

BARIJERE RAZVOJU I TEHNOLOŠKI NAPREDAK U INDUSTRIJI ELEKTRIČNIH VOZILA / BARRIERS TO DEVELOPMENT AND TECHNOLOGICAL PROGRESS IN THE ELECTRIC VEHICLE INDUSTRY

Arbi Krišto

¹IUT, Fakultet politehničkih nauka Travnik, Aleja Konzula – Meljanac bb, 72270 Travnik, BiH
e-mail: arbikristo@gmail.com

Pregledni članak

<https://www.doi.org/10.58952/zr20251401374>

Sažetak UDK / UDC 621.3:62:681.5

Sažetak

Električna vozila (EV) su sve prisutnija u svakodnevnom prometu kao zelena alternativa. Kako ova vozila postaju popularnija tako se pojavljuju značajniji problemi koji sprječavaju električna vozila da postanu standardna vrsta prijevoza. Glavni problemi s kojim se suočava industrija EV su ograničena infrastruktura za punjenje, znatno kraći domet i dulje vrijeme punjenjem u odnosu na vozila na fosilna goriva. Postoje razni planovi koji bi trebali riješiti probleme s EV. Solid-state, litij-sumporne i natrij-ionske baterije imaju potencijal za produženje doseg i ubrzanje punjenja EV-a, dok brojni dodatni brzi punjači i njihova poboljšanja rješavaju problem višesatnog punjenja. Osim ovih napredaka, najnoviji podatci vezani za statičko i dinamičko bežično punjenje (WPT) pokazuju pozitivne rezultate. Idući značajni napredak o kojem se intenzivno raspravlja su izmjenjive baterije i stanice za zamjenu baterije. Vozila koja podržavaju ovu tehnologiju na stanicama za zamjenu baterija, svoju praznu bateriju zamjene punom. Ovaj metoda „punjenja“ trenutno se već koristi u većem dijelu Azije. Završni pristup koji ćemo analizirati za poboljšanje EV-a jest integracija umjetne inteligencije u stanice za punjenje. Punionice s AI tehnologijom donose revoluciju u punjenju električnih vozila omogućujući vozilima da se autonomno povežu sa stanicama za punjenje i obave punjenje u cijelosti bez ljudske intervencije.

Ključne riječi: Električna vozila, baterije, stanice za punjenje, tehnološki napredak.
JEL klasifikacija: O36

Abstract

Electric vehicles (EVs) are increasingly present in everyday traffic as a green alternative. As these vehicles become more popular, significant problems emerge that prevent electric vehicles from becoming the standard mode of transportation. The main problems faced by the EV industry are limited charging infrastructure, significantly shorter range and longer charging times than fossil fuel vehicles. There are various plans that should solve EV problems. Solid-state, lithium-sulfur and sodium-ion batteries show promise in increasing the range and speeding up charging of EVs, while the numerous additional fast chargers and improvement of those solves the problem of multi-hour charging. In addition to these improvements, the latest data on static and dynamic wireless charging (WPT) shows positive results. Another significant development that is being intensively discussed is removable batteries and battery swapping stations. Vehicles that support this technology at battery swapping stations replace their empty battery with a full one. This method of “charging” is currently already used in most of Asia. The last way we can improve EVs is to introduce artificial intelligence to charging stations. Charging stations with AI technology are revolutionizing electric vehicle charging by enabling vehicles to autonomously connect to charging stations and complete the charging process entirely without human intervention.

Keywords: Electric vehicles, batteries, charging stations, technological advances.

JEL classification: O36

UVOD

Električni automobili ubrzano mijenjaju globalni transportni krajolik, nudeći čistu i održiviju alternativu tradicionalnim vozilima na fosilni pogon. Za razliku od konvencionalnih automobila koji se oslanjaju na motore s unutarnjim izgaranjem, električne automobile pokreće električni motor koji koristi energiju pohranjenu u punjivim baterijama. Električni automobili imaju kompliciran razvoj od samih početaka. Od velike popularnosti do potpunog zaborava, električni automobili su ponovno uspjeli pronaći svoje mjesto u svijetu prijevoza. Ova temeljna promjena u tehnologiji pogona ima značajne implikacije na okoliš, javno zdravstvo i gospodarstvo. Zahvaljujući ubrzanom razvoju baterijske tehnologije, širenju mreže za punjenje i sve većoj integraciji obnovljivih izvora energije, električna vozila postaju sve dostupnija i praktičnija za svakodnevnu uporabu. U odnosu na prije samo nekoliko godina, ostvaren je značajan napredak u području električne mobilnosti i prateće infrastrukture, ali ipak, unatoč vidljivom napretku ti izazovi i dalje postoje i sprečavaju širu dominaciju električnih vozila na tržištu. Slabe baterije, dugo punjenje i ograničena dostupnost punionica koče napredak električnih vozila. Pošto su problemi električnih vozila popularna tema postoje brojni istraživači koji istražuju načine na koje bi električna vozila postala učinkovitija, pristupačnija i ekološki prihvatljivija tijekom njihovog cijelog životnog ciklusa (od rudarenja sirovina do recikliranja na kraju životnog vijeka). Nove vrste baterija, unaprijeđenje punjenja i punionica i novi načini punjenja električnih vozila daju nadu da će se konačno pronaći rješenja problemima koji su usporavali napredak ove vrste vozila od samih početaka. Neke su ideje već uspješno zaživjele i pronašle primjenu u pojedinim dijelovima svijeta. Ovaj članak istražuje znanost koja stoji iza električnih automobila, njihove prednosti i izazove te inovacije koje oblikuju budućnost održivog prijevoza.

