

Standardizacija u oblasti izlaganja ljudi elektromagnetskim poljima visokih frekvencija: Polazna osnova za buduće izazove

BRANISLAV D. VULEVIĆ, ASTEL PROJEKT, Beograd
ORCID: 0000-0001-5027-0947

Pregledni rad
UDC: 614.87:537.531
DOI: 10.5937/tehnika2504465V

Ovaj rad daje pregled aktivnosti standardizacije i naučnih studija u vezi sa procenom izlaganja ljudi elektromagnetnim poljima (electromagnetic fields - EMF). U radu se razmatraju standardi u vezi sa izlaganjem EMF visokih frekvencija (iznad 100 kHz) kao i odnosni standardi za usaglašenost proizvoda. Izvršena je analiza standarda u medicinskim i nemedicinskim slučajevima EMF izlaganja ljudi. Na kraju, sumirani su budući pravci istraživanja i potrebe istraživanja za bezbednost u domenu EMF izlaganja ljudi.

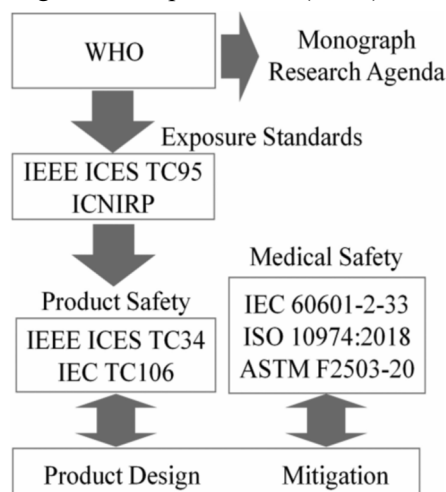
Ključne reči: izlaganje ljudi, procena saglasnosti, metode proračuna, elektromagnetska bezbednost, medicinska bezbednost, modeliranje ljudskog tela

1. UVOD

Sa razvojem raznih elektronskih sistema, ljudi su sve više izloženi uticajima elektromagnetskih polja (EMF). Međunarodna tela za standardizaciju, IEEE međunarodni komitet za elektromagnetsku bezbednost (ICES) – tehnički komitet 95 (TC95) i Međunarodna komisija za zaštitu od nejonizujućih zračenja (IC-NIRP), postavljaju bezbednosne smernice/standarde za zaštitu ljudi od prekomernog EMF izlaganja [1]–[3]. Ove smernice propisuju granice izlaganja za profesionalce i za opštu populaciju. Pomenute granice izlaganja obezbeđuju visok stepen zaštite od neželjenih efekata po zdravlje usled kratkoročnih i dugoročnih, kontinualnih i/ili privremenih EMF izlaganja ljudi.

Posebno treba naglasiti, da ove granice izlaganja nisu namenjene pacijentima koji su pod kontrolom lekara i medicinskih stručnjaka. Takođe, nisu primenljive prilikom upotrebe medicinskih uređaja ili implantata. Izlaganje tokom kliničkog lečenja može biti za jedan ili dva reda veličine veće u odnosu na dozvoljene granice za opštu populaciju. Za razliku od maksimalne bezbednosti za opštu populaciju, kod kliničkih primena EMF-a treba pronaći ravnotežu između povećanog izlaganja EMF i bezbednosti. Za podešavanje granica izlaganja EMF, neophodni su proračuni i podaci eksperimentalne dozimetrije.

Postoji sve veća zabrinutost javnosti u vezi sa pitanjima bezbednosti vezano za nove/nastajuće bežične sisteme. Istraživački program Svetske zdravstvene organizacije (WHO) preporučuje procenu izlaganja od novih bežičnih mrežnih tehnologija [4]. Nakon navedene publikacije, pojavilo se nekoliko novih bežičnih sistema, najsvežiji primer je peta generacija javne mobilne telefonije (5G) i sistemi bežičnog prenosa energije (Wireless Power Transfer Systems - WPT). Oni su doveli do pojačane diskusije o bezbednosti bežičnih tehnologija kao i izazova u domenu elektromagnetne kompatibilnosti (EMC).



Slika 1 - Odnos između zdravlja ljudi, standarda izlaganja, usaglašenosti proizvoda, medicinske bezbednosti i srodne standardizacije. Medicinski standardi bezbednosti opreme su navedeni kao primeri [5].

Adresa autora: Branislav Vulević, ASTEL PROJEKT, Beograd, Bulevar Crvene armije 11v
e-mail: banevul@gmail.com
Rad primljen: 31.12.2024.
Rad prihvaćen: 17.04.2025.

Kontinuirana poboljšanja u proračunima i eksperimentalnim metodama neophodna su za razvoj naučne osnove za standarde graničnih vrednosti izlaganja i metode procene usaglašenosti proizvoda. Za definisanje zahteva i preporuka u vezi sa bezbednosti izlaganja ljudi elektromagnetskim poljima uz usklađenost proizvoda i medicinskih sredstava, pored ostalih subjekata, odgovorna su različita tela za standardizaciju.

Slika 1 sumira odnos između različitih organizacija i tela za standardizaciju. Ovaj rad pokriva pregled aktuelnih tema iz oblasti elektromagnetske bezbednosti, uključujući kratku istoriju i buduće pravce razvoja.

