporabil pri študiji, so v mnogih pogledih natančnejše od metod v objavljenih strokovnih člankih. Predvsem poznavanje natančnega obnašanje elektromotorjev mi je omogočilo detajlno analizo zahtev za moč energijskega vira. Ravno nepoznavanje vseh specifičnih lastnosti energijskih virov, kot so akumulatorji in gorivne celice, pa predstavlja možnosti za nadaljnje izboljšave. Podatki o izkoristkih in obrabi energijskih virov v odvisnosti od pogojev delovanja, bi omogočali še bolj natančne rezultate. Pri hitrem tempu razvoja pa ti podatki, kljub sodobni informacijski tehnologiji, niso dostopni.

Po drugi strani pa nekateri parametri temeljijo tudi na standardih, ki le približno opisujejo realnost. Dejanska vožnja se lahko od standardnega voznega cikla tudi precej razlikuje, tako, da si moramo v nekaterih primerih vzeti zadostni varnostni faktor pri dimenzioniranju pogonskih komponent.

Vsi pomembnejši avtomobilski proizvajalci razvijajo in izboljšujejo nove tehnologije, tako da smo lahko glede prihodnosti prometa upravičeno optimistični.

9. Viri

Pri raziskavah in pisanju magistrskega dela sem si pomagal predvsem s strokovnimi članki, tehnično dokumentacijo proizvajalcev različnih komponent in patenti na področju električnih vozil. Nekaj splošnih zakonitosti sem povzel po bolj splošnih strokovnih knjigah, najnovejše novice pa tudi na internetnih straneh. Vire sem razporedil v sedem tematskih sklopov, znotraj katerih so po vrsti zapisani strokovni članki, knjige, tehnična dokumentacija in internetni naslovi. Sedmi sklop obsega dostopno patentno dokumentacijo, kjer je poleg vpisne številke patenta naveden prijavitelj patenta in leto objave. Vsi viri so v enaki strukturi priloženi tudi v elektronski obliki.

9.1 Električna vozila

[A1] Gwo-Hshiong Tzenga, Cheng-Wei Lina, Serafim Opricovic, Multi-criteria analysis of alternative-fuel buses for public transportation, *Energy Policy* 33 (2005) 1373–1383

[A2] Massimo Ceraolo, Alessandro Caleo, Paolo Capozzella, Maurizio Marcacci, Luca Carmignani, and Alberto Pallottini, A Parallel-Hybrid Drive-Train for Propulsion of a Small Scooter, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 21, NO. 3, (May 2006)

[A3] Anders Folkesson, Christian Andersson, Per Alvfors, Mats Alakula, Lars Overgaard, Real life testing of a Hybrid PEM Fuel Cell Bus, *Journal of Power Sources* 118 (2003) 349–357

[A4] Amory B. Lovins, David R. Cramer, *Hypercars*¹, hydrogen, and the automotive transition *Int. J. Vehicle Design*, Vol. 35, Nos. 1/2, (2004)

[A5] M. Nadal, F. Barbir, Development o a hybrid fuel cell/battery powered electric vehicle; International Association for Hydrogen Energy, (1996)

[A6] J.J. Hwang, D.Y. Wang, N.C. Shih, Development of a lightweight fuel cell vehicle, *Journal of Power Sources* 141 (2005) 108–115

[A7] <http://media.mitsubishi-motors.com/pressrelease/e/corporate/detail1321.html>

[A8] http://www.treehugger.com/files/2005/08/toyotas_fine-n_1.php

9.2 Viri energije

[B1] Edwin C. Kluiters , Dick Schmal, Willem R. ter Veen, Kees J.C.M. Posthumus, Testing of a sodium-nickel chloride ZEBRA battery for electric propulsion of ships and vehicles, *Journal of Power Sources* 80 (1999) 261–264

[B2] V. Livshits, A. Blum, E. Strauss, G. Ardel, G. Golodnitsky, E. Peled, Development of a bipolar Li/composite polymer electrolyte/pyrite battery for electric vehicles, *Journal of power sources*, 97-98 (2001) 782-785

