

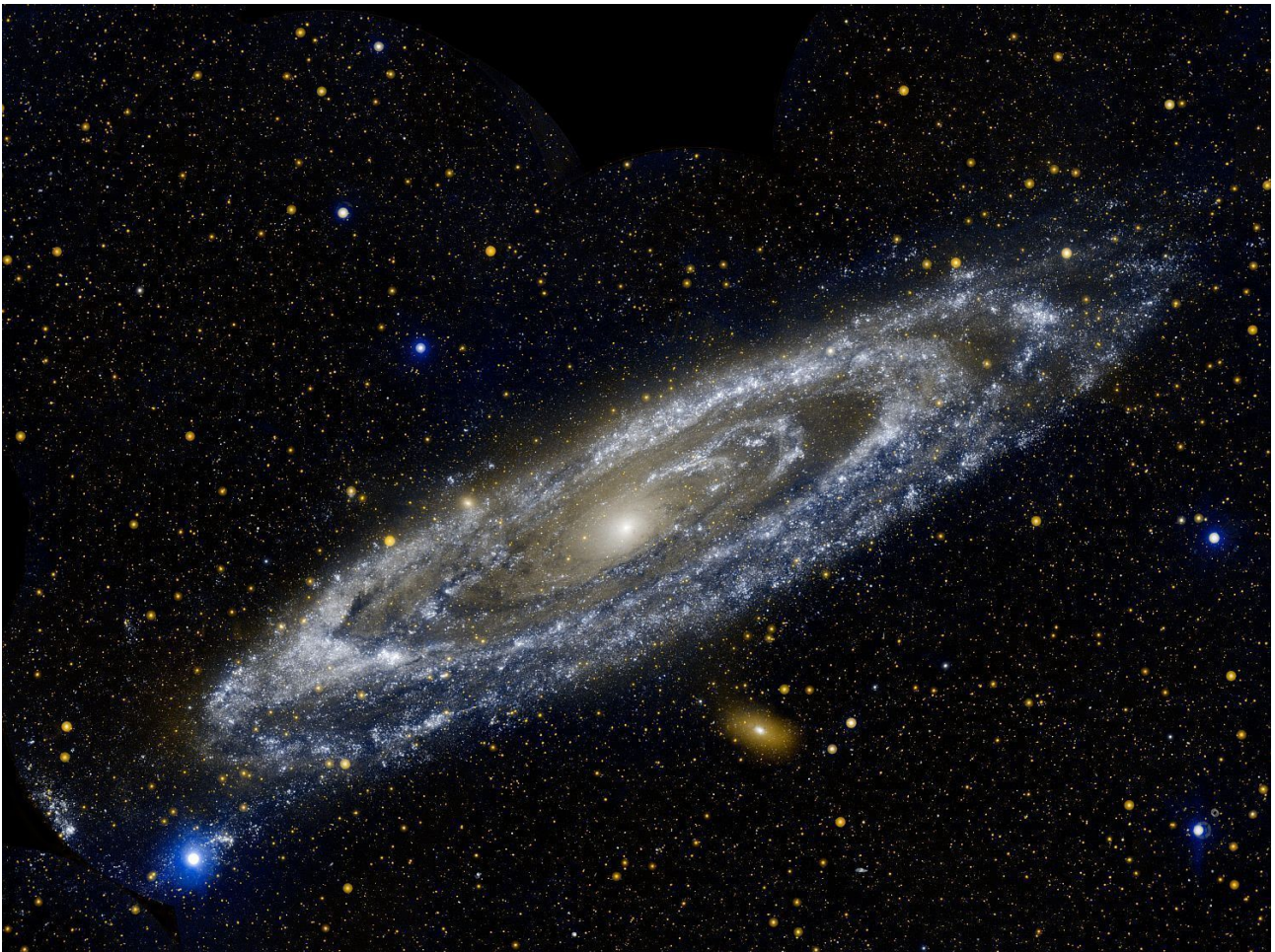
Zakaj in kako električni avto?

Matjaž Vidmar

1. Premikanje in potovanja

Ena od lastnosti živih bitij je želja po premikanju. Premikanje je lahko silno počasno za rastline ali pa razmeroma hitro za ptice. Povsem človeška lastnost je nenasitnost: nikoli ni iskana stvar zadosti velika, hitra itd. Kaj si glede na naravne zakone sploh lahko privoščimo?

Hitreje od svetlobe zagotovo ne moremo. Središče naše galaksije Rimske ceste je od nas oddaljeno približno 26000 svetlobnih let. V razponu enega človeškega življenja tja zagotovo ne moremo. Še manj do podobne, (razmeroma bližnje) sosednje galaksije Andromede na oddaljenosti približno 2.5 milijona svetlobnih let:



Nam najbližje zvezde izven našega osončja so oddaljene okoli štiri svetlobna leta. Za potovanje do najbližjih zvezd v razponu enega človeškega življenja jedrsko gorivo ne zadošča, saj se komaj tisočinka mase pretvori v energijo. Potrebovali bi znatne količine antimaterije, ki se v reakciji z navadno snovjo popolnoma pretvori v energijo. Ko bi znali učinkovito pridobivati antimaterijo in izdelati ustrezen raketni motor, bi njegov izpuh iz gama žarkov uničil vse življenje na Zemlji...

Danes (še) ne znamo izdelati niti praktičnega raketnega motorja na jedrsko gorivo (fisija oziroma fuzija). Vse, kar znamo izdelati, so raketni motorji na kemijsko gorivo. Enačba rakete pravi, da domet vesoljske ladje narašča komaj z logaritmom količine goriva. S kemijskim gorivom je možno kvečjemu na Luno. Za Mars največ enosmerna vozovnica, za zunanje planete osončja več deset-letno potovanje.

Naravne omejitve si je lažje predstavljati na manj zahtevnih primerih kot količino potrebne energije za premikanje na Zemlji. Glede na naslov članka je najbolj nazorna primerjava v potrebni količini goriva (nafte) za različna prevozna sredstva na potnika na določeno razdaljo (100km).

V razpredelnici so navedene okvirne številke, preračunane v litre nafte. Poraba baterijskega električnega avtomobila je mišljena, da enakovredno količino nafte pokurimo v veliki termoelektrarni, ki ima dvakrat večji izkoristek (okoli 40%) od majhnega motorja z notranjim izgorevanjem.

Sila zračnega upora največkrat narašča s kvadratom hitrosti $F = \alpha \cdot v^2$. Potrebna moč motorja je torej sorazmerna kubu hitrosti $P = F \cdot v = \alpha \cdot v^3$. Energija za določeno pot je ponovno sorazmerna kvadratu hitrosti $W = F \cdot d = \alpha \cdot d \cdot v^2$. Povsem samoumevno je daleč najbolj varčen počasni kolesar! Vsa cesta vozila so varčnejša od letal predvsem zaradi nižjih hitrosti pri premikanju po tleh.

Potniška letala letijo na višinah med 11km in 12km, kjer je ozračje štirikrat redkejšo in sila zračnega upora štirikrat manjša kot pri tleh. Kljub temu zaradi velike hitrosti niso kdove kako varčna. Povsem

jasno so na repu lestvice varčnosti vojaška letala:

Prevozno sredstvo	Hitrost	Število potnikov	Poraba vozilo/ura	Poraba potnik /100km
Kolesar	20km/h	1	(0.02l/h)	(0.1l/100km)
Avtomobil z notranjim izgorevanjem	120km/h	4	6l/h	1.25l/100km
Avtobus	90km/h	30	20l/h	0.74l/100km
Baterijski električni avtomobil	120km/h	4	(3l/h)	(0.63l/100km)
Športno letalo	180km/h	4	40l/h	5.6l/100km
Varčno malo malo letalo	180km/h	2	9l/h	2.5l/100km
Manjši helikopter	180km/h	4	120l/h	16.7l/100km
Potniško letalo	800km/h	100	4000l/h	5l/100km
Vojaško pod-zvočno letalo	800km/h	1	400l/h	50l/100km
Vojaško nad-zvočno letalo	2000km/h	1	4000l/h	200l/100km

Upor na površini vode zelo hitro narašča s hitrostjo. Vodna plovila so zato zelo počasna ali pa energetsko silno neučinkovita, da sem jih v razpredelnici namenoma izpustil. Učinkovitost vseh plovil narašča z velikostjo: preko-oceanske ladje in letala so grajeni za veliko število potnikov.

Hitrost premikanja vozil ima še druge praktične omejitve. Avtomobil naj bi bil na spodnji meji hitrosti konkurenčen kolesarju. Gornjo

mejo hitrosti omejujejo masa in oblika avtomobila ter izgradnja primerne avtoceste.

Počasna letala imajo zelo velika krila, ki so občutljiva na vremenske pojave, predvsem vetrove. Velike in počasne zračne ladje so pred stoletjem skoraj vse končale kot žrtev živahnega dogajanja v ozračju. Sodobna potniška letala omogočajo polet v skoraj vsakršnih vremenskih razmerah za ceno višjih hitrosti in višin nad večino vremenskih pojavov od malih športnih letal za ceno gradnje velikih letališč z dolgimi vzletno/pristajalnimi stezami.

Helikopter je zelo neučinkovito prevozno sredstvo, ker morajo konice krakov učinkovitega vrtečega krila doseči 70% do 80% hitrosti zvoka kljub znatno počasnejšemu premikanju celotnega plovila. Pok-pok-pok helikopterja je v resnici nad-zvočni pok, ko v določenem delu profila vrtečega krila hitrost zračnega toka preseže hitrost zvoka.

