



**UNIVERZITET NOVI SAD
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA**



Departman za energetiku, elektroniku i telekomunikacije

Doktorska disertacija

**METOD PROCENE IZLOŽENOSTI ELEKTRIČNIM
POLJIMA VISOKIH FREKVENCIJA BAZIRAN NA
ADAPTIVNIM GRANICAMA IZLOŽENOSTI**

Kandidat:
Master inženjer Dragan Kljajić

Mentor:
Prof. dr Nikola Đurić

Novi Sad, 2017. godina



КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

| | | | |
|---|---|--|----------------|
| Редни број, РБР: | | | |
| Идентификациони број, ИБР: | | | |
| Тип документације, ТД: | Монографска публикација | | |
| Тип записа, ТЗ: | Текстуални штампани материјал | | |
| Врста рада, ВР: | Докторска дисертација | | |
| Аутор, АУ: | м.сц. Драган Кљајић | | |
| Ментор, МН: | проф. др Никола Ђурић | | |
| Наслов рада, НР: | Метод процене изложености електричним пољима високих фреквенција базиран на адаптивним границама изложености | | |
| Језик публикације, ЈП: | Српски (Латиница) | | |
| Језик извода, ЈИ: | Српски (Латиница) | | |
| Земља публикавања, ЗП: | Република Србија | | |
| Уже географско подручје, УГП: | Аутономна Покрајина Војводина | | |
| Година, ГО: | 2018 | | |
| Издавач, ИЗ: | Ауторски репринт | | |
| Место и адреса, МА: | Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад | | |
| Физички опис рада, ФО: (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога) | 7 поглавља, 101 страна, 106 цитата, 32 табеле, 53 слике, 3 прилога | | |
| Научна област, НО: | Електротехничко и рачунарско инжењерство | | |
| Научна дисциплина, НД: | Теоријска електротехника | | |
| Предметна одредница/Кључне речи, ПО: | Електромагнетска поља, нејонизујуће зрачење, мерења, процена изложености | | |
| УДК | | | |
| Чува се, ЧУ: | Библиотека Факултета техничких наука, Нови Сад | | |
| Важна напомена, ВН: | | | |
| Извод, ИЗ: | У дисертацији је предложен и развијен метод процене изложености за широкопојасна мерења нивоа електричног поља високих фреквенција. Метод је базиран на одређивању граница изложености, као и њиховом прилагођењу спектралном садржају поља на мерној локацији. Верификација развијеног метода је обављена анализом резултата експерименталних мерења у реалним условима. | | |
| Датум прихватања теме, ДП: | 09.02.2017. | | |
| Датум одбране, ДО: | | | |
| Чланови комисије, КО: | Председник: | др Неда Пекарић-Нађ, ФТН, Нови Сад | Потпис ментора |
| | Члан: | др Небојша Раичевић, ЕФ, Ниш | |
| | Члан: | др Каролина Касаш-Лажетић, ФТН, Нови Сад | |
| | Члан: | др Миодраг Милутинов, ФТН, Нови Сад | |
| | Члан, ментор: | др Никола Ђурић, ФТН, Нови Сад | |



КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

| | | |
|--|--|--|
| Accession number, ANO : | | |
| Identification number, INO : | | |
| Document type, DT : | Monographic publication | |
| Type of record, TR : | Textual printed material | |
| Contents code, CC : | Ph.D. thesis | |
| Author, AU : | Dragan Kljajić, M.Sc. | |
| Mentor, MN : | prof. Nikola Đurić, Ph.D. | |
| Title, TI : | The adaptive boundary exposure assessment approach for the high frequency electric fields | |
| Language of text, LT : | Serbian (Latin) | |
| Language of abstract, LA : | Serbian (Latin) | |
| Country of publication, CP : | Republic of Serbia | |
| Locality of publication, LP : | Autonomous Province of Vojvodina | |
| Publication year, PY : | 2018 | |
| Publisher, PB : | Author's reprint | |
| Publication place, PP : | Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad | |
| Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes) | 7 chapters, 101 pages, 106 references, 32 tables, 53 figures, 3 appendixes | |
| Scientific field, SF : | Electrical and computer engineering | |
| Scientific discipline, SD : | Theoretical electromagnetics | |
| Subject/Key words, S/KW : | Electromagnetic fields, non-ionizing radiation, measurements, exposure assessment | |
| UC | | |
| Holding data, HD : | The Library of Faculty of technical sciences, Novi Sad | |
| Note, N : | | |
| Abstract, AB : | One new exposure assessment approach for broadband measurements of the high-frequency electric field strength is proposed and developed in the thesis. The approach is based on the determination of the upper and lower exposure boundaries, as well as their adaptation to the spectral content of the field at the measurement location. The verification of the developed approach was performed by analyzing the results of experimental measurements in real conditions. | |
| Accepted by the Scientific Board on, ASB : | 2017/02/09 | |
| Defended on, DE : | | |
| Defended Board, DB : | President: | Neda Pekarić-Nadž, Ph.D., FTN, Novi Sad |
| | Member: | Nebojša Raičević, Ph.D., EF, Niš |
| | Member: | Karolina Kasaš-Lažetić, Ph.D., FTN, Novi Sad |
| | Member: | Miodrag Milutinov, Ph.D., FTN, Novi Sad |
| | Member, Mentor: | Nikola Đurić, Ph.D., FTN, Novi Sad |
| | | Menthor's sign |

Zahvalnice

Želim da se zahvalim svom mentoru, prof. dr Nikoli Đuriću, na svesrdnoj pomoći i savetima prilikom istraživanja, pisanja naučnih radova i, konačno, izradi ove disertacije.

Takođe, zahvaljujem se i prof. dr Mirjani Damjanović, kao savetniku na početku mojih doktorskih studija, čija pomoć mi je bila od velikog značaja tokom studiranja i istraživanja.

Zahvaljujem se svim članovima Laboratorije za elektromagnetsku kompatibilnost, Fakulteta tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu, na pomoći tokom eksperimentalnih merenja, čiji rezultati su iskorišćeni za potrebe mojih istraživanja i ove doktorske disertacije.

Zahvaljujem se kolegama sa Katedre za teorijsku elektrotehniku, Fakulteta tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu, na podršci i razumevanju tokom dosadašnjeg naučno-istraživačkog rada.

Na kraju, ponajviše želim da se zahvalim svojoj porodici, na podršci, strpljenju i razumevanju.

Sadržaj:

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Uvod..... | 1 |
| 1.1 | Predmet istraživanja | 3 |
| 1.1.1 | Vrste merenja | 4 |
| 1.1.2 | Procena izloženosti..... | 6 |
| 1.2 | Potreba za istraživanjem..... | 7 |
| 1.3 | Cilj istraživanja..... | 8 |
| 1.4 | Kratak sadržaj i pregled rada | 9 |
| 2 | Stanje u oblasti | 11 |
| 2.1 | Teorijska modelovanja raspodele EM polja | 12 |
| 2.2 | <i>Spot</i> merenja nivoa EM polja | 12 |
| 2.2.1 | Merenja na otvorenom prostoru (<i>outdoor</i>)..... | 13 |
| 2.2.2 | Merenja u zatvorenom prostoru (<i>indoor</i>) | 16 |
| 2.2.3 | Merenja u zonama povećane osetljivosti..... | 17 |
| 2.3 | Merenja nivoa EM polja pomoću personalnih ekspozimetara | 18 |
| 2.4 | Kontinualna merenja (monitoring) nivoa EM polja | 19 |
| 2.5 | Procena izloženosti EM poljima..... | 23 |
| 3 | Metod procene izloženosti baziran na granicama izloženosti | 29 |
| 3.1 | Određivanje granica izloženosti | 29 |
| 3.2 | Razlika između granica izloženosti | 31 |
| 3.3 | Prilagođenje granica izloženosti..... | 36 |
| 4 | Rezultati eksperimentalnih istraživanja..... | 41 |
| 4.1 | Lokacija merenja | 41 |
| 4.2 | Procedura merenja i rezultati merenja | 46 |
| 4.2.1 | Širokopojasno merenje nivoa električnog polja | 46 |
| 4.2.2 | Rezultati širokopojasnog monitoringa nivoa električnog polja..... | 49 |
| 4.2.3 | Proračun inicijalnih granica izloženosti električnom polju | 51 |
| 4.2.4 | Frekvencijski selektivno merenje nivoa električnog polja | 52 |
| 4.2.5 | Procena stvarne izloženosti električnom polju | 55 |
| 4.2.6 | Procena maksimalne izloženosti baznim stanicama..... | 57 |
| 4.2.7 | Prilagođenje inicijalnih granica izloženosti električnom polju | 59 |
| 5 | Primena predloženog metoda procene izloženosti u opsegu niskih frekvencija | 65 |
| 5.1 | Teorijske osnove..... | 65 |
| 5.2 | Lokacija trafostanice | 67 |
| 5.3 | Procedura merenja i rezultati merenja | 69 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.3.1 | Širokopojasno merenje nivoa magnetskog polja..... | 69 |
| 5.3.2 | Proračun inicijalnih granica izloženosti magnetskom polju..... | 73 |
| 5.3.3 | Spektralna analiza sadržaja magnetskog polja..... | 75 |
| 5.3.4 | Prilagođenje inicijalnih granica izloženosti magnetskom polju..... | 76 |
| 6 | Diskusija..... | 81 |
| 7 | Zaključak..... | 85 |
| | Literatura..... | 87 |

Lista slika

| | |
|--|----|
| Slika 1. Spektar zračenja [3]..... | 2 |
| Slika 2. Primeri ručnih mernih instrumenata..... | 4 |
| Slika 3. Primer frekvencijskog spektra signala [22]..... | 5 |
| Slika 4. Koncept SEMONT sistema za kontinualni monitoring. | 9 |
| Slika 5. Primeri <i>outdoor</i> merenja [37]-[39]..... | 13 |
| Slika 6. Izloženost EM polju u različitim geografskim oblastima [41]..... | 14 |
| Slika 7. Promene intenziteta vektora jačine električnog polja na višemesečnom nivou [44]..... | 15 |
| Slika 8. Primeri <i>indoor</i> merenja [43], [52]..... | 17 |
| Slika 9. Izgled personalnog ekspozimetra EME Spy 120 [58]..... | 18 |
| Slika 10. Koncept kontinualnog monitoringa nivoa EM polja – primer SEMONT sistema. | 20 |
| Slika 11. Primeri širokopoljnih senzorskih elemenata za merenje nivoa EM polja [73], [74]..... | 21 |
| Slika 12. Upotreba vozila za obavljanje merenja nivoa EM polja u pokretu [78]..... | 22 |
| Slika 13. Vizuelni prikaz promene nivoa električnog polja različitim bojama [76]..... | 22 |
| Slika 14. Mape sa prikazom promene nivoa EM polja različitim bojama [80]. | 23 |
| Slika 15. Ekstrapolacija izmerenih vrednosti nivoa električnog polja do maksimalno mogućih. | 25 |
| Slika 16. Poređenje mernih rezultata sa minimalnim referentnim graničnim nivoom [65]. | 26 |
| Slika 17. Prikaz maksimalne granice sveukupne izloženosti [65]..... | 27 |
| Slika 18. Odnos izmerene vrednosti i minimalnog referentnog graničnog nivoa [65]..... | 27 |
| Slika 19. Izbor minimalnog i maksimalnog propisanog referentnog graničnog nivoa, u širokopoljnom frekvencijskom opsegu merne sonde. | 29 |
| Slika 20. Granice izloženosti električnim poljima visokih frekvencija. | 30 |
| Slika 21. Prikaz dnevnih granica izloženosti električnim poljima. | 31 |
| Slika 22. Promena relativne razlike između granica izloženosti [83]. | 33 |
| Slika 23. Promena relativne razlike između granica izloženosti za dva GSM podopsega merne sonde Narda EP-4B-01..... | 35 |
| Slika 24. Izbor prikladnijeg minimalnog i maksimalnog propisanog referentnog graničnog nivoa, za konkretnu mernu lokaciju. | 36 |
| Slika 25. Prilagođenje granica izloženosti električnim poljima visokih frekvencija..... | 37 |
| Slika 26. Primena metoda baziranog na adaptivnim granicama izloženosti električnim poljima. | 38 |
| Slika 27. Lokacije merenja u okviru kampusa Univerziteta u Novom Sadu [88]. | 42 |
| Slika 28. Rezultati monitoringa nivoa polja u kampusu Univerziteta u Novom Sadu [88]. | 43 |
| Slika 29. Okolina merne lokacije broj 6. | 44 |
| Slika 30. Mreža mernih tačaka. | 47 |
| Slika 31. Merenja nivoa električnog polja na tri visine..... | 48 |
| Slika 32. Kontinualni monitoring nivoa električnog polja u “ <i>hot spot</i> ” tački. | 48 |

| | |
|---|----|
| Slika 33. Postavka mernog instrumenta Narda NBM 550 na lokaciji broj 6. | 49 |
| Slika 34. Širokopolasni kontinualni monitoring nivoa električnog polja na lokaciji broj 6. | 50 |
| Slika 35. Inicijalne granice izloženosti električnom polju na mernoj lokaciji broj 6. | 51 |
| Slika 36. Postavka analizatora spektra FSH3 na lokaciji broj 6. | 53 |
| Slika 37. Spektralni sadržaj električnog polja na mernoj lokaciji broj 6. | 54 |
| Slika 38. Dva pristupa procene izloženosti električnom polju na mernoj lokaciji broj 6. | 56 |
| Slika 39. Maksimalna moguća izloženost baznim stanicama u blizini merne lokacije broj 6, u poređenju sa inicijalnim granicama izloženosti. | 58 |
| Slika 40. Prilagođenje granica izloženosti električnom polju na mernoj lokaciji broj 6, u slučajevima <i>B</i> (a) i <i>C</i> (b). | 61 |
| Slika 41. Maksimalna moguća izloženost baznim stanicama u blizini merne lokacije broj 6, u poređenju sa prilagođenim granicama izloženosti. | 63 |
| Slika 42. Lokacija trafostanice “Novi Sad 7” | 68 |
| Slika 43. Skica merne lokacije u blizini trafostanice. | 68 |
| Slika 44. Poređenje izmerenih i vrednosti dobijenih modelovanjem. | 71 |
| Slika 45. Širokopolasni kontinualni monitoring nivoa magnetskog polja. | 72 |
| Slika 46. Inicijalne granice izloženosti magnetskom polju na lokaciji trafostanice. | 74 |
| Slika 47. Spektralni sadržaj magnetskog polja na lokaciji trafostanice. | 75 |
| Slika 48. Prilagođenje granica izloženosti magnetskom polju u slučajevima <i>B</i> (a) i <i>C</i> (b). | 78 |
| Slika 49. Izloženost magnetskom polju na frekvenciji od 50 Hz. | 79 |
| Slika 50. Prikaz dnevnih granica izloženosti na internet veb portalu SEMONT sistema [27]. | 82 |
| Slika 51. Grafik promene referentnih graničnih nivoa vektora jačine električnog polja u funkciji frekvencije <i>f</i> | 97 |
| Slika 52. Dijagram zračenja GSM antene u vertikalnoj ravni. | 98 |
| Slika 53. Udaljenosti karakterističnih tačaka od interesa od GSM antene. | 99 |

Lista tabela

| | |
|---|-----|
| Tabela 1. Srednje vrednosti nivoa električnog polja na nedeljnom nivou [42]. | 15 |
| Tabela 2. Frekvencijski opsezi personalnog ekspozimetra EME Spy 120 [59]. | 18 |
| Tabela 3. Frekvencijski opsezi sonde za rad senzora Narda AMB-8059 [73]. | 21 |
| Tabela 4. Vrednosti referentnih graničnih nivoa vektora jačine električnog polja [10]. | 32 |
| Tabela 5. Relativna razlika između granica izloženosti za slučaj merne sonde EP-4B-01 [73]. | 34 |
| Tabela 6. Tehničke karakteristike GSM antena u blizini lokacije broj 6 [30]. | 45 |
| Tabela 7. Glavni snopovi zračenja prvih sektora GSM antena. | 45 |
| Tabela 8. Parametri širokopoljasne merne sonde Narda EF 0691 [89]. | 46 |
| Tabela 9. Statistička analiza rezultata širokopoljasnog monitoringa nivoa električnog polja. | 50 |
| Tabela 10. Statistička analiza inicijalnih granica izloženosti električnom polju. | 52 |
| Tabela 11. Parametri selektivne merne sonde RSEMF30-26-04-08 [92]. | 52 |
| Tabela 12. Parametri "Auto Sweep Time" režima rada analizatora spektra FSH3 [92]. | 53 |
| Tabela 13. Maksimalna izloženost baznim stanicama mobilne telefonije. | 58 |
| Tabela 14. Procentualni doprinosi pojedinih izvora stvarnoj izloženosti. | 59 |
| Tabela 15. Relativna razlika između inicijalnih i prilagođenih granica izloženosti. | 60 |
| Tabela 16. Statistička analiza prilagođenih granica izloženosti električnom polju. | 62 |
| Tabela 17. Odnosi srednjih vrednosti prilagođenih i inicijalnih granica izloženosti polju. | 62 |
| Tabela 18. Parametri širokopoljasne sonde mernog instrumenta Narda EFA 300 [99]. | 69 |
| Tabela 19. Rezultati prostornog skeniranja magnetskog polja na mernoj lokaciji. | 70 |
| Tabela 20. Vrednosti intenziteta struje u provodnicima trofaznog dalekovoda. | 70 |
| Tabela 21. Statistička analiza rezultata monitoringa intenziteta vektora magnetske indukcije. | 73 |
| Tabela 22. Referentni granični nivoi vektora magnetske indukcije, izraženi u μT [10]. | 73 |
| Tabela 23. Statistička analiza inicijalnih granica izloženosti magnetskom polju. | 74 |
| Tabela 24. Parametri Narda EFA 300 u "Spectrum FFT/Harmonics" režimu rada [99]. | 75 |
| Tabela 25. Doprinosi pojedinih harmonika ukupnoj izloženosti [103]. | 76 |
| Tabela 26. Razlika između inicijalnih i prilagođenih granica izloženosti magnetskom polju. | 77 |
| Tabela 27. Statistička analiza prilagođenih granica izloženosti magnetskom polju. | 79 |
| Tabela 28. Referentni granični nivoi za opštu populaciju, prema pravilniku [10]. | 95 |
| Tabela 29. Referentni granični nivoi za profesionalno osoblje, prema pravilniku [16]. | 96 |
| Tabela 30. Snopovi zračenja prvih sektora GSM antena [30]. | 99 |
| Tabela 31. Intenzitet vektora jačine električnog polja u tačkama od interesa. | 100 |
| Tabela 32. Udaljenosti od GSM antena u kojima je intenzitet vektora jačine električnog polja jednak vrednosti minimalnog referentnog graničnog nivoa. | 101 |

Lista skraćenica

| | |
|--------|--|
| EM | Elektromagnetsko |
| GSM | <i>Global System for Mobile Communications</i> |
| UMTS | <i>Universal Mobile Telecommunication System</i> |
| LTE | <i>Long-Term Evolution</i> |
| WLAN | <i>Wireless Local Area Network</i> |
| TV | <i>Television</i> |
| ELF | <i>Extremely Low Frequency</i> |
| WHO | <i>World Health Organization</i> |
| ICNIRP | <i>International Commission on Non-ionizing Radiation Protection</i> |
| SEMONT | <i>Serbian Electromagnetic Field Monitoring Network</i> |
| TETRA | <i>Terrestrial Trunked Radio</i> |
| DECT | <i>Digital Enhanced Cordless Telecommunications</i> |
| GPS | <i>Global Positioning System</i> |
| ER | <i>Exposure Ratio</i> |
| GER | <i>Global Exposure Ratio</i> |
| CPICH | <i>Common Pilot Channel</i> |
| EIRP | <i>Effective Isotropic Radiated Power</i> |
| TRU | <i>Transceiver Unit</i> |

1 Uvod

Ubrzani tehnološki razvoj društva, u poslednjih nekoliko decenija, je doveo do pojave velikog broja sistema koji koriste bežične komunikacije za prenos podataka. Rad ovakvih sistema je zasnovan na emitovanju elektromagnetskih (EM) polja u prostor, što za posledicu ima neminovno EM zračenje u životnoj sredini.

S obzirom na veliki broj i drugih sistema i električnih uređaja, koji emituju EM polje, uvođenjem novih tehnologija dolazi do pojave sve većeg broja veštačkih izvora polja, kako u životnom i radnom okruženju, tako i u bliskoj okolini ljudi. Svi ovi izvori EM polja se mogu klasifikovati u tri kategorije:

- Izvori instalirani na otvorenom prostoru – kao što su distributivni sistemi za prenos električne energije (visokonaponski vodovi, distributivne trafostanice), sistemi namenjeni radio/TV difuziji i fiksnoj telefoniji, sistemi razvijeni za potrebe mobilne telefonije (GSM – *Global System for Mobile Communications*, UMTS – *Universal Mobile Telecommunication System*, LTE – *Long-Term Evolution* sistemi), kao i sistemi za pružanje usluga bežičnog interneta (WLAN – *Wireless Local Area Network*).
- Izvori instalirani u zatvorenom prostoru – u grupu ovih izvora spadaju kućne instalacije, kao i svi električni uređaji koji se nalaze u domaćinstvima, kancelarijama i drugim zatvorenim prostorijama. Radio i TV (*Television*) prijemnici, personalni računari, modemi i ruteri za bežični internet samo su neki od izvora EM zračenja koji spadaju u ovu kategoriju.
- Izvori prisutni u neposrednom ljudskom okruženju – u ovu kategoriju izvora spadaju izvori koji su najveći deo vremena prisutni u blizini čoveka. To su različiti elektronski uređaji za ličnu upotrebu, bazirani na bežičnoj komunikaciji (mobilni telefoni, bežični telefoni, tableti i drugi), kao i neki od izvora iz prethodne dve kategorije.

Uobičajeno, izvori EM zračenja namenjeni komunikacionim servisima pokrivaju veliku teritoriju, kako bi se omogućila upotreba pojedinih sistema i pružanje odgovarajućih usluga na što većem području. Dodatno, pored teritorijalne rasprostranjenosti, svi izvori zajedno zauzimaju i širok opseg frekvencija, od par Hz do nekoliko GHz, koji je neophodno rezervisati za njihov rad i samu emisiju EM polja u prostor. S obzirom na trend sve većeg tehnološkog razvoja i unapređenja, pre svih, sistema za bežične komunikacije, sasvim je izvesno da će u bu-

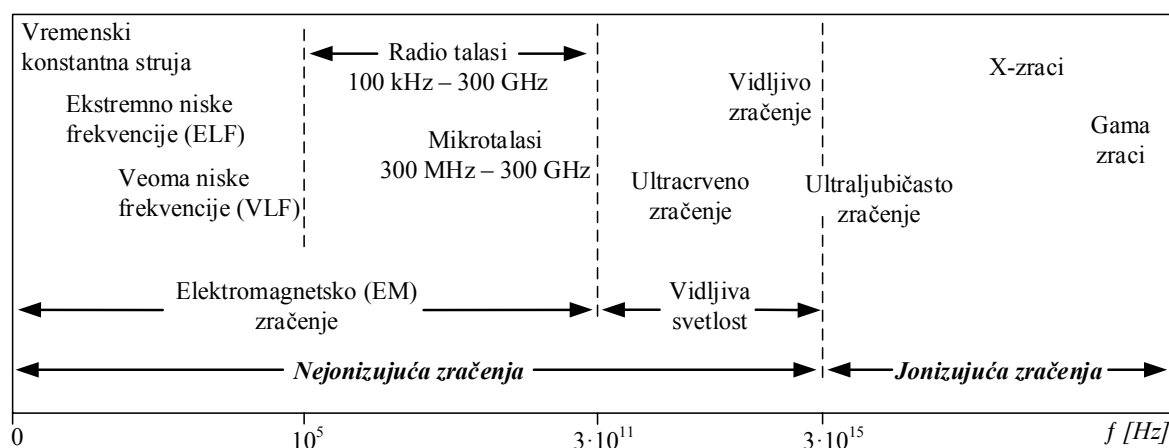
dućnosti sve veći broj frekvencijskih podopsega (delova spektra) biti zauzet, što će posledično dovesti i do povećanja EM zračenja u ljudskom okruženju.

EM zračenje spada u grupu nejonizujućih zračenja, koja za razliku od jonizujućih zračenja, ne mogu dovesti do jonizacije, odnosno izdvajanja elektrona iz atoma ili molekula, i time ne može izazvati destruktivna oštećenja ćelija živih organizama. Granica između jonizujućeg i nejonizujućeg zračenja je energija od 12,4 eV, koja je potrebna da se uloži, kako bi se jonizovao molekul vode [1]. Razlog za ovu vrednost granice jeste činjenica da najveći procenat ljudskog tela čini upravo voda.

Međutim, iako nejonizujuće zračenje ne može da uzrokuje destruktivne efekte na atomskom/molekularnom nivou, ono poseduje dovoljno energije da izazove različite biološke efekte u materiji živih organizama, kao što su na primer stimulacija mišićnih organa ili zagrevanje tkiva. Stoga, sa porastom broja veštačkih izvora polja raste i interesovanje naučne, stručne i opšte javnosti o eventualno štetnom uticaju koji nejonizujuća zračenja mogu imati kako na ljudski organizam, tako i na životnu sredinu.

Treba naglasiti da EM zračenja nemaju isključivo štetna dejstva. Međunarodni projekat “*COST Action BM1309: European network for innovative uses of EMFs in biomedical applications (EMF-MED)*” [2] je jedan od trenutno najvećih projekata u okviru kog istraživački timovi iz preko trideset zemalja rade na ispitivanju blagotvornih efekata ovog zračenja.

Na osnovu dosadašnjih naučnih saznanja, sva poznata zračenja su podeljena u nekoliko kategorija [3], kao što je prikazano na slici 1.



Slika 1. Spektar zračenja [3].

Može se videti da je granica između nejonizujućeg i jonizujućeg zračenja frekvencija od $3 \cdot 10^{15}$ Hz (3 PHz). Pri tome se opseg nejonizujućeg zračenja deli na EM zračenje (0 Hz - 300

GHz) i opseg vidljive svetlosti (300 GHz - 3 PHz). U okviru ove disertacije, akcenat će biti na EM zračenju.

Tehnološki razvoj u domenu upotrebe EM zračenja je intenzivno praćen i naučnim istraživanjima potencijalnih negativnih zdravstvenih efekata. Pri tome se obavljaju različite epidemiološke, *in vitro* studije (koje se sprovode koristeći komponente organizma koje su bile izolovane iz njihovog uobičajenog biološkog konteksta) i *in vivo* studije (gde se koriste celi, živi, organizmi) [4]. Ispitivanja se vrše u širokom opsegu frekvencija: od opsega ekstremno niskih frekvencija (ELF – *Extremely Low frequency*), sve do opsega frekvencija rezervisanih za radio talase [4].

Nažalost, i pored mnogobrojnih istraživanja, naučna zajednica još uvek nema jedinstven stav o efektima EM zračenja, niti potpuno jasnu sliku o mehanizmu delovanja EM zračenja na ljudski organizam. Ipak, do sada sprovedena istraživanja su ukazala na činjenicu da ne treba ignorisati prisustvo ove vrste zračenja u životnom i radnom okruženju, pogotovo što njihovo stalno, skoro neminovno, i praktično sve veće prisustvo ima kao posledicu izražen psihološki efekat, koji stvara zabrinutost populacije zbog mogućih štetnih efekata po zdravlje.

U prilog naporima naučne zajednice da razume i istraži efekte EM zračenja na ljudski organizam, kao i druge organizme, svetska zdravstvena organizacija (WHO – *World Health Organization*) ističe ovu problematiku kao veoma važnu, te svojim dokumentom “*WHO research agenda for radiofrequency fields*” [5] daje određene smernice u oblasti ispitivanja EM zračenja, sa aspekta potencijalno štetne izloženosti EM poljima.

Imajući u vidu sve ove činjenice, prevencija i zaštita od izlaganja nejonizujućim zračenjima, kako životne sredine tako i same populacije, postala je oblast od posebnog interesa, s obzirom na trend konstantnog povećanja broja izvora EM zračenja u ljudskom okruženju. Stoga su merenje, praćenje i kontrola prisutnog nivoa električnog, magnetskog i EM polja u okruženju veoma bitni, kako za zvanične, administrativne organe, kao što su agencije za zaštitu životne sredine, tako i za samo stanovništvo (opštu populaciju i profesionalno osoblje).

1.1 Predmet istraživanja

Predmet istraživanja ove disertacije jeste ispitivanje EM polja, pomoću takozvanog širokopojasnog (*wideband*) merenja nivoa polja, sa posebnim akcentom na proceni izloženosti opšte populacije električnim poljima visokih frekvencija, koristeći merne rezultate ovih širokopojasnih merenja.

Treba imati u vidu da sva merenja i odgovarajuća procena izloženosti EM poljima moraju biti realizovani u skladu sa propisanim standardima i preporukama [6]-[8]. Stoga je i eks-

perimentalni deo ove disertacije obavljen striktno u skladu sa nacionalnom zakonskom regulativom, u oblasti ispitivanja EM polja [9]-[16].

1.1.1 Vrste merenja

U domenu merenja nivoa EM polja trenutno su zastupljena dva merna pristupa: širokopojasni i frekvencijsko selektivni [17]-[19]. Ova dva pristupa se razlikuju po načinu merenja odgovarajuće fizičke veličine, odnosno po tome šta predstavlja krajnji rezultat procesa merenja. Dodatno, razlikuju se i po vrsti mernih instrumenata koji se u tu svrhu koriste.

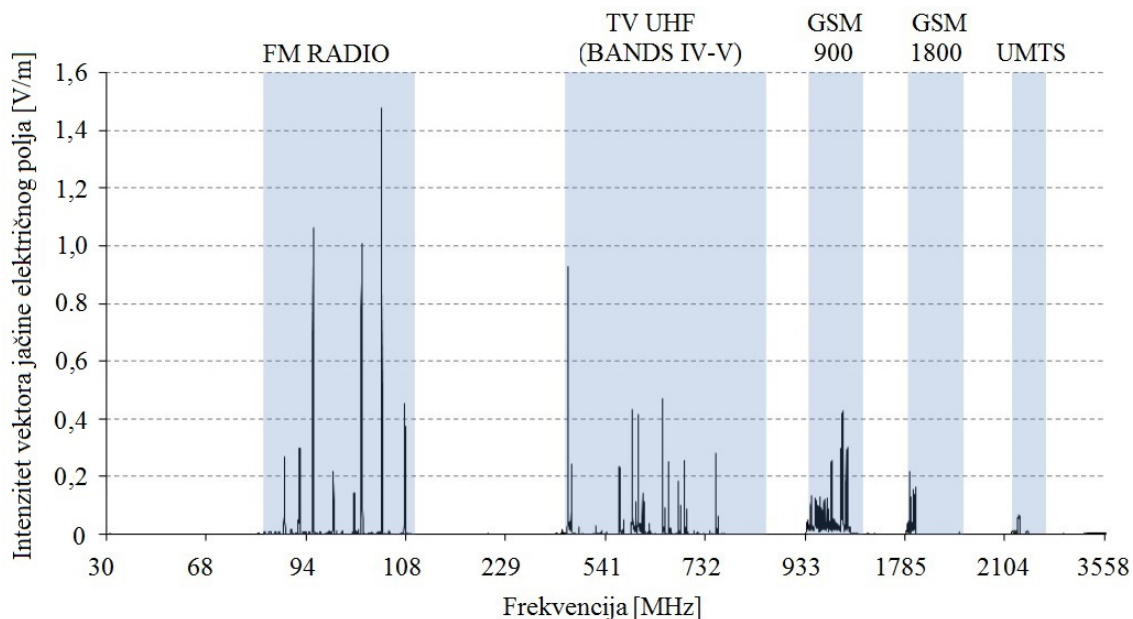
Na slici 2 su prikazani primeri ručnih mernih instrumenata, sa sondama dizajniranim za svaki od pomenuta dva merna pristupa. Merni instrument NBM 550, proizvođača Narda [20], sa širokopojasnom izotropnom mernom sondom za merenje nivoa električnog polja, prikazan je na slici 2a, dok je frekvencijski selektivni analizator spektra FSH3, sa pratećom mernom sondom, proizvođača Rohde & Schwarz [21], prikazan na slici 2b.



Slika 2. Primeri ručnih mernih instrumenata.

U slučaju širokopojasnog merenja nivoa EM polja, rezultat merenja jeste jedna vrednost, koja predstavlja sveukupnu i kumulativnu vrednost prisutnog nivoa polja, u određenom vremenskom intervalu. U ovoj vrednosti se nalazi doprinos svih izvora, aktivnih u posmatranom vremenskom intervalu, u okolini merne lokacije, a čije su radne frekvencije u okviru frekvencijskog opsega merne sonde instrumenta. Nažalost, širokopojasna merenja nisu u mogućnosti da pruže informaciju o pojedinačnom doprinosu svakog od izvora polja.

Sa druge strane, frekventijski selektivno merenje istovremeno daje vrednosti nivoa polja za svaku frekvenciju pojedinačno, u frekventijskom opsegu korišćene merne sonde. U slučaju upotrebe merne opreme za frekventijski selektivna merenja, takozvanih analizatora spektra, moguće je korišćenje različitih sonde. Sonde se dizajniraju da pokrivaju široki opseg frekvencija ili samo pojedine podopsege, rezervisane za rad nekih od izvora EM polja. Primer izgleda spektra signala, dobijenog pomoću analizatora spektra, dat je na slici 3 [22].



Slika 3. Primer frekventijskog spektra signala [22].

Pomenuta dva merna pristupa se uglavnom koriste odvojeno i nezavisno, shodno tome kakav tip merenja je predviđen da se obavi na mernoj lokaciji, odnosno šta je krajnji cilj ispitivanja EM polja. Širokopoljasno merenje se može smatrati kao frekventijski nezavisno i zato se uglavnom koristi u situacijama kada je potrebna informacija o sveukupnom nivou polja na datoj lokaciji, bez obzira na to koji su izvori aktivni u okolini, i na kojim frekvencijama oni emituju polje.

U slučaju kada je potrebno odrediti spektralni sadržaj polja i razdvojiti doprinose pojedinih frekvencija, koristi se frekventijski selektivni pristup merenju. Međutim, kombinovanjem ova dva pristupa se može obaviti sveobuhvatna analiza nivoa polja i zato je tendencija da se oni udružuju kad god je to moguće.

1.1.2 Procena izloženosti

Bez obzira koji od navedenih mernih pristupa se koristi u procesu ispitivanja EM polja, nakon izvršenih merenja, naredni, praktično obavezni, korak predstavlja procena potencijalne izloženosti polju. Ona se obavlja kako za opštu populaciju, tako i za profesionalno osoblje.

Jedan od najvažnijih dokumenata kojim se definišu preporuke za ograničenje izlaganja EM zračenju jeste dokument međunarodne Komisije za zaštitu od nejonizujućeg zračenja (*International Commission on Non-ionizing Radiation Protection – ICNIRP*) pod nazivom “*Guidelines for Limiting Exposure to Time-varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)*” [23]. Nacionalna regulativa Republike Srbije, kao i mnogih drugih država u svetu, oslanja se upravo na preporuke definisane ovim dokumentom.

U Republici Srbiji je oblast nejonizujućeg zračenja uređena “*Zakonom o zaštiti od nejonizujućih zračenja*” (“Službeni glasnik Republike Srbije”, broj 36/2009) [9] i grupom pravilnika koji prate ovaj zakon [10]-[16]. Jedan od njih, na koga se domaća akreditovana tela i stručna javnost oslanjaju prilikom procene izloženosti, jeste “*Pravilnik o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima*” (“Službeni glasnik Republike Srbije”, broj 104/2009) [10].

Ovaj dokument je baziran na ICNIRP-ovim preporukama, i njime se, u pogledu potencijalne izloženosti, definišu dve kategorije: *bazična ograničenja* i *referentni granični nivoi*. Bazična ograničenja izlaganja električnim, magnetskim i EM poljima su ograničenja u izlaganju izvorima vremenski promenljivih EM polja, zasnovana na utvrđenim zdravstvenim efektima i biološkim pokazateljima. Ova ograničenja se odnose na količinu energije koju tkivo može da apsorbira, a da ne dođe do štetnih posledica, kao i na jačinu indukovane struje koja se javlja u tkivu usled izlaganja vremenski promenljivim EM poljima.

Sa druge strane, referentni granični nivoi služe za praktičnu procenu izloženosti, na osnovu merenja fizičkih veličina kojima se kvantitativno opisuje električno i magnetsko polje. To su: vektor jačine električnog polja \vec{E} [V/m], vektor jačine magnetskog polja \vec{H} [A/m] i/ili vektor magnetske indukcije \vec{B} [T]. Merenjem ovih veličina i kasnijim poređenjem sa propisanim referentnim graničnim nivoima, koji se definišu za svaku frekvenciju ponaosob, vrši se provera da li su bazična ograničenja prekoračena.

U situaciji kada su merene vrednosti polja ispod propisanih referentnih graničnih nivoa, bazična ograničenja tada nisu prekoračena. U ovim situacijama se uobičajeno kaže da su merene vrednosti usaglašene sa propisanim referentnim graničnim nivoima. Međutim, kada je situacija obrnuta, i merene vrednosti prevazilaze vrednosti referentnih graničnih nivoa, tada ne mora nužno da sledi da su i bazična ograničenja prekoračena. Svakako, ovde je preporuka da

se sprovedu i dodatna sveobuhvatna ispitivanja, kako bi se utvrdilo da li je potrebno sprovesti dodatne zaštitne mere.

Treba naglasiti da je Republika Srbija svojim nacionalnim pravilnikom [10] pooštrila kriterijume u pogledu referentnih graničnih nivoa, usvajanjem vrednosti koje su dva i po puta manje u odnosu na one predložene u okviru ICNIRP-ovih preporuka [23]. Ova mogućnost postoji, pošto je svakoj državi ostavljeno da samostalno odluči da li će u potpunosti prihvatiti ICNIRP-ove preporuke ili će ih dodatno modifikovati.

1.2 Potreba za istraživanjem

U fokusu istraživanja ove disertacije jeste procena izloženosti opšte populacije električnim poljima visokih frekvencija (iznad 100 kHz), na kojima su dominantni termički efekti izlaganja tkiva, odnosno njegovog zagrevanja usled EM zračenja. U datom frekvenzijskom opsegu, procena izloženosti se, u skladu sa preporukama ICNIRP-a [23] i nacionalnim pravilnikom [10], vrši tako što se proverava prekoračenje bazičnih ograničenja primenom sledećeg kriterijuma:

$$\sum_{i=100kHz}^{1MHz} \left(\frac{E_i}{c} \right)^2 + \sum_{i>1MHz}^{300GHz} \left(\frac{E_i}{E_{Li}} \right)^2 \leq 1, \quad (1)$$

pri čemu je E_i intenzitet vektora jačine električnog polja na frekvenciji i , E_{Li} referentni granični nivo vektora jačine električnog polja na frekvenciji i , dok je konstanta $c = 87/f^{1/2}$ [V/m], definisana za opštu populaciju. Konkretno vrednosti referentnih graničnih nivoa se uzimaju ili iz nacionalnog pravilnika ili iz preporuka ICNIRP-ovog dokumenta, u zavisnosti od primene.

Dodatno, treba naglasiti da, u slučaju procene izloženosti profesionalnog osoblja, propisani referentni granični nivoi imaju drugačije vrednosti. Te vrednosti su strožije u odnosu na one za opštu populaciju, s obzirom da ova kategorija stanovništva jeste češće i u dužim intervalima vremena izložena različitim vrednostima nivoa EM polja, tokom obavljanja svakodnevnih aktivnosti na svojim radnim mestima [16].