1. POČETCI ELEKTRIČNIH AUTOMOBILA

Korijeni električnih vozila (EV) protežu se daleko u prošlost, iznenađujuće dublje nego što mnogi pretpostavljaju. Ova vozila već su proživjela uspone i padove prije nego što su stekla današnji status. Putovanje električnih vozila zapravo je započelo krajem 18. stoljeća. Začetak električnih vozila povezuje se s mađarskim fizičarom Ányosa Jedlika kojemu se pripisuje stvaranje jednog od najranijih funkcionalnih elektromotora 1828. godine. Nekoliko izumitelja diljem Europe i Sjedinjenim Država eksperimentiralo je s električnim pogonom, ali među prvim poznatim električnim prijevoznim sredstvima bilo je djelo škotskog izumitelja Robert Anderson 1830-ih godina. Njegov dizajn koristio je nepunjive baterije, što je ograničavalo njegovu praktičnost. Otprilike u isto vrijeme, američki izumitelj Thomas Davenport također je konstruirao kompaktno električno vozilo koje se pokretalo istosmjernim (DC) motorom. Idući ključni razvoja u povijesti električnih vozila bio je izum punjive olovno-kiselinske baterije francuskog fizičara Gastona Plantéa 1859. godine. Plantéova baterija bila je značajan proboj jer je omogućila pohranu i ponovnu upotrebu električne energije, čineći električni pogon održivijim za prijevoz. Prvo zabilježeno vozilo koje je koristilo punjive baterije izradio je Gustave Trouvé 1881. godine. Modificirao je tricikl s električnim motorom i punjivom baterijom. [17] Krajem 19. stoljeća dogodio se značajan napredak u razvoju električnih vozila, posebno u Europi i Sjedinjenim Državama. Godine 1884. britanski izumitelj Thomas Parker izgradio je električni automobil koristeći punjive baterije velikog kapaciteta, a 1891. u Sjedinjenim Državama William Morrison, kemičar iz Lowe, također je konstruirao električno vozilo, ali njegov električni automobil bio je veći, mogao je prevesti šest putnika i postići brzinu do 22 kilometra na sat. To je privuklo pozornost javnosti i pokazalo potencijal električnog pogona za prijevoz automobilima. Rana električna vozila bila su omiljena zbog jednostavnosti korištenja, tihog rada i nedostatka emisija u usporedbi s vozilima na fosilni pogon. [17]

Unatoč ranom uspjehu, električna vozila suočila su se sa sve većom konkurencijom automobila na fosilni pogon. Ograničen domet baterije, uvođenje električnog startera i masovna proizvodnja Henryja Forda bili su najveći čimbenici koju su doveli do postupnog nestanka električnih vozila. Pošto je do 1920-ih i 1930-ih infrastruktura benzinskih stanica za automobile na fosilni pogon, bila široko rasprostranjena to je dodatno pridonijelo padu električnih automobila, a do sredine 20. stoljeća električna vozila gotovo su u potpunosti nestala s tržišta. [17]

Iako su električna vozila veći dio 20. stoljeća pala u zaborav, njihov rani razvoj postavio je temelje za ponovni povratak u 21. stoljeću. Iste prednosti koje su rane električne automobile učinile privlačnima, poput učinkovitosti, tihog rada i ekološke održivosti, ponovno su potaknula prihvaćanje modernih električnih vozila. S napretkom u tehnologiji baterija i rastućom zabrinutošću zbog klimatskih promjena, električna vozila sada doživljavaju renesansu, označavajući povratak viziji koju su rani izumitelji zamislili prije više od stoljeća.

2.NAJVEĆI PROBLEM ELEKTRIČNIH AUTOMOBILA – BATERIJE

Iako postoje mnoge očite prednosti vožnje električnih automobila, poput nižih operativnih troškova, državnih poticaja, tihe i glatke vožnje te praktičnog punjenja kod kuće, postoje i neki nedostaci zbog kojih ih ljudi odbijaju kupiti i koristiti. Trenutno najveći nedostaci su ograničen domet s jednim punjenjem u usporedbi s automobilima na fosilni pogon, ograničena infrastruktura za punjenje i dugo vrijeme punjenja. Zanimljivo je primijetiti da problemi koji su u prošlosti uzrokovali nepopularnost električnih automobila i dalje su prisutni i još uvijek jedan od glavnih razloga koji obeshrabruju ljude od kupnje električnih vozila.