Hitrost zvoka predstavlja hudo omejitev v zemeljskem ozračju. Hitrost zvoka z višino celo upada zaradi nižajoče temperature. Razmerje učinkovitosti letal je podobno tudi za potniška letala: nad-zvočni Concorde prepelje čez veliko lužo za enako količino goriva štiri-krat manj potnikov od pod-zvočnega istodobnika B747.

Že potovanje v bližnje vesolje, v tirnico na višini nekaj 100km nad površino Zemlje, zahteva pospeševanje do več deset-kratne hitrosti zvoka. Večino tega pospeševanja lahko z razpoložljivo tehniko opravimo samo izven ozračja. Kemijski raketni motor potrebuje poleg goriva še oksidator. Hkrati se ostanki izgorevanja uporabijo kot izpuh raketnega motorja.

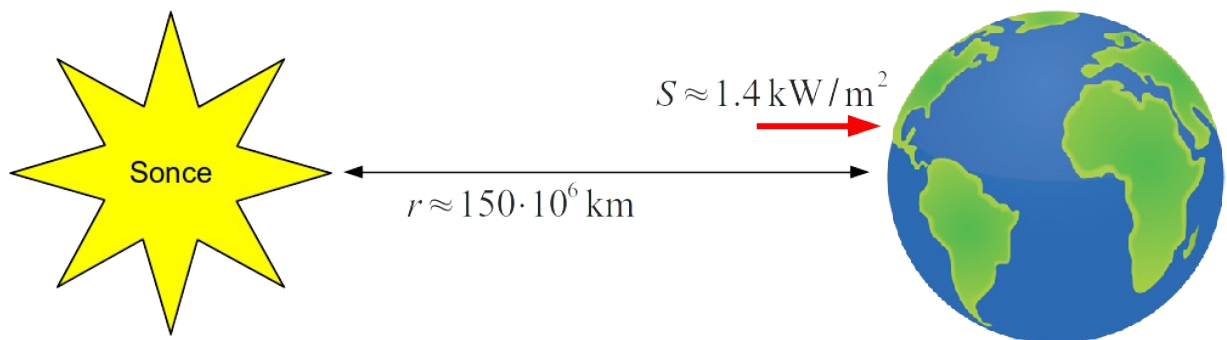
Potovanje v bližnje vesolje je zato za precej velikostnih razredov potratnejše in dražje od potovanja s potniškim letalom. Danes znana tehnika zaenkrat omogoča kvečjemu potovanje znotraj našega Osončja. Karkoli dlje ostaja svet pravljič, kjer se je zmajem in čarovnicam pridružil še Dart Vader.

2. Viri energije in podnebne spremembe

Kakršnakoli dejavnost zahteva vir energije. Obnovljivi viri energije ne obstajajo. Eden najbolj dolgoživih virov energije je naše Sonce. Astronomi pravijo, da je Sonce razmeroma majhna zvezda trenutno sredi svoje življenjske dobe okoli 10 milijard let. Sonce gori razmeroma enakomerno tako, da zlivanje jeder pretvarja vodik v helij. Sonce naj bi bilo premajhno, da bi eksplodiralo kot supernova.

Vsi ostali viri energije so posledica sevanja Sonca (na primer veter, fosilna goriva itd) oziroma so nastali še prej, težke kovine (uran ipd) v eksplozijo supernove, ki je ustvarila Osončje.

Kljub človeški nenasitnosti je energije iz Sonca še razmeroma dosti. Zemlja se nahaja na povprečni razdalji 150 milijonov kilometrov od Sonca, kjer znaša pretok moči sevanja sonca okoli 1.4 kW/m^2 . Pomnoženo s presekom Zemlje in deljeno s številom prebivalcev vsak od nas še vedno prejme skoraj 18 MW moči 24 ur na dan, 7 dni na teden:



Sprejeta moč $P = S \cdot A \approx 1.79 \cdot 10^{17} \text{ W}$

*Zemlja ≈ krogla $R \approx 6378 \text{ km}$
preseka $A = \pi R^2 \approx 1.28 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$*

Število prebivalcev $N \approx 10 \text{ milijard prebivalcev} = 10^{10} \text{ prebivalcev}$

Moč na prebivalca $P/N \approx 1.79 \cdot 10^7 \text{ W / prebivalec} = 17.9 \text{ MW / prebivalec}$

Moč 18 MW zadošča za pogon vojaškega nad-zvočnega letala. Več kot polovica te moči se sicer vpije v ozračju (ultravijolična svetloba)

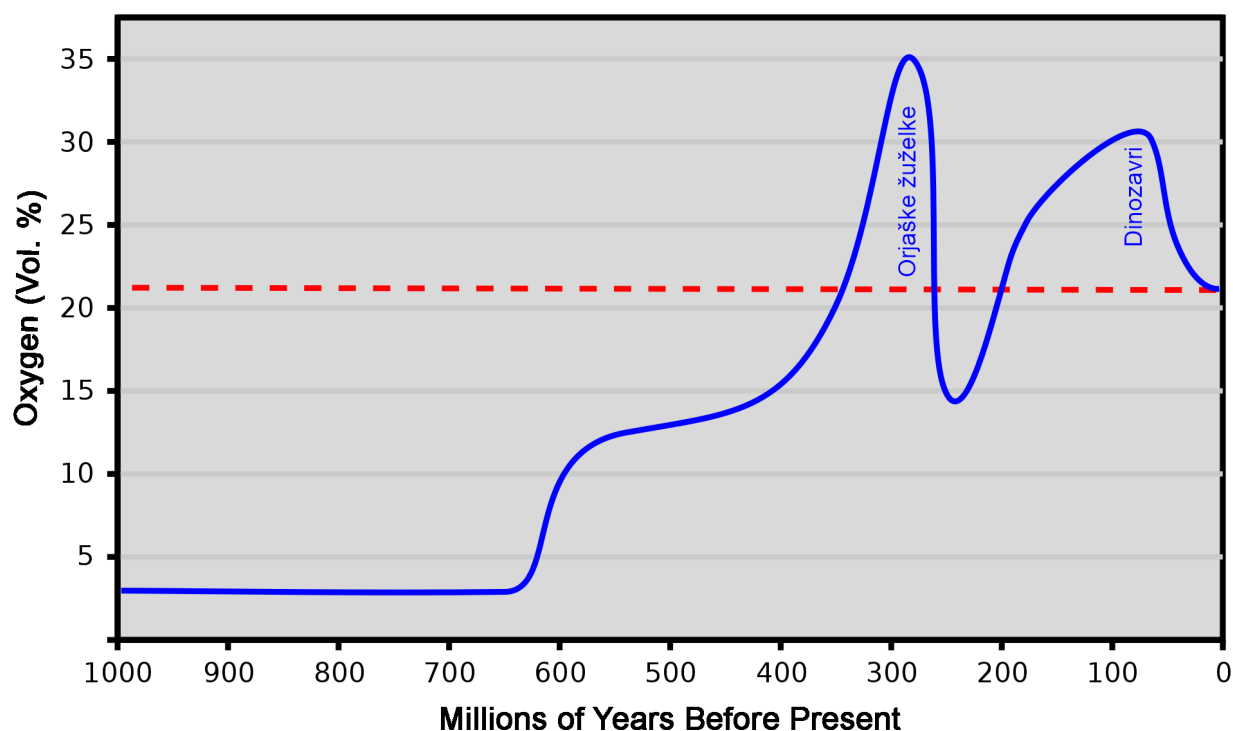
oziroma odbije od oblakov (vidna svetloba). Površino Zemlje kljub temu doseže znatna moč.

Svetlobno moč, ki doseže površino Zemlje, večinoma koristno izrabijo najmanjši prebivalci. Mikroskopske alge v oceanih tvorijo sladkorje in kisik O_2 z energijo svetlobe iz vode H_2O in ogljikovega dioksida CO_2 . Na drugem koncu prehranjevalne verige ponovno igrajo najpomembnejšo vlogo najmanjši: gnilobne bakterije iz sladkorjev in kisika ponovno tvorijo vodo in ogljikov dioksid.

Kisik je kemijsko preveč reaktiven plin, da bi se nahajal v znatnih količinah v ozračju planetov brez življenja. Kisik se pojavi v ozračju Zemlje še s pojavom življenja. V milijardi let so velike spremembe sestave zemeljskega ozračja in z njimi podnebja stalnica (https://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere_of_Earth):

Oxygen Content of Earth's Atmosphere

During the Course of the Last Billion Years



Količina kisika v zemeljskem ozračju ima velik vpliv na razvoj živalskih vrst. Velike živali potrebujejo dosti energije za premikanje in posledično dosti kisika. Vrhovi kisika v zemeljskem ozračju sovpadajo s pojavom orjaških živali: orjaške žuželke (kačji pastirji z

razponom kril 80cm) ob koncu starega zemeljskega veka pred dobrimi 300 milijoni let oziroma veliki plazilci (dinozavri) ob koncu srednjega zemeljskega veka pred dobrimi 100 milijoni let.

Vožnja s poldrugo tono težkim osebnim avtomobilom po avtocesti zahteva okoli 20kW mehanske moči oziroma polovico tega ali 10kW za počasnejšo vožnjo po navadni ravni cesti. Vožnja z avtomobilom torej zahteva tisočkrat manjšo moč, kot jo prejema vsak Zemljan od Sonca. Porabljena energija je še manjša, saj se z avtomobilom ne vozimo 24 ur na dan vseh 7 dni v tednu. Človeška proizvodnja CO₂ je v primerjavi z gnilobnimi bakterijami zanemarljivo majhna.