Analizirajući pristup procene izloženosti definisan jednačinom (1), može se primetiti da on podrazumeva frekvenzijski selektivna merenja nivoa električnog polja, pošto se zahteva da se intenzitet vektora jačine električnog polja poredi sa odgovarajućim propisanim referentnim graničnim nivoom, za svaku frekvenciju ponaosob. Ovaj pristup je razumljiv, imajući u vidu da tkivo različito reaguje i ima različite električne i magnetske karakteristike, na različitim frekvencijama [24].

Korišćenjem ovog pristupa procene izloženosti, moguće je odrediti pojedinačni doprinos ukupnoj izloženosti svake frekvencijske komponente polja ponaosob, odnosno izloženost po pojedinim frekvencijama. Ukoliko je zbir izloženosti po pojedinim frekvencijama u izrazu (1), manji od vrednosti jedan, bazična ograničenja nisu prekoračena.

Nažalost, ovakav pristup procene izloženosti je praktično neupotrebljiv za širokopoljasa merenja, pošto ova vrsta merenja, kao ni odgovarajući merni instrumenti (merne sonde) nisu u mogućnosti da razlikuju na kojim to frekvencijama okolni izvori emituju EM zračenje. Zbog toga, nije moguće obaviti razdvajanje komponenti polja po frekvencijama, čime se pojavljuje problem izbora vrednosti referentnih graničnih nivoa, koje treba uzeti u obzir pri proceni izloženosti, primenom jednačine (1).

1.3 Cilj istraživanja

Uzimajući u obzir činjenicu da nacionalni pravilnik Republike Srbije, kao ni drugi međunarodni pravilnici i standardi, ne nude standardizovan metod procene izloženosti u slučaju širokopoljasnih merenja, osnovni cilj i tema istraživanja ove disertacije jesu predlog i realizacija jednog novog pristupa, odnosno metoda za procenu izloženosti, koji je prilagođen širokopoljasnim merenjima nivoa EM polja.

Predloženi metod procene izloženosti treba da bude primenljiv za bilo koju vrstu širokopoljasnih merenja nivoa polja, kako za standardna merenja u kraćim vremenskim periodima, tako i za merenja u dužim intervalima vremena, takozvani kontinualni monitoring nivoa polja. Pri tome je veoma bitno da dati metod omogućava jednostavnu i efikasnu procenu dugoročne izloženosti u slučajevima kada se kombinuju širokopoljasna merenja i kontinualni monitoring. Ovo je neophodno zbog činjenice da najnoviji trendovi u oblasti ispitivanja EM polja sugerišu dugoročno praćenje nivoa polja [8], [25]. Cilj je da se dobije jasna slika o fluktuacijama nivoa polja u realnom vremenu, pogotovo u dužem vremenskom periodu, ali isto tako i o fluktuacijama izloženosti u ovom periodu.

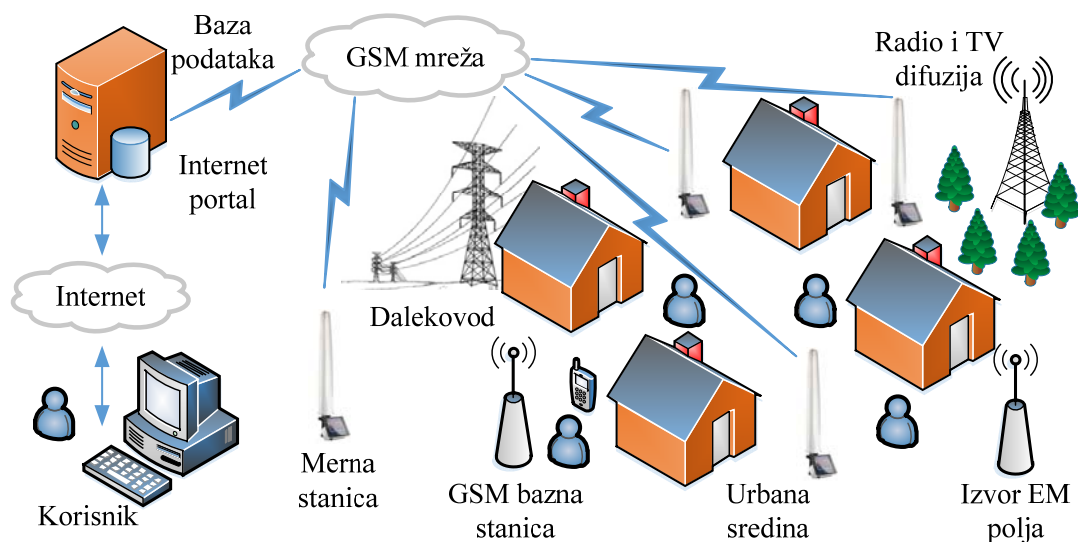
Predloženi metod je inicijalno osmišljen i realizovan za primenu kod širokopoljasnih merenja u opsegu visokih frekvencija, gde se uobičajeno vrši merenje intenziteta vektora jačine električnog polja. Na toj primeni je i zasnovana celokupna analiza predstavljena u ovoj disertaciji. Pored toga, pokazano je da je realizovani metod primenljiv i za slučaj merenja nivoa polja u opsegu niskih frekvencija, odnosno merenja nivoa magnetskog polja, što će takođe biti opisano u jednom od kasnijih poglavlja.

Konačno, predloženi metod je realizovan da bude primenljiv kako za procenu izloženosti opšte populacije, tako i za procenu izloženosti profesionalnog osoblja, svakako uz primenu adekvatnih referentnih graničnih nivoa.

1.4 Kratak sadržaj i pregled rada

Predmet analize ove disertacije jeste način procene izloženosti u slučaju širokopoljnih merenja električnog polja visokih frekvencija. U radu je predložen jedan nov pristup procene izloženosti, baziran na određivanju donje i gornje granice izloženosti, kao i prilagođavanju ovih granica spektralnim karakteristikama ispitne lokacije – takozvani *metod adaptivnih granica izloženosti*. Ovim metodom se određuje opseg u kome se može naći realna izloženost. U slučaju kontinualnog monitoringa dobijaju se dnevne granice izloženosti. U cilju povećanja preciznosti procene, sprovodi se postupak prilagođavanja granica spektralnom sadržaju polja na lokaciji ispitivanja, a detalji metoda će biti objašnjeni u nastavku disertacije.

Predloženi metod je prvenstveno osmišljen za potrebe nacionalne informacione mreže za kontinualno ispitivanje EM polja (*Serbian Electromagnetic Field Monitoring Network – SEMONT*), koja je namenjena kontinualnom širokopoljnom monitoringu nivoa EM polja, kao i proceni izloženosti datim poljima [26], [27]. Osnovni koncept SEMONT sistema je prikazan na slici 4.



Slika 4. Koncept SEMONT sistema za kontinualni monitoring.

Ideja je da se niz mernih stanica postavi u prostoru od interesa, pri čemu one obavljaju monitoring nivoa polja i merne rezultate šalju u centralizovanu bazu podataka. Putem odgovarajućeg internet veb portala ovi merne rezultati su dostupni široj javnosti, koja ima potpuno

transparentan uvid u aktuelne nivoe EM polja i izloženosti EM polju. Više detalja o SEMONT sistemu, njegovom dizajnu i funkcionisanju je dato u [26].

Ova doktorska disertacija se sastoji iz sedam poglavlja. Pre prvog, uvodnog, poglavlja disertacije dati su: ključna dokumentacijska informacija na srpskom i engleskom jeziku, zatim zahvalnica, sadržaj, lista slika, lista tabela i lista skraćenica.

U drugom poglavlju je dat opis aktuelnog stanja u oblasti ispitivanja EM polja. Diskutovani su neki od rezultata merenja nivoa EM polja, predstavljeni u naučnim radovima koji su publikovani. Takođe, dat je i pregled postojećih metoda za procenu izloženosti, koji su korišćeni u ovim radovima, uz analizu njihovih prednosti i nedostataka.

U trećem poglavlju su predstavljene teorijske osnove novopredloženog metoda za procenu izloženosti u slučaju širokopojasnih merenja nivoa električnog polja visokih frekvencija. Opisan je način određivanja granica izloženosti i definisanja opsega u kom se stvarna izloženost nalazi. Takođe, analizirana je razlika između granica izloženosti, koja se dobija primenom ovog metoda. Prikazane su mogućnosti smanjenja te razlike i povećanja preciznosti procene opsega u kom se realna izloženost nalazi. Osnovna ideja za postizanje tog cilja leži u prilagođenju granica izloženosti spektralnom sadržaju polja na lokaciji ispitivanja, upotrebom frekvencijski selektivnog mernog pristupa.

Verifikacija predloženog metoda je obavljena kroz eksperimentalni deo disertacije, koji je detaljno opisan u četvrtom poglavlju. Predstavljen je način izbora ispitne lokacije na kojoj su eksperimenti izvršeni, opisana je merna procedura i dati su osnovni parametri korišćenih mernih instrumenata. U ovom delu su prikazani i rezultati merenja nivoa električnog polja visokih frekvencija na konkretnoj lokaciji od interesa, kao i rezultati odgovarajuće procene dnevnih granica izloženosti.

U petom poglavlju disertacije je opisana primena predloženog metoda za slučaj merenja nivoa magnetskog polja, u opsegu niskih frekvencija. Prikazani su rezultati merenja na lokaciji od interesa.

Odgovarajuća analiza dobijenih rezultata, sa posebnim osvrtom na pogodnosti koje donosi upotreba predloženog metoda procene izloženosti, predstavljeni su u šestom poglavlju. Dodatno, navedene su i mogućnosti primene novopredloženih metoda, kako u skladu sa zakonodavstvom Republike Srbije, tako i drugih država u svetu.

Sedmo poglavlje predstavlja zaključno poglavlje doktorske disertacije. Nakon njega je, na kraju disertacije, dat spisak korišćene naučne literature, kao i odgovarajući prilozi.

2 Stanje u oblasti

S obzirom na izuzetnu važnost zaštite životne sredine i zdravlja opšte populacije, u poslednjih nekoliko decenija je objavljen veliki broj naučnih radova u domenu interakcije EM zračenja i ljudskog organizma, odnosno efekata izloženosti populacije EM zračenju. U njima su ispitivana polja koja potiču od velikog broja različitih izvora: od dalekovoda i trafostanica, preko radio i TV difuzije, sve do baznih stanica mobilne telefonije. Njihov uticaj na okruženje je analiziran kroz merenja nivoa polja u neposrednoj blizini datih izvora, najčešće na otvorenom prostoru. Takođe, mereni su i nivoi polja u zatvorenim prostorijama različitog tipa (kuće, stanovi, kancelarije i druga mesta gde ljudi borave). Sama merenja i adekvatna procena izloženosti su obavljani u različitim vremenskim intervalima, od nekoliko minuta ili sati, do više dana, meseci ili godina. U nastavku je dat pregled mernih procedura i mernih instrumenata, koji su najčešće korišćeni u tu svrhu [28], [29].

Metode ispitivanja EM polja možemo svrstati u sledeće kategorije [28], [29]:

- Teorijska izvođenja i proračuni nivoa EM polja, u okolini pojedinih izvora. Primenom ovog metoda ispitivanja je moguće dobiti informacije o vrednostima nivoa polja koje se mogu očekivati na lokacijama od interesa. Za potrebe ovakvih istraživanja, neophodno je poznavati tehničke karakteristike samih izvora, kao i karakteristike okoline gde su ovi izvori postavljeni.
- Merenja nivoa EM polja u jednoj ili više tačaka na lokaciji od interesa (takozvana *spot* merenja). Ova merenja se obavljaju kako u kraćem vremenskom intervalu, tako i u dužim intervalima (takozvana *long-term* merenja). Veliki broj radova se bavi analizom rezultata ovakvih merenja, pri čemu se koriste i frekvencijski selektivni merni instrumenti, ali i širokopoljasni, uz primenu različitih mernih procedura.
- Upotreba takozvanih ličnih (personalnih) ekspozimetara, kao specifične vrste mernih instrumenata, u cilju određivanja izloženosti ljudi tokom njihovih dnevnih aktivnosti. U poslednjih nekoliko godina, primetan je sve veći broj naučnih studija u kojima se ovaj metod ispitivanja EM polja koristi, pri čemu se sami instrumenti postavljaju uz telo osobe koja učestvuje u eksperimentu.

U nastavku je data analiza ove tri kategorije metoda ispitivanja EM polja, počevši od teorijskih izvođenja i modelovanja raspodele EM polja. Navedeni i diskutovani su prednosti i nedostaci upotrebe svakog od datih metoda ispitivanja.

2.1 Teorijska modelovanja raspodele EM polja

Modelovanje i teorijski proračuni nivoa polja su obavljani za veliki broj postojećih izvora EM zračenja. Pri tome se u dostupnim naučnim radovima može primetiti da je najveći deo njih (pogotovo u poslednjih desetak godina) orijentisan ka teorijskim razmatranjima i proračunima nivoa polja od baznih stanica mobilne telefonije. Ova činjenica je razumljiva, imajući u vidu veliku rasprostranjenost i stalan porast broja novih baznih stanica.

Analizirani su rezultati modelovanja raspodele EM polja, koji potiču od baznih stanica (GSM i UMTS), kako na otvorenom [30], [31], tako i u zatvorenom prostoru [32], [33]. Rezultati modelovanja su upoređeni sa merenjima izvršenim korišćenjem personalnih ekspozimetara. Veoma dobro slaganje rezultata je ostvareno na otvorenom prostoru [31]. Međutim, u zatvorenom prostoru je slaganje nešto manje, pre svega zbog prisutnog slabljenja emitujućeg polja, usled prisustva objekta u kojima su merenja sprovedena [32], [33]. Vrste materijala od kojih su napravljeni zidovi, prozori i drugi delovi objekata zatvorenog tipa značajno utiču na vrednosti nivoa polja. Ti materijali mogu biti različiti dielektrici ili provodnici [34], [35], zbog čega može doći do apsorpcije emitujućeg signala u njima ili do refleksije i slabljenja.

Teorijsko modelovanje raspodele polja često može dovesti i do precenjivanja stvarnih vrednosti nivoa polja [36]. Razlog može biti činjenica da se pri teorijskim proračunima veoma teško mogu uzeti u obzir uticaji svih mogućih faktora na prostiranje EM talasa. Ti faktori podrazumevaju pre svega uticaj okoline i prostora u kom je prisutna emisija, odnosno uticaj materijala od kojih su napravljeni razni objekti. Ovi objekti mogu predstavljati fizičke prepreke na pravcu prostiranja talasa. Dodatno, često su ovakva ispitivanja praćena veoma teškim i kompleksnim proračunima, koji zahtevaju značajno vreme i resurse.

S obzirom na ograničenja koja prate ovaj način ispitivanja EM polja, ovaj pristup se ne može uvek smatrati najpreciznijim i jako pouzdanim, odnosno njegova primena često ne daje realnu sliku o prisutnim nivoima EM polja i potencijalnoj izloženosti. Dodatno, prisutna kompleksnost teorijskih proračuna je uticala na to da je u okviru naučne literature prisutan mnogo veći broj studija u kojima su opisana merenja nivoa polja u realnom vremenu i prostoru.

2.2 *Spot* merenja nivoa EM polja

Prva od dve kategorije merenja u realnim uslovima jesu *spot* merenja, koja se vrše u različitim vremenskim intervalima i na različitim mernim lokacijama: od onih na otvorenom (*outdoor* merenja), do onih u zatvorenom prostoru (*indoor* merenja).

2.2.1 Merenja na otvorenom prostoru (*outdoor*)

U značajno većem broju objavljenih naučnih radova je fokus na *outdoor* merenjima, iz razloga što izvori EM zračenja koji su instalirani na otvorenom prostoru (pre svih, radio i TV predajnici i antene baznih stanica mobilne telefonije) emituju polja mnogo većih snaga i pokrivaju dosta širi prostor signalom, u odnosu na izvore koji su instalirani unutar objekata (kao što su bežični telefoni, modemi za bežični internet, mikrotalasne pećnice i drugi). Pored toga, zakonska regulativa se najvećim delom odnosi na ispitivanje izvora na otvorenom prostoru, pri čemu je za dobijanje upotrebnih dozvola za rad ovih izvora neophodno obaviti merenja nivoa polja na lokacijama na kojima će oni biti postavljeni, i to pre same postavke [11].

Nekoliko primera *outdoor* merenja sa postavkama različitih mernih instrumenata, na lokacijama od interesa je dato na slici 5 [37]-[39], pri čemu su na slici 5a prikazane uobičajene postavke za merenja u kraćim vremenskim intervalima, dok su na slici 5b prikazane postavke za dugotrajni, kontinualni monitoring polja. Sva ispitivanja moraju biti obavljena korišćenjem standardizovanih mernih procedura, definisanih standardima [6], [7] i pravilnicima [10], [23].



(a)



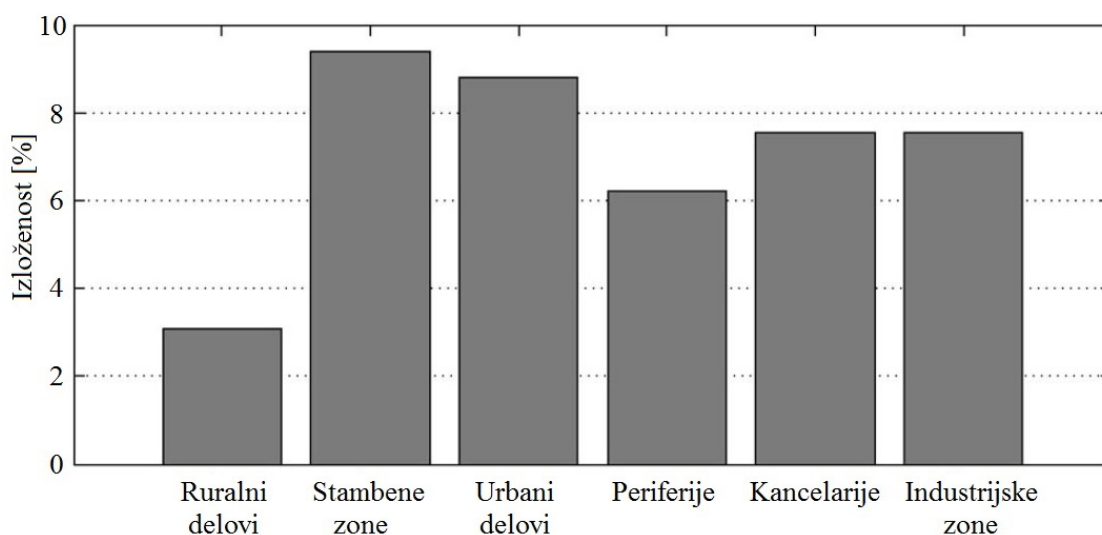
(b)

Slika 5. Primeri *outdoor* merenja [37]-[39].

Interesantni pristup u pojedinim naučnim radovima jeste prikaz rezultata *outdoor* merenja, sprovedenih u cilju klasifikacije EM zračenja prema geografskim oblastima: centralni de-

lovi urbanih sredina, periferije urbanih sredina, ruralni delovi, itd. U pogledu teritorijalne raspodele, veće vrednosti nivoa polja su uglavnom zabeležene u urbanim sredinama nego u ruralnim [40], kao što je prikazano na slici 6 [41]. Najveće vrednosti se dobijaju u centralnim delovima velikih gradskih sredina, odnosno u stambenim zonama, što je i očekivano, imajući u vidu činjenicu da je u ovim oblastima neophodno zadovoljiti potrebe velikog broja korisnika sistema za bežičnu komunikaciju i prenos podataka [41].

Izloženost populacije EM polju u ruralnim delovima je oko tri puta manja u odnosu na izloženost u urbanim sredinama, dok je na periferijama gradskih sredina izloženost polju manja nego u centralnim delovima. Što se tiče kancelarija i industrijskih zona, primećuje se da je izloženost neznatno manja nego u stambenim gradskim zonama, sugerišući važnost ispitivanja EM polja i u ovim oblastima. Razlog značajnog nivoa izloženosti polju u ovim oblastima može biti zastupljenost sistema za bežične komunikacije (mobilna i fiksna telefonija, kao i bežični internet), kojima se zaposlenima olakšava rad i povećava efikasnost obavljanja poslova.



Slika 6. Izloženost EM polju u različitim geografskim oblastima [41].

Zbog specifičnosti svakog od izvora EM zračenja, njegovih karakteristika i funkcionalnih parametara, postoje i odgovarajuće vremenske varijacije u pogledu nivoa polja koje emituju u okruženju. Ove varijacije su veoma bitne sa aspekta dugoročne izloženosti poljima, te je stoga veliki broj naučnih radova orijentisan ka merenjima u različitim vremenskim intervalima: od nekoliko minuta ili sati, preko onih obavljenih na dnevnom ili nedeljnom nivou, pa sve do višemesečnih ili čak višegodišnjih mernih kampanja (postavka prikazana na slici 5b). Na osnovu rezultata tih radova [42], [43], može se zaključiti da su razlike u nivoima električnog polja, na nedeljnom nivou, prisutne pre svega između perioda dana i noći, što je i očeki-

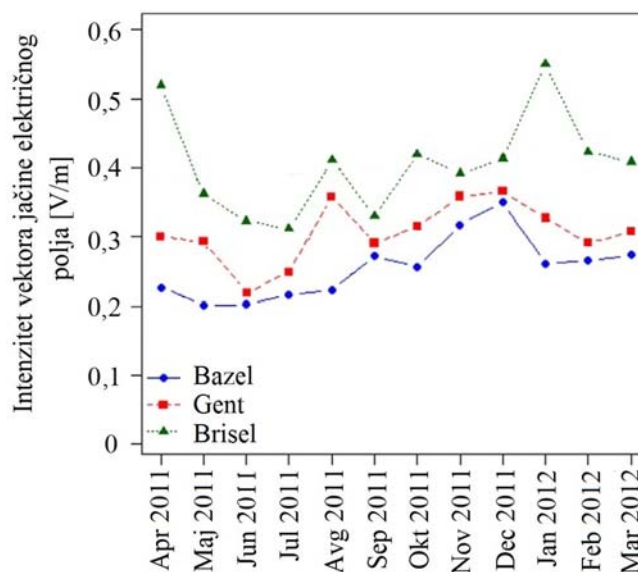
vano s obzirom da je aktivnost populacije znatno manja tokom noći, a samim tim je i smanjena upotreba različitih uređaja za bežičnu komunikaciju.

U pogledu srednjih vrednosti nivoa električnog polja po danima, prisutne su jako male razlike [42], [43], odnosno nema značajnijih varijacija između radnih dana i dana vikenda. Kao potvrda ove činjenice, u tabeli 1 su date srednje vrednosti nivoa električnog polja iz rada [42], gde su detaljno ispitivane promene nivoa polja na nedeljnom nivou, u urbanim i ruralnim sredinama. Razlike između vrednosti nivoa električnog polja po danima su veoma male. Procentualna razlika između najveće i najmanje vrednosti je manja od 5 %.

| | Ponedeljak | Utorak | Sreda | Četvrtak | Petak | Subota | Nedelja |
|-----------|------------|--------|-------|----------|-------|--------|---------|
| E [V/m] | 0,208 | 0,211 | 0,208 | 0,207 | 0,208 | 0,206 | 0,216 |

Tabela 1. Srednje vrednosti nivoa električnog polja na nedeljnom nivou [42].

U radovima [44] i [45] su analizirane promene nivoa polja na višemesečnom i godišnjem nivou. Ovakav pristup iziskuje veće napore u pogledu izvršenja merenja i obrade dobijenih rezultata. Međutim, on pruža dosta jasniju sliku o fluktuaciji nivoa polja u dužem vremenskom intervalu, što se u poslednje vreme nameće kao jedan od jako bitnih faktora u domenu ispitivanja EM polja [8], [25], kao i epidemioloških istraživanja efekata po zdravlje ljudi. Primer promene intenziteta vektora jačine električnog polja u periodu od nekoliko meseci, u tri evropska grada (Bazel, Gent i Brisel), je prikazan na slici 7 [44].



Slika 7. Promene intenziteta vektora jačine električnog polja na višemesečnom nivou [44].

Gradovi u kojima su izvršena ova ispitivanja su gradovi sa velikim brojem stanovništva. Kako je neophodno zadovoljiti njihove potrebe, u pogledu pružanja komunikacionih usluga, veliki broj izvora EM zračenja je prisutan u njihovom okruženju. Kao posledica toga, a u skladu sa zaključkom do kog se dolazi posmatrajući sliku 7, primetan je trend porasta prisutnog nivoa električnog polja, što ukazuje na činjenicu da se očekuje da će u budućnosti izloženost populacije EM poljima biti sve veća.

S obzirom na raznosvrtnost izvora zračenja u okruženju, kod određenog broja naučnih studija akcent na ispitivanja je na doprinosu određene vrste ili veće grupe različitih izvora. Od svih njih, trenutno su prostorno najzastupljeniji sistemi za radio i TV difuziju, mobilne komunikacije i bežični internet.

Na osnovu dostupne naučne literature, može se primetiti da u velikom broju slučajeva dominantni izvori EM polja jesu antene baznih stanica mobilne telefonije, čiji je procentualni doprinos veći u odnosu na doprinos radio i TV predajnika [46], [47]. Takav zaključak je donekle i razumljiv, imajući u vidu činjenicu da komunikacioni servisi zahtevaju sve veću teritorijalnu rasprostranjenost antena baznih stanica, kako bi se zadovoljile potrebe krajnjih korisnika. Pokazano je da se vrednosti nivoa polja od ovih izvora, na lokaciji od interesa, mogu povećati i do nivoa od oko stotinu puta, u vremenskom periodu od dve godine [47].

Sa druge strane, postoje i slučajevi gde, u većoj ili manjoj meri, glavni doprinos ukupnom EM polju daju radio i TV difuzija [22], [48], [49]. Obrazloženje ovakvog scenarija jesu karakteristike samih lokacija na kojima se vrše ispitivanja. Stoga, ukoliko je u neposrednoj blizini odgovarajuće lokacije instalirana tehnička oprema za rad određenih izvora EM zračenja, sasvim je očekivano da će upravo takvi izvori biti dominantni na datoj lokaciji.

U poslednje vreme, velika pažnja se posvećuje ispitivanju doprinosa LTE sistema ukupnoj izloženosti. Uprkos sve većoj rasprostranjenosti i broju baznih stanica namenjenih ovoj tehnologiji prenosa podataka, merni rezultati pojedinih studija pokazuju da je i dalje znatno veći doprinos ukupnom nivou EM polja od signala GSM i UMTS telekomunikacionih servisa [39]. To je donekle i očekivano s obzirom da LTE antene emituju EM polja manjih snaga u odnosu na antene GSM i UMTS servisa. Za očekivati je da će u budućnosti LTE sistemi biti sve više teritorijalno rasprostranjeni, odnosno da će doći do znatnog povećanja broja njihovih antena, a time će i njihov doprinos ukupnom polju biti značajniji.

2.2.2 Merenja u zatvorenom prostoru (*indoor*)

Kod *indoor* merenja, istraživačka pažnja je uglavnom usmerena ka ispitivanju uticaja sistema za bežični internet (WLAN), koji su sastavni deo skoro svakog domaćinstva, javnih

ustanova i drugih javnih mesta. Iako ovi sistemi emituju EM polja mnogo manjih snaga i pokrivaju relativno mali prostor signalom (u poređenju sa, na primer, antenama baznih stanica), pokazano je da je njihov doprinos u zatvorenom prostoru dominantan [50], [51], pre svega zbog male udaljenosti krajnjih korisnika od samih uređaja (modema), koji mogu biti postavljeni na različitim mestima i visinama unutar objekata.

Različiti merni instrumenti su korišćeni za *indoor* merenja unutar prostorija u kojima je cilj bio odrediti izloženost ljudi EM poljima, pri čemu je nekoliko primera ovog tipa merenja, iz dostupnih naučnih studija, dato na slici 8 [43], [52].



Slika 8. Primeri *indoor* merenja [43], [52].

Kod ovakvog tipa ispitivanja je moguće sprovesti i pojedinačna kratkoročna merenja, ali i kontinualni monitoring, kako bi se dobila potpuna slika o prisutnom nivou EM polja. Nažalost, zbog prisutnih objekata (predmeta) u prostorijama, i njihovog mogućeg uticaja na merenu opremu, za očekivati je da nešto veća merna nesigurnost bude prisutna u rezultatima *indoor* merenja. U svakom slučaju, ova vrsta ispitivanja je neophodna, prvenstveno imajući u vidu profesionalno osoblje, njihovo radno okruženje i potrebu za izradom akta o proceni rizika na radnom mestu, u okviru kog i EM polja treba uzeti u obzir.

2.2.3 Merenja u zonama povećane osetljivosti

Imajući u vidu preporuke Svetske zdravstvene organizacije (WHO) i važnosti obavljanja merenja u zonama povećane osetljivosti [5], gde se ljudi mogu zadržavati i do dvadeset četiri časa dnevno, veliki istraživački naponi se ulažu upravo u merenja i procenu izloženosti poljima na ovakvim lokacijama. U kategoriju lokacija sa povećanom osetljivošću spadaju pre svih predškolske i školske ustanove, univerzitetski kampusi, domovi, bolnice, parkovi, kao što je definisano nacionalnim pravilnikom [10], ali i druga javna mesta.

Kao primer merenja u zonama povećane osetljivosti, analizirani su rezultati merenja nivoa polja u okviru kampusa univerziteta [53], [54], kao oblasti od velikog interesa, u kojoj je svakodnevno prisutan veliki broj mladih ljudi. Dodatno, u radovima [45], [55]-[57] su analizirane i promene nivoa EM polja u školama, privatnim kućama, poslovnim objektima i drugim javnim mestima. Cilj ovih radova je bio da se odrede prostorne i vremenske varijacije nivoa polja, kao i da se odredi izloženost populacije u zonama povećane osetljivosti.

2.3 Merenja nivoa EM polja pomoću personalnih ekspozimetara

Sve veći broj naučnih radova je baziran na merenjima pomoću personalnih ekspozimetara. Dati instrumenti imaju mogućnost širokopojsnih merenja u velikom broju frekvencijskih podopsega, rezervisanih za rad različitih izvora EM zračenja u ljudskom okruženju. Primer upotrebe personalnog ekspozimetra EME Spy 120 [58], proizvođača SATIMO, je prikazan na slici 9.



Slika 9. Izgled personalnog ekspozimetra EME Spy 120 [58].

Merni frekvencijski opsezi instrumenta EME Spy 120 su dati u tabeli 2 [59].

| | | | | |
|-------------------|----------------|------------------|-----------------|-------------------|
| Servis | Radio | TV3 | TETRA | TV4&5 |
| Frekvencija [MHz] | 88 – 108 | 174 – 223 | 380 – 400 | 470 – 830 |
| Servis | GSM 900 uplink | GSM 900 downlink | GSM 1800 uplink | GSM 1800 downlink |
| Frekvencija [MHz] | 880 – 915 | 925 – 960 | 1710 – 1785 | 1805 – 1880 |
| Servis | DECT | UMTS uplink | UMTS downlink | WLAN |
| Frekvencija [MHz] | 1880 – 1900 | 1920 – 1980 | 2110 – 2170 | 2400 – 2500 |

Tabela 2. Frekvencijski opsezi personalnog ekspozimetra EME Spy 120 [59].

U tabeli 2, GSM 900 uplink predstavlja frekvencijski opseg rezervisan za slanje podataka od mobilnog telefona ka GSM 900 baznoj stanici, dok je GSM 900 downlink rezervisan za slanje podataka od bazne stanice ka mobilnom telefonu (korisniku). Slično su definisani i opsezi za komunikaciju u slučaju GSM 1800 i UMTS telekomunikacionih servisa.

Upotrebom personalnih ekspozimetara je moguće efikasno odrediti procentualni doprinos svakog od pojedinih frekvencijskih podopsega ukupnom nivou polja, na onim mestima na kojima osoba boravi tokom svojih dnevnih aktivnosti [60], [61]. Dodatno, pošto se merenja vrše neprekidno, u toku nedelje, meseca ili čak duže, i to na velikom broju različitih lokacija, koje učesnik u eksperimentu posećuje, moguće je odrediti promene nivoa polja u zavisnosti od vremena, lokacije i aktivnosti konkretne osobe [44], [62]-[64].

Ono što je mana ovakvog pristupa ispitivanju EM polja jeste to, što prisustvo ljudskog tela, koje je na jako malom rastojanju od samog instrumenta, dovodi do modifikacije električnih i magnetskih karakteristika sredine, pa se dobijeni merni rezultati razlikuju od onih koji bi se dobili merenjima u slobodnom prostoru. Dodatni problem je i to što se primenom ovakvog pristupa merenju ne može dobiti jasna slika o varijacijama nivoa polja, a samim tim ni izloženosti, na konkretnoj lokaciji, u toku dužeg intervala vremena. Kako je instrument najčešće u stalnom pokretu, zajedno sa učesnikom u eksperimentu, nije moguće obaviti dugoročni monitoring nivoa polja, na određenoj lokaciji od interesa.

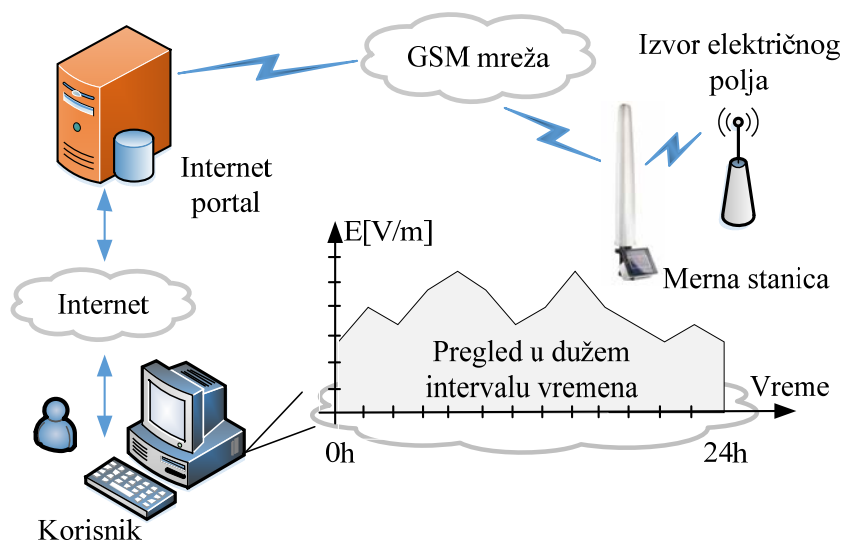
2.4 Kontinualna merenja (monitoring) nivoa EM polja

Kako je trend kontinualnog monitoringa EM polja sve izraženiji, u poslednjih nekoliko godina je primetna velika potreba za razvojem sistema koji će omogućiti autonomno obavljanje monitoringa. Neki od njih se mogu pogledati na veb stranicama [27], [65], [66].

Osnovni kriterijumi koji jedan sistem namenjen kontinualnom monitoringu nivoa polja mora da zadovolji, u pogledu organizacije, potom celina koje mora da poseduje, načina udaljene komunikacije sa mernim stanicama, kao i specifikacija koje merne stanice i merna procedura, prema odgovarajućim standardima, moraju da ispunjavaju, opisani su u radu [26]. Pored toga, definisani su i kriterijumi za izbor lokacija na kojima treba postaviti merne stanice, kao i način na koji rezultate merenja treba predstaviti široj javnosti. Slična analiza predstavljena je i u radu [67].

Jedan od sistema, dizajniran da zadovoljava kriterijume za obavljanje kontinualnog monitoringa nivoa EM polja je i SEMONT sistem [27]. On je baziran na bežičnoj mreži autonomnih mernih stanica, koje vrše kontinualni širokopoljasni monitoring nivoa EM polja od svih izvora u okolini. Pri tome, rezultati merenja se u vidu grafikona predstavljaju široj jav-

nosti putem odgovarajućeg internet sajta. Osnovni koncept kontinualnog monitoringa u okviru SEMONT sistema je prikazan na slici 10, dok se detaljnije informacije o organizaciji čitavog sistema mogu pronaći u [26].

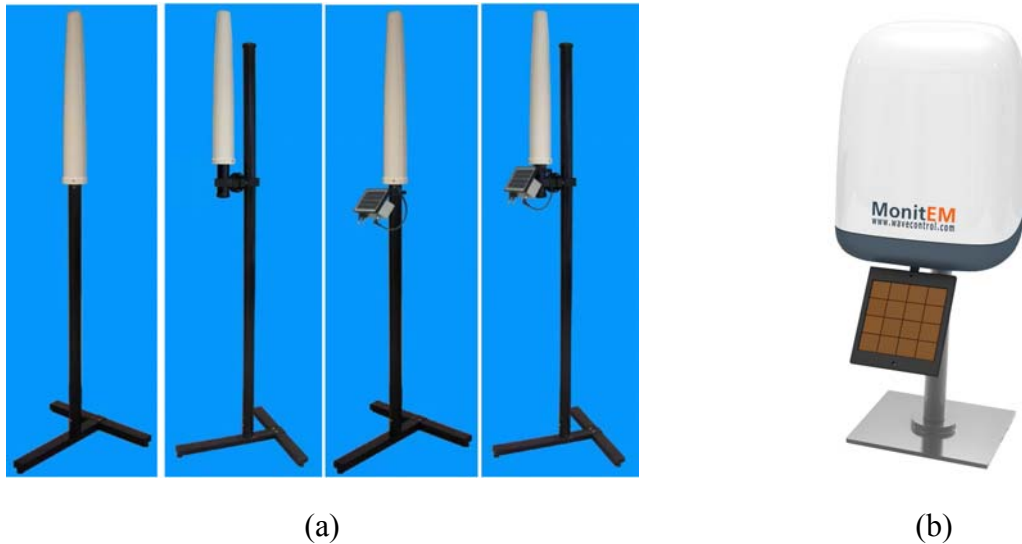


Slika 10. Koncept kontinualnog monitoringa nivoa EM polja – primer SEMONT sistema.

Pored SEMONT sistema, trenutno u svetu postoji značajan broj sistema za kontinualni monitoring nivoa EM polja [37], [68]-[71]. Većina njih je uglavnom bazirana na upotrebi širokopojasnih (*wideband*) sonde, pre svega zbog jednostavnije merne procedure, obrade merenih rezultata i skladištenja podataka. Njihovom primenom se pokriva određeni deo frekvencijskog spektra od interesa (u opsegu niskih ili u opsegu visokih frekvencija), odnosno omogućuje se merenje sveukupnog nivoa polja, kojem doprinosi različit broj aktivnih izvora na lokaciji od interesa.

Osim širokopojasnih, u okviru ovih sistema koriste se i takozvane *multiband* sonde, dizajnirane da pokrivaju podopsege frekvencija rezervisanih za rad pojedinih izvora EM polja: pre svih izvora namenjenih radio i TV difuziji, odnosno mobilnoj telefoniji. Pregled rezultata merenja sprovedenih u okviru postojećih sistema za monitoring dat je u radovima [38], [72], gde se može uočiti da su izmerene vrednosti nivoa polja veoma slične u pojedinim državama.

Primeri nekih od širokopojasnih senzorskih elemenata koji imaju mogućnost implementacije sonde za merenja u jednom (*wideband*) ili više (*multiband*) frekvencijskih opsega, dati su na slici 11. Senzorski elementi AMB-8059 nemačkog proizvođača Narda [73] prikazani su na slici 11a, dok je na slici 11b prikazan MonitEM senzorski element španskog proizvođača Wavecontrol [74].



Slika 11. Primeri širokopolasnih senzorskih elemenata za merenje nivoa EM polja [73], [74].

