



ELEKTROMAGNETNA SEVANJA
ELEKTRIČNA VOZILA IN ZDRAVJE

SLOVARČEK

Električno vozilo: vozilo, ki kot vir energije uporablja električno energijo, shranjeno v akumulatorju. Akumulator se polni s priključitvijo vozila na električno omrežje. V uporabi so tudi električna vozila, ki električno energijo sproti dobivajo iz električnega omrežja – električne lokomotive, tramvaji ...

Hibridno vozilo: vozilo, ki kot vir energije uporablja tekoče gorivo (večinoma bencin ali dizel) in električno energijo, shranjeno v akumulatorju. Akumulator se polni med delovanjem motorja z notranjim izgorevanjem. Pri priključnih hibridnih vozilih se akumulator lahko polni tudi s priključitvijo hibridnega vozila na električno omrežje.

Smernice ICNIRP so dokumenti, ki jih je pripravila Mednarodna komisija za varstvo pred neionizirnimi sevanji (ICNIRP). V njih so podane mejne vrednosti. Mejne vrednosti za nizke in srednje frekvence so določene za električno polje v človeškem telesu. Za izpostavljenosti pod mejnimi vrednostmi ni znanih škodljivih vplivov na zdravje ljudi. Ker je električno polje v telesu težko določiti, smernice ICNIRP določajo tudi mejne vrednosti za električno in magnetno polje v prostoru.

Uredba o elektromagnetnem sevanju v naravnem in življenjskem okolju (UL RS 70/1996) določa dopustne izpostavljenosti elektromagnetnim sevanjem v Sloveniji. Omejuje mejne vrednosti za električno in magnetno polje v prostoru.

Kataložni zapis o publikaciji (CIP) pripravili v Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani
COBISS.SI-ID=36562691
ISBN 978-961-91976-8-4 (pdf)

ELEKTROMAGNETNA SEVANJA – ELEKTRIČNA VOZILA IN ZDRAVJE

Izdajatelj: projekt FORUM EMS

Priprava besedila: dr. Blaž Valič, doc. dr. Peter Gajšek

Recenzija in potrditev: doc. dr. Damijan Škrk

Lektoriranje: skupina Lucas

Oblikovanje: Blaž Valič

Fotografija na naslovnici: [buffaloboy/Shutterstock.com](https://www.shutterstock.com)

Ljubljana, november 2020

ELEKTRIČNA VOZILA SKOZI ČAS

Kljub velikemu razmahu in popularnosti v zadnjem času električna vozila niso nova iznajdba. Že kmalu po prvi parni lokomotivi v začetku 19. stoletja so se pojavile tudi prve električne lokomotive, ki so kot vir energije uporabljale galvanske člene (baterije). Razmah uporabe so električna vozila doživela proti koncu 19. stoletja z razširitvijo električnih tramvajev ter kasneje trolejbusov in vlaka. Tudi na ozemlju današnje Slovenije so v preteklosti delovali električni tramvaji in trolejbusi, in sicer v Ljubljani, Piranu in Šempetru pri Gorici, do koder je bila speljana proga goriškega tramvaja. Do 60. let 20. stoletja so vse električne tramvaje in trolejbusove v Sloveniji ukinili, v uporabi pa so ostali električni vlaki na elektrificiranih progah. Vsa prej omenjena električna vozila kot vir električne energije uporabljajo napajalno omrežje. A tudi električna vozila z lastnim baterijskim oziroma akumulatorskim napajanjem se v Sloveniji uporabljajo že dalj časa. Poleg električnega vlaka, ki v Postojnski jami že od leta 1956 prevažata obiskovalce jame, se že dolgo uporabljajo številni električni viličarji za delo v zaprtih skladiščih, prav tako se že dalj časa uporabljajo električni invalidski vozički.

ELEKTRIČNA VOZILA DANES

Širši razmah uporabe električnih vozil se je začel pred kakšnim desetletjem s pojavom prvih električnih osebnih avtomobilov, z leti pa število in raznolikost električnih vozil narašča. Osnove delovanja vseh električnih vozil so podobna. Vgrajen akumulator skrbi za hranjene električne energije. Poseben elektronski sklop, pretvornik oziroma inverter, krmili električni motor, ki poganja vozilo. Med akumulatorjem in krmilnikom tečejo veliki enosmerni tokovi. Od krmilnika do električnega motorja v večini električnih vozil tečejo izmenični tokovi spremenljive frekvence, s katero se nastavlja moč motorja. Krmilnik skrbi tudi za regeneracijo, ko električni motor med zaviranjem vozila deluje kot generator in s proizvodnjo električne energije zavira vozilo in obenem polni akumulator. Vsako električno vozilo je potrebno napolniti, zato je potreben polnilnik. Pri majhnih električnih vozilih, kot so skiroji, kolesa in rolke, je električni polnilnik manjša zunanja naprava, ki jo priključimo v električno vtičnico in z njo napolnimo akumulator. Moč takšnega napajalnika je majhna in tokovi, ki tečejo, so primerljivi s tokovi napajalnikov za prenosne računalnike. V večjih vozilih, kot so avtomobili, pa so vgrajeni akumulatorji z bistveno večjo kapaciteto in je zato postopek polnjenja bolj kompleksen. Polnilnik, ki je vgrajen v samo vozilo, omogoča različne načine polnjenja, od polnjenja preko klasične

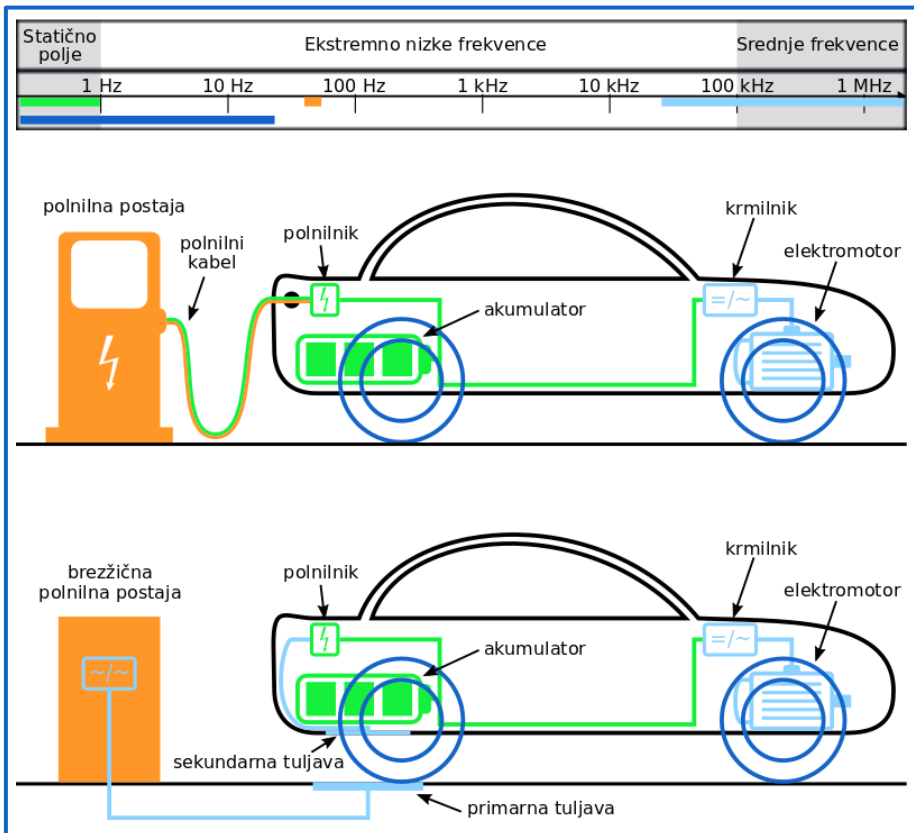
električne vtičnice, kar lahko traja tudi 10 ur in več, do polnjena na hitrih polnilnih postajah, kjer se akumulator napolni v manj kot eni uri. Prav v razvoj novih metod hitrega polnjenja je usmerjenih veliko raziskav, saj se želi čas polnjenja čimbolj skrajšati. Razvijajo pa se tudi različne tehnologije brezžičnega polnjenja, to je polnjena s pomočjo indukcije. Primer tovrstnega polnjenja, ki je že v uporabi, je brezžično polnjenje mobilnega telefona. Možnosti uporabe brezžičnega polnjenja za električna vozila so velike, v tla vgrajene brezžične polnilnice bi lahko med vožnjo sproti dopolnjevale električna vozila (npr. električni avtobus se polni med postankom na postajališču), zato bi lahko bistveno zmanjšali težo in velikost vgrajenih akumulatorjev. Za nekatera manjša električna vozila se brezžično polnjene že uporablja, npr. v industriji za transportne vozičke, za večja vozila pa se sistemi še preizkušajo in testirajo.



