

Poklicna izpostavljenost elektromagnetnim sevanjem

Bor Kos^{1,2}, Blaž Valič², Tadej Kotnik¹, Peter Gajšek²

¹ Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani

² INIS – Inštitut za neionizirna sevanja, Pohorskega bataljona 215, Ljubljana
E-pošta: bor.kos@fe.uni-lj.si

Povzetek. V članku so predstavljeni pomembni viri elektromagnetnih sevanj (EMS) na delovnih mestih v frekvenčnem območju od 0 do 300 GHz glede na merila evropske Direktive 2004/40/ES o minimalnih zdravstvenih in varnostnih zahtevah v zvezi z izpostavljenostjo delavcev tveganjem, ki nastajajo zaradi fizikalnih dejavnikov. V uvodu so predstavljeni znani znanstveno dokazani vplivi EMS na ljudi, v nadaljevanju pa so identificirana kritična delovna mesta. Zaporedoma so predstavljeni vplivi in viri statičnih polj, nizkofrekvenčnih ter visokofrekvenčnih EMS. Za vsako frekvenčno območje so predstavljena najbolj izpostavljena delovna mesta in znane vrednosti izpostavljenosti v primerjavi z mejnimi vrednostmi, ki jih določa Direktiva 2004/40/ES.

Ključne besede: poklicna izpostavljenost, neionizirna elektromagnetna sevanja, Direktiva 2004/40/ES, varnost pri delu

Occupational exposure to electromagnetic fields

Extended abstract. The paper presents the most significant sources of occupational exposure to electromagnetic fields (EMF) in the frequency range from 0 to 300 GHz, according to the criteria established in the Directive 2004/40/EC. The directive will fill the blank spot in the Slovenian legislation which doesn't provide any standard for limiting the workers' occupational exposure to EMFs, unlike is the case with the general public for which restrictions even stricter than those recommended by the ICNIRP are in place.

In the introduction, the paper summarizes the mechanisms of interaction of EMF with the human body (Table 1). Next, the rationale and scientific basis behind the limits adopted in the Directive are summarized. The exposure effects range from perception of metallic taste on the tongue, nausea and vertigo experienced by people working in strong static magnetic fields. At extremely low-frequency EMFs, the possible unwanted effects include stimulation of the central nervous system, manifesting itself as magnetically induced phosphenes or nerve/muscle stimulation. At higher frequencies, excessive heating can be caused by the EMF depositing energy in the human body which results either in whole-body core temperature rise or local tissue overheating. Different approaches to safety evaluation at workplaces are presented next. It can be performed through simple administrative measures, field measurements in free space or in body-simulating phantoms, and numerical modeling and simulations.

In the next section, the most significant EMF sources in the workplace as reported in the literature are presented and summarized in Table 2. For static magnetic fields, the strongest sources (and some of the most problematic in terms of compatibility with the 2004/40/EC Directive) are magnetic resonance imaging devices. Other significant sources include electrochemical processes. At low frequencies (1 Hz – 300 Hz), power distribution and generation systems, welding equipment and induction furnaces can all produce EMF in excess of the action values as required by the 2004/40/EC Directive. At intermediate frequencies (300 Hz – 10 MHz), dielectric heating, medical diathermy and electronic article

surveillance devices can all produce EMF in excess of the action values, although the published research does not indicate that exposure limits can be exceeded. At high frequencies (above 10 MHz), several significant and potentially dangerous sources are operating. Among them there are radio and television broadcasting transmitters, dielectric welding equipment, microwave drying equipment, radars and mobile communications equipment, all of which are capable of emitting fields in excess of the action values, sometimes even significantly exceeding the exposure limits. All these data suggest that workplaces where strong EMFs can be expected should be assessed either by measurements or modeling and simulation to ensure that the electromagnetic fields are within the accepted standards and thus not detrimental to the workers' health.

Keywords: occupational exposure, electromagnetic fields, 2004/40/EC Directive, occupational safety

1 Uvod

Elektromagnetna sevanja (EMS) so predvsem v zadnjem času kontroverzna tema, ki pogosto sproža javne razprave [1]. Dejstvo je, da lahko EMS visokih jakosti povzročajo akutne negativne vplive na zdravje, ki pa se razlikujejo glede na frekvenco [2]. Pri nižjih frekvencah (do približno 1 MHz) se pojavlja predvsem stimulacija vzdražnih tkiv, ki je posledica induciranelega električnega polja v okolici živčnih celic. Tovrstna stimulacija se izkazuje kot bliskanje pred očmi ali občutek mravljinčenja v okončinah. Pri višjih frekvencah pa je pomembno predvsem segrevanje posameznih tkiv, organov ali celotnega telesa zaradi absorpcije energije v bioloških tkivih. Pride lahko do segrevanja celotnega telesa prek meja, ki jih je telo še sposobno uravnati s termoregulacijo ali do opeklin na lokalno izpostavljenih tkivih. Zaposneli učinki izpostavljenosti pri manjših jakostih za zdaj niso

dokazani, saj niso znani morebitni fizikalni mehanizmi vpliva, čeprav obstaja nekaj epidemioloških raziskav, ki statistično nakazujejo na možnost povečanja tveganja za nastanek nekaterih oblik raka [3].

