



**МЕТОДОЛОГИЈА ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ МАКСИМАЛНЕ ВРЕДНОСТИ МАГНЕТСКЕ ИНДУКЦИЈЕ У ЗОНАМА ПОВЕЋАНЕ ОСЕТЉИВОСТИ У БЛИЗИНИ ТРАНСФОРМАТОРСКИХ СТАНИЦА НАПОНСКИХ НИВОА 10/0,4 kV И 20/0,4 kV ЗАСНОВАНА НА РЕЗУЛТАТИМА МЕРЕЊА И ПРОРАЧУНА**

**METHODOLOGY FOR DETERMINING THE MAXIMUM VALUE OF MAGNETIC FLUX DENSITY IN THE AREAS OF INCREASED SENSITIVITY NEAR 10/0.4 kV AND 20/0.4 kV TRANSFORMER STATIONS BASED ON THE RESULTS OF MEASUREMENTS AND CALCULATIONS**

Маја ГРБИЋ\*, Електротехнички институт „Никола Тесла“, Република Србија  
Александар ПАВЛОВИЋ, Електротехнички институт „Никола Тесла“, Република Србија

### КРАТАК САДРЖАЈ

У раду је приказана методологија за одређивање максималне вредности магнетске индукције у зонама повећане осетљивости у близини трансформаторских станица напонских нивоа 10/0,4 kV и 20/0,4 kV, која се заснива на резултатима мерења и прорачуна. Приказана методологија се односи на трансформаторске станице 10/0,4 kV и 20/0,4 kV код којих доминантни извор магнетске индукције у зони повећане осетљивости представљају шинске везе напонског нивоа 0,4 kV, које повезују трансформатор и развод напонског нивоа 0,4 kV. Мерењем се добијају вредности магнетске индукције које зависе од тренутног оптерећења трансформатора, док се прорачуном могу добити и максималне вредности магнетске индукције које би се јавиле при оптерећењу трансформатора назначеном струјом. Примена приказане методологије је од посебне важности у случају трансформаторских станица које се налазе у стамбеним зградама, нарочито уколико се непосредно изнад или поред трансформаторске станице налази стамбени простор.

**Кључне речи:** Електромагнетско поље, магнетска индукција, мерење, нејонизујуће зрачење, прорачун, трансформаторска станица.

### ABSTRACT

The paper presents a methodology for determining the maximum value of magnetic flux density in the areas of increased sensitivity near 10/0.4 kV and 20/0.4 kV transformer stations, which is based on the results of measurements and calculations. The presented methodology refers to 10/0.4 kV and 20/0.4 kV transformer stations where the dominant source of magnetic flux density in the area of increased sensitivity are 0.4 kV busbars, which connect the transformer and 0.4 kV distribution cabinet. The values of magnetic flux density which depend on the current transformer load are obtained by measurements, while the calculations can be used to obtain the maximum values of magnetic flux density that would occur at the rated load of the transformer. The application of the presented methodology is of special importance in the case of transformer stations located in residential buildings, especially if there is a residential space directly above or next to the transformer station.

**Keywords:** Calculation, electromagnetic field, magnetic flux density, measurement, non-ionizing radiation, transformer station.

### 1. УВОД

Заштита 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 [2]–[7]. Правилником [2] утврђен је референтни гранични ниво излагања који за магнетску индукцију индустријске учестаности (50 Hz) у зонама повећане осетљивости износи 40  $\mu$ T.

\* [maja@iecent.org](mailto:maja@iecent.org)

Према [2] и [3] зоне повећане осетљивости су „подручја стамбених зона у којима се особе могу задржавати и 24 сата дневно; школе, домови, предшколске установе, породилишта, болнице, туристички објекти, те деџа 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 члану 3 Правилника [3] изворима од посебног интереса сматрају се извори чије електромагнетско поље у зони повећане осетљивости достиже најмање 10% износа референтне, граничне вредности прописане за ту фреквенцију. У случају магнетске индукције индустријске учестаности 10% референтне граничне вредности износи 4  $\mu\text{T}$ .

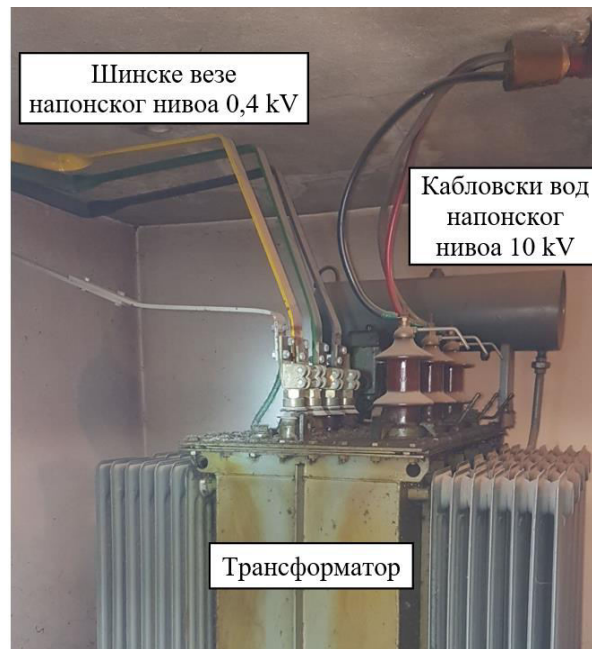
Усвајање законске регулативе иницирало је спровођење испитивања која се врше на терену, у околини извора нејонизујућих зрачења, применом метода описаних у стандардима [8]–[11], као и низ студијских истраживања. Резултати студијских истраживања која се односе на трансформаторске станице напонских нивоа 10/0,4 kV и 20/0,4 kV приказани су у студијама [12] и [13]. У [14] је дат збирни приказ и анализа резултата 34 испитивања спроведених у периоду од 2010. до 2017. године у околини трансформаторских станица напонских нивоа 10/0,4 kV и 20/0,4 kV. Техничке мере које се могу применити у случају када је потребно смањити вредности магнетске индукције које емитују поменуте трансформаторске станице приказане су у [15]–[17].