2. BEZBEDNOST IZLAGANJA LJUDI EMF-U

Međunarodne smernice uglavnom navode dve vrste ograničenja izlaganju električnim, magnetskim i elektromagnetskim poljima (EMF) [1-3], [6]:

a) Osnovna ograničenja (BRs - Basic restrictions - poznata kao dozimetrijske referentne granice – reference limits DRL [1]). One odgovaraju fizičkim veličinama unutar izloženog tela i izvedene su na osnovu odgovarajućih pragova izlaganja nakon kojih nastaju evidentne štetne posledice po zdravlje uz primenu odgovarajućih redukcionih faktora.

b) Referentni nivoi (RLs - The reference levels) [1], koji definišu električno polje, magnetsko polje ili gustinu snage bez prisustva ljudskog tela. Ovi nivoi omogućavaju praktičan pristup problemu procene izlaganja a imaju za cilj da odrede da li su prekoračena osnovna ograničenja. Referentni nivoi su dobijeni na osnovu merenja ili numeričkih proračuna kojima su osnovna ograničenja, dobijena u bio-laboratorijskim uslovima, „konvertovana“ u veličine koje se mogu meriti određenom mernom instrumentacijom u konkretnim slučajevima u praksi.

Neku zaštitnu meru, uključujući i preporuke o izlaganju nekom agensu, treba revidirati tokom vremena i usavršavati kada je to potrebno, što je posledica:

- novih naučnih podataka
- iskustva u praktičnoj primeni

Opšte je prihvaćen stav od strane WHO i ICNIRP [7], da treba izvršiti određene promene u postojećim međunarodnim preporukama i standardima ali tek posle završetka navedenih naučnih projekata, jer će se na osnovu rezultata većeg broja istraživanja dobiti kompletnija slika o potrebnim izmenama. Tako će sa razvojem naučnog znanja promene redukcionih faktora – granice izlaganja biti bolje definisane i opravdane. To posebno važi za slučaj nedovoljno istraženih tzv. „netermičkih efekata“ tokom dugotrajnog izlaganja električnim, magnetskim i elektromagnetskim poljima na nivoima koji se nalaze ispod sadašnjih referentnih nivoa za određeni opseg frekvencija.

Iz čisto pragmatičnih razloga, dozimetrija u domenu EMF razvija se u dva pravca [5]:

- a) dozimetrija niskih frekvencija (≤ 100 kHz)
- b) dozimetrija visokih frekvencija (>100 kHz).

a) Dozimetrija niskih frekvencija

Dozimetrijska veličina koja se koristi za definisanje BR u opsegu niskih frekvencija (LF) je *unutrašnje električno polje* [2]. Obrazloženje se zasniva na tome da se obezbedi zaštita od neželjenih efekata koji nastaju usled stimulacije elektro-ekscitabilnih (nadržljivih) tkiva u organizmu. Pošto se indukovano električno polje unutar tkiva ne može meriti, procenjuje se numerički.

Dozimetrijsko modeliranje na LF oslanja se na pretpostavci da se radi o frekvencijama pri kojima je talasna dužina mnogo veća od dimenzija ljudskog tela. Najčešće korišćene metode za proračun unutrašnjeg električnog polja u LF opsegu su: metoda konačnih razlika salar-potencijala (scalar-potential finite-difference method [8]) i metoda konačnih elemenata (the finite-element method FEM) [9].

Jedan od najvažnijih izvora nesigurnosti u LF dozimetriji je električna provodljivost tkiva. Konvencijalno, vrednosti provodljivosti tkiva se procenjuju na osnovu podataka iz merenja životinjskog tkiva [10]. Nesigurnosti u karakteristikama tkiva mogu značajno uticati na indukovana električna polja. Na primer, vrednost provodljivosti kože može imati veliki uticaj na procenu indukovano električnog polja [11]. Štaviše, različite procene provodljivosti moždanog tkiva mogu da proizvedu odstupanja od približno jedne trećine u najvišim vrednostima električnog polja u mozgu [12].

Za nesinusoidalne talasne oblike, predloženi su ICNIRP i IEEE pristup zasnovan na Furijeovoj transformaciji [1,2].

b) Dozimetrija visokih frekvencija

Ova vrsta dozimetrije se još naziva „radiofrekvencijska (RF) dozimetrija“ [5]. Dozimetrijska veličina koja se koristi za određivanje izlaganja EMF u RF frekvencijskom opsegu (100 kHz do 300 GHz) je SAR (Specifična brzina apsorpcije – W/kg) i apsorbovana/epitelna gustina snage (W/m^2) – tj. gustina snage apsorbovana u tkivu iz incidentnog RF talasa. Na frekvencijama ispod 6 GHz, „prostorno-usrednjen SAR na 10 g tkiva“ je praktično zamena za lokalni porast temperature [13]. Iznad 6 GHz, međunarodne smernice uvode pojam apsorbovana/epitelna gustina snage usrednjena na 4 cm^2 , kao zamena za porast temperature kože [14]. Dok IEEE C95.1 [1] ograničava prosečni SAR celog tela do 6 GHz, ICNIRP smernice [6] predviđaju ograničenja za prosečni SAR za celo telo do 300 GHz, što se zasniva na studiji [15], koja podseća da i infracrveno (IC) zračenje može povećati temperaturu tela.

Tehnike vremenskog domena konačnih razlika (The finite-difference time-domain - FDTD) i metoda konačnih elemenata (Finite elements – FEM) su široko prihvaćene za računarsku elektromagnetiku i termodinamiku u evaluaciji indukovanih polja (BR ili DRL) kod izlaganja RF EMF zbog njihove sposobnosti da precizno modeluju složene nehomogene medije.