2.1.TRENTNI DOMET S JEDNIM PUNJENJEM

Dobro je poznata činjenica da električni automobili imaju manji domet na jedno punjenje u usporedbi s automobilima na fosilna goriva. Taj je problem uzrokovao pojavu novog termina vezanog uz električna vozila - "range anxiety". Mnoga električna vozila imaju domet od približno 320-480 kilometara s jednim punjenjem, dok benzinska vozila često prelaze 650 kilometara s punim spremnikom. Infrastruktura za punjenje električnih vozila brzo je rasla posljednjih godina, ali mnogi potencijalni kupci i dalje imaju sumnje u domet električnih automobila. Zapravo, 25% potrošača koji namjeravaju kupiti električno vozilo (EV) navelo je kratki dometa jednog punjenja kao primarnu brigu. [10][16]

Iako domet od 480 kilometara ne zvuči nužno loše, treba uzeti u obzir da je to samo teoretski domet. Zapravo, prilikom proučavanja "dometa s jednim punjenjem" treba uzeti u obzir da, iako udaljenost koju električna vozila mogu prijeći ovisi o kapacitetu baterije i učinkovitosti motora, stvarni rezultati mogu varirati ovisno o nekoliko čimbenika poput vremena, uvjeta rada i brzine. Na temperaturama ispod -6,7 °C električna vozila mogu izgubiti oko 12% svog dometa, a taj postotak naraste na 41% ako je uključeno grijanje unutar vozila. Pri vožnji na velikim brzinama, motori električnih vozila okreću se brže i manje učinkovito, što može rezultirati dodatnim gubitkom energije. S pozitivne strane, zahvaljujući regenerativnom kočenju, električna vozila mogu produžiti svoj maksimalni domet tijekom gradske vožnje.

Također kada se električni automobili voze na optimalnim temperaturama od oko 21,5 °C, mogu premašiti svoj teoretski domet. Zaključno, podatke o "dometu s jednim punjenjem" koje je deklarirao proizvođač treba promatrati s oprezom. [15]

Još jedan problem vezan uz bateriju električnog vozila je taj što se s vremenom baterija može degradirati, što dovodi do smanjenog dometa i performansi. Zamjena ovih baterija je inače skupa i obično, bez jamstva, košta od 5000 do 16000 dolara, ovisno o veličini paketa i proizvođaču. Teoretski, ako se kupi novo električno vozilo, vjerojatno se nikada neće morati razmišljati o zamjeni baterije ili čak održavanju baterije, a ako se kupi rabljeno električno vozilo, stanje baterije je u većini slučajeva zadovoljavajuće, no preporučuje se provjeriti izvješće o povijesti vozila prije donošenja konačne odluke. Iako mnogi proizvođači obično nude jamstva kako bi ublažili ovu zabrinutost, postoje mnogi uvjeti i odredbe za jamstva na baterije, a postoje i slučajevi s nesrećama u kojima je došlo do oštećenja baterijskog paketa, što može dovesti do gubitka važećeg jamstva. [15] [24]

2.2.TRENTUTNI PROBLEMI S PUNIONICAMA

Osim ograničenog dometa, jedan od najpoznatijih izazova povezanih s električnim vozilima odnosi se na infrastrukturu za punjenje. Postoji nekoliko problema vezanih za punionice električna vozila, a prvi koji ćemo diskutirati je sporo vrijeme punjenja. Punjenje električnog vozila može trajati znatno dulje od punjenja vozila na fosilni pogon. Čak i s brzim punionicama, električnim vozilima može biti potrebno 30 minuta ili više da se postigne 80% napunjenosti, a vrijeme punjenja uvelike ovisi o veličini baterije i brzini punionice. Tipičnom električnom automobilu (baterija od 60 kWh) potrebno je nešto manje od 8 sati da se napuni od praznog do punog stanja s punionicom od 7 kW. Zbog dugog vremena punjenja većina vozača dopunjuje bateriju umjesto da čekaju da se baterija skroz isprazni. Kao i kod dometa, i u slučaju trajanja punjenja čimbenici okoliša igraju značajnu ulogu. Hladnija temperatura okoline može malo produžiti punjenje posebno kada se koriste brzi punjači, a zbog nižih temperatura također se smanjuje učinkovitost vozila što rezultira manjim brojem prijeđenih kilometara po jednom punjenju.[15]

Ovdje u tablici prikazana je usporedba vremena punjenja od potpuno prazne do potpuno pune baterije, ovisno o različitim brzinama punionica i modelima automobila:

Tablica 1: Usporedba vremena punjenja od potpuno prazne do potpuno pune baterije s različitim modelima električnih automobila i različitim vrstama punjača (Izvor: <https://pod-point.com/guides/driver/how-long-to-charge-an-electric-car>)

Vremena punjenja od potpuno prazne do potpuno pune baterije							
Model	Baterija	(Pouzdan) maksimalni doseg	3.7kW spor punjač	7kW brz punjač	22kW brz punjač	43-50kW jako brz punjač	150kW jako brz punjač
Volkswagen ID.5	82kWh	428,1 km	22 hrs	12 hrs	8 hrs	1 hr	30 mins
Tesla Model S (2022)**	75kWh	388 km	21 hrs	11 hrs	5 hrs	1 hr	30 mins
Mitsubishi Outlander PHEV (2018)	13.8kWh	38,6 km	4 hrs	4 hrs	4 hrs	40 mins	<i>Ne može puniti na ovoj vrsti punjača</i>

Iz tablice se može vidjeti da je na najbržim i brzim punjačima (150 kW i 43-50 kW) potrebno znatno kraće vrijeme za punjenje automobila nego kod standardnog punjenja, ali uz puno veću cijenu. Jeftinija alternativa, kućne punionice, obično imaju snagu od 3,7 kW ili 7 kW i znatno dulje vrijeme punjenja. Također je važno napomenuti da se svi električni automobili mogu puniti na kompatibilnim punionicama s višom maksimalnom brzinom punjenja nego što one mogu podnijeti, no oni će se punit maksimalnom brzinom koju mogu prihvatiti, pružajući fleksibilnost u opcijama punjenja. Vrijeme punjenja je veoma očiti nedostatak jer se motori na fosilni pogon "pune" za samo nekoliko sekundi do punog kapaciteta, ali električnim automobilima treba najmanje 30 minuta da se napune do samo 80%. [21]

