

Damir Raljević, univ.spec.el.
HEP Nastavno obrazovni centar
damir.raljevic@hep.hr

Željko Maravić, el.teh.
HEP Nastavno obrazovni centar
zeljko.maravic@hep.hr

SERVISIRANJE I ODRŽAVANJE BATERIJSKIH SUSTAVA POD NAPONOM KOD HIBRIDNIH I ELEKTRIČNIH VOZILA (HEV/EV)

SAŽETAK

Rad obrađuje postupke servisiranja i održavanja baterijskih sustava pod naponom u hibridnim i električnim vozilima (HEV/EV). Baterijski sustavi u ovim vozilima koriste napone do 1500 V DC, što zahtijeva specifične sigurnosne mjere pri radu s aktivnim dijelovima pod naponom. S obzirom na nemogućnost potpunog isključivanja napona tijekom rada, tehničari moraju koristiti osobnu zaštitnu opremu (OZO), uključujući izolacijske rukavice, kacige s viziorom, zaštitna odijela i izolacijske cipele, kako bi se smanjili rizici. Oprema je izrađena prema standardima HRN EN 60903 i HRN EN 61482-1-2. Osim OZO, radno mjesto opremljeno je dodatnim izolacijskim pregradama i pokrivačima za izolaciju neaktivnih dijelova sustava. Dijagnostika stanja baterije provodi se putem BMS-a (sustava upravljanja baterijom). U radu se također razmatraju postupci obnove i reciklaže baterija po završetku njihovog životnog vijeka, kao i novi tehnološki trendovi koji unapređuju sigurnost i učinkovitost rada pod naponom. Rad naglašava važnost pridržavanja propisa i uputa.

Ključne riječi: baterijski sustavi, hibridna i električna vozila, rad pod naponom, osobna zaštitna oprema, dijagnostika, BMS, sigurnosni standardi, održavanje, reciklaža baterija

SERVICING AND MAINTENANCE OF LIVE BATTERY SYSTEMS IN HYBRID AND ELECTRIC VEHICLES (HEV/EV)

SUMMARY

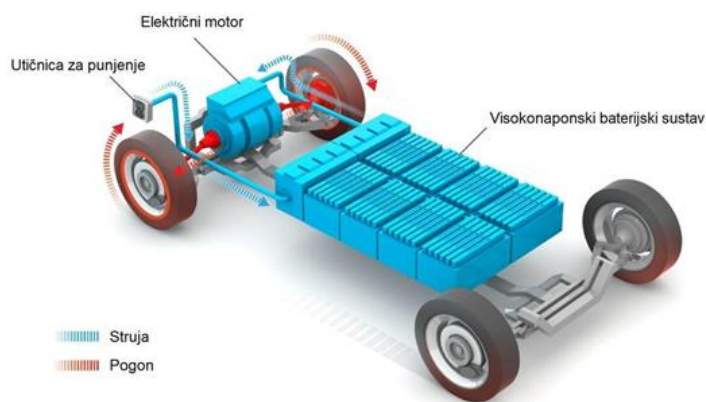
The paper deals with the procedures for servicing and maintaining live battery systems in hybrid and electric vehicles (HEV/EV). Battery systems in these vehicles use voltages of up to 1500 V DC, which requires specific safety measures when working with live parts. Given the impossibility of completely disconnecting the voltage during work, technicians must use personal protective equipment (PPE), including insulating gloves, helmets with visors, protective suits and insulating shoes, to reduce risks. The equipment is manufactured according to standards such as HRN EN 60903 and HRN EN 61482-1-2. In addition to PPE, the workplace is equipped with additional insulating partitions and covers to isolate inactive parts of the system. Battery health diagnostics are carried out via a BMS (battery management system). The paper also discusses battery reconditioning and recycling procedures at the end of their service life, as well as new technological trends that improve the safety and efficiency of live work. The paper emphasizes the importance of adhering to standards.