Poleg električnih vozil so v uporabi tudi hibridna vozila. Hibridna vozila imajo vgrajen motor z notranjim izgorevanjem, ki služi za pogon vozila in za polnjenje vgrajenega akumulatorskega sklopa. Hibridnih vozil ne moremo polniti iz električnega omrežja tako kot električna vozila, tovrstno polnjenje je mogoče pri priključnih hibridnih vozilih.

ELEKTRIČNA IN MAGNETNA POLJA ELEKTRIČNIH VOZIL

Električna vozila in polnilnice električnih vozil povzročajo enosmerna (statična) ter izmenična električna in magnetna polja (slika 1). Od akumulatorja do krmilnika teče enosmerni tok (zaradi pulznega načina delovanja krmilnika mu je dodana še manjša izmenična komponenta), v njegovi okolici nastane statično magnetno polje. Statično magnetno polje je prisotno tudi v naravi, saj je magnetno polje Zemlje tudi statično. Po drugi strani pa izmenična polja nastajajo zaradi izmeničnih tokov. Izmenična polja spreminjajo svojo smer v rednih intervalih. Električno omrežje deluje pri frekvenci 50 Hz, ki jih prištevamo med nizke frekvence. V električnih vozilih pa se uporabljajo tudi višje frekvence do nekaj 100 kHz, ki jih prištevamo med srednje frekvence.



Slika 1: Prikaz spektra EMS, ki jih povzročajo različni sklopi električnega vozila: zgoraj med klasičnim polnjenjem, spodaj med brezžičnim polnjenjem. Barve prikazujejo, kateri sklopi električnega vozila povzročajo EMS v določenem frekvenčnem območju: statična polja (zelena), polja frekvence do 20 Hz (modra), frekvence 50 Hz (oranžna), in frekvence več kot 20 kHz (svetlo modra).

Električna in magnetna polja nastanejo zaradi električnih nabojev. Električna polja nastanejo tam, kjer so pozitivni in negativni električni naboji neenakomerno porazdeljeni, kar ima za posledico nastanek napetosti v prostoru. Magnetna polja nastanejo zaradi premikanja nabitih delcev, to je električnega toka. Enota za jakost električnega polja je volt na meter [V/m], za gostoto magnetnega pretoka pa tesla [T], ker pa je magnetno polje 1 T izredno veliko, se običajno uporablja manjša enota, mikro tesla [μ T].

Električna in magnetna polja se z oddaljenostjo od vira hitro zmanjšujejo, poleg tega pa še zlasti na širjenje električnega polja v okolico zelo vplivajo tudi materiali v bližini. Električno prevodni materiali statična in nizkofrekvenčna ter srednjefrekvenčna električna polja praktično popolnoma zaustavijo. Ker so tudi napetosti, pri katerih delujejo električna vozila (do nekaj 100 V) razmeroma nizke, so zato izpostavljenosti ljudi električnim poljem v električnih vozilih in njihovi okolici nepomembne. Izpostavljenosti ljudi magnetnim poljem v električnih vozilih in v njihovi bližini pa so pomembne, saj veliki tokovi, ki tečejo po vodnikih v električnem vozilu ali v polnilnih kabljih, povzročajo velika magnetna polja.

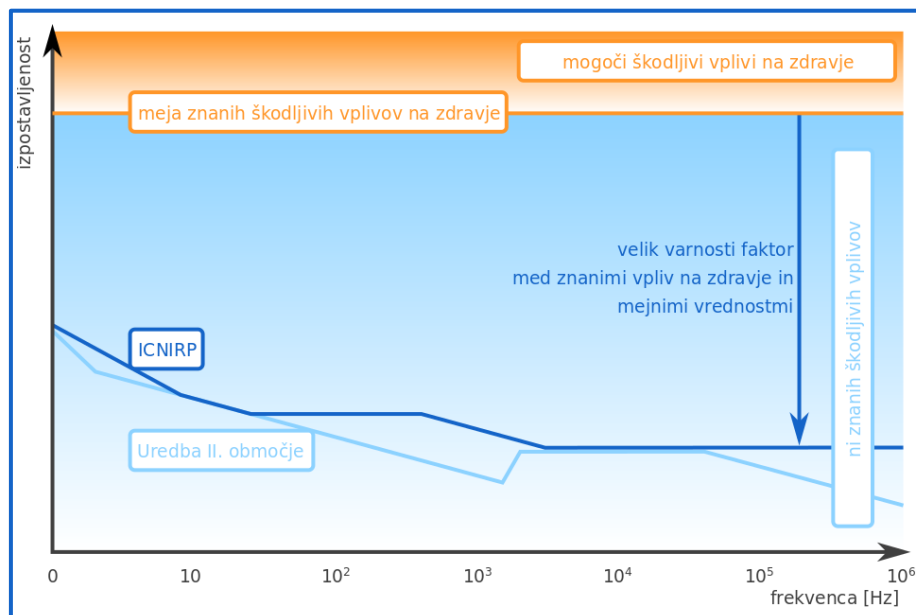
Ne smemo pa pozabiti, da je v sodobnih vozilih, tako električnih kot tistih z motorjem na notranje izgorevanje, nameščenih več sistemov, ki oddajajo tudi visokofrekvenčna elektromagnetna sevanja. Pogosto imajo vozila vgrajene mobilne modeme za komunikacijo z mobilnim omrežjem, vgrajeno imajo Bluetooth in Wi-Fi povezavo, senzorji tlaka v pnevmatikah podatke prenašajo preko visokofrekvenčne povezave, nekateri asistenčni sistemi, kot na primer opozorilnik mrtvega kota, aktivni tempomat, avtomatsko zaznavanje pešcev in kolesarjev, samodejno zaviranje v sili in drugi delujejo s pomočjo radarja in drugih visokofrekvenčnih senzorjev (senzorji za zaznavanje objektov, pešcev in kolesarjev, merilniki oddaljenosti ...). Z nadaljnjim razvojem asistenčnih sistemov in avtonomne vožnje bodo začela vozila komunicirati med seboj in z infrastrukturo, kar bo potekalo po brezžičnih povezavah. Ta brošura ne obravnava izpostavljenosti zaradi asistenčnih sistemov in naprav, namenjenih avtonomni vožnji.