Dozimetrijsko modelovanje za izlaganje celog tela otkrilo je da je potreban prosečni SAR za celo telo od najmanje 6 W/kg, u frekvenzijskom opsegu od 100 kHz do 6 GHz, za povećanje temperature tela kod odraslih za 1°C pri izlaganju od najmanje 1h [16]. Smernice postavljaju vrednost od 4 W/kg za povećanje telesne temperature za 1°C nakon 30 minuta izlaganja.

Kada se radi o lokalnoj izloženosti RF EMF, SAR i porast temperature u ljudskoj glavi i telu kod izlaganja ispod 6 GHz opsežno su proučavane. Primećeno je da je *faktor grejanja* (odnos pika porasta temperature i vršne vrednosti SAR usrednjeno na 10 g tkiva nakon 30 minuta izlaganja niži od 0,25°C/(W/kg) u koži i 0,1°C/(W/kg) u mozgu [17].

Novije studije su uglavnom fokusirane na izloženost RF EMF-u iznad 6 GHz, u cilju proučavanja na frekvenzijskom opsegu na kojem će funkcionisati nove 5G tehnologije. Zbog smanjenja dubine prodiranja sa povećanjem frekvencije, efekat grejanja u ovom frekvenzijskom opsegu uglavnom utiče na površinska tkiva kože. Za ovaj opseg frekvencija usvojeno je teorijsko modelovanje EM apsorpcije i zagrevanja tkiva korišćenjem (1-D) stratifikovanih modela [18 - 20].

Nesigurnosti parametara, uključujući varijacije kod dielektričnih osobina, termičkih osobina, termoregulacionih modela i debljina slojeva tkiva u modelima tela imaju određeni uticaj na proračune, koji se ne sme zanemariti. Protok krvi u tkivu uveliko varira od pojedinca do pojedinca i delova tela koji se posmatraju. Tipična varijabilnost rasta vršne temperature kod anatomskih modela glave uzrokovanih varijacijama u protoku krvi manja je od 15% [21]. Na višim frekvencijama, povećanje temperature kože u velikoj meri zavisi od debljine tkiva i koeficijenta prenosa toplote između kože i okoline. [18], [19], [22].

3. METODE MERENJA ZA PROCENU IZLAGANJA I STANDARDIZACIJA

Zahvaljujući ubrzanom razvoju novih tehnologija, mernih uređaja i njihovog povezivanja u merne sisteme, prvih petnaest godina XXI veka karakteriše pojava različitih pristupa merenjima u oblasti RF zračenja. Ovo posebno implicira potrebu za usaglašavanjem mernih metoda. Zbog toga se velika važnost poklanja standardizaciji i harmonizaciji mernih metoda [23].

Sa stanovišta standardizacije merenja, u domenu EMF visokih frekvencija, izvori EMF kojima se u

poslednjih nekoliko godina poklanja posebna pažnja su mobilni bežični uređaji i bazne stanice za mobilne komunikacije.

Mobilni bežični uređaji

Sonda za merenje električnog polja [25] koristi se za merenja SAR-a u skladu sa procedurom standardizovanoj od strane međunarodnih tela kao što su IEC TC106 i IEEE ICES TC34. Najnovija procedura za SAR merenja kod prenosnih uređaja publikovana je kao IEC/IEEE 62209-1528 [26]. Koristi se fantom napunjen tečnošću ekvivalentnom sastavu tkiva jer sonda može lako da skenira unutar tečnosti i meri 3-D distribuciju električnog polja uz pomoć robota.

Fantom zvani „specifični antropomorfni maneken“ (specific anthropomorphic mannequin) [26], ima realističan oblik i koristi se za procene SAR-a u temporalnom (slepoočnom) delu ljudske glave. Postupak merenja SAR-a je dugotrajan ali su to merenja sa izuzetno visokom ponovljivošću. Da bi se prevazišao nedostatak vezan za vreme merenja, uvedena je nova metoda u kojoj se koristi istovremeno više sonde električnog polja.

Gore navedene procedure se ne odnose na uređaje namenjene za ugradnju u ljudsko telo (implantati). Generalno, prenosne snage napajanja za bežične uređaje unutar tela (medicinski sistem komunikacije implantata) su male [27], [28]. U tom slučaju, merna procedura prema IEC/IEEE 62209-1528 [26] se izuzima.

Opšte tehnike proračuna za procenu SAR-a korišćenjem FDTD [27] i FEM [28] su takođe standardizovane. Procena proračuna SAR-a za specifične proizvode, uključujući antene postavljene na vozila [29] i mobilne telefone [30] takođe je standardizovana. Merenje gustine upadne snage (the incident power density - IPD) za terminale na frekvencijama iznad 6 GHz postaje sve više potrebno razvojem novih bežičnih tehnologija. IPD se lako dobija kada je u pitanju oblast „dalekog polja“ u kome je odnos između odgovarajućih komponenti električnih i magnetskih polja konstantan. Međutim, evaluacija IPD postaje izuzetno komplikovana u oblasti „bliskog polja“ [7]. Trenutno je predloženo nekoliko metoda koji koriste Pointing-ov vektor i koje zahtevaju složenija merenja električnog i magnetskog polja [31-34].

Na nižim frekvencijama od 10 GHz, telo korisnika uređaja bežične veze koji radi na udaljenosti od samo nekoliko milimetara, izloženo je „bliskom polju“ tako da su u tim slučajevima potrebna posebna razmatranja za procenu izlaganja na osnovu procene IPD u slobodnom prostoru [35].