Izumrtje dinozavrov je danes še vedno uganka. Nekateri dolžijo padec meteorita, ki naj bi povzročil hude podnebne spremembe. Mogoče pa so se dinozavri zadušili ob pomanjkanju kisika? Kaj pa če so dinozavri povzročili podnebne spremembe sami z nesmotrno uporabo fosilnih goriv?

3. Baterijski avtomobil

Osebni avtomobil je danes star dobrih sto let, je osnova številnih panog industrije ter predstavlja pomemben strošek v našem življenju. Avtomobil predstavlja tudi enega glavnih porabnikov energije različnih človeških dejavnosti. Vse človeške dejavnosti skupaj še vedno predstavljajo neznaten delež energije, ki na Zemlji kroži v živi naravi: mikroskopske alge in gnilobne bakterije.

Razvoj osebnega avtomobila je začel z najrazličnejšimi pogonskimi stroji, od parnega stroja do elektromotorja na akumulatorske baterije. Največji razvoj je omogočil batni motor z notranjim izgorevanjem, od avtomobilov do helikopterjev. Po celem stoletju razvoja je batni motor z notranjim izgorevanjem dosegel svoje teoretske meje. Batni motor z notranjim izgorevanjem ostaja komplicirana naprava, ki zahteva dosti dragega vzdrževanja.

Batni motor z notranjim izgorevanjem sodi skupaj s parnim strojem in letalsko (plinsko) turbino v veliko družino toplotnih Carnojevih strojev (Nicolas Leonard Sadi Carnot 1824). Izkoristek Carnojevega stroja je omejen z razmerjem temperatur oziroma s kompresijskim razmerjem. Slednje se giblje v razponu od 1:10 za bencinski motor do 1:30 za letalsko turbino. Kljub visokemu izkoristku turbine je potniško letalo še vedno potratno prevozno sredstvo zaradi velike hitrosti.

Razvijalci avtomobilov so najprej poskušali nadomestiti bencin z drugačnimi vrstami goriva: težjimi naftnimi derivati, alkoholom oziroma gorljivimi plini. Bencinski motor dosega vozniku prijaznejšo navorno krivuljo, ko ga poganja zemeljski plin metan. Hranjenje metana po drugi strani zahteva nerodno velike visokotlačne posode.

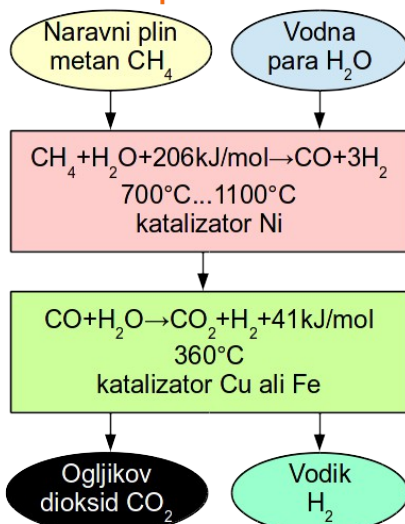
Čeprav odziv batnega motorja ni tako počasen kot odziv letalske turbine, postaja omejujoči dejavnik v sodobnem živahnem prometu. Povrhu slaba navorna krivulja batnega motorja zahteva sklopko in menjalnik, ki odvrata pozornost voznika od prometa oziroma vnašata dodatne zakasnitve avtomatskega menjalnika, tudi

brezstopenjskega.

Odziv in navorno krivuljo batnega motorja z notranjim izgorevanjem lahko sicer popravimo z manjšo električno akumulatorsko baterijo in dodatnim generatorjem/elektromotorjem. Hibridni pogon pomeni danes velik vložek za razmeroma majhen rezultat. Povrhu Carnot ostaja!

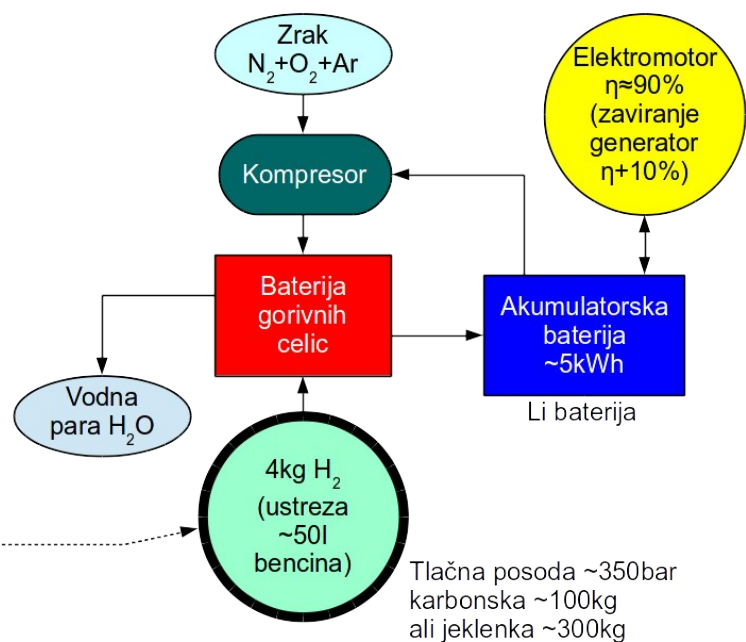
Carnojevemu izkoristku se lahko izognemo s proizvodnjo elektrike v baterijah gorivnih celic. Žal kljub temu izkoristek primernih gorivnih celic ne presega 50%. Glede na hitro nihanje porabe elektromotorja za pogon avtomobila je potrebna še manjša vmesna (NiCd ali litijeva) akumulatorska baterija:

Proizvodnja vodika $\eta \approx 60\%$



9...12kg CO₂ ← 1kg H₂

Avto na vodik $\eta \approx 50\%$



Ekonomsko upravičena proizvodnja vodika gre danes iz zemeljskega plina metana, kar je energetsko potratno in ekološko sporno. Skupni izkoristek je komaj kaj boljši od dizelskega motorja. Povrhu vodik zahteva nerodno in nevarno visokotlačno posodo (atest?) za hranjenje v vozilu. Električni avtomobil na gorivne celice bo verjetno ostal zanimivost v kakšnem tehničnem muzeju.

Na drugi strani električne akumulatorske baterije iz leta v leto vztrajno napredujejo. Napredek akumulatorskih baterij se

neprekinjeno nadaljuje že zadnjih nekaj desetletij. Hkrati z napredkom akumulatorskih celic napreduje tudi razumevanje delovanja baterij, njihove smotrne uporabe, razmeroma velike mase in nevarnosti, ki jo predstavlja vskladiščena energija.

Prelom v pogonu osebnih avtomobilov je nastopil v desetletju 2010 do 2020. Leta 2010 je bil baterijski električni avtomobil težko dostopna tehnična zanimivost z neuporabnim dometom za visoko ceno. Leta 2020 je postal električni baterijski pogon povsem konkurenčen pogonu z motorjem z notranjim izgorevanjem, dosegljiv vsem za podobno nabavno ceno in primerljivim dometom. Hkrati se je leta 2020 razvoj batnih motorjev z notranjim izgorevanjem skoraj ustavil, razvoj akumulatorskih baterij pa se z nezmanjšano hitrostjo nadaljuje.

Razvoj baterijskega pogona je sicer podoben razvoju batnega motorja z notranjim izgorevanjem. Prvotni batni motorju niso imeli posebnega hlajenja. Povečanje zmogljivosti batnega motorja je najprej omogočilo zračno hlajenje in končno tekočinsko (vodno) hlajenje batnega motorja z notranjim izgorevanjem.

Podobno kot delovanje batnega motorja je tudi delovanje akumulatorske celice močno odvisno od temperature in hkrati sama celica proizvaja toploto tako pri polnjenju kot pri praznjenju. Prvotni baterijski avtomobili vključno s predelanimi vozili niso imeli nikakršnega uravnavanja temperature akumulatorja, kar je omejevalo hitrost polnjenja, zmogljivost vozila in življenjsko dobo akumulatorske baterije.

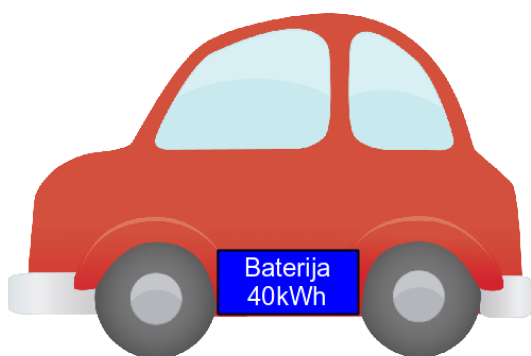
Novejša cenena vozila imajo vsaj zračno hlajenje akumulatorske baterije, da preprečijo poškodbe celic. Dražja vozila danes vsebujejo tekočinsko hlajenje oziroma ogrevanje baterije glede na trenutne pogoje uporabe: prevroča baterija ima krajšo življenjsko dobo, prehladna baterija pa nižjo zmogljivost pozimi.

Drugačen pogon prinaša tudi drugačno namestitev pogonskega stroja oziroma celotnega načrtovanja vozila. Prvotni baterijski osebni avtomobili so si pridobili sloves nevarnih, slabo upravljivih vozil zaradi neprimerne namestitve težke akumulatorske baterije.