Mejne vrednosti

V neposredni bližini električnih vozil in drugih z njimi povezanih električnih sistemov nastajajo predvsem statična, nizkofrekvenčna in srednjefrekvenčna magnetna polja. Biološki vplivi na človeka pri statičnih poljih se pojavijo šele pri zelo visokih vrednostih. Ljudje ves čas živimo v razmeroma močnem statičnem magnetnem polju zemlje, ki znaša na območju Slovenije približno 40 μ T. Pri izpostavljenosti nizkofrekvenčnim in srednjefrekvenčnim magnetnim poljem se v človeku inducira električna napetost. Če preseže določen prag, lahko inducirana napetost povzroči nezaželene učinke, to je stimulacijo živčnih in mišičnih vlaken. Da bi preprečili neželene učinke, so določene mejne vrednosti. Mejne vrednosti temeljijo na trenutnem stanju stroke na tem področju in upoštevajo vse znanstveno dokazane vplive na ljudi, ki pa so pri nizkih in srednjih frekvencah stimulacija živčnih in mišičnih vlaken. Določene so tako, da za izpostavljenosti, manjše od mejnih vrednosti, ni nobenih znanih škodljivih vplivov na zdravje. Namen mejnih vrednosti je preprečiti, da bi zaradi izpostavljenosti EMS prišlo do kakršnih koli tveganj za zdravje ljudi.

Določanje mejnih vrednosti je proces, ki se zaradi vedno novih spoznanj in raziskav na tem področju redno ponavlja, to pa zagotavlja, da mejne vrednosti vedno temeljijo za najaktualnejših spoznanjih in stanju stroke in upoštevajo vse znane škodljive vplive.

Mejne vrednosti za veličine v človeškem telesu so podane v smernicah Mednarodne komisije za varstvo pred neionizirnimi sevanji (ICNIRP) iz leta 2009 (za statična polja – od 0 Hz do 1 Hz), 2010 (za nizkofrekvenčna polja – do 1 Hz do 100 kHz) ter 2020 (visokofrekvenčna polja – od 100 kHz do 300 GHz) in v priporočilih Evropskega sveta iz leta 1999. Mejne vrednosti so frekvenčno odvisne in so za glavo in trup nižje kot za okončine. Zaradi razlik med ljudmi (starost, velikost, telesni ustroj) so za določanje mejnih vrednosti upoštevali kar 20-kratni varnostni faktor. Zato so mejne vrednosti postavili pri vrednostih, ki so kar 20-krat nižje od praga, pri katerem bi na podlagi znanstvenih raziskav lahko prišlo do škodljivih vplivov.



Slika 2: Princip mejnih vrednosti. Varnostni faktorji, ki so vključeni v mejne vrednosti, so veliki. Šele pri 20 krat večjih vrednostih kot so dovoljene bi lahko prišlo do znanih škodljivih vplivov na zdravje.

Določanje veličin v človeškem telesu zahtevno, saj jih neposredno ne moremo izmeriti. Zato so poleg mejnih vrednosti v človeškem telesu določene tudi mejne vrednosti za električno polje in magnetno polje v prostoru (slika 2). Pri tem se upoštevajo najneugodnejše možne razmere izpostavljenosti, kar pomeni, da je skladnost z mejnimi vrednostmi v človeškem telesu zagotovljena pri vseh izpostavljenostih, ki so pod mejnimi vrednostmi za električno in magnetno polje v prostoru.

V Sloveniji so mejne vrednosti za električno in magnetno polje v prostoru določene v Uredbi o elektromagnetnem sevanju v naravnem in življenjskem okolju (UL RS 70/1996). Uredba določa dve območji varstva pred sevanji: I. območje in II. območje. V I. območje varstva pred sevanji sodijo stanovanjsko območje, območje bolnišnic, zdravilišč, turističnih objektov, objektov vzgojnovarstvenega in izobraževalnega programa ter programa osnovnega zdravstvenega varstva, območje igrišč, javnih parkov, javnih zelenih in rekreacijskih površin, javno središče. Na teh območjih veljajo 10-krat strožje omejitve kot v večini držav. Preostala območja sodijo v II. območja varstva pred sevanji, kjer so mejne vrednosti večje in primerljive z mednarodno priporočenimi mejnimi vrednostmi. V II. območje varstva pred sevanji sodijo tudi območja namenjena javnemu cestnemu ali železniškemu prometu v I. območju varstva pred sevanji veljajo. Mejne vrednosti so frekvenčno odvisne, saj je tudi prag, pri katerem pride do vzdraženja živčnih in mišičnih vlaken, odvisen do frekvence inducirane električnega polja v tkivih. V tabeli 1 so podane mejne vrednosti za magnetno polje pri nekaj značilnih frekvencah v območju nizkih in srednjih frekvenc.

frekvenca	mejne vrednosti za magnetno polje			
	uredba I. območje	uredba II. območje	smernice ICNIRP	priporočila ES
<1 Hz	2,8 mT	28 mT	400 mT	40 mT
50 Hz	10 μ T	100 μ T	200 μ T	100 μ T
1 kHz	0,5 μ T	5 μ T	80 μ T	6,25 μ T
10 kHz	2 μ T	21 μ T	27 μ T	6,25 μ T
100 kHz	2,76 μ T	8,8 μ T	27 μ T	6,25 μ T

Tabela 1: Pregled mejnih vrednosti za nizkofrekvenčna in srednjefrekvenčna magnetna polja pri nekaj značilnih frekvencah.

Izpostavljenosti v električnem vozilu

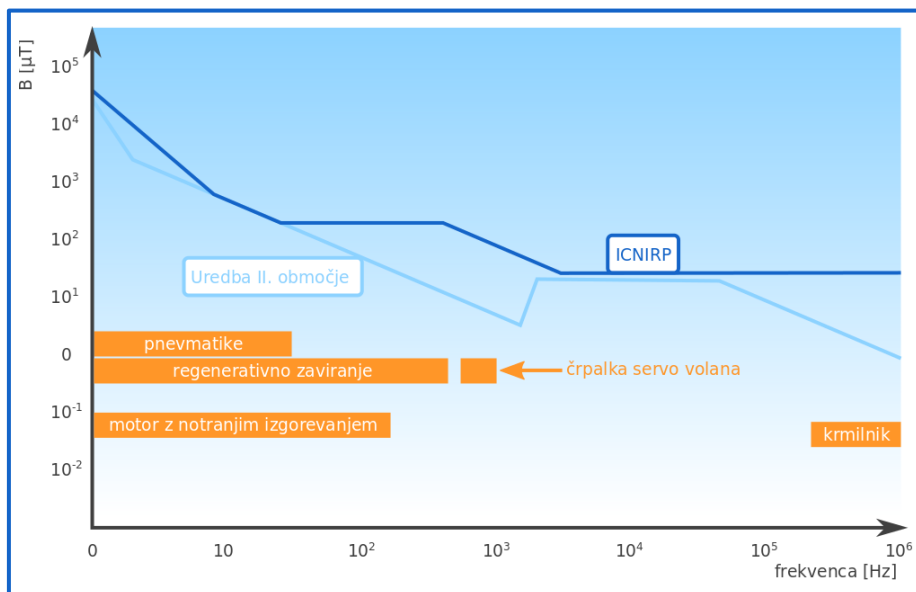
Uporabnik električnih vozil je magnetnim poljem izpostavljen med vožnjo, v bližini električnega vozila med njegovim polnjenjem in v bivalnem okolju zaradi povečanih obremenitev električnega omrežja kot posledice polnjenja električnih vozil.