V Sloveniji področje varovanja zdravja ljudi pred vplivi neionizirnih elektromagnetnih sevanj ureja Uredba o elektromagnetnem sevanju v naravnem in življenjskem okolju [4], področje poklicne izpostavljenosti pa še ni urejeno. To se bo predvidoma spremenilo v letu 2012, ko naj bi v Evropski uniji začela veljati Direktiva 2004/40/ES [5] (angl: *Directive 2004/40/ES*; v nadaljevanju: Direktiva), ki določa minimalne standarde za varstvo zaposlenih. Ta povzema mejne vrednosti po Smernicah Mednarodne komisije za varstvo pred neionizirnimi sevanji – ICNIRP (angl: *ICNIRP Guidelines*; v nadaljevanju: Smernice) [2], ki temeljijo na znanstveno dokazanih akutnih vplivih na ljudi, morebitnih zapoznelih vplivov dolgoročne izpostavljenosti pa ne upoštevajo, saj za to ni dovolj jasnih ugotovitev. Zaradi pomanjkljivosti v znanju imajo Smernice vgrajene varnostne faktorje (10 za poklicno izpostavljenost in 50 za izpostavljenost prebivalstva), ki naj bi zagotovili ustrezno varstvo pred vsemi negativnimi učinki EMS. Delovna mesta, kjer so mejne vrednosti presežene, so relativno redka, vendar je treba EMS kljub varnostnim faktorjem kot dejavnik tveganja upoštevati in preventivno ukrepati.

2 Opozorilne vrednosti in mejne vrednosti izpostavljenosti ter njihovo vrednotenje

V Direktivi nastopata dve vrsti omejitev glede jakosti elektromagnetnih polj. Prve so *opozorilne vrednosti* (angl. *action value*), ki se nanašajo na nemoteno polje v

praznem prostoru, druge pa so *mejne vrednosti izpostavljenosti* (angl. *exposure limit*), ki se nanašajo na dozimetrične količine v telesu, kot so gostota toka, stopnja specifične absorpcije in gostota pretoka moči. V Smernicah se namesto izraza opozorilna vrednost uporablja izraz *izvedena mejna vrednost* (angl. *reference level*), namesto mejne vrednosti izpostavljenosti pa kar *mejna vrednost* (angl. *basic restriction*).

2.1 Mehanizmi interakcije ter opozorilne in mejne vrednosti izpostavljenosti

Utemeljitev za mejne vrednosti izpostavljenosti izhaja iz frekvenčno odvisnih neprijetnih ali škodljivih učinkov, ki tipično izkazujejo pragovno naravo. Od nekega povprečnega praga, nad katerim lahko pride do neželene stimulacije ali poškodbe, zakonodaja uveljavlja še dodatne varnostne faktorje. Ker se mehanizmi interakcije EMS s človeškim telesom spreminjajo s frekvenco, so tudi opozorilne in mejne vrednosti izpostavljenosti ustrezno odvisne od frekvence. Mehanizmi interakcije in učinki glede na frekvence so povzeti v tabeli 1. Opozorilne vrednosti so iz mejnih vrednosti izpostavljenosti pridobljene na podlagi meritev in izračunov, zato se pri teh izpeljavah vedno upoštevajo najslabše razmere, kar zagotavlja, da v primerih, ko opozorilne vrednosti niso presežene, tudi mejne vrednosti izpostavljenosti niso presežene.

V letu 2004 sprejeta Direktiva 2004/40/ES omejuje statična magnetna polja na 500 mT. Taka opozorilna vrednost bi pomenila velike omejitve pri izvajanju magnetno resonančnega slikanja, a zanjo ni bilo znanstvene utemeljitve. Zato so skrajni rok za uvajanje direktive prestavili za štiri leta, na leto 2012, v tem času

Tabela 1: Znanstveno ugotovljeni mehanizmi interakcij in bioloških učinkov zaradi izpostavljenosti EMS

	Frekvenca	Mehanizmi interakcij	Učinki	Dozimetrične količine
Statično magnetno polje	0 Hz	Magnetomehanska interakcija (spreminjanje magnetnega pretoka zaradi premikanja v gradientu polja).	Kovinski okus v ustih in vrtoglavica pri premikanju v gradientu polja. Lorentzova sila učinkuje na električno nabite delce (npr. v krvi).	Gostota magnetnega pretoka.
EMS nizkih in srednjih frekvenc	Do nekaj MHz	Nabiranje naboja na površini telesa. Nastanek električnega polja in električnega toka v telesu.	Stimulacija vzdražnih tkiv.	Gostota toka znotraj telesa. Inducirano električno polje znotraj telesa.
EMS srednjih in visokih frekvenc	Od nekaj kHz do nekaj GHz	Nehomogena (lokalna) absorpcija visokofrekvenčne energije.	Segrevanje površine telesa – koža. Segrevanje celega telesa – dvig temperature v posameznih organih in celem telesu.	Stopnja specifične absorpcije (SAR). Gostota pretoka moči.

pa se opravljajo nadaljnje raziskave in iščejo smiselne in strokovne rešitve tega vprašanja. Navedena opozorilna vrednost za statična magnetna polja pomeni ekstrapolacijo Smernic iz leta 1998 [2], ki se nanašajo na izmenična polja, na enosmerne razmere. V letu 2009 pa so izšle nove Smernice [6], ki uvajajo tudi omejitve za statična magnetna polja in postavljajo zgornjo mejo gostote magnetnega pretoka v praznem prostoru na 2 T za zaposlene oziroma 8 T pod posebnimi pogoji. Tako visoke gostote magnetnega pretoka nastajajo predvsem v bližini naprav za magnetno resonančno slikanje.

Statična magnetna polja sicer ne glede na gostoto magnetnega pretoka (tudi pri zelo visokih vrednostih le-te) neposredno ne oddajajo energije človeškemu telesu, vseeno pa lahko na človeško telo vplivajo na različne načine. Tipični primeri so kovinski okus v ustih, občutek slabosti in vrtenje pri hitrem premikanju v velikem gradientu polja, pri zelo visokih poljih pa se lahko zmanjša pretok krvi – pri magnetnem polju nad 20 T se lahko pretok krvi zmanjša za več kot 10 % [6].

