

АНАЛИЗА НИВОА МАГНЕТСКЕ ИНДУКЦИЈЕ У СТАНУ ИЗНАД ДИСТРИБУТИВНЕ ТРАНСФОРМАТОРСКЕ СТАНИЦЕ НАПОНСКОГ НИВОА 10/0,4 kV ПРЕ И ПОСЛЕ ПРИМЕНЕ МЕРА ЗАШТИТЕ

Маја ГРБИЋ¹, Александар ПАВЛОВИЋ
Универзитет у Београду, Електротехнички институт „Никола Тесла”, Београд, Република Србија

КРАТАК САДРЖАЈ

У раду су приказани резултати мерења магнетске индукције у стану који се налази изнад трансформаторске станице напонског нивоа 10/0,4 kV. Приликом првог испитивања нивоа нејонизујућег зрачења у поменутом стану измерени су значајни нивои магнетске индукције. На основу односа назначене струје трансформатора и струје у време мерења закључено је да би вредности магнетске индукције у делу стана који се налази непосредно изнад трансформаторске станице прекорачиле референтни ниво од 40 μT у случају оптерећења трансформатора назначеном струјом. На основу распореда опреме у трансформаторској станици и просторне расподеле магнетске индукције у стану закључено је да су доминантан извор магнетског поља у стану представљале шинске везе које су повезивале трансформатор и развод напонског нивоа 0,4 kV, које су се налазиле у близини плафона трансформаторске станице, тј. непосредно испод пода стана у коме су вршена испитивања. У циљу смањења вредности магнетске индукције у стану, примењене су мере заштите које су подразумевале замену поменутих шинских веза кабловским водовима који се простиру по поду просторије и постављање неколико заштитних екрана унутар трансформаторске станице. Након спровођења описаних мера заштите, испитивања магнетске индукције у стану су поновљена у циљу провере ефикасности ових мера. Резултати испитивања магнетске индукције пре и након примене мера заштите детаљно су приказани и анализирани.

Кључне речи: трансформаторска станица 10/0,4 kV, нејонизујуће зрачење, магнетска индукција, мера заштите, зона повећане осетљивости.

ABSTRACT

The results of magnetic flux density measurements carried out in an apartment located above a 10/0.4 kV substation are presented in this paper. During the first testing of non-ionizing radiation levels in the apartment, significant magnetic flux density levels were measured. On the basis of the ratio of the rated current to the current at the time of measurements, it was concluded that magnetic flux density values in the room of the apartment located directly above the substation would exceed the prescribed reference level of 40 μT in the case when the transformer is under the rated load conditions. Based on the equipment layout in the substation and the spatial distribution of the magnetic flux density in the apartment, it was concluded that the main source of the magnetic field in the apartment were the busbars, located near the ceiling of the substation, i.e. directly beneath the floor of the said apartment, connecting the transformer and the 0.4 kV switchboard. In order to reduce the magnetic flux density levels in the apartment, mitigation techniques entailing substitution of the busbars with cables placed on the floor of the substation, as well as installation of several metal shields inside the substation, were implemented. After the described mitigation techniques had been implemented, magnetic flux density testing in the apartment was repeated in order to ascertain the efficiency of these techniques. The results of magnetic flux density testing performed before and after the implementation of the mitigation techniques are presented in detail and analyzed.

Keywords: 10/0.4 kV substation, non-ionizing radiation, magnetic flux density, mitigation technique, area of increased sensitivity.