Bazne stanice za mobilne komunikacije

Procena RF-EMF usaglašenosti baznih stanica za mobilne komunikacije predstavlja regulatorni zahtev.

Ona obično uključuje poštovanje tzv. granica usaglašenosti (ili zabranjenih zona) izvan kojih je nivo EMF ispod dozvoljenih granica izlaganja.

Metode merenja i numeričke tehnike za određivanje granica usaglašenosti su istraživane i unapređivane tokom proteklih godina. Odabir metode evaluacije zavisi od nekoliko faktora kao što su tip proizvoda, radna frekvencija, udaljenost od predajnih antena itd. Prednosti i nedostaci svakog pristupa su dokumentovani u [36].

Iako će frekvencije ispod 6 GHz i dalje biti okosnica mobilnih komunikacija sa 5G, opseg frekvencija će se vremenom proširiti na više frekvencije do tzv. „milimetarskih talasa“ (npr. za 5G tehnologiju je trenutno interesantan opseg frekvencija između 24,25 i 52,6 GHz) [5]. Merenja SAR-a, gustina snage i jačina polja koje se primenjuju ispod 6 GHz su do sada dobro proučena, međutim, novije studije se fokusiraju na razvoj mernih tehnika koje pokrivaju spektar frekvencija do 100 GHz. Za bazne stanice, usaglašenost se obično procenjuje evaluacijom IPD predajnih antena u dalekom polju. Prema tome, iste procedure merenja se primenjuju i u oblasti milimetarskih talasa.

Posebno treba apostrofirati činjenicu da 5G tehnologija koristi napredne antenske sisteme kao što su masivni višestruki ulaz i više izlaza (massive multiple input multiple output, Ma-MIMO) koji omogućavaju da bazna stanica „usmeri energiju“ tamo gde je potrebno korisniku. Drugim rečima, Ma-MIMO antene se razlikuju od dosadašnjih konvencionalnih antena jer su u stanju da formiraju snop zračenja („beamforming“) u različitim pravcima koje bazna stanica dinamički bira u cilju opsluživanja korisnika. Dakle, formiranje snopa zračenja uključuje dodatnu varijabilnost koja utiče na realnu procenu izlaganja EMF.

Navedena varijabilnost je posebno izražena tokom varijacije saobraćaja. Nekoliko nedavno objavljenih eksperimentalnih studija pokušalo je da utvrdi stvarni maksimalni nivo snage koji doprinosi proceni izlaganja EMF za bazne stanice koje implementiraju formiranje snopa zračenja [38–41]. Treća revizija IEC 62232 [37], uključuje procedure koje se primenjuju za Ma-MIMO bazne stanice. Tokom 2025. godine očekuje se i četvrta revizija navedenog standarda.

Znači, prilikom sprovođenja merenja u cilju usaglašenosti Ma-MIMO instalacije bazne stanice „na licu mesta“ (in situ), trenutnu izloženost će karakterisati velika varijabilnost emitovanih signala usled varijacija u saobraćaju i dinamičkim promenama „formiranog snopa zračenja“. Prema tome, potrebno je koristiti tehnike ekstrapolacije shodno standardu IEC 62232, da bi se procenio maksimum izlaganja EMF na posmatranoj lokaciji. Kao primer, može se koristiti literatura [42–44].

4. EM BEZBEDNOST I NOVI IZVORI

Tokom proteklih godina, pojavile su se nove teme vezane za praćenje elektromagnetne bezbednosti (skraćeno: EM bezbednost) kao posledica pojave novih izvora EMF u razvijenim urbanim sredinama.

RF merenja polja u životnoj sredini

Procene usaglašenosti mobilne opreme (videti tačku 3 ovoga rada) sprovode se u skladu sa procedurama ispitivanja ocenjivanja nivoa izlaganja kako bi se osiguralo da proizvodi ispunjavaju ograničenja pod određenim (laboratorijskim) uslovima. Procena RF EMF životne sredine podrazumeva da se istraži izlaganje EMF u realnim uslovima – „na licu mesta“ (in situ) uzimajući u obzir prisutnost postojećih i novih (5G) telekomunikacija kao i radiodifuznih antena. Posmatrana polja u životnoj sredini nisu samo posledica postojanja telekomunikacionih baznih stanica i radiodifuznih antena već i sve većeg broja mobilnih uređaja u životnom okruženju bez kojih se više ne može zamisliti svakodnevni život ljudi [45], [46].

Za procenu RF-EMF u životnoj sredini, postoje različite metode i procedure merenja. One se kategorišu kao „spot merenja“ korišćenjem širokopojasne ili frekvencijsko-selektivne merne opreme [45], [46]. Koriste se i personalni merači izlaganja (ekspozimetri) sa opcijama za podešavanje određenog „mikrookruženja“ (urbano, ruralno, škole, kuće i javna mesta) koji se koriste prilikom izrade različitih studija i anketa stanovništva [47]. Takođe se koriste i razna prostorno-vremenska mapiranja polja korišćenjem fiksnih i RF senzora postavljenih na različitim lokacijama u gradovima [48].

Procena izlaganja WPT sistema

Tehnike sistema bežičnog prenosa energije (WPT - tehnike) su vezane za bežično napajanje baterija raznih uređaja, uključujući mobilnu elektroniku, kućne aparate i električna vozila. Potražnja za brzim punjenjem povećala je nivoe snage WPT sistema za električna vozila od 3,3 do 22 kW [49], što kao posledicu ima veće „curenje“ EMF nego kod konvencionalnih bežičnih sistema. Samim tim, tokom vremena se javlja sve veća potreba za utvrđivanjem usaglašenosti WPT sistema sa EMF bezbednosnim standardima [1], [2], [6]. Odgovor na navedeno jeste tehnički izveštaj o metodama procene za WPT sisteme, dostupan je u literaturi [49] a standardizacija za WPT sisteme je u toku.