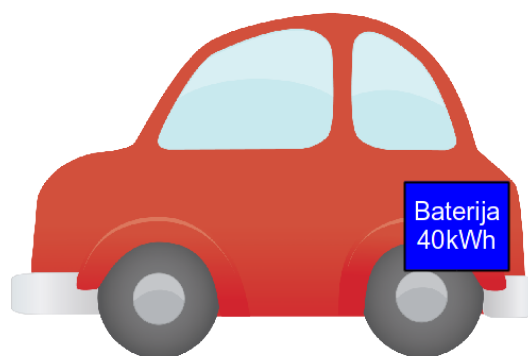
Praktične in zakonske zahteve za predelavo vozil so zahtevale namestitev baterije zadaj. Težišče vozila zadaj ni izredno škodljivo in nevarno samo za letalo, pač pa tudi za cestno vozilo.

Vsi sodobni osebni avtomobili na baterijski pogon imajo nameščeno baterijo nizko v sredini vozila. Nizko težišče v sredini baterijskega vozila se izkaže bolj stabilno in omogoča celo boljše vozne lastnosti od avtomobila z batnim motorjem z notranjim izgorevanjem. Hkrati je takšna namestitev akumulatorske baterije najbolj varna tudi v primeru prometne nesreče, da težka baterija ne poškoduje potnikov oziroma se ne poškoduje sama, da zagori:

Težišče vozila z baterijo 40kWh \equiv 300kg
(ustreza \sim 15l bencina)



Nizko težišče v sredini \equiv
upravljivo in varno vozilo
(vsa sodobna vozila)



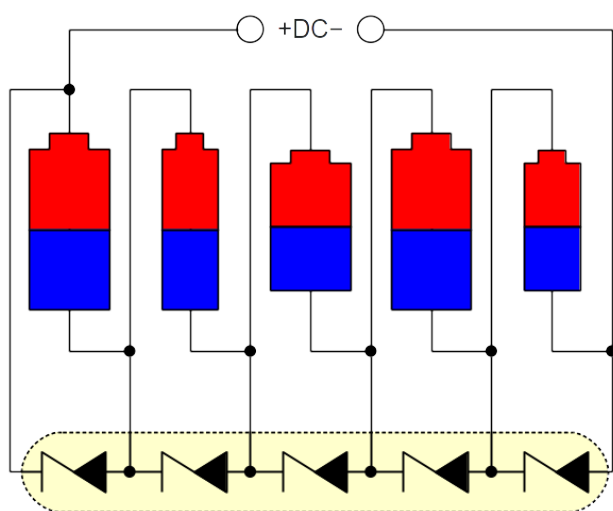
Visoko težišče zadaj \equiv
nevarno in slabo upravljivo
(stara/predelana vozila)

Večina sodobnih baterijskih vozil uporablja baterijo iz okroglo 100 litijevih celic za delovno napetost okoli 400V, kar omejuje sedanja tehnologija močnostnih polprevodnikov IGBT. Pri vršni moči elektromotorja 120kW to pomeni tokove praznjenja do 300A. Povsem samoumevno težijo proizvajalci k višjim napetostim, da bi znižali tokove.

Akumulatorska baterija ni preprost seštevek celic. Nekatere celice imajo nekoliko višjo zmogljivost, spet druge nekoliko manjšo. Nekatere celice imajo hitrejšo samo-praznjenje, spet druge manjše. Pojav se je dal opaziti že pri starih svinčenih baterijah, kjer je proti

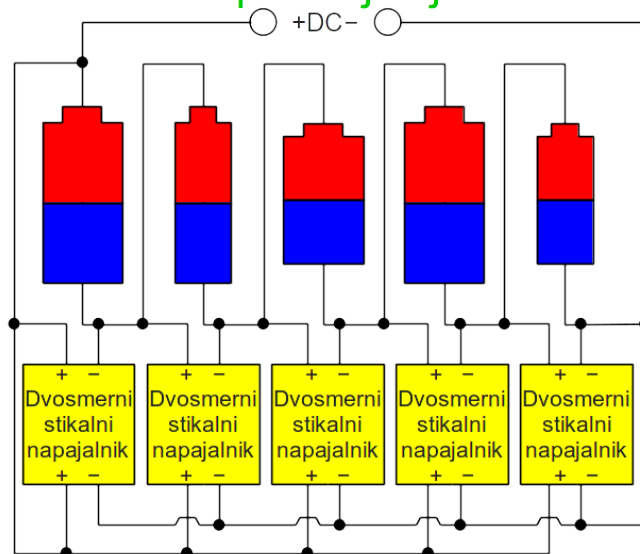
koncu življenjske dobe odpovedala samo ena ali dve celici. Nekateri NiCd baterije so imele vgrajene celo povratne diode, ki naj bi onemogočale polnjenje najšibkejših celic v obratni smeri pri prekomernem praznjenju celotne baterije.

Svinčene celice sicer ne prenesejo preglobokega praznjenja. Celicam NiCd zelo škodi prekomerno polnjenje. Litijeve celice so od vseh najbolj zahtevne, saj ne prenesejo niti preglobokega praznjenja niti prekomernega polnjenja. Čeprav majhne so razlike med posameznimi celicami kumulativne: vsak cikel polnjenja in praznjenja se razlike seštevajo. Vse akumulatorske baterije iz litijevih celic so zato opremljene z uravnoteževalcem (balanserjem):



Preprost uravnoteževalec deluje samo pri polnjenju baterije do 100%

Celovit uravnoteževalec deluje med polnjenjem in praznjenjem



Preprost uravnoteževalec so lahko zener diode oziroma enakovredna vezja, ki preprečuje prekomerno polnjenje najšibkejših celic. Preprost uravnoteževalec deluje samo pri polnjenju. Pri praznjenju je treba paziti, da se nobena celica ne izprazni preveč. Viška energije v močnejših celicah se ne da izrabiti. Cenena vozila so danes opremljena s preprostimi uravnoteževalci, ki zahtevajo, da vsakih nekaj polnjenj baterijo popolnoma napolnimo do 100%.

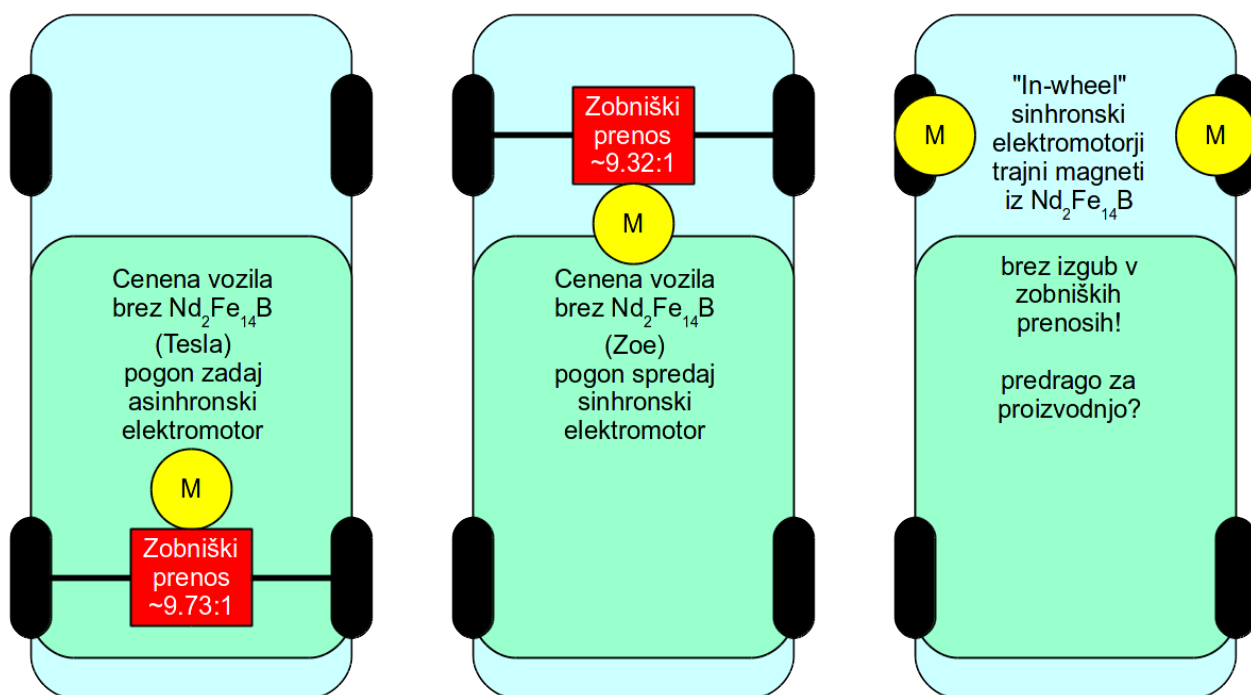
Celovit uravnoteževalec sestavljajo dvosmerni stikalni napajalniki, ki šibkejše celice polnijo iz močnejših celic. Ker so razlike med

celicami majhne, so tudi moči stikalnih napajalnikov za par velikostnih razredov manjše od moči polnjenja oziroma praznjenja posamezne celice. Celovit uravnoteževalec deluje med polnjenjem in med praznjenjem. Vso razpoložljivo energijo v vseh celicah se da popolnoma izrabiti.

