

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Маја Ђ. Грбић

**МЕТОДОЛОГИЈА ЗА ОЦЕНУ  
ИЗЛОЖЕНОСТИ ЉУДИ ЕЛЕКТРИЧНОМ И  
МАГНЕТСКОМ ПОЉУ НАДЗЕМНИХ  
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИХ ВОДОВА,  
ЗАСНОВАНА НА РЕЗУЛТАТИМА МЕРЕЊА И  
ПРОРАЧУНА**

Докторска дисертација

Београд, 2021.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Maja Đ. Grbić

**METHODOLOGY FOR THE ASSESSMENT OF  
HUMAN EXPOSURE TO ELECTRIC AND  
MAGNETIC FIELDS IN THE VICINITY OF  
OVERHEAD POWER LINES BASED ON  
RESULTS OF MEASUREMENTS AND  
CALCULATIONS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2021.

## ПОДАЦИ О МЕНТОРУ И ЧЛАНОВИМА КОМИСИЈЕ ЗА ОДБРАНУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

### Ментор

Др Јован Микуловић, редовни професор  
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

### Чланови комисије

Др Јован Микуловић, редовни професор  
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

Др Жељко Ђуришић, ванредни професор  
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

Др Драган Ковачевић, научни саветник  
Универзитет у Београду, Електротехнички институт „Никола Тесла” а. д.

Др Драган Олћан, ванредни професор  
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

Датум одбране: \_\_\_\_\_

## **Методологија за оцену изложености људи електричном и магнетском пољу надземних електроенергетских водова, заснована на резултатима мерења и прорачуна**

**Сажетак:** Анализа изложености људи електромагнетском пољу представља веома актуелну тему, која је предмет интензивног истраживања током последњих неколико деценија. Као резултат наведених истраживања усвојене су међународне препоруке и стандарди, а у великом броју земаља донета је и национална регулатива, којом се, између осталог, утврђују и дозвољене границе излагања становништва електромагнетском пољу. У дисертацији је развијена методологија за оцену изложености људи електричном и магнетском пољу у околини надземних електроенергетских водова, која се заснива на резултатима добијеним мерењима и прорачунима, као и коришћењем предности оба приступа, с циљем доношења поузданог и коначног закључка о усаглашености нивоа поља с прописаним границама излагања. Пошто је за успешну примену развијене методологије неопходно израчунавање проширене несигурности мерења и прорачуна, спроведена је детаљна анализа компонената несигурности и квантификација оних компонената које имају најзначајнији допринос проширеној несигурности. Развијена је метода за израчунавање компонената несигурности прорачуна које потичу од грешке мерења висине фазних и заштитних проводника и растојања између њих, грешке мерења напона и струја, као и грешке услед занемарења стварног облика проводника надземног вода, при чему су разматрана и одступања услед примене различитих метода прорачуна. Такође је развијена метода за израчунавање компонената мерне несигурности које потичу од грешке позиционирања мерне сонде дуж све три просторне координате и дат је допринос одређивању компоненте несигурности мерења електричног поља која потиче од присуства испитивача. Примена развијене методологије за оцену изложености људи приказана је на неколико реалних примера зона повећане осетљивости које се налазе у околини преносних надземних водова.

**Кључне речи:** нејонизујуће зрачење, електромагнетско поље, електрично поље, магнетска индукција, надземни електроенергетски вод, изложеност људи, мерење, прорачун, мерна несигурност, несигурност прорачуна

**Научна област:** Техничке науке – електротехника

**Ужа научна област:** Електроенергетски системи

**УДК:**

## **Methodology for the assessment of human exposure to electric and magnetic fields in the vicinity of overhead power lines based on results of measurements and calculations**

**Abstract:** Analysis of human exposure to electromagnetic fields is a current topic, which has been the subject of intensive research over the past few decades. As a result of that research, international recommendations and standards have been adopted, and many countries have also adopted national regulations with prescribed limits of exposure of the general public to electromagnetic fields. The dissertation develops a methodology for assessing human exposure to electric and magnetic fields in the vicinity of overhead power lines based on the results obtained by measurements and calculations, and uses the advantages of both of these techniques in order to come to reliable and final conclusion regarding the compliance of the field levels with the prescribed exposure limits. Since the successful implementation of the developed methodology requires the evaluation of the expanded measurement and calculation uncertainty, detailed analysis of the uncertainty components and quantification of the components that have the most significant contribution to extended uncertainty was conducted. A method was developed for evaluating the calculation uncertainty components referring to the errors of measuring the heights of phase conductors and ground wires and their mutual distances, errors related to voltage and current measurements and errors due to neglecting the catenary shape of the conductors, while the differences originating from the application of different calculation methods were also calculated. The method for calculating the measurement uncertainty components originating from the errors of measuring probe positioning in all three spatial coordinates was developed and the contribution to the evaluation of the operator proximity effect on electric field strength measurement results was provided. The application of the developed methodology for assessing human exposure was demonstrated on several examples of increased sensitivity areas located in the vicinity of transmission overhead power lines.

**Keywords:** non-ionizing radiation, electromagnetic field, electric field strength, magnetic flux density, overhead power line, human exposure, measurement, calculation, measurement uncertainty, calculation uncertainty

**Scientific field:** Technical science – Electrical engineering

**Scientific subfield:** Power systems

**UDK:**

# Садржај

1.	Увод .....	- 1 -
2.	Преглед међународне и националне правне регулативе из области заштите становништва од електромагнетских поља .....	- 6 -
2.1.	Увод.....	- 6 -
2.2.	Међународна правна регулатива из области заштите становништва од електромагнетских поља .....	- 6 -
2.3.	Национална правна регулатива из области заштите становништва од електромагнетских поља.....	- 7 -
3.	Мерење јачине електричног поља и магнетске индукције надземних електроенергетских водова .....	- 10 -
3.1.	Увод.....	- 10 -
3.2.	Мерни инструменти.....	- 11 -
3.3.	Поступак мерења електричног и магнетског поља.....	- 13 -
3.3.1.	Поступак мерења електричног поља.....	- 14 -
3.3.2.	Поступак мерења магнетске индукције .....	- 15 -
3.4.	Примери мерења јачине електричног поља и магнетске индукције .....	- 15 -
3.4.1.	Надземни вод напонског нивоа 110 kV бр. 183, распон 13–14 .....	- 16 -
3.4.2.	Надземни вод напонског нивоа 220 kV бр. 278, распон 9–10 .....	- 19 -
3.4.3.	Надземни вод напонског нивоа 400 kV бр. 460, распон 106–107 .....	- 21 -
3.4.4.	Двосистемски надземни вод напонског нивоа 400 kV бр. 449/1 и 449/2, распон 4–5 .....	- 23 -
3.4.5.	Коментар добијених резултата мерења.....	- 25 -
4.	Прорачун јачине електричног поља и магнетске индукције надземних електроенергетских водова .....	- 26 -
4.1.	Увод.....	- 26 -
4.2.	Прорачун јачине електричног поља и магнетске индукције за случај праволинијских проводника -	- 26 -
4.2.1.	Прорачун јачине електричног поља .....	- 26 -
4.2.2.	Прорачун магнетске индукције .....	- 30 -
4.3.	Прорачун јачине електричног поља и магнетске индукције уз уважавање стварног облика проводника .....	- 34 -
4.4.	Примери прорачуна јачине електричног поља и магнетске индукције .....	- 34 -
4.4.1.	Улазни подаци за прорачун .....	- 34 -
4.4.2.	Резултати прорачуна.....	- 37 -
4.4.3.	Коментар добијених резултата прорачуна.....	- 42 -
5.	Основе израчунавања мерне несигурности .....	- 43 -
5.1.	Увод.....	- 43 -
5.2.	Врсте грешака приликом мерења .....	- 43 -
5.3.	Врсте мерне несигурности .....	- 44 -
5.3.1.	Стандардна мерна несигурност .....	- 44 -
5.3.2.	Функције расподеле вероватноће резултата мерења .....	- 44 -
5.3.3.	Комбинована мерна несигурност .....	- 45 -
5.3.4.	Проширена мерна несигурност .....	- 46 -
5.4.	Примена методе „Монте Карло” у прорачунима мерне несигурности.....	- 46 -
5.5.	Уважавање мерне несигурности приликом давања изјаве о усаглашености .....	- 48 -
6.	Израчунавање компонената несигурности мерења јачине електричног поља.....	- 50 -
6.1.	Увод.....	- 50 -
6.2.	Несигурност услед грешке мерног система .....	- 50 -
6.3.	Несигурност услед присуства испитивача .....	- 54 -
6.3.1.	Мерење утицаја испитивача у близини надземног вода напонског нивоа 220 kV .....	- 55 -
6.3.2.	Мерење утицаја испитивача у близини надземног вода напонског нивоа 110 kV .....	- 58 -
6.4.	Несигурност позиционирања мерне сонде дуж латералног правца .....	- 63 -
6.4.1.	Метода за израчунавање несигурности .....	- 63 -
6.4.2.	Резултати прорачуна.....	- 65 -
6.5.	Несигурност позиционирања мерне сонде по висини .....	- 68 -
6.5.1.	Метода за израчунавање несигурности .....	- 68 -
6.5.2.	Резултати прорачуна.....	- 68 -