Još jedan veliki problem u vezi punionica za električna vozila je ograničena infrastruktura za punjenje. Dostupnost punionica se svakodnevno poboljšava, ali još uvijek zaostaje za uspostavljenom mrežom benzinskih postaja, posebno u ruralnim ili manje razvijenim područjima, što otežava putovanja na velike udaljenosti. Čak i dok državni sustav podržava šire mreže za punjenje, potražnja daleko nadmašuje ponudu. U SAD-u je broj javnih punjača za električna vozila porastao za samo 4,8% početkom 2024., dok je prodaja električnih vozila porasla za više od 50% u istom razdoblju. Globalni omjer električnih vozila i javnih punjača se konstantno pogoršava. U 2023. godini bilo je 10 električnih vozila po javnom punjaču, ali do 2035. godine predviđa se porast na 15 po punjaču. Ovaj trend znači veće gužve na punionicama, duga vremena čekanja na punionicama, posebno u urbanim područjima i duž ruta s velikim prometom, što prisiljava vozače da čekaju u dugim redovima ili planiraju ovisno o dostupnosti punjača. Važno je obratiti pozornost i na održavanje punionica. Još jedan značajan problem je nepouzdanost javnih punionica. Istraživanje iz 2024. godine pokazuje da je više od 25% brzih punjača u SAD-u bilo na neko vrijeme izvan funkcije ili neispravno. Vozači se često susreću s pokvarenim sustavima plaćanja, sporim brzinama punjenja i oštećenim konektorima, što duža i svakodnevna putovanja na posao čine frustrirajućim. [6] [15] [19][20]

Dodatno treba uzeti u obzir da za milijune ljudi koji žive u stanovima i gusto naseljenim gradovima punjenje kod kuće nije opcija. Mnogi se oslanjaju isključivo na javne punjače, kojih je često malo ili su nezgodno smješteni. To značajno otežava vlasništvo nad električnim vozilima za stanovnike urbanih područja. [20]

Zaključno, iako tržište električnih vozila cvjeta, infrastruktura za punjenje ostaje jedna od slabih karika. Nepouzdate stanice, spore brzine punjenja i ograničenja punjenja u gradskim područjima čine vlasništvo nad električnim vozilima izazovnim za mnoge. Bez hitnih ulaganja i poboljšanja održavanja, kriza punjenja električnih vozila bi mogla usporiti potražnju za električnim vozila umjesto da je ubrza.

3.UNAPRJEĐENJE TEHNOLOGIJE ELEKTRIČNIH VOZILA

Unatoč postojećim i jasno vidljivim izazovima električnih vozila, brojni planovi i terenska testiranja aktivno se provode kako bi se pronašla učinkovita rješenja. Predložena rješenja su raznolika i međusobno različita, no svako od njih nudi valjan pristup rješavanju izazova povezanih s električnim vozilima.

3.1.POBOLJŠANJE BATERIJE ELEKTRIČNIH VOZILA I NOVE GENERACIJE BATERIJA

Poboljšanje baterija ključno je za daljnji razvoj električnih vozila. Baterije su trenutno najveći trošak, sigurnosni rizik i najveće ograničenje u pogledu udaljenosti, pa s napretkom u tehnologiji baterija znatno je veća vjerojatnost da će se sve više ljudi odlučiti za kupnju i korištenje električnih vozila.

Suprotno strahu od ograničenog dometa, tzv. “range anxiety“, zahvaljujući poboljšanjima u tehnologiji baterija prosječni domet električnih automobila se više nego udvostručio tijekom posljednjeg desetljeća. Od 2025. godine, električna vozila nude domet vožnje između 250 km i 650 km s jednim punjenjem, što je oko 28% povećanje u odnosu na 2021. godinu kada je prosječno električno vozilo moglo prijeći najviše 350 km s jednim punjenjem, a u donosu na 2017. godinu, kada je domet bio 250 km to predstavlja povećanje od 80%. Značajan napredak ostvaren je u tehnologiji baterija, posebno kod tradicionalnih litij-ionskih sustava, gdje se ističe primjena katoda visoke gustoće energije te silicijskih anoda. Prema istraživanjima, katode visoke gustoće energije, poput slojevitih oksidnih (oxide) materijala, mogu značajno povećati energetske kapacitete baterija, što ih čini idealnim za primjenu u električnim vozilima i prijenosnim uređajima. Silicijske anode, sa svojim visokim teorijskim kapacitetom, također se predstavljaju kao obećavajuće rješenje za ograničenja konvencionalnih grafitnih anoda. Međutim, postoje izazovi povezani s ekspanzijom volumena silicija tijekom ciklusa i njegovom nestabilnošću. [4][18]