Sva četiri modela senzorskog elementa AMB-8059 poseduju mogućnost rada sa jednom od sedam sondi, čiji su radni frekvencijski opsezi dati u tabeli 3 [73].

| Model sonde | Frekvencijski opseg | | | |
|---|---------------------|---------------|-----------------|-----------------|
| Electric Field Probe EP-1B-01 | 100 kHz – 3 GHz | | | |
| Tri-Band Electric Field Probe EP-3B-01 | 100 kHz – 3 GHz | | | |
| | 0,1 – 3000 MHz | 0,1 – 862 MHz | 933 – 3000 MHz | |
| Magnetic Field Probe HP-1B-01 | 10 Hz – 5 kHz | | | |
| Quad-Band Electric Field Probe EP-4B-01 | 100 kHz – 3 GHz | | | |
| | 0,1 – 3000 MHz | 925 – 960 MHz | 1805 – 1880 MHz | 2110 – 2170 MHz |
| Electric Field Probe EP-1B-03 | 100 kHz – 7 GHz | | | |
| Quad-Band Electric Field Probe EP-4B-02 | 100 kHz – 7 GHz | | | |
| | 0,1 – 7000 MHz | 925 – 960 MHz | 1805 – 1880 MHz | 2110 – 2170 MHz |
| Electric Field Probe EP-1B-04 | 10 Hz – 5 kHz | | | |

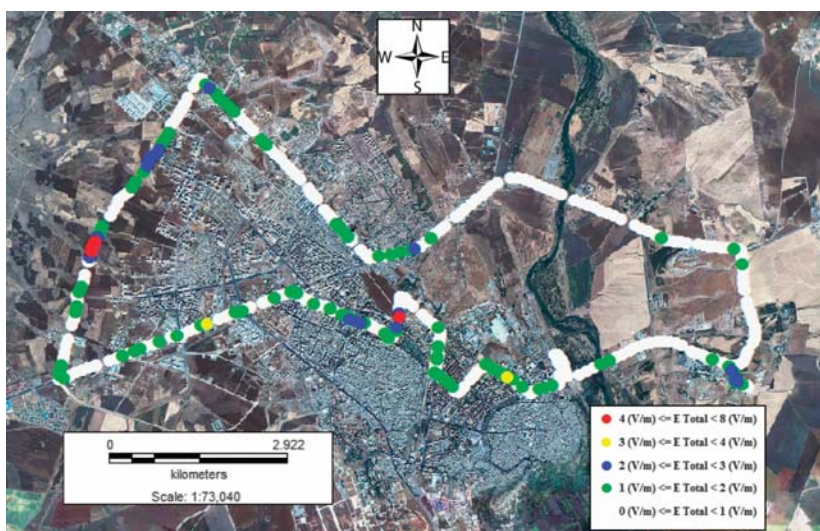
Tabela 3. Frekvencijski opsezi sondi za rad senzora Narda AMB-8059 [73].

Pored pomenutih sistema za kontinualni monitoring, gde se merne stanice postavljaju na fiksnim lokacijama, postoje i takozvani mobilni sistemi, u okviru kojih se merenja vrše u pokretu [75]-[77]. U tu svrhu se koriste automobili ili druga vozila na čiji se krov postavlja odgovarajuća merna oprema, a pri tome se beleže informacije o GPS (*Global Positioning System*) koordinatama prilikom svakog obavljenog merenja. Primer upotrebe automobila u svrhu kontinualnih merenja nivoa EM polja je dat na slici 12, gde je prikazano vozilo kompanije Wavecontrol, sa odgovarajućom mernom opremom, instaliranom na krovu [78].



Slika 12. Upotreba vozila za obavljanje merenja nivoa EM polja u pokretu [78].

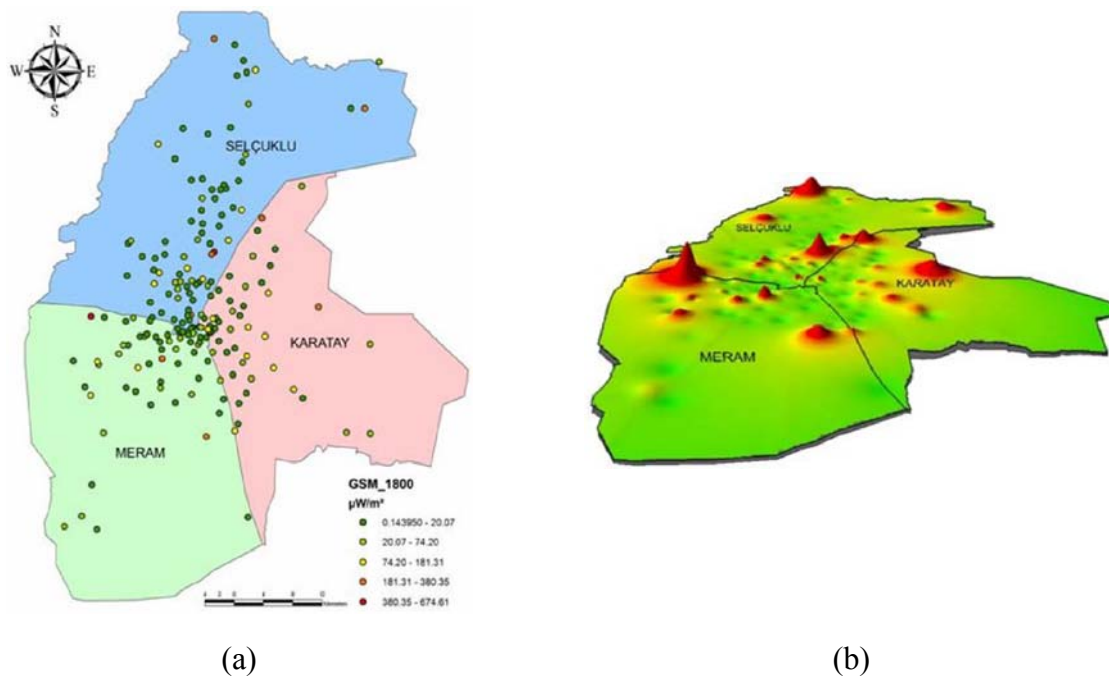
Primenom ovakvog mernog pristupa i adekvatnom obradom dobijenih mernih rezultata, moguće je kreirati mape teritorija na kojima su merenja sprovedena i na kojima su različitim bojama predstavljeni različiti nivoi polja. Time se omogućuje dobar vizuelni pregled promene nivoa EM polja i potencijalne izloženosti poljima u ljudskom okruženju, u skladu sa preporukama [79]. Primer prikaza vrednosti nivoa polja različitim bojama, duž određene trase, dat je na slici 13 [76].



Slika 13. Vizuelni prikaz promene nivoa električnog polja različitim bojama [76].

Međutim, iako upotreba mobilnih sistema za merenje nivoa polja omogućuje efektan prikaz dobijenih mernih rezultata krajnjim korisnicima, održavanje ovakvih sistema iziskuje velike napore, pre svega u pogledu troškova obavljanja merenja i obrade mernih rezultata.

Još jedan interesantan način vizuelne predstave prostorne promene nivoa EM polja jeste dvodimenzionalni i trodimenzionalni prikaz po geografskim oblastima, kao što je prikazano na slici 14 [80].



Slika 14. Mape sa prikazom promene nivoa EM polja različitim bojama [80].

Kod ovakvog pristupa predstave prostorne promene nivoa EM polja, različitim bojama se definišu opsezi vrednosti nivoa polja, od najnižih ka najvišim. Na taj način je moguće veoma lako vizuelno sagledati da li je određena teritorijalna oblast potencijalno izložena povišenim nivoima polja, odnosno da li postoji povišena izloženost.

2.5 Procena izloženosti EM poljima

Bez obzira na vreme, mesto i način obavljanja odgovarajućih merenja, jedan od najbitnijih koraka u procesu ispitivanja EM polja predstavlja procenu izloženosti. Kako bi se dobila jasna informacija o tome da li izmerene vrednosti nivoa polja mogu biti potencijalno opasne, neophodno je sprovesti odgovarajuću analizu, odnosno proveriti da li te vrednosti prevazilaze propisane referentne granične nivoe.

U prethodno navedenim naučnim radovima procena izloženosti se razlikuje u zavisnosti od načina na koji su merenja izvršena, odnosno od korišćene merne procedure, kao i merne

opreme koja je korišćena u eksperimentima. U slučajevima primene frekvencijski selektivnog mernog prisupa, procena izloženosti se obavlja u skladu sa preporukama ICNIRP-ovog dokumenta [23] i jednačinom (1). Ovaj dokument pruža jasne smernice za procenu izloženosti i sugerše poređenje izmerenih vrednosti sa referentnim graničnim nivoima, za svaku frekvenciju ponaosob. Međutim, iako je ovaj pristup procene izloženosti opšte prihvaćen i implementiran u zakonsku regulativu velikog broja nacionalnih pravilnika i standarda, nažalost, njegova primena je ograničena isključivo na slučajeve frekvencijski selektivnih merenja.

Čak se i jedan od trenutno najvažnijih standarda iz oblasti ispitivanja EM polja, pod nazivom “Osnovni standard za procedure merenja i izračunavanja izlaganja ljudi električnim, magnetskim i elektromagnetskim poljima (od 0 Hz do 300 GHz)”, SRPS EN 50413:2010/A1:2014 (prevod međunarodnog standarda “*Basic standard on measurement and calculation procedures for human exposure to electric, magnetic and electromagnetic fields (0 Hz – 300 GHz)*”, EN 50413:2010), u tački 5.2.4, takođe poziva na frekvencijski zavisne referentne granične nivoe [7] i kriterijum provere definisan jednačinom (1).

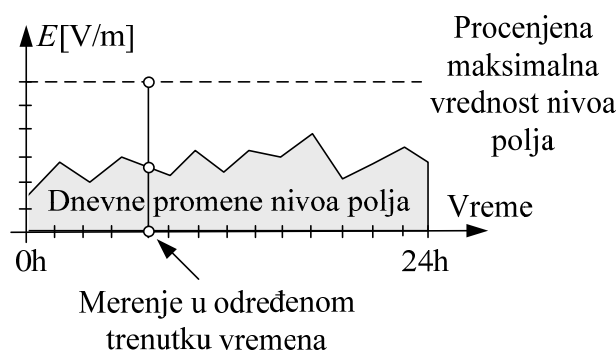
S obzirom na nemogućnost primene datog metoda procene izloženosti prilikom širokopojasnih merenja, u radovima u kojima je korišćen upravo ovaj merni pristup, autori su se uglavnom oslanjali na predlog dat u okviru standarda “Osnovni standard za merenje jačine elektromagnetskog polja na licu mesta u odnosu na izlaganje ljudi u blizini baznih stanica”, SRPS EN 50492:2010/A1:2014 (prevod međunarodnog standarda “*Basic standard for the in-situ measurement of electromagnetic field strength related to human exposure in the vicinity of base stations*”, EN 50492:2010) [6]. U odeljku Annex K.3 – “*Examples of implementation of this standard in the context of Council Recommendation 1999/519/EC*”, koji je informativnog karaktera, se predlaže način procene izloženosti pri širokopojasnim merenjima, korišćenjem sledećeg izraza:

$$ER = \left(\frac{E_m}{E_{L,f}} \right)^2, \quad (2)$$

u okviru kog se poredi apsorbovana snaga zračenja sa odgovarajućom referentnom vrednošću, a nivo sveukupne izloženosti, ER (*Exposure ratio*), se dobija poređenjem izmerene srednje vrednosti intenziteta vektora jačine električnog polja, E_m , sa minimalnim propisanim referentnim graničnim nivoom, $E_{L,f}$, u frekvencijskom opsegu koji pokriva širokopojasna merna sonoda korišćenog instrumenta. Na taj način se dobija najveća moguća izloženost, čija je vrednost, nažalost, često precenjena, odnosno može biti značajno veća od stvarne.

S obzirom da se primenom izraza (2) procenjuje realna izloženost, ovakav pristup ne nudi baš najbolju i najtačniju informaciju o izloženosti na lokaciji od interesa. Pored toga, pomenuti standard je definisan isključivo za merenja nivoa električnog polja visokih frekvencija, u okolini baznih stanica mobilne telefonije, kao konkretnog izvora EM polja. Stoga, predloženi metod se ne može smatrati opšte prihvatljivim, odnosno ne može se smatrati kao adekvatno rešenje za procenu izloženosti u opštem slučaju širokopojasnih merenja, u proizvoljnom frekviencijskom opsegu, u kom nemamo informacije o prisutnosti aktivnih izvora.

Još jedan od načina procene izloženosti je predstavljen u radovima [52], [81], [82], a oslanja se na preporuku standarda SRPS EN 50413:2010 da se obavi procena maksimalno moguće izloženosti (*worst case scenario of exposure*) [7]. Međutim, ni ovakav pristup ne daje realnu sliku o EM izloženosti u ljudskom okruženju. Za konkretan slučaj merenja u okolini baznih stanica mobilne telefonije, procena maksimalne izloženosti se vrši u skladu sa preporukama datim u odeljku Annex I – “*Maximum traffic estimation of cellular network contribution*” standarda SRPS EN 50492:2010 [6]. Ovim preporukama se predlaže procena maksimalnog opterećenja baznih stanica, odnosno ekstrapolacija izmerenih vrednosti nivoa polja do maksimalno mogućih, za slučaj kada su svi kanali aktivni. Primer procene maksimalne vrednosti nivoa polja je prikazan na slici 15.

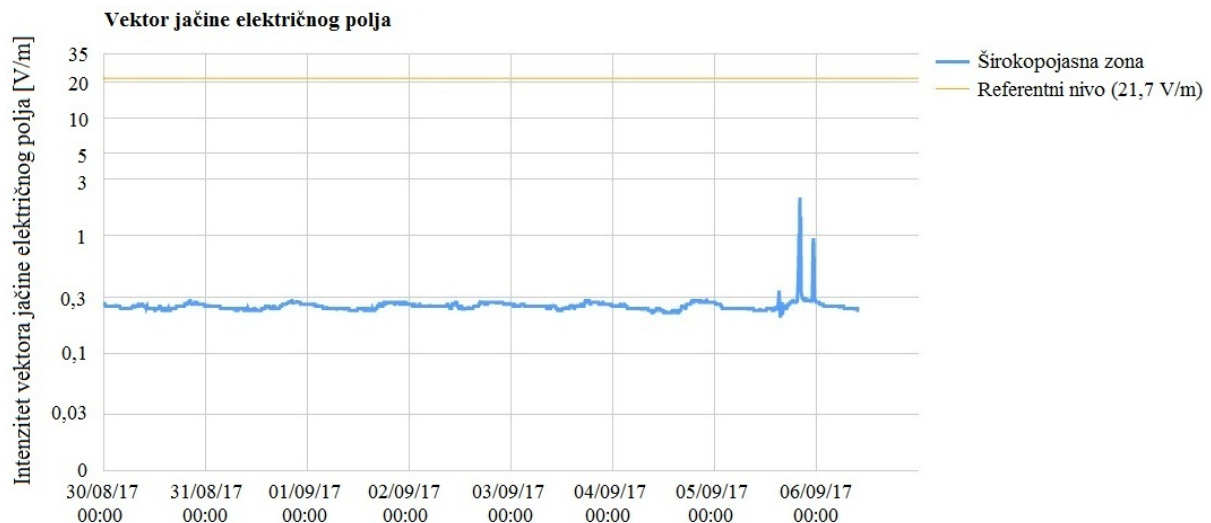


Slika 15. Ekstrapolacija izmerenih vrednosti nivoa električnog polja do maksimalno mogućih.

Ovakvim pristupom ispitivanja se dobija najveća moguća izloženost polju. Međutim, ono što može da predstavlja problem, i što je mana ovakvog pristupa, jeste činjenica da dolazi do značajnog precenjivanja realne izloženosti. Ono je posledica pretpostavke konstantnog rada bazne stanice punim kapacitetom, za šta postoji jako mala verovatnoća. Ovaj problem dolazi do posebnog izražaja u slučajevima kada se vrše analize i ispitivanja u dužem vremenskom periodu, kao što je primer sa slike 15. U praksi je mala verovatnoća da svi kanali budu konstantno i maksimalno opterećeni u dužem vremenskom periodu.

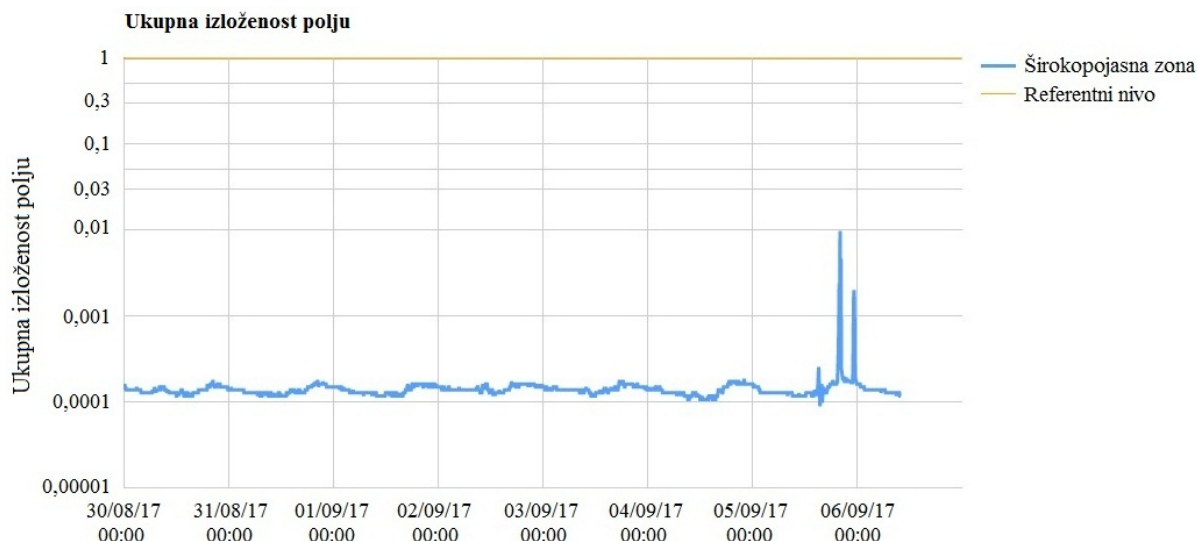
Zbog svega navedenog, od posebnog interesa jeste način procene izloženosti u sistemima za širokopoljasni kontinualni monitoring polja. Pregledom web stranica pojedinih sistema, primećuje se da se u okviru njih procena izloženosti uglavnom vrši poređenjem rezultata merenja sa minimalnim propisanim referentnim graničnim nivoom, za odgovarajući frekvencijski opseg u kom se merenja obavljaju [65], [66].

Pored toga, vremenske fluktuacije nivoa polja se predstavljaju putem grafikona, uz prisutnost odgovarajućeg markera, koji označava vrednost minimalnog referentnog graničnog nivoa [69], [71]. Primer ovakve predstave mernih rezultata, u okviru monitoring sistema grčke nacionalne opservatorije za ispitivanje elektromagnetskih polja (*National Observatory of Electromagnetic Fields*), dat je na slici 16 [65].



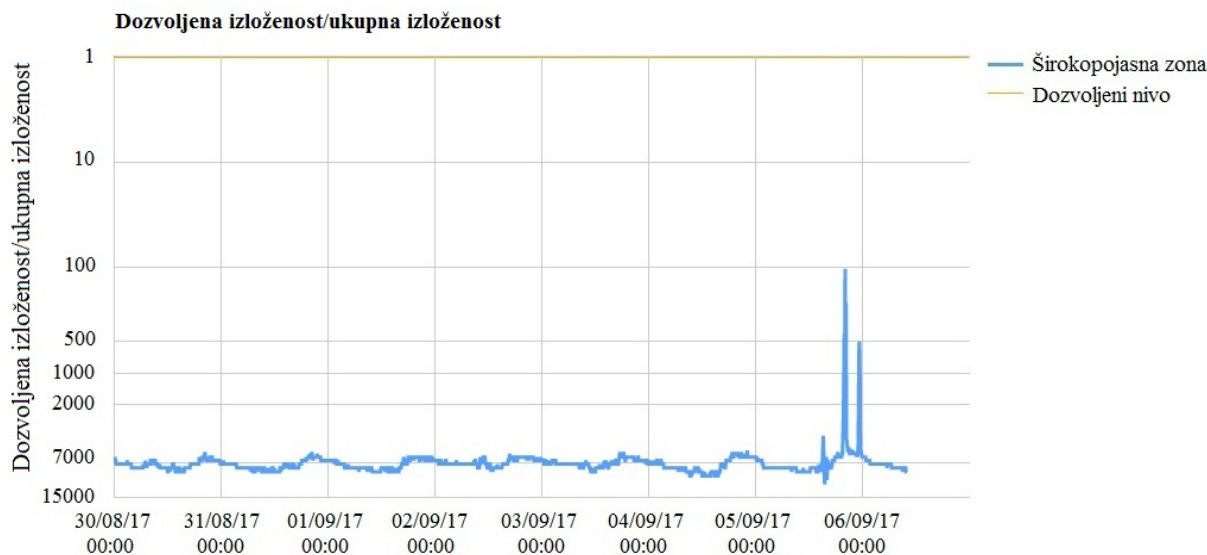
Slika 16. Poređenje mernih rezultata sa minimalnim referentnim graničnim nivoom [65].

Ovakvim pristupom se vrši poređenje mernih rezultata i minimalnog referentnog graničnog nivoa. Kako bi se odredila sveukupna izloženost polju, u okviru monitoring sistema grčke nacionalne opservatorije za ispitivanje elektromagnetskih polja [65] vrši se i procena maksimalne granice izloženosti, prema preporukama standarda SRPS EN 50492:2010 [6], korišćenjem izraza (2). Vremenske fluktuacije dobijene granice se takođe predstavljaju grafički, uz poređenje sa dozvoljenom granicom izloženosti od 1. Ovakav pristup procene prikazan je na slici 17 [65].



Slika 17. Prikaz maksimalne granice sveukupne izloženosti [65].

Dodatno, u okviru ovog monitoring sistema postoji i opcija prikaza odnosa izmerene vrednosti nivoa polja i minimalnog referentnog graničnog nivoa, uz grafički prikaz vremenske promene tog odnosa. Na taj način se vidi koliko puta su izmerene vrednosti manje od dozvoljenih, kao što je prikazano na slici 18 [65].



Slika 18. Odnos izmerene vrednosti i minimalnog referentnog graničnog nivoa [65].

Na kraju, nakon pregleda dostupne naučne literature, neophodno je naglasiti da pored pomenutih radova i opšte prihvaćenih dokumenata i standarda u oblasti ispitivanja EM polja, postoje i pojedinačna dokumenta i akta na nivou nacionalnih zakonskih regulativa pojedinih država. Postoji određena verovatnoća da je u nekom od njih predložen neki novi metod proce-

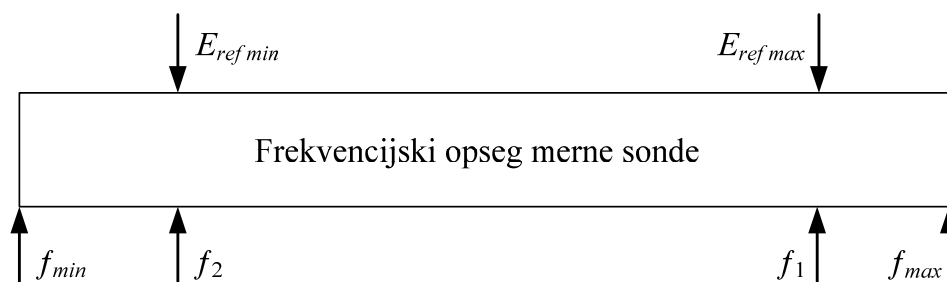
ne izloženosti za slučaj širokopojsnih merenja. Međutim, u toku svojih istraživanja, autor ove disertacije nije naišao, niti mu je poznat, ijedan takav standardizovan metod. Stoga je najveći deo svojih istraživačkih aktivnosti autor disertacije usmerio ka realizaciji jednog novog, mogućeg rešenja za problem procene izloženosti kod širokopojsnih merenja.

3 Metod procene izloženosti baziran na granicama izloženosti

U okviru ovog poglavlja biće predstavljene teorijske osnove novopredloženog metoda procene izloženosti električnim poljima visokih frekvencija, namenjenog širokopoljnim merenjima i monitoringu polja. Dati metod je baziran na određivanju granica izloženosti, odnosno opsega u kom se stvarna izloženost može naći [83]. Dodatno, u cilju poboljšanja procene izloženosti, predloženi metod poseduje i mogućnost suženja opsega definisanog granicama izloženosti, kroz njihovo prilagođavanje spektralnom sadržaju polja, na lokaciji ispitivanja [84], [85].

3.1 Određivanje granica izloženosti

Primena širokopoljnog mernog pristupa ne omogućava poznavanje frekvencijskog sadržaja polja, prisutnog na ispitnoj lokaciji. Kao posledica toga javlja se problem izbora adekvatnih referentnih graničnih nivoa prilikom procene izloženosti. Osnovna ideja predloženog metoda jeste da se na osnovu frekvencijskog opsega širokopoljne merne sonde, korišćenog mernog instrumenta, i odgovarajućih propisanih referentnih graničnih nivoa, odrede granice između kojih se nalazi stvarna i trenutna izloženost polju. U prvom koraku se određuju minimalni i maksimalni referentni granični nivo, $E_{ref\ min}$ i $E_{ref\ max}$, u posmatranom širokopoljnom frekvencijskom opsegu merne sonde, od f_{min} do f_{max} , kao što je prikazano je na slici 19.



Slika 19. Izbor minimalnog i maksimalnog propisanog referentnog graničnog nivoa, u širokopoljnom frekvencijskom opsegu merne sonde.

Inicijalno izabrani referentni granični nivoi se vezuju za frekvencijski opseg merne sonde, a njihov izbor se vrši u skladu sa vrednostima propisanim nacionalnim pravilnikom Republike Srbije [10]. Međutim, moguć je i odabir u skladu sa nekim drugim međunarodnim pravilnicima, kao što je ICNIRP-ov dokument [23].

Treba naglasiti da su izabrani referentni granični nivoi, $E_{ref\ min}(f_2)$ i $E_{ref\ max}(f_1)$, najmanji i najveći mogući u posmatranom frekvencijskom opsegu merne sonde, koji ne moraju biti, i u opštem slučaju se ne javljaju, na granicama frekvencijskog opsega sonde, odnosno na frekvencijama f_{min} i f_{max} , što se može videti sa slike 19.

Nakon odabira minimalnog i maksimalnog referentnog graničnog nivoa, naredni korak predstavlja proračun donje i gornje granice sveukupne izloženosti (*Global Exposure Ratio – GER*), primenom sledećih izraza:

$$GER_{donje} = \left(\frac{E_m}{E_{ref\ max}(f_1)} \right)^2 \quad i \quad GER_{gornje} = \left(\frac{E_m}{E_{ref\ min}(f_2)} \right)^2, \quad (3)$$

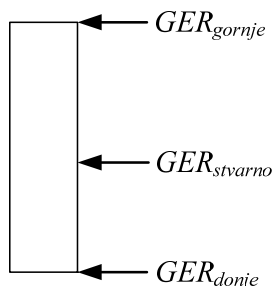
gde je E_m kumulativna izmerena vrednost vektora jačine električnog polja, dobijena širokopojasnim merenjem, koja u sebi sadrži doprinose svih frekvencija, odnosno svih aktivnih izvora električnog polja u okolini merne lokacije, a čije radne frekvencije pripadaju frekvencijskom opsegu merne sonde.

Na ovaj način, predloženi metod je u skladu sa predlogom procene izloženosti u okviru standarda SRPS EN 50492:2010 [6], kojim se sugerše proračun najveće moguće izloženosti na lokaciji ispitivanja, definisanjem gornje granice izloženosti. Kao dopuna ovog predloga, poređenjem izmerenih vrednosti sa najvećim graničnim nivoom dobija se minimalna moguća izloženost, čime se može upotpuniti slika o potencijalnoj izloženosti polju, definisanjem opsega u kome se stvarna izloženost nalazi.

Imajući u vidu da se pri izboru referentnih graničnih nivoa uzimaju najmanja i najveća moguća vrednost, stvarna izloženost električnom polju se sigurno nalazi negde između granica izloženosti [85], odnosno u opsegu:

$$GER_{donje} \leq GER_{stvarno} \leq GER_{gornje}, \quad (4)$$

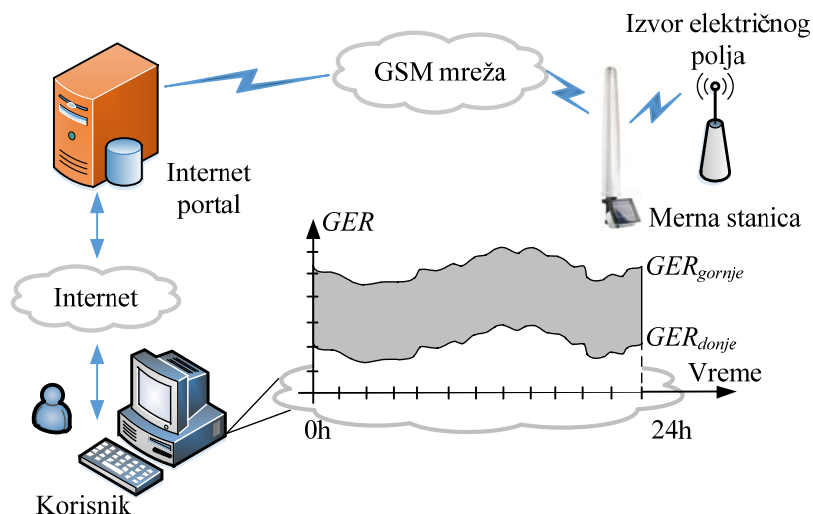
kao što je prikazano na slici 20. Dokaz ove činjenice dat je u prilogu 1.



Slika 20. Granice izloženosti električnim poljima visokih frekvencija.

Jednostavnost i opštost predloženog metoda procene izloženosti, baziranog na granicama izloženosti, čine ga primenljivim za bilo koji tip širokopoljnih merenja nivoa električnog polja. Pored standardnih konvencionalnih merenja, koja se obavljaju praktično trenutno, odnosno u kratkom vremenskom intervalu, predloženi metod nudi efikasno rešenje za procenu izloženosti i u slučaju merenja u dužim intervalima vremena.

Stoga, prednost ovakvog pristupa procene izloženosti posebno dolazi do izražaja kada imamo širokopoljasa kontinualna merenja (monitoring) nivoa električnog polja, kao što je prikazano na slici 10. U takvim slučajevima je moguće dobiti uvid u promene granica izloženosti, a samim tim i promene opsega u kom se nalazi stvarna izloženost, u toku nekog dužeg intervala vremena. Ova ideja je implementirana u okviru veb portala SEMONT sistema i prikaz promena granica izloženosti na dnevnom nivou je dat na slici 21 [27], [86].



Slika 21. Prikaz dnevnih granica izloženosti električnim poljima.

Pored promena granica izloženosti na dnevnom nivou, ovim pristupom je moguće sagledati i promene u nekom drugom intervalu vremena (nedeljnom, mesečnom ili godišnjem), pri čemu dobijene informacije mogu biti veoma korisne, pogotovo kada je za određenu ispitnu lokaciju neophodna opsežna i dugoročna analiza izloženosti populacije električnom polju visokih frekvencija.

3.2 Razlika između granica izloženosti

Prilikom izbora minimalnog i maksimalnog referentnog graničnog nivoa, koji se koriste za proračun granica sveukupne izloženosti, primenom jednačina (3), od primarnog je značaja poznavanje frekvencijskog opsega koji pokriva širokopoljasa merna sonda.

Nažalost, širokopoljasna merenja ne pružaju informacije o spektralnom sadržaju polja na mernoj lokaciji, odnosno nema nikakvih informacija o tome na kojim frekvencijama aktivni izvori emituju polje. Stoga se može desiti da na ispitnoj lokaciji aktivni izvori emituju polje u užem opsegu od frekvencijskog opsega sonde. Kao posledica, javlja se mogućnost neadekvatnog odabira minimalnog i maksimalnog referentnog graničnog nivoa, $E_{ref\ min}(f_2)$ i $E_{ref\ max}(f_1)$, u odnosu na realnu situaciju, odnosno spektralni sadržaj polja.

Imajući u vidu ovu činjenicu, jasno je da će u tom slučaju računanje GER_{donje} i GER_{gornje} dovesti do toga da je gornja granica nešto veće vrednosti, dok je donja granica nešto niže vrednosti od realne. Drugim rečima, na ovaj način se vrši precenjivanje gornje granice stvarne izloženosti, odnosno potcenjivanje donje granice.

Posledično, sve to može rezultovati širokim opsegom u kome se nalazi stvarna izloženost. Stoga, da bi se kvantifikovao opseg između granica izloženosti, moguće je definisati relativnu razliku između granica izloženosti, kao:

$$\delta[\%] = \frac{GER_{gornje} - GER_{donje}}{GER_{gornje}} \cdot 100\% = \left[1 - \left(\frac{E_{ref\ min}}{E_{ref\ max}} \right)^2 \right] \cdot 100\%, \quad (5)$$

gde se može uočiti da je ona funkcija odnosa izabranih referentnih graničnih nivoa.

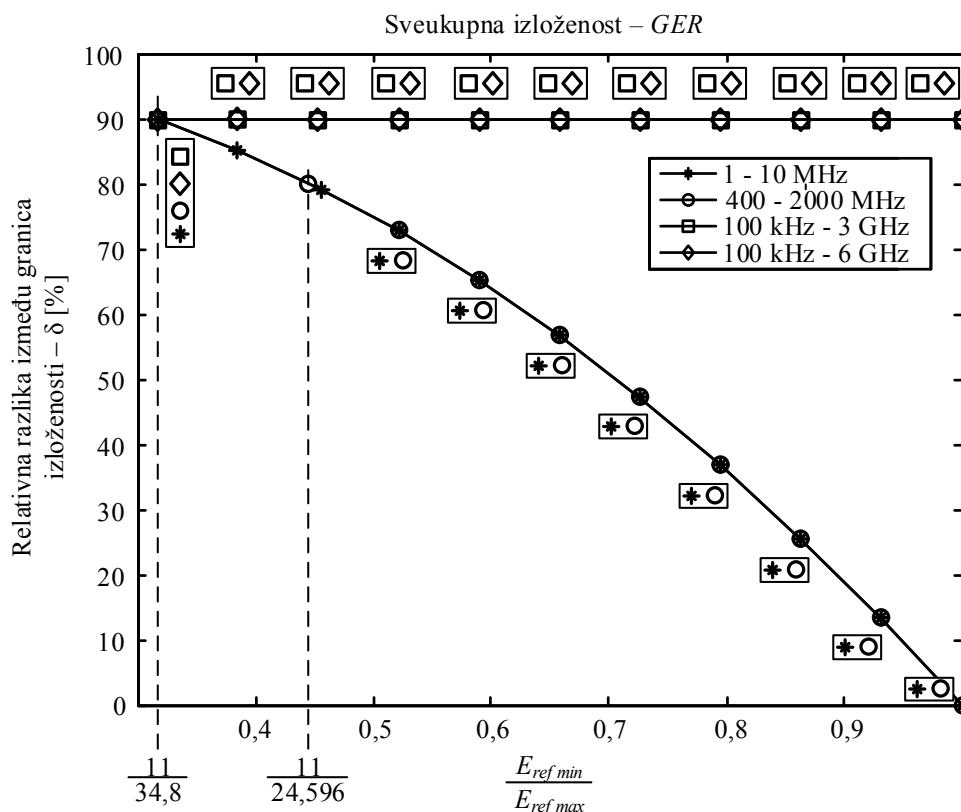
Vrednosti referentnih graničnih nivoa propisane nacionalnim pravilnicima, kako za opštu populaciju [10], tako i za profesionalno osoblje [16], date su prilogu 2. S obzirom da je akcent ove disertacije na proceni izloženosti opšte populacije, sva dalja razmatranja će podrazumevati upotrebu vrednosti referentnih graničnih nivoa propisanih za ovu kategoriju stanovništva. Naravno, slična analiza se može obaviti i za profesionalno osoblje, u skladu sa odgovarajućim vrednostima referentnih graničnih nivoa.

Na ovom mestu su, u okviru tabele 4, izdvojene vrednosti referentnih graničnih nivoa vektora jačine električnog polja, za opseg visokih frekvencija. U pojedinim frekvencijskim opsezima su vrednosti referentnih graničnih nivoa funkcija frekvencije f , pri čemu se prilikom proračuna vrednosti frekvencije uzimaju u MHz.

| Opšta populacija – E [V/m] | | | | |
|------------------------------|----------------|--------------|----------------|-------------|
| 100 kHz – 1 MHz | 1 – 10 MHz | 10 – 400 MHz | 400 – 2000 MHz | 2 – 300 GHz |
| 34,8 | $34,8/f^{1/2}$ | 11,2 | $0,55 f^{1/2}$ | 24,4 |

Tabela 4. Vrednosti referentnih graničnih nivoa vektora jačine električnog polja [10].

Na osnovu podataka iz tabele 4, jasno je da se relativna razlika između granica izloženosti, definisana izrazom (5), menja, kako po frekvencijskim opsezima, tako i sa promenom odnosa $E_{ref\ min}/E_{ref\ max}$. Ta promena je za nekoliko različitih frekvencijskih opsega prikazana na slici 22 [83].



Slika 22. Promena relativne razlike između granica izloženosti [83].

Aktuelne vrednosti referentnih graničnih nivoa su dobijene na osnovu intenzivnih istraživanja niza međunarodnih istraživačkih institucija, a koja su sprovedena sa nivoom znanja i mernom opremom koja je odgovarala datom tehnološkom razvoju. Međutim, realno je očekivati da će u budućnosti neka nova istraživanja ukazati na eventualnu potrebu promene aktuelnih i propisanih referentnih graničnih nivoa. Stoga, promena relativne razlike između gornje i donje granice izloženosti je analizirana u odnosu na mogućnost promene odnosa minimalnog i maksimalnog referentnog graničnog nivoa.

Za slučajeve merenja u frekvencijskim opsezima od 100 kHz do 3 GHz, kao i od 100 kHz do 6 GHz, gde je prema nacionalnom pravilniku Republike Srbije $E_{ref\ min} = 11$ V/m (na frekvenciji od 400 MHz) i $E_{ref\ max} = 34.8$ V/m (na frekvenciji od 100 kHz) [10], ova razlika je konstantna i iznosi 90% od vrednosti gornje granice izloženosti, GER_{gornje} . Očigledno, u tim

slučajevima je opseg u kome se stvarna izloženost nalazi veoma širok, što posredno utiče na preciznost same procene izloženosti.

Takav zaključak je i očekivan, s obzirom da proširenje frekvencijskog opsega u kome se merenja obavljaju, može da dovede do složenijeg frekvencijskog sadržaja polja čiji nivo se meri. Kako primena širokopojasnog mernog pristupa ne omogućuje informaciju o spektralnom sadržaju tog polja, izbor najveće i najmanje moguće vrednosti referentnog graničnog nivoa, za posmatrani frekvencijski opseg, podrazumeva da oni odgovaraju svim frekvencijama iz tog opsega, što naravno nije tačno. Dakle, sa povećanjem širine frekvencijskog opsega u kome se obavljaju širokopojasna merenja, relativna razlika između granica izloženosti se takođe povećava.

Međutim, u situacijama kada bi se merenja obavljala u nešto užim frekvencijskim opsezima, kao što su na primer opsezi od 1 do 10 MHz, i od 400 MHz do 2 GHz, može se uočiti da relativna razlika između granica izloženosti opada sa promenom odnosa $E_{ref\ min}/E_{ref\ max}$. To je posledica promene samih referentnih graničnih nivoa, koji su u datim frekvencijskim opsezima funkcije kvadratnog korena vrednosti frekvencije (tabela 4). Stoga, promenom odnosa $E_{ref\ min}/E_{ref\ max}$ granice izloženosti se međusobno sve više približavaju, sužava se opseg u kome se stvarna izloženost može naći, i dolazi do povećanja preciznosti procene izloženosti.

Imajući u vidu ove činjenice, posebno je interesantno sagledati promenu relativne razlike između granica izloženosti, u slučaju primene predloženog metoda za neke od komercijalno dostupnih sonde za merenje u više frekvencijskih opsega (*multiband* sonde). Kao primer, uzmimo mernu sondu Narda EP-4B-01, koja je kompatibilna sa senzorskim elementom Narda AMB-8059, prikazanim na slici 11a.