Key words: battery systems, hybrid and electric vehicles, live work, personal protective equipment, diagnostics, BMS, safety standards, maintenance, battery recycling

1. Uvod

Električno vozilo - EV (engl. Electric Vehicle) je pojam koji obuhvaća svako vozilo (automobil, motocikl, romobil...) koji koristi električnu energiju za pogon. S obzirom da se u njih ugrađuju baterijski sustavi daleko viših napona od 60 V DC, pojavljuju se nove opasnosti u odnosu na postojeće 12/24 V DC sustave. Proizvođači električnih vozila najčešće se odlučuju za dva tipa baterijskih sustava: litij-ionske te nikal-metal hibridne.

Električna vozila koriste isključivo visokonaponski baterijski sustav kao izvor električne energije - BEV (engl. Battery Electric Vehicle) i elektromotore za pokretanje (Slika 1.), koja za razliku od vozila s motorima s unutarnjim izgaranjem - ICE (engl. Internal Combustion Engine), ne stvaraju ispušne plinove prilikom vožnje. S obzirom na visoku iskoristivost elektromotora u odnosu na konvencionalne ICE motore te bolje performanse, pogotovo prilikom kretanja, te mogućnošću da prilikom kočenja rade kao generatori i vraćaju generiranu električnu energiju natrag u sustav (tzv. regenerativno kočenje), izuzetno su pogodni za gradsku vožnju.



Slika 1. Princip rada električnog vozila [1]

Neki primjeri BEV automobila: Volkswagen e-Golf, Tesla Model 3, BMW i3, Chevy Bolt, Chevy Spark, Nissan LEAF, Ford Focus Electric, Hyundai Ioniq, Karma Revera, Kia Soul, Mitsubishi i-MiEV, Tesla X, Toyota Rav4, Rimac Nevera.

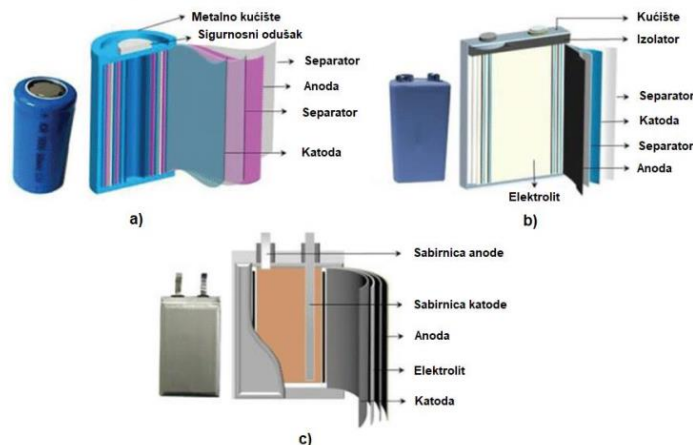
2. Baterijski sustavi visokog napona

U automobilske industriji najučestaliji tipovi članaka (ćelija) koji se koriste za izradu visokonaponskih baterija su litij-ionske ćelije (3,6 V, 90 – 190 Wh/kg) [4].

Cilindrične ćelije (Slika 2-a.) su jeftinije za proizvodnju, imaju dobru mehaničku stabilnost i visoku gustoću energije. Međutim, zbog cilindričnog oblika zauzimaju više prostora, ne nabubre tijekom rada, ali s obzirom na metodu izrade presavijanjem metala kućišta postoji mogućnost curenja elektrolita kroz izolator između plusa i minusa baterije pod povećanim pritiskom.

Prizmatične baterije (Slika 2-b.) su mehanički robusne s visokom učinkovitošću pakiranja, međutim, obično imaju nešto manju gustoću energije i skuplje su. U slučaju nakupljanja tlaka, generirani plinovi se oslobađaju kroz sigurnosni otvor. Kada je sigurnosni otvor premalen ili kada je začepljen, može ometati istjecanje plina, a ta situacija može dovesti do pucanja ili eksplozije ćelije.