[B3] P. Baudry, S. Lascaud, H. Majastre, Lithium polymer battery development for electric vehicle application, *Journal of Power Sources* 68 (1997) 432-435

[B4] U. Kohler, J.Kumpers, M. Ullrich, High Performance Nickel-metal hydrid and Lithium ion batteries, *Journal of power sources* 105 (2002) 139-144

[B5] Rudolph G. Jungst, Ganesan Nagasubramanian, Herbert L. Case, Bor Yann Liaw, Angel Urbina, Thomas L. Paez, Daniel H. Doughty, Accelerated calendar and pulse life analysis of lithium-ion cells, *Journal of Power Sources* 119–121 (2003) 870–873

- [B6] Noboru Sato, Kazuhiko Yagi, Thermal behavior analysis of nickel metal hydride batteries for electric vehicles, *JSAE Review* 21 (2000) 205-211
- [B7] K.T. Chau, Y.S. Wong, C.C. Chan, An overview of energy sources for electric vehicles *Energy Conversion & Management* 40 (1999) 1021-1039
- [B8] Shaohua Yang, Harold Knickle, Design and analysis of aluminium/air battery system for electric vehicles, *Journal of Power Sources* 112 (2002) 162–173
- [B9] Andrew Chu, Paul Braatz, Comparison of commercial supercapacitors and high-power lithium-ion, batteries for power-assist applications in hybrid electric vehicles, *Journal of Power Sources* 112 (2002) 236–246
- [B10] B. Kennedy, D. Patterson, S. Camilleri, Use of lithium-ion batteries in electric vehicles, *Journal of Power Sources* 90 (2000) 156–162
- [B11] Qiangfeng Xiao, Xiao Zhou, The study of multiwalled carbon nanotube deposited with conducting polymer for supercapacitor, *Electrochimica Acta* 48 (2003) 575-580
- [B12] J. Alzieu, P. Gagnol, H. Smimite, Development of an on-board charge and discharge management system for electric-vehicle batteries, *Journal of Power Sources* 53 (1995) 327-333
- [B13] Cord H. Dustmann, Advances in ZEBRA batteries, *Journal of Power Sources* 127 (2004) 85–92
- [B14] Robert F. Nelson, Power requirements for batteries in hybrid electric vehicles, *Journal of Power Sources* 91 (2000) 2–26
- [B15] Bruno Scrosati, The Italian contribution to battery science and technology, *Journal of Power Sources* 116 (2003) 4–7
- [B16] M. Anderman, The challenge to fulfil electrical power requirements of advanced vehicles, *Journal of Power Sources* 127, (2004)
- [B17] Kinji Tsujimura, The improvement of the efficiency of fuel cells against the elimination of harmful emissions from the internal combustion engines, *JSAE Review* 22 (2001) 147-150
- [B18] Rajesh K. Ahluwalia, X. Wang, A. Rousseau, R. Kumar, Fuel economy of hydrogen fuel cell vehicles, *Journal of Power Sources* 130 (2004) 192–201
- [B19] Vinay Ananthachar, John J. Duffy, Efficiencies of hydrogen storage systems onboard fuel cell vehicles, *Solar Energy* 78 (2005) 687–694
- [B20] Piotr Kowalczyk, Hideki Tanaka, Robert Hołyst, Katsumi Kaneko, Takumi Ohmori, and Junichi Miyamoto, Storage of Hydrogen at 303 K in Graphite Slitlike Pores from Grand Canonical Monte Carlo Simulation, *J. Phys. Chem. B* 109, (2005) 17174-17183
- [B21] Angela D. Lueking, Ralph T. Yang, Nelly M. Rodriguez and R. Terry K. Baker, Hydrogen Storage in Graphite Nanofibers: Effect of Synthesis Catalyst and Pretreatment Conditions, *Langmuir* 20, (2004) 714-721
- [B22] Yingwei Li and Ralph T. Yang, Significantly Enhanced Hydrogen Storage in Metal-Organic Frameworks via Spillover, *JACS Communications*, Published on Web 12/23/2005
- [B23] U. Bünger, W. Zittel, Hydrogen storage in carbon nanostructures – still a long road from science to commerce?, Springer-Verlag (2001)
- [B24] V. Merregalli, M. Parrinello, Review of theoretical calculations of hydrogen storage in carbon-based materials, *Appl. Phys. A* 72, (2001) 143–146