V baterijskem električnem vozilu je elektromotor razmeroma majhen in nezahteven gradnik, vsaj v primerjavi z baterijo. Majhna vztrajnost elektromotorja omogoča takojšen odziv. Primerna elektronika, razsmernik nastavljuje frekvence, omogoča skoraj poljubno navorno krivuljo ne glede na izvedbo elektromotorja: asinhronski, reluktančni, sinhronski ali kaj drugega. Mehanski menjalnik in sklopka so nepotrebni.

Preprost zgled, železnice že več kot pol stoletja uporabljajo dizel-električne lokomotive, kjer dizelski motor poganja električni generator, slednji pa elektromotorje na kolesih. Na kratko povedano, dizelski motor z električnim menjalnikom, ker glede na zahtevane mehanske moči zobniški prenosi niti mehanske sklopke niso praktični niti učinkoviti.

Običajni elektromotorji imajo za en velikostni razred previsoke vrtljaje in en velikostni razred prenizek navor za neposredni pogon koles osebnega avtomobila. Večina baterijskih električnih avtomobilov danes še vedno vsebuje preprost zobniški prenos in diferencial. Največji proizvajalec baterijskih avtomobilov Tesla dolguje svoje ime prav uporabi asinhronskega elektromotorja, čeprav danes uporablja tudi druge vrste elektromotorjev:



Bistveno upravljivejše vozilo bi omogočali elektromotorji z velikim navorom pri nizkih vrtljajih, vgrajeni neposredno v kolesa (in-wheel), povrh brez izgub v zobniških prenosih. Takšni elektromotorji zahtevajo močne permanentne magnetne iz dragih redkih „zemelj“ (zlitine z neodimijem, samarijem ipd). „In-wheel“ elektromotorji izgledajo danes predragi za široko-potrošna vozila.

4. Polnjenje baterije električnega avtomobila

Polnjenje baterije električnega avtomobila buri duhove od samega začetka. Nasprotniki akumulatorjev še vedno vztrajajo na majhnem dometu in počasnem polnjenju baterijskih avtomobilov. Industrija je odgovorila z (večinoma nepotrebnimi) hitrimi postopki polnjenja, znanstvena fantastika pa z menjavo celih baterij. Energetiki so zagnali krik in vik, da se jim bo celo omrežje podrlo. Uradniki v kravatah so odgovorili z vrsto pomanjkljivih in pogosto neživljenjskih standardov.

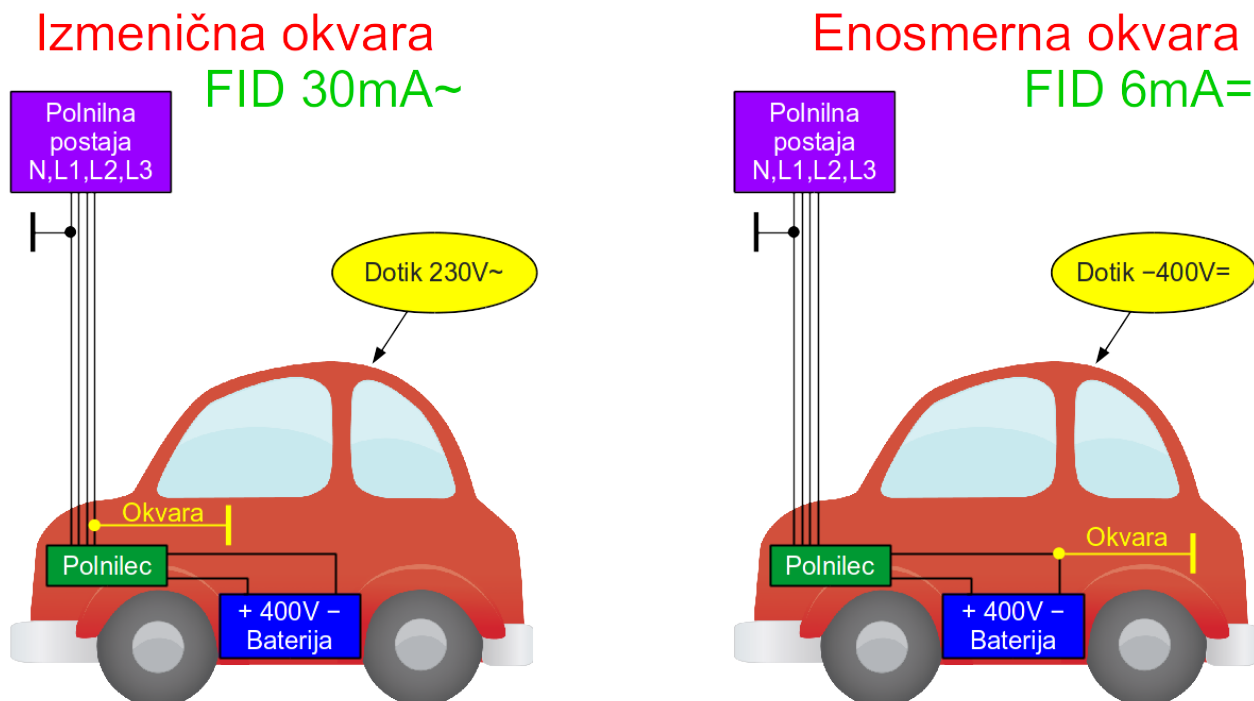
Domet baterijskega avtomobila se danes že kosa z bencinarji in dizli. Večji tank za gorivo pomeni večjo nevarnost ob prometni nesreči. Povsem enako večja akumulatorska baterija. Proizvajalci avtomobilov zato ne večajo prostornine tankov za gorivo preko vseh meja. Podobno proizvajalci baterijskih avtomobilov ne večajo zmogljivosti akumulatorjev preko vseh meja. V nobenem primeru nima smisla povečevati zaloge energije preko zmogljivosti voznika, ki za varno vožnjo sam potrebuje počitek. Vse kaže, da bo današnja meja (2021) zmogljivosti baterije med 50kWh in 100kWh ostala.

Avtomobile večinoma uporabljamo za prihod na delo in čez osem ur nazaj domov. Kakršenkoli postopek polnjenja, ki je krajši od osem ur, pomeni samo večje izgube energije pri polnjenju akumulatorja, večje izgube energije v omrežju in predvsem krajšo življenjsko dobo akumulatorske baterije, ki je najdražji sestavni del električnega avtomobila.

Električno omrežje se spreminja. Pred pol stoletja marsikateri večer nismo videli televizije, ker je bila omrežna napetost prenizka. Potem so omrežje tako izboljšali, da danes žarnica ne mrkne niti ob nevihti. Pred pol stoletja je marsikatera električna naprava imela samo dvopolni vtikač brez ozemljitve, ker o nevarnosti električnih naprav ni razmišljal nihče. „Šuko“ vtičnica z ozemljitvijo je prišla kar nekaj let kasneje, še nekaj let za njo FID zaščitno stikalo.

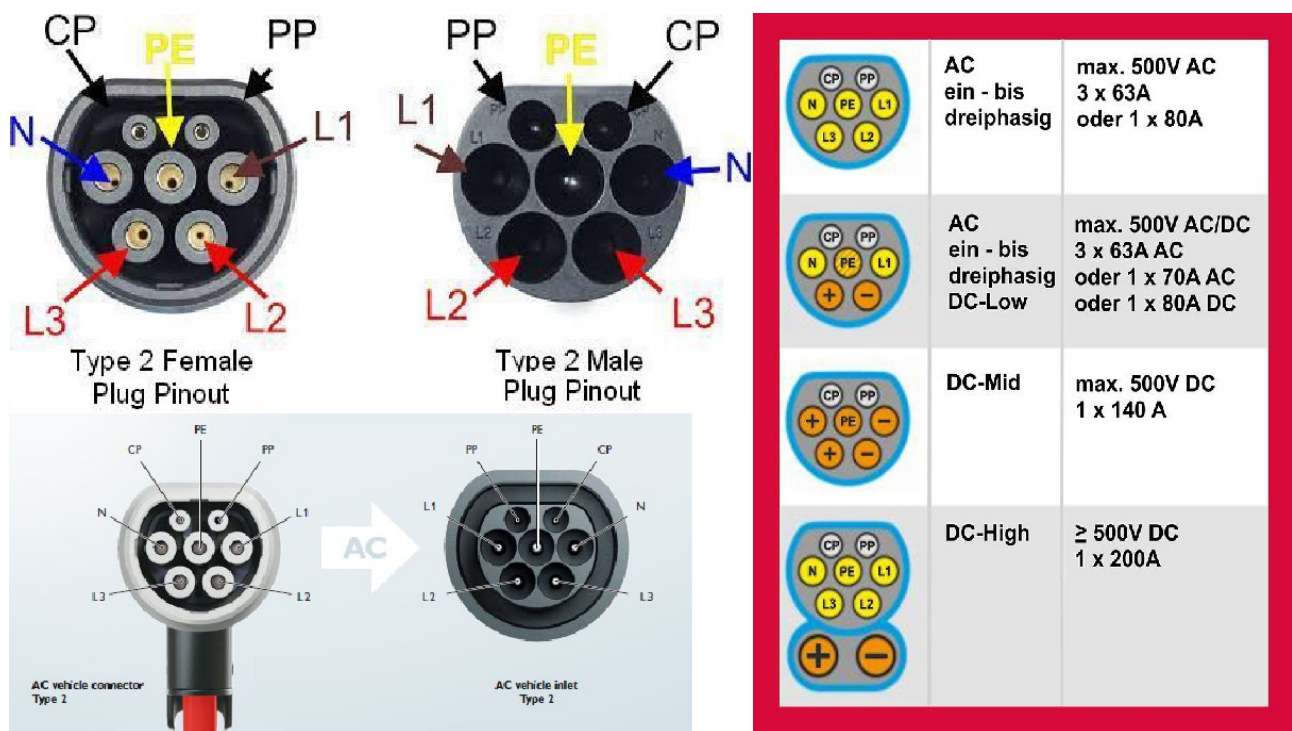
Baterijski električni avtomobil običajno polnimo na prostem, da se

baterija lahko neovirano hladi. Pri tem ne predstavlja nevarnosti samo izmenično omrežje 230V~, pač pa tudi enosmerna baterija 400V= v samem vozilu. Enosmerni tok zahteva posebno, izredno občutljivo FID zaščito samo 6mA=:



Glede na smiselne zahteve časa polnjenja je potrebna priključna moč okoli 10kW oziroma tok 3x16A na omrežju 230V~. Vtikanje oziroma iztikanje vtikača pri polni obremenitvi 3x16A pomeni hudo iskrenje, hitro obrabo vtikačev in vtičnic ter nevarnost za ljudi. Za preprosto in nenevarno rokovanje s polnilnim kablom sta SAE (ZDA) oziroma IEC (Evropa) predpisala še dva kontrolna signala: Proximity Pilot (PP) in Control Pilot (CP).