Baterije sa mekanim omotačem (Slika 2-c.) imaju veću gustoću energije od ostale dvije izvedbe, njihov trošak proizvodnje nije visok i mnogo su lakše, ali ih je potrebno zaštititi od mehaničkih oštećenja. Sklone su bubrenju tijekom rada (npr. starenje, izloženost temperaturama većim od 60°C) i nemaju određeni mehanizam za odzračivanje, a do ispuštanja plinova dolazi s manjom energijom nego za ostale izvedbe baterija.



Slika 2. Oblici litij-ionskih baterija [2]

Spajanjem ćelija u seriju povećava se ukupni napon na njihovim krajevima. Ovakav sastav označava se sa S (*series* – serija) kao npr. 13S gdje broj 13 podrazumijeva trinaest u seriju spojenih ćelija. Ukupni napon ovisi o tipu korištene baterije, a može se lako izračunati tako da se pomnoži nominalni napon jednog članka sa brojem ispred slova S, u ovom slučaju 13, te za litij-ionske ćelije dobiva se 46,8 V što pak spada pod sustav 48 V. Dodavanjem dodatnih ćelija paralelno postojećim povećava se ukupni kapacitet baterije kao i maksimalna struja pražnjena. Uz prethodnu oznaku S dodaje se i oznaka P (*parallel* – paralelno) kao npr. 13S4P gdje broj 4 podrazumijeva četiri članka baterije spojena paralelno jedan drugome i tako trinaest puta u seriju, što rezultira ukupnim brojem od 52 članka. Postoje neka ograničenja s tehničkog i praktičnog stajališta. Kod hibridnih vozila napon baterija je u rasponu od 50 V – 400 V dok je kod električnih vozila napon oko 800 V ili više. Iz sigurnosnih i praktičnih razloga, ne spajaju se sve ćelije unutar jednog kućišta već se dijele na module nižeg napona, s kojim je sigurnije raditi, koji se potom spajaju izoliranim debelim bakrenim vodovima u serije do željene vrijednosti napona (Slika 3.). Unutar svakog od tih modula postoji ugrađen sigurnosni element - BMS (engl. *Battery Management System*) koji prati stanje svake paralele ćelija, a njih pak kontrolira glavni sustav nadzora i distribucije snage. S obzirom da se baterije griju prilikom uporabe, iste je potrebno i hladiti te stoga postoje razni sustavi hlađenja na razini modula. Sklopljene baterije moraju biti sigurne od mehaničkih oštećenja i požara, a pored toga, moraju biti i vodonepropusne. Baterijski sustavi u sebi mogu sadržavati i sustav za distribuciju energije u sklopu kojeg postoji više sigurnosnih elemenata poput osigurača i sklopnika. Sklopnici rade isključivo u kombinaciji s vanjskim 12 V sustavom, a u normalnom beznaponskom stanju oni su isključeni.



Slika 3. Baterijski paket električnog automobila [3]

Prilikom rada na visokonaponskim baterijskim sustavima najbitnije je biti educiran za rad na tom sustavu, jer iako slični, svi sustavi nisu jednake gustoće snage, fizičke veličine kao ni internog rasporeda komponenti (Slika 4.).



Slika 4. Različite izvedbe visokonaponskih baterijskih sustava [4]

Obično se baterijski sustavi nalaze u podvozju automobila i/ili između vozača i suvozača u tzv. tunelu, no u većini hibrida s manjim baterijama one se najčešće nalaze u sklopu prtljažnog prostora odvojene sigurnosnom pregradom. Svaki baterijski sustav na sebi ima zasebni konektor za visoki napon, priključke za hlađenje sustava te jedan do više konektora za komunikaciju i napajanje iz 12 V sistema automobila te druge specifične konektore. Konstrukcijom baterijskog sustava onemogućeno je slučajno izlaganje visokom naponu sustava čak i ako se isti nalazi van vozila.

Sva ožičenja kao i dijelovi komponenti u vozilu u kojima može biti prisutan visoki napon moraju se jasno označiti narančastom bojom (Slika 5.) te moraju biti jasno i vidljivo označeni oznakama (Slika 6.).