6.6.	Несигурност позиционирања мерне сонде дуж лонгитудиналног правца .....	- 71 -
6.6.1.	Метода за израчунавање несигурности .....	- 71 -
6.6.2.	Резултати прорачуна.....	- 75 -
6.7.	Остале компоненте мерне несигурности .....	- 78 -
6.7.1.	Утицај сталка за позиционирање мерне сонде .....	- 78 -
6.7.2.	Утицај температуре и влажности ваздуха .....	- 79 -
6.7.3.	Неуниформност електричног поља .....	- 79 -
6.7.4.	Утицај короне.....	- 79 -
7.	Израчунавање компонената несигурности мерења магнетске индукције .....	- 80 -
7.1.	Увод.....	- 80 -
7.2.	Несигурност услед грешке мерног система .....	- 80 -
7.3.	Несигурност позиционирања мерне сонде дуж латералног правца .....	- 84 -
7.3.1.	Метода за израчунавање несигурности .....	- 84 -
7.3.2.	Резултати прорачуна.....	- 85 -
7.4.	Несигурност позиционирања мерне сонде по висини .....	- 88 -
7.4.1.	Метода за израчунавање несигурности .....	- 88 -
7.4.2.	Резултати прорачуна.....	- 89 -
7.5.	Несигурност позиционирања мерне сонде дуж лонгитудиналног правца .....	- 92 -
7.5.1.	Метода за израчунавање несигурности .....	- 92 -
7.5.2.	Резултати прорачуна.....	- 92 -
7.6.	Остале компоненте мерне несигурности .....	- 95 -
7.6.1.	Утицај температуре и влажности ваздуха .....	- 95 -
7.6.2.	Временска константа мерног инструмента и покретање сонде .....	- 95 -
7.6.3.	Неуниформност расподеле магнетског поља .....	- 95 -
8.	Израчунавање компонената несигурности прорачуна јачине електричног поља.....	- 96 -
8.1.	Увод.....	- 96 -
8.2.	Несигурност услед примене различитих метода прорачуна.....	- 97 -
8.3.	Несигурност услед занемарења стварног облика проводника.....	- 100 -
8.3.1.	Увод.....	- 100 -
8.3.2.	Метода за израчунавање утицаја занемарења стварног облика проводника.....	- 102 -
8.3.3.	Прорачун за прав распон надземног вода напонског нивоа 110 kV.....	- 104 -
8.3.4.	Прорачун за прав распон надземног вода напонског нивоа 220 kV.....	- 110 -
8.3.5.	Прорачун за прав распон надземног вода напонског нивоа 400 kV.....	- 112 -
8.3.6.	Прорачун за кос распон надземног вода напонског нивоа 110 kV.....	- 114 -
8.4.	Несигурност мерења висине фазних проводника .....	- 118 -
8.4.1.	Поступак мерења висине проводника.....	- 118 -
8.4.2.	Метода за израчунавање утицаја грешке мерења висине фазних проводника на резултате прорачуна јачине електричног поља .....	- 119 -
8.4.3.	Резултати прорачуна за случај када су висине свих фазних проводника измерене са истом грешком .....	- 122 -
8.4.4.	Резултати прорачуна за случај када су висине свих фазних проводника измерене са различитом грешком.....	- 125 -
8.4.5.	Резултати прорачуна за различите грешке мерења висине .....	- 126 -
8.4.6.	Упоредни приказ резултата за ласерске даљиномере различитих карактеристика .....	- 127 -
8.4.7.	Несигурност услед одступања између латералног правца на којем се мери висина и правца дуж којег се врше мерење и прорачун јачине електричног поља.....	- 128 -
8.5.	Несигурност мерења растојања између фазних проводника .....	- 134 -
8.5.1.	Метода за израчунавање утицаја грешке мерења хоризонталног растојања између фазних проводника на резултате прорачуна јачине електричног поља .....	- 134 -
8.5.2.	Резултати прорачуна.....	- 136 -
8.6.	Несигурност мерења висине заштитних проводника .....	- 137 -
8.7.	Несигурност мерења растојања између заштитних проводника .....	- 137 -
8.8.	Несигурност мерења напона надземног вода .....	- 138 -
8.8.1.	Максималне дозвољене грешке напонских мерних трансформатора.....	- 138 -

8.8.2.	Метода за израчунавање утицаја грешке мерења напона на резултате прорачуна јачине електричног поља.....	- 139 -
8.8.3.	Резултати прорачуна за мерне трансформаторе класе 1 .....	- 145 -
8.8.4.	Резултати прорачуна за мерне трансформаторе класе 0,5 .....	- 148 -
8.8.5.	Резултати прорачуна за мерне трансформаторе класе 0,2 .....	- 150 -
8.9.	Несигурност услед пада напона дуж вода .....	- 153 -
9.	Израчунавање компонената несигурности прорачуна магнетске индукције .....	- 154 -
9.1.	Увод.....	- 154 -
9.2.	Несигурност услед примене различитих метода прорачуна .....	- 154 -
9.3.	Несигурност услед занемарења стварног облика проводника.....	- 156 -
9.3.1.	Прорачун за прав распон надземног вода напонског нивоа 110 kV.....	- 156 -
9.3.2.	Прорачун за прав распон надземног вода напонског нивоа 220 kV.....	- 161 -
9.3.3.	Прорачун за прав распон надземног вода напонског нивоа 400 kV.....	- 163 -
9.3.4.	Прорачун за кос распон надземног вода напонског нивоа 110 kV.....	- 165 -
9.4.	Несигурност мерења висине фазних проводника .....	- 168 -
9.4.1.	Метода за израчунавање утицаја грешке мерења висине фазних проводника на резултате прорачуна магнетске индукције .....	- 168 -
9.4.2.	Резултати прорачуна за случај када су висине свих фазних проводника измерене са истом грешком .....	- 168 -
9.4.3.	Резултати прорачуна за случај када су висине свих фазних проводника измерене с различитом грешком.....	- 171 -
9.4.4.	Резултати прорачуна за различите грешке мерења висине .....	- 172 -
9.4.5.	Упоредни приказ резултата за ласерске даљиномере различитих карактеристика .....	- 173 -
9.4.6.	Несигурност услед одступања између латералног правца на којем се мери висина и правца дуж којег се врше мерење и прорачун магнетске индукције .....	- 174 -
9.5.	Несигурност мерења растојања између фазних проводника .....	- 177 -
9.6.	Несигурност мерења висине заштитних проводника .....	- 178 -
9.7.	Несигурност мерења растојања између заштитних проводника .....	- 178 -
9.8.	Несигурност мерења струје надземног вода .....	- 178 -
9.8.1.	Максималне дозвољене грешке струјних мерних трансформатора .....	- 178 -
9.8.2.	Метода за израчунавање утицаја грешке мерења струје на резултате прорачуна магнетске индукције .....	- 179 -
9.8.3.	Резултати прорачуна за мерне трансформаторе класе 1 .....	- 182 -
9.8.4.	Резултати прорачуна за мерне трансформаторе класа 0,2 и 0,5 .....	- 185 -
10.	Поређење резултата мерења и прорачуна ради обезбеђења валидности резултата .....	- 188 -
10.1.	Увод.....	- 188 -
10.2.	Пример 1 .....	- 188 -
10.2.1.	Опис локације и резултати испитивања.....	- 188 -
10.2.2.	Израчунавање проширене несигурности резултата мерења јачине електричног поља и магнетске индукције .....	- 190 -
10.2.3.	Израчунавање проширене несигурности резултата прорачуна јачине електричног поља .....	- 191 -
10.2.4.	Израчунавање проширене несигурности резултата прорачуна магнетске индукције.....	- 192 -
10.2.5.	Упоредни приказ резултата мерења и прорачуна јачине електричног поља и магнетске индукције .....	- 192 -
10.3.	Пример 2 .....	- 193 -
10.3.1.	Опис локације и резултати испитивања.....	- 193 -
10.3.2.	Израчунавање проширене несигурности резултата мерења јачине електричног поља и магнетске индукције .....	- 195 -
10.3.3.	Израчунавање проширене несигурности резултата прорачуна јачине електричног поља .....	- 196 -
10.3.4.	Израчунавање проширене несигурности резултата прорачуна магнетске индукције.....	- 198 -
10.3.5.	Упоредни приказ резултата мерења и прорачуна јачине електричног поља и магнетске индукције .....	- 199 -
10.3.6.	Оцена резултата мерења и прорачуна заснована на израчунавању вредности $E_n$ броја.....	- 201 -
10.3.7.	Оцена резултата мерења и прорачуна заснована на израчунавању вредности $\zeta$ .....	- 203 -
11.	Методологија за оцену изложености људи заснована на резултатима мерења и прорачуна .....	- 205 -



11.1.	Увод.....	- 205 -
11.2.	Методологија за оцену изложености људи електричном и магнетском пољу надземних електроенергетских водова .....	- 205 -
11.3.	Испитивања јачине електричног поља мерењем и прорачуном.....	- 209 -
11.3.1.	Пример 1 .....	- 209 -
11.3.2.	Пример 2 .....	- 213 -
11.3.3.	Пример 3 .....	- 216 -
11.3.4.	Пример 4 .....	- 217 -
11.3.5.	Пример 5 .....	- 218 -
11.4.	Испитивања магнетске индукције мерењем и прорачуном .....	- 220 -
11.4.1.	Пример 1 .....	- 220 -
11.4.2.	Пример 2 .....	- 224 -
11.4.3.	Пример 3 .....	- 226 -
12.	Закључак .....	- 228 -

# 1. Увод

Утицај електромагнетског поља на људски организам представља веома актуелну тему, која је предмет интензивног истраживања током последњих неколико деценија. Нивои електромагнетског поља којима је изложена људска популација повећавају се с развојем технике и нових технологија. Забринутост јавности и стручњака условила је реакцију многих држава и међународних организација, које су у протеклом периоду дефинисале политику заштите опште популације од нејонизујућих зрачења. Дефинисање такве политике подразумева усвајање закона, препорука и стандарда.

Међународна комисија за заштиту од нејонизујућих зрачења (енгл. *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection – ICNIRP*) објавила је 1998. године Препоруку за ограничавање излагања временски променљивим електричним, магнетским и електромагнетским пољима учестаности до 300 GHz [1]. Циљ ове препоруке јесте да обезбеди смернице за ограничавање излагања становништва и радника електромагнетским пољима, које ће обезбедити заштиту од познатих штетних утицаја на здравље. Иако ова препорука није правно обавезујућа, она је представљала основ за усвајање других, правно обавезујућих докумената. Савет Европске уније је 1999. године усвојио Препоруку [2] која представља оквир за уједначенију заштиту становништва од нејонизујућег зрачења, којег би требало да се придржавају све земље Европске уније приликом усвајања националних прописа. Границе излагања које прописује Препорука [2] идентичне су границама из Препоруке [1]. Међународна комисија за заштиту од нејонизујућих зрачења је 2010. године објавила Препоруку за ограничавање излагања временски променљивим електричним и магнетским пољима учестаности од 1 Hz до 100 kHz [3], која је заменила препоруку из 1998. године [1] у делу који се односи на опсег учестаности од 1 Hz до 100 kHz. Међутим, публикавање ове препоруке није довело до усвајања нове препоруке од стране Савета Европске уније, тако да препорука из 1999. године [2] и даље представља важећи документ на нивоу Европске уније. Предмет уређивања Препоруке [2] односи се искључиво на изложеност становништва електромагнетским пољима, док професионална изложеност није предмет овог документа. У мају 2004. године усвојена је Директива [4] којом је регулисана област заштите радника од електромагнетских поља. Ова директива је 2012. године замењена Директивом [5] која је и даље на снази и представља правно обавезујући документ на нивоу Европске уније.

Након усвајања Препоруке [2], државе чланице Европске уније усвојиле су националне прописе којима су регулисале област изложености становништва електромагнетским пољима. Препоруком [2] државама чланицама Европске уније остављена је могућност усвајања граница излагања становништва које су исте или оштрије у односу на границе из ове препоруке. Из наведеног разлога дошло је до значајне разлике у прописаним границама излагања, пошто су неке земље прописале границе излагања које су идентичне границама из Препоруке [2], док су у другим земљама границе излагања у мањој или већој мери пооштрене у односу на границе из Препоруке [2]. Преглед граница излагања прописаних у земљама Европске уније, али и у појединим земљама изван Европе, дат је у [6].