Na frekvenčnem območju od nekaj Hz pa do 1 MHz je omejevanje izpostavljenosti namenjeno preprečevanju stimulacije vzdražnih celic, kot so živčne in mišične celice. Zaradi svoje podolgovate oblike so najbolj občutljive živčne celice, predvsem tiste v centralnem živčnem sistemu. Živčne celice lahko stimulira inducirana napetost, ki je posledica električnega polja v telesu. Pri nizkih frekvencah je človeško telo dober prevodnik, zato je električno polje v telesu do šest velikostnih razredov manjše od zunanjega. Posledično tudi silnice električnega polja iz telesa izhajajo tako rekoč pod pravim kotom. Zmanjšanje električnega polja v telesu povzroča površinski naboj na človeškem telesu, v izmeničnem zunanjem polju pa se ta naboj spreminja, kar v telesu ustvari električni tok in hkrati tudi majhno električno polje. Na magnetno polje pa človeško telo ne vpliva bistveno. Na stimulacijo živčnih celic lahko magnetno polje vpliva prek Faradayeve indukcije in posledično vrtinčnih tokov v telesu. Inducirano električno polje je načeloma največje, kadar so silnice magnetnega polja pravokotne na telo (usmerjene so od prsi proti hrbtu ali nasprotno), vendar je močno odvisno od vira polja, lastnosti okolice in položaja telesa.

Omejitve v telesu se v izvornih Smernicah nanašajo na gostoto toka, vendar se bo to v prihodnosti verjetno spremenilo v inducirano električno polje. Ti dve količini sta sicer premosorazmerni. V vsakem primeru je treba vrednosti polja v telesu povprečiti prek določenega volumna, ker je treba za zaznaven učinek vzbuditi več celic. Vrednosti so trenutno omejene na 2 mA/m², v prihodnosti pa se bo to verjetno prevedlo na vrednost okoli 20 mV/m v možganih in nekoliko višjo vrednost v drugih tkivih [7].

V frekvenčnem območju med 100 kHz in 300 GHz se mejne vrednosti izpostavljenosti nanašajo na segrevanje tkiva zaradi absorpcije energije na enoto mase, ki je izražena s stopnjo specifične absorpcije (SAR). SAR je

omejena na dveh različnih ravneh: lokalno in v celem telesu. Lokalna omejitev se nanaša na povprečje preko 10 g tkiva, kar je tolikšen obseg tkiva, ki še bistveno prispeva k ohlajanju najbolj izpostavljenega dela prek difuzije toplote in ohlajanja prek krvi. Celotelesna omejitev pa omejuje izpostavljenost na ravni, kjer je telo še sposobno vzdrževanja temperature s termoregulacijo. Lokalna SAR je omejena na 10 W/kg (2 W/kg za prebivalstvo), omejitve za celotelesno SAR pa so 0,4 W/kg (0,08 W/kg za prebivalstvo).

V območju srednjih frekvenc (med 100 kHz in nekaj MHz) je prisotna kombinacija stimulativnih in termičnih učinkov, zato v tem frekvenčnem območju veljata obe formulaciji mejnih vrednosti.

Opozorilne vrednosti v Direktivi so prav tako frekvenčno odvisne in omejujejo največje električno oziroma magnetno polje v praznem prostoru. Najnižje dovoljene vrednosti so v območju 70-100 MHz, ker lahko pri izpostavljenosti v daljnem polju nastane celotelesna resonanca.

Pri frekvencah nad 10 GHz pa se tako rekoč vsa energija absorbira v vrhnjih plasteh kože, zato je tam omejena le gostota pretoka moči, opozorilne vrednosti električnega in magnetnega polja pa so izpeljane za daljnje polje.

2.2 Vrednotenje izpostavljenosti

Pri vrednotenju izpostavljenosti obstajata dva nivoja. Prvi nivo vrednotenja je ugotavljanje skladnosti z opozorilnimi vrednostmi. Za to se izvedejo meritve ali numerični izračuni v praznem prostoru. Če poljske jakosti ne presegajo opozorilnih vrednosti, tudi mejne vrednosti izpostavljenosti znotraj telesa zagotovo niso presežene, saj so opozorilne vrednosti postavljene za najslabše razmere. Drugi nivo vrednotenja, ki ga uporabljamo, če so opozorilne vrednosti presežene, pa so meritve oziroma izračuni dozimetričnih količin v telesu. Te meritve so sicer zahtevnejše, vendar je mogoče le z njimi preveriti, ali je določeno delovno mesto, kjer so opozorilne vrednosti presežene, varno.

V telesu je mogoče neposredno meriti le inducirani tok skozi presek neke okončine, za kar uporabimo ustrezne tokovne klešče. Tako lahko na primer izmerimo tok, ki ga povzroča izmenično električno polje, kadar oseba stoji pod visokonapetostnim vodnikom. Pri višjih frekvencah dozimetričnih količin neposredno v telesu ni mogoče izmeriti, zato se kot nadomestek uporabljajo približki človeškega telesa, napolnjeni z raztopino z dielektričnostjo in prevodnostjo, ki sta podobni tistima v človeškem tkivu. V taki tekočini je mogoče uporabiti robotizirane sonde majhnih dimenzij, ki prečešajo celoten volumen, poiščejo mesta z najvišjimi vrednostmi SAR in v okolici teh točk izmerijo še bolj fino povprečje preko volumna, ki ustreza 10 gramom tekočine. Identičen postopek se uporablja tudi za preverjanje skladnosti mobilnih telefonov z mednarodnimi predpisi o največji dopustni SAR.