Slika 5. Ožičenje visokog napona u vozilu [5]



Slika 6. Primjer oznaka na visokonaponskim komponentama [6]

Vodiči visokog napona koji se ugrađuju u vozila sastoje se od višežilne bakrene jezgre, glavne izolacije, mrežastog oplošja omotanog folijom koji služi kao zaštita od elektromagnetnog zračenja i mehaničkih oštećenja te vanjskog izolacijskog sloja (Slika 7.).



Slika 7. Visokonaponski vodiči za ugradnju u vozila [7]

Proizvođači hibridnih i električnih vozila trebaju osigurati način putem kojeg serviseri prije početka rada ili sigurnosne službe, poput vatrogasaca, u slučaju nezgode mogu na siguran način isključiti visoki napon prema ostatku vozila, odnosno osigurati sigurnosni prekid (eng. service plug, safety disconnect). Kao dio tog sigurnosnog prekida mogu biti i sklopnici koji su ugrađeni u samu bateriju ili PDU (Power Distribution Unit) te se oni mogu uključiti samo vanjskim 12 V sustavom tako da bi trebao postojati i način isključenja napajanja prema visokonaponskoj bateriji (Slika 8-1.). Također, proizvođač može označiti mjesto na kabelu koji se u slučaju nužde može prerezati od strane ovlaštene osobe te na taj način isključiti dovod napajanja (Slika 8-2.).



Slika 8. Mjesta isključenja 12V sustava: 1) konektor 12V baterije, 2) mjesto za prekid u nuždi [8]

3. Opasnosti kod električnih vozila

U industriji električnih vozila, pod visokim naponom podrazumijevaju se svi naponi veći od 30 V izmjenične struje te 60 V istosmjerne struje, a prema Pravilniku o poslovima s posebnim uvjetima rada (NN 5/84) [9], rad sa električnom energijom napona viših od 250 V zahtijeva posebne kriterije prilikom odabira radnika za rad na visokonaponskim baterijskim sustavima.

3.1. Opasnosti litij-ionske baterije

Iako su zbog velikog broja ciklusa pražnjenja i punjenja te visoke energije i gustoće snage litij-ionske baterije izvrsni sustavi za pohranu, podložne su opasnostima koje nastaju kada se baterija koristi izvan njenog sigurnog radnog područja. Ove opasnosti postaju ozbiljnije u većim sustavima baterija te iz

tog razloga sustavi litij-ionskih baterija zahtijevaju učinkovite sustave upravljanja (BMS), kako bi se spriječilo nekontrolirano oslobađanje energije. Iako se sigurnost i pouzdanost litij-ionskih baterija neprestano povećavaju, povećava se i gustoća pohranjene energije te snaga. Sukladno tome, razvijene su litij-ionske baterije za ugradnju u električna vozila te za integraciju u elektroenergetski sustav. Ti su sustavi sa znatno većom snagom i gustoćom energije što može dovesti do većih i ozbiljnijih potencijalnih opasnosti ako stvari krenu po zlu.

Nestručna uporaba ili zlouporaba baterije može dovesti do požara, eksplozije, oslobađanja otrovnih i zapaljivih tvari te opasnosti od strujnog udara, što može dovesti do toplinske nezadrživosti i bubrenja baterije te ispuštanja plinova ili elektrolita. Visoke temperature mogu biti uzrokovane visokim temperaturama okoline, izloženošću izvorima topline ili preopterećenjem baterije. S druge strane, većina litij-ionskih baterija ima ograničene performanse pri niskim temperaturama. Punjenje pri niskim temperaturama može uzrokovati nanošenje litija na anodu što dovodi do nepovratnog gubitka kapaciteta i mogućeg unutarnjeg kratkog spoja. Prodiranje stranih tvari i drugi unutarnji nedostaci baterijskih ćelija mogu uzrokovati unutarnje kratke spojeve koji mogu prouzročiti zagrijavanje.