Ova sonda ima mogućnost širokopojasnog merenja nivoa električnog polja u četiri frekvencijska opega, kao što je navedeno u tabeli 3 [73]. Vrednosti minimalnih i maksimalnih referentnih graničnih nivoa, za frekvencijske opsege ove sonde, prema nacionalnom pravilniku Republike Srbije [10], dati su u tabeli 5.

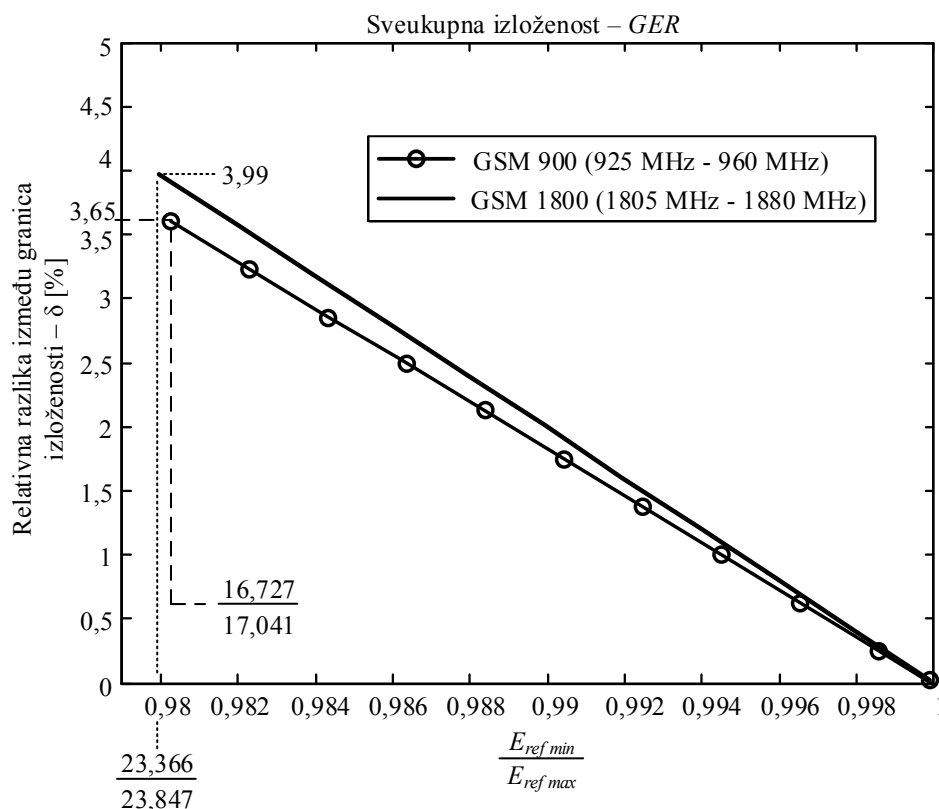
| Opseg | Wideband | GSM 900 | GSM 1800 | UMTS 2100 |
|---------------------------|------------|-----------|-------------|-------------|
| Frekvencijski opseg [MHz] | 0,1 – 3000 | 925 – 960 | 1805 – 1880 | 2110 – 2170 |
| $E_{ref\ min}$ [V/m] | 11 | 16,727 | 23,366 | 24,4 |
| $E_{ref\ max}$ [V/m] | 34,8 | 17,041 | 23,847 | 24,4 |
| δ [%] | 90 | 3,65 | 3,99 | 0 |

Tabela 5. Relativna razlika između granica izloženosti za slučaj merne sonde EP-4B-01 [73].

Na osnovu vrednosti propisanih referentnih graničnih nivoa, dobija se da je relativna razlika između granica izloženosti najveća u slučaju *wideband* opsega (100 kHz – 3 GHz), i ima konstantnu vrednost od 90%. Ovaj slučaj je praktično već razmatran u prethodnom delu teksta i ova vrednost relativne razlike je već prikazana na slici 22.

Međutim, za GSM 900 i GSM 1800 podopsege, relativna razlika se drastično smanjuje i iznosi 3,65% i 3,99%, respektivno. Konačno, u slučaju UMTS 2100 opsega razlike uopšte nema i iznosi 0%, što je i očekivano s obzirom da je u ovom frekvencijskom opsegu ista vrednost propisanog graničnog nivoa za sve frekvencije, a sama procena je apsolutno tačna.

Dobijene vrednosti relativne razlike između granica izloženosti su dobra potvrda prethodno navedene činjenice da suženje frekvencijskog opsega širokopojasnog merenja može rezultovati odgovarajućim smanjenjem te relativne razlike. Dodatno smanjenje ove razlike se može postići samo za dva GSM podopsega merne sonde, promenom odnosa $E_{ref\ min}/E_{ref\ max}$, kao što je prikazano na slici 23.



Slika 23. Promena relativne razlike između granica izloženosti za dva GSM podopsega merne sonde Narda EP-4B-01.

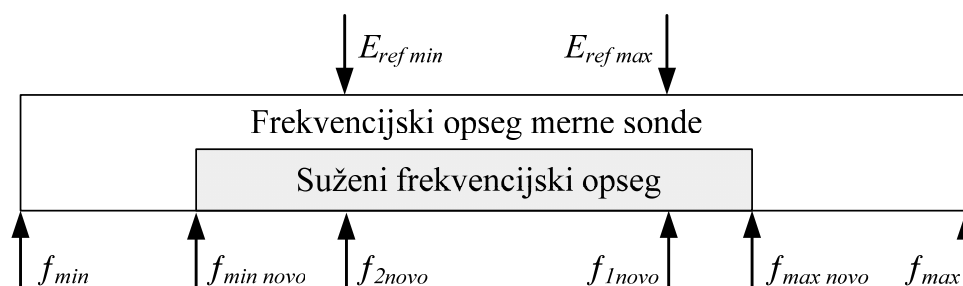
Sprovedena analiza se može obaviti i za bilo koji drugi tip širokopojasne sonde, koja se koristi za merenje nivoa električnog polja visokih frekvencija. Merna sonda Narda EP-4B-01

je izabrana kao primer, jer poseduje funkcionalnost da istovremeno, pored širokog (*wideband*) opsega, pokriva i podopsege rezervisane za rad sistema mobilne telefonije. S obzirom da je zastupljenost sistema za mobilne komunikacije veoma velika, i u stalnom porastu, aktuelan je i trend razvoja *multiband* širokopojasnih sonde, koje pokrivaju upravo frekvencijske podopsege rezervisane za njihov rad.

U svakom slučaju, sprovedena analiza promene relativne razlike između granica izloženosti predloženog metoda, kao najvažniji zaključak daje činjenicu da je moguće, na odgovarajući način, smanjiti relativnu razliku i time povećati preciznost određivanja opsega u kom se nalazi realna izloženost. To smanjenje podrazumeva adekvatno prilagođenje prvobitno određenih granica izloženosti, pri čemu će u narednom poglavlju biti opisana osnovna ideja i pojedini detalji realizacije.

3.3 Prilagođenje granica izloženosti

U cilju smanjenja razlike između granica izloženosti, a samim tim i povećanja preciznosti procene, ideja jeste da se obavi detekcija aktivnih izvora električnog polja, kao i njihovih radnih frekvencija, u okolini ispitne lokacije. Cilj je da se vidi koji delovi iz frekvencijskog opsega merne sonde mogu da se odbace, ukoliko na njima nema emisije polja [84], [85]. Time se otvara mogućnost suženja prvobitnog frekvencijskog opsega, na podopseg od $f_{min\ novo}$ do $f_{max\ novo}$, u kome se vrši izbor novih referentnih graničnih nivoa $E_{ref\ min}(f_{2novo})$ i $E_{ref\ max}(f_{1novo})$, koji su prikladniji konkretnoj mernoj lokaciji, kao što je prikazano na slici 24.



Slika 24. Izbor prikladnijeg minimalnog i maksimalnog propisanog referentnog graničnog nivoa, za konkretnu mernu lokaciju.

Izborom novih referentnih graničnih nivoa dolazi do prilagođenja granica sveukupne izloženosti, koje se sada mogu odrediti kao:

$$GER_{donje}^{novo} = \left(\frac{E_m}{E_{ref\ max}(f_{1novo})} \right)^2 \quad i \quad GER_{gornje}^{novo} = \left(\frac{E_m}{E_{ref\ min}(f_{2novo})} \right)^2, \quad (6)$$

pri čemu je E_m izmerena kumulativna, odnosno sveukupna, vrednost intenziteta vektora jačine električnog polja, dobijena širokopoljnim merenjem.

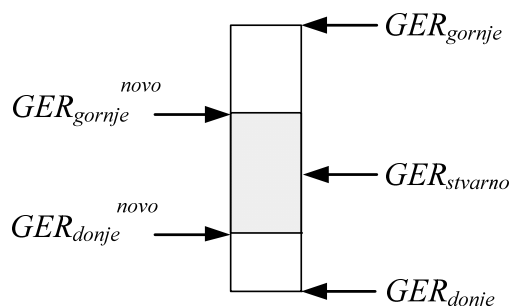
S obzirom da su prvobitno odabrani referentni granični nivoi, $E_{ref\ min}$ i $E_{ref\ max}$, najmanji i najveći mogući u inicijalno posmatranom širokopoljnom frekvencijskom opsegu merne sonde, suženje opsega dovodi do toga da mora da važi:

$$E_{ref\ min}(f_2) \leq E_{ref\ min}(f_{2novo}) \quad i \quad E_{ref\ max}(f_{1novo}) \leq E_{ref\ max}(f_1), \quad (7)$$

odakle na osnovu jednačina (3) i (6) sledi da je:

$$GER_{donje} \leq GER_{donje}^{novo} \quad i \quad GER_{gornje}^{novo} \leq GER_{gornje}. \quad (8)$$

Poslednji izrazi pokazuju da se, nakon prilagođavanja granica izloženosti, opseg u kome se stvarna izloženost nalazi u izvesnoj meri sužava, a time se preciznost procene izloženosti povećava, kao što je prikazano na slici 25.



Slika 25. Prilagođenje granica izloženosti električnim poljima visokih frekvencija.

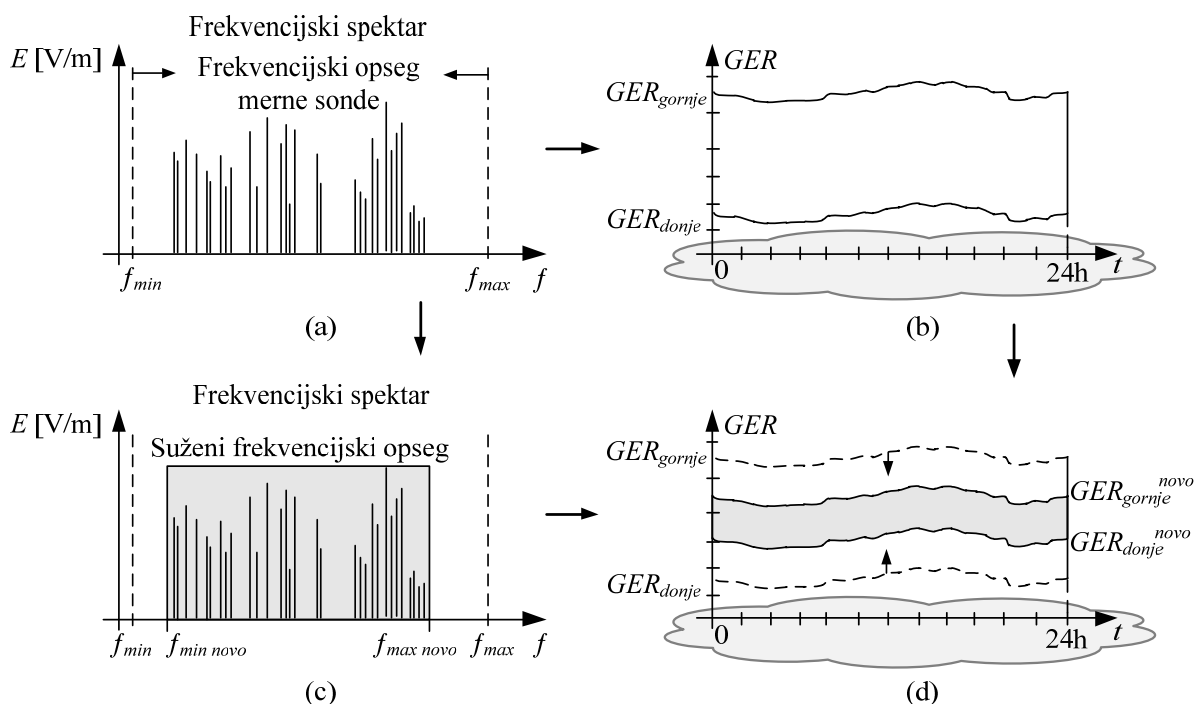
Predloženi postupak predstavlja unapređenje osnovnog metoda procene izloženosti kod širokopoljnih merenja, baziranog na granicama izloženosti i u okviru ove disertacije je nazvan *metod procene izloženosti baziran na adaptivnim granicama izloženosti*.

Kako bi se omogućilo smanjenje razlike između granica izloženosti, potrebno je na podesan način odrediti spektralni sadržaj električnog polja, na lokaciji ispitivanja. Stoga se u okviru metoda procene baziranog na adaptivnim granicama izloženosti predlaže kombinovana upotreba frekvencijski selektivnog i širokopoljnog mernog pristupa [84], [85]. Zajedničkom upotrebom ova dva tipa merenja se, pored sveukupne vrednosti polja na datoj lokaciji, dobijaju i informacije o tome koje frekvencijske komponente doprinose ovoj vrednosti.

Naravno, cilj je da se obe vrste merenja obave u istoj mernoj tački, prethodno definisanoj primenjujući kriterijume odgovarajućih standarda iz oblasti merenja nivoa EM polja.

Primena metoda baziranog na adaptivnim granicama podrazumeva pretpostavku da se granice spektralnog sadržaja neće tako često menjati i da je prisutni spektar u većini slučajeva znatno uži od frekventijskog opsega širokopoljasne merne sonde. Stoga, poznavanje spektralnog sadržaja na mernoj lokaciji, a prvenstveno njegovih granica, uticaće na tačnije određivanje adekvatnih referentnih graničnih nivoa, koji će se upotrebljavati za procenu izloženosti kod širokopoljasnih merenja, pogotovo u slučaju kontinualnog monitoringa.

U tim slučajevima, frekventijski selektivna analiza polja na mernoj lokaciji može dati značajan doprinos proceni dnevnih granica izloženosti, odnosno fluktuaciji realne izloženosti u nekom dužem vremenskom periodu, kao što je prikazano na slici 26.



Slika 26. Primena metoda baziranog na adaptivnim granicama izloženosti električnim poljima.

Imajući u vidu činjenicu da je mala verovatnoća da će na konkretnoj mernoj lokaciji biti čestog instaliranja novih izvora polja, čije su radne frekvencije izvan postojećeg spektra prisutnog na toj lokaciji, predloženi metod adaptivnih granica predstavlja efikasno rešenje za procenu izloženosti u slučaju širokopoljasnih merenja. Jednom određene granice spektralnog sadržaja na datoj mernoj lokaciji omogućuju izbor novih referentnih graničnih nivoa koji su znatno prikladniji toj lokaciji. Novi referentni granični nivoi se mogu koristiti za poboljšanu pro-

cenu dnevnih granica izloženosti, i omogućavaju suženje inicijalno procenjenog opsega u koje se stvarna izloženost nalazi, kao što je prikazano na slikama 26b i 26d.

Sa druge strane, čak i ako dođe do instalacije nekog novog izvora u blizini lokacije od interesa, periodična analiza spektra na lokaciji će omogućiti izbor potencijalno novih referentnih graničnih nivoa, koji će se koristiti za dalje prilagođenje granica izloženosti, u novonastaloj situaciji na mernoj lokaciji. Jednostavna promena brojne vrednosti referentnog graničnog nivoa omogućiće nesmetano obavljanje procene izloženosti, koje ne zahteva bilo kakvu promenu merne opreme ili eventualni prekid procesa merenja/monitoringa. Stoga, metod baziran na adaptivnim granicama izloženosti poseduje visok stepen prilagodljivosti svim promenama frekvencijskog sadržaja polja na mernoj lokaciji.

Na osnovu prethodno navedenih činjenica, zaključak je da bi implementacija ovakvog pristupa proceni izloženosti mogla efikasno da se sprovede u okviru bilo kog sistema za širokopoljasni kontinualni monitoring nivoa polja. U okviru centralizovane baze podataka takvog jednog sistema postojala bi mogućnost čuvanja vrednosti minimalnog i maksimalnog referentnog graničnog nivoa, uz opciju njihovog adekvatnog ažuriranja, nakon periodičnih spektralnih analiza na mernim lokacijama. Baza podataka SEMONT sistema je upravo dizajnirana da omogući ovu podršku [87], te samim tim i implementaciju predloženog metoda procene izloženosti sa adaptivnim granicama izloženosti, odnosno prilagođenim granicama izloženosti.

4 Rezultati eksperimentalnih istraživanja

U cilju verifikacije novopredloženog metoda procene izloženosti je sproveden eksperimentalni deo ove disertacije, odnosno merenja nivoa električnog polja visokih frekvencija, kao i odgovarajuća procena granica izloženosti. U nekoliko narednih poglavlja biće predstavljeni svi detalji eksperimentalnog dela istraživanja, od lokacije na kojoj su merenja obavljena, preko korišćene merne procedure i mernih instrumenata, do samih rezultata procene sveukupne izloženosti.

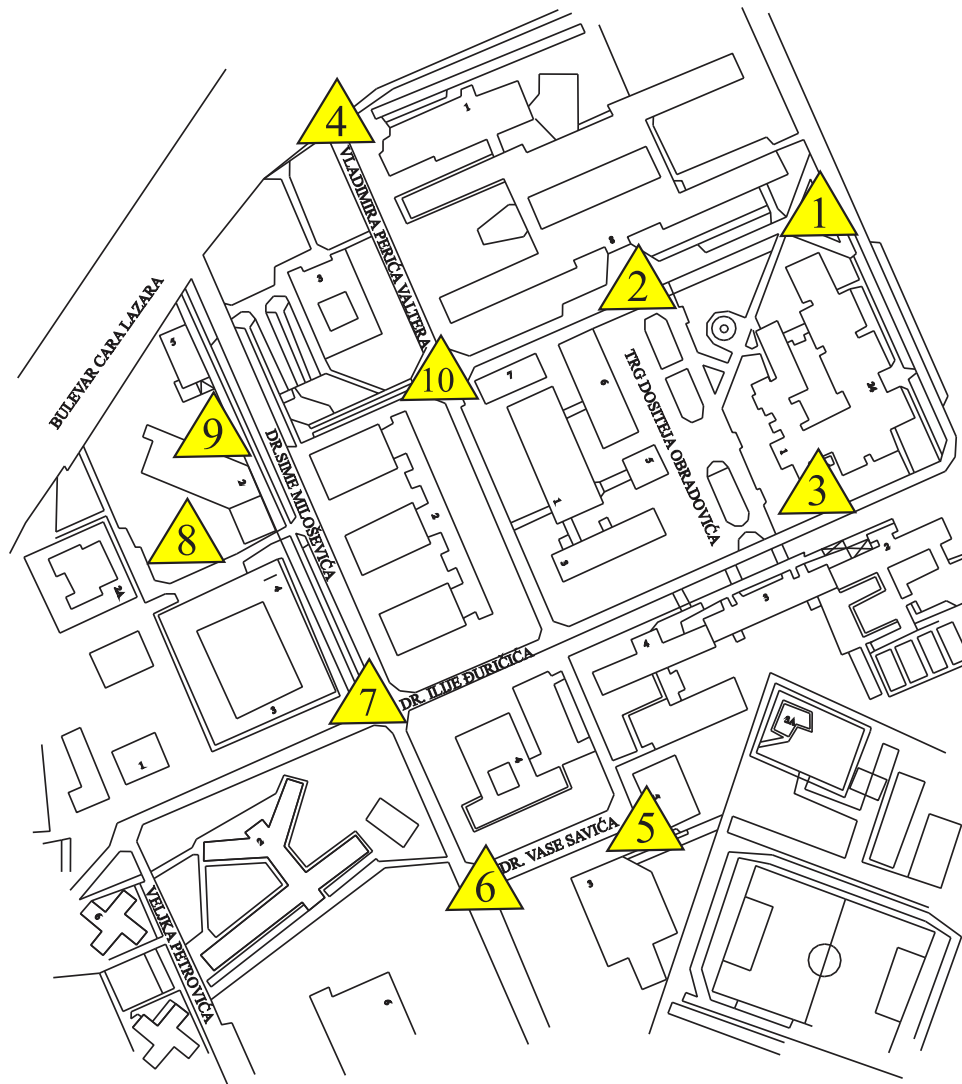
Dobijeni rezultati su verifikovani kroz publikaciju u međunarodnom časopisu *Measurement* [85], kategorije M21. Dodatno, radovi iz oblasti istraživanja ove disertacije su objavljeni i na nekoliko međunarodnih konferencija i skupova [83], [84].

4.1 Lokacija merenja

Kampanja merenja nivoa električnog polja visokih frekvencija sprovedena je u periodu od 15. do 28. juna 2012. godine, u kampusu Univerziteta u Novom Sadu. Ovo je bila prva organizovana i sistematična kampanja monitoringa u kampusu, gde je prisustvo velikog broja studenata konstantno i zbog čega se kampus može smatrati zonom od posebnog interesa, u pogledu izloženosti opšte populacije EM zračenju. Stoga je ovaj prostor zahtevao odgovarajući monitoring nivoa prisutnog polja [88].

Obavljena kampanja je obuhvatala merenja na deset lokacija u okviru kampusa, pažljivo izabranih kako bi se pokrili delovi kampusa u kojima je najveća dnevna posećenost studentske populacije. Na nekim od tih lokacija se studenti obično zadržavaju nešto duži period vremena, dok su neke od lokacija samo prolazne, prilikom obavljanja njihovih svakodnevnih obaveza i aktivnosti.

Tokom merenja su lokacije bile obezbeđene, dok je pristup imalo samo tehničko osoblje koje je obavljalo merenje. Pristup ostalim ljudima je bio zabranjen, kako njihovo prisustvo ne bi imalo uticaja na raspodelu polja i rezultate merenja, odnosno kako bi se obezbedili uslovi takozvanog “neometanog” polja (*unperturbed field*), kao što sugerišu standardi SRPS EN 50492:2010 [6] i SRPS EN 50413:2010 [7]. Prikaz izbora mernih lokacija u okviru ove kampanje merenja dat je na slici 27 [88].



Slika 27. Lokacije merenja u okviru kampusa Univerziteta u Novom Sadu [88].

Na svih deset lokacija merenja su sprovedena korišćenjem iste merne procedure, koja će biti objašnjena u nastavku. Tokom kampanje, monitoring nivoa polja je obavljan na svakoj od lokacija u istom vremenskom intervalu, od 10:00 do 14:00 časova. Ovaj vremenski interval je izabran jer obuhvata period dana kada se očekuje najveća koncentracija ljudi (pre svih studenata) u okviru kampusa. Dodatno, veliki broj ljudi može prouzrokovati i povećanu upotrebu sistema za bežičnu komunikaciju i prenos podataka (mobilna telefonija, bežični internet i dr.). Stoga se u datom periodu dana može očekivati porast nivoa električnog polja na izabranim lokacijama.

Rezultati merne kampanje su detaljno analizirani u radu [88], dok je uporedna analiza rezultata monitoringa električnog polja visokih frekvencija, na pojedinim lokacijama, data na slici 28.

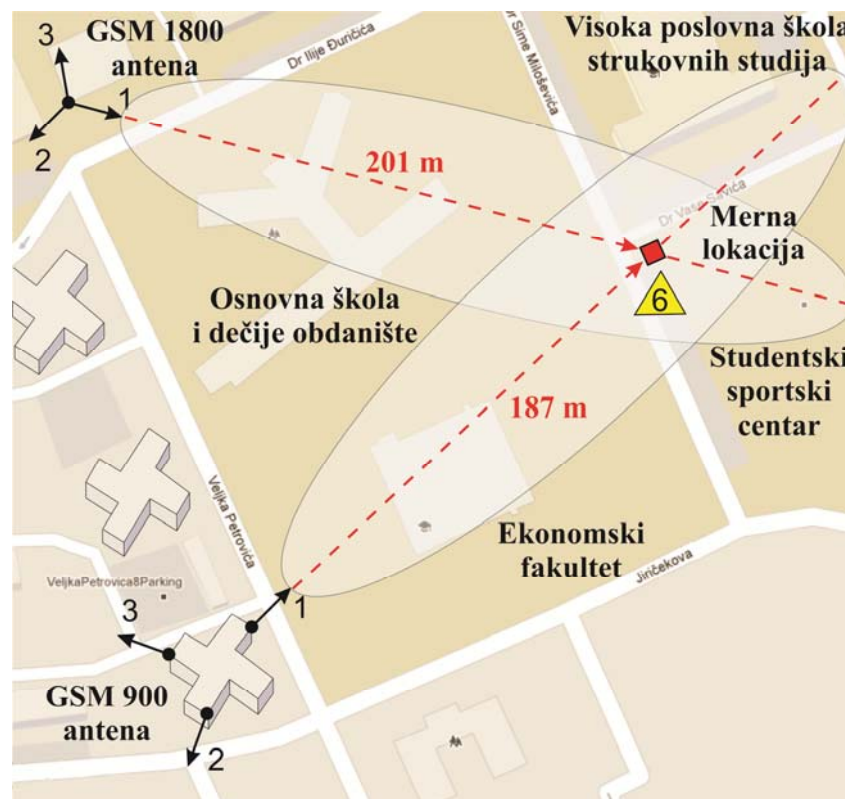


Slika 28. Rezultati monitoringa nivoa polja u kampusu Univerziteta u Novom Sadu [88].

Na osnovu izvršenih merenja i analize promene nivoa polja na svih deset lokacija, zaključeno je da su na lokaciji broj 6 srednje vrednosti nivoa električnog polja dva do tri puta ve-

će nego na ostalim [88], te je stoga ona izabrana za dalju i detaljniju analizu. Na lokaciji broj 6 je obavljeno dodatno merenje, čiji rezultati su poslužili prvenstveno za testiranje i verifikaciju novopredloženog metoda [85].

Merna lokacija broj 6 se nalazi na raskrsnici ulica Dr Sime Miloševića i Dr Vase Savića, a dodatni razlog zbog kojeg je ona bila od posebnog interesa u okviru kampanje monitoringa je taj što se u njoj neposrednoj blizini nalazi nekoliko objekata koji mogu biti posmatrani kao zone povećane osetljivosti, među kojima su: Ekonomski fakultet, Visoka poslovna škola strukovnih studija, studentski sportski centar, osnovna škola “Jovan Popović” i dečije obdanište “Radosno detinjstvo”, kao što je prikazano na slici 29.



Slika 29. Okolina merne lokacije broj 6.

Vizuelna analiza date lokacije je pokazala da se u njenom okruženju nalaze dve bazne stanice (GSM 900 i GSM 1800). Antene ovih baznih stanica su instalirane na krovovima obližnjih zgrada, pri čemu postoji njihova direktna optička vidljivost sa samom lokacijom. Tehničke karakteristike ovih antena su date u tabeli 6 [30]. Ovo verovatno nisu bili jedini izvori zračenja na datoj lokaciji, ali se moglo pretpostaviti da su dominantni, što je kasnija analiza spektralnog sadržaja polja i potvrdila.

| Antena | RBS 2206 indoor 900 MHz | | |
|-----------------------------|--------------------------|-----------|---------|
| Sektor | Prvi | Drugi | Treći |
| Tip antene | K739495 | K739495 | K739495 |
| Broja antena po sektoru | 1 | 1 | 1 |
| Azimut antene | 45° | 200° | 290° |
| Električni <i>down-tilt</i> | 2° | 2° | 2° |
| Mehanički <i>down-tilt</i> | 4° | 1° | 4° |
| Visina antene [m] | 39,5 | 37,5 | 37,5 |
| Broj kanala po sektoru | 4 | 4 | 4 |
| Antena | RBS 2216 indoor 1800 MHz | | |
| Sektor | Prvi | Drugi | Treći |
| Tip antene | K742241 | K80010292 | K742241 |
| Broja antena po sektoru | 1 | 1 | 1 |
| Azimut antene | 105° | 225° | 350° |
| Električni <i>down-tilt</i> | 2° | 2° | 2° |
| Mehanički <i>down-tilt</i> | 0° | 0° | 0° |
| Visina antene [m] | 11,2 | 11,2 | 11,2 |
| Broj kanala po sektoru | 4 | 4 | 4 |

Tabela 6. Tehničke karakteristike GSM antena u blizini lokacije broj 6 [30].

Na osnovu parametara GSM antena iz tabele 6, izvršen je detaljni proračun, koji je dat u prilogu 3. Dobijeno je da su antene prvih sektora baznih stanica GSM 900 i GSM 1800 udaljene 187 i 201 metar od merne lokacije, respektivno. Pri tome, zaključeno je da se glavni snopovi zračenja ovih antena ukrštaju iznad merne lokacije. Glavni snopovi zračenja prelaze iznad merne lokacije na visinama od 19,85 i 4,18 metara, respektivno, kao što je navedeno u tabeli 7. Dodatno, glavni snopovi zračenja prvih sektora antena padaju na površinu zemlje dosta iza same merne lokacije, na udaljenostima od 188,82 i 119,73 metra od nje.

| | Azimut [°] | Visina snopa na mernoj lokaciji [m] | Pad snopa na površ zemlje [m] | Udaljenost mesta pada snopa od merne lokacije [m] |
|----------|------------|-------------------------------------|-------------------------------|---|
| GSM 900 | 45 | 19,85 | 375,82 | 188,82 |
| GSM 1800 | 105 | 4,18 | 320,73 | 119,73 |

Tabela 7. Glavni snopovi zračenja prvih sektora GSM antena.

Imajuću u vidu azimute glavnih snopova zračenja GSM antena, jasno je zašto su baš na ovoj mernoj lokaciji dobijene najveće srednje vrednosti nivoa električnog polja. Posledično, za očekivati je da će i izloženost na datoj lokaciji biti najveća. Kako bi utvrdili u kom opsegu se nalazi izloženost, izvršeno je širokopoljasno merenje na datoj lokaciji, kao i detaljna spektralna analiza. Dobijeni rezultati su poslužili za procenu i prilagođenje granica izloženosti spektralnom sadržaju električnog polja na datoj lokaciji.

4.2 Procedura merenja i rezultati merenja

U ovom poglavlju je opisana procedura merenja, koja je korišćena u okviru merne kampanje, na svih deset lokacija u kampusu. Nakon toga su predstavljeni detalji merne procedure dodatnog merenja na lokaciji broj 6, gde je pored širokopoljasnog, izvršeno i frekvencijski selektivno merenje nivoa električnog polja, u cilju verifikacije metoda procene izloženosti baziranog na adaptivnim granicama izloženosti [85].

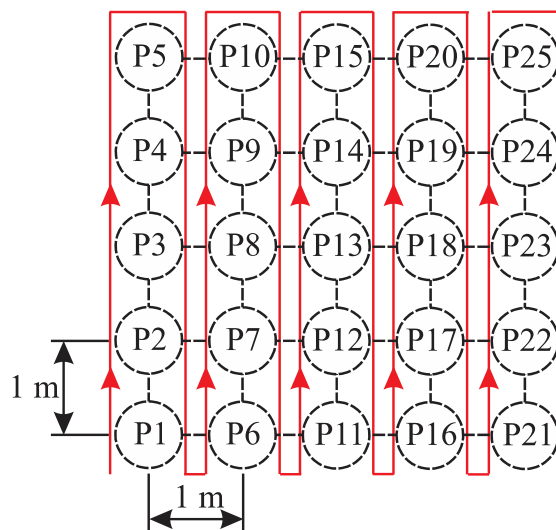
4.2.1 Širokopoljasno merenje nivoa električnog polja

Širokopoljasno merenje prisutnog nivoa električnog polja, na svim lokacijama u okviru merne kampanje, obavljeno je uz upotrebu ručnog mernog instrumenta Narda NBM 550 [20], koji je prikazan na slici 2a. Pri tome je korišćena izotropna merna sonda Narda EF 0691 za širokopoljasna merenja nivoa električnog polja visokih frekvencija [89]. Osnovni i najvažniji parametri ove merne sonde su dati u tabeli 8.

| Parametar | Frekvencijski opseg | Opseg merenja | Linearnost | Frekvencijska osetljivost |
|-----------|---------------------|----------------|--------------------------|----------------------------|
| Vrednost | 100 kHz – 6 GHz | 0,35 – 650 V/m | ±0,5 dB (2 – 400 V/m) | ±1,5 dB (1 MHz – 4 GHz) |

Tabela 8. Parametri širokopoljasne merne sonde Narda EF 0691 [89].

Širokopoljasno merenje je izvršeno u skladu sa mernom procedurom, definisanom u okviru SEMONT sistema [90], [91]. Ova procedura podrazumeva više koraka, od kojih je prvi korak prostorno skeniranje električnog polja na mreži mernih tačaka, prilagođenoj mernoj lokaciji, iznad kojih se vrše merenja nivoa polja, kao što je prikazano na slici 30.

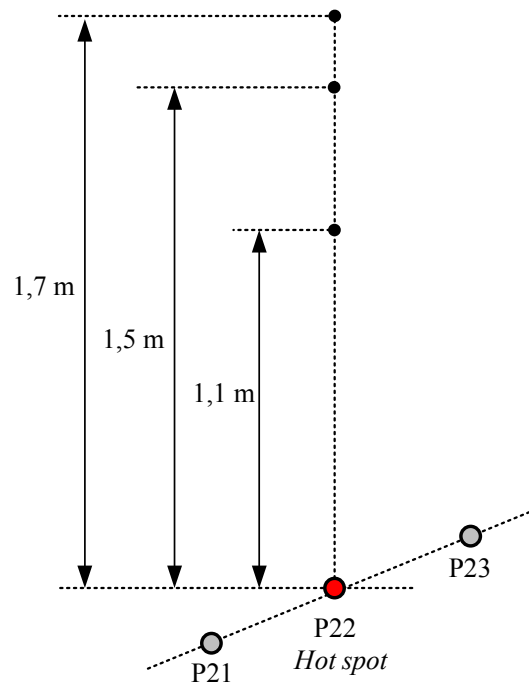


Slika 30. Mreža mernih tačaka.

Merne tačke su bile raspoređene u formi kvadratne matrice, u skladu sa mernom procedurom u okviru SEMONT sistema [90], [91] i pri tome su bile na jednakim međusobnim rastojanjima od jednog metra, u skladu sa standardom SRPS EN 50492:2010 [6]. U svakoj od tačaka je obavljeno kratkotrajno merenje nivoa polja, od strane tehničkog osoblja koje je rukovalo mernim instrumentom. Pri tome, merna sonda je bila postavljena na visinu od 1,1 metar iznad zemlje (visina ljudskog abdomena), dok je njena udaljenost od osobe koja je vršila merenje iznosila 0,5 metara, u skladu sa standardom SRPS EN 50492:2010 [6]. Merenja su bila izvršena tako što se rukovalac instrumentom pozicionira iznad odgovarajuće merne tačke, postavi mernu sondu na visinu od 1,1 metra, obavi merenje, a nakon toga se pomeri u sledeću mernu tačku i ponovi postupak merenja. Kratke pauze između merenja u susednim tačkama su bile neophodne kako bi se umanjio efekat dinamičke elektromagnetske indukcije.

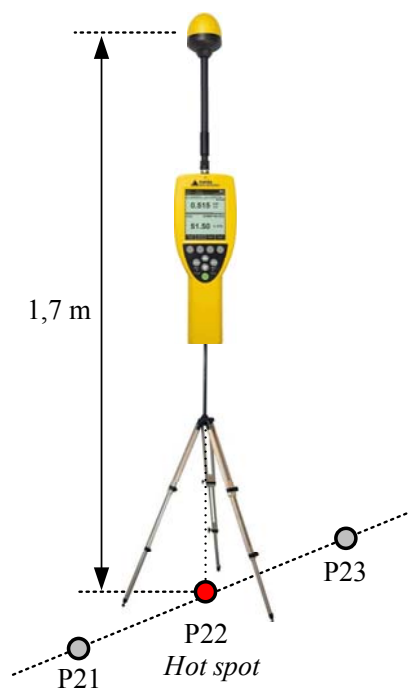
Ovaj deo merenja je sproveden kako bi se odredila prostorna raspodela električnog polja na datoj lokaciji, u skladu sa zahtevima standarda SRPS EN 50413:2010 [7]. Dodatno, cilj je bio i da se odredi lokalna tačka sa najvećom vrednošću nivoa električnog polja, takozvana “*hot spot*” tačka, kako definiše standard SRPS EN 50492:2010 [6].

U drugom koraku definisane merne procedure je izvršeno merenje nivoa električnog polja na tri visine (1,1, 1,5 i 1,7 metara) u “*hot spot*” tački, kako bi se obavilo usrednjavanje po visini, odnosno kako bi se, prema preporuci standarda SRPS EN 50492:2010 [6], omogućila procena potencijalne izloženosti čoveka koji može provesti duži period vremena na tom mestu. Merenje nivoa električnog polja na tri visine, za lokaciju broj 6, je prikazano na slici 31.



Slika 31. Merenja nivoa električnog polja na tri visine.

Treći korak merne procedure predstavlja kontinualni širokopoljasni monitoring nivoa električnog polja u “*hot spot*” tački. Ovaj deo merenja je obavljen postavljanjem merne opreme na drveni tronožac, pri čemu je sonda bila postavljena na visini od 1,7 metara, kao što je prikazano na slici 32.



Slika 32. Kontinualni monitoring nivoa električnog polja u “*hot spot*” tački.

Visina od 1,7 metara predstavlja prosečnu visinu čoveka, a cilj ispitivanja je bio da se obavi monitoring nivoa električnog polja na visini čovekove glave, kao veoma osetljive pozicije ljudskog tela. Pri tome, merni instrument je bio podešen da radi u “*timer logging*” modu [20], a merenja i beleženje rezultata su bili obavljani automatski, bez intervencije tehničkog osoblja tokom trajanja monitoringa. Korišćeno je šestominutno usrednjavanje izmerenih vrednosti, u skladu sa preporukama standarda [8], [23], [25]. Prikaz postavke mernog instrumenta Narda NBM 550 na lokaciji broj 6 dat je na slici 33.



Slika 33. Postavka mernog instrumenta Narda NBM 550 na lokaciji broj 6.