¹ maja.grbic@ieent.org

УВОД

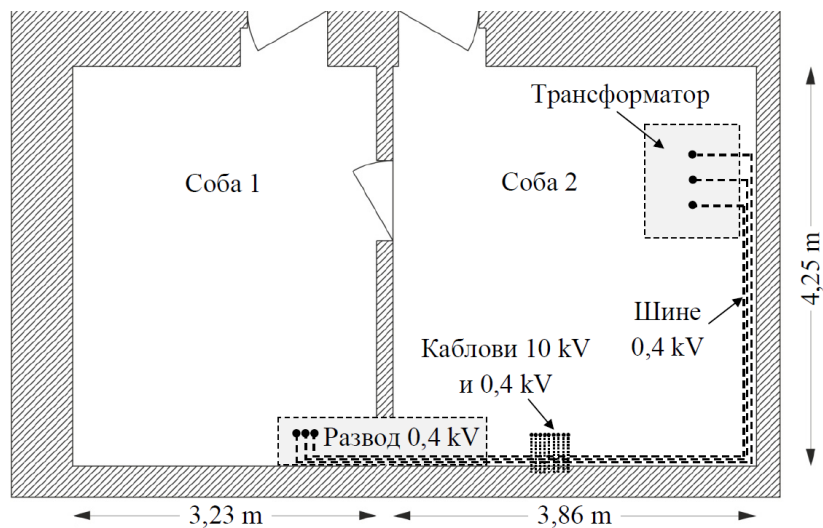
У раду су приказани резултати мерења магнетске индукције у стану који се налази изнад трансформаторске станице напонског нивоа 10/0,4 kV. Приликом првог испитивања нивоа нејонизујућег зрачења у поменутом стану измерени су значајни нивои магнетске индукције. На основу односа назначене струје трансформатора и струје у време мерења закључено је да би у случају оптерећења трансформатора назначеном струјом вредности магнетске индукције у делу стана који се налази непосредно изнад трансформаторске станице прекорачиле референтни ниво утврђен националним прописима. У циљу смањења вредности магнетске индукције у стану, примењене су мере заштите, након чега су испитивања поновљена. Резултати испитивања магнетске индукције пре и након примене мера заштите детаљно су приказани и анализирани.

КРАТАК ПРЕГЛЕД НАЦИОНАЛНЕ РЕГУЛАТИВЕ У ОБЛАСТИ ЗАШТИТЕ СТАНОВНИШТВА ОД НЕЈОНИЗУЈУЋИХ ЗРАЧЕЊА

Област заштите становништва од нејонизујућег зрачења правно је регулисана у Републици Србији током 2009. године, усвајањем Закона о заштити од нејонизујућих зрачења [1] и шест пратећих правилника, од којих су најважнији [2] и [3]. На тај начин су испуњени захтеви Препоруке 1999/519/ЕС [4], која представља оквир за уједначенију заштиту становништва од нејонизујућег зрачења, којег би требало да се придржавају све земље Европске уније приликом усвајања локалних прописа. Предмет уређивања Правилника [2] представља ограничење излагања становништва нејонизујућем зрачењу искључиво у тзв. „зонама повећане осетљивости”. Овим правилником утврђен је референтни гранични ниво излагања који за магнетску индукцију индустријске учестаности (50 Hz) износи 40 μT и односи се на зоне повећане осетљивости. Према [2,3] зоне повећане осетљивости су „подручја стамбених зона у којима се особе могу задржавати и до 24 сата дневно; школе, домови, предшколске установе, породилишта, болнице, туристички објекти, дечја игралишта; површине неизграђених парцела намењених, према урбанистичком плану, за наведене намене, у складу са препорукама Светске здравствене организације”. Правилник [3] дефинише и појам извора нејонизујућег зрачења од посебног интереса. Према [3] „изворима нејонизујућих зрачења од посебног интереса сматрају се извори електромагнетског зрачења који могу да буду штетни по здравље људи, а одређени су као стационарни и мобилни извори чије електромагнетно поље у зони повећане осетљивости достиже најмање 10% износа референтне, граничне вредности прописане за ту фреквенцију”. Према захтевима Правилника [3] власници извора од посебног интереса имају обавезу да на сваке четири године обезбеде периодично испитивање нивоа нејонизујућих зрачења које ови извори емитују.

ИЗВОР НЕЈОНИЗУЈУЋЕГ ЗРАЧЕЊА

Извор нејонизујућег зрачења представља трансформаторска станица напонског нивоа 10/0,4 kV, која је смештена у подруму стамбене зграде и налази се непосредно испод стана у коме су вршена испитивања. Положај опреме у трансформаторској станици у односу на стан приказан је на слици 1.



СЛИКА 1 – Положај опреме у трансформаторској станици у односу на стан

У просторији трансформаторске станице налази се трансформатор назначене снаге 1000 kVA, развод напонског нивоа 10 kV и развод напонског нивоа 0,4 kV. Распоред опреме у трансформаторској станици приказан је на слици 2. На основу распореда опреме закључено је да доминантан извор нејонизујућег зрачења у стану представљају шинске везе напонског нивоа 0,4 kV, које се налазе у близини плафона просторије трансформаторске станице, тј. непосредно испод пода стана.



СЛИКА 2 – Распоред опреме у трансформаторској станици

ПРВО ИСПИТИВАЊЕ

Испитивање нејонизујућег зрачења у стану извршено је путем мерења ефективних вредности магнетске индукције на великом броју мерних места. Мерења су извршена у складу са захтевима стандарда [5–7]. Истовремено са мерењем магнетске индукције мерена је и фреквенција магнетског поља. Мерење јачине електричног поља није вршено, пошто је познато да су вредности електричног поља у оваквим случајевима занемарљиве. Детаљан приказ резултата испитивања дат је у [8].