Mehanička oštećenja baterija mogu uzrokovati unutarnji ili vanjski kratki spoj koji dovodi do odzračivanja sadržaja ćelija, toplinske nezadrživosti ili požara te opasnosti od strujnog udara uslijed električnog luka. Materijal katode litij-ionske baterije je osjetljiv na vrlo niske temperature koje mogu uzrokovati unutarnje kratke spojeve, a previsoke temperature mogu prouzročiti pucanje baterijske ćelije. Zaštitni sloj formiran na vrhu anode - SEI (engl. *Solid Electrolyte Interface*) osjetljiv je na povišene temperature. Uništavanje SEI sloja može dovesti do raspadanja elektrolita te do pucanja baterijske ćelije. Elektrolit je litijeva sol u organskom otapalu koja može proizvesti otrovne i zapaljive plinove kada dođe do ispuštanja.

Svaka ćelija treba imati senzor napona spojen na sustav upravljanja baterijom (BMS) tako da svi naponi ćelija ostanu unutar sigurnih radnih vrijednosti i da sustav može uravnotežiti (izjednačiti) napone ćelija [10].

3.2. Opasnosti električne energije

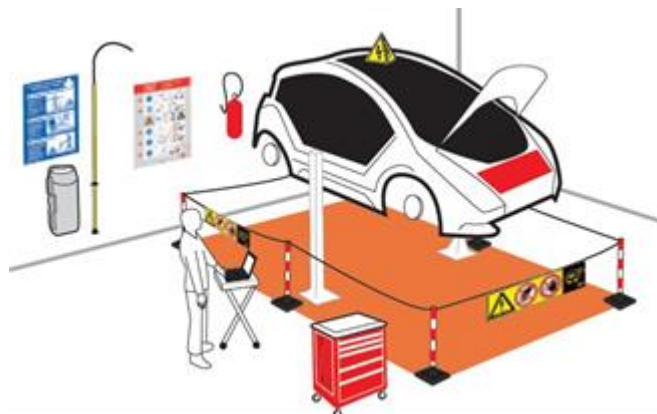
Izvore ovih opasnosti možemo podijeliti u dvije grupe: primarne i sekundarne. Kod primarnih opasnosti, ozljeda je izravno uzrokovana djelovanjem električne energije prolaskom kroz ljudsko tijelo. Sekundarne opasnosti su požari i eksplozije. Problem s litijevim ćelijama je što kad dođe do zapaljenja, sama ćelija stvara toplinu potrebnu za gorenje (sadrži gorivu tvar) te prilikom izgaranja stvara kisik potreban za gorenje. Za sada, za učinkovito gašenje požara na litij-ionskim baterijskim sustavima, jedina opcija je ohladiti baterijski sustav sa što većom količinom vode ili uroniti u slanu vodenu otopinu.

Sva vozila, električna, hibridna i na benzinski pogon, imaju određeni rizik od požara, u slučaju ozbiljne nesreće. U slučaju oštećenja ili požara na električnom vozilu ili hibridno-električnom vozilu uvijek je potrebno pretpostaviti da su visokonaponska baterija i povezane komponente pod naponom i potpuno napunjene. Izložene električne komponente, vodovi i visokonaponska baterija predstavljaju potencijalnu opasnost od visokog napona, a fizičko oštećenje vozila ili visokonaponske baterije može rezultirati trenutnim ili odgođenim otpuštanjem otrovnih i/ili zapaljivih plinova i vatre.

3.3. Zone opasnosti

Prije početka rada na električnom vozilu, nužno je definirati zone rada koje su odvojene fizičkim preprekama i psihološkom ogradom:

- I. zona (zona slobodnog kretanja) - svi prostori koji nisu obuhvaćeni zonama opasnosti u kojima zaposlenik nehotično ne može izazvati ukapčanje ili iskapčanje električne energije visokonaponskog baterijskog sustava te ni tijelom niti alatom doći u blizinu dijelova pod visokim naponom (označena crvenom bojom na vozilu – Slika 9.),



