

Poklicna izpostavljenost elektromagnetnim sevanjem na FM radijskem oddajniku

Blaž Valič^{1,2}, Peter Gajšek¹

¹ Inštitut za neionizirna sevanja, Pohorskega bataljona 215, Ljubljana

² Genera, Prevale 10, Trzin

E-pošta: blaz.valic@inis.si

Occupational exposure on the FM broadcasting mast

The electric field strengths normally exceed the action values for occupational exposure in close vicinity to large FM transmitters. Thus, a detailed investigation on compliance with exposure limits is needed before any administrative protection measures are applied (i.e. reduction of the output power, shutting down the transmitter...). We prepared a detailed numerical model of 20 kW FM transmitter on a 32 m high mast. An anatomical human model was placed in three different positions inside the mast in the region where the highest values of the electric field were calculated. The electric field strengths in this region were up to 700 V/m. The highest calculated whole body SAR was 0,48 W/kg, whereas the maximum 10 g average SAR in the head and trunk was 1,66 W/kg. The results show that the action values in the FM frequency range are very conservative for near field exposures. SAR values are not exceeded even for fields 10 times stronger than the action values.

1 Uvod

Poleg radarjev so radijski in TV oddajniki eni najmočnejših virov visokofrekvenčnih elektromagnetnih sevanj (EMS). Oddajna moč lahko doseže do več sto kW, zato so sevalne obremenitve v njihovi bližini lahko zelo velike. Mejne vrednosti za poklicno izpostavljenost so določene v smernicah ICNIRP [1] in direktivi 2004/40/ES [2]. Dokumenta določata omejitve tako za enostavno merljive veličine v praznem prostoru, to so električna poljska jakost in gostota magnetnega pretoka, imenujemo jih opozorilne vrednosti, kot tudi za dozimetrične veličine znotraj človeškega telesa, to pa so gostota toka pri nizkih frekvencah ter stopnja specifične absorpcije (SAR) pri visokih frekvencah, imenujemo jih mejne vrednosti izpostavljenosti. Zato se ocenjevanje izpostavljenosti običajno izvede najprej s pomočjo opozorilnih vrednosti [3]. Če so le te presežene, pa je potrebno ovrednotiti veličine znotraj človeškega telesa. SAR vrednost opisuje, koliko energije se vsako sekundo absorbira na kilogram telesne teže in ta veličina je pri izpostavljenosti visokofrekvenčnim virom tista, ki dokončno določa, ali je neko delovno mesto še skladno ali so sevalne obremenitve prekomerne.

Opozorilne vrednosti so frekvenčno odvisne in znašajo za FM radijske oddajnike v območju od 87 do 108 MHz ter za VHF televizijske oddajnike v območju od 174 do 223 MHz 61 V/m ter za UHF televizijske oddajnike v območju do 470 do 830 MHz med 65,0 in 86,4 V/m.

Da bi preprečili prekomerno segrevanje celotnega telesa, je SAR vrednost omejena na 0,4 W/kg, lokalna vrednost pa ne sme presegati 10 W/kg v glavi in trupu ter 20 W/kg v okončinah.

Delavci morajo med vzdrževalnimi deli zaradi izvajanja delovnih nalog splezati na stolpe, na katerih so nameščeni radijski oddajniki. A s strani podjetij, ki se ukvarjajo z radiodifuzijo, je izključevanje oddajnikov zelo nezaželeno [4, 5], zato je s pomočjo meritev in numeričnih izračunov potrebno ugotoviti, ali je kljub delujočim oddajnikom zagotovljena ustrezna stopnja varnosti in zdravja.

Do sedaj objavljene študije so v več primerih sicer analizirale polja v okolici različnih radijskih in TV oddajnikov [4, 6, 7], a le malo študij je vključilo tudi numerične izračune SAR vrednosti [8].

V študiji smo s pomočjo meritev določili vrednosti električne poljske jakosti na stolpu 25 kW FM oddajnika. Nato smo zgradili podroben numerični model celotnega stolpa z antenami ter izračunali vrednosti električne poljske jakosti ter SAR vrednosti za tri različne položaje modela človeškega telesa. Izračunane vrednosti smo primerjali z opozorilnimi vrednostmi ter mejnimi vrednostmi izpostavljenosti.

2 Materiali in metode

Sevalne obremenitve smo določili s pomočjo meritev ter numeričnega izračuna. Za analizo je bil izbran večji oddajni center, ki se nahaja na vrhu hriba. Sestavljajo ga glavni VHF ter UHF stolp, analiziran pomožni 40 m FM stolp, telekomunikacijska ploščad ter stavba s prostori za stalno posadko ter vso potrebno oddajniško opremo.