Poleg meritev je zelo aktualen še numerični pristop, pri katerem uporabimo zmogljiv računalnik za reševanje Maxwellovih enačb znotraj anatomskega modela telesa z eno izmed numeričnih metod (končne diference, končni elementi, ...). Ta pristop omogoča upoštevanje razlik med prevodnostmi in dielektričnostmi različnih tkiv in tudi neizotropnosti nekaterih tkiv, je pa trebanatančno poznati tudi vir sevanja in njegovo delovanje, saj je rešitev zelo odvisna od točnosti vhodnih podatkov [8]. Pri visokih frekvencah se lahko uporablja več različnih metod, med najpogosteje uporabljanimi za dozimetrične izračune pa je metoda končnih diferenc v časovnem prostoru [9].

3 Pregled virov EMS na delovnih mestih

3.1 Statična magnetna polja

Čeprav Direktiva za statična magnetna polja navaja le opozorilno vrednost, lahko tudi v teh poljih pride do inducirane izmeničnega toka – v nehomogenem magnetnem polju je za to dovolj že premikanje telesa, v homogenem pa se to zgodi pri zasukih delov telesa, npr. okončin [10]. Tako lahko pri uporabi 3 T magneta za magnetno resonančno slikanje znaša inducirano električno polje v telesu do 0,17 V/m (vrtenje telesa pred izvrtino magneta, polje na trebuhu) oziroma do 0,04 V/m (na jeziku pri kimanju), kar pa je oboje manj od predvidenih prihodnjih Smernic za nizke frekvence [11]. Kljub temu formalno še ni jasno, ali tako nastali izmenični tokovi sodijo pod omejitve za izmenične tokove v Direktivi ali ne.

Mejna vrednost izpostavljenosti, ki znaša 2 T, pri običajnih aktivnostih delavcev v bližini MR naprave z notranjo gostota magnetnega pretoka 4 T ne bo presežena, razen če se delavec nagiba v jedro magneta. Raziskave kažejo, da lahko gibanje zdravstvenih delavcev s hitrostjo 1 m/s med rutinskimi kliničnimi aktivnostmi v območju od 0,5 m do 1 m v statičnem polju MR tomografa z jakostjo od 1,5 do 7 T povzroči tokove v centralnem živčnem sistemu (še posebno v glavi), ki presegajo dovoljene mejne vrednosti [12]. Pri gibanju s hitrostjo le 0,5 m/s je sprememba polja približno 0,5 T/s in po izračunih se v človeškem telesu inducira tok z gostoto do 400 mA/m² (1000 % mejne vrednosti), kar presega priporočeno mejno vrednost.

Druge panoge, kjer so vrednosti za statična polja lahko presežene, so na primer elektrokemijski procesi, ki temeljijo na elektrolizi in uporabljajo velike enosmerne tokove. Pri enosmernem toku 60 kA lahko 10 cm od vodnika gostota magnetnega pretoka doseže 120 mT (60 % opozorilne vrednosti), tipične vrednosti na mestih, kjer se običajno zadržujejo delavci, pa so 8-15 mT (7,5 %). Pri teh procesih se izkažejo za bistveno bolj problematične harmonske komponente s frekvencami 300, 600 in 900 Hz, ki nastajajo zaradi močnostnih usmernikov, ki nimajo idealnega filtriranja. Te harmonske komponente lahko v seštevku dosežejo

tudi do 800 % (v bližini usmernikov) ali do 500 % (v okolici vodnika) opozorilnih vrednosti [13],[14].

Med vire statičnih magnetnih polj se v Sloveniji uvrščajo tudi železnice, kjer se uporablja enosmerna napetost 3 kV. Magnetno polje nastaja predvsem v bližini pogonskih motorjev in napajalnih kablov, vendar glede na pričakovane tokove in njim pripadajoče magnetno polje iz Biot-Savartovega zakona sledi, da opozorilne vrednosti niso presežene – gostota magnetnega pretoka v voznikovi kabine je manjša od 100 mT (20 % opozorilne vrednosti).

3.2 Nizke frekvence (nekaj Hz – 300 Hz)

Pri nizkih frekvencah so največji viri električnih in magnetnih polj prisotni v elektroenergetiki. V stikališčih je lahko električno polje preseženo predvsem v okolici visokonapetostnih vodnikov, magnetno polje pa v bližini nizkonapetostnih zbiralk pri transformatorjih in generatorjih v elektrarnah, kjer je zaradi velikih tokov prisotno močno magnetno polje. V visokonapetostnih 400 kV stikališčih pri tipičnih opravilih nastajajo električna polja do 40 kV/m (400 % opozorilne vrednosti), vendar mejne vrednosti izpostavljenosti za tokove dotika in inducirane tokove niso nujno presežene (ponavadi manj kot 50 % mejne vrednosti) [15]. Opozorilne vrednosti za magnetno polje v okolici 400 kV daljnovoda tipično niso presežene (do 20 % za magnetno polje ter do 80 % za električno polje), na daljnovodnem stebru v nivoju vodnikov pa lahko gostota magnetnega pretoka doseže opozorilno vrednost, električno polje pa jo preseže do dvakrat [13],[14].