U cilju sprečavanja neželjenih nivoa EMF od WPT sistema trenutno se sprovode istraživanja sa različitim aspektata. U međunarodnom standardu društva automobilskih inženjera [50], zahtevaju se senzori za detekciju stranih predmeta kako bi sistem prenosa

struje mogao da se smanji ili isključi u hitnim slučajevima [51], [52].

5. EM BEZBEDNOST U MEDICINI

Mnoge medicinske procedure koriste EMF za terapiju (npr. dijatermija koja koristi električne struje visokih frekvencija za zagrevanje tkiva), dijagnostičke primene (npr. mikrotalasno snimanje dojki koji predstavlja dodatni alat za mamografiju) i magnetnu rezonancu (MRI) [53].

Po prvi put je, 1946. godine, eksperimentalno opisan MRI [54], da bi 2020. godine postao dijagnostički alat sa preko 100 miliona pregleda širom sveta [55]. Od prve kliničke MR slike dobijene 1980-ih, MRI je evoluirao u suštinski dijagnostički alat za snimanje mozga, zglobova, stomaka i nogu. Iako izloženost EMF tokom MR pregleda rezultira jednim od najvećih RF izlaganja celog tela, dostižući i do 50 puta veća izlaganja u poređenju sa dozvoljenim granicama opšte populacije u životnoj sredini, MRI ima izuzetnu istoriju bezbedne upotrebe EMF-a. Tokom godina, mnogi standardi i dokumentacija sa uputstvima razvijani su u smeru bezbednog i efikasnog korišćenja MR sistema prilikom medicinskih pregleda [56]. Za procenu EMF bezbednosti pacijenata tokom MR pregleda, mora biti napravljena stroga distinkcija između pacijenata sa i bez implantata.

MR EMF bezbednost za pacijente bez implantata

IEC 60601-2-33 [57] standardizuje izlaganje EMF tokom MR pregleda. Pored toga, ICNIRP je objavio tri saopštenja koji se odnose na zaštitu pacijenata tokom MR procedura [58]–[60]. MRI koristi kombinaciju jakog statičkog magnetnog polja (B_0), RF impulsa i povremene promene u magnetnom polju (gradijent polja) u cilju generisanja RF signala koji se kasnije pretvara u sliku. Tipičan MR sistem sa $B_0 = 3\text{ T}$ koristi statičko magnetno polje koje je 100 000 puta jače od Zemljinog magnetnog polja. Ova jaka magnetna polja deluju elektrodinamičkim silama na pokretne jone u krvnim sudovima [61] stacioniranih pacijenata, što dovodi do stvaranja električnih potencijala širom krvnih sudova i smanjenja brzine protoka krvi u aorti za približno 12% na 18 T [62]. Međutim, nisu pronađeni značajni klinički efekti na srčanu frekvenciju, brzinu disanja, sistolni i dijastolni krvni pritisak ili telesnu temperaturu zdravih dobrovoljaca tokom i nakon izlaganja statičkom magnetnom polju od 8 T [63]. Zdravi ljudi koji se neprekidno kreću u jakom statičkom magnetnom polju do 8T, prijavili su osećaj vrtoglavice, glavobolje, mučnine, probleme sa ravnotežom, percepciju treperenja svetlosti u vidnom polju, metalni ukus i povećano vreme reakcije [63] što dovodi do povećanja rizika od slučajnih povreda [64]. Za odrasle i decu stariju od 1 meseca, Američka

agencija za hranu i lekove (FDA) označava uređaje za MRI iznad 8T (4T za decu mlađu od mesec dana) kao uređaje značajnog rizika po zdravlje, bezbednost ili dobrobit a član (21 C.F.R. §812.3), zahteva i izuzeće tokom sprovođenja kliničkog ispitivanja [65]

MR EMF bezbednost za pacijente sa implantatima

Kod pacijenata sa implantatima situacija je znatno komplikovanija. Implantati se obično dele na pasivne implantibilne medicinske (PIMD) i aktivne implantibilne medicinske (AIMD). Za pravilnu identifikaciju i bezbedno rukovanje, PIMD i AIMD su označeni kao „MR Safe“ (bezbedno), „MR Unsafe“ (nije bezbedno) ili „MR Conditional“ (uslovno – omogućava bezbedno snimanje pod vrlo specifičnim uslovima navedenim na etiketi uređaja) [66].

Na osnovu fizičke prirode njihove interakcije, opasnosti za pacijente sa PIMD-om u okruženju MR uređaja mogu se grupisati u tri kategorije:

- Sile i momenti na feromagnetnim objektima usled statičkog magnetnog polja B_0 ;
- Zagrevanje tkiva usled indukovane RF struje u implantatu i
- Artefakti slike koji zaklanjaju region od interesa ili dovode do pogrešnog tumačenja slike.

Generalno, PIMD i AIMD testovi se izvode eksperimentalno, računski ili njihovom kombinacijom [67].

