

Vrednotenje električnega polja visokofrekvenčnih virov glede mejnih vrednosti iz predloga Uredbe o elektromagnetnem polju

Boštjan Batagelj¹, Iztok Humar²

¹Laboratorij za sevanje in optiko, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška c. 25, 1000 Ljubljana

²Laboratorij za osnove elektrotehnike in elektromagnetiko, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani,

Tržaška c. 25, 1000 Ljubljana

E-pošta: bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

Povzetek. Prispevek predstavlja izračun električnega polja za visokofrekvenčne vire pri mejah varne izpostavljenosti, določenih v osnutku novih slovenskih predpisov o elektromagnetnih poljih. V uvodnem delu so napisana pojasnila k osnutku predpisov o elektromagnetnih poljih in pojasnjena sprememba terminologije iz "elektromagnetnega sevanja" na "elektromagnetno polje". Nato so v skladu s storitvami informacijsko-komunikacijske tehnologije obravnavani najpomembnejši viri visokofrekvenčnega elektromagnetnega polja, ki nastane z emisijo oddajne antene. Izračunano je električno polje teh virov in določene so varnostne razdalje od antenskega vira do človeškega telesa za različna frekvenčna območja glede na ravni varnosti v zvezi z elektromagnetnimi polji osnutka nove uredbe. Izračuni visokofrekvenčnega elektromagnetnega polja so ocenjeni glede na mejno izpostavljenosti v "varovanem območju".

Ključne besede: električno polje, visokofrekvenčni vir, visokofrekvenčno elektromagnetno polje, izpostavljenost

Evaluation of the Electric Field for High-Frequency Sources for Safety Levels in the New Draft Regulation on Electromagnetic Fields

The paper presents a calculation of the electric field for high-frequency sources at safe exposure limits laid down in the new draft of the Slovenian Regulations on Electromagnetic Fields. First, the new draft regulations on electromagnetic fields are commented and an explanation is given for the change in the terminology from "electromagnetic radiation" to "electromagnetic field". Then, the most significant sources of the high-frequency electromagnetic field emitted by the transmitting antennas are addressed according to the information and communications technology services. The electric field of these sources is calculated and the safety distances from the antenna source to the human body for different frequency ranges are determined regarding the safety levels with respect to the electromagnetic fields of the new draft regulation. The calculations of the high-frequency electromagnetic field are evaluated on the limit exposure in "sensitive areas".

Keywords: electric field, high-frequency source, high-frequency electromagnetic field, exposure

1 UVOD

Slovenska uredba in pripadajoči pravilnik o elektromagnetnem sevanju v naravnem in življenjskem okolju sta po več kot dvajsetih letih prišla v fazo prenove, ki je potrebna zaradi i) uskladitve z veljavno zakonodajo in priporočili, ii) tehnološkega napredka in

iii) ozaveščenosti prebivalstva, ki se tudi v Sloveniji čedalje bolj zavzema za izogibanje tveganjem ter visoke standarde v kakovosti življenja.

Termin elektromagnetno sevanje, ki se v medijskem prostoru in pogovornem jeziku pogosto uporablja, je strokovno neustrezen in se v prenovljeni uredbi nadomešča s terminom elektromagnetno polje (EMP), ki je uveljavljen v tuji strokovni literaturi in v dokumentih mednarodnih organizacij. Po vseh letih zavzemanja elektrotehnične stroke se bo to utemeljeno poimenovanje končno uveljavilo tudi v slovenskem prostoru. Poleg tega, da ima termin sevanje negativen prizvok, saj ga mnogi povezujejo z ionizirajočim sevanjem, je treba poudariti, da termin sevanje ni utemeljeno uporabljati na celotnem frekvenčnem območju od 0 do 300 GHz. Pri nizkofrekvenčnih virih namreč ni mogoče govoriti o sevanju, saj je premikalni tok v prvi Maxwellovi enačbi tako rekoč zanemarljiv. Izraz sevanje je strokovno smiselno uporabiti pri visokofrekvenčnih virih, pri katerih je valovni delež elektromagnetnega polja prevladujoč, delež bližnjega polja pa zanemarljiv. Daljnovodi, ki obratujejo pri frekvenci 50 Hz, v prostor okoli njih ne sevajo. Zaradi valovne dolžine 6000 km, ki pripada tej frekvenci, je valovno število zelo majhno, približno 10^{-6} m^{-1} , zato pride sevalni člen do izraza šele pri razdaljah, večjih od 1000 km [2]. Prav tako ne sevajo tudi druge nizkofrekvenčne naprave. Se pa okrog teh naprav pojavita električno ali magnetno polje.