Još jedno poboljšanje u vezi s baterijama je nedavni razvoj kemijskog sastava „new age“ baterija. Istraživači istražuju nove kompozitne materijale, uključujući natrijeve ionske i napredne litij-sumporne spojeve, koji su pokazali potencijal za povećanje kapaciteta pohrane energije do 50% uz smanjenje težine. Najnoviji razvoj ovih solid-state baterija naglašava njihov potencijal da revolucioniraju pohranu energije u raznim sektorima, a značajan napredak koji se ističe je poboljšanje gustoće energije. Ove baterije u čvrstom stanju koriste krute elektrolite umjesto tekućih (koji se nalaze u tradicionalnim litij-ionskim baterijama) i stoga smanjuju rizik od požara i poboljšavaju toplinsku stabilnost. Osim poboljšane sigurnosti postoje i druge značajne prednosti poput povećane gustoće energije, bržeg punjenja i produljenog vijeka trajanja. Nove baterije pokazuju jako dugi radni vijek. Sposobne su izdržati između 8000 i 10 000 ciklusa punjenja, što je znatno povećanje u usporedbi s 1500 do 2000 ciklusa tipičnih za litij-ionske baterije. Sve navedene prednosti čine solid-state baterije posebno pogodnima za primjenu u električnim vozilima. [22]

3.2.UBRZANJE PROCESA PUNJENJA I TEHNOLOŠKI NAPREDAK INFRASTRUKTURE PUNIONICA

Tijekom 2024. godine, uz velik napredak u baterijskoj tehnologiji, ostvareni su i značajni pomaci u poboljšanju punionica i ubrzavanju procesa punjenja električnih vozila.

Kako bi se ubrzalo vrijeme punjenja, unaprijeđeni su brojni sastavni dijelovi, uključujući izmjene u dizajnu i optimizaciju infrastrukture za punjenje, integraciju brzih punjača u postojeće elektroenergetske mreže te druga poboljšanja vezana uz visoko naponsko punjenje. Nadalje, veća važnost dana je standardizaciji tehnologije brzog punjenja kako bi se osigurala kompatibilnost između različitih modela električnih vozila i mreža za punjenje. Ulažu se napor u razvoj univerzalnih standarda punjenja, a vlada također ima ulogu u provedbi politika za poticanje usvajanja infrastrukture za brzo punjenje. [25]

Kako bi se poboljšala mreža za punjenje i učinila što učinkovitijom, prikupljaju se podaci za modeliranje optimalne mreže za punjenje. Primjerice, u metropolitanskom području Dallas–Fort Worth analiziraju se podaci o prometu i punionicama u stvarnom vremenu kako bi se utvrdila prostorna raspodjela potražnje za punjenjem te predložile optimalne lokacije za postavljanje punionica. Ključni aspekt analize je utjecaj zauzetosti stanica za punjenje na ukupno vrijeme putovanja, s naglaskom na kompromis između brzine punjenja i učinkovitosti cestovne mreže. Otkriveno je da davanje prioriteta fazama punjenja konstantnom strujom (takozvanom CC fazom, koja napuni bateriju do oko 60-80%) značajno smanjuje vrijeme zauzetosti stanica, čime se skraćuju redovi čekanja i poboljšava korisničko iskustvo. Međutim, u uvjetima velikog prometa, produžene sesije punjenja (s CC i CV fazom) mogu, u nekim slučajevima, biti poželjnije kako bi se izbjegla kašnjenja uzrokovana preopterećenim stanicama. [23][25]

Veliku važnost treba dati adaptivnom planiranju infrastrukture koje integrira ograničenja električne mreže, modeliranje ponašanja korisnika i podatke o prometu u stvarnom vremenu radi olakšavanja prelaska na električna vozila i smanjenja opterećenja na infrastrukturi za punjenje. Rješavajući distribuciju energije i dinamiku mobilnosti, modul bi pružao robusan okvir za strateško postavljanje javnih mreža za punjenje električnih vozila u urbanim i međugradskim okruženjima. [12] [14]

Sljedeće istraživanje usmjereno je na sisteme statičkog i dinamičkog bežičnog prijenosa energije (WPT) i komunikacijske infrastrukture bitne za učinkovit rad tih sustava u električnim vozilima. Postoje dvije vrste WPT sustava, dinamički bežični prijenos energije (DWPT) i statički bežični prijenos energije (SWPT). Riječ je o dvjema naprednim metodama prijenosa električne energije bez potrebe za izravnim fizičkim kontaktom. DWPT omogućuje prijenos energije dok su vozila ili uređaji u pokretu, poboljšavajući učinkovitost i smanjujući vrijeme provedeno na punjenju. S druge strane, SWPT osigurava energiju stacionarnim vozilima ili uređajima, poput trenutnih stanica za punjenje. Obje metode koriste elektromagnetska polja, pri čemu DWPT obično zahtijeva sofisticiraniju tehnologiju za rukovanje prijenosom energije tijekom kretanja. Takve tehnologije od presudne su važnosti za napredak održivog prijevoza i sustava obnovljive energije. [12] [14]

Sveobuhvatnom procjenom trenutnih izazova i tehnološkog napretka mogu se pronaći vrijedni uvidi u razvoj inteligentnih i funkcionalnih sustava za punjenje električnih vozila koji će moći usmjeriti buduća istraživanja i napore industrijske standardizacije.

3.3. INTEGRACIJA UMJETNE INTELIGENCIJE U PROCES PUNJENJA I PAMETNA PARKIRALIŠTA

Sljedeća ideja koju ćemo analizirati su automatizirani sustavi punjenja kojima upravlja umjetna inteligencija. Automatizirani sustavi punjenja pokretani umjetnom inteligencijom revolucioniraju punjenje električnih vozila omogućujući vozilima autonomno povezivanje s punionicama bez ljudske intervencije. Ovi sustavi koriste naprednu robotiku i umjetnu inteligenciju za pojednostavljenje procesa punjenja, povećavajući praktičnost i učinkovitost za vlasnike električnih vozila.

