

IZPOSTAVLJENOST ZAPOSLENIH ELEKTROMAGNETNIM SEVANJEM V ČHE AVČE

BLAŽ VALIČ

Inštitut za neionizirna sevanja

blaz.valic@inis.si

MIHA LEBAN

Soške elektrarne Nova Gorica

miha.leban@seng.si

PETER GAJŠEK

Inštitut za neionizirna sevanja

peter.gajsek@inis.si

Povzetek – V črpalni hidroelektrarni (ČHE) Avče so uporabljene nekatere nove tehnološke rešitve, ki so pomembne tudi z vidika poklicne izpostavljenosti elektromagnetnim sevanjem (EMS). To so predvsem glavne zbiralke, izvedene kot zbiralke z izoliranimi fazami, ter celoten vzbujalni sklop, ki normalno deluje pri frekvencah, bistveno nižjih od 50 Hz. Za določanje izpostavljenosti zaposlenih EMS so bili opravljeni numerični izračuni EMS ter po pričetku obratovanja ČHE Avče še meritve. Rezultati kažejo, da zbiralke z izoliranimi fazami zelo učinkovito zmanjšajo izpostavljenost zaposlenih, saj zmanjšujejo vrednosti magnetnega polja za več kot 10 krat. Poleg nekaterih manjših območij, kjer so prisotne visoke vrednosti magnetnih polji, pa je sicer izpostavljenost zaposlenih sprejemljiva.

OCCUPATIONAL EXPOSURE TO EMF IN PSP AVČE

BLAŽ VALIČ

Inštitut za neionizirna sevanja

blaz.valic@inis.si

MIHA LEBAN

Soške elektrarne Nova Gorica

miha.leban@seng.si

PETER GAJŠEK

Inštitut za neionizirna sevanja

peter.gajsek@inis.si

Abstract – *In the pumped storage hydropower plant (PSP) Avče different new technologies are used which greatly influences the occupational exposure to electromagnetic fields (EMF). Not only that the busbars are of the isolated phase type, but also the PSP Avče has variable speed. Therefore, depending on the load, the whole excitation system normally works at the frequency much lower than the normal 50 Hz. The occupational exposure was determined by numerical calculations and measurements. Results show that the isolate phase busbars reduce the exposure of the workers, as the magnetic field level is more than 10 times lower compared to traditional busbars. Beside some small areas inside the PSP Avče, the occupational exposure is acceptable.*

I. UVOD

Zagotavljanje varnosti in zdravja pri delu je v proces, ki se v podjetju izvaja neprestano. Še posebej so aktivnosti, povezane z varnostjo in zdravjem pri delu, pomembne ob uvajanju sprememb ali novosti v delovni proces. Nov objekt, kakršen je črpalna hidroelektrarna (v nadaljevanju ČHE) Avče poleg ostalih tveganj prinaša tudi nova tveganja, povezana z elektromagnetnimi sevanji (v nadaljevanju EMS). Še posebej je objekt pomemben, saj v svojem postroju uporablja nekatere sklope in tehnologije, ki se v Sloveniji uporabljajo prvič. Predvsem so to glavne zbiralke, ki so izvedene kot zbiralke z izoliranimi fazami, ter celoten sklop vzbujanja generatorja, ki ga sestavljajo vzbujalni transformator, konverter, zagonski transformator ter vzbujalne zbiralke. Posebnost tega sklopa je, da v normalnem režimih delovanja sklopi delujejo pri frekvencah blizu 0 Hz in le občasno pri frekvencah do 51 Hz.

Z namenom ugotavljanja izpostavljenosti EMS zaposlenih v ČHE Avče smo še pred pričetkom obratovanja ČHE Avče s pomočjo numeričnih izračunov in modeliranja identificirali tiste sklope, ki bi lahko povzročali čezmerne sevalne obremenitve. Po pričetku obratovanja ČHE Avče so bile v okolici teh sklopov izvedene meritve. Tako izračuni kot meritve upoštevajo najbolj neugodne razmere, ki pomenijo največje možne sevalne obremenitve v okolici virov.