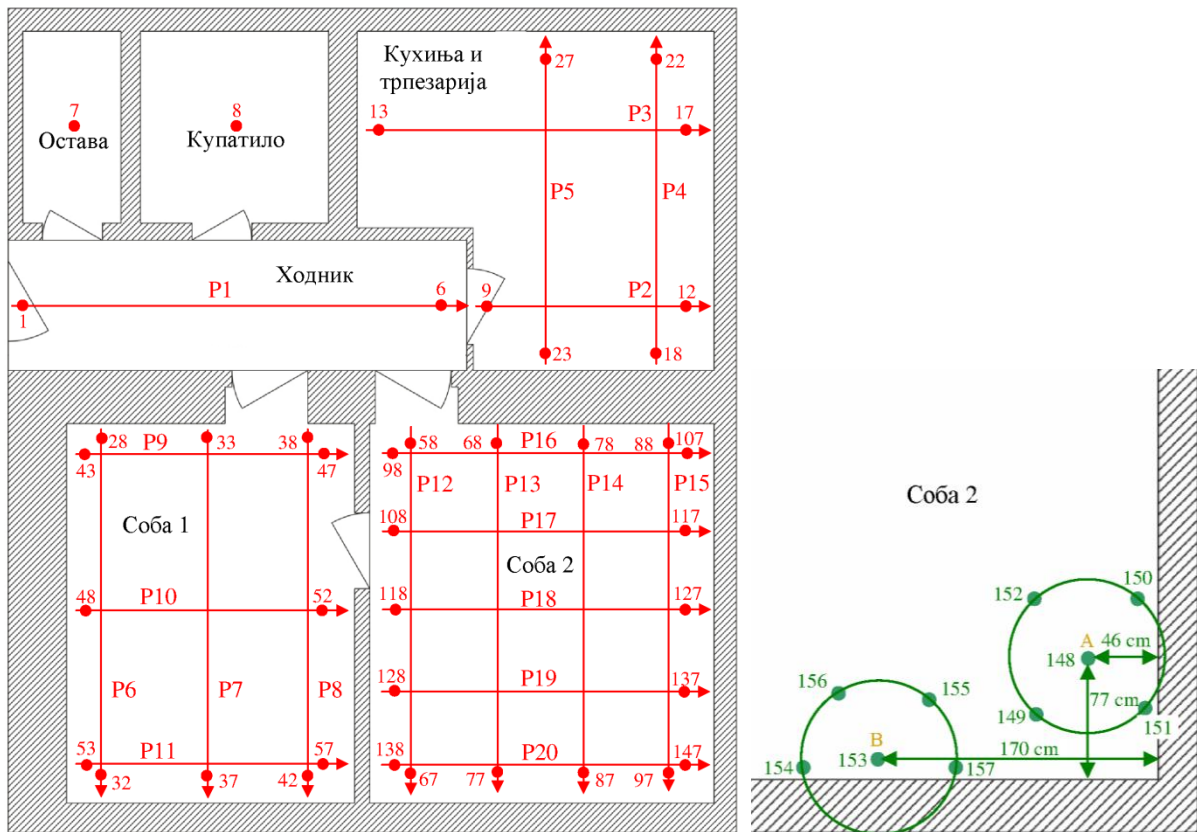
Пошто је магнетско поље сразмерно струји која протиче кроз проводнике, током целокупног времена трајања мерења магнетске индукције мерене су и струје оптерећења трансформатора у сва три фазна проводника, као и у неутралном проводнику. Вредности струја су измерене на напонском нивоу 0,4 kV. У табели 1 је за сваку фазу и за неутрални проводник приказан опсег вредности струја у току испитивања. Назначена струја енергетског трансформатора израчуната према податку о назначеној снази од 1000 kVA износи $I_n = 1443,4$ А на напонском нивоу 0,4 kV. На основу измерених вредности струја може се закључити да се оптерећење енергетског трансформатора у току испитивања кретало од 16 до 28% од назначеног оптерећења.

ТАБЕЛА 1 – Измерене вредности струја енергетског трансформатора на напонском нивоу 0,4 kV у време мерења магнетске индукције

Проводник	Опсег промене струје у току испитивања, I [А]	Процентуална вредност у односу на назначену струју, I [%]
Фаза А	255,0–367,9	17,67–25,49
Фаза В	239,7–407,0	16,61–28,20
Фаза С	230,7–337,7	15,98–23,40
Неутрални проводник	24,4–135,3	/

Мерења магнетске индукције у стану спроведена су на укупно 157 мерних места, чији је распоред приказан на слици 3. У циљу утврђивања просторне расподеле магнетског поља мерна места 1–147 су распоређена дуж хоризонталних мерних праваца P1–P20, који се налазе на висини од 1 m од пода.