Jedan od popularnih prijedloga je inovativni robotski sustav punjenja koji oponaša ljudsko haptičko ponašanje kako bi automatizirao operacije spajanja i odspajanja s punjača električnih vozila čime se poboljšava dostupnost i učinkovitost punjenja. Kako bi skupili potrebne podatke za dizajn robotskog sustava, istraživači su proveli eksperimente u kojima su sudjelovali ljudi koji su obavljali zadatke vezane za punjenje električnih vozila. Tijekom tih sesija, senzori za sile i momente (FT) bilježili su sile i momente koje su primjenjivali sudionici, dok su sustavi za snimanje pokreta pratili pokrete punjača. Koristeći podatke dobivene od ispitanika, tim je u laboratoriju dizajnirao tri kontrolera impedancije kako bi replicirali uočene haptičke obrasce. Kontroleri moduliraju dinamiku robotske ruke podešavanjem parametara inercije (M_d), prigušenja (D_d) i krutosti (K_d). Kalibracija ovih parametara koja se temeljila na snimljenim ljudskim interakcijama, rezultirala je optimalnim skupom vrijednosti inercije (M_d): 0,5 kg, prigušenja (D_d): 25 Ns/m, krutosti (K_d): 300 N/m. Ove postavke omogućuju robotskom sustavu da dinamički prilagodi svoje pokrete, prilagođavajući se manjim neusklađenostima i osiguravajući glatko spajanje i odspajanje punjača s utora električnog vozila. Nakon što su podaci prikupljeni i simulirani u laboratoriju, validirani kontroleri impedancije implementirani su na robotsku ruku UR10 opremljenu uređajem za punjenje. Sustav je uspješno izvodio automatizirane operacije punjenja, kompenzirajući pozicijske netočnosti do ± 5 mm i kutne neusklađenosti do ± 10 stupnjeva. Predloženi model nudi robusnu i pristupačnu metodu za automatizaciju punjenja električnih vozila, a važno je napomenuti i potencijalnu korist za širok raspon korisnika, uključujući i one s fizičkim ograničenjima. Integrirane robotske ruke već su primijenjene u tvrtkama poput Spirea u Seattleu, gdje robotske ruke autonomno pune električna vozila. [1] [13]

Osim robotske ruke (koju trenutno razvijaju Rocsys i Flexiv), postoje i neke druge ideje koje koriste umjetnu inteligenciju za poboljšanje punjenja električnih vozila. Na primjer, Hyundai Motor Group predstavio je autonomne robote za parkiranja sposobne za prijevoz vozila do određenih parkirnih mjesta i olakšavanje procesa punjenja. Ovi robotski parkirni sustavi integriraju stanice za punjenje električnih vozila unutar svojih automatiziranih parkirnih objekata, omogućujući automatsko smještanje i punjenje vozila dok su parkirana. [5] [11]

Napredci u automatiziranim sustavima punjenja i parkiranja potpomognuta umjetnom inteligencijom, otvaraju put prema jednostavnom, ugodnom i učinkovitom korisničkom iskustvu za vlasnike električnih vozila, doprinoseći široj primjeni električnih vozila i razvoju infrastrukture pametnih gradova.

3.4. IZMJENJIVE BATERIJE U ELEKTRIČNIM VOZILIMA

Jedna od ideja koja zasad ima ograničenu međunarodnu primjenu, ali je vrlo popularna u Aziji, jest zamjena baterija. Ideja iza ove metode je da se na stanicama za zamjenu tj. punionicama, ne čeka na punjenje baterije električnog vozila, već se jednostavno trenutna prazna baterija zamjeni s već napunjenom. To znači vrlo brzu zamjenu kada je baterija slaba ili prazna, što rezultira procesom koji traje nekoliko sekundi.

Ova ideja je prvi put uvedena za električne skutere i već je široko zastupljena u Aziji. Nekoliko kineskih proizvođača električnih skutera koristi jako razvijenu mrežu zamjene baterija, omogućujući vozačima brzu zamjenu istrošenih baterija potpuno napunjenima, čime se smanjuju zastoji i poboljšava gradska mobilnost. Stanice za zamjenu baterija električnih skutera u velikim su razmjerima prvi put implementirane od strane tvrtke Gogoro, tajvanskog poduzeća osnovanog 2011. godine. Gogoro je predstavio svoj sustav zamjene baterija 2015. godine, uvodeći Smartscooter uz mrežu GoStation kioska gdje su vozači mogli mijenjati baterije. [3]

Iako su stanice za zamjenu baterija električnih vozila prvi put implementirane početkom 2012. od strane danske tvrtke Better Place, ideja nije zaživjela. Ponovno uvođenje ove tehnologije u Shenzhen 20. svibnja 2018. godine označilo je početak njezinog velikog uspjeha. U Kini je koncept dobio značajan zamah s kompanijom NIO-om. NIO je proširio svoju mrežu na 1000 stanica, a do 14. prosinca 2024. izgradio je 2785 stanica za zamjenu baterija samo u Kini, od kojih se 909 nalazi na autocestama. Do prosinca 2023. NIO je osigurao približno 61,7 milijuna zamjena baterija, što naglašava široko rasprostranjeno usvajanje i uspjeh ove tehnologije u regiji. [2][7][8]