Pomemben vir izpostavljenosti je tudi varjenje, kjer sicer obstaja veliko različnih postopkov. Med tistimi, ki za vir toplote za varjenje uporabljajo elektriko, se razlikujejo metode za uporovno in obločno varjenje. Pri obločnem varjenju so prisotni tokovi do 1 kA, vrednosti gostote magnetnega pretoka lahko ob kablu dosežejo 2 mT (400 % opozorilne vrednosti), ob telesu varilca pa do 200 μT (40 % opozorilne vrednosti) [13]. Mejne vrednosti v tem primeru niso presežene, je pa treba opozoriti, da si nekateri varilci zaradi lažjega rokovanja z varilno elektrodo napeljejo dovodne kable ob telesu ali čez ramo. V tem primeru bi lahko prišlo do preseganja mejnih vrednosti izpostavljenosti za gostote inducirane toka v centralnem živčnem sistemu.

Pri uporovnem varjenju obdelovancev z velikim presekom se uporabljajo zelo veliki tokovi za varjenje; delovni tokovi so lahko do 100 kA, kar povzroča preseganje opozorilnih vrednosti za gostoto magnetnega pretoka za faktor 2 na oddaljenosti 1 m in za faktor 20 na oddaljenosti 10 cm. Mejne vrednosti so lahko presežene v okončinah; v rokah so pri bremenskem toku 11 kA izmerili inducirano gostoto toka do 14 mA/m² [14]. Pri enosmernem varilnem toku 4 kA (s 300 Hz komponento ripple toka) so z numeričnimi izračuni ocenili, da izpostavljenost na razdalji 20 cm dosega

60 % mejne vrednosti izpostavljenosti, pri efektivnem toku 2 kA s frekvenco 50 Hz pa na isti razdalji 53 % mejne vrednosti [16].

3.3 Srednje frekvence (300 Hz – 10 MHz)

Podatki o virih in izpostavljenosti, predvsem pa o dozimetričnih količinah pri srednjih frekvencah, med 300 Hz in 10 MHz, so v literaturi relativno skopi. Najvišje vrednosti izpostavljenosti so bile izmerjene na delovnih mestih v okolici indukcijskih peči v železarski industriji (magnetno polje do 90 A/m oz. do 360 %

opozorilne vrednosti pri frekvenci 800 Hz), sledijo indukcijske tuljave za segrevanje, kaljenje ali drugo obdelavo kovin (magnetno polje do 7 A/m oz. do 175 % opozorilne vrednosti pri frekvenci 400 kHz) [17]. Podatkov o morebitnem preseganju mejnih vrednosti izpostavljenosti nismo zasledili.

Zelo pogost vir, ki je vsesplošno prisoten in redko deležen pozornosti, so naprave za elektronsko varovanje pred tatvinami, ki so pogoste v trgovinah, nakupovalnih središčih in knjižnicah. Vrednosti induciranih tokov znašajo do 1 mA/m² (manj kot 10 % mejne vrednosti izpostavljenosti), SAR pa do 0.5×10^{-3} W/kg (manj kot

Tabela 2: Poklicne izpostavljenosti virom EMS pri različnih industrijskih panogah in različnih frekvencah

Vrsta vira	Opozorilne vrednosti	Izmerjene/izračunane vrednosti	Mejne vrednosti izpostavljenosti	Izmerjene/izračunane vrednosti
statično magnetno polje pri magnetno resonančnih tomografih	500 mT	do 3 T (600%)	ni podano	do 0,17 V/m pri vrtenju, do 400 mA/m ² pri hoji v gradientu polja
proizvodnja aluminija	200 mT	do 120 mT (60%)	ni podano	ni podatka
proizvodnja aluminija - višjeharmonske komponente	odvisno od frekvence	do 800 % v okolici usmernikov, do 500 % v okolici vodnika	10 mA/m ²	ni podatka
železnice	500 mT	do 100 mT (20%) znotraj voznirove kabine	ni podano	ni preseženo
400 kV stikališča	10 kV/m, 0,5 mT	do 40 kV/m (400 %)	10 mA/m ²	do 50 %
okolica 400 kV daljnovoda	10 kV/m, 0,5 mT	ni preseženo	10 mA/m ²	ni preseženo
na stebru 400 kV daljnovoda	10 kV/m, 0,5 mT	do 200% za električno polje, do 100 % za gostoto magnetnega pretoka	10 mA/m ²	ni podatka
obločno varjenje	1 mT	do 2mT (200%) ob kablu, ter do 200 μT ob telesu varilca (40%)	10 mA/m ²	ni preseženo
uporovno varjenje	0,5 mT	do 2000% na oddaljenosti 10 cm od vodnika	10 mA/m ²	14 mA/m ² (140 %) v rokah
indukcijsko segrevanje	25 A/m	magnetno polje do 90 A/m (360%)	10 mA/m ²	ni podatka
naprave za elektronski nadzor	odvisno od frekvence	ni podatka	10 mA/m ² , SAR 10 W/kg	do 1 mA/m ² , SAR do 0,005 W/kg
naprave za medicinsko diatermijo	610 V/m	do 500 V/m 10 cm od vodnika, do 2500 V/m 1 cm od vodnika	10 mA/m ² , SAR 10 W/kg	ni preseženo
srednjevalovni radijski oddajniki	610 V/m	700 V/m in 2 μT na oddaljenosti 1 m od stolpa	10 mA/m ²	ni podatka
UKV radijski oddajniki	61 V/m	1000 V/m in 0,5 μT (1600 % oziroma 250 %)	SARtelo 0,4 W/kg, SAR10g: 10 W/kg	ni podatka
TV oddajniki (VHF, UHF)	200 V/m	do 600 V/m na stolpu (25600 %)	SARtelo 0,4 W/kg, SAR10g: 10 W/kg	ni podatka
radar v osi antene	50 W/m ²	gostota pretoka moči do 10 MW/m ² (20000%), časovno povprečje do 80 W/m ² (160%)	SARtelo 0,4 W/kg, SAR10g: 10 W/kg	ni podatka
dielektrično varjenje	61 V/m	do 300 V/m (500 %), do 100mA (250 %)	SARtelo 0,4 W/kg, SAR10g: 10 W/kg	ter do 2 W/kg (250%)
mikrovalovno sušenje	50 W/m ²	do 10 kW/m ² pred napravo, do 50 W/m ² (100%) 50 cm od naprave	SARtelo 0,4 W/kg, SAR10g: 10 W/kg	
mobilna telefonija	odvisno od frekvence		SARtelo 0,4 W/kg, SAR10g: 10 W/kg	presežene na majhnih oddaljenostih od antene