Ker želi biti nova uredba s pripadajočim pravilnikom o EMP konsistentna, nikjer več ne uporablja pojma sevanje in so vse mejne vrednosti podane kot mejne efektivne vrednosti električne poljske jakosti E v voltih na meter (V/m) in mejne efektivne vrednosti gostote magnetnega poljska B v teslih ($T = V \cdot s \cdot m^{-2}$).

V javnosti se zelo hitro zastavi vprašanje, na katerih razdaljah od izvora so dosežene mejne vrednosti električne poljske jakosti in gostote magnetnega pretoka. Vprašanje je toliko bolj zanimivo pri visokofrekvenčnih virih, kjer se EMP ustvarja s pomočjo oddajnih anten različnih dimenzij in oblik. Antena, ki skrbi za sprejem ali oddajo elektromagnetnega valovanja, je ključen element vsake radijske ali mikrovalovne naprave ali celo naprave v območju milimetrskih valov. Pri oddajnih antenah se postavlja vprašanje, na katerih razdaljah od oddajne antene so mejne vrednosti dovolj nizke, da polje ne bo preseglo predpisanih mejnih vrednosti. Pri tem je odgovor odvisen od uporabljene frekvence in moči oddajnika [3].

Spekter elektromagnetnih valovanj je omejena naravna dobrina in bi kot taka lahko vodila v nepravilno izkoriščanje telekomunikacijskih gospodarskih družb, s čimer bi si pridobile monopolistično vlogo. Da se izognemo nedopustnemu stanju na telekomunikacijskem trgu, je elektromagnetni spekter podrejen državnim in mednarodnim regulativim. Regulativna telesa so spekter razdelila številnim uporabnikom, ki v prostor nameščajo večje število elektromagnetnih virov. Pomembnost virov se v moderni dobi postindustrijske in informacijske družbe skozi čas spreminja. Sprva je pravo revolucijo pomenil že prenos električne energije s pomočjo električnih vodnikov, zdaj pa se čedalje bolj uveljavljajo brezstični načini polnjenja električnih naprav. Za prenos informacij na razdaljo so se najprej uveljavile komunikacije prek radijskih valov – radio, sledili so jim televizija, radarji, mobilna in brezžična omrežja različnih dosegov. Danes uporabljamo vse tehnologije, pozornost javnosti glede vpliva tehnologij pa je najpogosteje usmerjena predvsem na javne površine in se pozablja na čezmerno onesnaženje z EMP v notranjosti domov, kjer se brez razmisleka uporabljajo zadnji visokotehnološki dosežki.

Namen tega prispevka je prikazati nekaj primerov izračuna električne poljske jakosti visokofrekvenčnih oddajnikov za tipične telekomunikacijske sisteme. Visokofrekvenčni viri delujejo na različnih frekvenčnih območjih, ki jih regulirajo državne in mednarodne organizacije za dodeljevanje frekvenčnega spektra. Glede na uporabljeno frekvenco, nazivno moč in tip antene so izračunane razdalje, kjer je dosežena mejna vrednost polja. Zunaj tega območja polje dosega vrednosti, ki – v skladu s standardi – ne pomenijo škodljivega vpliva za človeka. V tem območju pa so mejne vrednosti presežene in neprimerne za daljše zadrževanje prebivalstva. Vplivno območje je zelo pomembno za načrtovalce vseh telekomunikacijskih sistemov, saj si prizadevajo, da so cone okrog

visokofrekvenčnih oddajnikov, znotraj katerih se prebivalstvo ne sme zadrževati, po obsegu čim manjše.