- [B25] Shannon Franzky, High-pressure 825 bar hydrogen storage, Fuel Cells Bulletin, (2002)
- [B26] F. Schusth, B. Bogdanović, M. Felderhoff, Light metal hydrides and complex hydrides for hydrogen storage, The Royal Society of Chemistry 2004 Chem. Commun. (2004) 2249-2258
- [B27] Andreas Zuttel, Hydrogen storage methods, Springer-Verlag (2004)
- [B28] Gene D. Berry, Salvador M. Aceves, Onboard Storage Alternatives for Hydrogen Vehicles, Energy & Fuels 12, (1998) 49-55
- [B29] Hiroshi Matsuura, Tamio Tanikawa, Hiromitsu Takaba, Yutaka Fujiwara, Production of an Alcohol-Based Hydrogen Storing Polymer, The journal of physical chemistry A, VOLUME 108, NUMBER 16, APRIL 22, (2004)
- [B30] M. Conte, P.P. Prosini, S. Passerini, Overview of energy/hydrogen storage: state-of-the-art of the technologies and prospects for nanomaterials, Materials Science and Engineering B108 (2004) 2–8
- [B31] Don Cameron, Richard Holliday, David Thompson, Gold's future role in fuel cell systems, Journal of Power Sources 118 (2003) 298–303
- [B32] R.J. Spiegel, Platinum and fuel cells, Transportation Research Part D 9 (2004) 357–371
- [B33] E-One Moli Datasheet for Li-ion battery
- [B34] KOKAM Datasheet for Li-polymer battery
- [B35] Maxwell Datasheet for UltraCapacitor
- [B36] Vielstich, Lamm, Gasteiger; Handbook of Fuel Cells, VOLUME 1, 2, 3 in 4; Willey, (2003)
- [B37] Gregor Hoogers; Fuel Cell Technology Handbook; CRC Press LLC, (2003)
- [B38] Fuel Cells Power for Transport 2002; Society of Automotive Engineers, (2002)
- [B39] D.J.L. Brett, P. Aguiar, N.P. Brandon, R.N. Bull, R.C. Galloway, G.W. Hayes, K. Lillie, C. Mellors, C. Smith, A.R. Tilley, Concept and system design for a ZEBRA battery–intermediate temperature solid oxide fuel cell hybrid vehicle, Journal of Power Sources xxx (2006) xxx–xxx, ARTICLE IN PRESS

9.3 Električni pogoni, krmilniki in elektronika

- [C1] Jawad Faiz, M. B. B. Sharifian, Optimal design of an induction motor for an electric vehicle, Published online 14 July 2005 in Wiley InterScience EUROPEAN TRANSACTIONS ON ELECTRICAL POWER, Euro. Trans. Electr. Power 2006; 16, 15–33
- [C2] Ion Boldea, Cristian Ilie Pitic, Cristian Lascu, Gheorghe-Daniel Andreescu, Lucian Tutelea, Frede Blaabjerg and Per Sandholdt, DTFC-SVM Motion-Sensorless Control of a PM-Assisted Reluctance Synchronous Machine as Starter-Alternator for Hybrid Electric Vehicles, IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 21, NO. 3, May (2006) 711
- [C3] Nobuyoshi Mutoh, Takuro Kazama and Kazuya Takita, Driving Characteristics of an Electric Vehicle System With Independently Driven Front and Rear Wheels, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 53, NO. 3, JUNE (2006) 803-813