oznaka	vrsta vozila	moč [kW]	izpostavljenost [%ICNIRP]	lokacija največje izpostavljenosti
EV	električno	11	14,3	sovoznikovo stopalo
EV	priključni hibrid	30	17,8	nad zadnjo baterijo
EV	mali hibrid	10	7,9	nad zadnjo baterijo
EV	električno	10	5,9	stopalo zadnjega potnika
EV	električno	34	4,0	sovoznikov sedež
EV	električno	40	3,2	sovoznikov sedež
EV	gorivne celice	100	2,1	sovoznikov sedež
EV	električno	35	2,7	sovoznikovo stopalo
NI	bencin	75	2,7	sovoznikov sedež
NI	bencin	66	9,0	levi zadnji sedež
NI	diesel	125	10,0	levi zadnji sedež

Tabela 2: Izpostavljenost glede na mejne vrednosti smernic ICNIRP za magnetno polje v prostoru v 11 tipih vozil. EV-električno vozilo NI-vozilo z motorjem z notranjim izgorevanjem

Glede na številne izvedene meritve v električnih avtomobilih vrednosti v kabini dosegajo do 20 odstotkov mejnih vrednosti smernic ICNIRP za magnetno polje v prostoru (tabela 2). Največje vrednosti so dosežene v območju stopal ter v bližini akumulatorskega sklopa. Na višini, kjer se nahaja trup in glava voznika in potnikov v vozilu, znašajo vrednosti magnetnega polja do 2 odstotka mejnih vrednosti ICNIRP. Pri električnih vozilih različni sklopi vozila povzročajo različna magnetna polja (slika 3). V bližini akumulatorskega sklopa ter električnih vodnikov med akumulatorskim sklopom in krmilnikom so prisotna statična in nizkofrekvenčna magnetna polja do frekvence 10 kHz. Krmilniki povzročajo magnetna polja do frekvenc 10 MHz, vendar so vrednosti razmeroma majhne.

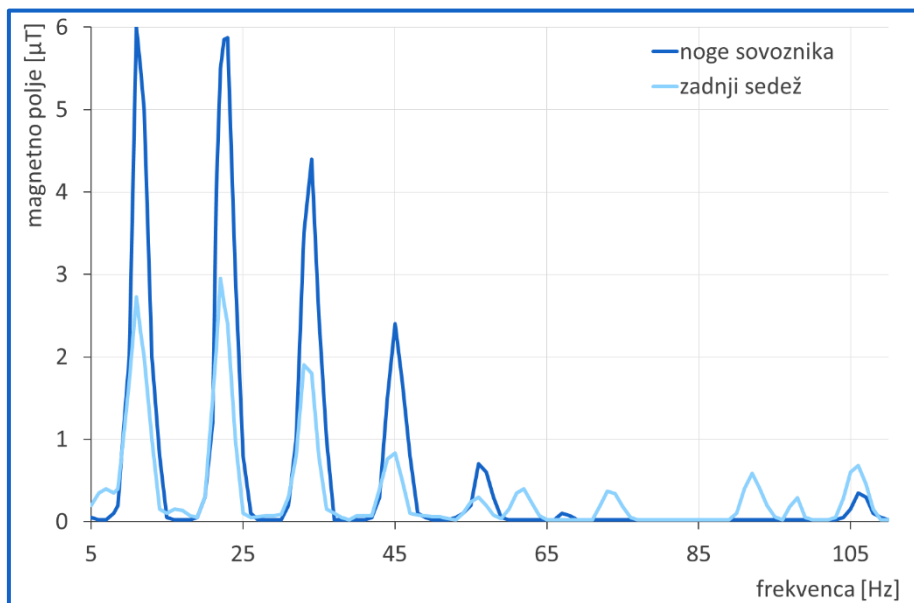
Meritve magnetnega polja v 13 različnih kitajskih električnih vozilih so pokazale, da so otroci, ki sedijo v otroškem sedežu na zadnjih sedežih vozila, nekoliko bolj izpostavljeni magnetnim poljem kot odrasli, saj so nižje rasti, vrednosti magnetnega polja pa so nižje v vozilu večje. Vendar so zaradi manjše prostornine otroškega telesa vrednosti inducirane električnega polja v otroku 30 do 40 odstotkov nižje kot v odraslem človeku. Vsekakor pa so vrednosti tako za otroka kot za odraslega potnika v vozilu bistveno nižje od mednarodno priporočenih mejnih vrednosti.



Slika 3: Tipične najvišje vrednosti magnetnega polja v vozilu. **Oranžni bloki** predstavljajo naprave in njihove tipične najvišje vrednosti magnetnega polja. **Temno modra krivulja** prikazuje mejne vrednosti smernic ICNIRP za magnetno polje v prostoru, **svetlo modra krivulja** pa mejne vrednosti Uredbe za magnetno polje v prostoru za II. območje varstva pred sevanji. Vir: Vassilev A et. al. Magnetic Field Exposure Assessment in Electric Vehicles. IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility, 57(1): 35 – 43, 2015.

Pri tem je pomembno, da tudi v običajnih avtomobilih izpostavljenosti dosegajo do 10 odstotkov mejnih vrednosti ICNIRP. Zelo pomemben vir magnetnega polja v vozilih so pnevmatike, značilni spekter magnetnega polja zaradi pnevmatik je predstavljen na sliki 4. Med postopkom izdelave pnevmatik se jeklene žice v pnevmatiki namagnetijo. Med vožnjo se pnevmatike vrtijo in ker so namagnetene, inducirajo izmenično magnetno polje.

Preizkusi so pokazali, da je s posebnim razmeroma enostavnim postopkom mogoče namagnetene jeklene žice v pnevmatikah razmagnetiti. Z razmagnetenjem se vrednosti magnetnega polja zmanjšajo za približno 10 krat. Razmagnetenje ima trajen učinek, saj so meritve pol leta po razmagnetenju pokazale, da so se vrednosti magnetnega polja sicer minimalno povečale, a so še vedno ostale bistveno manjše kot pred postopkom razmagnetenja.



Slika 4: Spekter magnetnega polja v vozilu z motorjem z notranjim izgorevanjem pri vožnji s hitrostjo 80 km/h. Magnetno polje je v pretežni meri posledica avtomobilskih pnevmatik vozila, ki se med vožnjo vrtijo in povzročajo izmenično nizkofrekvenčno magnetno polje z značilnimi višjimi harmonskimi komponentami. Vir: Stankowski S et. al. Low frequency magnetic fields induced by car tire magnetization. Health Phys, 90(2):148-153, 2006.

Tako inducirano magnetno polje doseže znotraj vozila do 8 μT , njegova frekvenca pa je odvisna od hitrosti in obsega pnevmatik in znaša pri hitrosti 0 km/h 0 Hz, pri 130 km/h pa približno 20 Hz. Prav tako je vir magnetnega polja tudi druga električna oprema v vozilih, kot na primer električni servo volan oziroma električna črpalka za servo volan, ki povzroča magnetno polje frekvenca med 500 Hz in 1 kHz, amplituda pa doseže 1 μT . Tudi drugi električni sklopi klasičnih vozil povzročajo magnetno polje, vendar so njihovi prispevki v kabini majhni.