Осим регулативе која прописује границе излагања становништва и радника електромагнетском пољу, усвојен је и низ стандарда који дефинишу поступке мерења и прорачуна електромагнетског поља, као и критеријуме које треба да задовољи опрема која се користи за мерења [7]–[18]. Осим тога, радне групе Међународног савета за велике електричне мреже, CIGRE, израдиле су техничка упутства и смернице [19]–[21].

Правна регулатива из области заштите становништва од нејонизујућег зрачења у Републици Србији усвојена је током 2009. године, када је донет Закон о заштити од нејонизујућег зрачења [22] и шест пратећих правилника [23]–[28]. Област заштите радника од електромагнетских поља правно је регулисана 2012. године усвајањем Правилника [29]. Правилник [29] замењен је 2015. године Правилником [30], који је и даље на снази.

Усвајање националне регулативе из области заштите становништва и радника од електромагнетских поља иницирало је низ студијских истраживања [31]–[41], која су имала за циљ сагледавање и анализу нивоа електричног и магнетског поља у животној и радној средини, као и детаљну анализу расположивих мера за смањење вредности електричног и магнетског поља.

Прописи из области заштите људи од електромагнетских поља захтевају, између осталог, оцењивање усаглашености нивоа поља с утврђеним референтним граничним нивоима. У поступку оцењивања усаглашености потребно је проверити да ли постоји могућност прекорачења референтних граничних нивоа, имајући у виду погонска стања извора која доводе до појаве највећих могућих нивоа поља. Због тога је од изузетне важности и развој нових, као и унапређење постојећих метода испитивања које обезбеђују поуздану оцену изложености људи електромагнетском пољу.

Испитивања и студијска истраживања спроведена у претходном периоду показала су да надземни електроенергетски водови представљају најзначајније изворе поља индустријске учестаности, имајући у виду њихову распрострањеност и нивое поља који се јављају у њиховој околини [34], [36], [39]. Осим тога, у непосредној близини надземних водова постоји велики број стамбених и других објеката у којима људи бораве у дужем временском периоду, па је тачно одређивање нивоа поља од изузетног значаја.

Нивои електричних и магнетских поља ниских учестаности у околини надземних водова могу се одредити мерењем и/или прорачуном [7]–[18], [42]–[75]. Према дефиницији из члана 2 Закона о заштити од нејонизујућег зрачења [22], „испитивање зрачења које потиче од извора нејонизујућих зрачења јесте мерење, а по потреби и прорачун параметара поља и његове просторне расподеле у животној средини”. Резултати добијени мерењем, као и резултати добијени прорачуном, имају своју практичну примену, при чему обе методе имају своје предности и недостатке. Приступ проблему изложености људи електромагнетским пољима заснован на резултатима мерења и прорачуна јесте најсвеобухватнији и недвосмислено даје најпоузданије резултате, јер користи предности обе поменуте методе [43].

Важећи технички стандарди из предметне области [7]–[18] уопштено дефинишу методе мерења и прорачуна поља, при чему је акценат на методама заснованим на мерењима. Захтев стандарда [7], [8] јесте да приликом оцене изложености људи треба узети у обзир различита погонска стања извора поља, да би се одредила највећа вредност поља којој особа може бити изложена. Због тога је приликом давања изјаве о усаглашености нивоа електричног и магнетског поља с референтним вредностима, у складу са [76], потребно имати у виду променљиве карактеристике извора које доводе до највећих нивоа поља. Међутим, важећи стандарди не дају препоруке за уважавање ових променљивих карактеристика извора и не обезбеђују смернице за давање коначне изјаве о усаглашености. Стандард [7], [8] даје основне смернице за мерења и прорачуне изложености људи електричним, магнетским и електромагнетским пољима у опсегу учестаности 0–300 GHz. С обзиром на веома широк опсег примене, поменути стандард не даје конкретне смернице које би се односиле на појединачне изворе електромагнетског поља у наведеном опсегу учестаности. Из наведених разлога, у пракси је чест случај да се закључци о изложености људи доносе на бази тренутних вредности поља добијених мерењима, без процене максималне изложености. Покушај превазилажења недостатака оваквог приступа јесте периодично понављање мерења, које је предвиђено и националном регулативом [24]. Спровођење периодичних испитивања је значајно јер обезбеђује праћење вредности поља на одређеној локацији, али не доводи до коначног закључка о усаглашености.

Из поменутих разлога постоји потреба за развојем детаљне методологије за оцену изложености људи електричном и магнетском пољу у околини надземних електроенергетских водова, која дефинише услове за које се врши прорачун, као и начин коришћења резултата мерења и прорачуна, с циљем доношења поузданог и коначног

закључка о изложености људи. Развој описане методологије на бази вишегодишњег искуства из праксе представља предмет истраживања у докторској дисертацији.

Мерењем се добијају резултати електричног и магнетског поља у датом тренутку, који зависе од услова на терену у време мерења. Под овим условима подразумевају се тренутне висине проводника надземног вода, његово струјно оптерећење, напони, као и постојање објеката у близини мерних места који могу довести до пертурбације електричног поља. Приликом оцењивања усаглашености неопходно је имати у виду погонске услове вода који су најнеповољнији са аспекта нивоа поља који се јављају у његовој околини. Стога је, ради процене највећих могућих нивоа електричног и магнетског поља, потребно вршити прорачуне поља, при чему је неопходно моделовати најкритичнији случај у погледу изложености људи. На тај начин је могуће израчунати јачину електричног поља за случај када би висина фазних проводника била мања од висине приликом мерења [77], када би напони вода били виши него у време мерења, као и за случај када не би постојали објекти који доводе до пертурбације поља. Такође, може се израчунати магнетска индукција која би се јавила при мањим висинама фазних проводника, као и приликом максималног оптерећења вода [78].

Приликом доношења закључка о усаглашености добијених резултата с прописаним границама излагања, неопходно је узети у обзир резултате добијене мерењем и прорачуном. Оцена усаглашености нивоа поља с прописаним границама излагања, заснована на истовременом коришћењу резултата мерења и прорачуна, има одређену несигурност, која зависи од мерне несигурности и несигурности резултата прорачуна. Компоненте које утичу на проширену несигурност мерења јачине електричног поља и магнетске индукције углавном потичу од опреме за мерење, мерне методе и амбијенталних услова. Због тога је резултат мерења неопходно исказати с његовом проширеном несигурношћу, коју је потребно уважити приликом доношења закључка о усаглашености с прописаним границама излагања. У случајевима када се за оцену изложености људи користе резултати прорачуна, према захтеву стандарда [7], [8] неопходно је израчунати несигурност тако добијеног резултата. С обзиром на чињеницу да се поменути стандард односи на електромагнетска поља у опсегу учестаности 0–300 GHz, у њему нису дате смернице за израчунавање несигурности резултата прорачуна за поједине изворе поља. У литератури [49]–[62] приказане су различите методе прорачуна електричног и/или магнетског поља у околини надземних водова, али при томе није разматрана несигурност тако добијених резултата. На несигурност прорачуна јачине електричног поља и магнетске индукције утичу несигурност примењене методе прорачуна и несигурност моделовања извора поља. Несигурност моделовања извора поља потиче од одређених поједностављења на којима је модел заснован, као и од несигурности познавања одређених улазних података. Несигурност познавања одређених величина које представљају улазне податке за прорачун често има већи утицај од несигурности која потиче од примењене методе прорачуна. Најзначајнију компоненту несигурности представља несигурност познавања геометрије надземног вода, и то првенствено несигурност познавања висина фазних проводника, пошто висине фазних проводника у великој мери утичу на вредности јачине електричног поља и магнетске индукције у околини надземног вода. Подаци о вредностима напона и струја надземног вода у време мерења такође садрже несигурност која примарно зависи од грешке напонских и струјних мерних трансформатора. Компоненте несигурности које потичу од грешке мерења висине фазних проводника вода [79], као и од грешке мерења напона [80] и струја, у дисертацији су детаљно анализирани и квантификовани.

У дисертацији су идентификоване компоненте несигурности које доприносе проширеној несигурности мерења и прорачуна, као и несигурности оцене усаглашености нивоа поља с прописаним границама излагања. Компоненте које имају најзначајнији утицај на резултате мерења и прорачуна јачине електричног поља и магнетске индукције детаљно су анализирани. С обзиром на чињеницу да се компоненте несигурности, а самим тим и проширена несигурност, разликују од случаја до случаја, у дисертацији је развијен и детаљно

описан поступак одређивања најзначајнијих компонената несигурности. У раду је такође разматрана могућност коришћења „Монте Карло” симулација у евалуацији проширене несигурности мерења и прорачуна јачине електричног и магнетског поља. На основу спроведених анализа дате су препоруке за смањење одређених компонената несигурности на најмању могућу меру. Примена датих препорука има за последицу тачније одређивање јачине електричног поља и магнетске индукције мерењем и прорачуном.

Осим за израчунавање највећих вредности поља, које се јављају у најнеповољнијем случају са аспекта изложености људи, прорачун јачине електричног поља и магнетске индукције се може вршити и за услове који су постојали у време мерења. У дисертацији је такође приказано како се резултати мерења и прорачуна с придруженим проширеним несигурностима могу користити за обезбеђење валидности резултата испитивања нивоа електричног и магнетског поља, што представља захтев стандарда [76].

Циљ дисертације јесте развој методе за тачну, поуздану и коначну оцену изложености људи електричном и магнетском пољу у околини надземних електроенергетских водова, која је заснована на резултатима мерења и прорачуна поља и коришћењу предности оба приступа. Развој поменуте методе, осим научног, има и велики практични значај, имајући у виду да у околини надземних електроенергетских водова постоји велики број објеката у којима људи бораве у дужем временском периоду, због чега је поуздана оцена њихове изложености од изузетне важности.