- [C4] Motoki Shinoa, Masao Nagai, Independent wheel torque control of small-scale electric vehicle for handling and stability improvement, *JSAE Review* 24 (2003) 449–456
- [C5] Shin-ichiro Sakaia, Yoichi Horib, Advanced motion control of electric vehicle with fast minor feedback loops: basic experiments using the 4-wheel motored EV, *UOT Electric March II, JSAE Review* 22 (2001) 527–536
- [C6] P.R. Johansen, D. Patterson, C. O’Keefe, J. Savenson, The use of an axial flux permanent magnet in-wheel direct drive in an electric bicycle; *Renewable Energy* 22, (2001)
- [C7] Ali Emadi, Sheldon S. Williamson and Alireza Khaligh, Power Electronics Intensive Solutions for Advanced Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicular Power Systems, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 21, NO. 3, May (2006) 567

9.4 Arhitektura in optimizacija pogonov

- [D1] K.T. Chaw, Y. C Wong, Hybridization of Energy Sources in electric vehicles, *Energy Conversion and Management*, 42 (2001) 1059-1069
- [D2] V. Galadi, L. Ipollito, V. Piccolo, A. Vaccaro, A genetic-based methodology for Hybrid Electric Vehicle sizing, *Soft Computig, Springer Verlag*, (2001) 451-457
- [D3] D.W. Corson, High power battery systems for hybrid vehicles, *Journal of power sources* 105 (2002) 110-113
- [D4] Kenji Morita, Automotive power source in 21st century, *JSAE Review* 24(2003)3–7
- [D5] Sergey Edward Lyshevski, Energy conversion and optimal energy management in diesel electric drivetrains of hybrid-electric vehicles, *Energy Conversion & Management* 41 (2000) 13-24
- [D6] Wootaik Lee, Daeho Choi, Myoungcho Sunwoo, Modelling and simulation of vehicle electric power system, *Journal of Power Sources* 109 (2002) 58–66
- [D7] Joeri Van Mierlo, Peter Van den Bossche, Gaston Maggetto, Models of energy sources for EV and HEV: fuel cells, batteries, ultracapacitors, flywheels and engine-generators, *Journal of Power Sources* 128 (2004) 76–89
- [D8] Eberhard Meissner, Gerolf Richter, Vehicle electric power systems are under change! Implications for design, monitoring and management of automotive batteries, *Journal of Power Sources* 95 (2001) 13-23
- [D9] S R Bhatikar, R L Mahajan, K Wipke and V Johnson, An artificial neural network module for simulation of the energy storage system of a hybrid electric vehicle, *Proc Instn Mech Engrs Vol 215 Part C, IMechE* (2001) 919-933
- [D10] John M. Miller, Hybrid Electric Vehicle Propulsion System, Architectures of the e-CVT Type, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 21, NO. 3, May (2006)
- [D11] T. Markel, A. Brooker, T. Hendricks, V. Johnson, K. Kelly, B. Kramer, M. O’Keefe, S. Sprik, K. Wipke ADVISOR: a systems analysis tool for advanced vehicle modelling, *Journal of Power Sources* 110 (2002) 255–266
- [D12] Jorge Moreno, Micah E. Ortúzar and Juan W. Dixon, Energy-Management System for a Hybrid Electric Vehicle, Using Ultracapacitors and Neural Networks, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, VOL. 53, NO. 2, APRIL (2006) 614 -623