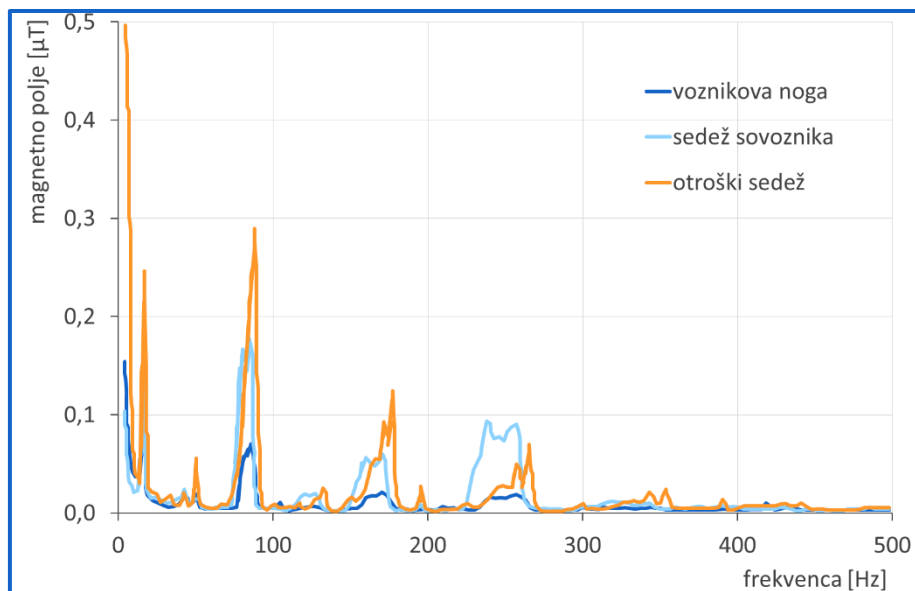
Hibridna vozila

Hibridna vozila se od električnih vozil razlikujejo v tem, da imajo poleg celotnega električnega sklopa za pogon vgrajen tudi motor z notranjim izgorevanjem. Običajno imajo vgrajene akumulatorje manjše kapacitete, prav tako je tudi moč električnega motorja običajno manjša kot pri električnih vozilih. Izpostavljenosti v hibridnih vozilih so zato tipično manjše kot v električnih vozilih, razlike med različnimi modeli pa so

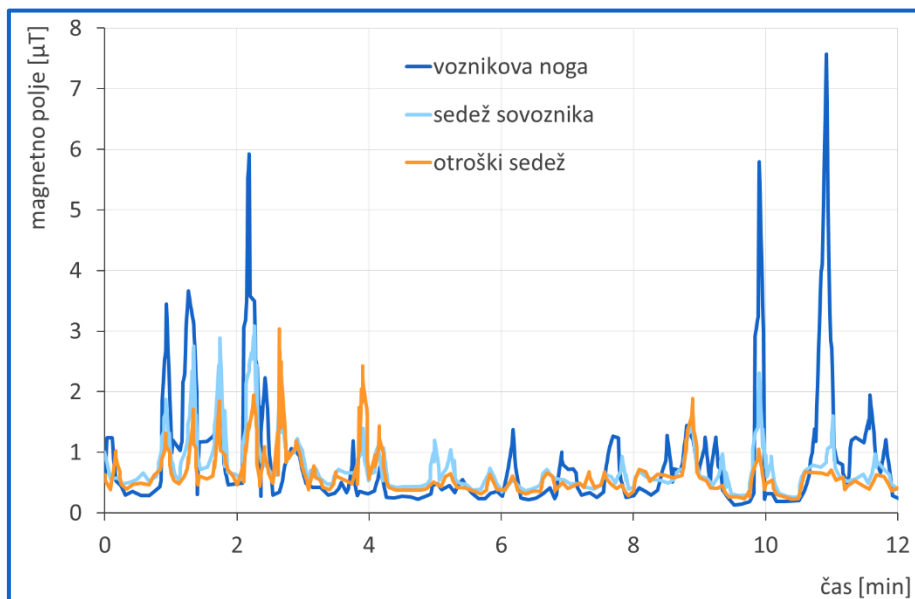
velike zaradi različnih detajlov izvedbe in zelo velikih razlik v moči električnega pogona. V hibridna vozila se vgrajujejo električni pogoni moči od nekaj 10 kW do nekaj 100 kW. Spekter magnetnega polja, ki ga povzročajo hibridna vozila in je predstavljen na sliki 5, je primerljiv s poljem, ki ga povzročajo električna vozila, saj so vgrajene električne komponente podobne. Primerjava frekvenčnega spektra na različnih mestih v vozilu kaže, da so vrednosti na zadnjih sedežih višje za statična in nizkofrekvenčna magnetna polja frekvenc približno 80 Hz, katerih vir so predvsem akumulatorji in avtomobilske pnevmatike, zadnji sedeži pa so tema dvema viroma najbližje.

Časovni potek magnetnega polja med vožnjo s hibridnim vozilom je predstavljen na sliki 6. Med vožnjo se tako hitrosti kot tudi moč električnega motorja ter moč polnjenja akumulatorja ves čas spreminjajo, zato se tudi vrednosti magnetnega polja v vozilu spreminjajo.

Številne meritve v klasičnih, električnih in hibridnih vozilih tako kažejo, da so izpostavljenosti v električnih in hibridnih vozilih večje kot v klasičnih, obstajajo pa velike razlike med različnimi modeli električnih in hibridnih vozil, saj so v nekaterih modelih električnih vozil vrednosti primerljive z vrednostmi v klasičnih vozilih, v splošnem pa izpostavljenosti v električnih vozilih med vožnjo dosegajo do dvakrat višje vrednosti kot v klasičnih vozilih.



Slika 5: Frekvenčni spekter magnetnega polja v hibridnem vozilu v izbranem trenutku med vožnjo po mestu. Vir: BAG. Cars, hybrid cars. Bern, BAG, 2016.



Slika 6: Primer časovnega poteka magnetnega polja v hibridnem vozilu med vožnjo po mestu.
Vir: BAG. Cars, hybrid cars. Bern, BAG, 2016.

Izpostavljenosti med polnjenjem električnega vozila

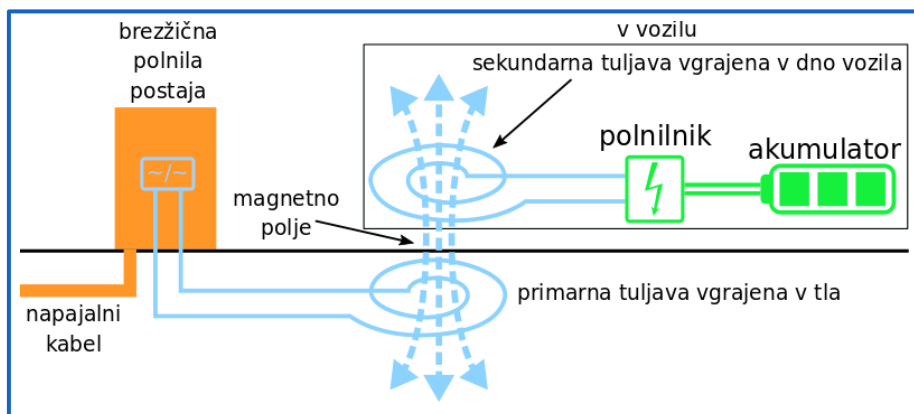
Električne polnilne naprave so zaradi velikih električnih tokov, ki tečejo znotraj polnilnih naprav in po vodnikih, vir magnetnih polj nizkih in srednjih frekvenc. V neposredni bližini polnilnih naprav so med samim postopkom polnjenja lahko mejne vrednosti za magnetno polje v prostoru sicer presežene, a so območja s preseženimi vrednostmi omejena na zelo majhno območje tik ob napravah. Z oddaljenostjo vrednosti hitro upadejo in že na oddaljenosti 20 cm od naprav mejne vrednosti niso več presežene.

Med polnjenjem manjših električnih vozil (električna kolesa, rolke, skiroji ...) so izpostavljenosti majhne, saj se polnijo z bistveno manjšimi močmi in pri nižjih tokovih kot električni avtomobili. Električni avtomobili se polnijo z močmi 7 kW in več, električno kolo pa z močjo 200 W.