На два места на којима су измерене највеће вредности магнетске индукције у целом стану извршена су мерења у 5 тачака на висини од 0,2 m од пода просторије (мерна места 148–157). Од 5 измерених вредности издвојене су три највеће и израчуната је њихова средња вредност B_{sr} , у складу са поступком мерења у 5 тачака, који је детаљно описан у стандарду [7].



СЛИКА 3 – Распоред мерних места у стану (1–157)

Резултати мерења магнетске индукције дуж хоризонталних мерних праваца P1–P20 приказани су на слици 4, упоредо са измереним вредностима струја трансформатора. Резултати мерења магнетске индукције у пет тачака на местима А и В приказани су на слици 5. На свим мерним местима измерена је фреквенција поља од 50 Hz. Ознаке на сликама 4 и 5 имају следеће значење:

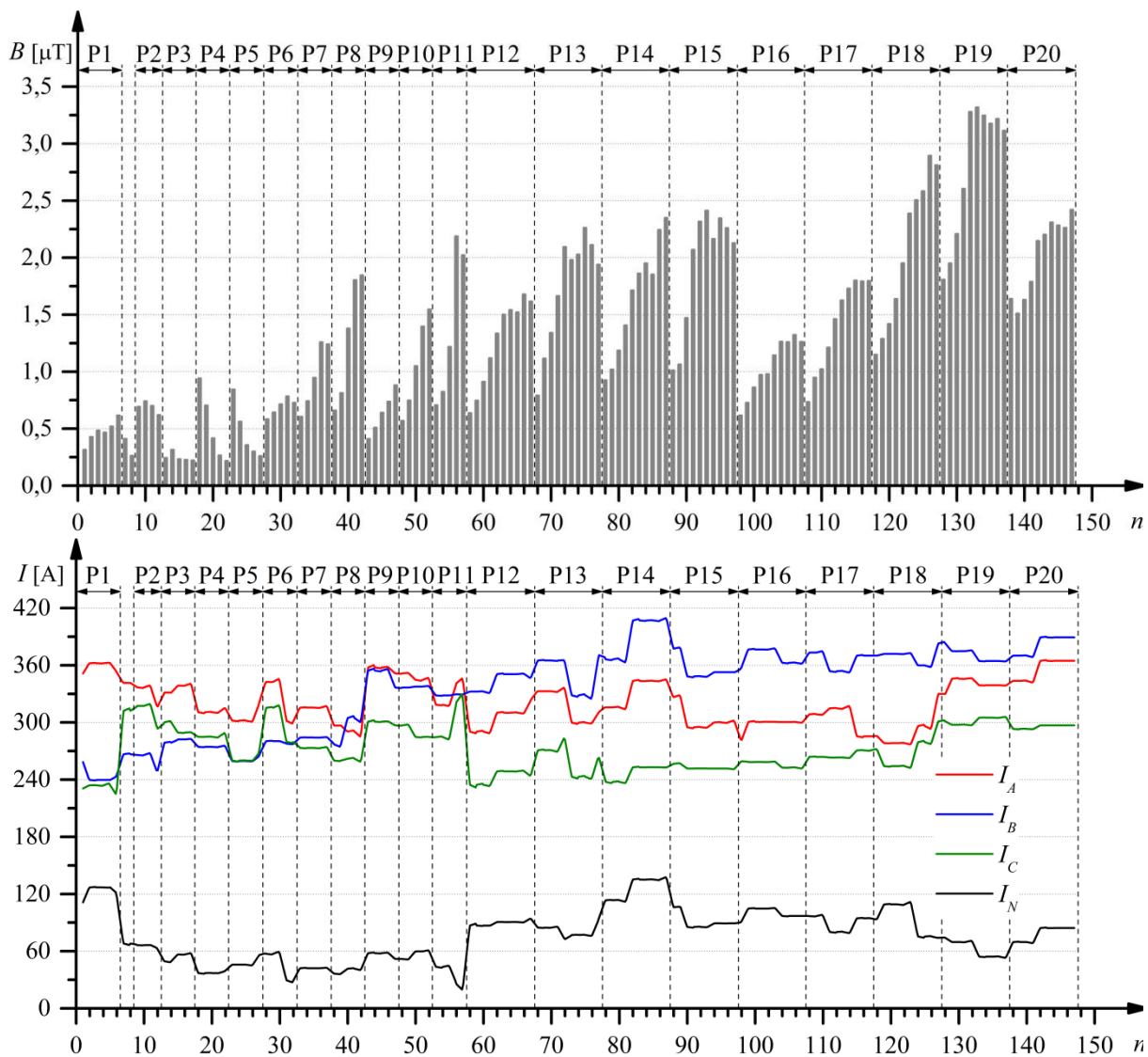
n – редни број мерења;