У [12]–[14] је закључено да нивои магнетске индукције у зонама повећане осетљивости које се налазе у непосредној близини трансформаторских станица 10/0,4 kV и 20/0,4 kV у неким случајевима могу прекорачити референтни ниво од 40  $\mu\text{T}$ , као и да у највећем броју случајева могу прекорачити ниво од 4  $\mu\text{T}$ . Овај закључак се првенствено односи на најнеповољнију ситуацију са аспекта изложености магнетском пољу, а то је ситуација када се трансформаторска станица налази у згради, а непосредно поред или изнад ње је зона повећане осетљивости. У оваквим случајевима ниво магнетске индукције у зони повећане осетљивости примарно зависи од распореда опреме у трансформаторској станици, и то првенствено од положаја шина које повезују трансформатор и развод напонског нивоа 0,4 kV, али и од снаге трансформатора, тј. од његове назначене струје. Досадашња испитивања су показала да трансформаторске станице код којих се шинске везе напонског нивоа 0,4 kV налазе непосредно уз плафон или зид трансформаторске станице представљају најнеповољнију конфигурацију са аспекта изложености магнетском пољу, уколико се са друге стране зида, односно плафона, налази зона повећане осетљивости. Неповољну околност у већини случајева представља близина трансформаторских станица зонама повећане осетљивости. Магнетско поље знатно опада са повећањем растојања од извора, тако да су у зонама повећане осетљивости које су од трансформаторске станице удаљене свега неколико метара нивои магнетске индукције знатно нижи, што је случај када су трансформаторске станице издвојене као засебни објекти и удаљене неколико метара од зона повећане осетљивости.

Испитивања се у пракси заснивају на мерењима магнетске индукције у зонама повећане осетљивости [14]. Међутим, оптерећење трансформатора у периоду када се врше мерења је у већини случајева знатно ниже од назначеног оптерећења. Због тога је неопходно проценити ниво магнетске индукције који би се у зони повећане осетљивости јавио при оптерећењу трансформатора назначеном струјом. У овом раду је приказана методологија за одређивање максималне вредности магнетске индукције у зонама повећане осетљивости која осим мерења подразумева и прорачун магнетске индукције. Прорачун се заснива на софтверском моделовању шинских веза које повезују трансформатор и развод напонског нивоа 0,4 kV. Прорачун магнетске индукције спроведен је применом одговарајућег комерцијалног софтвера, [18], [19]. Предложена методологија је применљива у свим ситуацијама када шински развод напонског нивоа 0,4 kV представља доминантан извор магнетског поља у зони повећане осетљивости, што је најчешћи случај код трансформаторских станица у зградама. Као што је претходно објашњено, овакве трансформаторске станице управо представљају најзначајније изворе магнетског поља у зонама повећане осетљивости. Методологија је представљена на примеру једне трансформаторске станице напонског нивоа 10/0,4 kV која се налази у сутерену стамбене зграде, изнад које се налази стан.

## 2. ИЗВОР МАГНЕТСКЕ ИНДУКЦИЈЕ

Извор магнетске индукције је трансформаторска станица напонског нивоа 10/0,4 kV која се налази у сутерену стамбене зграде. Трансформаторску станицу чине две просторије. У једној просторији (трансформаторски бокс) налази се енергетски трансформатор назначене снаге 630 kVA (слике 1 и 2). Назначена струја овог трансформатора на напонском нивоу 0,4 kV износи 910 А. У другој просторији налазе се разводи напонских нивоа 0,4 kV и 10 kV (слика 3). Енергетски трансформатор је повезан шинама са разводом напонског нивоа 0,4 kV и кабловским водом са разводом напонског нивоа 10 kV. Непосредно изнад трансформаторске станице налази се стан у коме су спроведена испитивања. Доминантни извор магнетске индукције у стану представљају шинске везе напонског нивоа 0,4 kV које повезују трансформатор и развод 0,4 kV, које се налазе на свега 20 cm од плафона трансформаторске станице, односно непосредно испод пода стана.