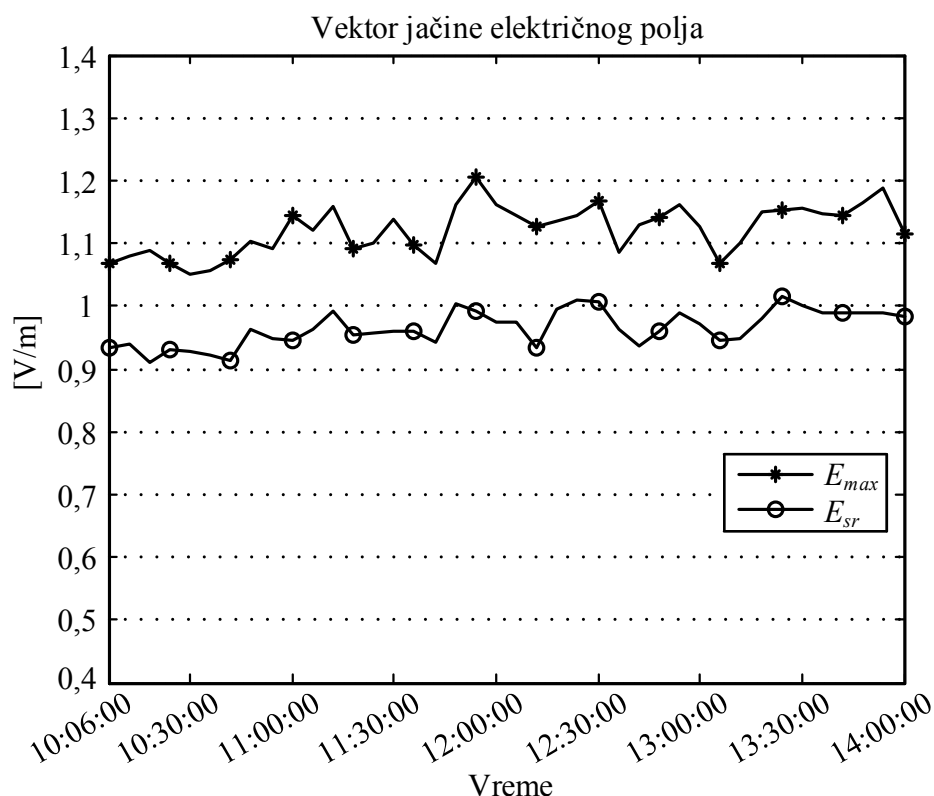
Nažalost, jasno je da ovaj četvoročasovni vremenski period, u kome su obavljena merenja, nije sasvim dovoljan kako bi se obavila opsežna analiza i kako bi se dobile informacije o dugoročnim promenama nivoa električnog polja, na datim lokacijama. Međutim za potrebe istraživanja ove disertacije i verifikaciju predloženog metoda procene izloženosti, izabrani vremenski period se može smatrati prihvatljivim.

4.2.2 Rezultati širokopojasnog monitoringa nivoa električnog polja

U nastavku teksta će biti prikazani rezultati ponovljenog merenja nivoa električnog polja na lokaciji broj 6. Ponovljeno merenje je obavljeno u junu 2013. godine, uz upotrebu iste merne opreme, kao i u mernoj kampanji sprovedenoj 2012. godine. Dodatno, prva dva koraka

merne procedure su preskočena i odmah se prešlo na četvoročasovni širokopojasni monitoring nivoa električnog polja, u istoj “*hot spot*” tački date lokacije, određene prilikom prvog merenja.

Monitoring nivoa električnog polja je opet izvršen u vremenskom intervalu od 10:00 do 14:00 časova, kako se ne bi remetila ponovljivost merenja. Ponovo je korišćen protokol šestominutnog usrednjavanja, pri čemu su dobijeni rezultati prikazani na slici 34.



Slika 34. Širokopojasni kontinualni monitoring nivoa električnog polja na lokaciji broj 6.

Krive prikazane na slici 34 opisuju četvoročasovne promene maksimalnih, E_{max} , i srednjih vrednosti nivoa električnog polja, E_{sr} , dobijenih usrednjavanjem u intervalu od šest minuta. Statistička analiza mernih vrednosti, predstavljenih na slici 34, je data u tabeli 9.

| | Minimum | Srednja vrednost | Maksimum | Standardna devijacija [%] |
|-----------------|----------|------------------|----------|---------------------------|
| E_{sr} [V/m] | 0,909805 | 0,964441 | 1,014050 | 2,874775 |
| E_{max} [V/m] | 1,050827 | 1,122326 | 1,206965 | 3,972119 |

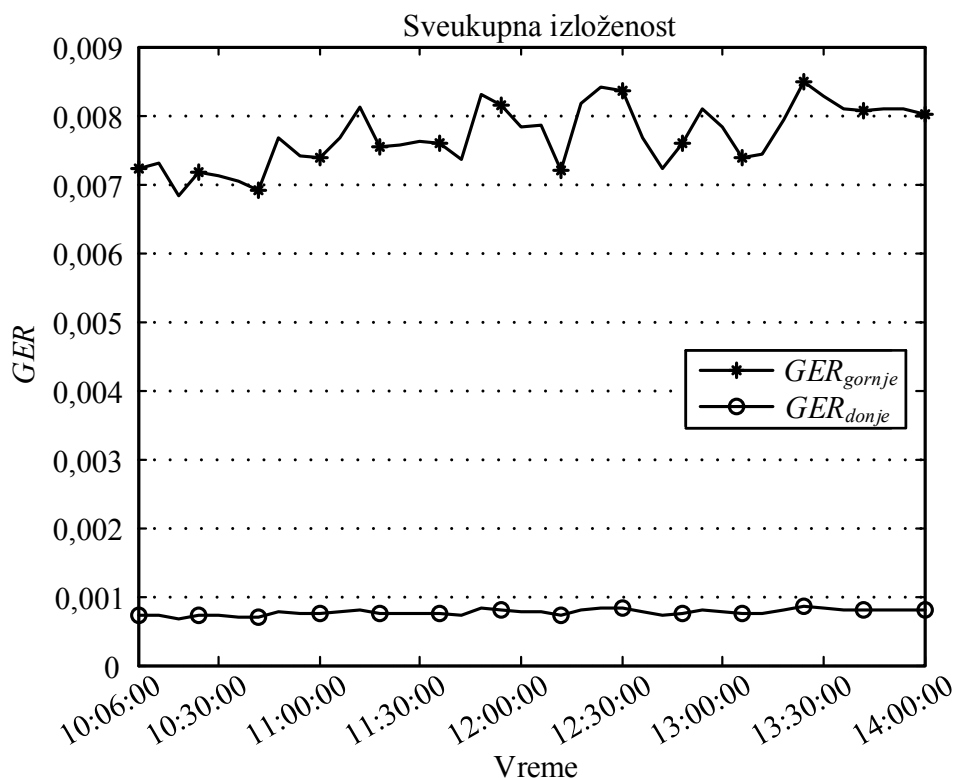
Tabela 9. Statistička analiza rezultata širokopojasnog monitoringa nivoa električnog polja.

Iako je izabrana lokacija broj 6, lokacija sa najvećim vrednostima nivoa električnog polja od svih deset analiziranih u okviru kampusa, merni rezultati iz tabele 9 pokazuju da su te vrednosti relativno male u odnosu na propisane referentne granične nivoe [10]. Dodatno, mala standardna devijacija tih vrednosti, i to u periodu dana kada je velika frekvencija ljudi, sugerirše da je na datoj lokaciji prisutna relativno ravnomerna promena nivoa električnog polja. Slični zaključci su prethodno dobijeni i za svih deset lokacija, analizirajući rezultate sprovedene merne kampanje [88], što ukazuje na činjenicu da oblast kampusa predstavlja zonu sa sporom promenom nivoa električnog polja.

4.2.3 Proračun inicijalnih granica izloženosti električnom polju

Kako bi se dobila jasna slika o potencijalnoj izloženosti ljudi na mernoj lokaciji broj 6, izvršen je proračun inicijalnih granica izloženosti, primenom izraza (3). Na osnovu rezultata monitoringa, srednje vrednosti nivoa električnog polja, E_{sr} , korišćene su kao E_m u izrazu (3), u skladu sa standardima SRPS EN 50492:2010 i SRPS EN 50413:2010 [6], [7].

Pri tome su, na osnovu frekvencijskog opsega korišćene širokopoljasne sonde (od 100 kHz do 6 GHz), datog u tabeli 8, inicijalno izabrani minimalni i maksimalni referentni granični nivoui sledećih vrednosti: $E_{ref\ min} = 11\ \text{V/m}$ i $E_{ref\ max} = 34,8\ \text{V/m}$ [10]. Prikaz promene inicijalnih granica izloženosti električnom polju, u toku perioda od četiri časa, je dat na slici 35.



Slika 35. Inicijalne granice izloženosti električnom polju na mernoj lokaciji broj 6.

Na osnovu rezultata proračuna inicijalnih granica izloženosti, obavljena je njihova kratka statistička analiza, pri čemu su rezultati predstavljeni u tabeli 10.

| | Minimum | Srednja vrednost | Maksimum | Standardna devijacija [%] |
|----------------|----------|------------------|----------|---------------------------|
| GER_{donje} | 0,000683 | 0,000769 | 0,000849 | 0,004567 |
| GER_{gornje} | 0,006841 | 0,007693 | 0,008498 | 0,045707 |

Tabela 10. Statistička analiza inicijalnih granica izloženosti električnom polju.

Na osnovu prikazanih podataka se može zaključiti da stvarna izloženost, tokom četiri časa monitoringa, ima vrednosti koje se u opsegu od $GER_{donje}^{min} = 0,000683$ do $GER_{gornje}^{max} = 0,008498$. Te vrednosti su par stotina puta manje od dozvoljene granice $GER_{dozvoljeno} = 1$, propisane nacionalnim i međunarodnim pravilnikom [10], [23]. Ova činjenica sugerise da se data lokacija može smatrati lokacijom sa niskim nivoom izloženosti električnom polju visokih frekvencija.

Međutim, važno je primetiti da je izbor referentnih graničnih nivoa, za dati frekvencijski opseg sonde, praktično već razmatran, s obzirom da su izabrane referentne granične vrednosti najveća i najmanja moguća iz čitavog opsega, propisanog nacionalnim pravilnikom [10]. Stoga se između granica izloženosti, prikazanih na slici 35, javlja i pomenuta relativna razlika od 90%. Kako je cilj smanjenje ove razlike, nakon završenog monitoringa obavljena je i frekvencijski selektivna analiza spektralnog sadržaja polja.

4.2.4 Frekvencijski selektivno merenje nivoa električnog polja

U cilju određivanja spektralnog sadržaja električnog polja na mernoj lokaciji, izvršeno je frekvencijski selektivno merenje nivoa polja upotrebom analizatora spektra FSH3, prikazanog na slici 2b. Pri tome je korišćena selektivna merna sonda RSEMF30-26-04-08, čiji su osnovni parametri dati u tabeli 11 [92].

| Parametar | Frekvencijski opseg | Opseg merenja | Frekvencijska rezolucija |
|-----------|---------------------|------------------|--------------------------|
| Vrednost | 30 MHz – 3 GHz | 1 mV/m – 100 V/m | 1 Hz |

Tabela 11. Parametri selektivne merne sonde RSEMF30-26-04-08 [92].

Ova faza merenja je sprovedena odmah nakon širokopojasnog merenja i trajala je svega nekoliko minuta (od 14:25 do 14:36), potrebnih instrumentu da obavi analizu prisutnog spek-

tra. Merna oprema je bila postavljena u “*hot spot*” tački merne lokacije broj 6, kao što je prikazano na slici 36.



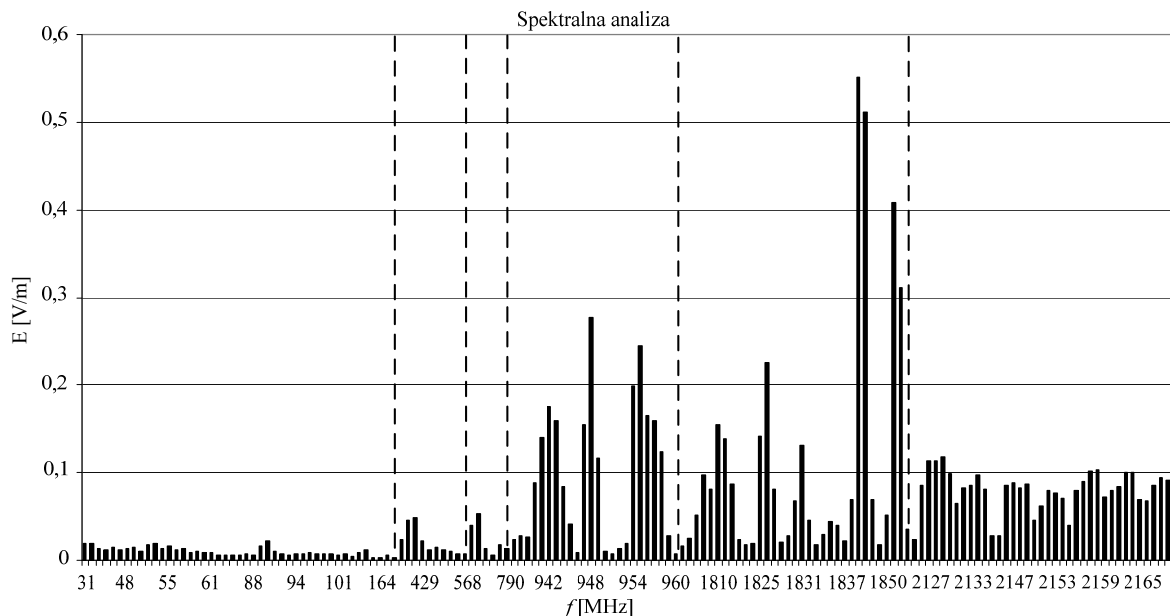
Slika 36. Postavka analizatora spektra FSH3 na lokaciji broj 6.

Tokom merenja, instrument je bio podešen da radi u “*Auto Sweep Time*” režimu, sa osnovnim parametrima datim u tabeli 12.

| Parametar | Trace mode/Detector | Res BW/video BW/Span | Ref level | Dwell Time |
|-----------|---------------------|-----------------------|---------------|------------|
| Vrednost | Max hold/RMS | 1000 kHz/auto/150 MHz | 91 dB μ V | 250 ms |

Tabela 12. Parametri “*Auto Sweep Time*” režima rada analizatora spektra FSH3 [92].

Spektralni sadržaj električnog polja dobijen je obradom rezultata pomoću softverskog alata R&S RFEX v6.1.34, koji je sastavni deo kompleta korišćenog analizatora FSH3. Na taj način su dobijene vrednosti nivoa električnog polja na svakoj od frekvencija ponaosob, u okviru frekvencijskog opsega korišćene merne sonde. Izgled spektra električnog polja na mernoj lokaciji broj 6 je prikazan na slici 37.



Slika 37. Spektralni sadržaj električnog polja na mernoj lokaciji broj 6.

Rezultati sa slike 37 sugerišu postojanje komponenti električnog polja u nekoliko različitih frekvencijskih podopsega, rezervisanih za rad različitih izvora polja. Može se primetiti da se najveći intenziteti vektora jačine električnog polja javljaju na frekvencijama koje su rezervisane za rad GSM 900 i GSM 1800 telekomunikacionih servisa. Na taj način je potvrđena pretpostavka o dominantnom uticaju antena ovih servisa na mernoj lokaciji broj 6.

Dodatno, spektralna analiza pokazuje prisustvo nekih drugih izvora električnog polja, koji prvobitno nisu bili vizuelno detektovani u okolini merne lokacije. Te izvore predstavljaju sistemi za radio i TV difuziju i UMTS 2100 telekomunikacioni servis. Njihovo prisustvo je i očekivano, s obzirom na zahteve i potrebe studentske populacije koji veliki deo svog vremena provodi u kampusu.

Prekidi koje se mogu uočiti na frekvencijskoj skali sa slike 37, obeleženi vertikalnim isprekidanim linijama, su posledica činjenice da su u pojedinim frekvencijskim podopsezima nivoi električnog polja ispod praga detekcije korišćenog mernog instrumenta. Dodatno, prekidi mogu biti posledica i toga što na pojedinim frekvencijama jednostavno ne postoje izvori koji emituju električno polje. Podopsezi u kojima nema prisutnih komponenti električnog polja su sledeći: 172 MHz – 426 MHz, 568 MHz – 783 MHz, 790 MHz – 937 MHz, 960 MHz – 1805 MHz i podopseg 1853 MHz – 2125 MHz.

Treba naglasiti da je frekvencijski opseg merne sonde RSEMF30-26-04-08 (od 30 MHz do 3 GHz) nešto uži od opsega širokopoljasne sonde Narda EF 0691 (od 100 kHz do 6 GHz), koja je korišćena prilikom širokopoljasnog monitoringa nivoa polja. Zbog ograničenja u pogle-

du tehničkih karakteristika merne sonde RSEMF30-26-04-08, bila je onemogućena potpuna i detaljna analiza spektralnog sadržaja polja do granice od 6 GHz, na lokaciji broj 6.

Međutim, prvobitno obavljena vizuelna analiza lokacije broj 6 je rezultovala pretpostavkom da su antene GSM 900 i GSM 1800 baznih stanica dominantni izvori EM zračenja na njoj. Ova pretpostavka je donekle bila opravdanje za obavljanje spektralne analize u frekvencijskom opsegu od 30 MHz do 3 GHz, smatrajući ga odgovarajućim za dobijanje informacija o prisutnom spektru.

Pored toga, spektralni sadržaj električnog polja, prikazan na slici 37, kao i izvedeni zaključci o postojanju i doprinosu pojedinih izvora polja, su dodatno potvrdili dominantni doprinos telekomunikacionih servisa (GSM 900, GSM 1800 i UMTS 2100) ukupnom polju. Na taj način je još jednom opravdana činjenica obavljanja frekvencijski selektivnog merenja u nešto užem opsegu od opsega u kom je izvršeno širokopojasno merenje. Međutim, ovo nikako ne umanjuje svrhu predloženog metoda i ne ograničava njegovu primenu.

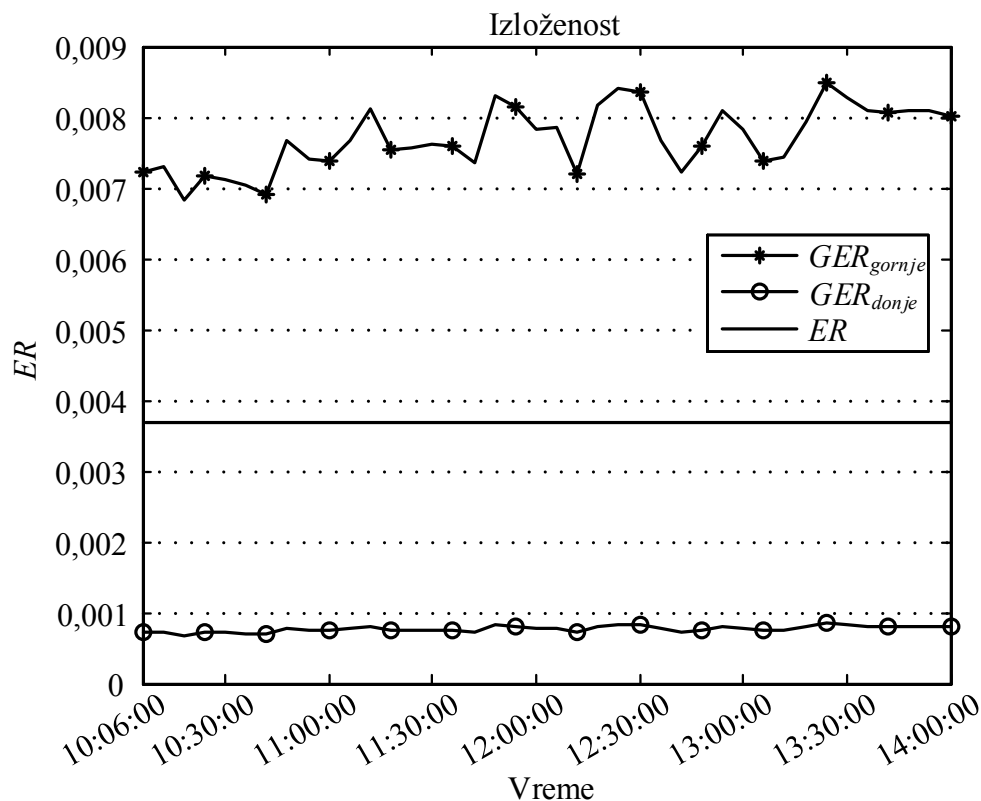
4.2.5 Procena stvarne izloženosti električnom polju

Primarna upotreba frekvencijski selektivnog mernog pristupa, u okviru predloženog metoda procene izloženosti, vezana je pre svega za prikupljanje informacija o spektralnog sadržaju električnog polja, kako bi se obavilo adekvatno prilagođenje inicijalnih granica izloženosti. Međutim, na osnovu rezultata frekvencijski selektivnog merenja nivoa električnog polja moguće je odrediti i stvarnu izloženost, prema preporuci ICNIRP-a i nacionalnog pravilnika. U tom slučaju, primenom izraza (1), se dobija da je stvarna izloženost, ER (*Exposure ratio*), električnom polju na mernoj lokaciji broj 6 jednaka:

$$ER = \sum_{i>30MHz}^{3GHz} \left(\frac{E_m^i}{E_{Li}} \right)^2 = 0,003697, \quad (9)$$

pri čemu E_m^i predstavlja intenzitet vektora jačine električnog polja, a E_{Li} referentni granični nivo vektora jačine električnog polja, na frekvenciji i , u granicama frekvencijskog opsega korišćene selektivne merne sonde, a u skladu sa nacionalnim pravilnikom [10].

Rezultat proračuna stvarne izloženosti, kao i poređenje dobijene vrednosti sa inicijalnim granicama izloženosti su prikazani na slici 38.



Slika 38. Dva pristupa procene izloženosti električnom polju na mernoj lokaciji broj 6.

Stvarna izloženost sa slike 38 se može samo uslovno tako nazvati, jer kao što se vidi ona ima konstantnu vrednost tokom intervala vremena od četiri časa. Ova konstatacija naravno nije tačna, pre svega zbog činjenice da je selektivno merenje nivoa polja trajalo svega jedanaest minuta, te se dobijeni rezultati ne mogu smatrati potpuno validnim za period četvorčasovnog monitoringa.

Ipak, cilj ove kratke analize je bio da se obavi poređenje rezultata procene izloženosti dobijene primenom ova dva različita pristupa merenja. Za neku detaljniju analizu i poređenje, neophodno bi bilo sprovesti istovremeni kontinualni monitoring, primenom oba merna pristupa. S obzirom na kompleksnost obrade rezultata kod frekvencijski selektivnih merenja, tako nešto se uglavnom nije radilo.

Rezultati pokazuju da se vrednost stvarne izloženosti $ER = 0,003697$ nalazi između inicijalnih granica izloženosti, u datom vremenskom periodu. Pri tome je relativna razlika između srednje vrednosti gornje granice izloženosti, GER_{gornje}^{sr} (date u tabeli 10), i stvarne izloženosti 51,99%, dok je relativna razlika između stvarne izloženosti i srednje vrednosti donje granice izloženosti, GER_{donje}^{sr} , jednaka 79,17%. Ove vrednosti ukazuju na činjenicu da postoji opravdan razlog za unapređenje metoda procene izloženosti baziranog na granicama izloženo-

sti, kroz međusobno približavanje inicijalnih granica i suženje opsega u kome se stvarna izloženost nalazi.

4.2.6 Procena maksimalne izloženosti baznim stanicama

Još jedan od pristupa procene izloženosti je već razmatran u okviru drugog poglavlja, kada je bilo reči o proceni maksimalne izloženosti [7], sa akcentom na slučaj baznih stanica mobilne telefonije kao izvora polja [6]. S obzirom da je na mernoj lokaciji broj 6 potvrđeno dominantno prisustvo komponenti polja od okolnih baznih stanica (GSM 900, GSM 1800 i UMTS 2100), u nastavku su dati rezultati proračuna maksimalne izloženosti njima, za slučaj kada su svi kanali aktivni, u skladu sa standardom SRPS EN 50413:2010 [7].

Da bi se odredila vrednost maksimalne izloženosti, ER_{max} , neophodno je prvo odrediti frekvenciju nosioca signala za svaki od tri telekomunikaciona servisa, zatim intenzitet vektora jačine električnog polja, $E_{nosioca}$, kao i vrednost referentnog graničnog nivoa, $E_{ref\ nosioca}$, na toj frekvenciji. Na osnovu toga, prema standardu SRPS EN 50492:2010 [6], procena maksimalne izloženosti se vrši primenom izraza:

$$ER_{max} = \left(\frac{E_{max}}{E_{ref\ nosioca}} \right)^2, \quad (10)$$

pri čemu se, u slučaju GSM 900 i GSM 1800 telekomunikacionih servisa, maksimalno očekivani intenzitet vektora jačine električnog polja, E_{max} , dobija kao:

$$E_{max} = \sqrt{n_{kanala}} \cdot E_{nosioca}, \quad (11)$$

dok se u slučaju UMTS 2100 telekomunikacionog servisa E_{max} dobija kao:

$$E_{max} = \sqrt{\eta_{cpich}} \cdot E_{nosioca}. \quad (12)$$

Parametar n_{kanala} predstavlja broj kanala date GSM bazne stanice, dok parametar η_{cpich} predstavlja odnos između maksimalno moguće snage zračenja antene bazne stanice i snage dodeljene "Common Pilot Channel – CPICH" kanalu UMTS 2100 telekomunikacionog servisa [6]. Parametar η_{cpich} zavisi od kapaciteta bazne stanice, definiše ga mobilni operater i može biti komercijalno poverljiv i dostupan zainteresovanim licima. Njegova vrednost se izražava u procentima, i generalno je u opsegu od 4% do 10% [6]. U okviru ovog istraživanja, uzeta je najveća vrednost od 10%, kako bi se odredila maksimalno moguća izloženost.

Vrednosti svih prethodno pomenutih parametara i rezultati proračuna maksimalne izloženosti baznim stanicama mobilne telefonije dati su u tabeli 13.

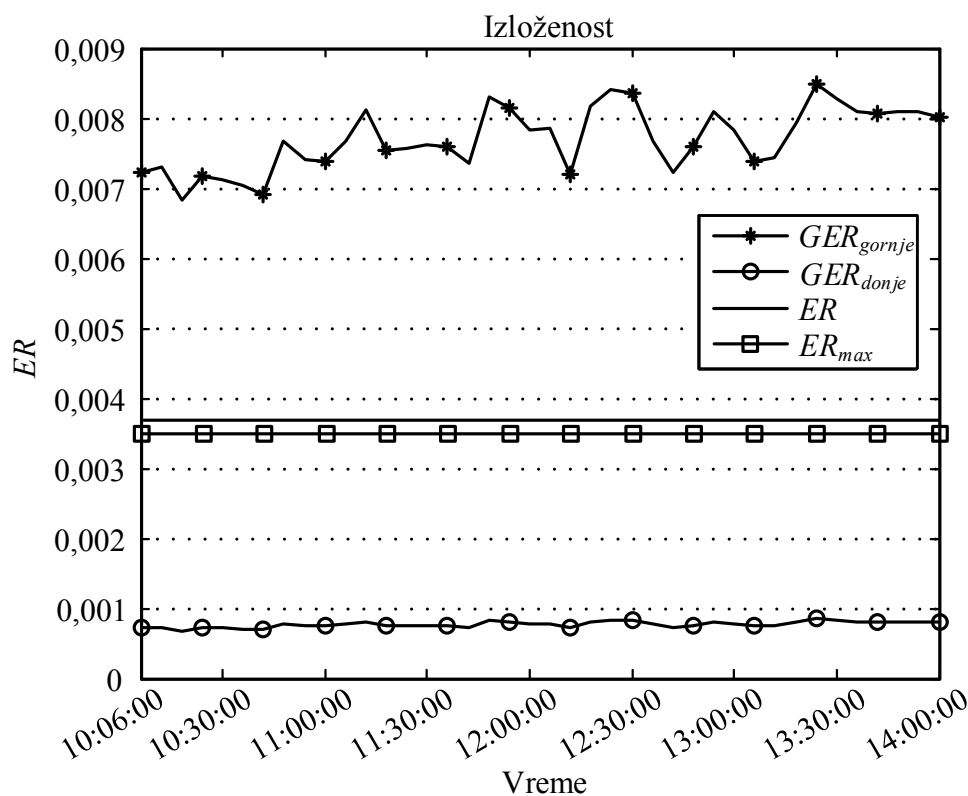
| Servis | GSM 900 | GSM 1800 | UMTS 2100 |
|------------------------|----------|----------|-----------|
| n_{kanala} | 4 | 4 | - |
| Frekvencija nosioca | 948 MHz | 1842 MHz | 2129 MHz |
| $E_{nosioca}$ [V/m] | 0,276763 | 0,551795 | 0,117707 |
| E_{max} [V/m] | 0,553525 | 1,103591 | 0,372224 |
| $E_{refnosioca}$ [V/m] | 16,934 | 23,605 | 24,4 |
| ER_{max} | 0,001068 | 0,002186 | 0,000233 |

Tabela 13. Maksimalna izloženost baznim stanicama mobilne telefonije.

Ukupna maksimalna izloženost servisima mobilne telefonije na mernoj lokaciji broj 6, se dobija sabiranjem vrednosti za pojedine servise i iznosi:

$$ER_{max} = ER_{max}^{GSM900} + ER_{max}^{GSM1800} + ER_{max}^{UMTS2100} = 0,003487, \quad (13)$$

pri čemu je predstavljena na slici 39, uz poređenje sa inicijalnim granicama izloženosti.



Slika 39. Maksimalna moguća izloženost baznim stanicama u blizini merne lokacije broj 6, u poređenju sa inicijalnim granicama izloženosti.

Naravno, maksimalna izloženost se ne može smatrati konstatnom u nekom dužem vremenskom intervalu (kao što je to predstavljeno na slici 39), s obzirom na jako malu moguć-

nost da bazne stanice budu maksimalno opterećene tokom tog, a i bilo kog drugog dužeg vremenskog intervala. U svakom slučaju, poređenjem maksimalne izloženosti baznim stanicama, ER_{max} , i stvarne izloženosti od svih okolnih izvora, ER , se može primetiti da postoji jako mala relativna razlika između ove dve vrednosti. Ova razlika iznosi svega 5,69% i potvrđuje dominantni doprinos telekomunikacionih servisa mobilne telefonije ukupnom električnom polju na mernoj lokaciji.

Dodatno, relativna razlika između srednje vrednosti gornje granice, GER_{gornje}^{sr} (date u tabeli 10), i maksimalne izloženosti, ER_{max} , iznosi 54,72%, dok je relativna razlika između maksimalne izloženosti, ER_{max} , i srednje vrednosti donje granice izloženosti, GER_{donje}^{sr} , jednaka 77,93%. Ponovo, ove vrednosti ukazuju na činjenicu da bi se smanjenjem razlike između inicijalnih granica izloženosti mogla ostvariti dosta preciznija procena opsega u kome se stvarna izloženost nalazi.

4.2.7 Prilagođenje inicijalnih granica izloženosti električnom polju

Analiza spektralnog sadržaja električnog polja na mernoj lokaciji je pokazala da postoje pojedini delovi spektra, u kojima nema emisije polja, čime se oni mogu praktično odbaciti i time suziti frekvencijski opseg u kom se određuju adekvatni referentni granični nivoi. Na taj način je primenom izraza (6), moguće odrediti nove granice izloženosti, adekvatno prilagođene spektralnog sadržaju električnog polja na mernoj lokaciji broj 6.

Na osnovu izgleda spektra, prikazanog na slici 37, zaključak je da se inicijalno posmatrani frekvencijski opseg merne sonde (od 100 kHz do 6 GHz) može suziti na opseg od 30 MHz do 2,2 GHz, s obzirom da nema komponenti električnog polja izvan ovog opsega. Dodatno, najveći doprinos ukupnom električnom polju, na datoj lokaciji, imaju sistemi za mobilne komunikacije (GSM 900, GSM 1800 i UMTS 2100), dok je doprinos ostalih izvora dosta manji. To se pre svega odnosi na komponente polja na frekvencijama rezervisanim za radio i TV emisiju, čiji je doprinos ukupnom polju svega 3,05%, kao što je prikazano u tabeli 14.

| Servis | Radio/TV | GSM 900 | GSM 1800 | UMTS 2100 |
|---|----------|-----------|-------------|-------------|
| Frekvencijski opseg [MHz] | 30 – 800 | 925 – 960 | 1805 – 1880 | 2110 – 2200 |
| $ER^{servisa}$ | 0,000113 | 0,001313 | 0,001837 | 0,000434 |
| $ER^{servisa}/ER$ [%] | 3,05 | 35,51 | 49,68 | 11,75 |
| $ER = 0,003697$ je stvarna izloženost na mernoj lokaciji broj 6 | | | | |

Tabela 14. Procentualni doprinosi pojedinih izvora stvarnoj izloženosti.

Zanemarivanjem doprinosa sistema za radio i TV difuziju se može izvršiti dodatno suženje inicijalnog frekvencijskog opsega na opseg od 925 MHz do 2,2 GHz, te se analiza procene i prilagođenja granica izloženosti može sprovesti posmatrajući tri slučaja:

- Slučaj *A* – procena izloženosti na osnovu kontinualnog monitoringa u inicijalnom širokopojasnom frekvencijskom opsegu merne sonde (100 kHz – 6 GHz),
- Slučaj *B* – procena izloženosti na osnovu suženja inicijalnog frekvencijskog opsega na opseg od 30 MHz do 2,2 GHz, i
- Slučaj *C* – procena izloženosti na osnovu zanemarivanja doprinosa onog dela spektra rezervisanog za radio i TV difuziju, i dodatnog suženja na opseg od 925 MHz do 2,2 GHz.

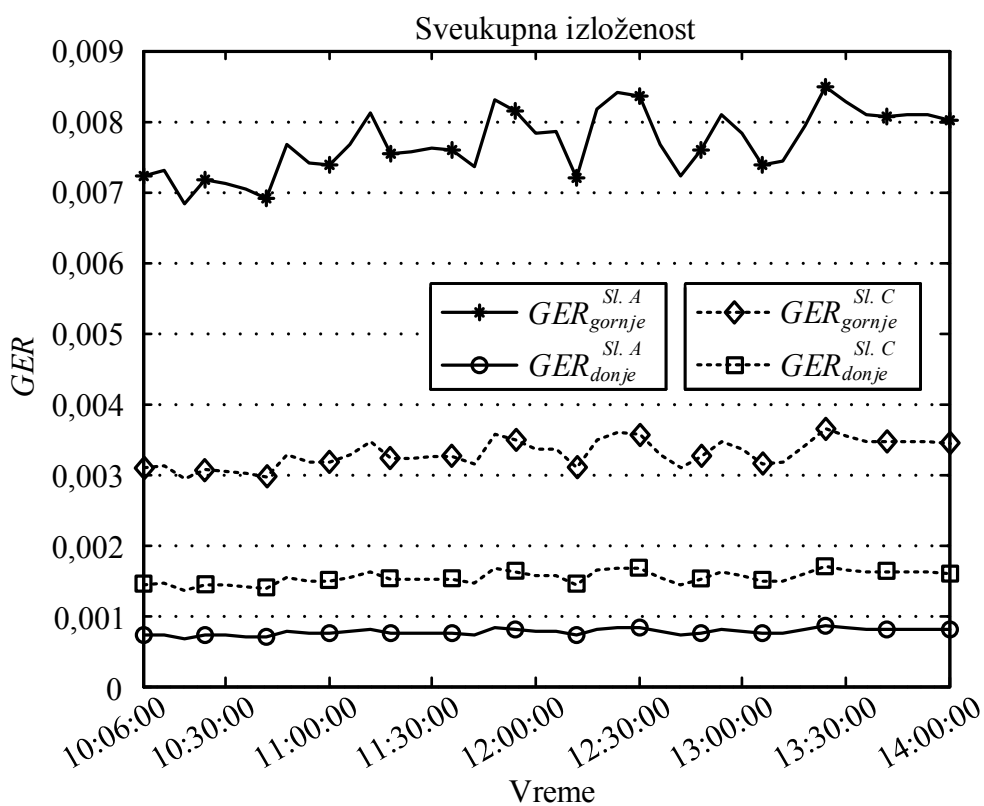
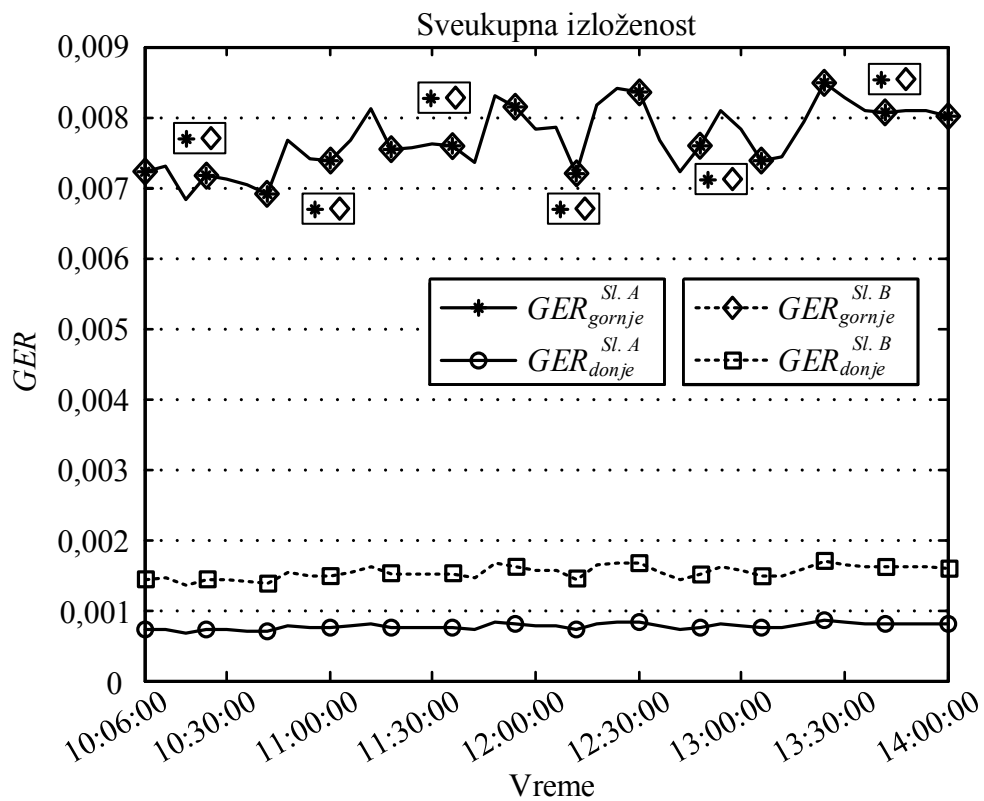
Veoma je važno naglasiti da je ovakav postupak sužavanja posmatranog frekvencijskog opsega isključivo vezan za datu mernu lokaciju. Na bilo kojoj drugoj lokaciji, gde različiti izvori električnog polja mogu biti prisutni i dominantni, zanemarivanje komponenti polja u bilo kom delu spektra ne može da se obavi bez valjanog razloga za tako nešto, odnosno bez obavljanja vizuelne inspekcije date lokacije i frekvencijski selektivne analize sadržaja polja.

Izbor referentnih graničnih nivoa, $E_{ref\ min}$ i $E_{ref\ max}$, kao i vrednost relativne razlike između granica izloženosti, za sva tri analizirana slučaja su dati u tabeli 15.

| Slučaj | <i>A</i> | <i>B</i> | <i>C</i> |
|---------------------------|------------|-----------|------------|
| Frekvencijski opseg [MHz] | 0,1 – 6000 | 30 – 2200 | 925 – 2200 |
| $E_{ref\ min}$ [V/m] | 11 | 11 | 16,728 |
| $E_{ref\ max}$ [V/m] | 34,8 | 24,597 | 24,597 |
| δ [%] | 90 | 80 | 53,75 |

Tabela 15. Relativna razlika između inicijalnih i prilagođenih granica izloženosti.

Promena u izboru referentnih graničnih nivoa, nakon sužavanja frekvencijskog opsega, dovodi do prilagođavanja granica izloženosti, kao i određenog smanjenja relativne razlike između njih. Mala promena relativne razlike, od 10%, se uočava u slučaju *B*, dok je u slučaju *C* ta promena izraženija, s obzirom da je razlika smanjena za 36,25%. Prilagođenje granica izloženosti za oba ova slučaja, kao i njihovo poređenje sa inicijalnim granicama (procenjenim u slučaju *A*), su prikazani na slici 40.



Slika 40. Prilagođenje granica izloženosti električnom polju na mernoj lokaciji broj 6, u slučajevima B (a) i C (b).