I_A, I_B, I_C – измерене вредности фазних струја трансформатора;

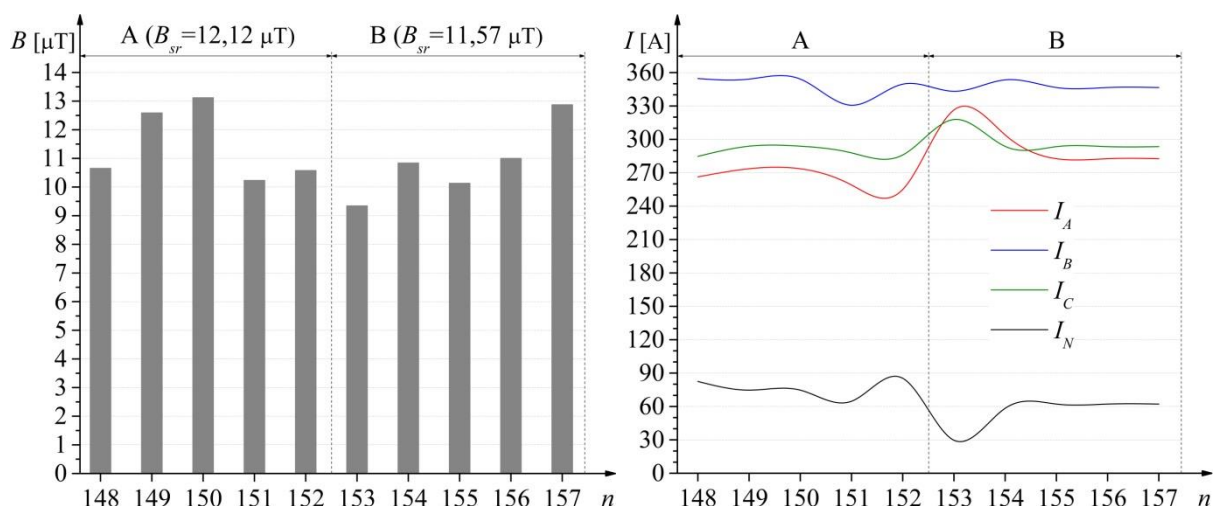
I_N – измерене вредности струје кроз неутрални проводник;

B – измерене вредности магнетске индукције.

Као што је и очекивано, највеће вредности магнетске индукције измерене су у просторији која се налази непосредно изнад трансформаторске станице (соба 2). На основу резултата приказаних на слици 4 може се уочити да су у просторији која је на сликама 1 и 3 означена као соба 1 највеће вредности магнетске индукције измерене у зони изнад развода напонског нивоа 0,4 kV (мерна места бр. 41, 42, 56 и 57). Такође се може уочити да у просторији која је означена као соба 2 вредности магнетске индукције измерене дуж праваца P12–P20 расту са приближавањем делу просторије који се налази изнад шина напонског нивоа 0,4 kV.



СЛИКА 4 – Резултати мерења магнетске индукције дуж хоризонталних праваца на висини од 1 m (мерна места 1–147), приказани упоредо са измереним вредностима струја



СЛИКА 5 – Резултати мерења магнетске индукције у пет тачака на местима А и В на висини од 0,2 m (мерна места 148–157), приказани упоредо са измереним вредностима струја

На мерним местима А и В која се налазе на висини од 0,2 m од пода просторије извршена су дуготрајна мерења магнетске индукције у периоду од неколико минута, пошто су на овим местима измерени највиши нивои магнетске индукције у целом стану. На основу резултата дуготрајног мерења магнетске индукције у тачкама А и В и истовременог мерења струја оптерећења трансформатора може се направити корелација између ових величина и извршити процена максималног нивоа магнетске индукције у овим тачкама, који би се јавио при максималном оптерећењу трансформатора. На мерном месту А извршено је 100 мерења магнетске индукције са временским кораком од 5 s, при чему средња вредност ових резултата износи 10,25 μT . Максимална вредност магнетске индукције у тачки А, која би се јавила при оптерећењу трансформатора назначеном струјом од 1443,4 A износи приближно 55 μT . На мерном месту В извршено је 40 мерења магнетске индукције са истим временским кораком, при чему средња вредност ових резултата износи 10,26 μT . Максимална вредност магнетске индукције у тачки В, која би се јавила при оптерећењу трансформатора назначеном струјом износи приближно 51 μT . Максималне вредности магнетске индукције у тачкама А и В израчунате су екстраполацијом вредности измерених у овим тачкама, на основу односа назначене струје и струја оптерећења трансформатора у време дуготрајног мерења. Резултати дуготрајног мерења у тачки А приказани су на слици 6.