Uredba iz leta 1996 je vsebovala izjemo za oddajnike z močjo do 100 W, ki jih je izvzela iz obravnave vplivov. Ker je osnovni namen nove uredbe ščititi človeka, na katerega vpliva elektromagnetno polje (ne pa električna ali oddajna moč oddajnika), nova uredba to izjemo opušča. Namesto praga, določenega z močjo, pa za obravnavo določa prag, podan z (relativnimi) vrednostmi polja. Med snovalci brezžičnih radijskih omrežij različnih dosegov se tako poraja vprašanje, kako določiti, ali njihova naprava ustreza pogoju opustitve pri vrednotenju skupnega polja, saj se ne morejo več opreti na absolutno zapisano vrednost električne ali oddajne moči, tako kot pri uredbi iz leta 1996. Tako je namen tega članka določiti električno polje in pri različnih frekvencah določiti dopustne razdalje za približevanje visokofrekvenčnim oddajnikom.

Pri določanju dopustnih razdalj je treba upoštevati, da uredba določa mejne vrednosti za tri območja: za varovano, občutljivo in neposeljeno območje. Najstrožje vrednosti veljajo za občutljiva območja, ki so neposredno človekovo bivalno okolje, za katero veljajo najstrožji standardi kakovosti življenja. Izračuni, ki so narejeni v tem prispevku, se osredinjajo na najstrožje mejne vrednosti, ki veljajo za občutljiva območja.

V tem prispevku predstavljeni izračuni predvidevajo obravnavan elektromagnetni vir kot edini vir v prostoru, kar v praksi še zdaleč ni res. Življenjski prostor danes vsebuje enosmerne, nizkofrekvenčne in visokofrekvenčne vire (oziroma po več teh), katerih vrednosti je treba upoštevati pri umeščanju novega vira, kar med drugim tudi urejajo predpisi obremenjevanja okolja z EMP in s tem dvigujejo raven ugodja sodobnemu človeku v življenjskem okolju.

2 EMP VISOKOFREKVENČNIH VIROV

Med visokofrekvenčne vire štejemo tiste vire, ki imajo osnovno frekvenco delovanja višjo od sto kilohercev (100 kHz). Za prenos informacijskih signalov s pomočjo visokofrekvenčnega valovanja, ki ga oddaja antena, je najpomembnejši parameter gostota pretoka moči S , ki se podaja v vatih na kvadratni meter (W/m^2). Ko na anteno pripeljemo moč P iz radijskega oddajnika, antena oddaja elektromagnetno valovanje v okoliški prostor in se od nje širi na vse strani. Gostoto pretoka moči, ki jo na oddaljenosti r oddaja antena, določimo tako, da anteno objamemo z navidezno sfero polmera r in moč P delimo z njeno površino $4\pi r^2$.

V praksi antena ne seva enakomerno v vse smeri prostora. Njeno sevanje podaja smernost antene D (angl. directivity) v dani smeri glede na izotropni vir, ki je matematični ekvivalent za anteno, ki bi sevala enakomerno v vse smeri. V smeri, kamor antena največ seva, je gostota pretoka moči enaka:

$$S = \frac{P \cdot D \cdot \eta}{4 \cdot \pi \cdot r^2}, \quad (1)$$

kjer je P vstopna moč v anteno v vatih (W), η izkoristek antene in r razdalja od antene do opazovane točke v metrih (m). Zmnožek smernosti D in izkoristka η imenujemo dobitek antene G (angl. gain), ki je običajno podan v decibelih (dBi). Ker potrebujemo za izračun absolutno vrednost dobitka, se pri pretvorbi uporablja enačba:

$$G[\text{dBi}] = 10 \cdot \log(G) \quad (2)$$

S tem se enačba (1) preoblikuje v:

$$S = \frac{P \cdot G}{4 \cdot \pi \cdot r^2}. \quad (3)$$

Zmnožek dovedene moči P in dobitka G imenujemo efektivna izotropno sevana moč in jo označujemo s kratico EIRP (angl. effective isotropic radiated power). S tem se enačba (1) za gostoto pretoka moči v smeri največjega sevanja antene preoblikuje v zapis:

$$S = \frac{EIRP}{4 \cdot \pi \cdot r^2}. \quad (4)$$

Pri vseh treh zgoraj omenjenih enačbah za gostoto pretoka moči je opaziti lastnost upadanja s kvadratom oddaljenosti antene. Fizikalna lastnost upadanja s kvadratom je logična posledica obravnavanja točkastega vira v tridimenzionalnem prostoru. Gostota pretoka moči se zmanjšuje s kvadratom razdalje, ker se površina sfere v prostoru s kvadratno razdalje povečuje.