СЛИКА 1 – Распоред опреме у трансформаторском боксу



СЛИКА 2 – Шинске везе напонског нивоа 0,4 kV које повезују трансформатор и развод 0,4 kV (посматрано из трансформаторског бокса)



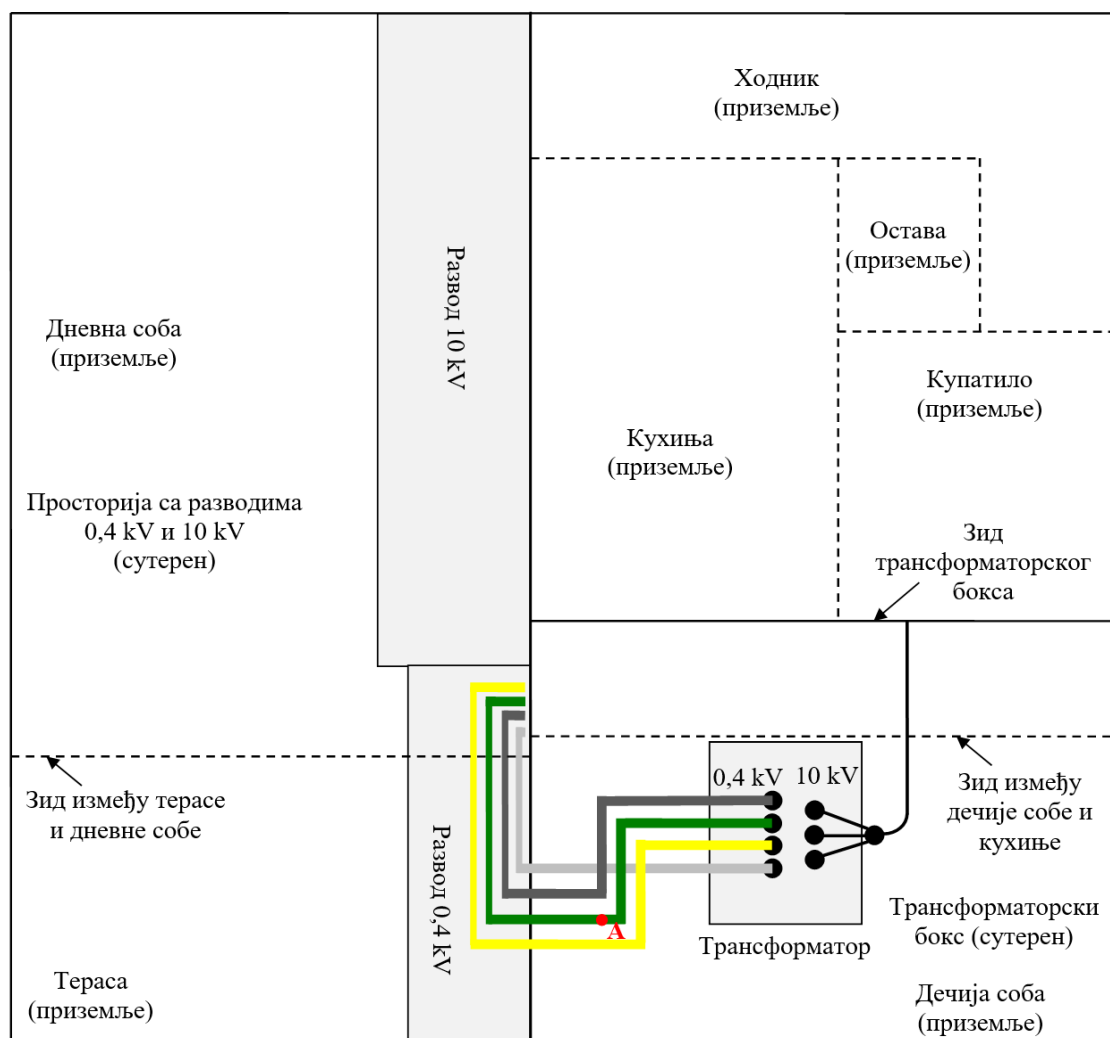
СЛИКА 3 – Шинске везе напонског нивоа 0,4 kV које повезују трансформатор и развод 0,4 kV (посматрано из просторије са разводима)