6. POTREBNA ISTRAŽIVANJA

Potrebe za istraživanjima o oblasti EM bezbednosti ljudi sumirane su od različitih međunarodnih tela za standardizaciju. Teme se uglavnom odnose na modelovanje ljudskog tela, neophodnost tačnije dozimetrije što uključuje smanjenje nesigurnosti u korelaciji veličine polja sa potkrepljenim biološkim efektima. Procene izlaganja novim LF i RF tehnologijama i istovremeno izlaganje većem broju izvora, takođe predstavljaju istraživački izazov u budućnosti. Tako se obezbeđuje više korisnih naučnih podataka i poboljšati opravdanja za granice izlaganja, posebno na frekvencijama iznad 6 GHz i u opsegu srednjih frekvencija (300 Hz do 100 kHz) koji će u budućnosti biti sve više eksploatisani od strane novih tehnologija.

Nove mobilne bežične tehnologije, kao što su 5G/6G i dalje, kontinuirano se razvijaju. Njihova bezbedna upotreba zahteva ne samo stabilne kratkoročne i dugoročne granice izlaganja već i adekvatno standardizovane metode usaglašenosti. Stoga je u narednih 10 godina potrebno razvijati dodatne relevantne metode evaluacije izlaganja vezane za opseg frekvencija od 100 do 300 GHz. Međunarodna standardizacija će nastaviti da igra ključnu ulogu za usaglašenost global-

nih procedura ispitivanja radi utvrđivanja usaglašenosti sa trenutnim i budućim bežičnim tehnologijama. Jedan od izazova sa kojim se suočava standardizacija biće da se definišu uslovi ispitivanja koji obezbeđuju stabilni ali realistični uslovi izlaganja zasnovani na stvarnim životnim situacijama a ne samo oslanjanje na teorijske i moguće pretpostavke. Dakle, metode procene je potrebno razvijati u skladu sa novim istraživanjima poštujući različita realna scenarija.

LITERATURA

- [1] Bailey WH et al. Synopsis of IEEE std C95.1 TM-2019 'IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to electric, magnetic, and electromagnetic fields, 0 Hz to 300 GHz. *IEEE Access*, vol. 7, p.p. 171346–171356, 2019.
- [2] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz), *Health Phys.* vol. 99, no. 6, pp. 818–836, 2010.
- [3] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz), *Health Phys.* vol. 118, no. 5, pp. 483–524, 2020.
- [4] World Health Organization (WHO). Research agenda for radiofrequency fields: Dostupno na: <https://www.who.int/publications/i/item/who-research-agenda-for-radiofrequency-fields>
- [5] Hirata A et al. Assessment of Human Exposure to Electromagnetic Fields: Review and Future Directions, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 63, no. 5, pp. 1619–1630, 2021.
- [6] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Principles for non-ionizing radiation protection *Health Phys.* vol. 118, no. 5, pp. 477–482, 2020.
- [7] Vulević B. Određivanje nivoa radiofrekvencijskog zračenja u okolini baznih stanica mobilne telefonije. Magistarski rad. Elektrotehnički fakultet u Beogradu. 2006.
- [8] Dawson TW. and. Stuchly MA. Highresolution organ dosimetry for human exposure to lowfrequency magnetic fields, *IEEE Trans. Mag.* vol. 34, no. 3, pp. 708–718, 1998.
- [9] Wang W and Eisenberg S. R. A three-dimensional finite element method for computing magnetically induced currents in tissues, *IEEE Trans. Mag.* vol. 30, no. 6, pp. 5015–5023, 1994.
- [10] Gabriel S, Lau R. W, and Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz, *Phys. Med. Biol.* vol. 41, no. 11, pp. 2251–2269, 1996.
- [11] G. Schmid, S. Cecil, and R. Überbacher. The role of skin conductivity in a low frequency exposure assessment for peripheral nerve tissue according to the ICNIRP 2010 guidelines, *Phys. Med. Biol.* vol. 58, no. 13, pp. 4703–4716, 2013.
- [12] Soldati M and Laakso I. Effect of electrical conductivity uncertainty in the assessment of the electric fields induced in the brain by exposure to uniform magnetic fields at 50 Hz, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 222297–222309, 2020.
- [13] Hirata A and Fujiwara O. The correlation between mass-averaged SAR and temperature elevation in the human head model exposed to RF near-fields from 1 to 6 GHz, *Phys. Med. Biol.* vol. 54, no. 23, 2009.
- [14] Hashimoto Y et al. On the averaging area for incident power density for human exposure limits at frequencies over 6 GHz, *Phys. Med. Biol.* vol. 62, no. 8, pp. 3124–3138, 2017.
- [15] Brockow T, Wagner A, Franke A, Offenbächer M., and. Resch K. L, A randomized controlled trial on the effectiveness of mild water-filtered near infrared whole-body hyperthermia as an adjunct to a standard multimodal rehabilitation in the treatment of fibromyalgia, *Clin. J. Pain*, vol. 23, no. 1, pp. 67–75, 2007.
- [16] Hirata A et al. FDTD analysis of human Bodycore temperature elevation due to RF far-field energy prescribed in the ICNIRP guidelines, *Phys. Med. Biol.* vol. 52, no. 16, pp. 5013–5023, 2007.
- [17] Foster K R et al. Modeling tissue heating from exposure to radiofrequency energy and relevance of tissue heating to exposure limits: Heating factor, *Health Phys.* vol. 115, no. 2, pp. 295–307, 2018.
- [18] Ziskin M. C et al. Tissue models for RF exposure evaluation at frequencies above 6 GHz, *Bioelectromagnetics*, vol. 39, no. 3, pp. 173–189, 2018.
- [19] Sasaki K et al. Monte Carlo simulations of skin exposure to electromagnetic field from 10 GHz to 1 THz, *Phys. Med. Biol.* vol. 62, no. 17, pp. 6993–7010, 2017.
- [20] Li K et al. Relationship between power density and surface temperature elevation for human skin exposure to EM waves with oblique incidence angle from 6 GHz to 1 THz, *Phys. Med. Biol.* vol. 64, no. 6, 2019.
- [21] Laakso I et al. Computational dosimetry of the human head exposed to near-field microwaves using measured blood flow, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* vol. 59, no. 2, pp. 739–746, Apr. 2017.
- [22] Kanezaki A et al. Parameter variation effects on temperature elevation in a steady-state, one-dimensional thermal model for millimeter wave exposure of one-and three-layer human tissue, *Phys. Med. Biol.* vol. 55, no. 16, pp. 4647–4659, 2010.