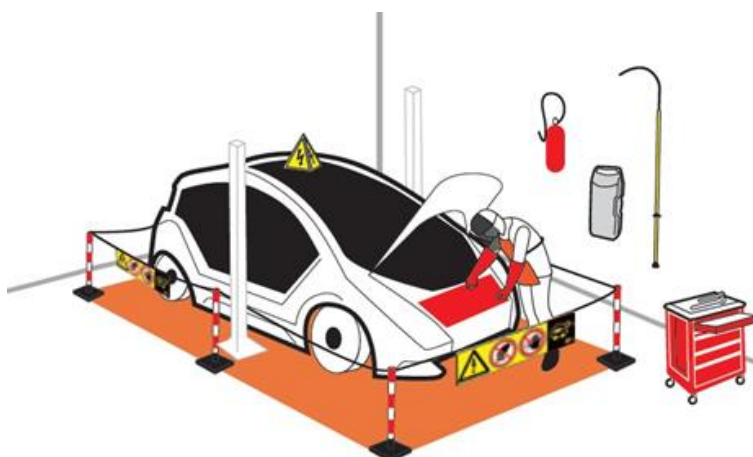
Slika 9. Zona slobodnog kretanja [11]

- II. zona (zona približavanja) - prostor oko vozila ili baterijskog sustava (Slika 10.) koji zahtjeva višu razinu obuke radnika od prijašnje te podrazumijeva korištenje propisne zaštitne opreme i poštivanje radnih procedura,



Slika 10. Zona približavanja [11]

- III. zona (zona rada pod naponom - zona opasnosti) - zona rada na samom baterijskom sustavu ili u blizini dijelova pod naponom (Slika 11.) koja zahtijeva najviši stupanj obuke, izuzetnu stručnost, oprez i korištenje kompletne visokonaponske zaštitne opreme, a ova zona može biti dio vozila kad se rad odvija na vozilu ili može biti izdvojen dio na kojem radnik ima pristup baterijskom sustavu koji je izvađen iz vozila.



Slika 11. Zona opasnosti [11]

4. Razumijevanje rada pod naponom u kontekstu HEV/EV baterijskih sustava

Rad pod naponom, u kontekstu baterijskih sustava HEV i EV vozila, odnosi se na namjerni kontakt s dijelovima pod naponom jer u mnogim slučajevima nije izvedivo potpuno isključivanje napona baterije. Tijekom rada pod naponom, stručne osobe rastavljaju i izoliraju module baterije sve dok napon ne padne na sigurne razine (ispod 50 V DC).

Ovaj proces zahtijeva poštivanje niza sigurnosnih mjera i korištenje specijalizirane opreme, kako bi se zaštitilo stručne osobe i okolina. Rad pod naponom uključuje korištenje OZO i prekrivanje dijelova koji mogu biti opasni ako se dođe s njima u dodir.

U skladu s normama i sigurnosnim zahtjevima, pri radu pod naponom koristi se slijedeća osobna zaštitna oprema:

- izolacijske rukavice klase 0 i 00, prema normi HRN EN 60903 - namijenjene su za zaštitu od električnog udara i prilagođene za rad pod naponom specifičnim za HEV/EV baterijske sustave (Slika 12.),



Slika 12. Izolacijske rukavice [3]

- izolacijska kaciga s viziorom - osigurava zaštitu glave i lica od električnog udara i UV zračenja koje može nastati prilikom kratkog spoja,
- zaštitno radno odijelo (HRN EN 61482-1-2) - izrađeno od materijala otpornih na toplinu i plamen, koji sprječavaju širenje vatre i smanjuju mogućnost ozljeda od električnog luka (Slika 13.),
- zaštitne cipele (HRN EN 50321-1) - osiguravaju izolaciju od tla i sprječavaju prijenos struje kroz tijelo (u nedostatku zaštitne obuće, koristi se izolacijski tepih kao dodatna zaštita).



Slika 13. Rad pod naponom na baterijama [3]

Kako bi se osigurala potpuna sigurnost pri radu pod naponom, koriste se dodatna sredstva za prekrivanje aktivnih dijelova na kojima se ne radi, a koji se nalaze u radnoj zoni. To uključuje izolacijske pokrivače, barijere i izolacijske pregrade, koje onemogućuju nenamjerni kontakt operatera s dijelovima pod naponom te prisutnost samo jednog potencijala na kojem se radi.