### 3. ОДРЕЂИВАЊЕ МАКСИМАЛНЕ ВРЕДНОСТИ МАГНЕТСКЕ ИНДУКЦИЈЕ

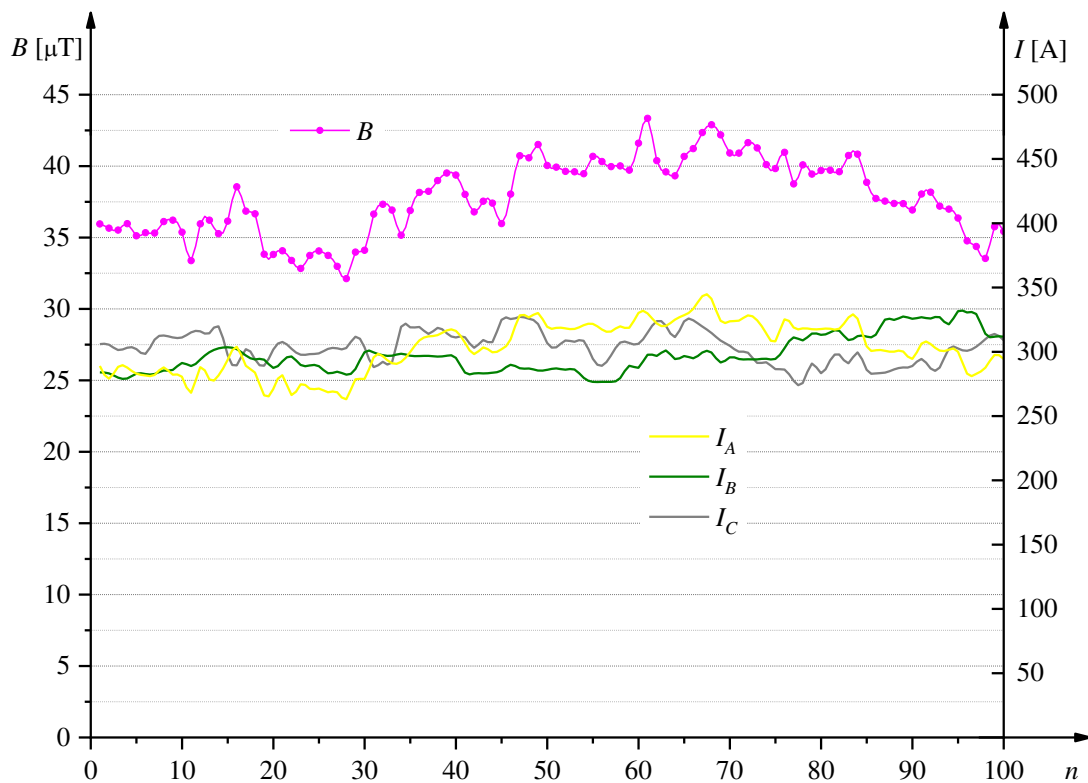
#### 3.1 Мерење магнетске индукције

Стан у коме су спроведена испитивања налази се непосредно изнад трансформаторске станице, као што је приказано на слици 4. На слици 4 је приказан положај шинских веза напонског нивоа 0,4 kV и остале опреме у трансформаторској станици у односу на просторије у стану.

Мерење магнетске индукције у стану спроведено је на великом броју мерних места. На основу резултата ових мерења и положаја доминантних извора магнетске индукције у трансформаторској станици, одређено је место у стану на коме се јавља највећа вредност магнетске индукције. Ово место је на слици 4 означено са *A* и налази се на висини од 0,2 m од пода дечије собе. Мерење на висини од 0,2 m од пода просторије се, према стандарду [11], спроводи када се ради о спаваћој соби, као што је случај у разматраном примеру. У овој тачки је спроведено 100 мерења магнетске индукције са кораком од 5 s, уз истовремено мерење струје оптерећења трансформатора на напонском нивоу 0,4 kV у сва три фазна проводника. На слици 5 је дат упоредни приказ резултата мерења магнетске индукције у тачки *A* и резултата мерења струја. На овој слици *n* означава редни број мерења, *B* измерене вредности магнетске индукције, а *I* измерене вредности струја оптерећења трансформатора. Највећа од 100 измерених вредности магнетске индукције износи 43,34  $\mu\text{T}$ . У тренутку када је измерена ова вредност магнетске индукције, струје оптерећења трансформатора износиле су  $I_A = 329,8 \text{ A}$ ,  $I_B = 297,7 \text{ A}$  и  $I_C = 315 \text{ A}$ .



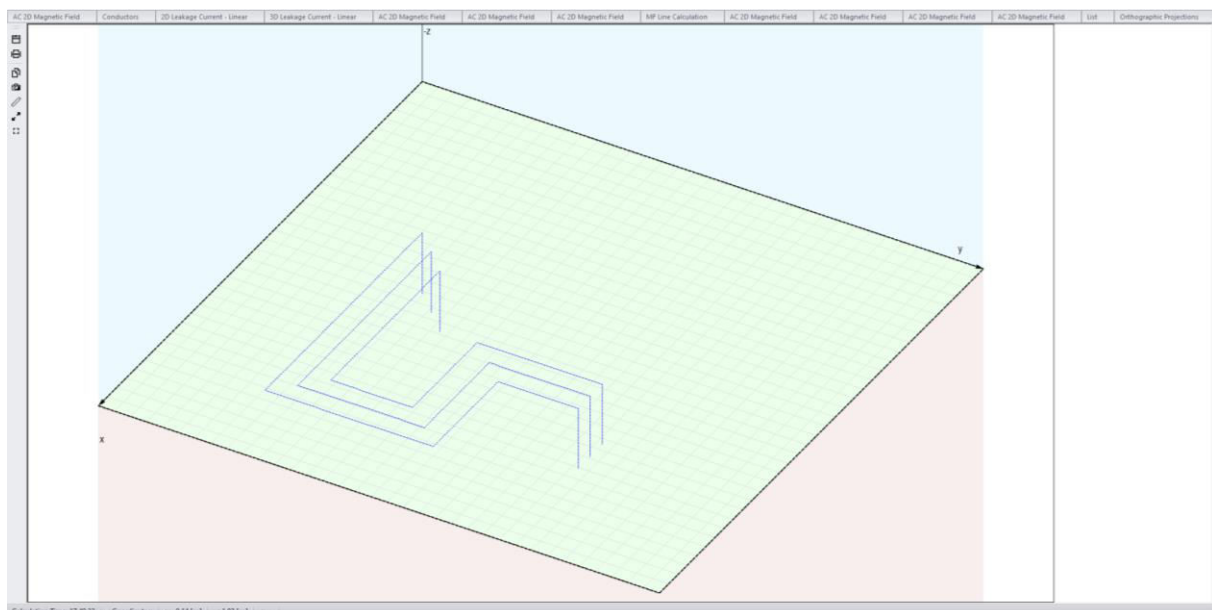
СЛИКА 4 – Положај доминантних извора магнетске индукције у односу на просторије у стану