Elektromagnetno valovanje, ki izhaja radialno iz visokofrekvenčnega vira, tvori električna poljska jakost E in magnetna poljska jakost H . Jakost magnetnega polja H je v praznem prostoru sorazmerna gostoti magnetnega polja B , pri čemer je sorazmernostni koeficient permeabilnost praznega prostora.

Jakost električnega in magnetnega polja sta v elektromagnetnem valu med seboj pravokotni in obenem pravokotni na smer širjenja elektromagnetnega vala. Razmerje med električno in magnetno poljsko jakostjo je enako valovni upornosti prostora. Valovna upornost praznega prostora je enaka karakteristični impedanci praznega prostora:

$$Z_0 = 120 \cdot \pi \cdot \Omega \approx 377 \cdot \Omega. \quad (5)$$

V praznem prostoru med veličinami gostote pretoka moči S , električno poljsko jakostjo E in magnetno poljsko jakostjo H veljajo naslednji odnosi:

$$S = \frac{E^2}{Z_0} = H^2 Z_0, \quad (6)$$

kjer sta jakosti E in H izraženi v efektivnih vrednostih.

Če poznamo gostoto pretoka moči S , lahko določimo električno poljsko jakost

$$E = \sqrt{S \cdot Z_0} = \sqrt{\frac{P \cdot G}{4 \pi \cdot r^2} \cdot 120 \pi} = \frac{1}{r} \sqrt{30 \cdot P \cdot G}, \quad (7)$$

iz nje pa še magnetno poljsko jakost

$$H = \frac{E}{Z_0}. \quad (8)$$

Električna in magnetna poljska jakost padata s prvo potenco razdalje.

Vse omenjene enačbe veljajo za daljno polje v praznem prostoru, kjer se nahaja zgolj oddajniška antena. Če bi te enačbe uporabljali v bližnjem polju, bi dobili za gostoto pretoka moči neprimerno višje vrednosti oziroma nerealne vrednosti.

Za daljno polje je značilno, da imajo prispevki polja, ki izhajajo iz različnih delov antene, lahko zelo različne faze. Razsežnost bližnjega polja je odvisna od velikosti antene d . Pri antenah, ki so v velikosti ene valovne dolžine, seže območje bližnjega polja do približno razdalje ene valovne dolžine. Pri velikih antenah sega to območje precej dlje in ga po Fresnelovem pogoju izračunamo kot

$$r_{\text{Fresnel}} = \frac{d^2}{4\lambda}, \quad (9)$$

kjer je r_{Fresnel} meja med bližnjim in daljnim območjem, d največja velikost antene (premer antene, ko gre za krožno površino antene) in λ valovna dolžina elektromagnetnega valovanja.

3 PRIMERI IZRAČUNOV EMP ZA VISOKOFREKVENČNE VIRE

Lastnosti elektromagnetnih zvez so v veliki meri odvisne od uporabljenih anten na oddajni in sprejemni strani. Sprejemna antena iz prostora sprejema elektromagnetno valovanje in ga pretvarja v vhodni električni signal sprejemne naprave. Pri tem ne oddaja nikakršnega elektromagnetnega valovanja in je kot taka nezanimiva za obravnavo v tem prispevku. Upoštevati pa je treba oddajne antene, ki pretvarjajo električne signale oddajniških naprav (oddajnikov) v elektromagnetno valovanje in ga pošiljajo v prostor. Nekatere antene so lahko obenem sprejemne in oddajne (na primer pri mobilnem telefonu), kjer posebne

tehnične rešitve zagotovijo, da se sprejeti in oddani signal med seboj ne motita.

Antena kot vir elektromagnetnega valovanja je narejena iz kovinskih (prevodnih) in dielektričnih (izolatorskih) materialov. Eden najpomembnejših podatkov antene, ki jih potrebujemo pri ocenjevanju elektromagnetnega polja, je njen smerni diagram, ki pove, koliko in kam seva antena v prostor. Smerni diagram je odvisen od oblike antene in od njene bližnje okolice.