Дисертација се састоји од 12 поглавља. У првом поглављу су дата уводна разматрања и приказани су циљ и значај истраживања које је предмет докторске дисертације. Друго поглавље представља кратак преглед националне и међународне регулативе из области заштите становништва од електромагнетских поља. Предмет трећег поглавља јесу мерења електричног и магнетског поља у околини надземних електроенергетских водова. У овом поглављу је описана опрема за мерење јачине електричног поља и магнетске индукције и приказана је метода мерења која је дефинисана стандардима [7]–[12]. У четвртном поглављу приказане су методе прорачуна јачине електричног поља и магнетске индукције надземних електроенергетских водова које су коришћене у дисертацији. У петом поглављу су дате основе прорачуна стандардне, комбиноване и проширене мерне несигурности. Предмет шестог поглавља јесте несигурност мерења јачине електричног поља, а предмет седмог поглавља несигурност мерења магнетске индукције у околини надземних водова. Разматране су компоненте мерне несигурности и извршена је идентификација и квантификација компонената за које је на основу искуства с великог броја мерења закључено да имају најзначајнији допринос укупној мерној несигурности. Посебна пажња је посвећена анализи грешке мерних система и утицају присуства испитивача на резултате мерења електричног поља, као најзначајнијим компонентама мерне несигурности. Такође је детаљно анализирана компонента грешке услед несигурности позиционирања мерне сонде у простору, чије је уважавање од великог значаја када се врши поређење резултата мерења с резултатима прорачуна. У осмом и деветом поглављу идентификоване су најзначајније компоненте несигурности прорачуна јачине електричног поља и магнетске индукције и детаљно су приказане методе за њихово израчунавање, које се могу применити на надземне водове различитих напонских нивоа и геометрија. Извршено је израчунавање поменутих компонената несигурности за неколико примера типичних преносних надземних водова. Разматране су компоненте несигурности које потичу од различитих метода прорачуна, занемарења стварног облика проводника, као и компоненте које се односе на познавање одређених величина које представљају улазне податке за прорачун. У десетом поглављу је, на изабраном примеру, извршено поређење резултата мерења и прорачуна јачине електричног поља и магнетске индукције, уз уважавање несигурности мерења и прорачуна, што је од значаја за обезбеђење валидности резултата испитивања. У једанаестом поглављу приказана је методологија за оцену изложености људи електричном и магнетском пољу у околини надземних водова, која се заснива на коришћењу резултата добијених мерењем и прорачуном. Циљ примене предложене методологије јесте доношење поузданог и коначног

закључка о изложености људи електричном и магнетском пољу у околини надземних вода. Примена развијене методологије приказана је на неколико реалних примера из праксе. У дванаестом поглављу дати су закључци дисертације, представљене су предности предложене методологије за оцену изложености људи електричном и магнетском пољу као и могућности примене добијених резултата у пракси и размотрени су правци даљег научноистраживачког рада.

## 2. Преглед међународне и националне правне регулативе из области заштите становништва од електромагнетских поља

### 2.1. Увод

С обзиром на чињеницу да детаљан приказ и анализа међународне и националне правне регулативе из области заштите од електромагнетских поља знатно превазилази обим ове дисертације, у овом поглављу је дат кратак преглед најзначајнијих међународних препорука, као и националног закона и правилника из области заштите становништва од електромагнетских поља који су тренутно на снази. Предмет уређивања већине наведених докумената односи се на електромагнетска поља учестаности до 300 GHz, али је у овом поглављу акценат стављен на поља индустријске учестаности (50 Hz), која су доминантна у околини надземних електроенергетских водова. У овом поглављу су приказани референтни гранични нивои излагања становништва електричном пољу и магнетској индукцији учестаности 50 Hz, који су прописани међународном и националном регулативом.

### 2.2. Међународна правна регулатива из области заштите становништва од електромагнетских поља

Међународна комисија за заштиту од нејонизујућих зрачења је 1998. године објавила Препоруку за ограничавање излагања временски променљивим електричним, магнетским и електромагнетским пољима учестаности до 300 GHz [1]. Циљ ове препоруке јесте да обезбеди смернице за ограничавање излагања електромагнетским пољима, које ће обезбедити заштиту од доказаних штетних утицаја на здравље. Препоруком [1] утврђује се скуп ограничења излагања електромагнетским пољима у виду базичних ограничења (енгл. *basic restrictions*) и референтних нивоа (енгл. *reference levels*). Базична ограничења су директно заснована на утврђеним ефектима по здравље и биолошким разматрањима. У опсегу ниских фреквенција, физичка величина за одређивање базичног ограничења јесте густина струје. Референтни нивои су утврђени ради практичног оцењивања излагања и одређивања да ли постоји могућност да базична ограничења буду премашена. Усаглашеност нивоа поља с утврђеним референтним нивоима гарантује усаглашеност с базичним ограничењима. С друге стране, уколико вредност јачине електричног поља или магнетске индукције, добијена мерењем или прорачуном, прекорачује утврђени референтни ниво, то не значи да ће и базично ограничење бити прекорачено, већ је потребна додатна провера прекорачења базичног ограничења. Препоруком [1] дефинисане су границе излагања електромагнетском пољу које се разликују за становништво и за раднике, при чему су за становништво утврђене ниже границе излагања. Према [1], разлог за усвајање различитих граница излагања у вези је с чињеницом да су радници искључиво одрасли људи, који су упознати с потенцијалним ризицима и обучени да предузму одговарајуће мере заштите, док становништво чине људи различитих година и здравственог стања, који често нису свесни да су изложени утицају поља и нису у могућности да предузму мере за смањење изложености. Референтни нивои утврђени Препоруком [1] за поље учестаности 50 Hz дати су у табели 2.1. Наведени референтни нивои се односе на ефективне вредности непертурбисаног поља.

**Табела 2.1.** Референтни нивои за поље учестаности 50 Hz према препоруци Међународне комисије за заштиту од нејонизујућих зрачења из 1998. године [1]

Област примене	Јачина електричног поља, $E$ [kV/m]	Магнетска индукција, $B$ [ $\mu$ T]
Јавна безбедност	5	100

Међународна комисија за заштиту од нејонизујућих зрачења је 2010. године објавила Препоруку за ограничавање излагања временски променљивим електричним и магнетским пољима учестаности од 1 Hz до 100 kHz [3]. Ова препорука је заменила препоруку из 1998. године [1] у делу који се односи на опсег учестаности од 1 Hz до 100 kHz. Физичка величина за одређивање базичног ограничења у овој препоруци јесте интерно електрично поље [3]. Референтни нивои утврђени Препоруком [3] за поље учестаности 50 Hz дати су у табели 2.2. Поређењем с референтним нивоима утврђеним Препоруком [1] може се закључити да су референтни нивои јачине електричног поља остали непромењени, док су референтни нивои магнетске индукције два пута повећани.

**Табела 2.2.** Референтни нивои за поље учестаности 50 Hz према препоруци Међународне комисије за заштиту од нејонизујућих зрачења из 2010. године [3]

Област примене	Јачина електричног поља, $E$ [kV/m]	Магнетска индукција, $B$ [ $\mu$ T]
Јавна безбедност	5	200

На основу предлога Европске комисије (енгл. *The European Commission*), Савет Европске уније (енгл. *The Council of the European Union*) усвојио је 1999. Препоруку [2], која представља оквир за уједначенију заштиту становништва од нејонизујућег зрачења. Препорука [2] утврђује скуп ограничења излагања електромагнетским пољима којих би требало да се придржавају све земље Европске уније приликом усвајања националних прописа. Препоручена ограничења преузета су из Препоруке [1] без икаквих измена. Пошто је заштита становништва одговорност сваке појединачне државе, остављена је могућност да национални прописи дефинишу ниже вредности ограничења излагања и тиме додатно поопштре захтеве.

Поједине европске земље су у својим националним прописима усвојиле границе излагања утврђене Препоруком [2], док су неке земље прописале строже границе излагања. У неким европским земљама прописане су различите границе излагања за нове и затечене изворе поља, при чему су за затечене изворе преузете границе излагања из Препоруке [2], док су за нове изворе прописане оштрије границе [6].

### **2.3. Национална правна регулатива из области заштите становништва од електромагнетских поља**

Заштита становништва од електромагнетских поља у Републици Србији правно је регулисана 2009. године, усвајањем Закона о заштити од нејонизујућих зрачења [22]. Предмет уређивања Закона [22] јесте само област јавне безбедности, тако да област професионалне изложености електромагнетском пољу није регулисана овим законом.

Закон је заснован на три основна начела:

- начело забране – излагање нејонизујућим зрачењима изнад прописане границе и свако непотребно излагање нејонизујућим зрачењима није дозвољено;
- начело сразмерности – услови и дозвољеност коришћења извора нејонизујућих зрачења од посебног интереса одређују се и цене према користи коју њихово коришћење има за друштво у односу на потенцијалне ризике наступања штетног дејства услед њиховог коришћења, узимајући у обзир ниво и трајање изложености становништва у конкретном случају, старосну и здравствену структуру потенцијално изложеног становништва, начин, време и место коришћења таквог извора, присуство других извора с различитим фреквенцијама, као и друге релевантне околности конкретног случаја;
- начело јавности – подаци о нејонизујућим зрачењима доступни су јавности.



Према Закону [22], испитивање зрачења које потиче од извора нејонизујућих зрачења јесте мерење, а по потреби и прорачун параметара поља и његове просторне расподеле у животној средини.

Ради успешне примене Закона [22], исте године је усвојено и шест пратећих правилника:

- Правилник о границама излагања нејонизујућим зрачењима [23];
- Правилник о изворима нејонизујућих зрачења од посебног интереса, врстама извора, начину и периоду њиховог испитивања [24];
- Правилник о садржини евиденције о изворима нејонизујућих зрачења од посебног интереса [25];
- Правилник о условима које морају да испуњавају правна лица која врше послове испитивања нивоа зрачења извора нејонизујућих зрачења од посебног интереса у животној средини [26];
- 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 [27];
- Правилник о садржини и изгледу обрасца извештаја о систематском испитивању нивоа нејонизујућих зрачења у животној средини [28].

Предмет уређивања Правилника [23] представља ограничење излагања становништва нејонизујућем зрачењу искључиво у зонама повећане осетљивости, тако да у преосталом делу животне средине нису прописане границе излагања. Према [23], у зоне повећане осетљивости спадају „подручја стамбених зона у којима се особе могу задржавати и 24 сата дневно; школе, домови, предшколске установе, породилишта, болнице, туристички објекти, те дечја игралишта; површине неизграђених парцела намењених, према урбанистичком плану, за наведене намене, у складу са препорукама Светске здравствене организације”. Референтни нивои за поље индустријске учестаности (50 Hz) у зонама повећане осетљивости, прописани Правилником [23], дати су у табели 2.3.

**Табела 2.3.** Референтни нивои за поље учестаности 50 Hz према Правилнику о границама излагања нејонизујућим зрачењима из 2009. године [23]

Област примене	Јачина електричног поља, $E$ [kV/m]	Магнетска индукција, $B$ [ $\mu$ T]
Зоне повећане осетљивости	2	40

Правилником о изворима нејонизујућих зрачења од посебног интереса, врстама извора, начину и периоду њиховог испитивања [24] дефинисана је и обавеза спровођења првог испитивања нејонизујућег зрачења, које се врши у околини новог или реконструисаног извора зрачења. Поменути правилником дефинисани су извори нејонизујућег зрачења од посебног интереса као „извори електромагнетног 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”. Корисници ових извора имају обавезу вршења периодичних мерења једном у четири године.

Према члану 11 Правилника [24], ако се у току првог или периодичног испитивања утврди ниво електромагнетног поља нижи од 10% прописаних граничних вредности, корисник неће вршити периодична испитивања. Према члану 12 истог правилника, прописи о заштити становништва у подручју повећане осетљивости не односе се на објекте који су накнадно изграђени унутар далеководних коридора.