СЛИКА 5 – Упоредни приказ резултата мерења магнетске индукције у тачки А и резултата мерења струја

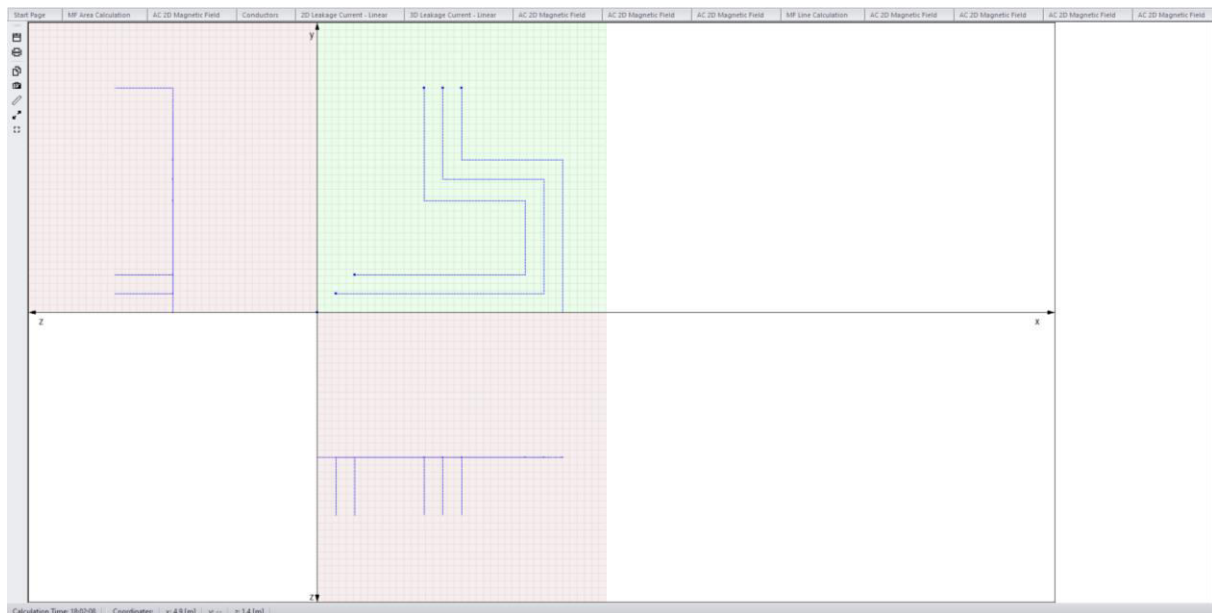
### 3.2 Прорачун магнетске индукције

Прорачун магнетске индукције спроведен је применом софтверског пакета [18], [19]. Софтвер је заснован на Максвеловим једначинама, Гриновим функцијама и Зомерфелдовим интегралима, који су имплементирани у нумерички приступ који се назива метод *PEEC* (енгл. *Partial Element Equivalent Circuit*) [18]. У наведеном софтверу је могуће формирати тродимезионални модел шинских веза напонског нивоа 0,4 kV, које представљају доминантан извор магнетског поља у стану. Модел шинских веза је приказан на сликама 6 и 7.



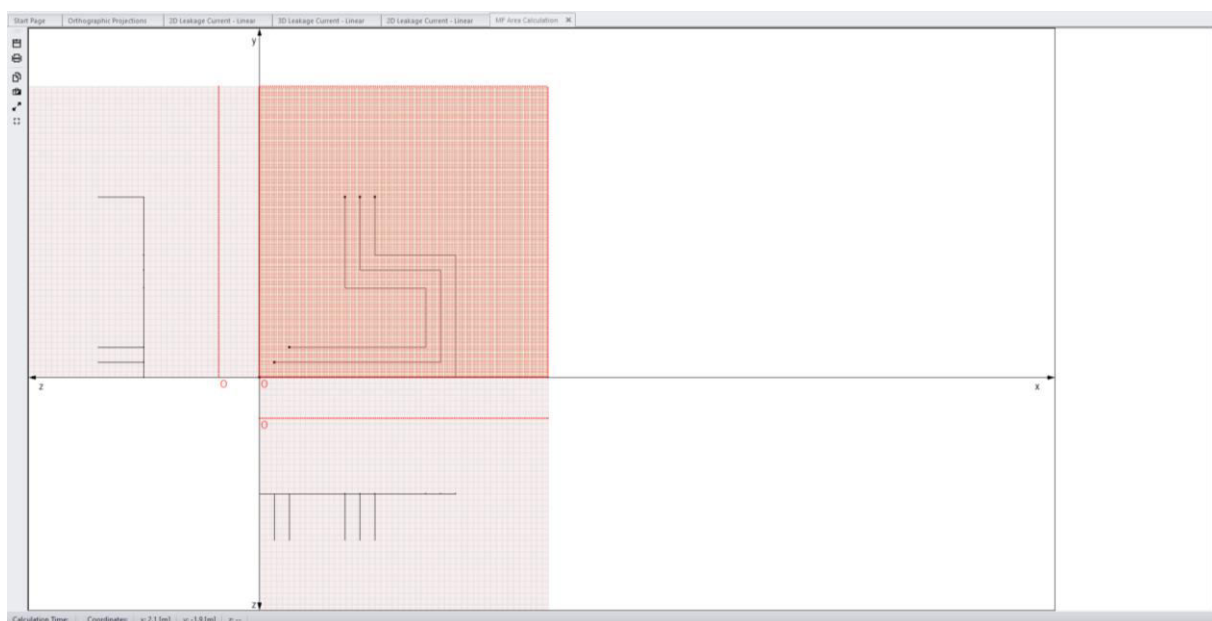
СЛИКА 6 – Приказ тродимезионалног модела шинских веза напонског нивоа 0,4 kV у програму [18, 19]