5. Postupci servisiranja baterijskih sustava i zaštitne mjere

5.1. Dijagnostički postupci

Prije svakog servisnog zahvata provode se dijagnostičke mjere kako bi se utvrdilo stanje baterijskog sustava:

- provjera napona i termalne analize: voltmetri i termalne kamere koriste se za otkrivanje nepravilnosti, poput vrućih točaka koje mogu signalizirati probleme s modulima,
- analiza pomoću BMS-a - BMS podaci o naponu, temperaturi i kapacitetu pomažu u otkrivanju stanja svakog modula.

5.2. Postupak sigurnog rastavljanja i popravka modula

S obzirom na nemogućnost potpunog isključenja napona, moduli se rastavljaju postupnim smanjenjem napona unutar sigurnih granica koristeći tehnologiju rada pod naponom:

- izoliranje vodljivih dijelova izvan minimalne udaljenosti približavanja,
- postavljanje izolacije u zoni minimalne udaljenosti približavanja (obvezno korištenje izolacijskih rukavica),
- odspajanje pojedinih modula (sekvencijalno isključivanje napona na modulu),
- skidanje izolacije nakon završetka postupka odvajanja modula.

6. Zaključak

Servisiranje i održavanje baterijskih sustava pod naponom u HEV i EV vozilima složen je proces koji zahtijeva poštivanje sigurnosnih standarda i korištenje specifične osobne zaštitne opreme. Slijedom toga, u HEP NOC-u se provodi Program obrazovanja za stjecanje mikrokvalifikacije za servisiranje i održavanje baterijskih sustava pod naponom HEV/EV. Nakon završenog osposobljavanja polaznici obuke moći će samostalno zamijeniti bateriju na električnom/hibridnom vozilu, uz primjenu tehnologije rada pod naponom na siguran način. Daljnji razvoj i sve veći broj električnih vozila zahtijevati će i osposobljene stručne osobe za servisiranje i održavanje baterijskih sustava.

7. Literatura

- [1] "The 4 main kinds of electric cars BMW.com". <https://www.bmw.com/en/innovation/Plug-in-hybrid-and-other-kinds-of-electric-cars.html> (pristupljeno 17.02.2025).
- [2] T. Chen i ostali, „Applications of Lithium-Ion Batteries in Grid-Scale Energy Storage Systems“, Transactions of Tianjin University, sv. 26, velj. 2020, DOI: 10.1007/s12209-020-00236-w.
- [3] Dokumentacija HEP NOC-a
- [4] „BatterySystems Archives“, Rimac Automobili. <https://www.rimacautomobili.com/technology/battery-technology/> (pristupljeno 17.02.2025).
- [5] „High voltage power and battery- HUBER+SUHNER“. <https://www.hubersuhner.com/en/solutions/automotive/applications/on-board-vehicle-wiring/high-voltage-power-and-battery> (pristupljeno 17.02.2025).
- [6] „Fleet Home Page“. <https://www.fleet.ford.com/> (pristupljeno 17.02.2025)
- [7] „Screened Automotive High Voltage Electric Vehicle Cable - 95mm² - EV950 | Coroplast 9-2611“. <https://www.hilltop-products.co.uk/electric-vehicle-cable-ev950.html> (pristupljeno 17.02.2025).
- [8] „Electric Cars, Solar & Clean Energy | Tesla“. <https://www.tesla.com/> (pristupljeno 17.02.2025).
- [9] „Pravilnik o poslovima s posebnim uvjetima rada“, <http://uznr.mrms.hr/propisi/nacionalni-propisi/> (pristupljeno 17.02.2025).
- [10] „Battery standards“, <https://www.batterystandards.info/literature> (pristupljeno 17.02.2025).
- [11] „CATU - Expert de la Prévention du Risque Electrique“. <http://www.catuelec.com/> (pristupljeno 17.02.2025).