У случају поља учестаности 50 Hz, изворима од посебног интереса сматрају се они извори који у зонама повећане осетљивости изазивају електрично поље веће од 200 V/m и/или магнетску индукцију већу од 4  $\mu$ T. Наведене вредности често могу бити прекорачене у зонама повећане осетљивости које се налазе у близини надземних водова, нарочито када су у питању преносни водови напонских нивоа 110 kV, 220 kV и 400 kV [39], што ове водове сврстава у категорију извора од посебног интереса и ствара обавезу спровођења периодичних испитивања. Зоне у околини надземних водова напонских нивоа 110 kV, 220 kV и 400 kV у којима може доћи до прекорачења референтних граничних нивоа и вредности од 10% референтних граничних нивоа, одређене су прорачуном и дате су у [37], [64], [65] и [72].

### **3. Мерење јачине електричног поља и магнетске индукције надземних електроенергетских водова**

#### **3.1. Увод**

Мерењем електричног и магнетског поља на терену добијају се информације које су од суштинског значаја за оцену изложености људи овим пољима. Најзначајнија предност овако добијених резултата јесте у томе што уважавају све услове који на терену реално постоје, као што су присуство објеката, нераван терен и сл. Моделовање ових услова је веома захтевно и повезано је с низом несигурности, али се такође поставља и питање оправданости оваквог приступа, имајући у виду велики број зона повећане осетљивости у околини надземних водова у којима је потребно спровести испитивања.

Мерењем се добијају вредности електричног и магнетског поља у датом тренутку, које одговарају реалним условима на терену у време мерења. Под овим условима подразумевају се тренутне висине проводника надземног вода, његово оптерећење, напони, као и постојање објеката у близини мерних места. Висине фазних проводника надземног вода имају значајан утицај на нивое електричног и магнетског поља у његовој близини, при чему смањење висина фазних проводника доводи до повећања вредности електричног и магнетског поља у простору испод вода [43], [68]. Висине фазних проводника изнад тла у време мерења не морају бити једнаке минималним висинама на датом месту, о чему треба водити рачуна приликом анализе резултата мерења и доношења закључка о усаглашености нивоа поља с прописаним границама излагања. Струја оптерећења надземног вода у великој мери зависи од тренутка када се врши мерење, и по правилу је знатно нижа од краткотрајно дозвољене струје. Из тог разлога и измерене вредности магнетске индукције у великој мери зависе од тренутка када се врши мерење, тј. од струје оптерећења вода у датом временском интервалу. Објекти који се налазе на локацији на којој се врши мерење доводе до пертурбације електричног поља. Због тога вредности јачине електричног поља добијене мерењима на локацијама где постоје поменути објекти одступају од теоријских вредности електричног поља које се добијају прорачуном у слободном простору у којем нема објеката. Из наведеног разлога вредности електричног поља добијене мерењем одговарају реалној изложености. Приликом мерења треба водити рачуна о томе да се у близини места на којем се врше мерења налазе искључиво стални и непокретни објекти, који перманентно доводе до пертурбације електричног поља на датом месту. Сви покретни објекти треба да буду удаљени од мерног места ради елиминисања њиховог утицаја на резултате мерења [8].

Вредности магнетске индукције добијене мерењем веома су значајне, јер одражавају реалну изложеност људи у периоду спровођења мерења, која одговара реалном оптерећењу надземног вода у том тренутку. Међутим, приликом доношења коначног закључка о усаглашености вредности магнетске индукције с прописаним границама излагања, неопходно је анализирати случај када је вод оптерећен максималном дозвољеном струјом у нормалном погону и када су висине фазних проводника изнад тла минималне.

Вредности јачине електричног поља добијене мерењем такође су веома значајне, јер одговарају реалној ситуацији изложености људи и уважавају утицај пертурбације електричног поља услед присуства објеката који у реалности постоје. Пошто се напон вода мења у уским границама, мање варијације напона неће довести до значајних промена вредности јачине електричног поља у односу на вредности добијене приликом мерења. Међутим, приликом доношења закључка о усаглашености вредности јачине електричног поља с прописаним границама значајно је анализирати случај када су висине фазних проводника изнад тла минималне.

У наставку поглавља дати су критеријуми које треба да испуни опрема која се користи за мерења, као и кратак опис методе мерења електричног и магнетског поља која је утврђена међународним стандардима.

## 3.2. Мерни инструменти

Системи за мерење електричног и магнетског поља састоје се од сензорског уређаја (сонде) и уређаја који одређује и приказује измерену вредност поља. Мерна сонда може да обезбеђује мерење дуж једне или дуж три осе. Сонда која је предвиђена за мерење дуж три осе мери ефективне вредности поља дуж три ортогоналне осе и одређује резултантно поље  $F_R$  на основу следећег израза [20]:

$$F_R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (3.1)$$

где је:

$F_R$  – резултантно поље које је једнако ефективној вредности поља у тачки мерења;

$F_x, F_y, F_z$  – ефективне вредности три ортогоналне компоненте поља у тачки мерења.

У случају када се мерење врши мерним системом са сондом која је предвиђена за мерење дуж три осе, вредност резултантног поља је независна од оријентације сонде у простору. Осим резултантне вредности поља, неки мерни уређаји такође могу да прикажу посебно  $x$ ,  $y$  и  $z$  компоненту јачине електричног поља и магнетске индукције [20].

У случају када се мерења електричног и магнетског поља у околини надземних водова спроводе ради провере усаглашености нивоа поља с прописаним границама излагања становништва, неопходно је истовремено мерење све три просторне компоненте електричног и магнетског поља, па је из наведених разлога неопходна употреба изотропне сонде [10].

Да би се обезбедиле тачност и могућност поређења резултата мерења, неопходно је периодично еталонирање мерних инструмената, у складу са захтевима стандарда [10]. Приликом еталонирања мора бити обезбеђена следљивост до националних и међународних еталона непрекинутим ланцем еталонирања.

Опсежи температуре и релативне влажности ваздуха за које је мерни инструмент декларисан зависе од типа инструмента. Приликом мерења би требало избегавати нагле промене температуре, које би довеле до појаве кондензације на мерном инструменту. У случају када се врше мерења јачине електричног поља у условима када је релативна влажност ваздуха виша од 70%, може доћи до грешке мерења услед појаве кондензације на мерној сонди и сталку [10].

Системе за мерење електричног поља и магнетске индукције чине детектор и мерне сонде. Приликом мерења електричног поља, сонда и детектор су повезани оптичким каблом дужине неколико метара, чиме се омогућава да се испитивач током мерења налази на одређеном растојању од сонде и на тај начин ограничава његов утицај на мерено поље. Приликом мерења магнетске индукције, сонда и детектор могу бити повезани директно или преко оптичког кабла, у зависности од типа мерног система.

За мерења јачине електричног поља и магнетске индукције која су приказана у наставку дисертације коришћен је мерни систем приказан на слици 3.1. Мерни систем чине анализатор електромагнетског поља EFA-300 и сонде за мерење јачине електричног поља и магнетске индукције, произвођача *Narda Safety Test Solutions* [81], [82]. Мерни систем приказан на слици 3.1. омогућава мерење јачине електричног поља и магнетске индукције у опсегу ниских фреквенција, од 5 Hz до 32 kHz, као и мерење фреквенције поља.

Детектор служи за меморисање и приказ измерених вредности јачине електричног поља и магнетске индукције на дисплеју, као и за избор опција мерења, као што су опсег, врста филтера, избор између ефективне или вршне вредности итд. У случају мерног система приказаног на слици 3.1, унутар детектора се налази и интерна сонда за мерење магнетске индукције.

Сонда за мерење јачине електричног поља је у облику коцке, странице 105 mm, и има сопствено напајање, тако да је омогућен њен аутономан рад и без присуства руковаоца, ако је то потребно. Сонда се уноси у електрично поље на сталку од изолационог материјала. У кућишту сонде је смештен сензор за мерење на капацитивном принципу, што омогућава мерење капацитивне струје која је сразмерна јачини електричног поља. Сензор чине три плочаста кондензатора, постављена међусобно ортогонално унутар сонде. Сваки кондензатор чине две међусобно изоловане проводне плоче на одређеном растојању. Ортогоналним постављањем кондензатора у сонди омогућено је истовремено мерење компонената вектора електричног поља, на основу чега инструмент израчунава резултантну вредност јачине електричног поља. На тај начин је омогућено изотропно мерење јачине електричног поља.

Сонда за мерење магнетске индукције је сферног облика, површине 100 cm<sup>2</sup>. Сензор чине три калема, постављена међусобно ортогонално унутар сонде. Мерење магнетске индукције заснива се на мерењу индукованог напона у калемовима сонде. Ортогоналним постављањем калемова у сонди омогућено је истовремено мерење компонената вектора магнетског поља, на основу чега инструмент израчунава резултантну вредност магнетске индукције. На тај начин је омогућено изотропно мерење магнетске индукције.



**Слика 3.1.** Систем за мерење електричног поља и магнетске индукције – анализатор електромагнетског поља EFA-300 (тип BN 2245/30) с екстерним сондама за мерење јачине електричног поља (тип BN 2245/90.31) и магнетске индукције (тип BN 2245/90.10) [81], [82]

У случају који је приказан у поглављу 10, где је вршено поређење резултата које дају два мерна система, као други мерни систем коришћен је систем приказан на слици 3.2. Овај мерни систем чине анализатор електромагнетског поља NBM-550 и сонда за мерење јачине електричног поља и магнетске индукције ENP-50F, произвођача *Narda Safety Test Solutions* [83]–[86]. Најзначајнија разлика у односу на претходни мерни систем јесте у томе што се сонда ENP-50F користи за мерење и електричног и магнетског поља. Сонда се приликом мерења поставља на сталак од изолационог материјала и повезује с детектором оптичким каблом дужине 10 m. Мерни систем приказан на слици 3.2. омогућава мерење јачине електричног поља и магнетске индукције у опсегу ниских фреквенција, од 1 Hz до 400 kHz, као и мерење фреквенције поља.



**Слика 3.2.** Систем за мерење јачине електричног поља и магнетске индукције – анализатор електромагнетског поља NBM-550 с екстерном сондом за мерење јачине електричног поља и магнетске индукције ENP-50F [83]–[86]

Коришћени системи за мерење јачине електричног поља и магнетске индукције који су приказани на сликама 3.1. и 3.2. обезбеђују изотропско мерење и испуњавају захтеве стандарда [10].