Analizirajući slučaj *B*, sa slike 40a, može se videti da nema promene gornje granice izloženosti, $GER_{gornje}^{Sl. B}$, u odnosu na inicijalnu $GER_{gornje}^{Sl. A}$, dok se donja granica, $GER_{donje}^{Sl. B}$, neznatno povećala u odnosu na inicijalnu $GER_{donje}^{Sl. A}$, što za posledicu daje malo suženje opsega u kome se nalazi stvarna izloženost. Međutim, do znatno većeg suženja tog opsega dolazi u slučaju *C* (slika 40b), gde su granice izloženosti $GER_{donje}^{Sl. C}$ i $GER_{gornje}^{Sl. C}$ mnogo više približene jedna drugoj, čime je u velikoj meri povećana preciznost same procene izloženosti. Statistička analiza promene granica izloženosti, nakon njihovog prilagođavanja spektralnom sadržaju električnog polja je data u tabeli 16.

| | | Minimum | Srednja vrednost | Maksimum | Standardna devijacija [%] |
|-----------------|----------------|----------|------------------|----------|---------------------------|
| Slučaj <i>B</i> | GER_{donje} | 0,001368 | 0,001540 | 0,001699 | 0,008855 |
| | GER_{gornje} | 0,006841 | 0,007693 | 0,008498 | 0,045707 |
| Slučaj <i>C</i> | GER_{donje} | 0,001368 | 0,001540 | 0,001699 | 0,008855 |
| | GER_{gornje} | 0,002958 | 0,003330 | 0,003675 | 0,019145 |

Tabela 16. Statistička analiza prilagođenih granica izloženosti električnom polju.

Odnosi između srednjih vrednosti prilagođenih granica izloženosti (slučajevi *B* i *C*) i srednjih vrednosti inicijalnih granica izloženosti (slučaj *A*), su dati u tabeli 17.

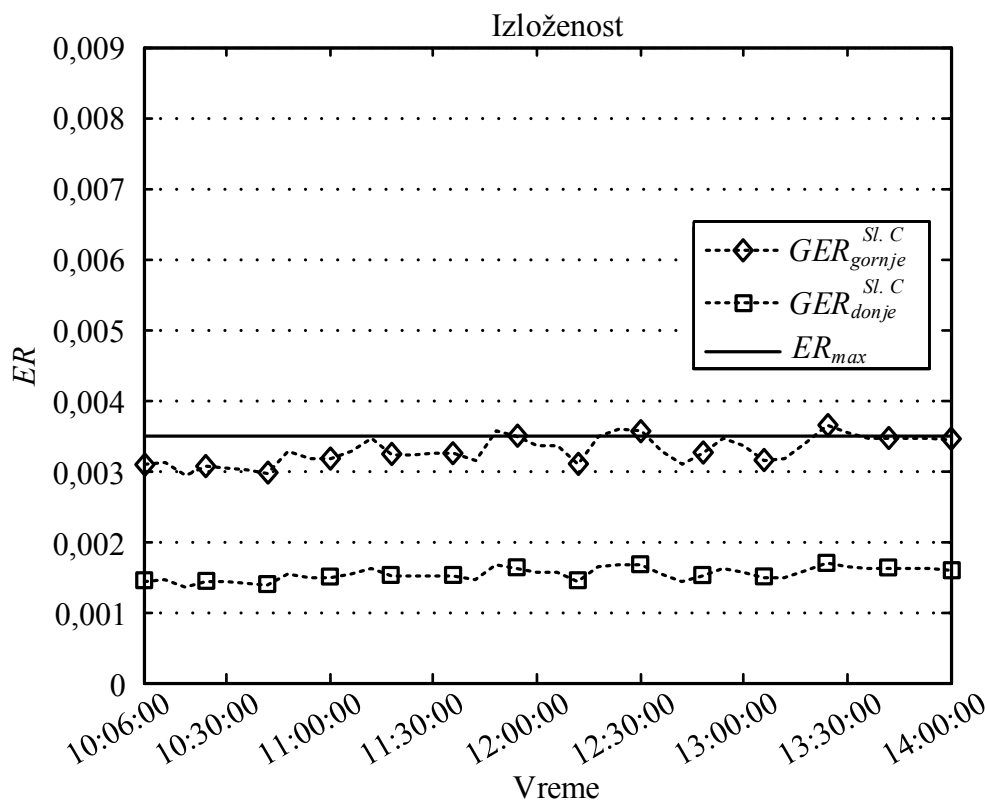
| Slučaj | <i>B</i> | <i>C</i> |
|---|-----------|------------|
| Frekvencijski opseg [MHz] | 30 – 2200 | 925 – 2200 |
| $GER_{gornje}^{prilag.}/GER_{gornje}^{Sl. A}$ [%] | 100 | 43,24 |
| $GER_{donje}^{Sl. A}/GER_{donje}^{prilag.}$ [%] | 49,96 | 49,96 |

Tabela 17. Odnosi srednjih vrednosti prilagođenih i inicijalnih granica izloženosti polju.

Može se primetiti da je u ovom konkretnom slučaju postignuto smanjenje odnosa srednjih vrednosti prilagođenih i inicijalnih granica od oko 50%. Dobijeno smanjenje je značajno i na dobar način potvrđuje validnost predloženog metoda baziranog na adaptivnim granicama izloženosti.

Konačno, na osnovu rezultata prilagođavanja granica izloženosti, predstavljenih na slici 40 i u tabelama 15, 16 i 17, može se zaključiti da primena metoda procene izloženosti baziranog na adaptivnim granicama omogućuje određeno poboljšanje preciznosti same procene opsega u kom se realna izloženost nalazi.

Poređenje maksimalne moguće izloženosti baznim stanicama u blizini merne lokacije broj 6, sa prilagođenim granicama izloženosti, u slučaju C, prikazano je na slici 41.



Slika 41. Maksimalna moguća izloženost baznim stanicama u blizini merne lokacije broj 6, u poređenju sa prilagođenim granicama izloženosti.

Sa slike 41 se može uočiti da se vrednost maksimalne izloženosti baznim stanicama mobilne telefonije, $ER_{max} = 0,003487$, ne nalazi u opsegu između granica izloženosti. Ova vrednost je skoro jednaka sa maksimalnom vrednošću gornje prilagođene granice, $GER_{gornje}^{Sl. C max} = 0,003675$. Ovakav rezultat je praktično i očekivan, iz više razloga.

Prvo, frekvencijski selektivno merenje nivoa električnog polja je obavljeno u kratkom intervalu vremena od svega nekoliko minuta, i to nakon završetka četvoročasovnog širokopojasnog monitoringa. Stoga je moguće da je došlo do manjih izmena u spektru, u smislu promene vrednosti nivoa polja na pojedinim frekvencijama.

Takođe, proračun maksimalne izloženosti baznim stanicama podrazumeva procenu njihove maksimalne opterećenosti (η_{cpich}) i rad punim kapacitetom, za šta su šanse veoma male, pogotovo ako se takav režim rada smatra konstantnim u nekom dužem intervalu vremena. U okviru ovog istraživanja je uzeta najveća moguća vrednost parametra η_{cpich} od 10%, što je sigurno doprinelo datom odnosu gornje granice izloženosti i maksimalne izloženosti baznim stanicama.

5 Primena predloženog metoda procene izloženosti u opsegu niskih frekvencija

U današnje vreme je prisutan sve veći broj izvora nejonizujućeg zračenja. Posebno interesantni izvori jesu visokonaponski vodovi (dalekovodi) i distributivne trafostanice. Oni su sastavni deo bilo koje distributivne mreže i prenos električne energije na veće udaljenosti se ne može zamisliti bez njih.

Nažalost, čest je slučaj da se ovi izvori nalaze u stambenim delovima naseljenih mesta ili u njihovoj neposrednoj blizini. Uzimajući u obzir i neizbežno prisustvo kućnih instalacija, kao i raznih električnih uređaja, u ljudskom okruženju, jasno je da opšta populacija može biti izložena različitim nivoima EM polja od ovih izvora. Zato su odgovarajuća merenja nivoa polja u njihovoj okolini i procena izloženosti populacije od velike važnosti [93], [94].

Radne frekvencije dalekovoda i trafostanica spadaju u opseg niskih frekvencija (od 1 Hz do 100 kHz), u kome se ispituju prvenstveno stimulatívni efekti na ljudsko tkivo, usled izlaganja magnetskom polju. Kod ispitivanja u domenu niskih frekvencija, uobičajeno merene fizičke veličine su vektor jačine magnetskog polja \vec{H} i/ili vektor magnetske indukcije \vec{B} .

Sa ciljem proširenja primene predloženog metoda procene izloženosti na slučaj širokopojasnih merenja nivoa magnetskog polja niskih frekvencija, u nastavku teksta će biti predstavljene teorijske osnove za proračun granica sveukupne izloženosti. Dodatno, biće prikazani detalji drugog dela obavljenog eksperimentalnog istraživanja, uz opis lokacije na kojoj su merenja izvršena, kao i korišćene merne procedure i merne opreme. Dobijeni merni rezultati su takođe verifikovani kroz publikaciju rada u međunarodnom časopisu *Measurement* [95], kao i u radovima objavljenim na međunarodnim konferencijama i skupovima [96], [97].

5.1 Teorijske osnove

Procena izloženosti magnetskim poljima niskih frekvencija, prema ICNIRP-ovim preporukama [23], a i prema nacionalnom pravilniku [10], se vrši tako što se proverava prekoračenje bazičnih ograničenja primenom jednog od sledećih kriterijuma:

$$\sum_{i=1\text{Hz}}^{150\text{kHz}} \frac{H_i}{H_{Li}} + \sum_{i>150\text{kHz}}^{10\text{MHz}} \frac{H_i}{b} \leq 1, \quad (14)$$

ili:

$$\sum_{i=1\text{Hz}}^{150\text{kHz}} \frac{B_i}{B_{Li}} + \sum_{i>150\text{kHz}}^{10\text{MHz}} \frac{B_i}{b} \leq 1, \quad (15)$$

u zavisnosti od fizičke veličine koja se meri. U prvoj od jednačina H_i predstavlja intenzitet vektora jačine magnetskog polja na frekvenciji i , H_{Li} referentni granični nivo vektora jačine magnetskog polja na frekvenciji i , dok je konstanta $b = 5$ [A/m], za opštu populaciju, u skladu sa nacionalnim pravilnikom [10]. U slučaju primene druge jednačine, B_i predstavlja intenzitet vektora magnetske indukcije na frekvenciji i , B_{Li} referentni granični nivo vektora magnetske indukcije na frekvenciji i , dok je konstanta $b = 6,25$ [μT], za opštu populaciju [10].

Već je rečeno da je ovakav pristup procene izloženosti isključivo vezan za frekvencijski selektivna merenja nivoa polja, odnosno da se ne može primeniti na širokopoljasa merenja. Pri tome, autoru nije poznat ni jedan dokument kojim je uređena oblast ispitivanja EM polja, u kom je predložen standardizovan metod procene izloženosti u slučaju širokopoljasnih merenja nivoa magnetskog polja. Čak ni standard “Nivoi električnih i magnetskih polja koja stvaraju sistemi za napajanje naizmeničnom strujom – Postupci merenja u pogledu opšte izloženosti”, SRPS EN 62110:2011/AC:2015 (prevod međunarodnog standarda “*Electric and magnetic field levels generated by AC power systems – Measurement procedures with regard to public exposure*”, EN 62110:2011) [98], kao jedan od najvažnijih za opseg niskih frekvencija, ne nudi rešenje za dati problem.

Stoga se, proširenjem i dopunom metoda procene izloženosti, baziranog na adaptivnim granicama izloženosti, predlaže proračun granica između kojih se nalazi sveukupna izloženost magnetskom polju niskih frekvencija, korišćenjem sledećeg izraza:

$$GER_{donje} = \frac{B_m}{B_{ref\ max}(f_1)} \quad i \quad GER_{gornje} = \frac{B_m}{B_{ref\ min}(f_2)}, \quad (16)$$

gde je B_m efektivna vrednost vektora magnetske indukcije, dobijena širokopoljasnim merenjem. Slično kao i prilikom proračuna granica izloženosti električnom polju visokih frekvencija, minimalni i maksimalni referentni granični nivoi vektora magnetske indukcije, $B_{ref\ min}(f_2)$ i $B_{ref\ max}(f_1)$, su najmanji i najveći mogući u posmatranom frekvencijskom opsegu širokopoljassne merne sonde, od f_{min} do f_{max} (pogledati sliku 19).

S obzirom da se odabir ovih inicijalnih referentnih graničnih nivoa vrši bez informacija o spektralnom sadržaju magnetskog polja na mernoj lokaciji, i u ovom slučaju se javlja mogućnost neadekvatne procene inicijalnih granica izloženosti, uz potencijalno veliku relativnu razliku između njih. Ova razlika je definisana kao:

$$\delta[\%] = \frac{GER_{gornje} - GER_{donje}}{GER_{gornje}} \cdot 100\% = \left[1 - \frac{B_{ref\ min}}{B_{ref\ max}} \right] \cdot 100\%. \quad (17)$$

Smanjenje ove razlike očigledno zahteva promenu odnosa $B_{ref\ min}/B_{ref\ max}$, odnosno izbor novih referentnih graničnih nivoa, prikladnijih datoj mernoj lokaciji (pogledati sliku 24). Stoga, ponovo je neophodno obaviti frekvencijski selektivno merenje, uz adekvatnu analizu spektralnog sadržaja magnetskog polja, nakon čega je moguće obaviti prilagođenje inicijalnih granica sveukupne izloženosti primenom izraza:

$$GER_{donje}^{novo} = \frac{B_m}{B_{ref\ max}(f_{1novo})} \quad i \quad GER_{gornje}^{novo} = \frac{B_m}{B_{ref\ min}(f_{2novo})}, \quad (18)$$

pri čemu je B_m prvobitno izmerena širokopojasna vrednost vektora magnetske indukcije, dok su $B_{ref\ min}(f_{2novo})$ i $B_{ref\ max}(f_{1novo})$ nove vrednosti referentnih graničnih nivoa, u suženom frekvencijskom opsegu.

Zbog opštosti predloženog metoda procene izloženosti, baziranog na adaptivnim granicama, u okviru ovog poglavlja nije izvođena detaljna teorijska analiza (kao u slučaju primene kod električnih polja visokih frekvencija), nego je ukratko predstavljeno idejno rešenje njegove primene u slučaju širokopojasnih merenja magnetskog polja u opsegu niskih frekvencija. Prilikom procene granica izloženosti, u izrazima (16) i (18) figuriše vektor magnetske indukcije kao merena fizička veličina.

Eksperimentalna faza ovog dela disertacije je obavljena uz odgovarajuća merenja intenziteta vektora magnetske indukcije i biće predstavljena u narednim poglavljima. Naravno, slična analiza se može obaviti i za slučaj kada je merena fizička veličina vektor jačine magnetskog polja.

5.2 Lokacija trafostanice

U cilju verifikacije predloženog metoda procene izloženosti u opsegu niskih frekvencija, izvršeno je širokopojasno merenje nivoa magnetskog polja u neposrednoj blizini visokonaponske 110/25/35 kV trafostanice “Novi Sad 7” [95], koja je smeštena u urbanom području novosadskog naselja Telep. Ova trafostanica je izabrana iz razloga što se u njenoj blizini nalazi više stambenih objekata, kao što je prikazano na slici 42.

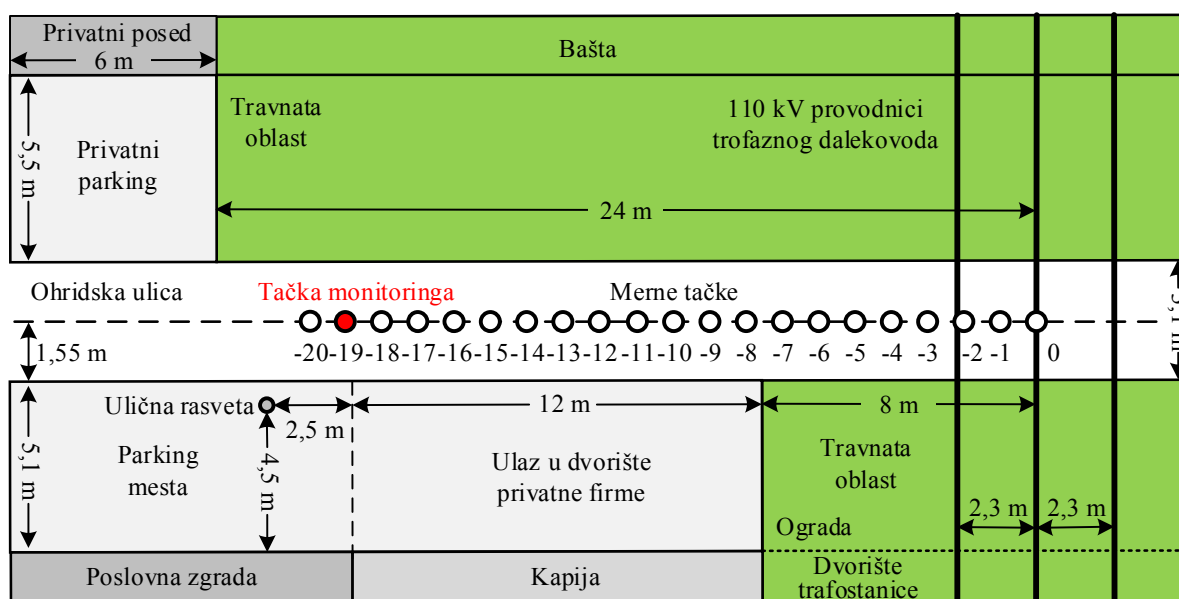
Provodnici trofaznog dalekovoda, naponskog nivoa 110 kV, prelaze preko Ohridske ulice i ulaze u dvorište trafostanice, kao što je prikazano na slici 42. Dodatno, postoji i nekoliko 25/35 kV podzemnih provodnika, koji izlaze iz dvorišta trafostanice i nastavljaju da se prostiru duž ulice Heroja Pinkija. Ovi provodnici služe za snabdevanje električnom energijom potrošača u naselju Telep, kao i drugim delovima Novog Sada.



Slika 42. Lokacija trafostanice “Novi Sad 7”.

S obzirom da se u neposrednoj blizini trafostanice nalaze privatna domaćinstva, a pri tome su uz samo dvorište trafostanice postavljene staze za pešake, jasno je da se čitava oblast oko trafostanice može smatrati vrlo osetljivom zonom, u pogledu izloženosti magnetskom polju. Upravo je ovo bio ključan detalj prilikom izbora lokacije na kojoj će se obaviti merenje.

Posebno interesantna pozicija u čitavom okruženju trafostanice jeste pozicija u Ohridskoj ulici, iznad koje, na visini od oko 10 metara, prolaze 110 kV provodnici trofaznog dalekovoda, kao što je prikazano na slici 43.



Slika 43. Skica merne lokacije u blizini trafostanice.

Provodnici prelaze direktno preko privatnog poseda, pri čemu je stambeni objekat (kuća) udaljena oko 20 metara od vertikalne projekcije srednjeg provodnika. Dodatno, na rastojanju od oko 24 metra od vertikalne projekcije srednjeg provodnika nalazi se i jedan privatni poslovni objekat, pri čemu je ulaz u dvorište date firme na rastojanju od svega 8 metara od srednjeg provodnika.

Pored navedenog, u datoj ulici nema staza za pešake, koji stoga koriste stazu za drumski saobraćaj, svakodnevno prolazeći direktno ispod dalekovoda. Stoga su merenja obavljena upravo na toj stazi, pri čemu je prikaz mernih tačaka dat na slici 43. Više detalja o korišćenoj mernoj proceduri, kao i dobijenim rezultatima merenja biće dato u nastavku.

5.3 Procedura merenja i rezultati merenja

U okviru ovog dela eksperimentalnih istraživanja su izvršena odgovarajuća merenja u opsegu niskih frekvencija i to u dve faze: primenom frekvencijski selektivnog i širokopojasnog mernog pristupa [95]. Merenja su sprovedena u junu 2015. godine, pri čemu je korišćena slična ideja kao i slučaju merenja u kampusu Univerziteta u Novom Sadu, odnosno prvo je obavljeno širokopojasno, a zatim i frekvencijski selektivno merenje.

5.3.1 Širokopojasno merenje nivoa magnetskog polja

Prva faza merenja je predstavljala širokopojasno merenje nivoa magnetskog polja niskih frekvencija. Ova faza je sprovedena uz upotrebu ručnog mernog instrumenta Narda EFA 300 [99], [100], opremljenog izotropnom sondom za merenje intenziteta vektora magnetske indukcije (100 cm² *Magnetic B-field probe*), Osnovni parametri ove sonde su dati u tabeli 18.

| Parametar | Frekvencijski opseg | Opseg merenja | Tip detekcije | Nivo šuma | Merna nesigirnost |
|-----------|---------------------|----------------|----------------|-----------|-------------------|
| Vrednost | 5 Hz – 32 kHz | 100 nT – 32 mT | RMS/Peak Value | 10 nT | ±3% @ ≥80 nT |

Tabela 18. Parametri širokopojasne sonde mernog instrumenta Narda EFA 300 [99].

U okviru ove faze merenja, izvršeno je najpre prostorno skeniranje merne lokacije, merenjem intenziteta vektora magnetske indukcije u četrdeset jednoj mernoj tački. Po dvadeset tačaka je bilo raspoređeno na jednakim međusobnim rastojanjima od jednog metra, levo i desno od vertikalne projekcije srednjeg provodnika (merna tačka 0 je bila tačno ispod njega), pri čemu je na slici 43 prikazana samo leva polovina tih tačaka, s obzirom da su one bliže pomenutom stambenom i poslovnom objektu.

Merenja su obavljena na visini od 1,1 metra iznad zemlje, duž centralnog dela staze za drumski saobraćaj u Ohridskoj ulici. Pri tome je udaljenost sonde od tehničkog osoblja iznosila 0,5 metara, kako bi se izbegle eventualne pojave refleksije i elektromagnetske indukcije. Rezultati ovog dela merenja su prikazani u tabeli 19, pri čemu intenzitet vektora magnetske indukcije u mernoj tački 0 iznosi 1,14 μT .

| | | | | | | | | | | |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| x [m] | -1 | -2 | -3 | -4 | -5 | -6 | -7 | -8 | -9 | -10 |
| B [μT] | 1,15 | 1,11 | 1,06 | 0,96 | 0,87 | 0,84 | 0,75 | 0,68 | 0,60 | 0,53 |
| x [m] | -11 | -12 | -13 | -14 | -15 | -16 | -17 | -18 | -19 | -20 |
| B [μT] | 0,47 | 0,42 | 0,38 | 0,33 | 0,29 | 0,26 | 0,24 | 0,22 | 0,21 | 0,20 |
| x [m] | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| B [μT] | 1,11 | 1,04 | 1,01 | 0,93 | 0,84 | 0,75 | 0,67 | 0,60 | 0,55 | 0,48 |
| x [m] | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| B [μT] | 0,42 | 0,37 | 0,33 | 0,29 | 0,26 | 0,23 | 0,21 | 0,19 | 0,17 | 0,15 |

Tabela 19. Rezultati prostornog skeniranja magnetskog polja na mernoj lokaciji.

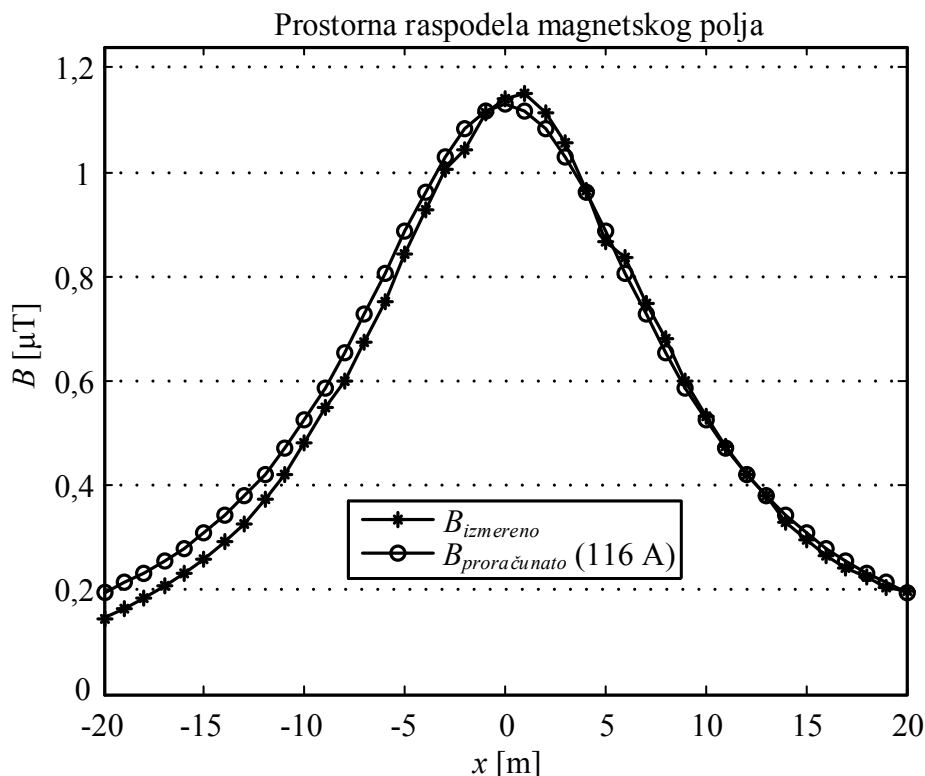
Kako bi se dodatno potvrdila tačnost mernih rezultata, teorijsko modelovanje raspodele magnetskog polja, koji potiče od provodnika trofaznog dalekovoda, je obavljeno primenom metoda opisanog u [101]. Ulazni parametri prilikom proračuna su bile vrednosti intenziteta struje u provodnicima, koje su dobijene od firme “EPS Distribucija – Regionalni centar Elektrovođovina” [102], koja je autorizovani operater trafostanice “Novi Sad 7”, zadužen za njen rad i održavanje.

Prostorno skeniranje na mernoj lokaciji je izvršeno u vremenskom intervalu od 7:45 do 8:10 časova. Promene vrednosti intenziteta struje u provodnicima, u datom vremenskom intervalu, date su u tabeli 20.

| | Minimum | Srednja vrednost | Maksimum |
|--------------|---------|------------------|----------|
| Vrednost [A] | 110,18 | 114,79 | 116,78 |

Tabela 20. Vrednosti intenziteta struje u provodnicima trofaznog dalekovoda.

Radi jednostavnosti, a i kako bi se razmotrio slučaj maksimalne opterećenosti trafostanice, prilikom teorijskog proračuna je uzeta vrednost intenziteta struje od 116 A. Rezultati modelovanja, uz poređenje sa izmerenim vrednostima, u svim mernim tačkama, su prikazani na slici 44.



Slika 44. Poređenje izmerenih i vrednosti dobijenih modelovanjem.

Kao što se može videti sa slike, prisutno je veoma dobro slaganje rezultata, pri čemu je usrednjena vrednost relativne razlike između pojedinih tačaka krivih jednaka:

$$\text{relativna razlika} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{B_i^{\text{prorač.}} - B_i^{\text{izmer.}}}{B_i^{\text{prorač.}}} \cdot 100\% = 7,97 \%. \quad (19)$$

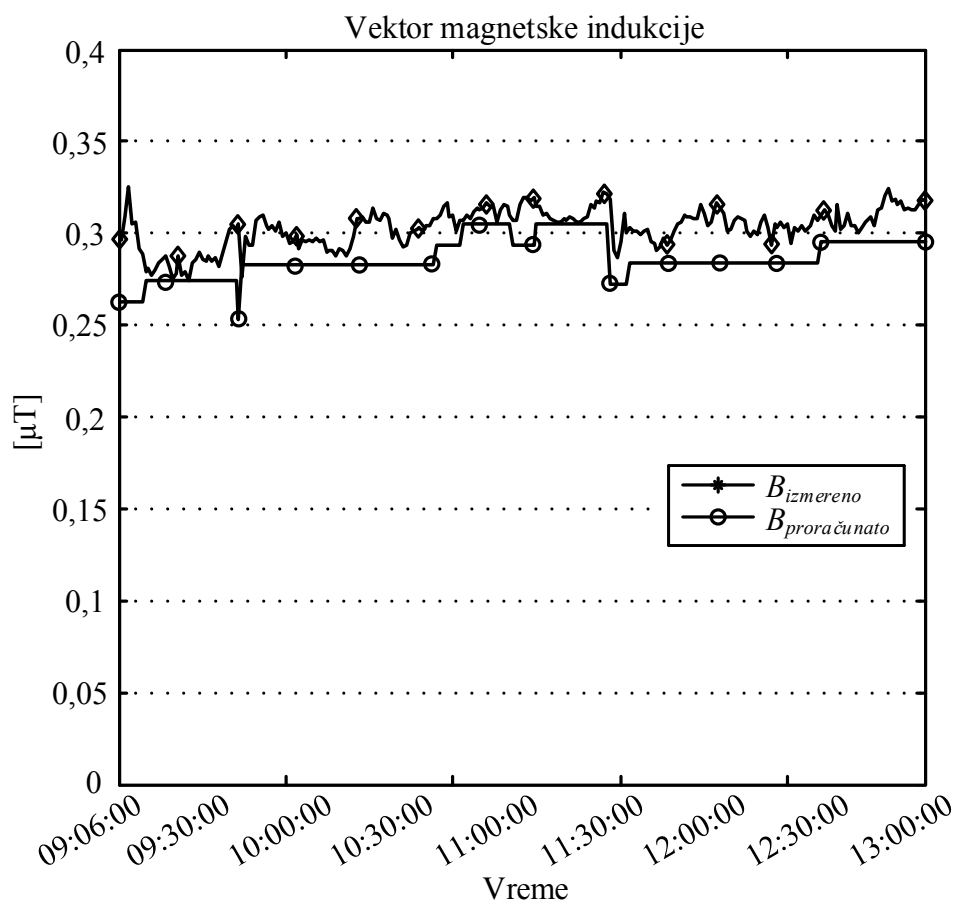
Ova razlika predstavlja srednju vrednost relativne razlike između proračunatih, $B_i^{\text{prorač.}}$, i izmerenih, $B_i^{\text{izmer.}}$, vrednosti intenziteta vektora magnetske indukcije, za svaku mernu tačku i , pri čemu je broj mernih tačaka $n = 41$. Veoma mala vrednost ove razlike potvrđuje dobro slaganje rezultata proračuna i merenja u realnim uslovima.

Nakon završetka prostornog skeniranja magnetskog polja je obavljen i širokopolasni četvoročasovni monitoring, od 9:00 do 13:00 časova. Ovaj period dana je izabran zbog pretpostavke da se tada očekuje nešto veća potrošnja električne energije, a samim tim i rad trafostanice sa potencijalno najvećim opterećenjem.

U ovoj fazi merenja, instrument je bio postavljen na drveni tronožac, pri čemu je centralni deo sonde bio na visini od 1,7 metara (slična postavka kao na slici 32). Monitoring je izvršen bez intervencije tehničkog osoblja, koje je prethodno podesilo instrument u “*Field Strength Mode*” režim rada za automatsko i kontinualno merenje [99].

Iako su prilikom prostornog skeniranja najveće vrednosti intenziteta vektora magnetske indukcije izmerene u tačkama ispod provodnika trofaznog dalekovoda (što je i očekivano), monitoring nije obavljen u tim tačkama. Za, uslovno rečeno, “*hot spot*” tačku je odabrana tačka na udaljenosti od 19 metara od središnjeg provodnika (na slici 43 obeležena crvenom bojom). Ovakav izbor tačke za monitoring je obavljen iz razloga što je data tačka podjednako udaljena od stambenog objekta i dvorišta privatnog poseda, sa jedne strane, i zgrade i dvorišta poslovnog objekta, sa druge strane. Pozicija je interesantna i zbog činjenice da u njenoj neposrednoj blizini ljudi izlaze iz ovih objekata i mogu se duže zadržati na samom izlazu.

Tokom četvoročasovnog monitoringa, merni instrument je bio podešen da meri efektivnu vrednost intenziteta vektora magnetske indukcije na svakih jedan minut [99]. Rezultati monitoringa prikazani su na slici 45.



Slika 45. Širokopolasni kontinualni monitoring nivoa magnetskog polja.

Pored izmerenih vrednosti, na ovoj slici su predstavljene i rezultati teorijskog modelovanja promene intenziteta vektora magnetske indukcije u izabranoj “*hot spot*” tački, koristeći metod [101]. Rezultati modelovanja su dobijeni na osnovu promene intenziteta struje u pro-

vodnicima trofaznog dalekovoda, za sam period monitoringa. Ovi podaci su takođe dobijeni od nadležnog operatera [102]. Statistička analiza dobijenih rezultata je data u tabeli 21.

| | Minimum | Srednja vrednost | Maksimum | Standardna devijacija |
|-------------------------------------|---------|------------------|----------|-----------------------|
| $B_{izmereno}$ [μT] | 0,274 | 0,303 | 0,325 | 0,010 |
| $B_{proračunato}$ [μT] | 0,253 | 0,287 | 0,305 | 0,011 |

Tabela 21. Statistička analiza rezultata monitoringa intenziteta vektora magnetske indukcije.

Veoma male razlike između minimalnih, srednjih i maksimalnih izmerenih i proračunatih vrednosti intenziteta vektora magnetske indukcije, u toku intervala vremena od četiri časa, su još jedna potvrda validnosti obavljenog monitoringa. Dodatno, ove male razlike na neki način potvrđuju i pretpostavku da su provodnici trofaznog dalekovoda dominantni izvori magnetskog polja na izabranoj lokaciji. Analiza spektralnog sadržaja magnetskog polja, koja će biti predstavljena u nastavku, će to definitivno i potvrditi.

5.3.2 Proračun inicijalnih granica izloženosti magnetskom polju

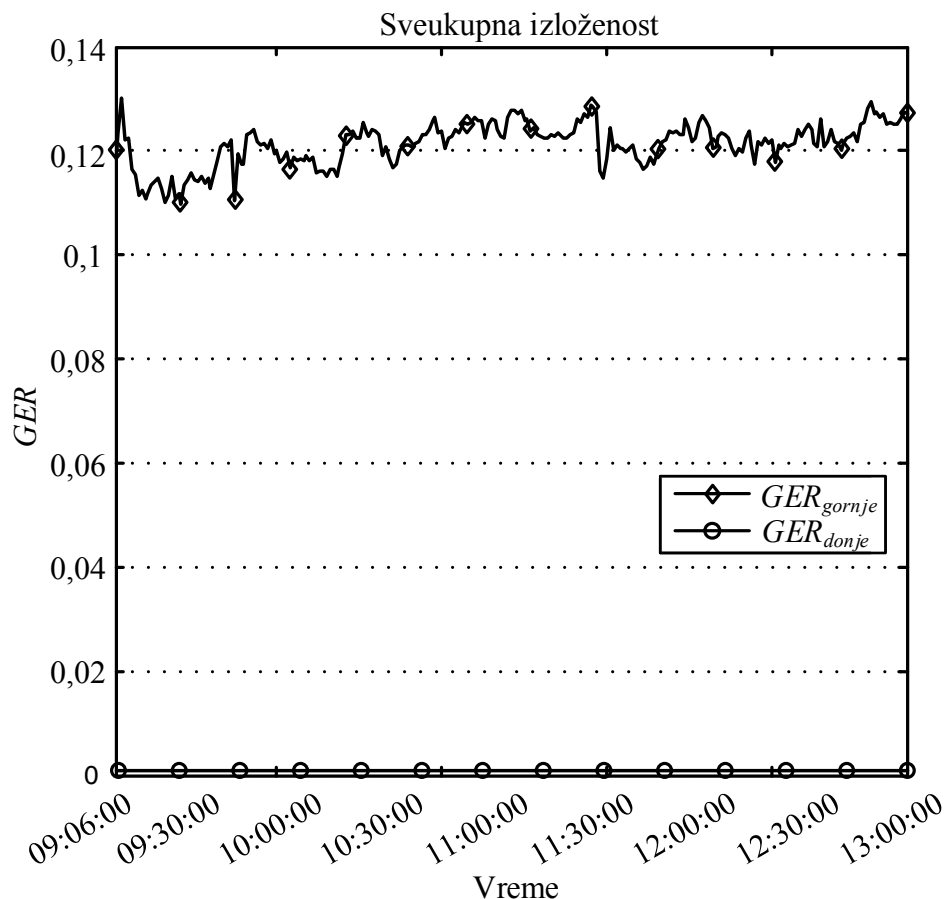
Proračun inicijalnih granica izloženosti magnetskom polju na mernoj lokaciji je izvršen primenom izraza (16), u kom su kao B_m figurisale izmerene vrednosti intenziteta vektora magnetske indukcije, $B_{izmereno}$, dobijene četvoročasovnim monitoringom. Izbor minimalnog i maksimalnog referentnog graničnog nivoa je obavljen u skladu sa vrednostima propisanim nacionalnim pravilnikom [10], u frekvencijskom opsegu korišćene sonde (od 5 Hz do 32 kHz).

Promene referentnih graničnih nivoa vektora magnetske indukcije za opštu populaciju, u opsegu niskih frekvencija su date u tabeli 22, u okviru koje, u pojedinim frekvencijskim opsezima, vrednosti referentnih graničnih nivoa zavise od frekvencije f . Prilikom proračuna u tim opsezima, vrednosti frekvencije su uzimaju u Hz.

| < 1 Hz | 1 – 8 Hz | 8 – 800 Hz | 800 Hz – 100 kHz |
|--------|-------------|------------|------------------|
| 16000 | $16000/f^2$ | $2000/f$ | 2,5 |

Tabela 22. Referentni granični nivoi vektora magnetske indukcije, izraženi u μT [10].

Na osnovu ove tabele i frekvencijskog opsega korišćene širokopojasne sonde (od 5 Hz do 32 kHz), inicijalno izabrani referentni granični nivoi su: $B_{ref\ min} = 2,5 \mu\text{T}$ (na frekvenciji od 32 kHz) i $B_{ref\ max} = 640 \mu\text{T}$ (na frekvenciji od 5 Hz) [10]. Nakon odabira ovih vrednosti je izvršen proračun inicijalnih granica izloženosti magnetskom polju, a njihove četvoročasovne promene su prikazane na slici 46.



Slika 46. Inicijalne granice izloženosti magnetskom polju na lokaciji trafostanice.

Statistička analiza inicijalnih granica izloženosti magnetskom polju je data u tabeli 23.

| | Minimum | Srednja vrednost | Maksimum | Standardna devijacija [%] |
|----------------|----------|------------------|----------|---------------------------|
| GER_{donje} | 0,000428 | 0,000474 | 0,000508 | 0,001628 |
| GER_{gornje} | 0,109652 | 0,121283 | 0,130000 | 0,416805 |

Tabela 23. Statistička analiza inicijalnih granica izloženosti magnetskom polju.

Maksimalna vrednosti gornje granice izloženosti ($GER_{gornje}^{max} = 0,13$) je 7,69 puta manja od dozvoljene granice $GER_{dozvoljeno} = 1$. Ova činjenica datu lokaciju izdvaja kao lokaciju sa malom izloženošću magnetskom polju niskih frekvencija. Dodatno, male vrednosti standardne devijacije obe granice izloženosti sugerišu da je izloženost populacije poprilično konstantna i to u periodu dana kada se očekuje možda i maksimalna opterećenost trafostanice.

Ipak, primenom izraza (17) se dobija da je relativna razlika između inicijalnih granica izloženosti jednaka 99,6%. Ovako velika razlika je i očekivana, s obzirom na širokopoljasni opseg u kome su merenja obavljena, odnosno u kome su birani inicijalni referentni granični

nivoi. Kako je rad distributivnih sistema za prenos električne energije vezan za frekvenciju od 50 Hz, naredni korak je zahtevao frekvencijski selektivnu analizu polja, kako bi se utvrdilo da li postoje i neki drugi izvori polja niskih frekvencija na datoj lokaciji.