Druge zemlje, uključujući Indiju i razne europske nacije, također su počele usvajati rješenja za zamjenu baterija, posebno za dvokotačna vozila, trokotačna vozila i komercijalne flote. Tvrtke poput Gogoro u Tajvanu i Ample u Sjedinjenim Državama razvijaju modularne sustave zamjene baterija kako bi zadovoljile navedena tržišta. Budući da stanice za zamjenu baterija postaju sve popularnije, istraživači su počeli istraživati tema vezane za stanice za zamjenu. Jedno od istaknutih istraživanja usmjereno je na određivanje najpovoljnijih lokacija za stanice za zamjenu baterija unutar urbanih prometnih mreža, uzimajući u obzir stohastičku potražnju za zamjenom baterija. Istraživači su razvili matematički programski model za optimizaciju postavljanja stanica za zamjenu baterija, s ciljem minimiziranja gubitka potražnje i povećanja učinkovitosti usluge. [9][17]

Uspije li se model zamjene baterija uspješno implementirati na globalnoj razini, to bi moglo značajno smanjiti troškove te povećati popularnost električnih vozila. S prednostima kratkog "vremena punjenja", smanjenja troškova automobila (budući da se baterije iznajmljuju, a ne kupuju) i produljenog vijeka trajanja vozila, ovaj koncept ima potencijal revolucionirati prijevoz, nudeći praktično i učinkovito rješenje za korisnike električnih automobila.

ZAKLJUČAK

Električni automobili predstavljaju značajan korak naprijed u evoluciji prijevoza, nudeći čišću, tišu i energetske učinkovitiju alternativu konvencionalnim vozilima na fosilna goriva. Za razliku od konvencionalnih automobila koji se oslanjaju na motore s unutarnjim izgaranjem, električne automobile pokreću električni motori koji koriste energiju pohranjenu u punjivim baterijama. Ova temeljna promjena u tehnologiji pogona ima značajne implikacije na okoliš, javno zdravlje i gospodarstvo. Iako su ekološke prednosti električnih vozila (EV) znatne, također je važno prepoznati izazove koji prate njihovo široko usvajanje. Električna vozila imala su burnu povijest od samih početaka i problemi koji su spriječili njihov daljnji razvoj u povijesti još su i danas prisutni.

Glavna ograničenja koji predstavljaju problem u daljem razvoju električnih automobila su dosta mali domet s jednim punjenjem (u usporedbi s vozilima na fosilni pogon) i nedostatna infrastruktura punionica. Trenutni domet električnih vozila s jednim punjenjem je prosječno oko 400 km i manje (ovisno u uvjetima), dok vozila na fosilni pogon imaju domet od prosječno 650 km. Osim toga problemi s dostupnosti punionica i dugo vrijeme punjenja još više naglašavaju problem električnih vozila što je uzrokovalo da se pojavi novi pojam vezan za ovu vrstu vozila "range anxiety". Za razliku od benzinskih stanica, punionica ima manje i uz to punjenje traje osjetno duže nego nekoliko minuta koliko je potrebno za napuniti rezervoar vozila na fosilna goriva. Da bi električna vozila postali primarni način prijevoza ovi se problemi trebaju riješiti.

Postoji nekoliko ideja koje su najpopularnije u rješavanju problem baterija i punionica električnih vozila. Nove solid-state baterije obećavaju s povećavanjem kapaciteta za 50%, smanjenjem težine i povećanjem životnog ciklusa. Uz to ove su baterije puno stabilnije i sigurnije od tradicionalnih litij-ionske baterije. Osim u baterijama napredak ima i u električnim punionicama i brzini punjenja. Skupljeni podaci i predloženi modeli poboljšati će prostornu distribuciju potražnje za punjenjem i predložiti optimalan smještaj punionica. Uz optimizaciju lokacija punionica radi se na novom statičkom i dinamičkom sustavi bežičnog prijenosa energije (WPT) koji bi znatno olakšao proces punjenja električnih vozila. Još jedna inovacija koja će olakšati punjenje je uvođenje AI i robota u sustav punionica. Zahvaljujući ovim prijedlozima vezanim uz infrastrukturu za punjenje, sam proces punjenja trebao bi postati znatno brži i jednostavniji, uz minimalnu potrebu za planiranjem. Time bi se umanjila zabrinutost potencijalnih kupaca i dodatno potaknula potražnja za električnim vozilima. Zadnji prijedlog poboljšanja je ideja koja se već implementirala u nekim dijelovima Azije i pokazuje jako obećavajuće rezultate. Umjesto spajanja auta na punjače i višesatnog čekanja, postoji brza alternativa, zamjena prazne baterije za punu. Ova ideja prvotno je započela s električnim motorima i doživjela veliki uspjeh, a prvi rezultati ove tehnologije implementirane kod automobila također pokazuju zadovoljavajuće ishode. Ako se metoda zamjene umjesto punjenja uspije proširiti i na ostatak svijeta, uspjela bi se riješiti većina, a možda i svi problemi koji usporavaju razvoj električnih vozila.