- [23] Vulević B. Određivanje jačine električnog polja visokih učestanosti primenom širokopojsnih merenja, *Tehnika, Savez inženjera i tehničara Srbije*, Vol.72, No. 5, p.p. 701–706, 2017.
- [24] European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC). Basic standard on measurement and calculation procedures for human exposure to electric, magnetic and electromagnetic fields (0Hz – 300 GHz), CENELEC EN 50413, 2019.
- [25] Bassen H and Smith G. “Electric field probes—A review, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 31, no. 5, pp. 710–718, 1983.
- [26] Measurement Procedure for the Assessment of Specific Absorption Rate of Human Exposure to Radio Frequency Fields From Hand-Held and Body-Worn Wireless Communication Devices: Human Models, Instrumentation and Procedures (Frequency Range of 4 MHz to 10 GHz), IEC/IEEE 62209-1528, 2020.
- [27] Determining the Peak Spatial-Average Specific Absorption Rate (SAR) in the Human Body From Wireless Communications Devices, 30 MHz to 6 GHz - Part 1: General Requirements for Using the Finite Difference Time-Domain (FDTD) Method for SAR Calculations, IEC/IEEE 62704-1, 2017.
- [28] Determining the Peak Spatial-Average Specific Absorption Rate (SAR) in the Human Body From Wireless Communication Devices, 30 MHz to 6 GHz – Part 4: General Requirements for Using the Finite Element Method for SAR Calculations, IEC/IEEE 62704-4, 2020.
- [29] Determining the Peak Spatial-Average Specific Absorption Rate (SAR) in the Human Body From Wireless Communications Devices, 30 MHz to 6 GHz - Part 2: Specific Requirements for Finite Difference Time Domain (FDTD) Modelling of Exposure From Vehicle Mounted Antennas, IEC/IEEE 62704-2, 2017.
- [30] Determining the Peak Spatial-Average Specific Absorption Rate (SAR) in the Human Body From Wireless Communications Devices, 30 MHz to 6 GHz - Part 3: Specific Requirements for Using the Finite Difference Time Domain (FDTD) Method for SAR Calculations of Mobile Phones, IEC/IEEE 62704-3, 2017.
- [31] Measurement Procedure for the Evaluation of Power Density Related to Human Exposure to Radio Frequency Fields From Wireless Communication Devices Operating Between 6 GHz and 100 GHz, IEC TR63170, 2018.
- [32] Pfeifer S et al. Total field reconstruction in the near field using pseudo-vector E-field measurements, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 61, no. 2, pp. 476–486, 2019.
- [33] Sasaki, K et al. Error analysis of a near-field reconstruction technique based on plane wave spectrum expansion for power density assessment above 6 GHz, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 11591–11598, 2019.
- [34] Lundgren J et al. A near-field measurement and calibration technique: Radiofrequency electromagnetic field exposure assessment of millimeter-wave 5G devices, *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 63, no. 3, pp. 77–88, 2021.
- [35] Assessment of Power Density of Human Exposure to Radio Frequency Fields From Wireless Devices in Close Proximity to the Head and Body (Frequency Range of 6 GHz to 300 GHz) Part 1: Measurement Procedure, IEC/IEEE 63195-1 FDIS, 2021.
- [36] Determination of RF Field Strength, Power Density and SAR in the Vicinity of Radiocommunication Base Stations for the Purpose of Evaluating Human Exposure, Edition 2.0, IEC 62232, 2017.
- [37] Determination of RF Field Strength, Power Density and SAR in the Vicinity of Radiocommunication Base Stations for the Purpose of Evaluating Human Exposure, Edition 3.0, IEC 62232, 2022.
- [38] Thors B et al. Time-averaged realistic power levels for the assessment of radio frequency exposure for 5G radio base stations using massive MIMO, *IEEE Access*, vol. 5, pp. 19711–19719, 2017.
- [39] Pinchera D et al. Compliance boundaries of 5G massive MIMO radio base stations: A statistical approach, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 182787–182800, 2020.
- [40] Shikhantsov S et al. Ray-tracing-based numerical assessment of the spatiotemporal duty cycle of 5G massive MIMO in an outdoor urban environment, *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 21, 2020.
- [41] Werner R et al. A comparison between measured and computed assessments of the RF exposure compliance boundary of an in-situ radio base station massive MIMO antenna, *IEEE Access*, vol.7, pp. 170682–170689, 2019.
- [42] Keller H. On the assessment of human exposure to electromagnetic fields transmitted by 5G NR base stations, *Health Phys.*, vol. 117, no. 5, pp. 541–545, 2019.
- [43] Aerts S et al, In-situ measurement methodology for the assessment of 5G NR massive MIMO base station exposure at sub-6 GHz frequencies, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 184658–184667, 2019.
- [44] Adda S et al. A theoretical and experimental Investigation on the measurement of the electromagnetic field level radiated by 5G base stations, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 101448–101463, 2020.
- [45] Dürrenberger G et al. EMF monitoring Concepts, activities, gaps and options, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 11, no. 9, pp. 9460–9479, 2014.
- [46] Joseph W et al. In situ LTE exposure of the general public: Characterization and extrapolation, *Bio-electromagn.*, vol. 33, no. 6, pp. 466–475, 2012.