0,1 % mejne vrednosti izpostavljenosti) in niti tik ob napravah ne dosega mejnih vrednosti izpostavljenosti [14],[18].

Srednje frekvence se pogosto uporabljajo tudi v zdravstvene namene. Diatermija se uporablja v fizioterapiji za gretje delov telesa pri zdravljenju poškodb, pri kirurških posegih pa za rezanje in koagulacijo tkiva (električni nož). Pri slednjih so izpostavljene predvsem roke kirurga, najvišje izmerjene vrednosti magnetnega polja so do 1,95 μT pri 390 kHz, električno polje pa lahko preseže 500 V/cm na razdalji 10 cm od vira [17] oziroma do 2500 V/m pri oddaljenosti okoli 1 cm. To lahko pomeni preseganje opozorilnih vrednosti, medtem ko mejne vrednosti izpostavljenosti zaradi zelo lokalizirane izpostavljenosti niso presežene [14].

3.4 Visoke frekvence (10 MHz – 300 GHz)

Pri visokih frekvencah delujejo radijski in TV oddajniki, kjer so lahko v bližini oddajne antene vrednosti elektromagnetnega polja zelo visoke. Srednjevalovni radijski oddajniki imajo manj kot 500 kW moči. V bližini stolpa so lahko opozorilne vrednosti presežene do dvakrat (700 V/m in 2 μT na oddaljenosti 1 m) [14], podatki o mejnih vrednostih izpostavljenosti pa so pomanjkljivi. Na UKV oddajnih stolpih lahko električna poljska jakost in gostota magnetnega pretoka prav tako presežeta opozorilni vrednosti 61 V/m in 0,2 μT (do 1000 V/m in 0,5 μT na stolpu, kar znaša do 1600 % oziroma 250 % opozorilne vrednosti) [19]. TV oddajniki delujejo v dveh frekvenčnih področjih – VHF (174-230 MHz) in UHF (470-862 MHz) – in na stolpu so lahko vrednosti električnega polja bistveno višje od opozorilnih vrednosti (do 600 V/m, kar je 25600 % mejnih vrednosti za električno polje) [14]. Tudi v tem primeru še ni podatkov, ki bi potrdili ali ovrgli preseganje mejnih vrednosti izpostavljenosti.

Pri radarju gre ponavadi za izrazito pulzna polja in zelo usmerjen sevalni snop. Zato v okolici antene mejne vrednosti izpostavljenosti ponavadi niso presežene, medtem ko so v glavnem snopu antene lahko presežene tudi v daljšem časovnem povprečju, še toliko bolj pa med samim radarskim pulzom. Gostota pretoka moči v času radarskega pulza v osi antene doseže vrednost 10 MW/m^2 (faktor 200 nad mejno vrednostjo izpostavljenosti), časovno povprečje v osi antene na oddaljenosti nekaj metrov pa znaša 80 W/m^2 (160 % mejne vrednosti izpostavljenosti). Na tipičnih delovnih mestih, povezanih z radarji, je gostota pretoka moči manjša od 1 W/m^2 (2 % mejne vrednosti izpostavljenosti), zato velja, da na tipičnih delovnih mestih mejne vrednosti izpostavljenosti niso presežene, so pa presežene v glavni osi antene [13],[14].

Naprave za dielektrično varjenje plastike uporabljajo izmenično električno polje (ponavadi je frekvenca okrog 30 MHz) za segrevanje in varjenje plastike. V okolici naprave je lahko zelo visoko polje in mogoče so tudi

brezkontaktno opeklino pri delavcih. Dejstvo, da pri uporabi naprav za varjenje plastike dejansko pogosto prihaja do takšnih opeklin, nakazuje, da so lahko vrednosti izpostavljenosti zelo velike. Izmerjene povprečne vrednosti električnega polja so od 28 do 107 V/m (45 % do 175 % opozorilne vrednosti), povprečni inducirani tokovi v zapestjih in gležnjih pa 100 mA (100 % opozorilne vrednosti) [20].

Pri drugih primerih dielektričnega varjenja so izmerili jakosti električnega polja do 300 V/m (500 % opozorilne vrednosti) in magnetna polja do 20 A/m (12500 % opozorilne vrednosti). Odvisno od izolacije telesa operaterja proti zemlji in oddaljenosti do elektrod lahko celotelesna vrednost SAR znaša med 0,12 in 2 W/kg (med 15 in 250 % mejne vrednosti izpostavljenosti) [13],[14].