Kot izhodišče za oceno sevalnih obremenitev služi razvrstitev obravnavanega območja v območje z omejenim dostopom, kjer je dostop omogočen samo pooblaščenim osebam. Za območja z omejenim dostopom, kjer gre za poklicno izpostavljenost, v Sloveniji trenutno še ni veljavne zakonodaje. Za oceno sevalnih obremenitev smo zato uporabili določila Direktive 2004/40/ES Evropskega parlamenta in Sveta dne 29. aprila 2004 o minimalnih zdravstvenih in varnostnih zahtevah v zvezi z izpostavljenostjo delavcev tveganjem, ki nastajajo zaradi fizikalnih dejavnikov (elektromagnetnih sevanj) [1].

Poleg tega je za vrednotenje poklicne izpostavljenosti ter pripravo strokovnih izhodišč za oceno tveganja pomembno ugotoviti, kdaj je v oceni tveganja potrebno vrednotiti izpostavljenost EMS. To je potrebno takrat, ko so vrednosti EMS večje od mejnih vrednosti, ki veljajo za prebivalstvo. Za prebivalstvo je smiselna uporaba priporočil 1999/519/ES [2].

II. MEJNE VREDNOSTI

Direktiva 2004/40/ES ter priporočila 1999/519/ES določata mejne vrednosti izpostavljenosti in opozorilne vrednosti (v primeru priporočil 1999/519/ES se uporabljajo izrazi mejne vrednosti ter izvedene mejne vrednosti). Mejne vrednosti

izpostavljenosti so določene za tiste elektromagnetne veličine, ki znotraj človeškega telesa lahko povzročijo škodljive učinke na zdravje. Za nizkofrekvenčna EMS je to gostota toka v telesu. Na podlagi literature so sestavljalci smernic Mednarodne komisije za varstvo pred neionizirnimi sevanji (ICNIRP) [3] identificirali gostoto toka v telesu, pod kateri doslej ni bilo ugotovljenih nobenih škodljivih bioloških vplivov. Ob upoštevanju 10 kratnega varnostnega faktorja za poklicno izpostavljenost so določili mejne vrednosti za poklicno izpostavljenost (tabela 1), medtem ko so za splošno prebivalstvo uporabili varnostni faktor 50 (tabela 2). Na smernicah ICNIRP temeljijo mejne in opozorilne vrednosti Direktive 2004/40/EC in priporočil 1999/519/ES.

Velja omeniti, da je ICNIRP v lanskem letu izdal prenovljene smernice za izpostavljenost nizkofrekvenčnim magnetnim poljem, kjer mejne vrednosti namesto gostote toka omejujejo električno poljsko jakost v človeškem telesu. Obenem je tudi Direktiva 2004/40/EC v postopku sprememb in dopolnitev, a določila oziroma omejitve se bistveno ne bodo spremenile.

Ker je določanje elektromagnetnih veličin znotraj človeškega telesa zahtevno, Direktiva 2004/40/ES določa tudi opozorilne vrednosti, ki pa veljajo za veličine v prostoru brez prisotnosti človeka: gostoto magnetnega pretoka in električno poljsko jakost. Opozorilne vrednosti so določene konzervativno, kar pomeni, da nepreseganje opozorilnih vrednosti zagotavlja nepreseganje mejnih vrednosti.

Tabela 1: Poklicna izpostavljenost: mejne vrednosti izpostavljenosti (gostota toka) ter opozorilne vrednosti za EMS nizkih frekvenc (električna poljska jakost in gostota magnetnega pretoka) glede na Direktivo 2004/40/ES.

| frekvenca f [Hz] | gostota toka I [mA/m ²] | električna poljska jakost E [kV/m] | gostota magnetnega pretoka B [μT] |
|--------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| do 1 | 40 | - | 2×10^5 |
| 1 – 8 | $40/f$ | 20 | $2 \times 10^5/f^2$ |
| 8 – 25 | $40/f$ | 20 | $2,5 \times 10^4/f$ |
| 25 – 820 | 10 | $500/f$ | $2,5 \times 10^4/f$ |
| 50 | 10 | 10 | 500 |

Tabela 2: Prebivalstvo: mejne vrednosti (gostota toka) ter izvedene mejne vrednosti za EMS nizkih frekvenc (električna poljska jakost in gostota magnetnega pretoka) glede na priporočila 1999/519/ES.