СЛИКА 7 – Приказ пројекција модела шинских веза напонског нивоа 0,4 kV у програму [18, 19]

Зона шрафирана црвеном бојом на слици 8 представља зону у којој се врши прорачун магнетске индукције. Прорачун се врши у равни ху која је паралелна са подом просторије и налази се на растојању од 20 cm од пода, тј. на растојању од 65 cm од врха шинских веза напонског нивоа 0,4 kV.

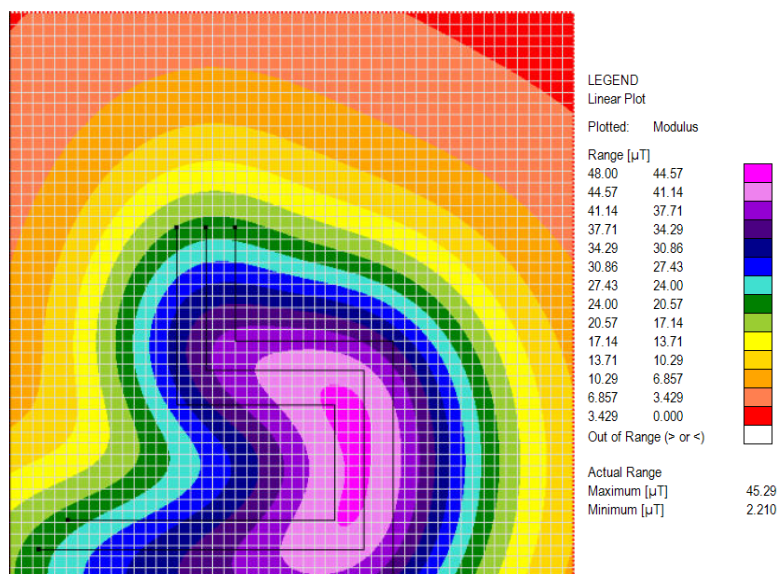


СЛИКА 8 – Приказ зоне у којој се врши прорачун магнетске индукције у програму [18, 19]

### 3.3 Прорачун магнетске индукције за услове у време мерења

Прорачун магнетске индукције за услове у време мерења спроведен је ради поређења са вредностима магнетске индукције које су добијене мерењем. Поређење резултата добијених мерењем и прорачуном је веома значајно због обезбеђења валидности резултата и верификације модела извора магнетског поља. У тренутку када је у тачки А измерена највећа вредност магнетске индукције од 43,34  $\mu\text{T}$  струје оптерећења трансформатора су износиле  $I_A = 329,8 \text{ A}$ ,  $I_B = 297,7 \text{ A}$  и  $I_C = 315 \text{ A}$ , па је прорачун спроведен за ове вредности струја. Усвојено је да фазни ставови струја износе  $\theta_A = 0^\circ$ ,  $\theta_B = 120^\circ$  и  $\theta_C = 240^\circ$ .

Резултати добијени прорачуном магнетске индукције у равни ху која је паралелна са подом просторије и налази се на растојању од 20 cm од пода приказани су на слици 9.

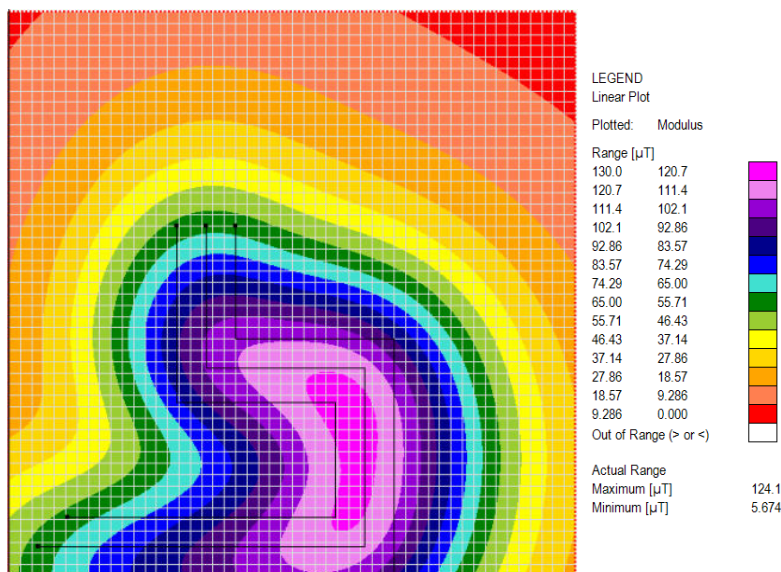


СЛИКА 9 – Приказ резултата прорачуна магнетске индукције у програму [18, 19] на висини од 0,2 m изнад пода просторије, за оптерећење трансформатора у време мерења