Mikrovalovno sušenje se uporablja za sušenje lesa v lesni industriji ter za sušenje po poplavih in drugih poškodbah z vodo. Princip delovanja je enak kot pri gospodinjstvih mikrovalovnih pečicah. Izhodne moči tovrstnih naprav segajo od 1 do 5 kW pri frekvenci 2,45 GHz, narejene pa so tako, da mikrovalovno sevanje usmerijo proti površini, ki jo je treba sušiti. Pri sušenju zidu lahko neposredno pred aplikatorjem gostota pretoka moči preseže 10 kW/m^2 (20000 % mejne vrednosti izpostavljenosti), na nasprotni strani zidu pa 1 kW/m^2 (2000 % mejne vrednosti izpostavljenosti). Poleg tega lahko gostota pretoka moči stresanega polja v okolici naprave preseže mejno vrednost izpostavljenosti 50 W/m^2 na oddaljenosti 50 cm [13].

Mobilna telefonija, ki po trenutno veljavnih standardih deluje pri frekvencah 900, 1800 in 2100 MHz, je predvsem v laični javnosti pogosto vzrok za zaskrbljenost, vendar pa se večinoma uporabljajo relativno nizke oddajne moči. Oddajna moč mobilnih telefonov je omejena na 2 W. Bazne postaje oddajajo pri nekoliko višji moči, vendar tipično manj kot 100 W. Zato so opozorilne vrednosti za zaposlene ponavadi presežene zgolj v glavnem snopu, neposredno pred oddajno anteno. Vrednosti so sicer bistveno odvisne od skupne oddajne moči na anteni, pri čemer je treba upoštevati izgube v kabljih. Na splošno je zato dejanska izsevana moč antene manjša od izhodne moči bazne postaje (oddajno-sprejemne enote). Pri oddajni moči 30 W so opozorilne vrednosti presežene na oddaljenostih, manjših od 1 m, medtem ko mejna vrednost izpostavljenosti tudi pri razdalji 20 cm še ni presežena [21]. Drugi izračuni kažejo, da je pri oddaljenosti 50 cm od antene največja dovoljena moč, pri kateri še niso presežene mejne vrednosti izpostavljenosti, približno 50 W pri 2140 MHz [22].

Poleg mobilne telefonije obstaja še podoben sistem TETRA, ki se uvaja v policiji, vojski in drugih urgentnih službah. Sistem deluje pri frekvencah 380–470 MHz in omogoča nekoliko večje oddajne moči kot sistemi za mobilno telefonijo, zato so tudi pričakovane

vrednosti izpostavljenosti nekoliko višje. Pri ročnih terminalih lahko vrednosti SAR dosežejo do 3 W/kg (30 % mejne vrednosti izpostavljenosti), pri postajah, nameščenih v vozilu, pa lahko vrednost SAR v neposredni bližini antene doseže 10 W/kg (100 % mejne vrednosti izpostavljenosti), vendar je izpostavljenost v vozilih majhna. Sistem TETRA uporablja podobne bazne postaje kot sistemi mobilne telefonije, zato je tudi izpostavljenost podobna. Pri moči oddajnikov 4×40 W lahko gostota pretoka moči 10 cm pred anteno doseže 100 W/m^2 (200 % mejne vrednosti izpostavljenosti), na oddaljenosti enega metra pa 10 W/m^2 (20 % mejne vrednosti izpostavljenosti) [23].

V tabeli 2 so povzeta najbolj izpostavljena delovna mesta, kjer so na voljo tudi podatki o opozorilnih in mejnih vrednostih izpostavljenosti.

4 Sklep – stanje v Sloveniji.

Prihajajoča Direktiva 2004/40/ES bo v Sloveniji nadomestila zakonsko praznino. Kljub navidezno visokim zahtevam pa je delež delovnih mest, kjer so opozorilne ali mejne vrednosti izpostavljenosti lahko presežene, relativno majhen. Primer bolj izpostavljenih delovnih mest so predvsem operaterji naprav za dielektrično varjenje, kaljenje in taljenje kovin, delavci na radio-difuzijskih oddajnikih, uporabniki naprav za mikrovalovno sušenje ter delavci v proizvodnji in prenosu električne energije.

Pred prihodom oz. morebitno revizijo Direktive je treba nevarnost za zdravje kritično ovrednotiti in sprejeti ustrezne ukrepe. Za lažje izvajanje določil Direktive je bil sprejet standard EN 50499, ki predlaga preproste postopke za ocenjevanje tveganja na delovnem mestu, še zlasti za tista mesta, pri katerih je jasno, da na njih niso presežene mejne vrednosti izpostavljenosti. Za večino delovnih mest je tako mogoče izdelati oceno tveganja prav s pomočjo tega standarda, v nekaterih primerih pa lahko pričakujemo, da bo treba izvesti tudi meritve EMS na delovnem mestu. Pri preseganju opozorilnih vrednosti so kot nadaljnji korak mogoči numerični izračuni ali merjenje vplivnih količin v človekovem telesu. Ta ukrepa prideta v poštev res pri redkih delovnih mestih, kjer morajo zaposleni nujno opraviti dela na natančno določenem mestu in so morebitne spremembe na delovnih mestih zahtevne in drage. V teh primerih je treba z meritvami ali izračuni količin v človeškem telesu preveriti, da delo na tistem delovnem mestu še ustreza standardom in je zato, kar se tiče izpostavljenosti elektromagnetnim sevanjem, varno.