Električnega baterijskega avtomobila zato ne moremo polniti na navadno vtičnico, pač pa potrebujemo vmesnik z imenom polnilna postaja. Evropski priključek za polnjenje avtomobilov (tip 2 ali Mennekes) ima zato najmanj 7 pinov: tri faze (L1,2,3 do 3x63A ali 43kW), ničla (N), zaščitna ozemljitev z daljšim pinom (PE) ter signala PP in CP. Dva (80A=) oziroma štirje (140A=) močnostni pini oziroma dodaten par debelih pinov (200A=) se lahko uporabijo tudi za hitro enosmerno polnjenje:



Vtikač/vtičnica tip 2 oziroma Mennekes ima posebne pine in puše za tok 3x63A. Hkrati so vzmeti v pušah tako mehke, da je vtikanje in iztikanje bistveno lažje kot za večjo industrijsko vtičnico 3x32A. Nadalje je predvideno samodejno zaklepanje vtikača v vtičnico, da nepooblaščno razdiranje spoja (odklapljanje) ni možno.

Kljub vtičnici Mennekes danes večina vozil ne zmore polnjenja 3x63A, pač pa je omejena na 3x32A ali celo samo 3x16A. Vozila sicer vsebujejo tri enofazne polnilce, kar omogoča polnjenje na eno fazo, dve fazi ali tri faze. Povezava ničle (N) je zato nujna v vseh primerih: enofazno, dvofazno ali trifazno polnjenje!

V Evropi se prodajajo tudi vozila, načrtovana za ameriško tržišče, ki kljub vtičnici tipa 2 oziroma Mennekes vsebujejo samo enofazni polnilce 1x32A. Takšno vozilo takoj prepoznamo po temu, da v vtičnici manjkata kontakta L2 in L3. Enofazno polnjenje s 7.4kW oziroma samo 3.7kW (polnilna postaja omejena na 16A) je za praktično uporabo prepočasno!

Končno so hitre enosmerne polnilne postaje zaenkrat še zelo redke. Visoka moč ne pomeni samo hude zahteve za elektroenergetsko omrežje in dražjo enosmerno polnilno postajo, pač pa predvsem

skrajšuje življenjsko dobo drage akumulatorske baterije v vozilu. Zaradi nezanimanja potrošnikov proizvajalci avtomobilov ponujajo hitri polnilec kot dodatno plačljivo opcijo.

Signal Proximity Pilot (PP) je opremljen s tanjšim pinom od močnostnih vodnikov. Signal PP sporoča avtomobilu in polnilni postaji, kolikšen tok prenese kabel. Vsak vtikač oziroma vtičnica je opremljen z neodvisnim uporom za analogno kodiranje zmogljivosti kabla do ozemljitve PE (dva ločena upora na vsakem koncu kabla):

Upor do ozemljitve	Zmogljivost kabla
1.5k Ω	13A
680 Ω	20A
220 Ω	32A
100 Ω	63A (70A enofazno)

IEC standard predpisuje vtikač in vtičnico različnih spolov na obeh koncih kabla. Zaporedna vezava dveh ali več kablov ni dovoljena, ker analogni signal PP tedaj ne deluje. Mennekes vtikač na kablu na strani polnilnice ima v ta namen nameščene pine nekoliko globlje, da se ne spajajo v puše vtičnice na strani avta. Napako IEC so na Kitajskem popravili tako, da na obeh koncih kabla predpisujejo vtikač istega spola.

Nekatere polnilne postaje (Tesla) imajo fiksno priključen lasten polnilni kabel. V teoriji bi bila to prednost samo enega spoja vtičnic za velike tokove namesto dveh. V praksi se je to pri nas izkazalo za polomijo: prosto viseča vtičnica na koncu kabla se zamaže, v njej žuželke naredijo gnezdo.

Takšne zapacane vtičnice ne moremo več pravilno vtakniti v avto. Povrhu z njo zapacamo še vtikač na našem avtu. Pred vtikanjem neznanega kabla v avto zato obvezno preverimo stanje vtičnice, saj lahko zapacani kontakti zanetijo požar!

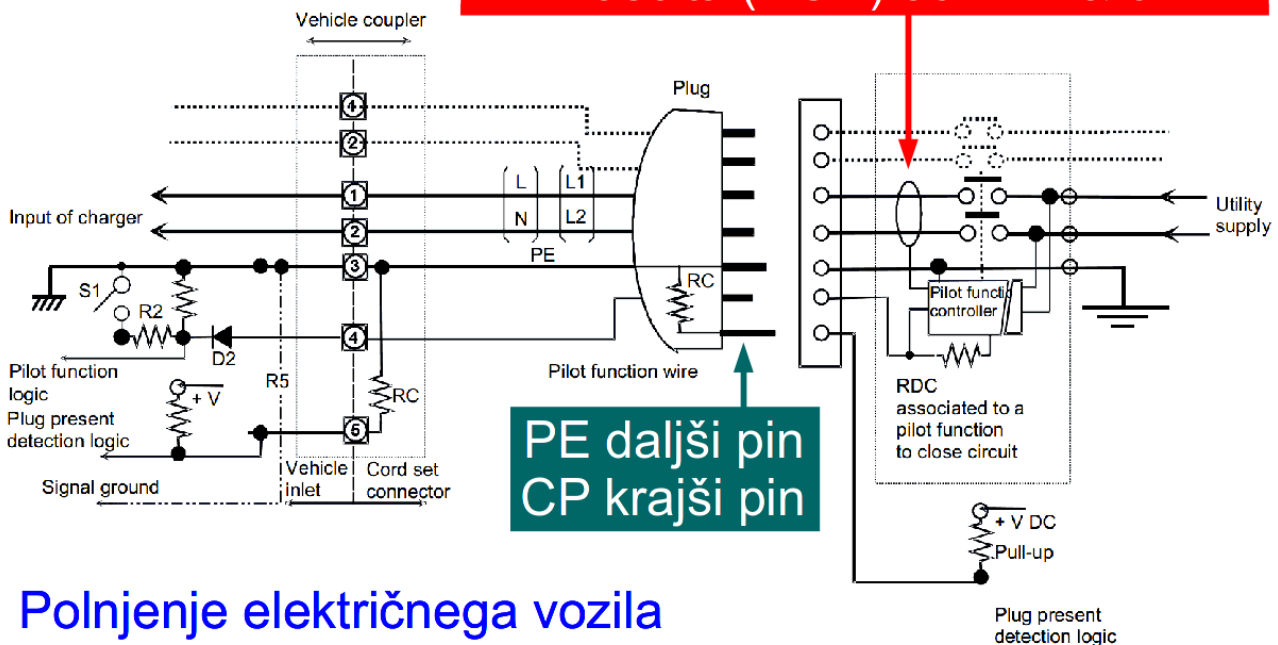
Vklop, izklop in samodejno nastavljanje toka polnjenja ureja signal Control Pilot (CP). Brez signala CP so vse tri faze L1,2,3 izključene.

Signal CP je namenoma opremljen s tanjšim in krajšim pinom.