- [D13] Xinxiang Yan, Dean Patterson, Novel power management for high performance and cost reduction in an electric vehicle, *Renewable Energy* 22 (2001) 177-183
- [D14] Lijun Gao, Zhenhua Jiang, Roger A. Dougal, An actively controlled fuel cell/battery hybrid to meet pulsed power demands, *Journal of Power Sources* 130 (2004) 202–207
- [D15] K. David Huang, Sheng-Chung Tzeng, A new parallel-type hybrid electric-vehicle, *Applied Energy* 79 (2004) 51–64
- [D16] K.T. Chau, Y.S. Wong; Overview of power management in hybrid electric vehicles; *Energy Conversion and Management* 43, (2002)
- [D17] Otmar Bitsche, Guenter Gutmann, Review Systems for hybrid cars, *Journal of Power Sources* 127 (2004) 8–15
- [D18] Paul Bentley, David A. Stone, Nigel Schofield, The parallel combination of a VRLA cell and supercapacitor for use as a hybrid vehicle peak power buffer, *Journal of Power Sources* (2005)
- [D19] Niels J. Schoutena, Mutasim A. Salmanb, Naim A. Kheira, Energy management strategies for parallel hybrid vehicles using fuzzy logic, *Control Engineering Practice* 11 (2003) 171–177
- [D20] S.M. Shaahid, M.A. Elhadidy, Opportunities for utilization of stand-alone hybrid (photovoltaic + diesel + battery) power systems in hot climates, *Renewable Energy* 28 (2003) 1741–1753
- [D21] Sheldon S. Williamson, Srdjan M. Lukic and Ali Emadi, Comprehensive Drive Train Efficiency Analysis of Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles Based on Motor-Controller Efficiency Modelling, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 21, NO. 3, MAY (2006), 730-740
- [D22] Gorazd Lampič, Tomaž Slivnik, Andrej Detela, Holistic Approach in Developing Propulsion System for Urban Electric Vehicles, 2005 IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference, Illinois Institute of Technology, Chicago Illinois, September (2005)

9.5 Ekologija, ekonomija in družba

- [E1] Stephen Eaves, James Eaves, A cost comparison of fuel-cell and battery electric vehicles, *Journal of Power Sources* 130 (2004) 208–212
- [E2] G. M. Hidy, Multiscale Impact of Fuel Consumption on Air Quality, *Energy & Fuels* 16, (2002) 270-281
- [E3] Sergio Chiquetto, Roger Mackett, Modelling the effects of transport policies on air pollution, *The Science of the Total Environment* 169 (1995) 265-271
- [E4] Diane Bailey, Gina Solomon, Pollution prevention at ports: clearing the air *Environmental Impact Assessment Review* 24 (2004) 749–774
- [E5] Alan Pilkington and Romano Dyerson, A patent study of electric vehicle technology development, Innovation in disruptive regulatory environments, *Disruptive regulatory environments* 79, *European Journal of Innovation Management* Vol. 9 No. 1, (2006) pp. 79-91 Emerald Group Publishing Limited
- [E6] Mark B. Brown The Civic Shaping of Technology, California's Electric Vehicle Program, *Science, Technology, & Human Values*, Vol. 26 No. 1, Winter (2001) 56-81, 2001 Sage Publications Inc.

- [E7] Geoff D. Callow, The Bourner lecture: Electric vehicles: can we get there from here?, *Journal of Power Sources* 80 (1999) xvii–xxi
- [E8] W.W. Clark, E. Paolucci, J. Cooper, Commercial development of energy—environmentally sound technologies for the auto-industry: the case of fuel cells, *Journal of Cleaner Production* 11 (2003) 427–437
- [E9] M.A. Delucchi, T. E Lipman, An analysis of the retail and life-cycle cost of battery-powered electric vehicles, *Transportation Research Part D* 6 (2001) 371–404, Pergamon
- [E10] Karina Funk, Ari Rabl, Electric versus conventional vehicles: social costs and benefits in France, *Transportation Research Part D* 4 (1999) 397–411
- [E11] Camilla Kazimi, Evaluating the Environmental Impact of Alternative-Fuel Vehicles, *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ECONOMICS AND MANAGEMENT* 33, 163-185 (1997) ARTICLE NO. EE970984
- [E12] M. Z. Jacobson, W. G. Colella, D. M. Golden, Cleaning the Air and Improving Health with Hydrogen Fuel-Cell Vehicles, *SCIENCE VOL 308 24 JUNE (2005) 1901-1905*
- [E13] S. Locke Bogart, Comparison of Investment and Related Requirements for Selected Hydrogen Vehicle System Pathways, *Journal of Fusion Energy*, Vol. 21, Nos. 3/4, December (2002)
- [E14] Timothy E. Lipman, Jennifer L. Edwards, Daniel M. Kammen, Fuel cell system economics: comparing the costs of generating power with stationary and motor vehicle PEM fuel cell systems, *Energy Policy* 32 (2004) 101–125
- [E15] Bengt Johansson , Anders Martensson, Energy and environmental costs for electric vehicles using CO₂-neutral electricity in Sweden, *Energy* 25 (2000) 777–792
- [E16] Sanjay Kaula, Raphael Edingerb, Efficiency versus cost of alternative fuels from renewable resources: outlining decision parameters, *Energy Policy* 32 (2004) 929–935
- [E17] Kinji Tsujimura, The improvement of the efficiency of fuel cells against the elimination of harmful emissions from the internal combustion engines, *JSAE Review* 22 (2001) 147-150
- [E18] Lester B. Lave, Heather L. MacLean; An Environmental-economic evaluation of hybrid electric vehicles: Toyota's Prius vs. its conventional internal combustion engine Corolla, Pergamon, *Transportation Research Part D* 7 (2002) 155-162