| frekvenca f [Hz] | gostota toka I [mA/m ²] | električna poljska jakost E [kV/m] | gostota magnetnega pretoka B [μT] |
|--------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| do 1 | 8 | - | 4×10^4 |
| 1 – 8 | $8/f$ | 10 | $4 \times 10^4/f^2$ |
| 8 – 25 | $8/f$ | 10 | $5 \times 10^3/f$ |
| 25 – 820 | 2 | $250/f$ | $5 \times 10^3/f$ |
| 50 | 2 | 5 | 100 |

Iz tabel 1 in 2 je razvidno, da so tako mejne vrednosti izpostavljenosti kot tudi opozorilne vrednosti v območju, kjer delujejo viri znotraj ČHE Avče (0 – 50 Hz) najnižje pri frekvenci 50 Hz, zato bodo v nadaljnji analizi izpostavljenosti uporabljene te vrednosti.

III. PREDSTAVITEV VIRA

ČHE Avče je kompleksen tehnološki postroj, ki je tudi z vidika izpostavljenosti EMS novost. Za zagotavljanje prilagodljivosti obratovalnih razmer glede na trenutne potrebe na trgu električne energije ob sočasnem kar se le da visokem izkoristku se namreč v ČHE Avče uporablja dvojno napajani asinhronski stroj. Zaradi tega so med delovanjem ČHE Avče poleg EMS s frekvenco 50 Hz (in višjimi harmonskimi komponentami) prisotna tudi EMS s frekvencami med 0 in 50 Hz, ki so posledica vzbujalnega sistema.

V elektroenergetsko omrežje je ČHE Avče priključena prek dveh dvosistemskih 110 kV daljnovodov, ki v zadnjem delu potekata kot štirje kablovodi, ki so v ČHE Avče priključeni na GIS stikališče. Iz GIS stikališča je napajanje dovedeno do glavnega 110/18 kV 200 MVA transformatorja.

Od glavnega transformatorja dalje so glavne zbiralke v celoti izvedene kot zbiralke z izoliranimi fazami. Speljane so najprej v prostor, kjer je nameščen generatorski odklopnik ter ločilke za menjavo zaporedja faz, nato pa se po robu glavnega jaška spustijo približno 60 m pod nivo tal do generatorja.

V prostoru, kjer je nameščen generatorski odklopnik, se od glavnih zbiralk odcepijo zbiralke za napajanje vzbujalnega transformatorja. Vzbujalni transformator moči 11,6 MVA napetost iz 18 kV zniža na 2,5 kV, kolikor jo potrebuje konverter za vzbujanje.

V konverterju za vzbujanje se izmenična napetost najprej usmeri, nato pa z razsmerniki generira izmenična napetost frekvence od 0 do 51 Hz. Konverter je v obliki zaprtega kontejnerja nameščen v pritličju ČHE Avče. Iz njega izhajajo vzbujalne zbiralke, ki so najprej izvedene v obliki ploščatih odprtih zbiralk in speljane do posebnega odprtega zagonskega transformatorja, ki služi samo v prvi fazi zagona elektrarne v črpalni režim za višanje izhodne napetosti vzbujanja, nato pa je zagonski transformator ves čas izključen. Vzbujalne zbiralke so od zagonskega transformatorja izvedene kot zbiralke z izoliranimi fazami. Celotno območje v pritličju, kjer so nameščeni zagonski transformator ter pripadajoča stikala in odprte zbiralke, je ograjeno in med delovanjem vanj dostop ni mogoč, zbiralke z izoliranimi fazami pa so speljane v kletki objekta in naprej po glavnem jašku do globine približno 60 m pod nivojem tal do generatorja.

Generator moči 180 MVA je nameščen tik nad turbino na globini približno 60 m pod nivojem tal.

IV. MATERIALI IN METODE

V skladu z določili Direktive 2004/40/ES ter standarda EN 50499:2009 [5] je oceno sevalnih obremenitev mogoče izvesti na več načinov, eden izmed njih je tudi s pomočjo numeričnega izračuna pričakovanih sevalnih obremenitev in meritev ter primerjavo vrednosti z opozorilnimi vrednostmi.