Za vsako anteno dobimo od izdelovalca podatek o dobitku antene G , ki je najpomembnejši podatek antene. Če tega podatka iz različnih razlogov ne moremo pridobiti od izdelovalca, je mogoče dobitok antene vedno izmeriti [4]. Dobitek antene podaja povečanje gostote moči antene v določeni smeri prostora v primerjavi z gostoto moči, ki bi jo sevala izotropna antena. V posameznih frekvenčnih območjih se uporabljajo antene različnih velikosti, oblik in dobitkov. Za koherentne zveze na splošno velja, da je dobitok neposredno povezan z velikostjo antene, pri čemer imajo antene z večjo površino A tudi večji dobitok G . Dobitek antene je torej mogoče tudi oceniti glede na uporabljeno frekvenco zveze in velikost antene po enačbi

$$G = \frac{4\pi \cdot \eta \cdot A}{\lambda^2}, \quad (10)$$

kjer je A fizična površina, η izkoristek antenske odprtine in λ valovna dolžina elektromagnetnega valovanja.

3.1 Frekvenčni pas od 100 kHz do 10 MHz

To najstarejše radijsko območje se še vedno uporablja za srednjevalovne oddajnike v Sloveniji, Evropi in tudi drugod po svetu. Morebitna digitalizacija srednjega vala bi sicer izboljšala kakovost prenosa in za nekajkrat zmanjšala moč oddajnikov, vendar trendi kažejo, da se ne bo šlo v digitalizacijo, temveč se število srednjevalovnih oddajnikov povsod v Evropi zmanjšuje. Zmanjševanje števila oddajnikov velja tudi za Slovenijo, kjer je poleti leta 2017 ugasnil največji srednjevalovni oddajnik v Domžalah, ki je deloval na frekvenci 918 kHz. V Sloveniji sta tako ostala le še srednjevalovna oddajnika na Belem križu (Primorska) in v Nemčavcih (Prekmurje), ki oddajata na frekvencah 549 kHz in 1170 kHz (Beli križ) ter 549 kHz in 648 kHz (Nemčavci) [5]. Mejne vrednosti za občutljivo območje v frekvenčnem pasu do 1 MHz znašajo 27,5 V/m in 29,8 V/m za frekvenco 1,17 MHz. Največja oddajna moč znaša 15 kW, za antenski stolp pa lahko vzamemo, da ima dobitok približno 1 (0 dBi). Če zanemarimo vse odboje v prostoru, znaša električna poljska jakost na razdalji 80 m od oddajniškega stolpa

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot P \cdot G}}{r} = \frac{\sqrt{30 \cdot P \cdot G}}{80 \text{ m}} = \frac{\sqrt{30 \cdot 1,5 \cdot 10^3 \text{ W} \cdot 1}}{80 \text{ m}} = 2,65 \frac{\text{V}}{\text{m}}, \quad (11)$$

kar je pod mejo tudi za občutljivo območje. Izračunana električna poljska jakost v nobenem od posameznih primerov ni večja od predpisane mejne vrednosti. Vedno pa je treba preveriti še skupno obremenitev okolice za vse vire na dotični lokaciji. Na lokacijah Nemčavci in Beli križ sta hkrati aktivna dva srednjevalovna oddajnika (dva elektromagnetna visokofrekvenčna vira). Skupna obremenjenost življenjskega okolja z visokofrekvenčnim elektromagnetnim poljem se pri večjem številu virov določi kot vsota vseh posameznih prispevkov glede na pripadajoče mejne vrednosti

$$\sum_i \left(\frac{E_i}{E_{im}} \right)^2, \quad (12)$$

pri čemer je E_i električna poljska jakost vira elektromagnetnega polja i -te frekvence in E_{im} mejna vrednost električne poljske jakosti pri i -ti frekvenci. Če je vsota večja od ena, je obremenjenost življenjskega okolja z elektromagnetnim poljem presežena. Za snovalce brezžičnega omrežja je torej pomembno, da je omenjena vsota manjša od ena, kar pomeni, da mejne vrednosti niso presežene.