Zaključno, električni automobili su nužan odgovor na ekološke i energetske izazove 21. stoljeća. Nastavkom ulaganja u istraživanje i infrastrukturu, mogu se prevladati trenutna ograničenja i otključati puni potencijal električnih vozila. Put pred električnim vozilima ima prepreke, ali uz predanost i suradnju među znanstvenicima, inženjerima, kreatorima politike i potrošačima, električni automobili mogu nas odvesti prema održivijoj budućnosti u prijevozu.

LITERATURA

1. Alyounes at al., (2023), TeslaCharge: Smart Robotic Charger Driven by Impedance Control and Human Haptic Patterns, 21st IEEE International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2023)
2. Blum B., (2013), Better Place: what went wrong for the electric car startup?, The Guardian , <https://www.theguardian.com/environment/2013/mar/05/better-place-wrong-electric-car-startup>
3. Dauids A., (2015), The Electric Scooter Scheme That Could Finally Make Battery-Swapping Work, Wired, <https://www.wired.com/2015/01/gogoro-battery-swapping/>
4. Feyzi at al., (2024), „A comprehensive review of silicon anodes for high-energy lithium-ion batteries: Challenges, latest developments, and perspectives“, *Next Energy*, Vol. 5, br. 8
5. Haggerty H., (2018), Robotic Parking Systems Provides Essential Infrastructure for EVs, Robotic Parking System Inc., <https://roboticparking.com/robotic-parking-systems-provides-essential-infrastructure-for-evs/>
6. Hawkins A. J., (2025), Trump administration halts \$5 billion EV charging program that benefited Tesla, The verge, <https://www.theverge.com/news/608316/nevi-funding-halt-ev-charging-trump-tesla>
7. Ho L., (2024), Nio battery swap services surpasses 60 million swaps, CarNewsChina, <https://carnewschina.com/2024/12/14/nio-battery-swap-services-surpasses-60-million-swaps/>
8. Kang L., (2025), Nio reaches 3,000 swap stations in China, Cnevpost, <https://cnevpost.com/2025/01/03/nio-3000-swap-stations-china/>
9. Liu at al., (2024), Battery swapping station location for electric vehicles: a simulation optimization approach
10. Mc Gowran L., (2024), Global demand for EVs slows as consumer concerns remain over charging infrastructure, EY, https://www.ey.com/en_ie/newsroom/2024/09/global-demand-for-evs-slows-as-consumer-concerns-remain-over-charging-infrastructure-ey-global-mobility-consumer-index
11. Merno M., (2024), Hyundai Motor Group showcases autonomous park & charge robots, Teslarati, <https://www.teslarati.com/hyundai-motor-group-electric-vehicle-park-charge-robots/>
12. Reddy at al., (2016), "Dynamic wireless power transfer systems for electric vehicles: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 56, str. 1370-1384
13. Schlosser K., (2024), Automated parking garage in Seattle condo tower gets even more robotic with EV charging bays, GeekWire, <https://www.geekwire.com/2024/automated-parking-garage-in-seattle-condo-tower-gets-even-more-robotic-with-ev-charging-bays/>
14. Shahrjerdi at al., (2018), "Static wireless power transfer systems: A review," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 65, br. 12, str. 9778-9786
15. Tallodij, (2022) Seven disadvantages of electric cars, Carwow, <https://www.carwow.co.uk/guides/choosing/disadvantages-of-electric-cars>
16. Threewitt C., (2024), Pros and Cons of Electric Cars, U.S.News, <https://cars.usnews.com/cars-trucks/advice/pros-and-cons-electric-cars>
17. (2025), Battery Swapping Analysis Report 2025: Market to Grow by Over \$20 Billion at a CAGR of 31.5% - Global Forecast to 2035 with Nio, Gogoro, Ample, Sun Mobility,

Contemporary Ampere Dominating, <https://www.globenewswire.com/news-release/2025/03/31/3052454/0/en/Battery-Swapping-Analysis-Report-2025-Market-to-Grow-by-Over-20-Billion-at-a-CAGR-of-31-5-Global-Forecast-to-2035-with-Nio-Gogoro-Ample-Sun-Mobility-Contemporary-Ampere-Dominating.html>

18. (2024), Electric Vehicle, U.S. department of energy, <https://afdc.energy.gov/vehicles/electric>
19. (2024), Electric Vehicle Charging Infrastructure Trends, U.S. department of energy, <https://afdc.energy.gov/fuels/electricity-infrastructure-trends>
20. (2024), Global EV Outlook 2024, IEA, <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/outlook-for-electric-vehicle-charging-infrastructure>
21. (2024), How Long Does It Take to Charge an Electric Car?, PodPoint, <https://podpoint.com/guides/driver/how-long-to-charge-an-electric-car>
22. (2024), Solid-state battery technology: 2024 energy storage advancements , Monolith, <https://www.monolithai.com/blog/solid-state-batteries-energy-storage>
23. Choi S. J., Jiao J., Mendez T., (2024), „Who owns Electric Vehicles (EVs)? The relationship between EV adoption and socio-demographic characteristics across different price segments and brands in the Texas triangle“, *Research in Transportation Business & Management*, Vol. 57
24. Witt J., (2024), Electric Car Battery Replacement Costs, Recurrent, <https://www.recurrentauto.com/research/costs-ev-battery-replacement>
25. Zentani A.T., Almaktoof A. M. A., Kahn M., (2024), A Comprehensive Review of Electric Vehicles Fast Charging Developments and Technology, *Applied Sciences*, Vol 14., br. 11