Če so izmerjene oziroma izračunane vrednosti višje od izvedenih mejnih vrednosti za splošno prebivalstvo, govorimo o poklicni izpostavljenosti in za vse delavce, ki vstopajo v takšna območja, je v oceni tveganja izpostavljenost EMS potrebno obravnavati. Če pa so na nekem območju presežene tudi opozorilne vrednosti za poklicno izpostavljenost, je brez ugotavljanja skladnosti z mejnimi vrednostmi izpostavljenosti potrebno dostop v takšna območja preprečiti.

S pomočjo numeričnih izračunov smo še pred pričetkom obratovanja ČHE Avče izračunali gostoto magnetnega pretoka in identificirali tiste sklope, v bližini katerih so opozorilne vrednosti presežene in je potrebna v nadaljevanju natančnejša analiza. Električne poljske jakosti v numeričnih izračunih nismo obravnavali, saj so zaradi oklopov vrednosti zelo majhne, kar so kasneje potrdile tudi meritve (vrednosti znašajo pod 10 V/m, razen v prostoru glavnega transformatorja, kjer so tik pod zbiralkami do 900 V/m).

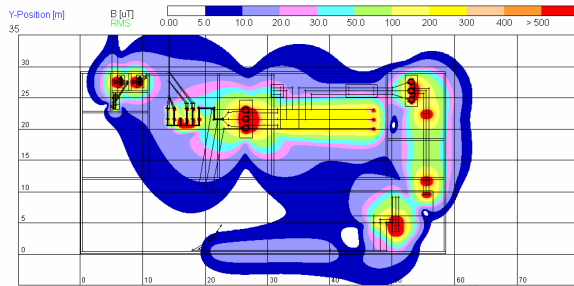
Numerično modeliranje in izračune magnetnega polja smo opravili s programskim paketom Narda EFC-400EP Electric and Magnetic Field Calculation, ki nizkofrekvenčne sevalne obremenitve izračuna s pomočjo metode končnih vodnikov. Sestavne dele (naprave, povezovalni kabli, stikališča) se v modelu predstavi z večjim številom končnih vodnikov. Vsakemu od vodnikov se določijo fizikalne lastnosti ter vrednosti elektromagnetnih veličin, potrebnih za izračun. Rezultirajoče polje je posledica prispevkov vseh teh končnih vodnikov.

Po pričetku obratovanja so bile opravljene še meritve. Z meritvami so bile preverjene izračune vrednosti ter določene sevalne obremenitve v nekaterih sklopih, kjer numerični izračuni niso bili opravljeni (vzbujalni konverter). Meritve gostote magnetnega pretoka so bile izvedene z merilnima inštrumentoma Wandel & Goltermann EFA-3 z merilno negotovostjo $\pm 2,12$ dB ter Narda ELT-400 z merilno negotovost $\pm 2,32$ dB.

Meritve so bile izvedene ob nazivni obremenitvi elektrarne, ker pa so sklopi vzbujanja (vzbujalni transformator, zbiralke med vzbujalnim transformatorjem in vzbujalnim konverterjem, zagonski transformator in vzbujalne zbiralke) bistveno bolj obremenjeni med zagonom ČHE Avče v črpalni režim, so bile meritve teh sklopov opravljene tudi med zagonom elektrarne v črpalni režim.

V. IZRAČUNANE IN IZMERJENE VREDNOSTI EMS

Numerični izračuni gostote magnetnega pretoka so bili opravljeni za vse naprave v ČHE Avče. V modelu je bilo predvideno 10 kratno zmanjšanja magnetnega polja zaradi uporabe zbiralk z izoliranimi fazami v primerjavi s klasično izvedenimi zbiralkami. Prikaz gostote magnetnega pretoka v pritličju na višini 1 m nad tlemi je prikazan na sliki 1.