Za lokacijo Beli križ na razdalji 80 m od oddajniškega stolpa velja

$$\sum_i \left(\frac{E_i}{E_{im}} \right)^2 = \left(\frac{2,65}{27,5} \right)^2 + \left(\frac{2,65}{29,8} \right)^2 = 0,017 \cdot \quad (13)$$

Za lokacijo Nemčavci na razdalji 80 m od oddajniškega stolpa velja

$$\sum_i \left(\frac{E_i}{E_{im}} \right)^2 = \left(\frac{2,65}{27,5} \right)^2 + \left(\frac{2,65}{27,5} \right)^2 = 0,019 \cdot \quad (14)$$

Izračunane vrednosti kažejo, da elektromagnetno polje na obeh lokacijah trenutno delujočih srednjevalovnih oddajnikov v Sloveniji ne presega dovoljenih vrednosti.

3.2 Frekvenčni pas od 10 MHz do 400 MHz

Mejne vrednosti električne poljske jakosti v visokofrekvenčnem območju od 10 MHz do 400 MHz znašajo 28 V/m za varovano območje in za koren iz deset manj za občutljivo območje, kar znaša 8,85 V/m.

Najbolj izkoriščen del spektra v tem območju se nahaja med 87,6 MHz in 107,9 MHz. Tu se nahajajo

radiodifuzijski oddajniki slovenskih radijskih postaj, ki oddajajo s tipično močjo 400 W prek anten z dobitkom 2,5 (4 dBi). Če ne upoštevamo odbojev od tal in drugih objektov, so pripadajoče dopustne razdalje, ki jih kot varne določa uredba o EMP, v glavnem snopu antene za občutljivo območje enake

$$r_{\text{radio}} \geq \frac{\sqrt{30 \cdot P \cdot G}}{E_{100\text{MHz}}} = \frac{\sqrt{30 \cdot 400 \text{ W} \cdot 2,5}}{8,85 \frac{\text{V}}{\text{m}}} = 19 \text{ m} \cdot \quad (15)$$

V tem frekvenčnem območju so zelo pogosti tudi viri sevanja za različne službe, kot so policija, službe za zaščito in reševanje, družbe za avtoceste Republike Slovenije (DARS) in drugi. Digitalni mobilni radio (angl. Digital Mobile Radio – DMR), ki uporablja radijske kanale pasovne širine 12,5 kHz na frekvenčnem območju 155 MHz in oddaja z maksimalno močjo 10 W, ima na stolpih nameščene antene s širino glavnega snopa 60° in dobitkom 4 (6 dBi) [5]. Če zanemarimo vse odboje v prostoru, so pripadajoče dopustne razdalje, ki jih kot varne določa uredba EMP, v glavnem snopu antene za občutljivo območje enake

$$\begin{aligned} r_{\text{DMR}} &\geq \frac{\sqrt{30 \cdot P \cdot G}}{E_{10\text{MHz} - 400\text{MHz}}} = \frac{\sqrt{30 \cdot 10 \text{ W} \cdot 10^{\frac{6\text{dBi}}{10}}}}{8,85 \frac{\text{V}}{\text{m}}} = \\ &= \frac{\sqrt{30 \cdot 10 \text{ W} \cdot 4}}{8,85 \frac{\text{V}}{\text{m}}} = 3,9 \text{ m} \cdot \end{aligned} \quad (16)$$

3.3 Frekvenčni pas od 400 MHz do 2 GHz

V frekvenčnem območju med 400 MHz in 2 GHz so najbolj razširjeni radiodifuzni televizijski oddajniki, oddajniki mobilne telefonije (bazne postaje in ročni terminali) ter oddajniki, ki jih uporabljajo železnice za komunikacijo med vlaki (GSM-R). Mejna vrednost električne poljske jakosti za varovano območje je v tem frekvenčnem pasu določena kot

$$1,375 \cdot \sqrt{f}, \quad (17)$$

v občutljivem območju pa še za koren iz deset manjša.