Brezžično polnjenje

Pri brezžičnem polnjenju električnih vozil se električna energija iz polnilnice v električno vozilo prenaša na osnovi indukcije. Na podoben princip deluje brezžično polnjenje mobilnega telefona in tudi indukcijsko kuhališče, pri slednjem se prenesena energija porablja za segrevanje dna posode, pri brezžičnem polnjenju pa prenesena energija polni akumulator. Delovanje indukcijskega polnjenja je predstavljeno na sliki 7. Indukcijsko polnjenje se že uporablja za polnjenje manjših naprav, npr. transportni vozički v industriji ali skladiščih, v večjih vozilih, kot so avtomobili, kombinirana vozila, avtobusi ali tovorna vozila, pa se uporaba indukcijskega polnjenja še preizkuša. Prednost takšnega polnjenja je v večji enostavnosti uporabe (ni potrebno več priključevati debelih polnilnih kablov), obenem pa brezžično polnjenje omogoča tudi nekatere nove možnosti kot npr. polnjenja avtobusov mestnega prometa na avtobusni postaji med postankom.

Za prenos električne energije sta v polnilni napravi in v električnem vozilu vgrajeni tuljavi. Da se lahko prenašajo dovolj velike moči, mora biti oddaljenost med tuljavama majhna. V bližini teh tuljav je prisotno močno magnetno polje frekvenc med 10 kHz in 150 kHz. Meritve 25 kWh brezžičnega sistema polnjenja, ki deluje pri 20 kHz, so pokazale, da vrednosti magnetnega polja v okolici električnega vozila na človeku dostopnih mestih dosežejo do 20 μT , znotraj električnega vozila pa so vrednosti pod 1 μT . Mejne vrednosti smernic ICNIRP pri tej frekvenci so 27 μT , kar pomeni, da mejne vrednosti niso presežene, a najvišje izpostavljenosti niso dosti nižje od mejnih vrednosti.



Slika 7: Delovanja indukcijskega polnjenja. Energija se iz primarne tuljave, vgrajene v tleh, prenaša v sekundarno tuljavo, vgrajeno v vozilo, preko magnetnega polja. V vozilu se nato preko polnilnika energija shrani v akumulator.

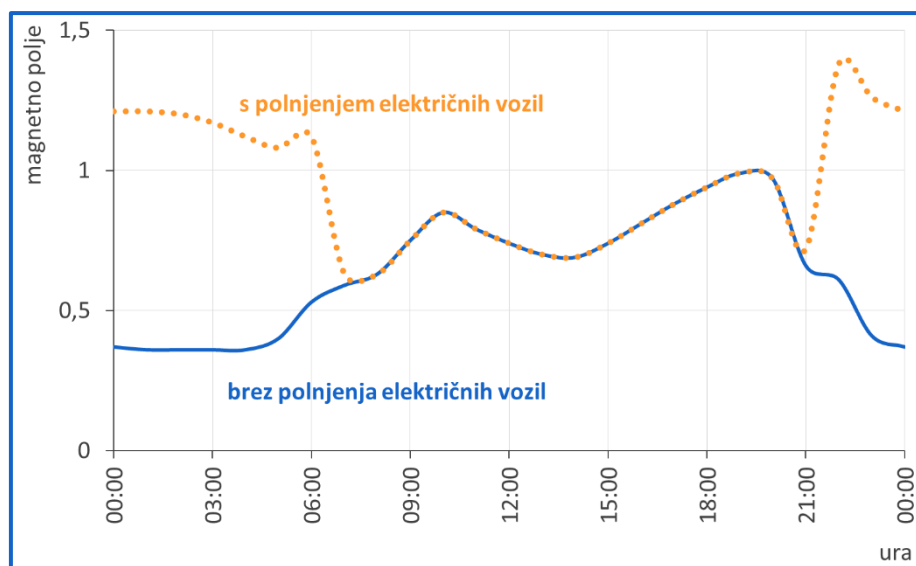
Analiza, izvedena za model 85 kHz sistema brezžičnega polnjenja, je pokazala, da so za polnilne sisteme moči več 10 kW v okolici vozila mejne vrednosti lahko presežene. Vrednosti magnetnega polja se še dodatno povečajo, če tuljavi nista poravnani točno ena nad drugo. Ob upoštevanju takšnih bolj neugodnih pogojev ali v primeru močnejših sistemov z močjo več 10 kW torej izpostavljenosti lahko presežejo mejne vrednosti. Med načrtovanjem in implementacijo sistemov za brezžično polnjenje bodo v prihodnje morali proizvajalci več pozornosti nameniti zmanjševanju izpostavljenosti ljudi med postopkom brezžičnega polnjenja. Zmanjšanje izpostavljenosti je mogoče doseči z vgradnjo zaščite v okolici sekundarne tuljave v dnu vozila, ki mora biti izdelana iz posebnih temu namenjenih materialov. Pravilno načrtovana in vgrajena zaščita lahko bistveno zmanjša izpostavljenost v vozilu nad samo tuljavo ter tudi v drugih predelih tako znotraj kot tudi izven vozila. Prav tako se v vozila lahko vgradi sistemi za avtomatsko natančno pozicioniranje sekundarne tuljave, vgrajene v vozilu, točno nad primarno tuljavo, vgrajeno v tla, s čemer se tudi zmanjšajo vrednosti magnetnega polja v okolici naprave za brezžično polnjenje.

Izpostavljenosti doma zaradi polnjenja električnih vozil

Pričakuje se, da bo polnjenje električnih vozil pomembno vplivalo na porabo električne energije doma. To bo vplivalo na obremenitve električne napeljave doma ter vseh električnih vodov in naprav, po katerih električna energija prispe do našega doma: transformatorskih postaj in vseh električnih vodov do naših domov in vodov, ki napajajo transformatorske postaje. Bolj kot so električne naprave obremenjene, večje je magnetno polje v njihovi bližini.

Glede na podatke statističnega urada je povprečna poraba električne energije na gospodinjstvo v Sloveniji v letu 2017 znašala 11 kWh na dan. Če upoštevamo, da električni avtomobil porabi med 15 in 20 kWh električne energije na 100 prevoženih kilometrov in da je tipična kapaciteta akumulatorjev električnega avtomobila med 30 in 70 kWh, je polnjenje električnega avtomobila doma največji porabnik električne energije v gospodinjstvu. Z vidika izpostavljenosti prebivalstva je pomembno, da se polnjenje električnih vozil običajno izvaja čez noč, ko je električna energija cenejša in zato polnjenje električnih vozil poveča vrednosti magnetnih polj doma ravno v času, ko smo doma in ko spimo. Zelo težko je oceniti, koliko se bodo zaradi polnjenja električnih vozil povečale vrednosti magnetnih polj v bivalnih območjih. Povečanje je pretežno odvisno od razširjenosti električnih vozil, deležu polnjenja električnih vozil doma, zmogljivosti in hitrosti domačih polnilnih naprav in razvoja elektroenergetske infrastrukture v smislu pametnega polnjenja, ko se bo polnjenje vozil prilagajalo razmeram v elektroenergetskem sistemu. Ob ocenjenem 50 odstotnem povečanju

porabe električne energije zaradi polnjenja električnih vozil, kar za povprečno gospodinjstvo predstavlja dnevno približno 5,5 kW dodatne porabljene električne energije (polnjenje električnega avtomobila po prevoženih 25 do 30 km), se v nočnem času vrednosti magnetnega polja v bližini transformatorskih postaj in vodov v stanovanjskem okolju znatno povečajo. Najnižje vrednosti magnetnega polja so sedaj v stanovanjskih območjih dosežene ponoči, zjutraj se povečajo in dosežejo največje vrednosti zvečer med 19. in 20. uro. Razmere pa se znatno spremenijo v primeru polnjenja električnih vozil doma. Ker se električna vozila večinoma polnijo čez noč, vrednosti magnetnega polja v stanovanjskih območjih zvečer znatno narastejo in so ponoči bistveno večje kot bi bile sicer. Proti jutru pričnejo upadati, saj se električna vozila v zaključni fazi polnijo počasneje oziroma je del vozil že napolnjen. Značilen ocenjen dnevni potek magnetnega polja v bližini transformatorske postaje ob upoštevanju polnjenja električnih vozil doma je predstavljen na sliki 8.