Na pomožnem FM stolpu so FM antene nameščene na višini 10 do 32 m, medtem ko zgornjih 8 m zaseda dodaten UHF sistem. FM oddajniški sistem je sestavljen iz 28 4 dipolnih anten. Antene so nameščene v 8 nadstropjih v 3 m intervalu. V treh horizontalnih smereh je 8 anten, medtem ko so v eni le 4. Oddajni sistem napaja 120 m 3 1/8" koaksialni kabel, 3 nivojski delilnik moči je nameščen na samem stolpu. Slabljenje celotnega sistema kablov in delilnikov znaša 1,1 dB,

tako da se oddajna moč 25 kW zmanjša na približno 20 kW, razporejenih na 112 dipolov. Sistem je krožno polariziran, s tem da je 1/3 moči dovedena vertikalnim dipolom ter 2/3 horizontalnim. Poleg razlik v moči na vertikalnih in horizontalnih dipolih pa je različna tudi dovedena moč na antene na različni višini, tako da znaša moč na posameznem dipolu med 0,37 % in 2,2 % celotne moči. Razlikujejo se tudi dolžine kablov, zato so tudi fazni zamiki na posameznih dipolih različni.

Ker oddajni center predstavlja pomembno telekomunikacijsko in radiodifuzno vozlišče, obenem pa je vremensko zelo izpostavljen, je na objektu stalno prisotna dvočlanska ekipa.

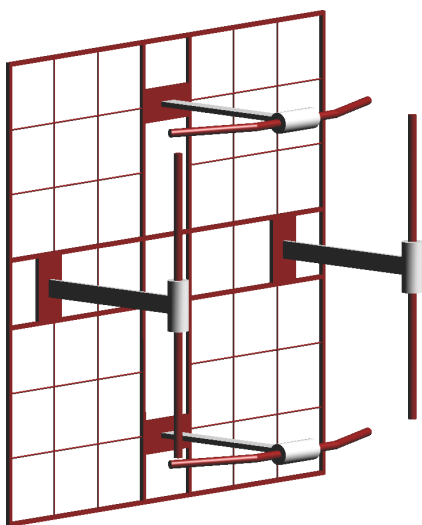
2.1 Meritve

Meritve so bile opravljene s pomočjo širokopasovnega merilnega instrumenta W&G EMR 300 z merilno sondo Narda 8.2E (oboje Narda, Pfullingen, Nemčija) ter spektralnega analizatorja Anritsu MS 2711 A (Anritsu, Richardson, ZDA) in bikonične antene Clampco EMSAP2000 (Clampco, Udine, Italija).

Skupno je bilo na FM stolpu opravljenih 16 širokopasovnih meritev in dve selektivni. Selektivne meritve je na stolpu namreč zahtevno opraviti, saj je anteno med meritvami potrebno namestiti na ustrezno stojalo, kar pa ni bilo povsod mogoče. Namen selektivnih meritev je bil ovrednotiti prispevke posameznih sistemov (FM, VHF in UHF) na posamezni lokaciji.

2.2 Numerični izračuni

Za numerično modeliranje je bil uporabljen programski paket SEMCAD (verzija 14 – Aletsch) (Speag, Zurich, Švica), ki temelji na metodi FDTD.

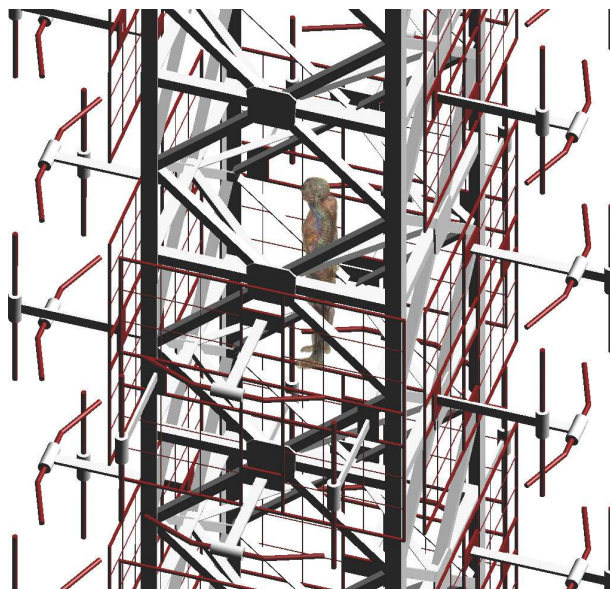


Slika 1. Model antene iz štirih dipolov.