Prizemna digitalna televizija (angl. Digital Video Broadcasting – DVB-T) v Sloveniji deluje v območju med 482 MHz (kanal 22) in 618 MHz (kanal 32). Tipične oddajne televizijske postaje so postavljene v gorah. Digitalizacija televizijskih oddajnikov je zmanjšala oddajniške moči na tipično 1 kW z dobitkom 6 (8 dBi). Če tudi v tem primeru ne upoštevamo odbojev, so pripadajoče dopustne razdalje za občutljivo območje pri uporabi 22. kanala, ki je s stališča tovrstnega izračuna najmanj ugoden, enake

$$r_{\text{DVB-T}} \geq \frac{\sqrt{30 \cdot P \cdot G}}{\frac{E_{482\text{MHz}}}{\sqrt{10}}} = \frac{\sqrt{30 \cdot 1 \text{ kW} \cdot 6}}{1,375 \sqrt{\frac{482}{10}}} = 44 \text{ m} \quad (18)$$

v glavnem snopu antene.

Bazne postaje mobilne telefonije so tiste, ki se v zadnjih dvajsetih letih postavljajo predvsem v naseljenih predelih, saj jih z namenom boljše uporabniške izkušnje poskušajo čim bolj približati končnemu mobilnemu uporabniku. V trenutno najsodobnejši, četrti generaciji mobilnih omrežij (LTE) se uporabljajo različna frekvenčna območja: od 790 MHz do 862 MHz, od 925 MHz do 960 MHz, od 1805 MHz do 1860 MHz in od 2110 MHz do 2170 MHz (zadnje glede na frekvenčno območje že v naslednjem podpoglavju obravnavan frekvenčni pas). Največji delež pri izračunu imajo ponovno najnižje frekvence. Moč baznih postaj znaša do 100 W na sektor, ki ga pokriva antena z dobitkom 60 (18 dBi). V glavnem snopu antene so dopustne razdalje za občutljivo območje

$$r_{\text{LTE}} \geq \frac{\sqrt{30 \cdot P \cdot G}}{\frac{E_{790\text{MHz}}}{\sqrt{10}}} = \frac{\sqrt{30 \cdot 100 \text{ W} \cdot 60}}{1,375 \sqrt{\frac{790}{10}}} = 35 \text{ m} \cdot \quad (19)$$

Digitalni radijski sistem za železnice (GSM-R) deluje v frekvenčnem pasu od 921 MHz do 925 MHz. Bazne postaje z močjo 50 W napajajo ponavadi zelo usmerjene antene, ki pokrivajo zgolj železniško progo pod kotom 30° in imajo dobitok 100 (20 dBi). V glavnem snopu antene so dopustne razdalje za občutljivo območje

$$r_{\text{GSM-R}} \geq \frac{\sqrt{30 \cdot P \cdot G}}{\frac{E_{921\text{MHz}}}{\sqrt{10}}} = \frac{\sqrt{30 \cdot 50 \text{ W} \cdot 100}}{1,375 \sqrt{\frac{921}{10}}} = 29 \text{ m} \cdot \quad (20)$$

3.4 Frekvenčni pas od 2 GHz do 300 GHz

Mejna vrednost električnega polja za frekvenčni pas med 2 GHz in 300 GHz za občutljivo območje znaša 19,3 V/m. V tem frekvenčnem pasu se večinoma nahajajo usmerjene mikrovalovne zveze, ki niso obravnavane v tem prispevku, saj jih uredba zaradi izrazite usmerjenosti uporabljenih anten izključuje. Med komunikacijske sisteme, ki se nahajajo v tem frekvenčnem pasu, spada zelo razširjeno brezžično računalniško lokalno omrežje (angl. Wireless Local Area Network), bolj poznano pod kratico WiFi. Najpogosteje deluje na frekvencah 2,4 GHz in 5,2 GHz. Največja učinkovita izotropno sevana moč WiFi dostopovne točke na frekvenci 2,4 GHz znaša 100 mW. Iz tega je mogoče izračunati, da je dopustna razdalja za občutljivo območje

$$r_{\text{WiFi}} \geq \frac{\sqrt{30 \cdot P \cdot G}}{19,3 \frac{\text{V}}{\text{m}}} = \frac{\sqrt{30 \cdot 100 \text{ mW}}}{19,3 \frac{\text{V}}{\text{m}}} = 10 \text{ cm} \cdot \quad (21)$$

4 SKLEP

V novih predpisih se zaradi strokovne elektrotehniške neustreznosti in družbeno negativne konotacije termin elektromagnetno sevanje nadomešča z veliko bolj ustreznim elektromagnetnim poljem.