5.3.3 Spektralna analiza sadržaja magnetskog polja

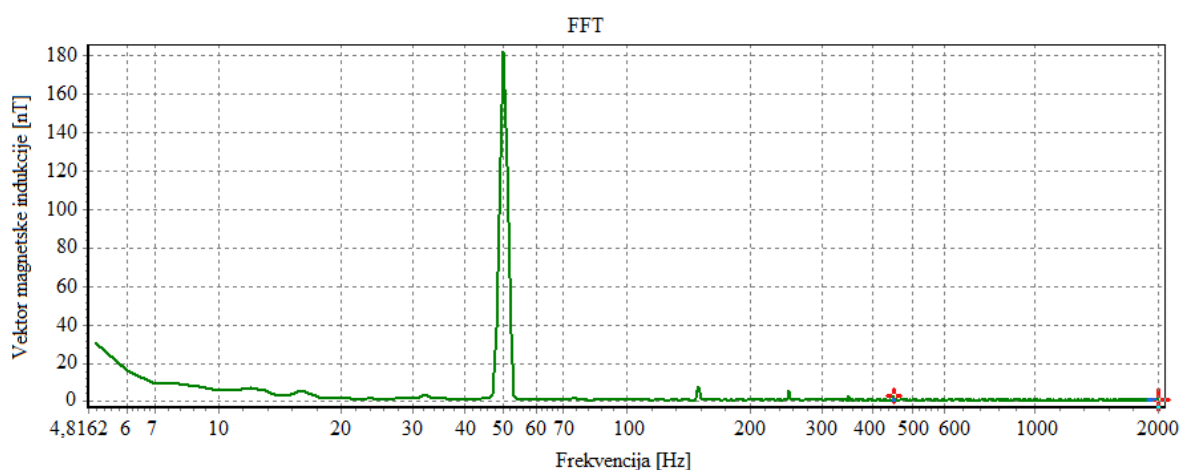
Ova faza merenja je sprovedena između prostornog skeniranja polja na mernoj lokaciji i monitoringa, i trajala je nekoliko minuta. Tom prilikom je korišćen merni instrument Narda EFA 300, postavljen u “*Spectrum FFT/Harmonics*” režim rada [99]. Osnovni parametri instrumenta u ovom režimu rada su dati u tabeli 24 [99].

| Parametar | Frekvencijski opseg | Opseg merenja | Rezolucija | Frekvencijska skala | Širina prozora |
|-----------|---------------------------------|----------------|------------|---|----------------|
| Vrednost | 5 Hz – 2 kHz/ 40 Hz – 32 kHz | 100 nT – 32 mT | 0,01 Hz | Full-Scale Logarithmic/100 Hz Wide Linear Span | 1 sekunda |

Tabela 24. Parametri Narda EFA 300 u “*Spectrum FFT/Harmonics*” režimu rada [99].

Instrument poseduje mogućnost skeniranja spektra u dva frekvencijska opsega, koji su dati u tabeli 24. Vizuelna inspekcija je pokazala da su provodnici trofaznog dalekovoda (na frekvenciji od 50 Hz) dominantni izvor polja na datoj lokaciji, te je stoga spektralna analiza obavljena samo u opsegu od 5 Hz do 2 kHz.

Spektralni sadržaj magnetskog polja je prikazan na slici 47.



Slika 47. Spektralni sadržaj magnetskog polja na lokaciji trafostanice.

S obzirom da je merni opseg korišćenog instrumenta od 100 nT do 32 mT, sve vrednosti koje su ispod praga detekcije, a koje su pri tom prikazane na slici 47, mogu se smatrati kao

posledica merne nesigurnosti instrumenta ili prisustva određenog šuma. Stoga bi se te vrednosti možda mogle i zanemariti. Međutim u okviru analize kojom se bavi ova disertacija one će ipak biti razmatrane, u cilju suženja inicijalnog frekvencijskog opsega i prikaza funkcionisanja predloženog metoda procene izloženosti.

U svakom slučaju, spektralna analiza magnetskog polja je potvrdila pretpostavku o dominantnom prisustvu komponente polja na frekvenciji od 50 Hz. Dodatno, može se uočiti i očekivano postojanje viših harmonika ove komponente polja, na neparnim umnošcima frekvencije osnovnog harmonika.

Kako bi sagledali koliki je doprinos pojedinih harmonika u čitavom spektru, analizirana je procena izloženosti po frekvencijskim harmonicima, primenom metoda predstavljenog u radu [103]. Vrednosti intenziteta vektora magnetske indukcije na frekvencijama svih harmonika, kao i njihov procentualni doprinos ukupnoj izloženosti su dati u tabeli 25.

| f [Hz] | B [nT] | $B_{harm.}/B_{osnov.}$ [%] | B_{ref} [μ T] | $ER = B/B_{ref}$ | $ER_{harm.}/ER_{uk.}$ [%] |
|------------|----------|----------------------------|----------------------|------------------|---------------------------|
| 50 | 181,94 | 100 | 40 | 0,004549 | 63,94 |
| 150 | 7,84 | 4,50 | 13,33 | 0,000588 | 8,27 |
| 250 | 5,78 | 3,32 | 8 | 0,000722 | 10,15 |
| 350 | 2,97 | 1,79 | 5,71 | 0,000520 | 7,31 |
| 450 | 3,26 | 1,60 | 4,44 | 0,000735 | 10,34 |
| $ER_{uk.}$ | | | | 0,007114 | |

Tabela 25. Doprinosi pojedinih harmonika ukupnoj izloženosti [103].

Rezultati pokazuju da je doprinos viših harmonika zanemarljivo mali u odnosu na doprinos osnovnog harmonika na frekvenciji od 50 Hz, što je u skladu sa zaključcima dobijenim u radu [103]. Ova činjenica je veoma bitna za analizu suženja inicijalnog frekvencijskog opsega merne sonde i prilagođenje granica izloženosti magnetskom polju.

5.3.4 Prilagođenje inicijalnih granica izloženosti magnetskom polju

Vizuelna inspekcija izabrane lokacije je pokazala da su provodnici trofaznog dalekovođa dominantni izvori magnetskog polja, i da nema nikakvih izvora statičkog ili sporo promenljivog magnetskog polja. Sa druge strane, poslednji viši harmonik polja je prisutan na frekvenciji od 450 Hz. Na osnovu ovih činjenica, i zanemarivanjem određenih delova spektra, moguće je obaviti suženje inicijalnog frekvencijskog opsega merne sonde (od 5 Hz do 32 kHz) na ospeg od 40 Hz do 450 Hz.

Dodatno suženje ovog opsega se može izvršiti ukoliko se uzmu u obzir rezultati proračuna procentualnog doprinosa viših harmonika u čitavom spektru. Kako je procentualno najveći doprinos osnovnog harmonika, dodatno suženje inicijalnog frekvencijskog opsega podrazumeva praktično izdvajanje samo frekvencije od 50 Hz, te je obavljeno njeno “filtriranje“ u opsegu od 40 Hz do 60 Hz.

Na osnovu ove analize spektralnog sadržaja magnetskog polja, procena i prilagođenje granica izloženosti je obavljeno razmatrajući tri slučaja:

- Slučaj *A* – procena inicijalnih granica izloženosti, na osnovu merenja u širokopojasnom frekvencijskom opsegu merne sonde (5 Hz do 32 kHz),
- Slučaj *B* – procena izloženosti na osnovu suženja inicijalnog frekvencijskog opsega na opseg od 40 Hz do 450 Hz, i
- Slučaj *C* – procena izloženosti na osnovu zanemarivanja doprinosa viših harmonika, posmatrajući samo osnovni harmonik u opsegu od 40 Hz do 60 Hz.

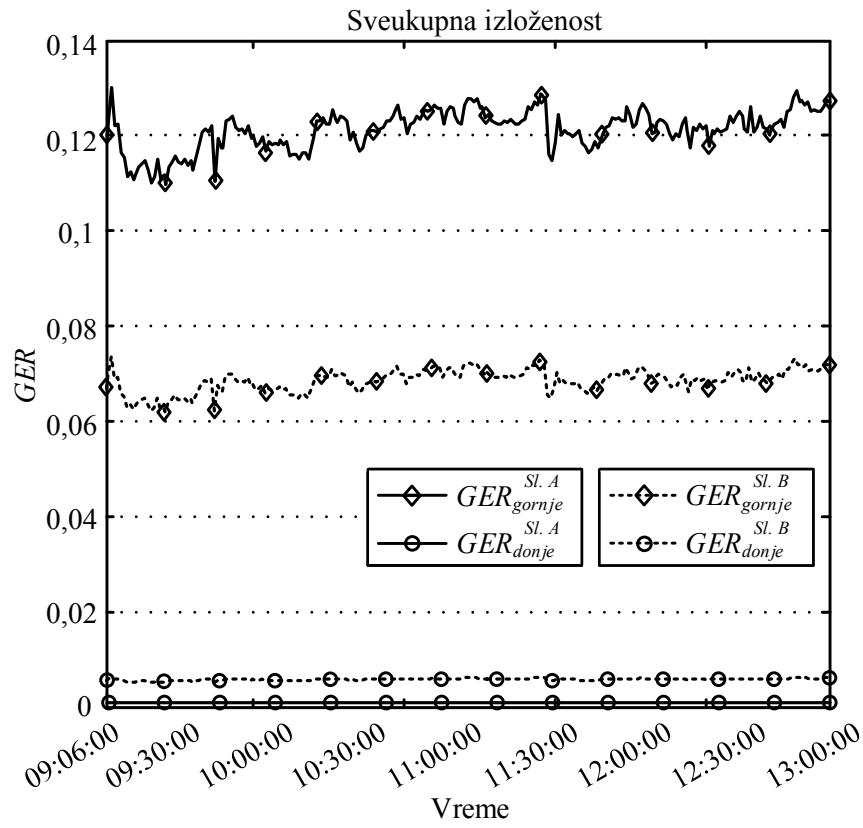
Odbacivanje pojedinih delova spektra je, i u ovom slučaju, vezano isključivo za datu mernu lokaciju. U slučaju primene predloženog adaptivnog metoda procene izloženosti na nekoj drugoj lokaciji, neophodno je realno sagledati mogućnost suženja posmatranog frekvencijskog opsega.

Izbor inicijalnih i novih referentnih graničnih nivoa, $B_{ref\ min}$ i $B_{ref\ max}$, za sva tri slučaja procene granica izloženosti, je dat u tabeli 26.

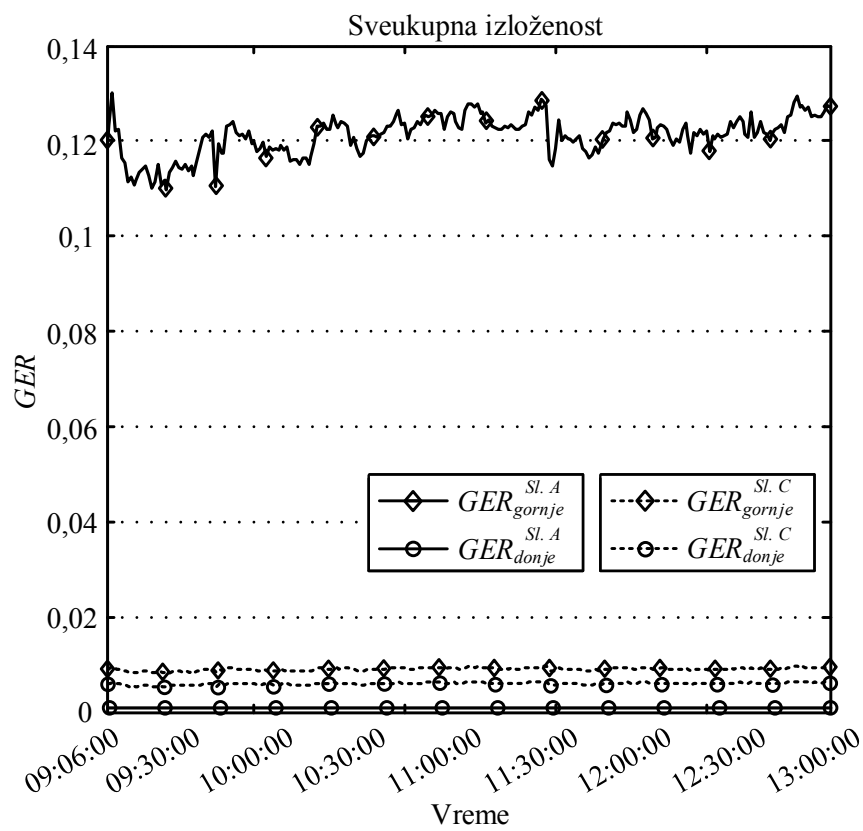
| Slučaj | <i>A</i> | <i>B</i> | <i>C</i> |
|---------------------------|-----------|----------|----------|
| Frekvencijski opseg [Hz] | 5 – 32000 | 40 – 450 | 40 – 60 |
| $B_{ref\ min}$ [μ T] | 2,5 | 4,44 | 33,33 |
| $B_{ref\ max}$ [μ T] | 640 | 50 | 50 |
| δ [%] | 99,6 | 91,1 | 33,3 |

Tabela 26. Razlika između inicijalnih i prilagođenih granica izloženosti magnetskom polju.

Inicijalna relativna razlika između granica izloženosti se, kao što se može videti iz tabele 26, neznatno smanjuje (za 8,5%) u slučaju *B*. Međutim, drastično smanjenje te razlike, od 66,3%, a samim tim i suženje opsega u kome se realna izloženost nalazi, se dobija u slučaju *C*. Kako bi se ovo suženje jasno naglasilo i predstavilo, na slici 48 je dato poređenje prilagođenih i inicijalnih granica izloženosti magnetskom polju.



(a)



(b)

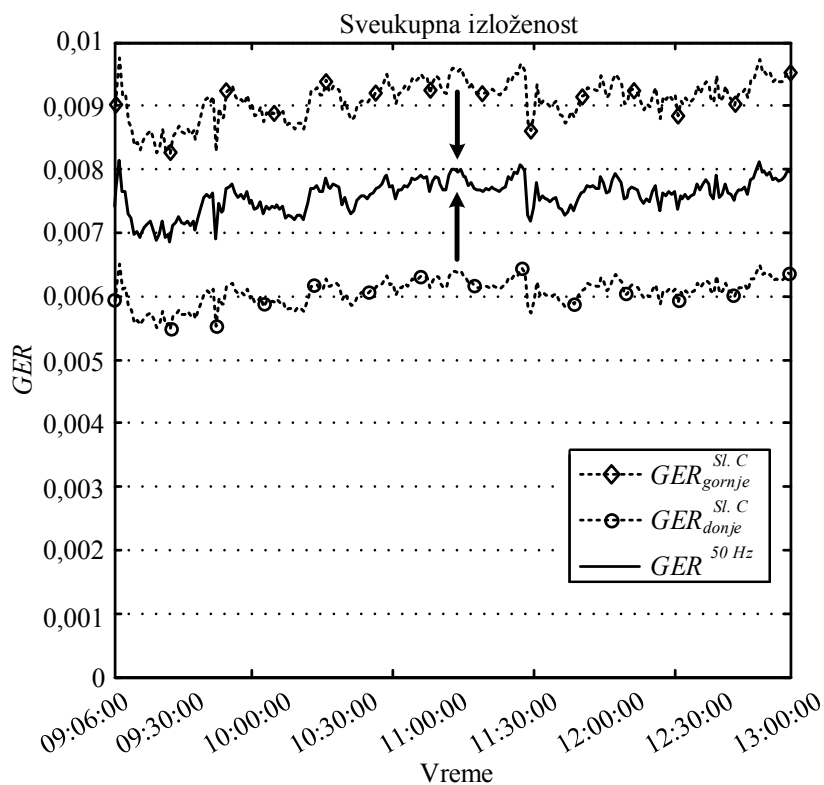
Slika 48. Prilagođenje granica izloženosti magnetskom polju u slučajevima B (a) i C (b).

Sa slike 48 se može jasno videti smanjenje opsega u kome se realna izloženost nalazi, nakon prilagođavanja inicijalnih granica izloženosti. Ovo smanjenje je posebno izraženo u slučaju C, čime je znatno povećana preciznost procene potencijalne izloženosti magnetskom polju. Statistička analiza prilagođenih granica izloženosti je data u tabeli 27.

| | | Minimum | Srednja vrednost | Maksimum | Standardna devijacija [%] |
|----------|----------------|----------|------------------|----------|---------------------------|
| Slučaj B | GER_{donje} | 0,005483 | 0,006064 | 0,006500 | 0,020840 |
| | GER_{gornje} | 0,061741 | 0,068289 | 0,073198 | 0,234687 |
| Slučaj C | GER_{donje} | 0,005483 | 0,006064 | 0,006500 | 0,020840 |
| | GER_{gornje} | 0,008225 | 0,009097 | 0,009751 | 0,000313 |

Tabela 27. Statistička analiza prilagođenih granica izloženosti magnetskom polju.

Na kraju čitave ove analize, posmatrajmo samo dominantnu komponentu polja, na frekvenciji od 50 Hz. Vrednost referentnog graničnog nivoa vektora magnetske indukcije za tu frekvenciju iznosi 40 μT [10]. Ukoliko bismo izvršili prilagođenje inicijalnih granica izloženosti tako što bismo iz čitavog spektra izdvojili samo ovu frekvenciju, došlo bi praktično do spajanja gornje i donje granice, kao što je prikazano na slici 49.



Slika 49. Izloženost magnetskom polju na frekvenciji od 50 Hz.

U ovoj i sličnim situacijama, gde možemo smatrati da izvor magnetskog polja emituje polje na samo jednoj frekvenciji, dolazi do spajanja granica izloženosti u jednu krivu. Na taj način praktično dolazi do konvergencije predloženog adaptivnog metoda procene izloženosti ka metodu definisanom u okviru ICNIRP-ovog dokumenta [23], kao i nacionalnog pravilnika [10], kojim se sugeriše proračun izloženosti po frekvencijama, primenom izraza (15).

Ovaj primer predstavlja jednu specifičnu situaciju postojanja samo jedne dominantne frekvencije. Nažalost, takvi slučajevi su retki u praksi, odnosno u realnom vremenu i prostoru. Stoga, u situacijama kada je na lokaciji ispitivanja prisutan veći broj izvora polja, različitih radnih frekvencija, predloženi adaptivni metod procene izloženosti dolazi do posebnog izražaja i dobija na značaju prilikom upotrebe širokopojasnih merenja nivoa polja.

6 Diskusija

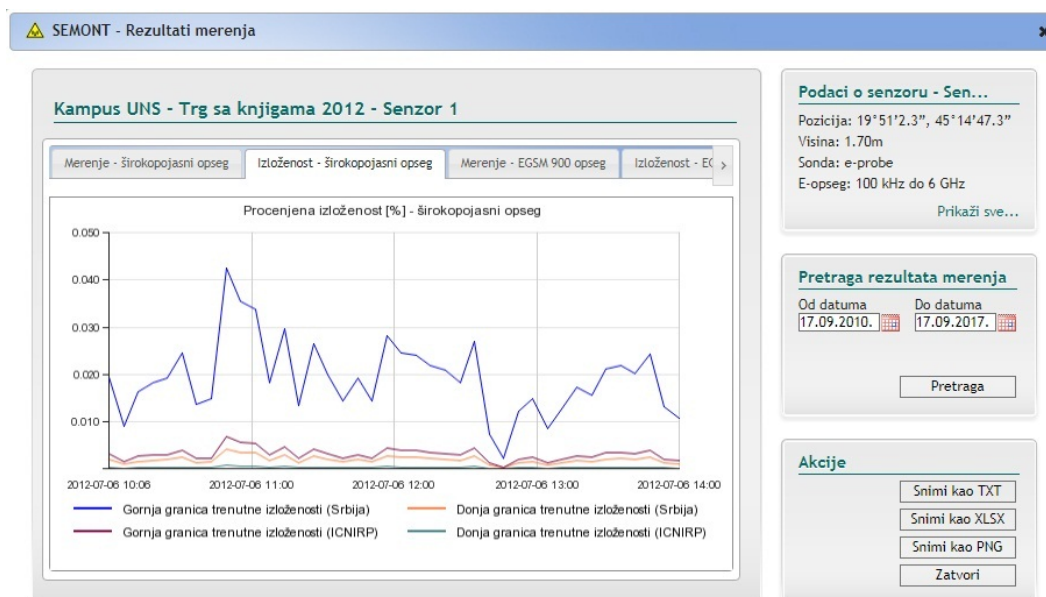
Cilj istraživanja ove doktorske disertacije su bili realizacija i verifikacija novog metoda procene izloženosti namenjenog širokopojsnim merenjima nivoa električnog polja, odnosno potvrda njegove ispravnosti/validnosti. Predloženi metod je baziran na određivanju gornje i donje granice izloženosti, kao i njihovom adekvatnom prilagođavanju spektralnom sadržaju polja, za konkretnu ispitnu lokaciju. Upotrebom metoda sa adaptivnim granicama izloženosti se pokazalo da je moguće ostvariti visoku efikasnost procene opsega u kom se stvarna izloženost polju nalazi. Dodatno, na osnovu upotrebe spektralne analize polja moguće je postići i odgovarajuće suženje inicijalno procenjenog opsega, u kome se izloženost nalazi, što doprinosi povećanju preciznosti procene predloženog metoda.

Rezultati praktičnih merenja nivoa električnog polja, obavljenih u okviru kampusa Univerziteta u Novom Sadu, kao i procena izloženosti, su pokazali da se relativna razlika između gornje i donje granice smanjuje sa 90% na 53,75%, kao što je prikazano na slici 40. Ovaj rezultat je veoma značajan, pošto ističe efikasnost predloženog metoda, koja posebno dolazi do izražaja u slučajevima prisutnosti dominantnih izvora, koji emituju polje u uzanim spektralnim opsezima, međusobno bliskim, kao i u situacijama dugoročnog kontinualnog širokopojsnog monitoringa nivoa polja, kada je moguće dobiti informaciju o fluktuaciji izloženosti u određenom vremenskom periodu.

Aktuelni trendovi u oblasti ispitivanja EM polja upravo sugerišu, i u mnogo slučajeva zahtevaju, konstantno praćenje promena nivoa polja, ali i same izloženosti, u dužem vremenskom periodu. Ovu činjenicu prati razvoj velikog broja sistema za kontinualni monitoring, od kojih treba pomenuti nacionalni SEMONT sistem, za čije potrebe je razvijen i osmišljen predloženi metod procene izloženosti.

Prikazivanjem dnevnih granica izloženosti putem grafikona koji su javno dostupni svim korisnicima SEMONT internet veb portala, omogućen je pravovremen i transparentan uvid u rezultate procene izloženosti opšte populacije. Na taj način se zadovoljavaju potrebe krajnjih korisnika, a ujedno se povećeva i kredibilitet samog SEMONT sistema, pošto na brz i komforan način omogućava uvid u rezultate monitoringa, svim zainteresovanim korisnicima.

Primer prikaza rezultata procene izloženosti električnom polju, putem internet veb portala SEMONT sistema, je dat na slici 50 [27].



Slika 50. Prikaz dnevnih granica izloženosti na internet veb portalu SEMONT sistema [27].

U svakom slučaju, predloženi metod procene izloženosti nije striktno ograničen na upotrebu u okviru SEMONT sistema. Njegova jednostavnost, i pre svega opštost, omogućuju efikasnu implementaciju u okviru bilo kog drugog sistema za kontinualni širokopolasni monitoring nivoa polja. Takođe, metod se može primeniti i za procenu izloženosti kod pojedinačnih širokopolasnih merenja, pri čemu je neophodno koristiti referentne granične nivoe polja, propisane odgovarajućim regulatornim aktima.

Predloženi metod procene izloženosti se koristi u završnoj fazi ispitivanja EM polja, odnosno u fazi obrade rezultata merenja nivoa polja, i ne zahteva upotrebu bilo kakve specifične vrste mernih instrumenata. Drugim rečima, dati metod je primenljiv kod svih komercijalno dostupnih mernih instrumenata, koji su dizajnirani za širokopolasna merenja nivoa polja.

Dodatno, sa aspekta implementacije, predloženi metod ne zahteva nikakve posebne resurse, u pogledu posebnih softverskih alata. Za njegovu efikasnu implementaciju su dovoljne uobičajene aritmetičke operacije, dostupne u svim programskim alatima za obradu podataka. Kako su za proračun granica sveukupne izloženosti potrebne samo dve aritmetičke operacije (deljenje i kvadriranje), veoma mala aritmetička kompleksnost se ističe kao jedna od prednosti datog metoda, pošto ne opterećuje dodatno postupak merenja nivoa polja.

Sa druge strane, ono što predloženi metod procene izloženosti čini nešto složenijim za praktičnu upotrebu jeste neophodnost određivanja spektralnog sadržaja polja na lokaciji ispitivanja, za šta se mora primeniti frekvencijsko selektivni merni pristup. Postupak izbora ili promene referentnih graničnih nivoa, kao i prilagođenje samih granica izloženosti, zavise upravo

od rezultata obavljene frekvencijski selektivne analize polja. Za to je svakako neophodno odgovarajuće vreme i resursi, čime se kompleksnost obavljanja procene izloženosti u određenoj meri povećava. Naravno, u slučaju da se ne sprovodi spektralna analiza, metod se i dalje može primeniti, uz upotrebu referentnih graničnih nivoa iz inicijalnog frekvencijskog opsega merne sonde, ali se tada ostvaruje manja preciznost procene.

Povećanje kompleksnosti, zbog dodatne spektralne analize, dolazi do izražaja u slučaju standardnih širokopoljnih merenja u kraćim vremenskim intervalima. Međutim, u okviru sistema za kontinualni širokopoljni monitoring to nije slučaj, jer jednom izvršena spektralna analiza i izbor novih referentnih graničnih nivoa se ne moraju često ponavljati, imajući u vidu pretpostavku da je u okolini konkretne lokacije ispitivanja mala verovatnoća da će dolaziti do čestog instaliranja novih izvora polja, sa frekvencijama emitovanja izvan postojećeg spektra.

Pored inicijalne primene predloženog metoda u opsegu visokih frekvencija, obavljeno je adekvatno proširenje i za slučaj širokopoljnih merenja i procene izloženosti magnetskim poljima niskih frekvencija. Uzimajući u obzir odgovarajuće izmene pri proračunu granica sveukupne izloženosti, rezultati eksperimentalnih istraživanja, izvršenih u blizini visokonaponske trafostanice u Novom Sadu, su u potpunosti potvrdili prednosti datog metoda, za primenu i u opsegu niskih frekvencija.

Prilagođenje inicijalnih granica izloženosti spektralnom sadržaju magnetskog polja je predstavljeno na slici 48. Sa slike se vidi da je ostvareno značajno smanjenje inicijalne relativne razlike između granica izloženosti sa 99,6% na 33,3%. Time je još jednom potvrđen potencijal predloženog metoda za primenu i kod magnetskih polja niskih frekvencija.

Na kraju, treba naglasiti da mogućnost primene predloženog metoda u okviru bilo kog sistema za kontinualni širokopoljni monitoring nivoa polja nije njegova jedina dobra strana. Njegova opštost omogućuje jednostavnu upotrebu i u svim akreditovanim organizacijama za ispitivanje EM polja, kao i u laboratorijama koje obavljaju odgovarajuća širokopoljna merenja, kako u kraćem, tako i u dužem vremenskom periodu.

Kao dodatna potvrda istraživačkih rezultata, na temu procene izloženosti pomoću metoda sa adaptivnim granicama izloženosti, tokom istraživanja i rada na ovoj doktorskoj disertaciji, su objavljena dva naučna rada, kategorije M21 [85], [95] i realizovana su dva tehnička rešenja, kategorije M82 [104], [105], usvojena od strane Nastavno-naučnog veća Fakulteta tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu.

7 Zaključak

Oblast ispitivanja EM polja, pored teorijskih modelovanja i proračuna, zahteva odgovarajuća merenja u realnom vremenu, na lokacijama od interesa. Primena bilo kog od trenutno zastupljenih mernih pristupa, širokopoljarnog ili frekvencijski selektivnog, posledično zahteva i adekvatnu procenu izloženosti populacije, prisutnim poljima.

Imajući u vidu da još uvek nije definisan i standardizovan metod za procenu izloženosti u slučaju širokopoljarnih merenja, glavni cilj i doprinos istraživanja ove disertacije, jesu predlog i realizacija jednog novog metoda za procenu izloženosti električnim poljima visokih frekvencija, baziranog na adaptivnim granicama izloženosti.

Predloženim metodom se vrši proračun granica sveukupne izloženosti i definiše opseg u kom se stvarna izloženost polju nalazi. Pri tome je, u cilju povećanja preciznosti procene, neophodno voditi računa i o specifičnostima lokacije na kojoj se obavljaju ispitivanja. To podrazumeva frekvencijski selektivnu analizu spektralnog sadržaja polja, kako bi se u potpunosti utvrdila prisutnost svih aktivnih izvora polja na ispitnoj lokaciji. Stoga, primena predloženog metoda zahteva zajedničku upotrebu dva različita pristupa merenja nivoa polja, širokopoljarnog i frekvencijski selektivnog merenja.

Informacija o spektralnog sadržaju polja pruža mogućnost za suženje inicijalno posmatranog širokopoljarnog frekvencijskog opsega merne sonde, korišćenog instrumenata. Na taj način se inicira izbor novih referentnih graničnih nivoa, prikladnijih datoj lokaciji, a samim tim i prilagođenje inicijalnih granica izloženosti. Rezultat svega toga jeste smanjenje relativne razlike između granica izloženosti, suženje opsega u kom se nalazi stvarna izloženost, što rezultuje povećanjem preciznosti procene predloženim metodom.

Jednostavnost i opštost ovog metoda čine ga primenljivim kako za pojedinačna merenja u kraćim vremenskim intervalima, tako i za kontinualni širokopoljarni monitoring. Posebno se ističe primena u cilju određivanja i pravovremenog praćenja izloženosti stanovništva u dužem vremenskom periodu (na dnevnom, mesečnom ili godišnjem nivou). Proračunom i adekvatnim prilagođenjem granica izloženosti omogućuje se jasan uvid u fluktuaciju stvarne izloženosti u realnom vremenu.

Rezultati praktičnih merenja nivoa električnog polja, obavljenih u cilju verifikacije predloženog metoda, su pokazali da se njegovom primenom može ostvariti značajno smanjenje relativne razlike između granica izloženosti. U konkretnom slučaju lokacije u okviru kam-

pusa Univerziteta u Novom Sadu, postignuto je smanjenje relativne razlike sa 90% na 53,75%.

Predloženi metod procene izloženosti se pokazao vrlo efikasnim i primenljivim i u slučajevima širokopoljnih merenja i procene izloženosti magnetskim poljima niskih frekvencija. U cilju njegovog testiranja, sprovedeno je merenje u blizini visokonaponske trafostanice, pri čemu je, za datu lokaciju i postojeće uslove na noj, ostvareno smanjenje inicijalne relativne razlike između granica izloženosti sa 99,6% na 33,3%.

Iako je eksperimentalni deo istraživanja sproveden u relativno kratkom vremenskom periodu, dobijeni rezultati su dobra potvrda ispravnosti i potencijala primene predloženog metoda. Buduća istraživanja će biti usmerena ka proširenju njegove primene u SEMONT sistemu, ali i primene u bilo kom drugom sistemu za kontinualni širokopoljasi monitoring. Time će biti omogućena potpuna verifikacija predloženog metoda u okviru merenja i procene granica izloženosti u dužem vremenskom periodu.

Na kraju, predloženi metod je inicijalno realizovan samo za procenu izloženosti opšte populacije. Međutim, moguća je njegova modifikacija za slučaj procene izloženosti profesionalnog osoblja, koje je češće i u dužim intervalima vremena izloženo različitim nivoima EM polja na svom radnom mestu. Kao nastavak istraživanja ove disertacije, planirane su dodatne kampanje monitoringa nivoa polja i procene izloženosti, u cilju verifikacije ove nove primene metoda procene izloženosti, baziranog na adaptivnim granicama izloženosti.

Literatura

- [1] R. Kitchen, RF and Microwave Radiation Safety Handbook, 2nd edition, Newnes 2001.
- [2] COST Action BM1309: European network for innovative uses of EMFs in biomedical applications (EMF-MED), <http://cost-emf-med.eu>, (stranica posećena u septembru 2017).
- [3] ITU EMF Guide, <http://emfguide.itu.int/emfguide.html>, (stranica posećena u septembru 2017).
- [4] EU Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR) – Final Opinion on Potential Health Effects of Exposure to Electromagnetic fields (EMF), 2015. http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/docs/scenih_r_o_041.pdf (stranica posećena u septembru 2017).
- [5] World Health Organization, “WHO research agenda for radiofrequency fields”, WHO research agenda for radiofrequency fields, 2010.
- [6] Osnovni standard za merenje jačine elektromagnetskog polja na licu mesta u odnosu na izlaganje ljudi u blizini baznih stanica, SRPS EN 50492:2010/A1:2014, 2014 (prevod međunarodnog standarda *Basic standard for the in-situ measurement of electromagnetic field strength related to human exposure in the vicinity of base stations*, EN 50492:2010).
- [7] Osnovni standard za procedure merenja i izračunavanja izlaganja ljudi električnim, magnetskim i elektromagnetskim poljima (od 0 Hz do 300 GHz), SRPS EN 50413:2010/A1:2014, 2014 (prevod međunarodnog standarda *Basic standard on measurement and calculation procedures for human exposure to electric, magnetic and electromagnetic fields (0 Hz – 300 GHz)*, EN 50413:2010).
- [8] ITU-T K.83, Recommendation ITU-T K.83 – Monitoring electromagnetic field, 03/2011.
- [9] Zakon o zaštiti od nejonizujućih zračenja ("Službeni glasnik RS" broj 36/2009).
- [10] Pravilnik o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima ("Službeni glasnik RS" broj 104/2009).
- [11] Pravilnik o izvorima nejonizujućeg zračenja od posebnog interesa, vrstama izvora, načinu i periodu njihovog ispitivanja ("Službeni glasnik RS" br. 104/2009).
- [12] Pravilnik o uslovima koje moraju da ispunjavaju pravna lica koja vrše poslove ispitivanja nivoa zračenja izvora nejonizujućih zračenja od posebnog interesa u životnoj sredini ("Službeni glasnik RS" br. 104/2009).
- [13] Pravilnik o sadržini evidencije o izvorima nejonizujućih zračenja od posebnog interesa ("Službeni glasnik RS" br. 104/2009).
- [14] Pravilnik o sadržini i izgledu obrasca izveštaja o sistematskom ispitivanju nivoa nejonizujućih zračenja u životnoj sredini ("Službeni glasnik RS" br. 104/2009).
- [15] Pravilnik o uslovima koje moraju da ispunjavaju pravna lica koja vrše poslove sistematskog ispitivanja nivoa nejonizujućih zračenja, kao i način i metode sistematskog ispitivanja u životnoj sredini ("Službeni glasnik RS" br. 104/2009).
- [16] Pravilnik o preventivnim merama za bezbedan i zdrav rad pri izlaganju elektromagnetskom polju ("Službeni glasnik RS" br. 117/2012).
- [17] B. O. Ayinmode and I. P. Farai, “Measurement and method in radiofrequency radiation exposure assessments”, *The Pacific Journal of Science and Technology*, Vol. 14, No. 2, pp. 110-118, 2013.

- [18] C. Goiceanu and R. Dănulescu, "Principles and methods of measuring environmental levels of high-frequency electromagnetic fields", *Journal of Preventive Medicine*, Vol. 14, No. 3-4, pp. 79-86, 2006.
- [19] P. Bienkowski, H. Trzaska and B. Zubrzak, "Methods of the electromagnetic fields intensity level assessment and monitoring in the environment", *IEEE 21st International Conference Radioelektronika*, Brno, Czech Republic, 19-20 April 2011, pp. 1-4.
- [20] Narda Safety Test Solutions GmbH, *NBM-550 Broadband Field Meter User's Guide*, 2006.
- [21] Rohde & Schwarz vebisajt, https://www.rohde-schwarz.com/us/product/ts-emf-productstartpage_63493-8174.html (stranica posećena u septembru 2017).
- [22] A. Y. Teşneli, N. B. Teşneli and B. A. H. A. Kanberoğlu, "Measurements of Electromagnetic Radiation in an urban environment", *6th International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields*, Bodrum, Turkey, 10-14 October 2010, pp. 1-6, dostupno na stranici: <http://memberfiles.freewebs.com/14/16/50451614/documents/MEASUREMENTS%20OF%20ELECTROMAGNETIC%20RADIATION.pdf> (stranica posećena u septembru 2017).
- [23] International commission on non-ionizing radiation protection (ICNIRP) – "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)", <http://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPemfgdl.pdf>, 1998 (stranica posećena u septembru 2017).
- [24] C. Gabriel, S. Gabriel and E. Corthout, "The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey", *Physics in medicine and biology*, Vol. 41, No. 11, pp. 2231–2249, 1996.
- [25] ITU-T K.83, Recommendation ITU-T K.83 – Monitoring of electromagnetic field levels – Amendment 1: Updates to the Introduction and Appendix I of ITU-T K.83, 07/2014.
- [26] N. Djuric, D. Kljajic, K. Kasas-Lazetic, M. Milutinov, M. Prsa, V. Bajovic, N. Pekaric-Nadj and V. Milosevic, "The concept of the SEMONT monitoring system and its influence on the EM pollution protection," *IEEE AFRICON 2013 Conference*, Mauritius, 9-12 September 2013, pp. 1298-1302.
- [27] Serbian Electromagnetic Field Monitoring Network – SEMONT vebisajt, <http://semont.ftn.uns.ac.rs> (stranica posećena u septembru 2017).
- [28] J. T. Rowley and K. H. Joyner, "Comparative international analysis of radiofrequency exposure surveys of mobile communication radio base stations", *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, Vol. 22, Issue 3, pp. 304-315, 2012.
- [29] P. Gajšek, P. Ravazzani, J. Wiart, J. Grellier, T. Samaras and G. Thuróczy, "Electromagnetic field exposure assessment in Europe radiofrequency fields (10 MHz–6 GHz)", *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, Vol. 25, Issue 1, pp. 37–44, 2015.
- [30] M. Prsa, V. Milosevic, A. Juhas, K. Kasas-Lazetic, D. Herceg, N. Djuric i M. Milutinov, "Detaljna analiza uticaja na zivotnu sredinu GSM bazne stanice Novi Sad – Liman 2 kompanije 063 Mobtel Srbija", *Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija*, April, 2004.
- [31] J. Beekhuizen, R. Vermeulena, H. Kromhouta, A. Bürgib and A. Huss, "Geospatial modelling of electromagnetic fields from mobile phone base stations", *Science of the Total Environment*, Vol. 445-446, pp. 202-209, 2013.
- [32] A. L. Martens, J. F. Bolte, J. Beekhuizen, H. Kromhout, T. Smid, and R. C. Vermeulen, "Validity of at home model predictions as a proxy for personal exposure to radiofrequency electromagnetic fields from mobile phone base stations", *Environmental Research*, Vol. 142, pp. 221-226, 2015, doi:10.1016/j.envres.2015.06.029.
- [33] A. L. Martens, P. Slottje, M. Y. Meima, J. Beekhuizen, D. Timmermans, H. Kromhout, T. Smid and R. C. Vermeulen, "Residential exposure to RF-EMF from mobile phone base stations: Mo-

- del predictions versus personal and home measurements”, *Science of the Total Environment*, Vol. 550, pp. 987-993, 2016.
- [34] B. D. Popović, “Osnovi elektrotehnike 1”, četrnaesto izdanje, Akademska misao, Beograd, 2005.
- [35] B. D. Popović, “Elektromagnetika”, sedmo izdanje, Akademska misao, Beograd, 2004.
- [36] S. I. Henderson and M. J. Bangay, “Survey of RF exposure levels from mobile telephone base stations in Australia”, *Bioelectromagnetics*, Vol. 27, Issue 1, pp. 73-76, 2006.
- [37] I. Popescu and P. Constantinou, “Review of EMR monitoring systems developed by the Mobile Radiocommunications Laboratory, National technical University of Athens”, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, Vol. 11, No. 3, pp. 435-455, 2014, doi:10.2298/sjee1403435p.
- [38] E. Lunca and A. Salceanu, “An overview of RF-EMF monitoring systems and associated monitoring data”, *IEEE 2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*, Iasi, Romania, 20-22 October 2016, pp. 418-421.
- [39] F. Gkonis, A. Boursianis and T. Samaras, “Assessment of General Public Exposure to LTE signals compared to other Cellular Networks Present in Thessaloniki, Greece”, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 157, Issue 3, pp. 388-393, 2017, doi:10.1093/rpd/ncw362.
- [40] I. Calvente, M. F. Fernández, R. Pérez-Lobato, C. Dávila-Arias, O. Ocón, R. Ramos, S. Ríos-Arrabal, J. Villalba-Moreno, N. Oleaa and M.I. Núñez, “Outdoor characterization of radio frequency electromagnetic fields in a Spanish birth cohort”, *Environmental research*, Vol. 138, pp. 136-143, 2015, doi: 10.1016/j.envres.2014.12.013.
- [41] W. Joseph, L. Verloock, F. Goeminne, G. Vermeeren and L. Martens, “Assessment of RF exposures from emerging wireless communication technologies in different environments”, *Health Physics*, Vol. 102, Issue 2, pp. 161-172, 2012.
- [42] J. F. Viel, M. Tiv, M. Moissonnier, E. Cardis and M. Hours, “Variability of radiofrequency exposure across days of the week: A population-based study”, *Environmental research*, Vol. 111, Issue 4, pp. 510-513, 2011.
- [43] L. Seyfi, “Measurement of electromagnetic radiation with respect to the hours and days of a week at 100 kHz – 3 GHz frequency band in a Turkish dwelling”, *Measurement*, Vol. 46, Issue 9, pp. 3002-3009, 2013.
- [44] D. Urbinello, W. Joseph, L. Verloock, L. Martens and M. Rössli, “Temporal trends of radio-frequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure in everyday environments across European cities”, *Environmental research*, Vol. 134, pp. 134-142, 2014.
- [45] L. Verloock, W. Joseph, F. Goeminne, L. Martens, M. Verlaek and K. Constandt, “Temporal 24-hour assessment of radio frequency exposure in schools and homes”, *Measurement*, Vol. 56, pp. 50-57, 2014.
- [46] C. K. Azah, J. K. Amoako and J. J. Fletcher, “Levels of electric field strength within the immediate vicinity of FM radio stations in Accra, Ghana”, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 156, Issue 4, pp. 395-400, 2013, doi:10.1093/rpd/nct089.
- [47] P. Deatanyah, J. K. Amoako, J. J. Fletcher, G. O. Asiedu, D. N. Adjei, G. O. Dwapanyin and E. A. Amoatey, “Assessment of radiofrequency radiation within the vicinity of some GSM base stations in Ghana”, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 151, Issue 2, pp. 218-223, 2012, doi:10.1093/rpd/ncr474.
- [48] F. S. R. Pinheiro, T. M. O. Maranhão, M. B. Filho, M. E. C. Rodrigues, G. S. Silva, T. P. Sousa, M. A. B. Sanchis, A. L. S. Câmara, J. P. S. Gonçalo and A. A. C. C. Braga, “Assessment of non-ionizing radiation from radio frequency energy emitters in the urban area of Natal City, Brazil”, *Scientific Research and Essays*, Vol. 10, No. 2, pp. 79-85, 2015, doi: 10.5897/SRE2014.6025.