- [47]Röösli M et al. Conduct of a personal radiofrequency electromagnetic field measurement study: Proposed study protocol, *Environ. Health*, vol. 9, no. 1, 2010, Art. no. 23.
- [48]Aerts M et al. Assessment of long-term spatio-temporal radiofrequency electromagnetic field exposure, *Environ. Res.*, vol. 161, pp. 136–143, 2018.
- [49]Assessment Methods of the Human Exposure to Electric and Magnetic Fields From Wireless Power Transfer Systems - Models, Instrumentation, Measurement and Numerical Methods and Procedures (Frequency Range of 1 kHz to 30 MHz), IEC PAS 63184, 2021.
- [50]Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-In/Electric Vehicles and Alignment Methodology, SAE J2954, 2016.
- [51]Xia J et al. Foreign object detection for electric vehicle wireless charging, *Electronics*, vol. 9, no. 5, 2020, Art. no. 805.
- [52]Chu SY and Avestruz AT. Electromagnetic model-based foreign object detection for wireless power transfer, in *Proc. IEEE Workshop Control Model. Power Electron*, 2019, pp. 1–8.
- [53]Mattsson MO and Simkó M, Emerging medical applications based on non-ionizing electromagnetic fields from 0 Hz to 10 THz, *Med. Dev.*, vol. 12, 2019, Art. no. 347.
- [54]Purcell EM, Torrey HC, and Pound RV. Resonance absorption by nuclear magnetic moments in a solid,” *Phys. Rev*, vol. 69, no. 1–2, 1946, Art. no. 37.
- [55]Health care utilisation: Diagnostic exams: Magnetic resonance imaging exams, total, Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD), Accessed: Aug. 10, 2021. [Online]. Available: <https://stats.oecd.org/>
- [56]Kainz W et al. MRI Standards and Guidance Documents from the United States, Food and Drug Administration (MRI Bioeffects, Safety, and Patient Management, Ch. 28.). Playa Del Rey, CA, USA: *Biomed. Res. Pub. Gr.*, 2020.
- [57]Medical Electrical Equipment – Part 2-33: Particular Requirements for the Basic Safety and Essential Performance of Magnetic Resonance Equipment for Medical Diagnosis, IEC 60601-2-33, 2015.
- [58]ICNIRP, Medical magnetic resonance (MR) procedures: Protection of patients, *Health Phys*, vol. 87, no. 2, pp. 197–216, 2004.
- [59]ICNIRP, “Amendment to the ICNIRP Statement on medical magnetic resonance (MR) procedures: Protection of patients”, *Health Phys*, vol. 97, no. 3, pp. 259–261, 2009.
- [60]ICNIRP, ICNIRP statement on diagnostic devices using non-ionizing radiation: Existing regulations and potential health risks, *Health Phys*, vol. 112, no. 3, pp. 305–321, 2017.
- [61]Kainz W et al. Development and validation of a Magnetohydrodynamic solver for blood flow analysis, *Phys. Med. Biol*, vol. 55, no. 23, pp. 7253–7261, 2010.
- [62]Kyriakou A et al. Patient-specific simulations and measurements of the magneto-hemodynamic effect in human primary vessels, *Physiol. Meas*, vol. 33, no. 2, pp. 117–130, 2012.
- [63]Chakeres DW et al. Effect of static magnetic field exposure of up to 8 tesla on sequential human vital sign measurements, *J. Magn. Reson. Imag*, vol. 18, no. 3, pp. 346–352, 2003.
- [64]A. Ghadimi-Moghadam et al., Does exposure to static magnetic fields generated by magnetic resonance imaging scanners raise safety problems for personnel?, *J. Biomed. Phys. Eng*, vol. 8, no. 3, pp. 333–336, 2018.
- [65]Criteria for significant risk investigations of magnetic resonance diagnostic devices, Guidance for Industry and Food and Drug Administration Staff, FDA, 2014.
- [66]Standard practice for marking medical devices and other items for safety in the magnetic resonance environment, ASTM F2503–20, 2020.
- [67]Feng S et al. A technique to evaluate MRI-induced electric fields at the ends of practical implanted lead, *IEEE Trans. Microw. Theory Techn*, vol. 63, no. 1, pp. 305–313, Jan. 2015.

SUMMARY

STANDARDIZATION IN THE FIELD OF HUMAN EXPOSURE TO HIGH FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELDS: A STARTING POINT FOR FUTURE CHALLENGES

This paper provides an overview of standardization activities and scientific studies related to the assessment of human exposure to electromagnetic fields (EMF). The paper discusses standards related to exposure to EMF of high frequencies (above 100 kHz) as well as related standards for product compliance. An analysis of standards in medical and non-medical cases of human EMF exposure was performed. Finally, future research directions and research needs for safety in the domain of human EMF exposure are summarized.

Key Words: human exposure, compliance assessment, calculation methods, electromagnetic safety, medical safety, human body modeling