Električna poljska jakost z razdaljo od visokofrekvenčnega oddajnika hitro upada in je odvisna od oddajne moči, delovne frekvence in vrste antene. Posledično je treba vedeti, da lahko človeško telo absorbira več energije od šibkega vira v neposredni bližini (pametni telefon, brezžični usmerjevalniki) kot pa od bolj oddaljenega močnejšega vira (bazne postaje, RTV-oddajnik).

V prispevku so izračunane teoretične mejne razdalje za nekatere tipične brezžične telekomunikacijske sisteme, ki delujejo na različnih frekvenčnih območjih z različnimi oddajnimi močmi in uporabljajo različne antene. Pri izračunu je narejenih nekaj predpostavk, med katerimi najverjetneje najbolj izstopa prazen prostor okrog oddajnika. Zato moramo teoretične vrednosti jemati zgolj kot približek, ki ga je treba v praksi vedno podkrepiti z meritvami.

Pri izračunu resnično najslabšega mogočega primera bi bilo treba upoštevati tudi odboje vpadnega vala od tal in okoliških objektov. Pri stoodstotnem odboju se v nekaterih območjih poljska jakost E podvoji, gostota pretoka moči S pa poveča za štirikrat. Pri stoodstotnem odboju za maksimalno vrednost gostote pretoka moči S torej velja enačba

$$S = \frac{2^2 \cdot P \cdot D \cdot \eta}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{EIRP}{\pi \cdot r^2} \cdot \quad (22)$$

To pomeni, da se pri popolnem odboju elektromagnetnega valovanja od tal ali predmetov v okolici v tem prispevku izračunane mejne razdalje podvojijo.

Vsi računski primeri v tem prispevku so narejeni za najbolj neugodne primere (maksimalne moči oddajnikov) in veljajo samo v ravnini antene in v tisti smeri, kamor je usmerjen glavni snop sevalnega diagrama antene. Ker so antene oddajnikov ponavadi nameščene na visokih stolpih, ni pričakovati, da bi bili prebivalci čezmerno obremenjeni z visokofrekvenčnim elektromagnetnim poljem.

LITERATURA

- [1] Vlada RS, Uredba o elektromagnetnem sevanju v naravnem in življenjskem okolju, Uradni list RS, št. 70/96, 1996.
- [2] Matjaž Vidmar, »Elektrodinamika«, Ljubljana, 2015 <http://antena.fe.uni-lj.si/literatura/ed.pdf>.
- [3] 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.
- [4] Matjaž Vidmar, »Antene in razširjanje valov«, Ljubljana, 2017 <http://antena.fe.uni-lj.si/literatura/ar.pdf>.
- [5] Register frekvenc, AKOS, <http://www.akos-rs.si/frekvence>, dostopano: 12. 12. 2017.

ZAHVALA

Delo je bilo opravljeno v okviru priprave uredbe in pravilnika o elektromagnetnem polju za Ministrstvo za okolje in prostor in v okviru raziskovalnega programa Algoritmi in optimizacijski postopki v telekomunikacijah (št. P2-0246), ki ga je sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna.

Boštjan Batagelj je docent na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer predava predmete Satelitske komunikacije in navigacije, Optične komunikacije in Radijske komunikacije. Raziskovalno delo opravlja v Laboratoriju za sevanje in optiko, kjer se med drugim ukvarja s fizičnim nivojem prenosnih in dostopovnih telekomunikacijskih omrežij, zasnovanih na radijski in optični tehnologiji. Je avtor več kot 300 člankov, izumitelj pri desetih patentnih, soustanovitelj dveh zagonskih podjetij ter sodeluje pri domačih in mednarodnih raziskovalnih projektih s področja radijskih in optičnih tehnologij.

Iztok Humar je izredni profesor na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer izvaja predavanja, vodi vaje in raziskovalno sodeluje na področjih aplikativne elektromagnetike in telekomunikacijskega inženiringa. Vodi Laboratorij za osnove elektrotehnike in elektromagnetiko.