СЛИКА 6 – Резултати дуготрајног мерења магнетске индукције у тачки А

На основу приказаних резултата може се закључити да је вредност од 10% референтног граничног нивоа (4 μT) приликом испитивања знатно прекорачена на неколико мерних места. Због тога се предметна трансформаторска станица категорично као извор од посебног интереса, у складу са одредбама Правилника [3].

Такође се може закључити да у делу стана који се налази директно изнад трансформаторске станице вредности магнетске индукције могу знатно прекорачити референтни гранични ниво од 40 μT при већем оптерећењу трансформатора, због чега је препоручена примена техничких мера за смањење магнетске индукције. У циљу смањења вредности магнетске индукције у стану, предложено је повећање растојања између шина напонског нивоа 0,4 kV и плафона трансформаторске станице. Такође је препоручено понављање испитивања након реализације мера за смањење магнетске индукције, у циљу провере њихове ефикасности.

ПРИМЕЊЕНЕ МЕРЕ ЗА СМАЊЕЊЕ МАГНЕТСКЕ ИНДУКЦИЈЕ

Имплементација мера за смањење магнетске индукције спроведена је у два корака. Прво су уклоњене шинске везе које повезују трансформатор и развод напонског нивоа 0,4 kV и извршена је њихова замена кабловским водовима. Пошто су се шинске везе налазиле непосредно испод плафона просторије у којој је смештена трансформаторска станица, а каблови се простиру по поду просторије, ова мера је веома ефикасна довела до смањења нивоа магнетске индукције у стану. Оваква мера је примењена и у случају који је детаљно описан у [9]. У циљу додатног смањења вредности магнетске индукције у стану, у просторији трансформаторске станице постављена су и четири заштитна екрана (слика 7). Два екрана у облику равне плоче постављена су изнад развода напонског нивоа 0,4 kV, док је један постављен изнад

трансформатора. Један екран је постављен изнад кабловских водова 0,4 kV и 10 kV, приказаних на слици 2. Овај екран је на два места савијен под правим углом, тако да обавија каблове са горње и са две бочне стране. Након спровођења ових мера извршена су испитивања нејонизујућег зрачења, чији су резултати приказани у [10]. Испитивања су показала да су примењене мере имале значајан утицај на смањење нивоа магнетске индукције у стану. Међутим, показано је да би при оптерећењу трансформатора назначеном струјом вредности магнетске индукције у делу просторије који се налази изнад трансформатора могле да прекораче вредност од 10% референтног граничног нивоа (4 μ T), тако да би трансформаторска станица и даље била категорисана као извор нејонизујућег зрачења од посебног интереса. Због тога су додата још четири екрана у виду равних плоча. Додатна два екрана су постављена изнад трансформатора, тако да су се изнад трансформатора налазила укупно три екрана, који су били постављени један изнад другог. Још два екрана су постављена један изнад другог у углу просторије, у продужетку екрана који се налазе изнад развода 0,4 kV (слика 8). Након постављања додатних екрана испитивања нејонизујућег зрачења су поновљена. Резултати ових испитивања приказани су у [11].



СЛИКА 7 – Заштитни екрани првобитно постављени у трансформаторској станици



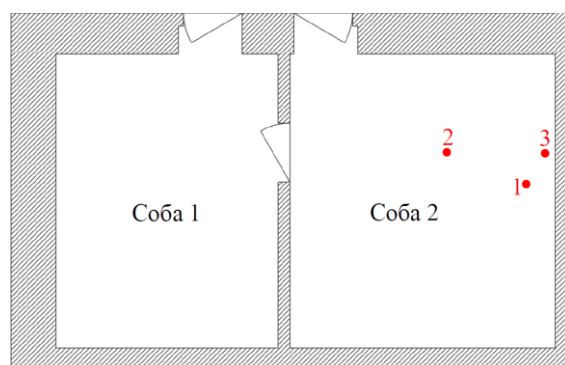
СЛИКА 8 – Заштитни екрани накнадно постављени у угао просторије трансформаторске станице