Pri sklapljanju vtičnic se CP sklene zadnji, ko so močnostni vodniki že povezani. Pri razklapljanju vtičnic se CP razklene prvi, ko so vsi močnostni vodniki še vedno povezani. Na ta način naj bi bilo onemogočeno, da bi v vtičnicah prišlo do prekinjanja velikih tokov, nevarnega iskrenja in tokovnih lokov:

EN 61851

FID zaščita (RCD) 30mA~ & 6mA=



Polnjenje električnega vozila

Komunikacija Control Pilot je pravokoten električni signal z virom v polnilni postaji. Vir z notranjo upornostjo 1kΩ preklaplja med -12V in +12V s frekvenco 1kHz. Vozilo (analogno) sporoči svojo prisotnost in zmožnosti z obremenitvijo pozitivnih signalov vira (dioda D2) in izbranim uporom:

Obremenitev	U_{+VRH}	
Odprte sponke ($\infty\Omega$)	+12V	Vozilo odsotno
2.74kΩ	+9V	Vozilo prisotno
$1.3k\Omega \parallel 2.74k\Omega$	+6V	Polnjenje dovoljeno
$270\Omega \parallel 2.74k\Omega$	+3V	Polnjenje z zračenjem
Kratek stik (0Ω)	0V	Napaka

Pri tem večina polnilnih postaj ne dovoli polnjenja, ki zahteva dodatno zračenje za hlajenje baterije. Polnilna postaja sporoči vozilu največji dovoljeni tok polnjenja s pulzno-širinsko modulacijo 1kHz (Duty Cycle):

Duty Cycle 1kHz	Zahteva polnilne postaje
0%(stalni -12V)...3%	Polnjenje ni dovoljeno
3%...7%	Digitalna komunikacija
7%...8%	Polnjenje ni dovoljeno
8%...97%	Analogno tok zvezno 6A...80A
97%...100%(stalni +12V)	Polnjenje ni dovoljeno

Vozilo sme obremeniti polnilno postajo od nič vse do največjega dovoljenega toka. Vozilo lahko tudi prekine in ponovno požene polnjenje, na primer zaradi potreb hlajenja akumulatorske baterije.

Analogna komunikacija je lahko zelo hitra. Dovoljeni tok polnjenja se s časom lahko spreminja, na primer glede na razpoložljivo električno moč male sončne elektrarne.

Analogna komunikacija je lahko nenatančna. Proizvajalci vozil zato nastavljajo nižji tok od največjega dovoljenega. Pri dovoljenem toku pod 10A se nekatera vozila sploh ne polnijo več.

Digitalna komunikacija je lahko natančnejša, ampak počasnejša. Digitalna komunikacija omogoča medsebojno vojno proizvajalcev vozil in polnilnih postaj na plečih potrošnikov. Na primer, novejših vozil Renault ne moremo več polniti na polnilnicah Tesla.

Končno, številnim standardom navkljub marsikaj ostaja nejasno. V kakšnem zaporedju priklopiti kable? Za izpad elektro-energetskega omrežja nista kriva niti baterijski avtomobil niti polnilna postaja. Kaj storiti, ko se omrežje vrne? Prekiniti polnjenje ali nadaljevati s polnjenjem?

5. Izkušnje z električnim avtomobilom

Z električnim baterijskim avtomobilom sem se najprej spoznal poleti 2017. V oglasih sem prebral, da domet baterijskega avtomobila že dosega mojo vsakdanjo zahtevo, pot iz Nove Gorice na delo v Ljubljano in zvečer nazaj domov s smiselno rezervo. Gnala me je predvsem radovednost preizkusiti nekaj novega. Poleti 2017 je bilo nekaj praktično uporabnih izdelkov (ne igrač) različnih proizvajalcev že dosegljivih za konkurenčno ceno.

V okoljevarstvena gibanja nisem nikoli verjel. Njihovi ukrepi pogosto povzročijo v naravi večjo škodo, kot bi se zgodila brez ukrepov. Sedanja gonja proti CO₂ in globalnemu segrevanju ne zdrži presoje srednješolske fizike niti kemije niti biologije.

Poleti 2017 sem najprej preizkusil in nato kupil vozilo Renault Zoe, ki je bilo tedaj na razpolago z akumulatorsko baterijo zmogljivosti 41kWh. V štirih letih sem z njim napravil 110000km (kljub pogostemu delu od doma zaradi koronavirusa) v vseh vremenskih razmerah po najrazličnejših cestah in se marsikaj naučil.

Domet električnega vozila je močno odvisen od načina uporabe. Za Renault Zoe in številna podobna vozila drugih proizvajalcev gre od 200km pozimi po avtocesti do 400km poleti po navadni počasni ovinkasti cesti. Pri tem je gostejši hladen zrak pozimi kriv samo za 10% zmanjšanje dometa, kar velja tudi za bencinarje in dizle. Cenena vozila imajo samo preprosto zračno hlajenje baterije, kar dodatno zmanjšuje domet pozimi.

Daleč najvplivnejši faktor pri dometu avta je hitrost vožnje. Hitrost se komaj pozna pri bencinarju, ker izkoristek bencinskega motorja zelo upade v neugodnih razmerah: manjša ali večja moč od nazivne. Hitrost vožnje se bolj občuti pri porabi učinkovitejšega dizla. Končno izkoristek elektromotorja in akumulatorske baterije vedno upada z večanjem moči.

Električni avto je držal obljubo, da ne ropota in ne smrdi, kar je meni oboje zelo moteče. Smrdi kvečjemu termoelektrarna, v bližnji

bodočnosti bo treba zanjo najti nadomestilo. Če ista fosilna goriva pokurimo v termoelektrarni, ima slednja še vedno dvakraten izkoristek malega motorja z notranjim izgorevanjem in boljše filtre v dimniku.

Mestna vožnja z električnim avtom je povsem drugačna. Takojšnji odziv in odlična navorna krivulja elektromotorja pomenita, da je električni avto že prevozil križišče, preden se smrdljivci sploh premaknejo. Kljub temu se v štirih letih še nisem odvadil, da pri približevanju križišču ne bi zagrabil ročice, ki je pri električnem avtu samo še stikalo za vzvratno vožnjo.

Vsi električni avti zavirajo elektromagnetno tako, da elektromotor deluje kot generator in polni baterijo. Na ta način električni avto reciklira približno 10% energije pri vožnji po ravnem. Še več po klancu navzdol. Električne lokomotive to počnejo že celo stoletje tako, da energijo zaviranja vračajo v omrežje.

Električni avti so sicer opremljeni tudi z mehanskimi zavorami zaradi varnosti oziroma takrat, ko je zahtevana zavorna moč višja od moči generatorja oziroma zmožnosti polnjenja baterije. Ker se mehanske zavore malo uporabljajo, je obraba zavornih ploščic zanemarljiva. Ni se treba bati pregrevanja zavor pri vožnji po klancu navzdol!

Električni baterijski avto je povsem nepričakovano prav prijetno presenetil pri vožnji v zahtevnih razmerah, po spolzki, tudi zaledeneli cesti. Odlične vozne lastnosti omogočata dva razloga. Prvi razlog je nizko težišče sredi avta, ki ima pravilno nameščeno težko baterijo. Drugi razlog je dovršena navorna krivulja krmilne elektronike elektromotorja, da pogonska kolesa ne zdrsnejo niti z letnimi gumami na ledu.

Renault Zoe sodi v razred cenениh električnih baterijskih vozil. Litijeva baterija ima samo zračno hlajenje, da je domet vozila pozimi v hladnem vremenu občutno manjši. Litijeva baterija je opremljena samo s preprostim uravnoteževalcem, ki deluje samo pri polnjenju. Vozilo moramo vsakih nekaj polnjenj vsaj enkrat napolniti do 100%. da vozilo ne javlja napake. Končno Renault Zoe ne omogoča

nastavitve toka polnjenja, pač pa vse prepušča polnilni postaji.

Začetno navdušenje nad električnim avtomobilom se konča, ko si moramo urediti polnjenje baterije. V vsakem primeru je treba napeljati do avta znatno električno moč po debelem kablu. Javna polnilnica je daleč, na delovnem mestu nimamo možnosti polnjenja, doma moramo poskrbeti sami. Končno nam grenijo življenje pomanjkljivi standardi o polnjenju baterijskih vozil, ki si jih vsak proizvajalec razlaga po svoje.

Električni baterijski avtomobil proizvajalec običajno dostavi s preprosto prenosljivo polnilno postajo (polnilnim kablom) za enofazno „šuko“ vtičnico. Slednja omejuje tok polnjenja na 10A, vključno z varnostnim faktorjem za analogno komunikacijo Control Pilot znižano na samo 8A. V teh razmerah potrebuje vozilo več kot 24 ur, da na polni baterijo, kar je za vsakodnevno vožnjo na delo in nazaj domov neuporabno.

Dostavljeni polnilni kabel običajno vsebuje predpisane FID zaščite in zna zaznati napako v vezavi „šuko“ vtičnice oziroma prekinjen ozemljitveni vodnik. Polnilec znotraj avtomobila sicer lahko obudimo k življenju s preprostim izvorom pravokotnika 1kHz z NE555 brez vsake predpisane zaščite. Ker je električni baterijski avtomobil za večino še vedno novost, dobimo na tržišču prav vse možne izdelke: od kakovostnih polnilnih postaj do cenene kitajske ploščice brez vsake zaščite, ampak z Bluetooth povezavo.

Baterijski električni avtomobil potrebuje hlajenje baterije med polnjenjem, zato polnjenje v garaži ni smiselno. Moj avto večinoma polnim na dvorišču pred hišo, kjer se v luži igrajo otroci. Polnilne postaje brez predpisanih zaščit zato ne bi tvegali. Pri polnilni postaji lahko izbiramo med fiksno vgrajeno in prenosljivo polnilno postajo.