Slika 8: Prikaz značilnega dnevnega poteka magnetnega polja v bližini transformatorske postaje, nameščene na stanovanjskem območju. Modra krivulja prikazuje potek brez polnjenja električnih vozil, oranžna krivulja predstavlja ocenjen potek magnetnega polja na isti lokaciji ob predpostavljnem 50 odstotnem povečanju porabe električne energije za polnjenje električnih vozil. Vse vrednosti so normirane na največjo vrednost magnetnega polja brez polnjenja električnih vozil.

ELEKTRIČNA VOZILA IN ZDRAVJE

Dolgoročnih študij o izpostavljenosti v električnih vozilih in vplivih na zdravje še ni, saj se električna vozila uporabljajo šele krajši čas, prav tako pa je tudi danes njihova razširjenost še zelo nizka. A izpostavljenosti nizkofrekvenčnim magnetnim poljem so bile v preteklosti že obširno preiskovane v številnih raziskavah. Ljudje smo že dolgo izpostavljeni tovrstnim poljem zaradi različnih električnih naprav doma in v okolju. Podrobneje so vpliv nizkofrekvenčnih električnih in magnetnih polj na zdravje predstavljeni v 4. poglavju brošure Visokonapetostni daljnovidni, ki jo je Forum EMS izdal leta 2018.

Ljudje z elektronskimi vsadki v električnih vozilih niso izpostavljeni morebitnim tveganjem. Med vožnjo z električnim avtomobilom in med njihovim polnjenjem pri ljudeh s srčnimi spodbujevalniki in defibrilatorji ne prihaja do motenj delovanja vsadkov.

Nekoliko manj je opravljenih raziskav za srednje frekvence. Že v preteklosti so se uporabljale naprave, ki so delovale v tem frekvenčnem območju, npr. srednjevalovni oddajniki, naprave v medicini in fizioterapiji, vendar je bilo tovrstnih naprav malo. Razširile so se v zadnjih 10 letih z razmahom uporabe indukcijskih kuhalšč, varčnih sijalk, naprav z inverterskim krmiljenjem električnih motorjev (klimatske naprave, pralni stroji ...) in številnih naprav z elektronskimi napajalniki. Vendar so izpostavljenosti v električnih vozilih bistveno nižje od mejnih vrednosti, ki jih določajo smernice INICRP ter evropska priporočila. Za vse izpostavljenosti, ki so nižje od mednarodnih priporočil pa velja, da ni znanih in potrjenih škodljivih vplivov na zdravje.

Pri izpostavljenostih, nižjih od mejnih vrednosti, ni znanih in potrjenih škodljivih vplivov na zdravje.

ZAKLJUČEK

Uporaba električnih vozil povzroča izpostavljenosti EMS med uporabo in polnjenjem ter tudi v bivalnem okolju zaradi povečanih obremenitev električnega omrežja kot posledice polnjenja električnih vozil. V električnih vozilih izpostavljenosti dosežejo do 20 odstotkov mednarodno priporočenih mejnih vrednosti. To je sicer več kot v vozilih z motorjem z notranjim izgorevanjem, kjer izpostavljenosti dosežejo do 10 odstotkov

mejnih vrednosti, a izpostavljenosti niso velike. V nekaterih tipih električnih vozil so zaradi večjih moči izpostavljenosti lahko večje. Kljub številnim raziskavam še vedno ostaja določena znanstvena negotovost o morebitnih dolgoročnih vplivih EMS na zdravje. Smiselno je, da se s preprostimi ukrepi trudimo zmanjšati izpostavljenost EMS v in zaradi električnih vozil. Sami zelo težko vplivamo na to, koliko smo v električnem vozilu izpostavljeni, več možnosti imajo proizvajalci. Na voljo je več preprostih ukrepov, kot npr. namestitvev posameznih sklopov v vozilu tako, da so kabli, po katerih tečejo večji tokovi nizkih in srednjih frekvenc, čim krajši, nameščeni tesno skupaj in speljani čim bolj stran od sedežev vozila, če pa to ni mogoče, se okrog kablov lahko namesti posebna zaščita. Vendar proizvajalci, kot velja tudi za druge naprave, niso zavezani k zmanjševanju izpostavljenosti ljudi v električnih vozilih, mejne vrednosti v vozilu pa seveda ne smejo biti presežene. Ali in v kolikšni meri se dodatno potrudijo znižati izpostavljenosti je prepuščeno njim samim in kupci žal nimamo vpliva na to.

Med polnjenjem električnih vozil so v neposredni bližini polnilnega kabla in polnilnice izpostavljenosti lahko velike, a z oddaljenostjo vrednosti zelo hitro upadejo. Bistveno manj smo izpostavljeni, če se med polnjenjem odmaknemo stran od teh naprav, že na oddaljenosti 1 m bodo vrednosti bistveno nižje od mejnih vrednosti. Prav tako je smiselno, da se med polnjenjem ne zadržujemo v vozilu (npr. spanje otrok v vozilu med postankom za polnjenje). Večje izpostavljenosti povzročajo brezžično polnjenje. Ta tehnologija je še v razvoju in se v običajnih električnih vozilih še ne uporablja, vendar raziskave kažejo, da izpostavljenosti v vozilu ali v njegovi okolici za brezžične polnilne naprave moči več 10 kV lahko presežejo mejne vrednosti. Vpliv polnjenja električnih vozil na izpostavljenosti doma je težko oceniti, a vpliv bo znaten, saj doma nimamo nobenega tako močnega električnega porabnika, ki bi deloval toliko časa. Glede trajanja delovanja se jim najbolj približajo električni grelniki vode, vendar je njihova moč (običajno 2 kW) bistveno manjša od moči polnilnic električnega avtomobila. Vsekakor bo v prihodnje temu področju potrebno posvetiti posebno pozornost, saj bo s širjenjem električnih vozil znatno narasla poraba električne energije v bivalnih soseskah, zaradi česar bo zelo verjetno potrebna nadgradnja električnega omrežja. Prav tako bo bistveno bolj obremenjena električna napeljava v bivalnih stavbah. Ker ta lahko poteka tudi v bližini bivalnih in spalnih prostorov stavbe, bi ob nesmotrni nadgradnji električne napeljave to lahko znatno povečalo izpostavljenost ljudi med polnjenjem električnih vozil, kar pa vsekakor ni smiselno. Polnjenje manjših električnih vozil (električna kolesa, električni skiroji, električne rolke) je majhen porabnik električne energije. Zato polnjenje tovrstnih vozil nima pomembnega vpliva na izpostavljenosti v domačem okolju. Vseeno je smiselno, da tovrstnih naprav ne polnimo neposredno ob prostorih, kjer se zadržujemo dolgo časa (spalnice), saj so lahko v neposredni bližini električne napeljave, polnilca in priključnih kablov prisotne povišane vrednosti magnetnega polja.