5 Literatura

- [1] I.S. Kristiansen, A.S. Elstein, D. Gyrd-Hansen, H.W. Kildemoes, and J.B. Nielsen, "Radiation from mobile phone systems: Is it perceived as a threat to people's health?," *Bioelectromagnetics*, vol. 30, 2009, pp. 393—401.
- [2] ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)," *Health Physics*, vol. 74, Apr. 1998, pp. 494—522.
- [3] P. Li, J. McLaughlin, and C. Infante-Rivard, "Maternal occupational exposure to extremely low frequency magnetic fields and the risk of brain cancer in the offspring," *Cancer Causes & Control*, vol. 20, Aug. 2009, pp. 945—955.
- [4] Vlada RS, "Uredba o elektromagnetnem sevanju v naravnem in življenjskem okolju," 1996.
- [5] "Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (18th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC)," *Official Journal of the European Union*, vol. 47, Apr. 2004, pp. 1—9.
- [6] ICNIRP, "Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields," *Health Physics*, vol. 96, 2009, pp. 504—514.
- [7] IEEE, "IEEE Std C95.1 - 2005 IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz," *IEEE Std C95.1-2005 (Revision of IEEE Std C95.1-1991)*, 2006.
- [8] N. Zoppetti and D. Andreuccetti, "Review of Open Problems in Assessing Compliance with 2004/40/EC Directive Exposure Limit Values for Low-Frequency Current Density by Means of Numerical Techniques," *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 137, Dec. 2009, pp. 247—251.
- [9] J.W. Hand, "Modelling the interaction of electromagnetic fields (10 MHz-10 GHz) with the human body: methods and applications," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 53, Aug. 2008, pp. R243—R286.
- [10] S. Ilvonen and I. Laakso, "Computational estimation of magnetically induced electric fields in a rotating head," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 54, Jan. 2009, pp. 341—351.
- [11] P. Glover and R. Bowtell, "Measurement of electric fields induced in a human subject due to natural movements in static magnetic fields or exposure to alternating magnetic field gradients," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 53, Jan. 2008, pp. 361—373.
- [12] WHO, *Static Fields*, Geneva: World Health Organization, 2006.
- [13] M. Hietanen, A.-M. Hämmäläinen, and P. von Nandelstadh, *Electromagnetic fields in the work environment*, Helsinki: Finnish Institute of Occupational Health, 2002.
- [14] J. Bolte and M. Pruppers, *Electromagnetic fields in the working environment*, Ministry of Social Affairs and Employment (SZW), 2006.

- [15] L. Korpinen, J. Elovaara, and H. Kuisti, "Evaluation of Current Densities and Total Contact Currents in Occupational Exposure at 400 kV Substations and Power Lines," *Bioelectromagnetics*, vol. 30, Apr. 2009, pp. 231–240.
- [16] P. Mair, "Effects on the Human Body and Assessment Methods of Exposure to Electro-Magnetic-Fields Caused by Spot Welding," *Proceedings of the 4th International Seminar on Advances in Resistance Welding*, Nov. 2006.
- [17] B. Floderus, C. Stenlund, and F. Carlgren, "Occupational exposures to high frequency electromagnetic fields in the intermediate range (>300 Hz-10 MHz)," *Bioelectromagnetics*, vol. 23, 2002, pp. 568–577.
- [18] M. Martínez-Búrdalo, A. Sanchis, A. Martín, and R. Villar, "Comparison of SAR and induced current densities in adults and children exposed to electromagnetic fields from electronic article surveillance devices," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 55, 2010, pp. 1041–1055.
- [19] EBU, "Radiofrequency Radiation Hazards - Exposure Limits and Their Implications for Broadcasters," 1995.
- [20] J. Wilen, R. Hornsten, M. Sandstrom, P. Bjerle, U. Wiklund, O. Stensson, E. Lyskov, and K. Mild, "Electromagnetic field exposure and health among RF plastic sealer operators," *Bioelectromagnetics*, vol. 25, Jan. 2004, pp. 5–15.
- [21] M. Martinez-Burdalo, A. Martin, M. Anguiano, and R. Villar, "On the safety assessment of human exposure in the proximity of cellular communications base-station antennas at 900, 1800 and 2170 MHz," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 50, Sep. 2005, pp. 4125–4137.
- [22] M.C. Gosselin, A. Christ, S. Kuhn, and N. Kuster, "Dependence of the Occupational Exposure to Mobile Phone Base Stations on the Properties of the Antenna and the Human Body," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 51, May. 2009, pp. 227–235.
- [23] National Radiological Protection Board, *Possible Health Effects from Terrestrial Trunked Radio (TETRA): Report of an Advisory Group on Non-Ionising Radiation*, National Radiological Protection Board, 2001.

Bor Kos je diplomiral leta 2008 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Oktobra leta 2008 se je zaposlil na isti fakulteti v Laboratoriju za biokibernetiko kot mladi raziskovalec pod mentorstvom Tadeja Kotnika. Pri svojem raziskovalnem delu se ukvarja predvsem z numeričnimi izračuni interakcij med elektromagnetnimi polji in biološkimi sistemi. Del svojih raziskav opravlja tudi na Inštitutu za neionizirna sevanja v Ljubljani.

Blaž Valič je doktoriral Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njegovo področje raziskovanja sta numerično modeliranje porazdelitve EMS v bioloških sistemih in vpliv EMS na človeka.

Tadej Kotnik je doktoriral leta 2000 na Univerzi Pariz XI. Zaposlen je kot docent in višji znanstveni sodelavec na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Raziskovalno se ukvarja s proučevanjem učinkov električnih in elektromagnetnih polj na biološke sisteme, predvsem na membrane bioloških celic, in z računalniškimi raziskavami v analitični teoriji števil.

Peter Gajšek je doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer je tudi habilitiran v docenta za področje elektrotehnike. Je direktor Inštituta za neionizirna sevanja in član več mednarodnih organizacij s področja neionizirnih sevanj. Njegovo področje delovanja je proučevanje interakcij EMS z organizmi s poudarkom na eksperimentalni in teoretični dozimetriji.