Model je vključeval celoten jeklen predalčni FM stolp v višini 32,2 m (brez zgornjih 8 m, kjer je nameščen UHF

oddajniški sistem) ter model vseh 28 4 polnih anten, katerih model je prikazan na sliki 1. Celoten sistem kablov in delilnika ni bil vključen v model, namesto tega je bila za vsak dipol točno določena tako moč kot tudi fazni zamik. Delovna frekvenca je bila nastavljena na 98 MHz.

Simulacijo smo najprej izvedli za prazen prostor, da bi ugotovili, kje so najvišje vrednosti. Ko je bilo območje z najvišjimi vrednostmi določeno, smo v ta del vstavili anatomski model 34 letnika, visokega 1,74 m in težkega 70 kg [9]. Model smo namestili na tri različne višine, in sicer točno v območje z najvišjo vrednostjo električne poljske jakosti (stojna višina 23,7 m nad tlemi) ter 1,3 m nad ter pod to točko. Območje z najvišjimi vrednostmi se nahaja med petim in šestim nadstropjem anten, kjer so moči na antenah največje, saj antene v teh dveh nadstropjih prejmejo kar 40 % celotne oddajne moči. Umestitev človeškega modela v model oddajnega stolpa je prikazan na sliki 2.



Slika 2. Model človeškega telesa v modelu predalčnega jeklenega stolpa z antenami.

Zaradi kompleksnosti modela je bil izračun opravljen v dveh korakih. Najprej je bil uporabljen homogen model človeškega telesa (specifična prevodnost 0,47 S/m, dielektričnost 44), ob izračunu pa je bila prostorska razločljivost določena na vsaj $\lambda/14$, s čemer je bila zagotovljena stabilnost FDTD simulacije. Vpadno polje je bilo shranjeno in v drugem koraku je bilo to polje uporabljeno kot vzbujanje za natančen izračun veličin znotraj anatomskega modela človeškega telesa [10]. Model človeškega telesa je imel v drugem koraku izračuna razločljivost 3 mm v vseh treh smereh, medtem ko so bile za lastnosti tkiv uporabljene vrednosti iz [11, 12].