### 3.3. Поступак мерења електричног и магнетског поља

Мерење електричног и магнетског поља надземних електроенергетских водова врши се дуж правца паралелног с надземним водом, који се назива уздужни или лонгитудинални, и/или дуж правца управног на надземни вод, који се назива попречни или латерални правац. Мерење дуж лонгитудиналног правца може да буде корисно да би се показало како поље опада приликом померања из области највећег угиба, тј. најмање висине проводника према крајевима распона [20]. Електрично поље у близини стубова је смањено, не само због веће висине проводника већ и због присуства стубова. Мерењем дуж лонгитудиналног правца може се пронаћи место на којем су висине фазних проводника изнад тла најмање и на којем се из тог разлога јављају највише вредности јачине електричног поља и магнетске индукције. На том месту се затим врши мерење јачине електричног поља и магнетске индукције дуж латералног правца. У случају када је површина терена равна и када су позиције проводника надземног вода симетричне у односу на осу вода, мерење дуж латералног правца се може вршити од осе вода до дефинисаног растојања од спољашњег проводника. Мерења се изводе на одређеној висини изнад земље, која обично износи 1 m. Мерења се могу вршити и на некој другој висини, али је неопходно записати тачну висину на којој је извршено мерење. Растојање између суседних мерних места зависи од жељене тачности. Испод вода се мерења изводе с кораком који износи 1 m или 2 m, док је при већим растојањима од вода довољно вршити мерења с кораком од око 5 m [20]. Положај мерног правца се бира тако да се налази у делу простора у којем нема препрека, али тако да одговара местима на којима треба извршити процену изложености. У случају када постоји нагиб терена или када позиције проводника надземног вода нису симетричне у односу на осу вода, мерење се врши дуж целог латералног правца, тј. с обе стране вода [20].

Приликом мерења електричног и магнетског поља црта се план области у којој се врши мерење. План приказује стубове и проводнике вода и све значајне елементе у тој области, као што су грађевине, дрвеће, ограде, путеви итд. Локација и висина дрвећа и другог растиња у области у којој се изводи мерење такође се бележи, јер може бити значајна за интерпретацију резултата мерења електричног поља.

У току времена трајања мерења електрично поље се не мења много, пошто зависи само од висине проводника и напона који се веома мало мењају. Због тога није неопходно прецизно бележење времена сваког појединачног мерења електричног поља. То није случај када је у питању мерење магнетског поља, због тога што струја оптерећења надземног вода у току мерења може значајно да варира. Када се врши мерење магнетског поља, неопходно је обезбедити податак о струји оптерећења надземног вода у време мерења, ради процене највећих вредности магнетске индукције које би се јавиле приликом оптерећења вода максималном дозвољеном струјом.

Приликом мерења електричног и магнетског поља бележе се подаци о температури и релативној влажности ваздуха, с циљем провере да ли се ови параметри налазе у границама које су адекватне за исправно функционисање система за мерење електричног и магнетског поља.

### **3.3.1. Поступак мерења електричног поља**

Границе излагања људи нискофреквентном електричном пољу прописане су као ефективне вредности непертурбисаног поља. Због тога је неопходно мерење непертурбисаног електричног поља, како би било могуће упоређивање тако добијених резултата мерења с прописаним границама излагања.

На вредности јачине електричног поља у великој мери утиче присуство проводних објеката, чак и ако су ти објекти лоши електрични проводници, као нпр. дрвеће и друго растиње, ограде, зграде и др. [20].

Када је предмет анализе изложеност особе, неопходно је имати у виду да окружење особе укључује објекте као што су дрвеће, зграде и др., који нису покретни, а који утичу на вредности електричног поља. Мерење електричног поља ће обухватити ефекте локалних модификација поља услед присуства наведених објеката. У овим условима се појам „непертурбисано поље” може схватити као поље у одсуству људи и покретних објеката [20].

Увек када је то могуће, мерење електричног поља треба вршити у условима непертурбисаног поља, што подразумева да у току мерења покретни објекти и људи треба да се налазе на довољно великом растојању од мерне сонде, тако да њихово присуство не доводи до пертурбације поља [20].

Приликом мерења испитивач треба да се налази на одређеном растојању од мерне сонде, како би се ограничио његов утицај на резултате мерења. Према [20], минимално растојање између испитивача и мерне сонде износи 1,5 m, а препоручено растојање је 3 m.

Као што је раније наглашено, приликом мерења јачине електричног поља све покретне објекте треба удаљити увек када је то могуће. У супротном, растојање између објекта и мерне сонде треба да буде једнако најмање трострукој висини објекта, за покретан објекат, односно 1 m, за непокретан објекат. Објекти који не могу да се уклоне морају да се евидентирају, при чему се бележе њихова позиција и димензије [20].

Да би се сва мерења вршила на истој висини изнад земље и да би се ограничио утицај испитивача на резултате мерења електричног поља, мерна сонда треба да буде постављена на сталак од изолационог материјала. Присуство сталка доводи до одређене грешке приликом мерења електричног поља, што треба узети у обзир приликом прорачуна мерне несигурности.

### 3.3.2. Поступак мерења магнетске индукције

Присуство испитивача не утиче на нискофреквентно магнетско поље. Из тог разлога је већина мерних инструмената конструисана тако да се приликом мерења држи у руци, односно није неопходно коришћење сталка као код мерења електричног поља. Уколико се за мерење магнетске индукције не користи сталка, већ се инструмент приликом мерења држи у руци, неопходно је водити рачуна о висини на којој се налази мерна сонда, тј. о томе да се сва мерна места налазе на унапред дефинисаној висини изнад тла. Иако употреба сталка код мерења магнетског поља није неопходна, његово коришћење може допринети прецизном позиционирању сонде у простору.

Већина објеката који могу да доведу до пертурбације нискофреквентног електричног поља не утичу на нискофреквентно магнетско поље. Метални објекти, а посебно феромагнетни материјали, могу да утичу на вредности магнетског поља, због чега покретне објекте од наведених материјала треба удаљити пре почетка мерења магнетског поља [20].

Приликом мерења магнетске индукције неопходно је бележење тренутка када је извршено одређено мерење, због успостављања корелације између добијених резултата и вредности струја оптерећења надземног вода добијених од власника вода.

Многи фактори који утичу на мерење електричног поља нису од значаја приликом мерења магнетског поља, као што је утицај близине испитивача или утицај сталка. Ипак, утицај других фактора не се може занемарити. Главни фактори који утичу на тачност мерења магнетске индукције јесу: покретање сензора, временска константа мерног инструмента, тачност и стабилност мерног инструмента и неравномерност расподеле магнетског поља.

### 3.4. Примери мерења јачине електричног поља и магнетске индукције

Ради практичне демонстрације описане методе, у наставку је дато неколико примера мерења јачине електричног поља и магнетске индукције, која су спроведена у околини надземних водова напонских нивоа 110 kV, 220 kV и 400 kV.

У свим приказаним примерима изотропски су мерене ефективне вредности јачине електричног поља ( $E$ ) и магнетске индукције ( $B$ ). Истовремено је мерена и фреквенција поља ( $f$ ), која је у свим случајевима износила 50 Hz.

За мерење јачине електричног поља и магнетске индукције коришћен је мерни систем приказан на слици 3.1.

Мерења су спроведена на правцима који су приближно нормални на осе надземних водова, при чему је на избор и положај мерних праваца утицала и конфигурација терена. У близини латералних праваца дуж којих су вршена мерења није било објеката који би могли да доведу до пертурбације електричног поља, као што су куће, ограде, дрвеће итд. Латерални правци дуж којих су вршена мерења означени су са Р. На свим мерним местима мерење је спроведено на висини од 1 m изнад тла. Измерене вредности електричног поља и магнетске индукције приказане су у функцији  $x$  координате, при чему се координатни почетак налази у осе вода.

Осим измерених вредности јачине електричног поља и магнетске индукције, у наредним примерима приказани су и подаци о вредностима фазних струја надземних водова у време мерења, који су добијени од надлежне службе власника водова.

Мерења јачине електричног поља и магнетске индукције која су приказана у наредним примерима спроведена су на локацијама које се не налазе у зонама повећане осетљивости, због чега није основано поређење добијених резултата с референтним нивоима наведеним у поглављу 2, који се односе на зоне повећане осетљивости.



### 3.4.1. Надземни вод напонског нивоа 110 kV бр. 183, распон 13–14

Мерења јачине електричног поља и магнетске индукције надземног вода напонског нивоа 110 kV бр. 183 ТС „Зрењанин 1” – ТС „Зрењанин 2” спроведена су на распону између стубова бр. 13 и 14. Локација на којој су вршена мерења приказана је на слици 3.3. Температура је у току мерења износила 15°C, а релативна влажност ваздуха 53%.



Слика 3.3. Позиција мерног правца P с распоредом мерних места

Стубови бр. 13 и 14 приказани су на сликама 3.4. и 3.5. Фазни проводници надземног вода су типа Al/Ѕе 150/25. Према [78], трајно дозвољена струја у зимском периоду за овај тип проводника износи 540 А, док краткотрајно дозвољена струја у зимском периоду износи 650 А.

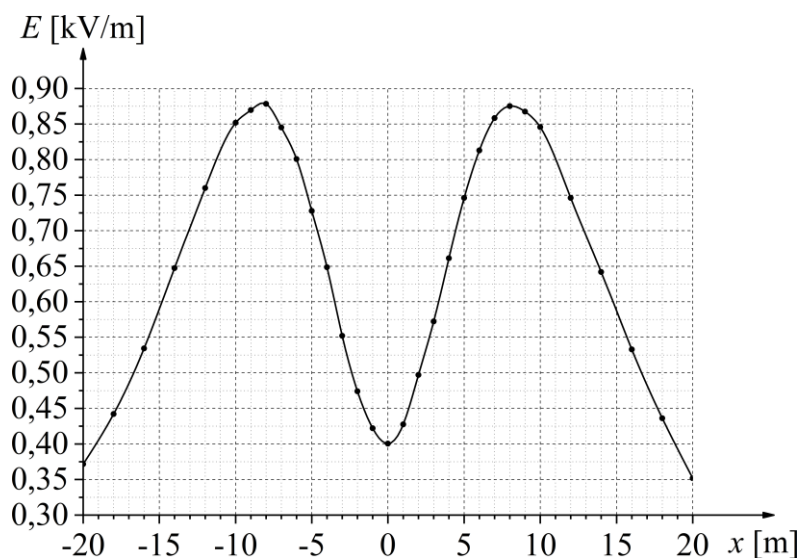


Слика 3.4. Стуб бр. 13  
(портал, носећи)

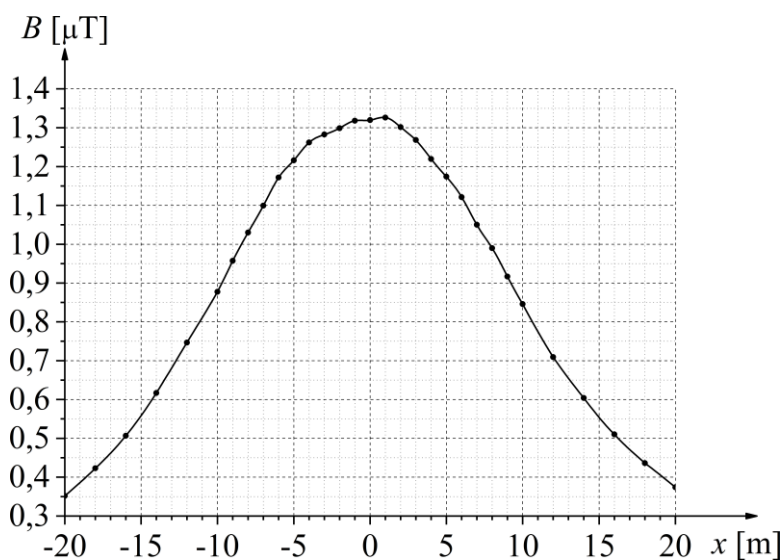


Слика 3.5. Стуб бр. 14  
(портал, носећи)

Резултати мерења електричног поља и магнетске индукције дуж латералног правца Р приказани су на сликама 3.6. и 3.7.