ИСПИТИВАЊА НАКОН ПРИМЕНЕ МЕРА ЗА СМАЊЕЊЕ МАГНЕТСКЕ ИНДУКЦИЈЕ

Као што је речено у претходном поглављу, након спровођења мера за смањење магнетске индукције испитивања су спроведена два пута. Накнадно додавање четири екрана није довело до додатног смањења магнетске индукције у стану. Због тога су у раду приказани само резултати последњег испитивања, које је спроведено након уклањања шина напонског нивоа 0,4 kV и постављања свих екрана [11].

Приликом мерења прво је извршено прелиминарно скенирање, на основу чега су издвојена репрезентативна мерна места на којима су спроведена детаљнија мерења магнетске индукције. У раду су приказани резултати добијени на овим репрезентативним мерним местима, на којима су измерене највеће

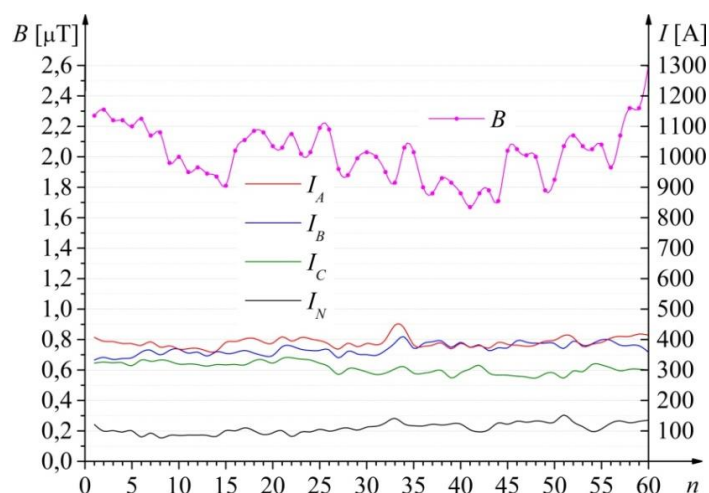
вредности магнетске индукције. Распоред мерних места у стану је приказан на слици 9, док су резултати мерења магнетске индукције дати у табели 2. Мерно место 1 представља место на коме је измерена највећа вредност магнетске индукције у целом стану на висини од 1 m. На мерном месту 2 добијена је највећа вредност магнетске индукције која је израчуната као средња вредност резултата мерења на три висине (0,5 m, 1 m и 1,5 m). На мерном месту 3, које се налази на висини од 0,2 m од пода просторије, извршена су мерења у 5 тачака. Пошто је на овом месту измерена највећа вредност магнетске индукције, спроведена су и мерења у периоду од неколико минута, чији су резултати приказани у табели 2 и на слици 10.



СЛИКА 9 – Распоред мерних места приликом поновљеног мерења, након примене мера заштите

ТАБЕЛА 2 – Резултати мерења

n	I_A [A]	I_B [A]	I_C [A]	B [μ T]	h [m]	Напомена
1	445,5	392,0	371,5	1,22	1	Највећа измерена вредност у целом стану на висини од 1 m.
2	451,7–456,1	435,2–438,9	322,7–333,3	1,82	0,5; 1; 1,5	Мерење на три висине. Приказани резултат представља средњу вредност.
3	372,3–402,3	360,1–395,5	305,2–313,4	2,48	0,2	Мерење у 5 тачака. Приказани резултат представља средњу вредност, израчунату у складу са [7].
3	361,9–447,1	332,8–408,5	273,6–340,3	2,02	0,2	Дуготрајно мерење. Приказани резултат представља средњу вредност.



СЛИКА 10 – Резултати дуготрајног мерења магнетске индукције на мерном месту бр. 3

На мерном месту 3 извршено је 60 мерења магнетске индукције са временским кораком од 5 s, при чему средња вредност ових резултата износи 2,02 μT . На основу резултата дуготрајног мерења магнетске индукције на мерном месту 3 и истовременог мерења струја оптерећења трансформатора извршена је процена максималног нивоа магнетске индукције на овом мерном месту. Максимална вредност магнетске индукције на мерном месту 3, која би се јавила при оптерећењу трансформатора назначеном струјом, износи 8,1 μT , што значи да би ниво од 4 μT и даље могао да буде прекорачен при максималном оптерећењу трансформатора. Због тога је као додатна мера заштите која би довела до смањења вредности магнетске индукције у стану испод 4 μT препоручено ограничење струје трансформатора на 600 A [12].