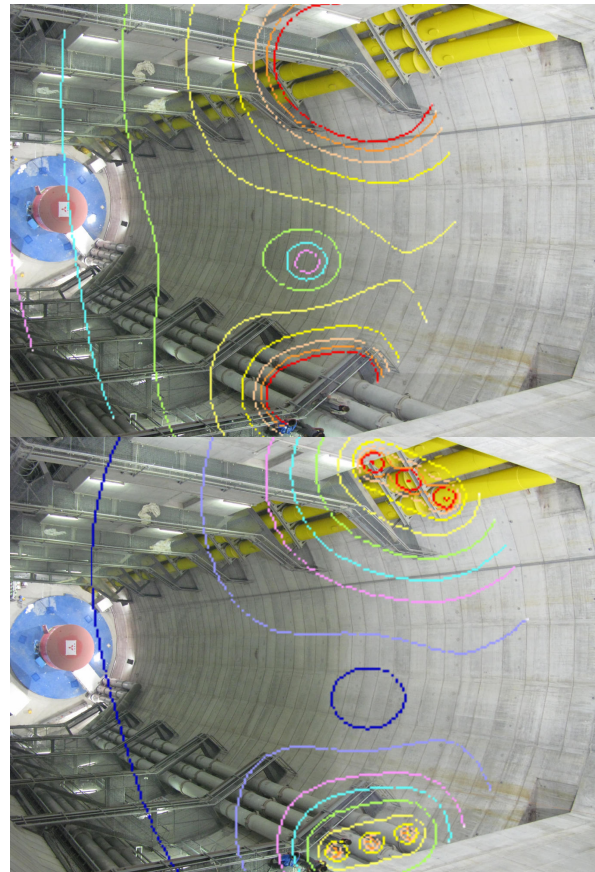


Slika 1: Gostota magnetnega pretoka v pritličju ČHE Avče na višini 1 m nad tlemi. Z rdečo je prikazano območje, kjer so presežene opozorilne vrednosti za gostoto magnetnega pretoka.

Izračuni kažejo, da so mejne vrednosti lahko presežene neposredno ob 110 kV kablovodih, ob glavnem transformatorju, zbiralkah, ki izhajajo iz vzbujalnega transformatorja, izhoda iz konverterja za vzbujanje in transformatorjev za lastno rabo.

Po pričetku obratovanja ČHE Avče so bile opravljene tudi meritve. Rezultati meritev so v veliki meri potrdili rezultate numeričnih izračunov. V numeričnih izračunih smo predpostavili 10 kratno zmanjšanje magnetnega polja zaradi uporabe zbiralk z izoliranimi fazami, rezultati meritev pa kažejo na še višje zmanjšanje magnetnega polja. Na sliki 2 je prikazana primerjava gostote magnetnega polja v okolici zbiralk, če bi bile izvedene klasično (zgoraj) ter kot zbiralke z izoliranimi fazami (spodaj). Rdeče območje, to je območje, kjer so opozorilne vrednosti, je veliko večje za klasično izvedbo zbiralk.

Rezultati kažejo, da so opozorilne vrednosti presežene neposredno ob 110 kV kablovodu. Tik ob kablju v območju, ko so kabli položeni v trikot, gostota magnetnega pretoka doseže do 0,9 mT, v območju, sicer pa do 1,7 mT. Z oddaljenostjo magnetno polje zelo hitro upade in je že na razdalji 0,1 m pod 400 μ T. Opozorilne vrednosti so presežene tudi neposredno ob zbiralkah na sekundarni strani vzbujalnega transformatorja, kjer gostota magnetnega pretoka doseže do 1,7 mT. Največje območje s preseženimi opozorilnimi vrednostmi se nahaja v okolici kontejnerja za vzbujanje med zagonom ČHE Avče v črpalnem režimu, ko se vključi še dodatni suhi zagonski transformator, k visokim vrednostim prispevajo tudi zbiralke, ki so tu klasične izvedbe.



Slika 1: Gostota magnetnega pretoka v okolici zbiralk v glavnem jašku. Zgoraj: zbiralke izvedene klasično. Spodaj: zbiralke z izoliranimi fazami. Z rdečo je prikazano območje, kjer so presežene opozorilne vrednosti.