9.6 Energetika, materiali in ostalo

- [F1] Kazuo Onda, Takahiro Kyakuno, Kikuo Hattori, Kohei Ito, Prediction of production power for high-pressure hydrogen by high-pressure water electrolysis, *Journal of Power Sources* 132 (2004) 64–70
- [F2] Rona Webster, Can the electricity distribution network cope with an influx of electric vehicles?, *Journal of Power Sources* 80 (1999) 217–225
- [F3] Andrew Ford, The impacts of large scale use of electric vehicles in southern California, *Energy and Buildings* 22 (1995) 207-218
- [F4] W. Kempton, T. Kubo; Electric-drive vehicles for peak power in Japan, *Energy Policy* 28, (2000)
- [F5] Butz von Stryk, Z. Angew. Modelling and Simulation of Electro and Magnetorheological Fluid Dampers, *Math. Mech.* 82 (2002) 1, 3—20

- [F6] Vicki P. McConnell, Electric vehicles rely on composite design, October (1999) REINFORCED plastics 33
- [F7] Masahiko Jinta, Yoshinori Sakai, Shunsaku Horie, Masafumi Oyagi, Kuniaki Matsui, Youichi Hasegawa, Press forming development of aluminum auto body panel for electric vehicle, Technical Notes/JSAE Review 22 (2001) 81-94
- [F8] M.W. Coney, C. Linnemann, H.S. Abdallah, A thermodynamic analysis of a novel high efficiency reciprocating internal combustion engine—the isoengine, Energy 29 (2004) 2585–2600
- [F9] Roel Hammerschlaga, Patrick Mazzab, Questioning hydrogen, Energy Policy 33 (2005) 2039–2043
- [F10] SLOVAR SLOVENSKEGA KNJIŽNEGA JEZIKA, DZS, 2000
- [F11] <http://www.epa.gov/otaq/labda.htm> - vozni cikli

9.7 Patenti

- [G1] PCT/JP2004/014041, Hitachi, 2006
- [G2] PCT/JP2005/009841, Toyota, 2006
- [G3] PCT/JP2005/006141, Bridgestone, 2005
- [G4] PCT/US2004/035898, WaveCrest, 2005
- [G5] PCT/US2004/003391, WaveCrest, 2004
- [G6] PCT/JP2003/008215, Toyota, 2004
- [G7] PCT/JP2002/008112, JAPAN SCIENCE AND TECHNOLOGY CORP., 2003
- [G8] PCT/JP2001/011434, JAPAN SCIENCE AND TECHNOLOGY CORP., 2002
- [G9] PCT/JP2001/011433, JAPAN SCIENCE AND TECHNOLOGY CORP., 2002
- [G10] PCT/JP2001/009421, JAPAN SCIENCE AND TECHNOLOGY CORP., 2002
- [G11] PCT/EP2001/003057, Audi, 2002
- [G12] PCT/US2001/000567, Snap-on Technologies, 2001
- [G13] PCT/US2005/025260, WaveCrest, 2006

Izjavljam, da sem diplomsko delo izdelal samostojno pod vodstvom mentorja prof. dr. Tomaža Slivnika in somentorja prof. dr. Janeza Nastrana. Izkazano pomoč drugih sodelavcev sem v celoti navedel v zahvali.

Gorazd Lampič