Смањење нивоа магнетске индукције испод 4 μT могло би да буде постигнуто и другачијим распоредом заштитних екрана у трансформаторској станици, који би био одређен путем прорачуна [13,14].

ЗАКЉУЧАК

На основу приказаних резултата може се закључити да су примењене мере имале значајан утицај на смањење нивоа магнетске индукције у стану. Приликом првог испитивања израчунато је да би максимална вредност магнетске индукције, која би се јавила при оптерећењу трансформатора назначеном струјом од 1443,4 А, износила приближно 55 μT . Након примене мера заштите максимална вредност магнетске износила би око 8,1 μT . Након примене мера заштите место максимума магнетске индукције у стану се не налази на истој локацији као пре примене мера, што је и очекивано.

На основу максималних вредности магнетске индукције у стану пре и после примене мера заштите може се израчунати вредност заштитног фактора. Вредност заштитног фактора, израчуната као однос максималних вредности магнетске индукције у стану пре и после примене мера заштите, износи 6,8.

Иако су примењене мере довеле до значајног смањења магнетске индукције у стану, закључено је да ниво од 4 μT и даље може да буде прекорачен при оптерећењу трансформатора назначеном струјом и то у зони која се налази непосредно изнад трансформатора.

Као додатна мера заштите која би довела до смањења вредности магнетске индукције у стану испод 4 μT препоручено је ограничење струје трансформатора на 600 А. Исти резултат би могао да буде постигнут и другачијим распоредом заштитних екрана, који би био одређен путем прорачуна.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Закон о заштити од нејонизујућих зрачења, „Службени гласник Републике Србије”, бр. 36/09 од 15.05.2009.
- [2] Правилник о границама излагања нејонизујућим зрачењима, „Службени гласник Републике Србије”, бр. 104/09 од 16.12.2009.
- [3] Правилник о изворима нејонизујућих зрачења од посебног интереса, врстама извора, начину и периоду њиховог испитивања, „Службени гласник Републике Србије”, бр. 104/09 од 16.12.2009.
- [4] 1999/519/EC: “Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz)”, OJ L 199, 30.7.1999, p. 59–70.
- [5] IEC 61786-1: “Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings – Part 1: Requirements for measuring instruments”, 2013.
- [6] IEC 61786-2: “Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings – Part 2: Basic standard for measurements”, 2014.
- [7] EN 62110: “Electric and magnetic field levels generated by AC power systems – Measurement procedures with regard to public exposure”, 2009.
- [8] Извештај Електротехничког института „Никола Тесла” бр. 316265-Л од 18.07.2016. године.
- [9] Маја Грбић, Александар Павловић, Милица Таушановић, Владимир Шилкут: „Примена мера за смањење вредности магнетске индукције дистрибутивне трансформаторске станице 10/0,4 kV”, Зборник радова, Р-1.19, IX саветовање о електродистрибутивним мрежама Србије са регионалним учешћем, Национални комитет *CIREД* Србија, Врњачка Бања, Република Србија, 22–26. септембар 2014. године, ISBN: 978-86-83171-18-7.
- [10] Извештај Електротехничког института „Никола Тесла” бр. 316394-Л од 13.10.2016. године.
- [11] Извештај Електротехничког института „Никола Тесла” бр. 316585-Л од 14.12.2016. године.
- [12] Допис Електротехничког института „Никола Тесла” бр. 03/523: „Стручно мишљење са предлогом мера за смањење изложености људи магнетској индукцији”, 22.02.2017. године, прималац: ОДС „ЕПС Дистрибуција” д.о.о. Београд.
- [13] Maја Grbić, Aldo Canova, Luca Giaccone: “Levels of Magnetic Field in an Apartment near 110/35 kV Substation and Proposal of Mitigation Techniques”, The 10th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion, Belgrade, Republic of Serbia, from 6th to 9th of November of 2016, Proceedings, Paper No. 030, ISBN: 978-1-78561-406-4, DOI: 10.1049/cp.2016.1025.
- [14] Maја Grbić, Aldo Canova, Luca Giaccone: “Magnetic Field in an Apartment Located above 10/0.4 kV Substation: Levels and Mitigation Techniques”, Paper No. 1230, The 24th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution – CIREД, Glasgow, Scotland, from 12th to 15th of June, 2017, CIREД – Open Access Proceedings Journal, 2017, Vol. 2017, Iss. 1, pp. 752–756, ISSN 2515-0855, DOI: 10.1049/oap-cired.2017.1230.