- [49] A. Lahham and A. Hammash, "Outdoor radiofrequency radiation levels in the West Bank – Palestine", *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 149, Issue 4, pp. 399–402, 2012, doi:10.1093/rpd/ncr354.
- [50] A. Lahham, A. Sharabati and H. ALMasri, "Assessment of Public Exposure From WLANs in the West Bank Palestine", *Radiation Protection Dosimetry*, 3 March 2017, pp. 1–5, doi:10.1093/rpd/ncx028.
- [51] K. Karipidis, S. Henderson, D. Wijayasinghe, L. Tjong and R. Tinker, "Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields From Wi-Fi in Australian Schools", *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 175, Issue 4, pp. 432-439, 2017, doi:10.1093/rpd/ncw370.
- [52] N. Pasquino and R. S. L. Moriello, "A critical note to the standard procedure for assessing exposure to GSM electromagnetic field", *Measurement*, Vol. 73, pp. 563-575, 2015.
- [53] F. C. Kunter, "Students Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields in Marmara University", *Marmara Science Journal*, Vol. 27, No. 1, pp. 32-36, 2015, doi:http://dx.doi.org/10.72-40/mufbed.70492.
- [54] C. Temaneh-Nyah and E. Victor, "RF radiation exposure levels from the Valombola base station, in the faculty of engineering and IT vicinity, Ongwediva, Namibia", *IEEE 2015 International Conference on Emerging Trends in Networks and Computer Communications (ETNCC)*, Windhoek, Namibia, 17-20 May 2015, pp. 27-31.
- [55] Ç. Kurnaz, B. K. Engiz and M. C. Bozkurt, "Monitoring of RF/Microwave Field Strength at Schools in a Pilot District in Samsun/Turkey", *IEEE 16th Mediterranean Microwave Symposium (MMS)*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 14-16 November 2016, pp. 1-4.
- [56] W. Joseph, L. Verloock, F. Goeminne, M. Verlaek, K. Constandt and L. Martens, "In-situ RF exposure in schools, houses, and public places", *Joint Meeting of the Bioelectromagnetics Society and the European BioElectromagnetics Association (BioEM 2014)*, Cape Town, South Africa, 8-13 June 2014, pp. 427-430.
- [57] L. Verloock, W. Joseph, F. Goeminne, L. Martens, M. Verlaek and K. Constandt, "Assessment of radio frequency exposures in schools, homes, and public places in Belgium", *Health physics*, Vol. 107, Issue 6, pp. 503-513, 2014.
- [58] SATIMO vebisajt, <http://www.satimo.com/taxonomy/term/7> (stranica posećena u septembru 2017).
- [59] Personal Exposure Meter – EME SPY 120, <http://www.next-up.org/pdf/DosimetreEtudeAFS-SET2007.pdf>, (stranica posećena u septembru 2017)
- [60] D. Urbinello, A. Huss, J. Beekhuizen, R. Vermeulen and M. Rössli, "Use of portable exposure meters for comparing mobile phone base station radiation in different types of areas in the cities of Basel and Amsterdam", *Science of the Total Environment*, Vol. 468-469, pp. 1028-1033, 2014.
- [61] J. F. Bolte and T. Eikelboom, "Personal radiofrequency electromagnetic field measurements in the Netherlands: Exposure level and variability for everyday activities, times of day and types of area", *Environment International*, Vol. 48, pp. 133-142, 2012.
- [62] J. F. Viel, E. Cardis, M. Moissonnier, R. De Seze and M. Hours, "Radiofrequency exposure in the French general population: band, time, location and activity variability", *Environment international*, Vol. 35, Issue 8, pp. 1150-1154, 2009, doi:10.1016/j.envint.2009.07.007.
- [63] D. Urbinello, W. Joseph, A. Huss, L. Verloock, J. Beekhuizen, R. Vermeulen, L. Martens and M. Rössli, "Radio-frequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure levels in different European outdoor urban environments in comparison with regulatory limits", *Environment International*, Vol. 68, pp 49–54, 2014, <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2014.03.007>.

- [64] C. R. Bhatt, A. Thielens, M. Redmayne, M. J. Abramson, B. Billah, M. R. Sim, R. Vermeulen, L. Martens, W. Joseph and G. Benke, "Measuring personal exposure from 900 MHz mobile phone base stations in Australia and Belgium using a novel personal distributed exposimeter", *Environment international*, Vol. 92-93, pp. 388-397, 2016.
- [65] National Observatory of Electromagnetic Fields, https://paratiritirioemf.eeae.gr/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=287&lang=en (stranica posećena u septembru 2017).
- [66] Romanian National Authority for Management and Regulation in Communications (ANCOM), <http://www.monitor-emf.ro/index.php/en/map> (stranica posećena u septembru 2017).
- [67] D. S. Šuka, M. I. Simić and P. V. Pejović, "Aspects of remote monitoring and recording system of non-ionizing electromagnetic radiation", *IEEE 38th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, MIPRO 2015*, Opatija, Croatia, 25-29 May 2015, pp. 536-540.
- [68] A. Gotsis, N. Papanikolaou, D. Komninos, A. Yalofas and P. Constantinou, "Non-ionizing electromagnetic radiation monitoring in Greece", *Annals of Telecommunications*, Vol. 63, Issue 1-2, pp. 109-123, 2008.
- [69] C. Oliveira, D. Sabastiao, G. Carpinteiro, L. M. Correia, C. A. Fernandes, A. Serralha and N. Marques, "The MoniT project: electromagnetic radiation exposure assessment in mobile communications", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 49, Issue 1, pp. 44-53, 2007.
- [70] Boyan Kehayov, "Automated System for Measurement and Visualization of Electromagnetic Field in GSM 900, GSM 1800 and UMTS 2100 Bands", *XII International PhD Workshop OWD 2010*, Wisla, Poland, 23-26 October 2010, pp 218-220.
- [71] F. Troisi, M. Boumis and P. Grazioso, "The Italian national electromagnetic field monitoring network", *Annals of Telecommunications*, Vol. 63, Issue 1-2, pp. 97-108, 2008.
- [72] A. Manassas, A. Boursianis, T. Samaras and J. N. Sahalos, "Continuous electromagnetic radiation monitoring in the environment: analysis of the results in Greece", *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 151, Issue 3, pp. 437-442, 2012, DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncs028>.
- [73] Narda GmbH, AMB-8059 Multi-band EMF Area Monitor User's Manual, 2015. http://www.gruppompb.com/public/upload/AMB-8059-V-1_14.pdf (stranica posećena u septembru 2017).
- [74] Wavecontrol vebsajt, <http://www.wavecontrol.com/rfsafety/en/products/monitem> (stranica posećena u septembru 2017).
- [75] J. Estenberg and T. Augustsson, "Extensive frequency selective measurements of radiofrequency fields in outdoor environments performed with a novel mobile monitoring system", *Bioelectromagnetics*, Vol. 35, Issue 3, 227-230, 2014.
- [76] M. Cansiz, T. Abbasov, M. B. Kurt and A. R. Celik, "Mapping of radio frequency electromagnetic field exposure levels in outdoor environment and comparing with reference levels for general public health", *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 2 November 2016, pp. 1-5, 2016, doi:10.1038/jes.2016.64.
- [77] M. Cansiz, T. Abbasov, M. B. Kurt and A. R. Celik, "Mobile measurement of radiofrequency electromagnetic field exposure level and statistical analysis", *Measurement*, Vol. 86, pp. 159-164, 2016.
- [78] Wavecontrol vebsajt, <http://www.wavecontrol.com/rfsafety/en/products/mapem> (stranica posećena u septembru 2017).
- [79] ITU-T K.113, Recommendation ITU-T K.113 – Generation of radio-frequency electromagnetic field level maps, 11/2015.
- [80] S. S. Durduran, O. Uygunol and L. Seyfi, "Mapping of electromagnetic pollution at 1800 MHz GSM (global system for mobile communication) frequency in Konya", *Scientific Research and Essays*, Vol. 5, No. 18, pp. 2664-2672, 2010.

- [81] W. Joseph, L. Verloock, F. Goeminne, G. Vermeeren and L. Martens, "In situ LTE exposure of the general public: Characterization and extrapolation", *Bioelectromagnetics*, Vol. 33, Issue 6, pp. 466-475, 2012.
- [82] E. Lunca, C. Damian and A. Salceanu, "EMF exposure measurements on 4G/LTE mobile communication networks", *IEEE 2014 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*, Iasi, Romania, 16-18 October 2014, pp. 545-548.
- [83] N. Djuric and D. Kljajic, "Assessment of Daily Exposure in the Broadband Continuous Monitoring System – SEMONT," *IEEE AFRICON 2013 Conference*, Mauritius, 9-12 September 2013 pp. 903-907.
- [84] D. Kljajic, N. Djuric, K. Kasas-Lazetic and D. Antic, "Adaptive Boundary Approach for EMF Exposure Assessment in Broadband Measurements", *Progress In Electromagnetics Research Symposium – PIERS 2015*, Prague, Czech Republic, 6–9 July 2015, *The Electromagnetics Academy, PIERS 2015 Proceedings*, pp. 1889-1892.
- [85] D. Kljajic and N. Djuric, "The adaptive boundary approach for exposure assessment in a broadband EMF monitoring", *Measurement*, Volume 93, pp. 515–523, 2016, DOI:10.1016/j.measurement.2016.07.055.
- [86] N. Djuric and N. Kavecán, "Internet portal of the SEMONT information network for the EM field monitoring," *The 4th International Conference on Advances in Future Internet – AFIN 2012*, Rome, Italy, 19–24 August 2012, pp. 55-59 (rad nagrađen kao najbolji na konferenciji).
- [87] N. Djuric, D. Kljajic, K. Kasas-Lazetic and V. Bajovic, "The SEMONT EM Field Register Support for the Assessment of Daily Exposure Limits", *IEEE 11th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics – SISY 2013*, Subotica, Serbia, 26-28 September 2013, pp. 305-308.
- [88] N. Djuric, D. Kljajic, K. Kasas-Lazetic and V. Bajovic, "The SEMONT continuous monitoring of daily EMF exposure in an open area environment", *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 187, Issue 4, pp. 1-17, 2015, DOI: 10.1007/s10661-015-4395-8.
- [89] Narda Safety Test Solutions GmbH, EF 0691 Electric Field User's Guide, 2006.
- [90] D. Kljajic, N. Djuric and K. Kasas-Lazetic, "The SEMONT information network for intelligent EM field continuous monitoring", *IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications – CIVEMSA 2013*, Milan, Italy, 15–17 July 2013, pp. 126-131.
- [91] N. Djuric, D. Kljajic, K. Kasas-Lazetic and V. Bajovic, "The measurement procedure in the SEMONT monitoring system", *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 186, Issue 3, pp. 1865-1874, 2014, DOI: 10.1007/s10661-013-3500-0.
- [92] Rohde & Schwarz FSH3 Handheld Spectrum Analyzer, Operating Manual, 2010, http://www.et-sist.upm.es/estaticos/catedra-coitt/web_salud_medioamb/equipos_medida/equipos_nuevos/manuales/manual%20FSH3_operacion_ingles.pdf (stranica posećena u septembru 2017).
- [93] A. S. Safigianni and C. G. Tsompanidou, "Electric- and magnetic-field measurements in an outdoor electric power substation", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 24, No. 1, pp. 38-42, 2009.
- [94] L. Korpinen, H. Kuusti, R. Pääkkönen, P. Vanhala and J. Elovaara, "Occupational exposure to electric and magnetic fields while working at switching and transforming stations of 110 kV", *Annals of occupational hygiene*, Vol. 55, Issue 5, pp. 526-536, 2011.
- [95] D. Kljajic, N. Djuric, J. Bjelica, M. Milutinov, K. Kasas-Lazetic and D. Antic, "Utilization of the boundary exposure assessment for the broadband low-frequency EMF monitoring", *Measurement*, Volume 100, pp. 110–114, 2017, DOI:10.1016/j.measurement.2016.12.061.

- [96] N. Djuric, J. Bjelica, D. Kljajic, M. Milutinov, K. Kasas-Lazetic and D. Antic, "The SEMONT Continuous Monitoring and Exposure Assessment for the Low-frequency EMF", IEEE International Conference on Emerging Technologies and Innovative Business Practices for the Transformation of Societies, EmergiTech 2016, Mauritius, 3-6 August 2016, pp. 1-6.
- [97] N. Djuric, J. Bjelica, D. Kljajic, M. Milutinov, K. Kasas-Lazetic and D. Antic, "The SEMONT Network Utilization for the Low-frequency EMF Monitoring", IEEE 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications – MIKON 2016, Krakow, Poland, 9-11 May 2016, pp. 1-6.
- [98] Nivoi električnih i magnetskih polja koja stvaraju sistemi za napajanje naizmjeničnom strujom – Postupci merenja u pogledu opšte izloženosti, SRPS EN 62110:2011/AC:2015, 2015 (prevod međunarodnog standarda *Electric and magnetic field levels generated by AC power systems – Measurement procedures with regard to public exposure*, EN 62110:2011).
- [99] EFA 300 EM Field Analyzer Operating Manual, http://www.narda-sts.us/pdf_files/DataSheets/-EFA300_DataSheet.pdf (stranica posećena u septembru 2017).
- [100] M. Milutinov, N. Djuric, D. Miskovic and D. Knezevic, "Utilization of the EFA-300 field meter into the SEMONT information network", 11th International Conference on Applied Electromagnetics – PES 2013, Nis, Serbia, 1–4 September 2013, pp. 1-4.
- [101] M. Milutinov, A. Juhas and M. Prsa, "Electric and magnetic field in vicinity of overhead multi-line power system", 2nd International Conference on Modern Power Systems – MPS 2008, Cluj-Napoca, Romania, 12-14 November 2008, Acta Electrotehnica, Special Issue, pp. 313-316.
- [102] "EPS Distribucija – Regionalni centar Elektrovojdina", <http://www.elektrovojdina.rs>, (stranica posećena u septembru 2017).
- [103] J. M. Paniagua, M. Rufo, A. Jiménez, F.T. Pachón and J. Carrero, "Exposure estimates based on broadband ELF magnetic field measurements versus the ICNIRP multiple frequency rule", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 163, Issue 2, pp. 173–180, 2015, doi: 10.1093/rpd/ncu175.
- [104] D. Kljajić i N. Đurić, "Metod procene izloženosti električnim poljima visokih frekvencija baziran na adaptivnim granicama izloženosti", Tehničko rešenje, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija, Septembar 2016.
- [105] D. Kljajić i N. Đurić, "Metod procene izloženosti magnetskim poljima niskih frekvencija baziran na adaptivnim granicama izloženosti", Tehničko rešenje, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija, Februar 2017.
- [106] S. M. Mann, T. G. Cooper, S. G. Allen, R. P. Backwell and A. J. Lowe, "Exposure to Radio Waves near Mobile Phones Base Stations", National Radiological Protection Board NPRB, June 2000.

Prilog 1

U slučaju kada se vrše merenja nivoa električnog polja visokih frekvencija, primenom frekvencijski selektivnog mernog pristupa, procena izloženosti se obavlja prema ICNIRP-ovoj preporuci i kriterijumu (1). U tom slučaju se vrednost referentnog graničnog nivoa vektora jačine električnog polja, E_{Li} , menja po frekvencijama.

Sa druge strane, u slučaju širokopojasnog merenja, primena predloženog metoda procene izloženosti podrazumeva odabir najmanjeg mogućeg, $E_{ref\ min}$, i najvećeg mogućeg, $E_{ref\ max}$, referentnog graničnog nivoa, u posmatranom frekvencijskom opsegu, od f_{min} do f_{max} . Ovi referentni nivoi se kasnije koriste za proračun granica izloženosti, primenom izraza (3).

Imajući u vidu ovu činjenicu, mora da važi da je:

$$E_{ref\ min} \leq E_{Li} \quad i \quad E_{Li} \leq E_{ref\ max}, \quad (20)$$

za bilo koju vrednost frekvencije i , u posmatranom opsegu.

Ukoliko sa E_i obeležimo vrednost intenziteta vektora jačine električnog polja izmerenu na i -toj frekvenciji, primenom frekvencijski selektivnog mernog pristupa, a sa E_m vrednost dobijenu širokopojasnim merenjem, pri čemu važi da je:

$$E_m = \sqrt{\sum_{i=f_{min}}^{f_{max}} E_i^2}, \quad (21)$$

tada sledi da je:

$$\begin{aligned} \sum_{i=f_{min}}^{f_{max}} \left(\frac{E_i}{E_{Li}} \right)^2 &\leq \sum_{i=f_{min}}^{f_{max}} \left(\frac{E_i}{E_{ref\ min}} \right)^2 = \sum_{i=f_{min}}^{f_{max}} \frac{E_i^2}{E_{ref\ min}^2} = \frac{1}{E_{ref\ min}^2} \sum_{i=f_{min}}^{f_{max}} E_i^2 = \frac{E_m^2}{E_{ref\ min}^2} = \left(\frac{E_m}{E_{ref\ min}} \right)^2 = GER_{gornje}, \\ \sum_{i=f_{min}}^{f_{max}} \left(\frac{E_i}{E_{Li}} \right)^2 &\geq \sum_{i=f_{min}}^{f_{max}} \left(\frac{E_i}{E_{ref\ max}} \right)^2 = \sum_{i=f_{min}}^{f_{max}} \frac{E_i^2}{E_{ref\ max}^2} = \frac{1}{E_{ref\ max}^2} \sum_{i=f_{min}}^{f_{max}} E_i^2 = \frac{E_m^2}{E_{ref\ max}^2} = \left(\frac{E_m}{E_{ref\ max}} \right)^2 = GER_{donje}, \end{aligned} \quad (22)$$

odnosno:

$$GER_{donje} = \left(\frac{E_m}{E_{ref\ max}} \right)^2 \leq \sum_{i=f_{min}}^{f_{max}} \left(\frac{E_i}{E_{Li}} \right)^2 \leq GER_{gornje} = \left(\frac{E_m}{E_{ref\ min}} \right)^2, \quad (23)$$

što potvrđuje činjenicu da se stvarna izloženost električnom polju sigurno nalazi negde između granica izloženosti, odnosno da je:

$$GER_{donje} \leq GER_{stvarno} \leq GER_{gornje}. \quad (24)$$

Prilog 2

Nacionalnim pravilnicima Republike Srbije su propisane granice izlaganja nejonizujućim zračenjima, odnosno definisana su bazična ograničenja i referentni granični nivoi izlaganja stanovništva električnim, magnetskim i EM poljima različitih frekvencija. Ove dve kategorije granica izlaganja imaju različite vrednosti za opštu populaciju [10] i profesionalno osoblje [16].

U okviru ovog priloga su date vrednosti referentnih graničnih nivoa, koji služe za praktičnu procenu izloženosti na osnovu rezultata merenja pojedinih fizičkih veličina. Vrednosti referentnih graničnih nivoa za opštu populaciju su propisane „Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućeg zračenja“ [10] i date su u tabeli 28.

| Frekvencija f | Jačina električnog polja E (V/m) | Jačina magnetskog polja H (A/m) | Gustina magnetskog fluksa B (μ T) | Gustina snage (ekvivalentnog ravnog talasa) S_{ekv} (W/m ²) | Vreme uprosecenja t (minuta) |
|-----------------|------------------------------------|-----------------------------------|--|--|--------------------------------|
| < 1 Hz | 5600 | 12800 | 16000 | – | – |
| 1 – 8 Hz | 4000 | $12800/f^2$ | $16000/f^2$ | – | – |
| 8 – 25 Hz | 4000 | $1600/f$ | $2000/f$ | – | – |
| 0,025 – 0,8 kHz | $100/f$ | $1,6/f$ | $2/f$ | – | – |
| 0,8 – 3 kHz | $100/f$ | 2 | 2,5 | – | – |
| 3 – 100 kHz | 34,8 | 2 | 2,5 | – | – |
| 100 – 150 kHz | 34,8 | 2 | 2,5 | – | 6 |
| 0,15 – 1 MHz | 34,8 | $0,292/f$ | $0,368/f$ | – | 6 |
| 1 – 10 MHz | $34,8/f^{1/2}$ | $0,292/f$ | $0,368/f$ | – | 6 |
| 10 – 400 MHz | 11,2 | 0,0292 | 0,0368 | 0,326 | 6 |
| 400 – 2000 MHz | $0,55 f^{1/2}$ | $0,00148 f^{1/2}$ | $0,00184 f^{1/2}$ | $f/1250$ | 6 |
| 2 – 10 GHz | 24,4 | 0,064 | 0,08 | 1,6 | 6 |
| 10 – 300 GHz | 24,4 | 0,064 | 0,08 | 1,6 | $68/f^{1,05}$ |

Tabela 28. Referentni granični nivoi za opštu populaciju, prema pravilniku [10].

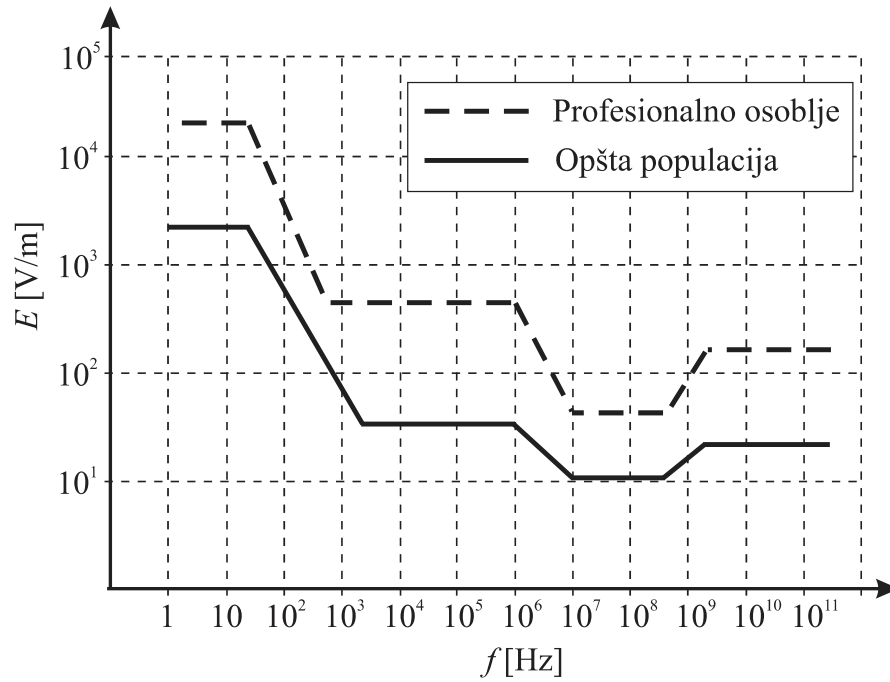
Sa druge strane, nacionalnim „Pravilnikom o preventivnim merama za bezbedan i zdrav rad pri izlaganju elektromagnetskom polju“ [16] definišu se vrednosti referentnih graničnih nivoa za profesionalno osoblje. Ove vrednosti su predstavljene u tabeli 29.

| Frekvencija f | Jačina električnog polja E (V/m) | Jačina magnetskog polja H (A/m) | Gustina magnetskog fluksa B (μ T) | Gustina snage (ekvivalentnog ravnog talasa) S_{ekv} (W/m^2) | Struja dodira, I_C (mA) | Indukovana struja uda, I_L (mA) |
|------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--|--|---------------------------|-----------------------------------|
| < 1 Hz | – | $1,63 \times 10^5$ | 2×10^5 | – | 1,0 | – |
| 1 – 8 Hz | 20000 | $1,63 \times 10^5 / f^2$ | $2 \times 10^5 / f^2$ | – | 1,0 | – |
| 8 – 25 Hz | 20000 | $2 \times 10^4 / f$ | $2,5 \times 10^4 / f$ | – | 1,0 | – |
| 0,025 – 0,82 kHz | $500 / f$ | $20 / f$ | $25 / f$ | – | 1,0 | – |
| 0,82 – 2,5 kHz | 610 | 24,4 | 30,7 | – | 1,0 | – |
| 2,5 – 65 kHz | 610 | 24,4 | 30,7 | – | $0,4 f$ | – |
| 65 – 100 kHz | 610 | $1600 / f$ | $2000 / f$ | – | $0,4 f$ | – |
| 0,1 – 1 MHz | 610 | $1,6 / f$ | $2 / f$ | – | 40 | – |
| 1 – 10 MHz | $610 / f$ | $1,6 / f$ | $2 / f$ | – | 40 | – |
| 10 – 110 MHz | 61 | 0,16 | 0,2 | 10 | 40 | 100 |
| 110 – 400 MHz | 61 | 0,16 | 0,2 | 10 | – | – |
| 400 – 2000 MHz | $3 f^{1/2}$ | $0,008 f^{1/2}$ | $0,01 f^{1/2}$ | $f/40$ | – | – |
| 2 – 300 GHz | 137 | 0,36 | 0,45 | 50 | – | – |

Tabela 29. Referentni granični nivoi za profesionalno osoblje, prema pravilniku [16].

Na osnovu podataka iz tabela 28 i 29 se može videti da su vrednosti referentnih graničnih nivoa različito definisane u pojedinim frekvencijskim opsezima. U nekim od ovih opsega su vrednosti konstantne, dok su u nekim funkcija frekvencije f .

Promene vrednosti referentnih graničnih nivoa vektora jačine električnog polja u zavisnosti od frekvencije su prikazane na slici 51.



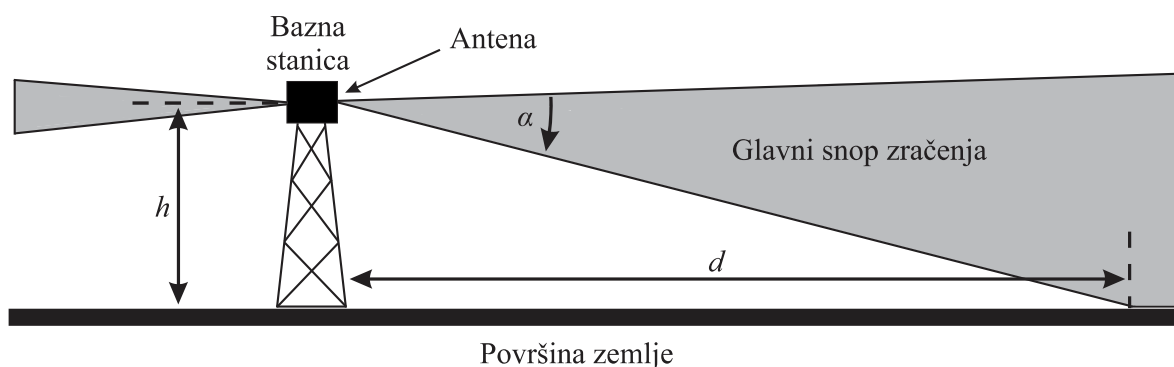
Slika 51. Grafik promene referentnih graničnih nivoa vektora jačine električnog polja u funkciji frekvencije f .

Vrednosti frekvencija na horizontalnoj osi, kao i vrednosti referentnih graničnih nivoa vektora jačine električnog polja na vertikalnoj osi, su predstavljene u logaritamskoj razmeri.

Prilog 3

Tehničke karakteristike GSM baznih stanica, prisutnih u okolini merne lokacije broj 6, su date u okviru studije [30]. U njima se nalaze podaci o tipu instaliranih antena, visini njihove postavke i azimutima glavnih snopova zračenja antena. Dodatno, date su i vrednosti uglova nagiba glavnih snopova zračenja ka površi zemlje, mehaničkim putem (mehanički *down-tilt*) i električnim putem (električni *down-tilt*).

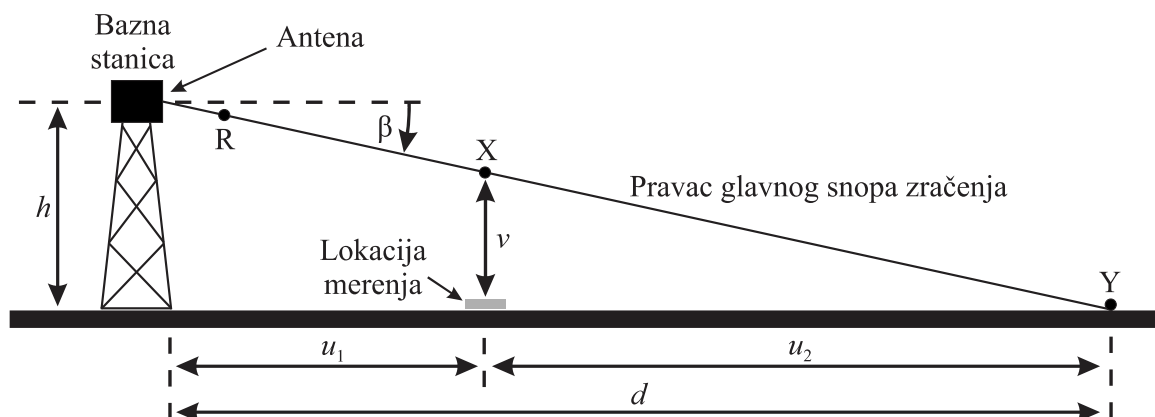
Na osnovu ovih podataka je izvršen proračun udaljenosti karakterističnih tačaka od interesa od samih antena, dok je proračun intenziteta vektora jačine električnog polja u tim tačkama obavljen uz pomoć dijagrama zračenja obe GSM antene. Prilikom proračuna, fokus je bio upravo na pravcima glavnih snopova zračenja GSM antena, za koje je utvrđeno da se ukrštaju iznad merne lokacije, prelazeći iznad nje na različitim visinama. Pojednostavljeni prikaz dijagrama zračenja jedne GSM antene u vertikalnoj ravni je dat na slici 52.



Slika 52. Dijagram zračenja GSM antene u vertikalnoj ravni.

Visina postavke antene je na slici 52 obeležena sa h , dok je horizontalna udaljenost mesta postavke antene do mesta pada glavnog snopa zračenja na površ zemlje obeležena sa d . Širina dijagrama zračenja u vertikalnoj ravni je definisana uglom α . Tipične vrednosti ovog ugla su od 5° do 10° , u zavisnosti od tipa antene [106]. Izgled dijagrama zračenja u vertikalnoj ravni takođe zavisi i od vrednosti mehaničkog i električnog *down-tilt*-a antene.

Na osnovu visine instalacije i nagiba glavnih snopova zračenja GSM antena je obavljen proračun udaljenosti karakterističnih tačaka od interesa. Pojednostavljeni prikaz tih tačaka u okolini jedne GSM antene je dat na slici 53.



Slika 53. Udaljenosti karakterističnih tačaka od interesa od GSM antene.

Ugao β na slici 53 predstavlja ukupni nagib glavnog snopa zračenja antene ka površi zemlje (mehanički plus električni *down-tilt*). Udaljenost lokacije merenja od antene je obeležena sa u_1 . Ova vrednost je određena nakon vizuelne inspekcije okoline lokacije merenja. Visina na kojoj glavni snop zračenja prolazi iznad merne lokacije je obeležena sa v . Rastojanje između lokacije merenja i mesta pada glavnog snopa zračenja na površ zemlje je obeležena sa u_2 . Rezultati proračuna datih parametara su prikazani u tabeli 30 [30].

| | Sektor | β [°] | h [m] | d [m] | u_1 [m] | u_2 [m] | v [m] |
|----------|--------|-------------|---------|---------|-----------|-----------|---------|
| GSM 900 | Prvi | 6 | 39,5 | 375,82 | 187 | 188,82 | 19,85 |
| GSM 1800 | Prvi | 2 | 11,2 | 320,73 | 201 | 119,73 | 4,18 |

Tabela 30. Snopovi zračenja prvih sektora GSM antena [30].

Glavni snopovi zračenja prelaze iznad lokacije merenja na visinama od 19,85 i 4,18 metara. Stoga se može smatrati da su dovoljno udaljeni od pozicije čovekove glave, odnosno pozicije na kojoj se postavlja sonda mernog instrumenta. Međutim, ponekad je važno sagledati i vrednosti nivoa električnog polja na visinama prelaska glavnih snopova zračenja antena iznad lokacije merenja (u tački X na slici 53). S tim u vezi je obavljen i proračun intenziteta vektora jačine električnog polja na datim visinama.

Kod proračuna intenziteta vektora jačine električnog polja, važno je naglasiti da površinska gustina snage emitovanog talasa, S , opada sa kvadratom rastojanja, r , posmatrane tačke od centra antene [7], [106]. Ova snaga se računa primenom izraza:

$$S = \frac{P_a}{4\pi r^2} g(\phi, \theta), \quad (25)$$

gde je P_a snaga koja se dovodi anteni, dok je $g(\phi, \theta)$ usmereno pojačanje antene i predstavlja meru snage zračenja antene u smeru određenom uglovima ϕ i θ [7], [106]. U prethodnom izrazu S predstavlja površinsku gustinu snage u takozvanoj "dalekoj zoni" ili "zoni zračenja". Pod dalekom zonom se podrazumeva oblast koja se nalazi na udaljenosti od izvora koja je veća ili jednaka od nekoliko talasnih dužina emitovanog talasa [7].

U dalekoj zoni je veza između površinske gustine snage zračenja, S , i intenziteta vektora jačine električnog polja, E , data sledećim izrazom:

$$S = \frac{E^2}{Z}, \quad (26)$$

gde je Z karakteristična impedansa sredine (u ovom slučaju karakteristična impedansa vazduha, $Z_0 = 377 \Omega$) [7], [106].

Kombinovanjem izraza (25) i (26) se dobija izraz za proračun intenziteta vektora jačine električnog polja u tačkama od interesa:

$$E = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{Z_0 P_a g(\phi, \theta)}{4\pi}} = \frac{1}{r} \sqrt{30 P_a g(\phi, \theta)} = \frac{1}{r} \sqrt{30 EIRP \cdot TRU}, \quad (27)$$

gde $EIRP$ (*Effective Isotropic Radiated Power*) predstavlja efektivnu izračenu snagu, koja je jednaka proizvodu snage koja se dovodi anteni i dobitka antene, u datom smeru, u odnosu na izotropni radijator [106]. Parametar TRU (*Transceiver Unit*) je vezan za model antene koja se koristi i definisan je od strane proizvođača. Vrednosti ovih parametara su uzete u skladu sa tehničkom dokumentacijom GSM antena [30].

Rezultati proračuna intenziteta vektora jačine električnog polja u tački X (mesto prelaska glavnog snopa zračenja antene iznad lokacije merenja), na rastojanju r_X , i tački Y (mesto pada glavnog snopa zračenja na površ zemlje), na rastojanju r_Y , koji potiču od obe antene, dati su u tabeli 31.

| | $EIRP \cdot TRU$ [W] | r_X [m] | E u tački X [V/m] | r_Y [m] | E u tački Y [V/m] |
|----------|----------------------|-----------|---------------------|-----------|---------------------|
| GSM 900 | 1238,96 | 188,03 | 1,03 | 377,89 | 0,51 |
| GSM 1800 | 2148,12 | 201,12 | 1,26 | 320,93 | 0,79 |

Tabela 31. Intenzitet vektora jačine električnog polja u tačkama od interesa.

Na osnovu rezultata datih u tabeli 31, zaključak je da su vrednosti intenziteta vektora jačine električnog polja u posmatranim tačkama dosta manje od najniže vrednosti propisane za referentne granične nivoe. Stoga je očekivano da će i rezultati merenja na mernoj lokaciji broj 6, na visini od 1,7 metara, biti dosta manji od najnižeg referentnog graničnog nivoa.

Na kraju je izvršen i proračun radijalne udaljenosti od same antene tačke R, u kojoj je intenzitet vektora jačine električnog polja jednak vrednosti minimalnog referentnog graničnog nivoa, za opseg frekvencija na kojima GSM antene emituju polje (*downlink* opseg). Primenom izraza (27) su dobijene vrednosti date u tabeli 32.

| | Frekvencijski opseg (<i>downlink</i>) [MHz] | $E_{ref\ min}$ [V/m] | r_R [m] |
|----------|---|----------------------|-----------|
| GSM 900 | 925 – 960 | 16,727 | 11,53 |
| GSM 1800 | 1805 – 1880 | 23,366 | 10,86 |

Tabela 32. Udaljenosti od GSM antena u kojima je intenzitet vektora jačine električnog polja jednak vrednosti minimalnog referentnog graničnog nivoa.

Dobijena rastojanja jasno ukazuju da su to pozicije u kojima se ljudi ne mogu nalaziti i stoga je za očekivati da će sve merene vrednosti, na rastojanjima značajno većim od ovih, biti ispod propisanih referentnih graničnih nivoa.