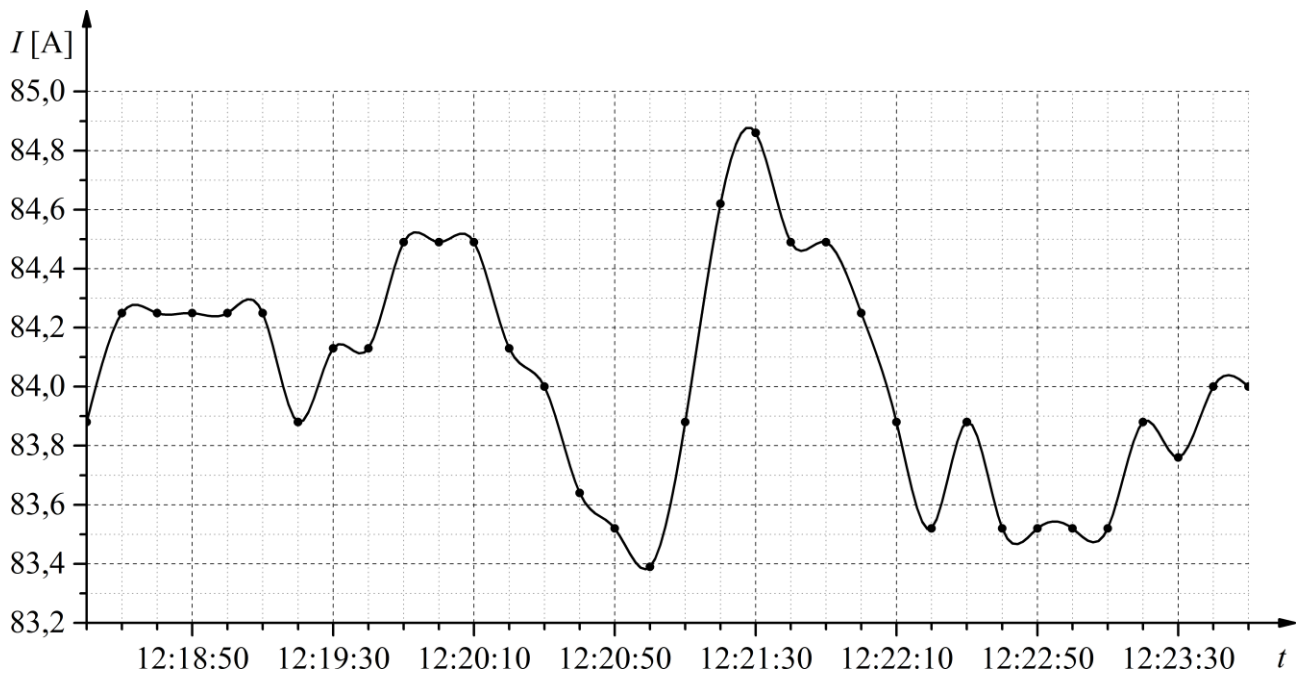


Слика 3.6. Резултати мерења јачине електричног поља дуж правца Р



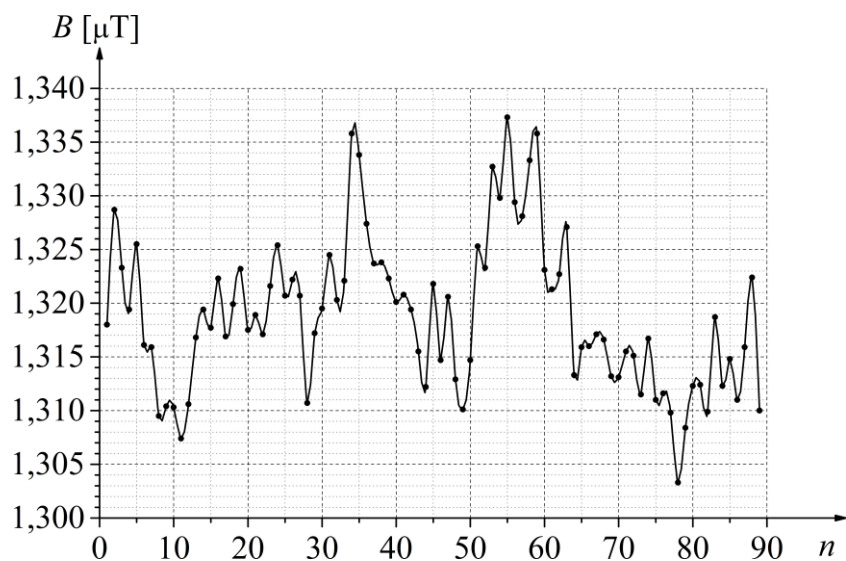
Слика 3.7. Резултати мерења магнетске индукције дуж правца Р

Вредности струје оптерећења надземног вода у време мерења магнетске индукције приказане су на слици 3.8. У конкретном случају били су доступни подаци само о струји у фази 4, која одговара средњем фазном проводнику, док вредности струја у фазама 0 и 8 нису мерене. Током мерења магнетске индукције дуж правца Р није било значајних промена струје у фази 4, што се може видети са слике 3.8. Аритметичка средина свих тренутних вредности струје оптерећења у време мерења магнетске индукције износи 84 А. Најмања вредност струје у периоду мерења износи 83,39 А, а највећа 84,86 А, што представља разлику од 1,8%.



Слика 3.8. Струја фазе 4 у време мерења магнетске индукције

Током целокупног времена трајања мерења магнетске индукције дуж латералног правца Р другим мерним системом, вршена су мерења магнетске индукције у оси вода, с временским кораком од 5 s. Резултати ових мерења приказани су на слици 3.9. На слици 3.9. је ознаком  $n$  обележен редни број мерења.

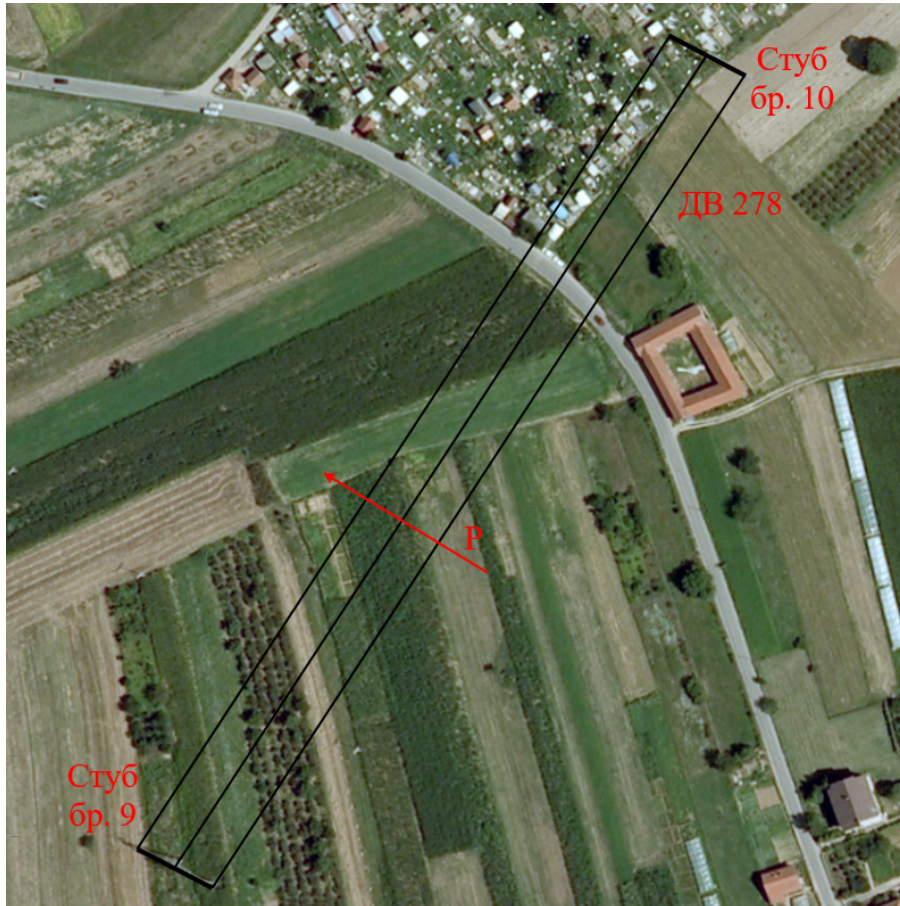


Слика 3.9. Резултати мерења магнетске индукције у оси вода

На основу резултата са слике 3.9. може се закључити да се током целокупног времена трајања мерења дуж правца Р магнетска индукција у тачки  $x = 0$  m није значајно мењала, што значи да у овом периоду није било значајних промена струја оптерећења вода у свим фазама. У току периода мерења најмања вредност магнетске индукције износила је 1,303  $\mu$ T, а највећа 1,337  $\mu$ T, што представља разлику од 2,6%.

### 3.4.2. Надземни вод напонског нивоа 220 kV бр. 278, распон 9–10

Мерења јачине електричног поља и магнетске индукције надземног вода напонског нивоа 220 kV бр. 278 ТС „Лесковац 2” – ТС „Ниш 2” спроведена су на распону између стубова бр. 9 и 10. Локација на којој су вршена мерења приказана је на слици 3.10. Температура је у току мерења износила 21°C, а релативна влажност ваздуха 45%.



Слика 3.10. Позиција мерног правца Р с распоредом мерних места

Стубови бр. 9 и 10 приказани су на сликама 3.11. и 3.12. Фазни проводници надземног вода су типа А1/Ѕе 360/57. Трајно дозвољена струја у зимском периоду за овај тип проводника износи 940 А, а краткотрајно дозвољена струја у зимском периоду 1140 А.