Највећа вредност магнетске индукције која је добијена путем прорачуна износи 45,29 μT. На основу резултата прорачуна приказаних на слици 9 и положаја тачке А који је приказан на слици 4 може се закључити да постоји слагање у погледу локације у стану где се налази максимум магнетске индукције. Одступање између максималних вредности магнетске индукције добијених путем мерења и прорачуна износи 4,5%. Релативно одступање је израчунато под претпоставком да се за тачну вредност усвоји вредност магнетске индукције која је добијена мерењем. Слагање резултата представља потврду да су резултати добијени путем мерења и прорачуна коректни. Одступање које се јавља између резултата мерења и прорачуна последица је мерне несигурности и несигурности прорачуна. На мерну несигурност највише утичу грешка система за мерење магнетске индукције и грешка позиционирања мерне сонде у све три просторне координате. Декларисана грешка система који је коришћен за мерења у овом раду износи ±3%. На несигурност прорачуна утиче грешка која потиче од примењене методе прорачуна, поједностављена која су усвојена у моделу, као и грешка која је последица несигурности познавања улазних података који се користе у моделу. У моделу није уважена струја у неутралном проводнику, као ни остала опрема у трансформаторској станици и усвојено је да фазни померај између струја у фазама А, В и С износи 120°. Под несигурношћу познавања улазних података који се користе у моделу се првенствено подразумева несигурност познавања димензија шинских веза, њиховог положаја и растојања у односу на стан, као и несигурност мерења струја у фазама А, В и С. Такође, постоји могућност да приликом мерења мерна сонда није била постављена на место на коме се теоријски налази максимум магнетске индукције, већ да постоји одступање од неколико центиметара у односу на локацију теоријског максимума.

### 3.4 Прорачун магнетске индукције за случај оптерећења трансформатора назначеном струјом

Пошто је поређењем резултата мерења и прорачуна верификован модел који се користи за прорачун, следећи корак представља спровођење прорачуна магнетске индукције за случај када је трансформатор оптерећен назначеном струјом. Прорачун је стога поновљен, применом истог модела, под претпоставком да струје у сва три фазна проводника изnose 910 A ( $I_A = I_B = I_C = 910$  A,  $\theta_A = 0^\circ$ ,  $\theta_B = 120^\circ$ ,  $\theta_C = 240^\circ$ ). Резултати добијени прорачуном магнетске индукције у равни ху која је паралелна са подом просторије и налази се на растојању од 20 cm од пода приказани су на слици 10. Највећа вредност магнетске индукције која је добијена путем прорачуна у овом случају износи 124,1 μT. На основу резултата приказаних на слици 10 може се закључити да је у овом случају у целој зони која се налази изнад шинских веза напонског нивоа 0,4 kV прекорачен референтни ниво од 40 μT.



СЛИКА 10 – Приказ резултата прорачуна магнетске индукције у програму [18, 19] на висини од 0,2 m изнад пода просторије, за оптерећење трансформатора назначеном струјом

#### 4. ЗАКЉУЧАК

У раду је приказана методологија за одређивање максималне вредности магнетске индукције у зонама повећане осетљивости које се налазе у близини трансформаторских станица напонских нивоа 10/0,4 kV и 20/0,4 kV. Предложена методологија је применљива у свим ситуацијама када шински развод напонског нивоа 0,4 kV представља доминантан извор магнетског поља у зони повећане осетљивости, што је најчешћи случај код трансформаторских станица у зградама према резултатима досадашњих испитивања. Испитивања се у пракси најчешће заснивају на мерењима магнетске индукције у зонама повећане осетљивости, која се спроводе при оптерећењу трансформатора које је у већини случајева знатно ниже од назначеног оптерећења. Ради превазилажења овог проблема, методологија предложена у раду осим резултата мерења подразумева и коришћење резултата добијених путем прорачуна. Прорачун се заснива на софтверском моделовању шинских веза напонског нивоа 0,4 kV које повезују трансформатор и развод напонског нивоа 0,4 kV. Након спровођења мерења, први корак представља спровођење прорачуна за услове који су постојали у време мерења. Циљ овог корака је упоређивање резултата добијених мерењем и прорачуном и верификација модела који се користи за прорачун. Следећи корак представља спровођење прорачуна за услове када је трансформатор оптерећен назначеном струјом. На основу овако добијених резултата може се донети коначан закључак у погледу усаглашености добијених вредности магнетске индукције са прописаним границама излагања становништва. Предложена методологија је у раду приказана на примеру трансформаторске станице напонског нивоа 10/0,4 kV, која се налази у сутерену стамбене зграде, изнад које се налази стан. У приказаном примеру је мерењем добијена вредност која прекорачује референтни ниво од 40 µT, тако да у овом случају прорачун магнетске индукције није био неопходан за доношење закључка о усаглашености. Међутим, у пракси постоје случајеви када се мерењем добија вредност магнетске индукције која је нижа од 40 µT, а прорачун показује да би при оптерећењу трансформатора назначеном струјом вредности магнетске индукције у зони повећане осетљивости прекорачиле референтни ниво од 40 µT. У таквим случајевима је примена описане методологије од изузетног значаја, како би се донео поуздан и коначан закључак о усаглашености са прописаним границама излагања и предузеле одговарајуће мере заштите. Поред тога, постоје и случајеви када се мерењем у зони повећане осетљивости добијају вредности које прекорачују 4 µT, због чега се трансформаторска станица категорише као извор од посебног интереса, али се прорачуном показује да референтни ниво од 40 µT не може да буде прекорачен ни при оптерећењу трансформатора назначеном струјом, па је примена описане методологије значајна и у оваквим случајевима. Методологија заснована на резултатима мерења и прорачуна магнетске индукције може се применити и у ситуацијама када осим шинских веза напонског нивоа 0,4 kV и друга опрема у трансформаторској станици знатно доприноси нивоу магнетске индукције у зони повећане осетљивости, али је у оваквим случајевима потребно моделовати и осталу опрему чији је допринос укупном магнетском пољу значајан.



## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Закон о заштити од нејонизујућих зрачења, „Службени гласник Републике Србије”, бр. 36/09 од 15. 5. 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] Правилник о садржини евиденције о изворима нејонизујућих зрачења од посебног интереса, „Службени гласник Републике Србије”, бр. 104/09 од 16. 12. 2009.
- [5] Правилник о условима које морају да испуњавају правна лица која врше послове испитивања нивоа зрачења извора нејонизујућих зрачења од посебног интереса у животној средини, „Службени гласник Републике Србије”, бр. 104/09 од 16. 12. 2009.
- [6] Правилник о условима које морају да испуњавају правна лица која врше послове систематског испитивања нивоа нејонизујућих зрачења, као и начин и методе систематског испитивања у животној средини, „Службени гласник Републике Србије”, бр. 104/09 од 16. 12. 2009.
- [7] Правилник о садржини и изгледу обрасца извештаја о систематском испитивању нивоа нејонизујућих зрачења у животној средини, „Службени гласник Републике Србије”, бр. 104/09 од 16. 12. 2009.
- [8] SRPS EN 50413:2020 „Основни стандард за процедуре мерења и прорачуна изложености људи електричним, магнетским и електромагнетским пољима (од 0 Hz до 300 GHz)”.
- [9] SRPS EN 61786-1:2014 „Мерење једносмерних магнетских, наизменичних магнетских и наизменичних електричних поља у опсегу од 1 Hz до 100 kHz у погледу изложености људи – Део 1: Захтеви за мерне инструменте”.
- [10] IEC 61786-2:2014 “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”.
- [11] SRPS EN 62110:2011 „Нивои електричних и магнетских поља која стварају системи за напајање наизменичном струјом – Поступци мерења у погледу опште изложености” и измена SRPS EN 62110:2011/AC:2015.
- [12] Студија Електротехничког института „Никола Тесла” бр. 311201: „Електрична и магнетна поља у и ван објеката ЕДБ д.о.о. Београд”, 2011. година, наручилац: ПД за дистрибуцију електричне енергије „Електродистрибуција Београд” д.о.о.
- [13] Студија Електротехничког института „Никола Тесла” бр. 311206: „Студија значаја постојећих извора нејонизујућих зрачења од посебног интереса у ЈП Електропривреда Србије”, 2011–2012. година, наручилац: ЈП „Електропривреда Србије”.
- [14] Маја Грбић, Александар Павловић, Дејан Хрвић, Момчило Петровић: „Нивои магнетске индукције у зонама повећане осетљивости у околини трансформаторских станица напонског нивоа 10/0,4 kV и 20/0,4 kV”, XI саветовање о електродистрибутивним мрежама Србије са регионалним учешћем, Национални комитет CIRED Србија, Копаноник, Република Србија, 24–28. 9. 2018. године, Зборник радова, Р-1.26, СТК 1 – Компоненте мрежа.
- [15] Маја Грбић, Aldo Canova, Luca Giaccone: “Magnetic Field in an Apartment Located above 10/0.4 kV Substation: Levels and Mitigation Techniques”, The 24th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution – CIRED, Glasgow, Scotland, June 12–15, 2017, Paper No. 1230; CIRED – Open Access Proceedings Journal, 2017, Vol. 2017, Iss. 1, pp. 752–756, ISSN 2515-0855, DOI: 10.1049/oap-cired.2017.1230.
- [16] Маја Грбић, Александар Павловић, Милица Таушановић, Владимир Шилкут: „Примена мера за смањење вредности магнетске индукције дистрибутивне трансформаторске станице 10/0,4 kV”, IX саветовање о електродистрибутивним мрежама Србије са регионалним учешћем, Национални комитет CIRED Србија, Врњачка Бања, Република Србија, 22–26. 9. 2014. године, Зборник радова, Р-1.19, СТК 1 – Електродистрибутивна постројења и водови, ISBN: 978-86-83171-18-7.
- [17] Маја Грбић, Александар Павловић: „Анализа нивоа магнетске индукције у стану изнад дистрибутивне трансформаторске станице напонског нивоа 10/0,4 kV пре и после примене мера заштите”, XI саветовање о електродистрибутивним мрежама Србије са регионалним учешћем, Национални комитет CIRED Србија, Копаноник, Република Србија, 24–28. 9. 2018. године, Зборник радова, Р-1.27, СТК 1 – Компоненте мрежа.
- [18] XGSLab User’s Guide, Release 9.4.1 – 03/20, SINT Ingegneria Srl, March 2020.
- [19] XGSLab Tutorial XGSA\_FD, Release 9.4.1 – 03/20, SINT Ingegneria Srl, March 2020.