LITERATURA

- BAG. Cars, hybrid cars. Bern, BAG, 2016.
- Clemens M, Zang M, Alsayegh M, Schmuelling B. High Resolution Modeling of Magnetic Field Exposure Scenarios in the Vicinity of Inductive Wireless Power Transfer Systems. 2018 IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG), 23. – 27. april 2018, Singapur, Singapur. doi: 10.1109/INTMAG.2018.8508403
- EC: Council of the European Union. Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz). Official Journal of the European Communities L199.
- Asa E, Mohammad M, Onar OC, Pries J, Galigekere V, Su G –J. Review of Safety and Exposure Limits of Electromagnetic Fields (EMF) in Wireless Electric Vehicle Charging (WEVC) Applications. 2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC), Chicago, IL, USA. 17-24, 2020. doi: 10.1109/ITEC48692.2020.9161597.
- Hareuveny R, Sudan M, Halgamuge MN, Yaffe Y, Tzabari Y, Namir D, Kheifets L. Characterization of Extremely Low Frequency Magnetic Fields from Diesel, Gasoline and Hybrid Cars under Controlled Conditions. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 12: 1651-1666, 2015. doi:10.3390/ijerph120201651
- ICNIRP: Guidelines on limits on exposure to static magnetic fields. *Health Physics* 96(4): 504-514, 2009. doi: 10.1097/01.HP.0000343164.27920.4a
- ICNIRP: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Physics* 99(6): 818-836, 2010. doi: 10.1097/HP.0b013e3181f06c86
- Lennerz C, Horlbeck L, Weigand S, Grebmer C, Blazek P, Brkic A, Semmler V, Haller B, Reents T, Hessling G, Deisenhofer I, Lienkamp M, Kolb C, O'Connor M. Patients with pacemakers or defibrillators do not need to worry about e-Cars: An observational study. *Technol Health Care*. 28(1): 1-12, 2020. doi: 10.3233/THC-191891
- Lin J, Lu M, Wu T, Yang L, Wu T. Evaluating Extremely Low Frequency Magnetic Fields In The Rear Seats Of The Electric Vehicles. *Radiat Prot Dosimetry*. 182(2): 190-199, 2018. doi: 10.1093/rpd/ncy048
- Milham S, Hatfield JB, Tell R. Magnetic fields from steel-belted radial tires: implications for epidemiologic studies. *Bioelectromagnetics*: 20(7): 440-5, 1999. doi: 10.1002/(SICI)1521-186X(199910)20:7%3C440::AID-BEM5%3E3.0.CO;2-X
- Mohamed AAS, Meintz A, Schrafel P, Calabro A. In-Vehicle Assessment of Human Exposure to EMFs from 25-kW WPT System Based on Near-Field Analysis. 2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 27. – 30. avgust 2018, Chicago, ZDA. doi : 10.1109/VPPC.2018.8605011
- Moreno-Torres P, Lourd J, Lafoz M, Arribas J. Evaluation of the Magnetic Field Generated by the Inverter of an Electric Vehicle. *IEEE Transactions on Magnetics*. 49. 837-844, 2013. doi: 10.1109/TMAG.2012.2214787
- Moreno-Torres Concha P, Velez P, Lafoz M, Arribas JR. Passenger Exposure to Magnetic Fields due to the Batteries of an Electric Vehicle. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(6), 4564-4571, 2016. doi: 10.1109/TVT.2015.2490105
- Pääkkönen R, Korpinen L. Low frequency magnetic fields inside cars. *Radiation Protection Dosimetry*, ncz248: 1–4, 2019. doi:10.1093/rpd/ncz248
- Park S. Evaluation of Electromagnetic Exposure During 85 kHz Wireless Power Transfer for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Magnetics*. 54(1), 1–8, 2018. doi:10.1109/tmag.2017.2748498
- Tell RA, Kavet R. Electric And Magnetic Fields <100 Khz In Electric And Gasoline-Powered Vehicles. *Radiation Protection Dosimetry*, 172(4), 541–546, 2016. doi:10.1093/rpd/ncv533
- Trentadue G, Pinto R, Zanni M, Scholz H, Pliakostathis K, Martini G. Low Frequency Magnetic Fields Emitted by High-Power Charging Systems. *Energies*, 13: 1594, 2020. doi:10.3390/en13071594
- Trentadue G, Pinto R, Salvetti M, Zanni M, Pliakostathis K, Scholz H, Martini G. Assessment of Low-Frequency Magnetic Fields Emitted by DC Fast Charging Columns. *Bioelectromagnetics*, 41(4), 308-317, 2020. doi:10.1002/bem.22254
- Shimamoto T, Laakso I, Hirata A. In-situ electric field in human body model in different postures for wireless power transfer system in an electrical vehicle. *Physics in Medicine & Biology*, 60: 163-173, 2015. doi:10.1088/0031-9155/60/1/163
- Stankowski S, Kessi A, Bécheiraz O, Meier-Engel K, Meier M. Low frequency magnetic fields induced by car tire magnetization. *Health Phys*, 90(2):148-153, 2006. doi:10.1097/01.hp.0000174526.10639.ff
- Uredba o elektromagnetnem sevanju v naravnem in življenjskem okolju, Uradni list Republike Slovenije, 70/1996.
- Vassilev A, Ferber A, Wehrmann C, Pinaud O, Schilling M, Ruddle AR. Magnetic Field Exposure Assessment in Electric Vehicles. *IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility*, 57(1): 35 – 43, 2015. doi: 10.1109/TEMC.2014.2359687

O BROŠURI

Delež električnih vozil se v zadnjih letih vztrajno večja. Ob tem se postavlja vprašanje, koliko smo uporabniki električnih vozil izpostavljeni elektromagnetnim sevanjem. Izpostavljenosti v električnih in hibridnih vozilih so sicer večje kot v klasičnih vozilih, vendar pa so bistveno nižje od mejnih vrednosti.

Z električnimi vozili in priključnimi hibridnimi vozili je povezano tudi polnjenje. Ker bo polnjenje doma večinoma potekalo ponoči, je pričakovati, da se bodo naše izpostavljenosti nizkofrekvenčnim magnetnim poljem doma povečale.

O PROJEKTU FORUM EMS

Forum EMS je projekt, ki skrbi za objektivno, nepristransko in strokovno podprto komuniciranje o problematiki elektromagnetnih sevanj. Opira se izključno na znanstvene temelje in sledi izhodiščem vodilnih mednarodnih organizacij s področja varovanja zdravja in okolja pred elektromagnetnimi sevanji (EMS). Namenjen je vsem, ki iščejo odgovore na pereče probleme s področja EMS. Z omenjenimi dejavnostmi želimo omogočiti in zagotoviti objektivno obveščanje javnosti ter v družbi vzpostaviti stanje, kjer bodo zainteresirani posamezniki in skupine imeli možnost objektivno prepoznati in razumeti možna zdravstvena in okoljska tveganja zaradi EMS. Oblikujemo in posredujemo strokovne argumente, ki omogočajo lažje sporazumevanje javnosti s ponudniki storitev. Višja stopnja razumevanja problematike EMS je tudi za ponudnike storitev dober temelj za prikaz njihove družbene odgovornosti skozi neposredno vključevanje v hitrejšo reševanje konkretnih dilem in nesoglasij, ki spremljajo umeščanje virov EMS v prostor.

DODATNE INFORMACIJE

Vse dodatne informacije lahko najdete na domači strani projekta: www.forum-ems.si. Lahko jih prejmete po elektronski pošti, če nam pišete na naslov: info@forum-ems.si. Obrnete se lahko tudi na svetovalno pisarno projekta Forum EMS: telefon **01 5682732**.