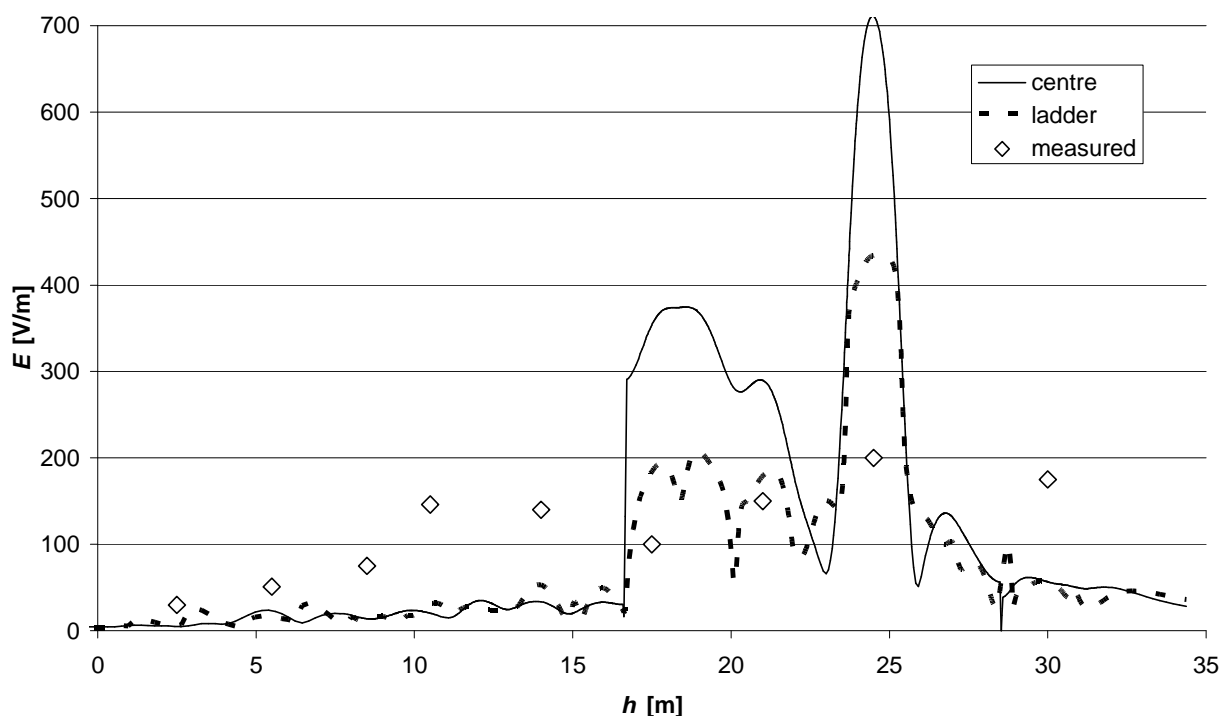
3 Rezultati

3.1 Električno polje

Rezultati širokopasovnih meritev na 16 merilnih mestih so podani v tabeli 1.

Tabela 1: Rezultati širokopasovnih meritev. Na merilnih mestih, označenih z *, so opozorilne vrednosti presežene.

Merilno mesto	h [m]	E [V/m]	Opis
1	2.5	30	
2	5.5	51	
*3	8.5	75	
*4	10.5	146	
*5	14.0	140	
*6	17.5	100	na prvi ploščadi
*7	21.0	150	
*8	21.0	400	pri delilniku
*9	21.0	350	0,2 m od delilnika
*10	21.0	200	0,5 m od delilnika
*11	21.0	140	1 m od delilnika
*12	24.5	200	
*13	30.0	175	na zgornji ploščadi
*14	30.0	600	pri delilniku
*15	30.0	222	0,2 m od delilnika
*16	30.0	200	0,5 m od delilnika



Slika 3. Primerjava izmerjenih (measured) in izračunanih vrednosti električne poljske jakosti v odvisnosti od višine za sredino stolpa (centre), ob lestvi (ladder).

3.2 SAR

Ker so bile tako izmerjene kot izračunane vrednosti električne poljske jakosti višje od opozorilnih vrednosti, smo izračunali tudi SAR vrednosti v modelu človeškega telesa. Rezultati numeričnih izračunov SAR vrednosti so predstavljeni v tabeli 2, kjer so na voljo podatki o povprečni vrednosti SAR za celotno telo ter največji

Primerjava izmerjenih in izračunanih vrednosti električne poljske jakosti je prikazana na sliki 3. Vidno je, da so opozorilne vrednosti presežene na večini izmerjenih mest. Vrednosti znašajo do 200 V/m, v manjših območjih ob delilniku pa lahko dosežejo tudi do 600 V/m.

Prikazani so rezultati, ko smo izračun opravili za primer, ko se znotraj modela stolpa ni nahajal tudi model človeškega telesa. Poleg izmerjenih vrednosti so prikazani tudi izračuni za dve lokaciji: v sredini stolpa ter ob stopnicah, torej bližje kovinski strukturi stopnic in samega stolpa. Prva lokacija v sredini stolpa se bolje ujema z lokacijo izmerjenih vrednosti – le te so bile opravljene v sredini stolpa, medtem ko druga lokacija ob lestvi predstavlja tipično izpostavljenost delavca, ko le ta pleza po lestvi. Merilne točke v bližini delilnika (8, 9, 10, 11, 14, 15 in 16) na sliki 3 niso prikazane, saj je vpliv delilnika omejen na ozko območje ob delilniku, poleg tega pa delilnik ni bil vključen v numerični model.

Vrednosti električne poljske jakosti so nižje v bližini lestev, saj je oddaljenost od dobro prevodnih struktur, kot so same lestve ter nosilna konstrukcija stolpa, manjša kot v sredini stolpa.

SAR vrednosti v glavi ter trupu in okončinah, povprečni preko 10 g tkiva.

Iz rezultatov je razvidno, da je povprečna SAR vrednost za celo telo manjša od mejnih vrednosti izpostavljenosti (0,4 W/kg) za srednjo in zgornjo namestitvev modela človeškega telesa ter malo presežena za spodnjo namestitvev modela. Največja lokalna vrednost SAR je manjša od mejnih vrednosti

izpostavljenosti (10 W/kg za glavo in trup ter 20 W/kg za okončine), a je za primer spodnje namestitve modela razmeroma visoka in znaša 40 % mejnih vrednosti izpostavljenosti. Vendar so visoke vrednosti omejene na okončine in so znotraj glave in trupa znatno manjše (glej tabelo 2).

Tabela 2: SAR vrednosti za vse tri pozicije modela znotraj FM oddajnega stolpa.