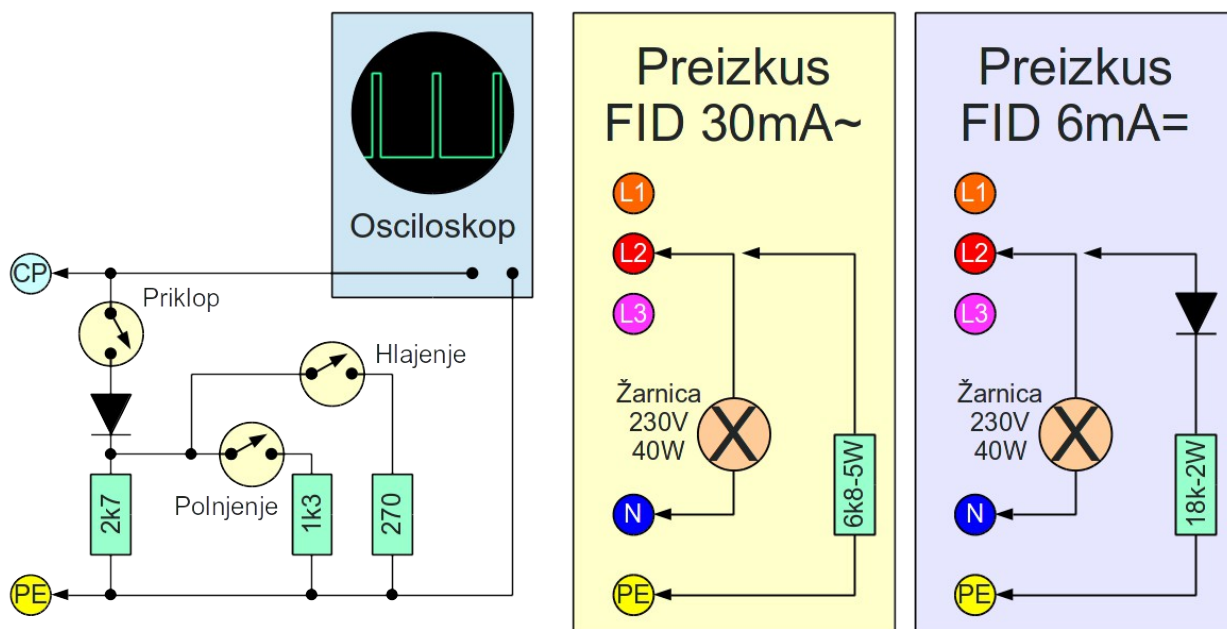
Med številnimi izdelki na tržišču se je težko odločiti. Ker so bile polnilne postaje leta 2017 še redke, sem se odločil za prenosljivo polnilno postajo (polnilni kabel) „Juice Booster 2“. Slednji omogoča polnjenje baterijskega avtomobila s priključkom Mennekes iz najrazličnejših enofaznih in trifaznih vtičnic. Priključka za enofazno „šuko in trifazno industrijsko 3x32A prideta s kablom. Številne druge

dodatne priključke lahko dostavi proizvajalec na željo kupca.

Prenosljiva polnilna postaja „Juice Booster 2“ omogoča nastavitve toka polnjenja od 6A vse do gornje meje, kar prenese vhodni adapter, od 1x10A vse do 3x32A. Iste nastavitve gola programska oprema Renault Zoe iz meni nerazumljivih razlogov ne omogoča. Z nižanjem toka polnjenja omejujemo konice porabe v omrežju, predvsem pa s počasnejšim polnjenjem podaljšujemo življenjsko dobo akumulatorske baterije električnega avtomobila.

Končno zna prenosljiva polnilna postaja „Juice Booster 2“ prepoznati napačno povezano vtičnico, prekinjen vodnik oziroma drugačno napako v električnem omrežju, ki bi lahko ogrozila uporabnika oziroma poškodovala polnilec baterije v vozilu.

Brez tožnika ni sodnika! Kakršnokoli polnilno postajo ali polnilni kabel nabavimo, moramo delovanje FID in drugih zaščit tudi preveriti. Za preizkus potrebujemo vezje, ki simulira polnilec avtomobila kot tudi napako (podobno tipki na stikalu FID). Osciloskop je sicer koristen, ni pa nujno potreben:



Preizkusna vezja za polnilni kabel ali polnilno postajo

Prenosljiva polnilna postaja „Juice Booster 2“ jo je pri mojem preizkusu odnesla brez napak: vse predpisane zaščite so delovale.

Pri marsikateri drugi polnilni postaji ni delovala FID zaščita za enosmerni tok 6mA=. Pri nekaterih (javnih) polnilnih postajah ni delovala celo nobena FID zaščita!

Proizvajalec Renault ocenjuje življenjsko dobo akumulatorske baterije vozila Zoe na prevoženih 150000km, ko naj bi zmogljivost baterije upadla na 2/3 začetne vrednosti. Pri mojem vozilu Zoe nisem po prevoženih 110000km opazil še nobenega upada zmogljivosti baterije. Edina razlaga, kar sem zasledil na spletu, Renault naj bi v Zoe vgrajeval baterijo za 46kWh, od katerih uporabniku dovoli izkoriščanje samo 41kWh.

Pri moji bateriji sem pazil, da je večinoma nisem praznil pod 30% zmogljivosti in zelo redko pod 20% zmogljivosti. Baterije tudi nisem po nepotrebnem polnil. Baterijo sem doma vedno polnil z „Juice Booster 2“ z minimalnim potrebnim tokom glede na predvideno uporabo avtomobila. Žal programska oprema vozila Zoe ne omogoča prijaznejšega polnjenja baterije na javnih polnilnicah.

6. Uvajanje novotarij

Kot zaključek se mi zdi smiselna primerjava z drugimi vejami tehnike, kjer smo bili priča podobnemu razvoju izdelkov. Razvoj avtomobila se mi zdi silno podoben razvoju televizorja. Avtomobil je skoraj celo dvajseto stoletje preživel z batnim motorjem z notranjim izgorevanjem, ki je nadomestil parni stroj. Televizor je preživel skoraj celo dvajseto stoletje z zaslonom s katodno cevjo, ki je nadomestila Nipkovo ploščo.

Izdelava barvne katodne cevi je veljala za tehnični čudež steklopihaštva. Izdelava malega in učinkovitega dizelskega motorja je veljala za čudež mehanike. Oba, barvni televizor in dizelski avtomobil sta zahtevala ogromno dragega vzdrževanja in popravil. Življenjska doba katodne cevi in dizelskega motorja je omejena.

Televizor je manjši in cenejši izdelek od avtomobila, zato so se pri televizorju najprej uveljavile novotarije, približno dve desetletji pred avtomobilom. Mobilni telefon je prvi zahteval izredno zanesljivo ampak široko-potrošno in ceneno elektroniko, ki si ne more privoščiti napak niti popravil.

Televizorji z zaslonom na tekoče kristale (LCD) se ne kvarijo. Nekoč živahna dejavnost RTV servisov je danes povsem izginila. Baterijski električni avtomobil podobno vsebuje zelo malo delov, ki bi se obrabili in bi jih lahko popravljali. Celoten servis električnega avtomobila lahko naredimo pri vulkanizerju. Klasični avtomehanik je obsojen na izumrtje kot RTV servis.

Novotarije največkrat prinesejo izboljšano uporabniško izkušnjo. Ko se je pojavila televizija s 625 vrsticami na katodni cevi, ni Nipkovich 48 vrstic več hotel gledati nihče. Podobno iz tisočev vrstic sodobnih LCD televizorjev noče danes gledati 625 vrstic katodne cevi več nihče.

Parni stroj je zahteval strojevodjo, kurjača in uro priprave. Kaj ni lažje obrniti ključ v dizlu, da motor čez par sekund vžge? Kaj pa če elektromotorja sploh ni treba vžigati, pač pa deluje takoj s polno

močjo pri vseh hitrostih, brez menjalnika, brez sklopke in predvsem brez obremenjevanja voznika z nepotrebni opravili, ki odvrtaajo njegovo pozornost od dogajanja v prometu?

Končno razvoj industrije podpirajo tudi oblasti. Nipkovo televizijo so med obema svetovni vojna ugasnili s prihodom katodne cevi. Analogno televizijo so v začetku 21. stoletja čez noč ugasnili. Z uvedbo digitalne televizije je odšla v muzej tudi katodna cev.

Parni cestni tovornjaki (lokomobile) so bili pomembno prevozno sredstvo v prvi svetovni vojni. Še pred drugo svetovno vojno so parna cestna vozila prepovedali. Življenjski prostor se krči tudi motorju z notranjim izgorevanjem. V marsikatero mestno središče ne sme več. Ustrezno gorivo je danes povsod visoko obdavčeno, da je vožnja z njim dvakrat dražja od električnega baterijskega avtomobila.

Industrija lahko deluje in živi samo tako, da prodaja nove in nove izdelke. Eden od teh novih izdelkov je tudi električni baterijski avtomobil. Poleg izdelovalcev avtomobilov imata pri tem ključno vlogo še energetika in zavarovalništvo.

Energetiki so se nadejali „vehicle-to-grid“ oziroma izkoriščanja avtomobilskih akumulatorjev za pridobivanje dragocene vršne moči v električnem omrežju. Sedanja (2021) vrednost avtomobilske akumulatorske baterije je najmanj petkrat višja od vrednosti električne energije, ki se v celotni življenjski dobi baterije pretoči skozi njo. Energija iz baterij je torej zelo draga. Sedanji baterijski električni avtomobili večinoma ne podpirajo „vehicle-to-grid“.

Vozilo na fosilno gorivo pelje v svojem tanku le majhno količino goriva neznatne vrednosti v primerjavi z vozilom, saj gorivo kupuje sproti na bencinskih črpalkah. Obratno baterijsko vozilo vedno pelje s sabo drago baterijo v vrednosti tretjine do polovice električnega vozila. Dragaa baterija pomeni veliko dodatno postavko v zavarovani vrednosti električnega vozila oziroma nov izziv za zavarovalništvo.