Tabela 3: Pregled območij, kjer so glede na numerične izračune in meritve presežene opozorilne vrednosti glede na direktivo 2004/40/EC.

| naprava oziroma del naprave | oddaljenost |
|---|-------------|
| 110 kV kablovod | 0,1 m |
| Zbiralke na sekundarni strani vzbujalnega transformatorja | 0,6 m |
| Izhod iz konverterja za vzbujanje (med zagonom v črpalni režim) | 3 m |
| Transformatorji za lastno rabo (NN zbiralke) | 0,5 m |

Tabela 4: Pregled območij, kjer so glede na numerične izračune in meritve presežene izvedene mejne vrednosti glede na priporočila 1999/519/ES.

| naprava oziroma del naprave | oddaljenost |
|---|-------------|
| 110 kV kablovod | 0,5 m |
| 110 kV GIS stikališče | 0,5 m |
| Glavni transformator | 1 m |
| Glavne zbiralke | 0,5 m |
| Zbiralke na sekundarni strani vzbujalnega transformatorja | 1,5 m |
| Izhod iz konverterja za vzbujanje (med zagonom v črpalni režim) | 10 m |
| Transformatorji za lastno rabo | 1 m |

VI. ZAKLJUČKI

Za celovito zagotavljanje varnosti in zdravja je glede na rezultate izračunov in meritev potrebno izvesti nekaj ukrepov. Potrebno je zagotoviti, da vsi, ki vstopajo v ČHE Avče, vedo, kje in kdaj so lahko opozorilne vrednosti presežene. To pomeni, da je o tem potrebno poleg zaposlenih obvestiti oziroma informirati tudi vse zunanje izvajalce in obiskovalce ČHE Avče. Posebno obravnavo zahtevajo osebe z aktivnimi medicinskimi vsadki. Nekateri medicinski vsadki, na primer srčni spodbujevalnik ali kardioverter-defibrilator, med delovanjem merijo majhne električne potenciale v človeškem telesu in jih lahko zunanje polje zmoti. Običajno (razen v izjemnih primerih, ko bi pacient moral biti o tem posebej obveščten) zunanja polja, manjša od mejnih vrednosti za prebivalstvo, ne predstavljajo težav za aktivne medicinske vsadke, zato so tudi ljudje z aktivnimi medicinskimi vsadki izven območij, določenih v tabeli 4, varni. Izjema so celotne vzbujalne zbiralke med zagonom elektrarne, še posebej pa območje ob zagonskem transformatorju med zagonom elektrarne v črpalni način. Med zagonom elektrarne je namreč za določen čas frekvenca v vzbujalnem sistemu nizka, kar sovпада s srčnim ritmom. V tem frekvenčnem območju pa je imunost srčnih spodbujevalnikov veliko manjša, zato so mogoče težave tudi na oddaljenostih, večjih od tistih, določenih v tabeli 4. V smislu preventivnega ravnanja je zato za osebe s srčnim spodbujevalnikom smiselno, da se med zagonom elektrarne nahajajo najmanj na dvakratni razdalji od tistih, določenih v tabeli 4. Poleg tega je na območje ob zagonskem transformatorju potrebno namestiti opozorilne oznake za aktivne medicinske vsadke ter namestiti vidno oznako (signalna luč), ki sveti med zagonom elektrarne v črpalnem načinu.

Rezultati opravljenih numeričnih izračunov in meritev so pokazali, da so zaradi uporabe zbiralk z izoliranimi fazami zaposleni v bližini zbiralk več kot 10 krat manj izpostavljeni magnetnemu polju. Zbiralke z izoliranimi fazami so učinkovit ukrep, kako bistveno zmanjšati območja, kjer so delavci lahko čezmerno izpostavljeni, saj numerični izračuni kažejo, da bi v primeru klasične izvedbe zbiralk bila območja, kjer so opozorilne vrednosti presežene, veliko večja in bi bilo posledično izvajanje ustreznih ukrepov varnosti in zdravja veliko zahtevnejše.

REFERENCE

- [1] Direktiva 2004/40/ES Evropskega parlamenta in Sveta dne 29. aprila 2004 o minimalnih zdravstvenih in varnostnih zahtevah v zvezi z izpostavljenostjo delavcev tveganjem, ki nastajajo zaradi fizikalnih dejavnikov (elektromagnetnih sevanj). Ur. l. EU, L 159/1, 2004.

- [2] Council recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz) (1999/519/EC) Ur. l. EU 199/59.
- [3] ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Physics. 4: 1998, 494-522
- [4] ICNIRP. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz - 100 kHz). Health Physics. 99(6): 2010, 818-836.
- [5] SIST EN 50499:2009 - Postopki ocenjevanja izpostavljenosti delavcev elektromagnetnim sevanjem