Pozicija modela	SAR celo telo	SAR glava trup	SAR okončine
spodaj	0,46	1,66	8,02
sredina	0,17	1,03	1,99
zgoraj	0,15	1,05	1,96

4 Diskusija in zaključek

Kljub temu, da so izračunane in izmerjene vrednosti električne poljske jakosti na lokacijah znotraj 20 kW FM oddajnika tudi do 10 krat presegle opozorilne vrednosti, so bile izračunane SAR vrednosti le največ do 15 % višje od mejnih vrednosti izpostavljenosti. To kaže na dejstvo, da so v FM frekvenčnem območju v bližnjem polju opozorilne vrednosti zelo konzervativne. To je posledica dejstva, da se prav v tem frekvenčnem območju nahaja resonančna frekvenca vertikalno izpostavljenega človeškega telesa daljnemu polju. Zato so opozorilne vrednosti v tem frekvenčnem območju najnižje. V bližnjem polju pa resonančni pojavi celotnega telesa ne pridejo do izraza, zato so mejne vrednosti zelo konzervativne. Če na podoben način kot v [8] določimo varnostni faktor S za vse tri primere namestitve človeškega telesa kot produkt kvadrata razmerja med najvišjo vrednostjo električnega polja ter opozorilno vrednostjo ter razmerja med mejno vrednostjo izpostavljenosti ter najvišjo izračunano SAR vrednost, dobimo naslednje varnostne faktorje:

$$S_{lower} = \left(\frac{663 \text{ V/m}}{61 \text{ V/m}} \right)^2 \frac{0.4 \text{ W/kg}}{0.48 \text{ W/kg}} \approx 100$$

$$S_{middle} = \left(\frac{711 \text{ V/m}}{61 \text{ V/m}} \right)^2 \frac{0.4 \text{ W/kg}}{0.17 \text{ W/kg}} \approx 320$$

$$S_{upper} = \left(\frac{591 \text{ V/m}}{61 \text{ V/m}} \right)^2 \frac{0.4 \text{ W/kg}}{0.15 \text{ W/kg}} \approx 250$$

Varnostni faktor nam pove, koliko krat so opozorilne vrednosti strožje od mejnih vrednosti izpostavljenosti. V [8] je znašal varnostni faktor 42. Vrednost je sicer nižja od tu predstavljenih, a uporabljen je bil drugačen model oddajnega stolpa (čeprav podoben), drugačen anatomski model človeškega telesa ter druga numerična metoda. A oba rezultata kažeta, da so za izpostavljenost v bližnjem polju opozorilne vrednosti konzervativne in so izračuni vrednosti SAR edini način, kako ugotoviti skladnost delovnega mesta z določili direktive 2004/40/ES.

Literatura

- [1] ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Phys. 1998; 74(4):494-
- [2] Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the council on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields). OJ.2004; L159:1-26.
- [3] Mild KH et, al. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE). 2009; 15(1):3-33
- [4] European Broadcast Union. Radiofrequency Radiation Hazards - Exposure Limits and Their Implications for Broadcasters. Geneva, Switzerland: EBU; 1995.
- [5] Clark J. UK Broadcasting and telecommunication. EMF-IMPACT Stakeholders Workshop, Ljubljana, Slovenia: 2009. Retrieved January 15, 2010, from http://www.inis.si/fileadmin/user_upload/Dogodki/EMF2009/presentations_first_day/16_Clarke.pdf.
- [6] Bolte JFB, Pruppers MJM. Electromagnetic fields in the working environment. Hague: Netherland. Ministry of Social Affairs and Employment; 2006.
- [7] Jokela K, Puranen L. Occupational RF exposures. Radiat Prot Dosimetry. 1999; 83(1-2); 119-124.
- [8] Remkes G. Work safely with EMF high power RF-Emitters. Occupational exposure to electromagnetic fields: paving the way for a future EU initiative, Umea, Sweden: 2009. Retrieved January 15, 2010, from http://www.av.se/dokument/inenglish/European_Work/Session_Remkes.pdf.
- [9] Christ A et al. The Virtual Family-development of surface-based anatomical models of two adults and two children for dosimetric simulations. Phys Med Biol. 2010; 55(2), N23-N38.
- [10] Talfove A, Hagness SC. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. Boston, USA: Artech House, 2005.
- [11] Gabriel S, Lau R, Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues.2. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz. Phys Med Biol. 1996a; 41(11):2251-2269.
- [12] Gabriel S, Lau R, Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues .3. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues. Phys Med Biol. 1996b; 41(11):2271-2293.