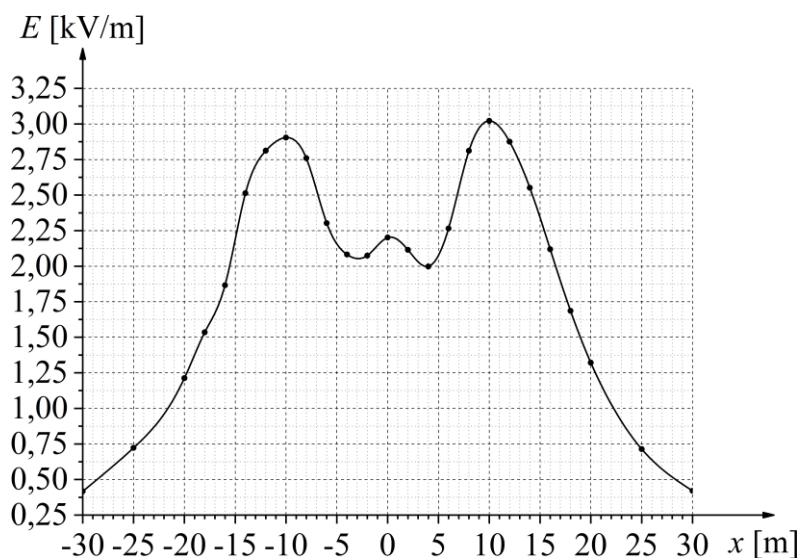


Слика 3.11. Стуб бр. 9  
(портал, носећи)

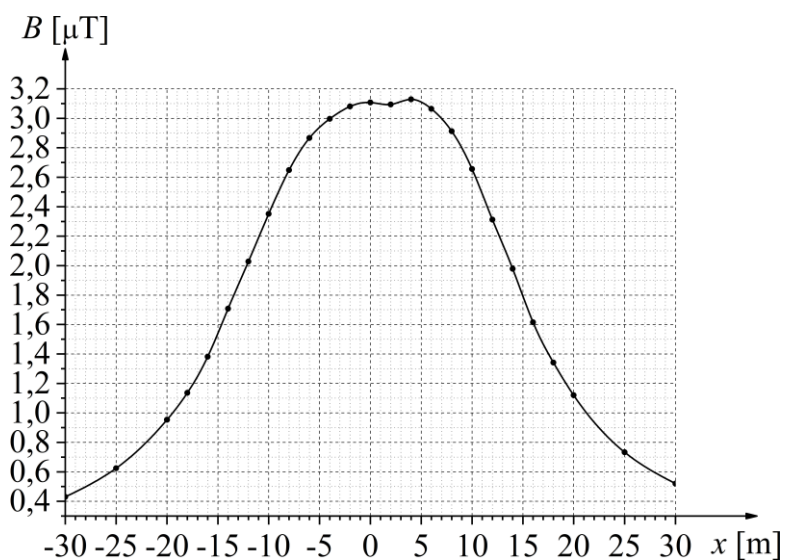


Слика 3.12. Стуб бр. 10  
(портал, носећи)

Резултати мерења електричног поља и магнетске индукције дуж латералног правца Р приказани су на сликама 3.13. и 3.14.

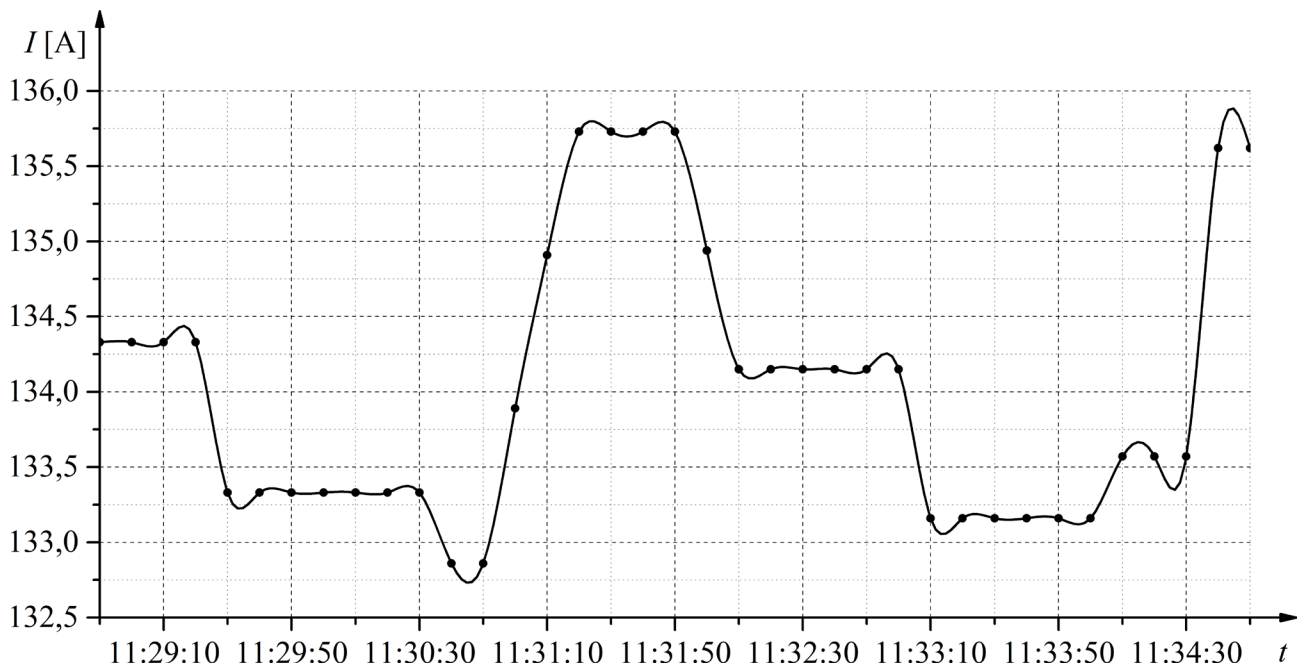


Слика 3.13. Резултати мерења јачине електричног поља дуж правца Р



Слика 3.14. Резултати мерења магнетске индукције дуж правца Р

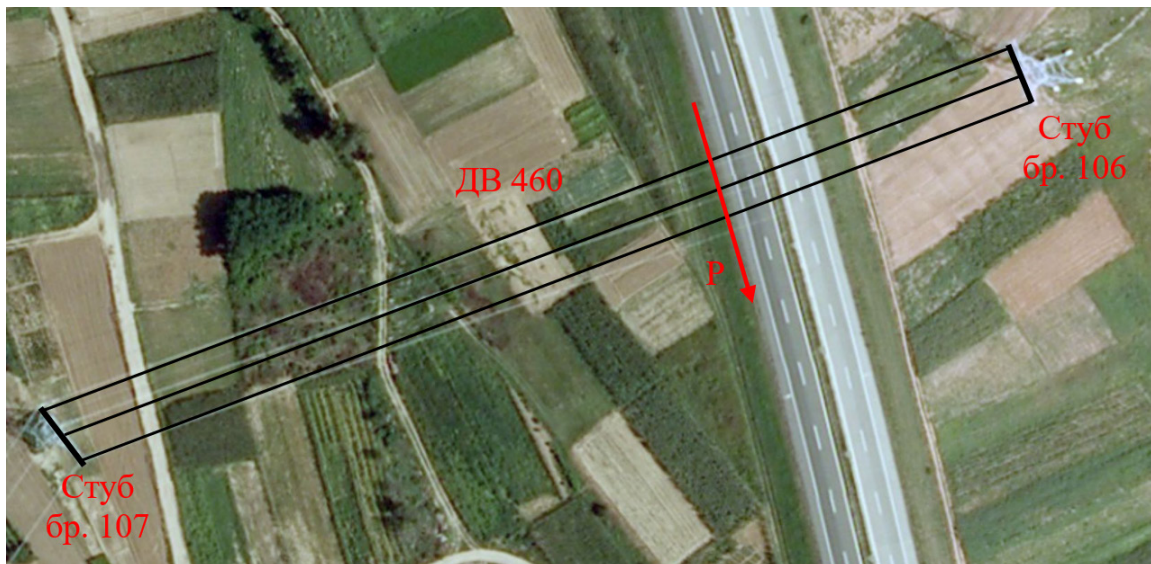
У конкретном случају добијени су подаци о струји у само једној фази, који су графички представљени на слици 3.15. Са слике 3.15. види се да током мерења магнетске индукције није било значајних промена ове струје. Аритметичка средина свих тренутних вредности струје оптерећења у време мерења магнетске индукције износи 134 А.



Слика 3.15. Струја оптерећења надземног вода у време мерења магнетске индукције

### 3.4.3. Надземни вод напонског нивоа 400 kV бр. 460, распон 106–107

Мерења јачине електричног поља и магнетске индукције надземног вода напонског нивоа 400 kV бр. 460 ТС „Ниш 2” – ТС „Лесковац 2” спроведена су на распону између стубова бр. 106 и 107. Локација на којој су вршена мерења приказана је на слици 3.16. Температура је у току мерења износила 24°C, а релативна влажност ваздуха 21%.



Слика 3.16. Позиција мерног правца P с распоредом мерних места

Стубови бр. 106 и 107 приказани су на сликама 3.17. и 3.18. Фазни проводници надземног вода су типа Al/Ѕе 2 × 490/65. Трајно дозвољена струја у зимском периоду за овај тип проводника износи 2280 А, док краткотрајно дозвољена струја у зимском периоду износи 2740 А.

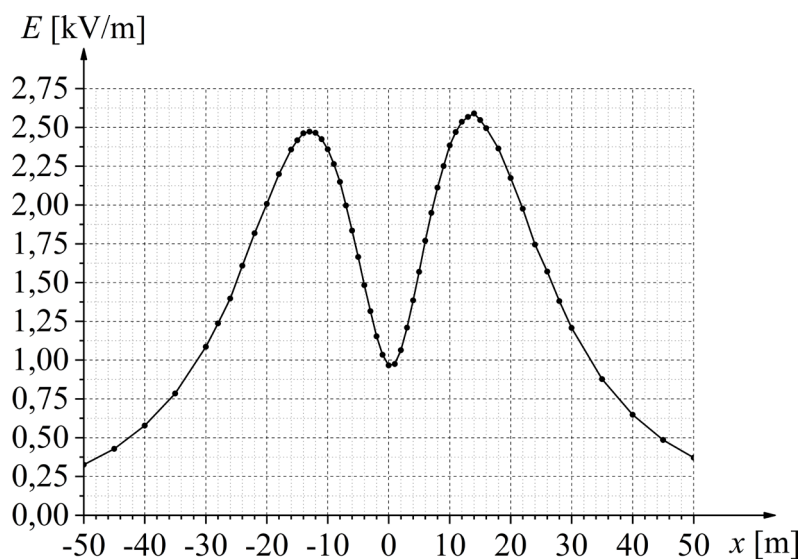


**Слика 3.17.** Стуб бр. 106  
(Y, затезни)

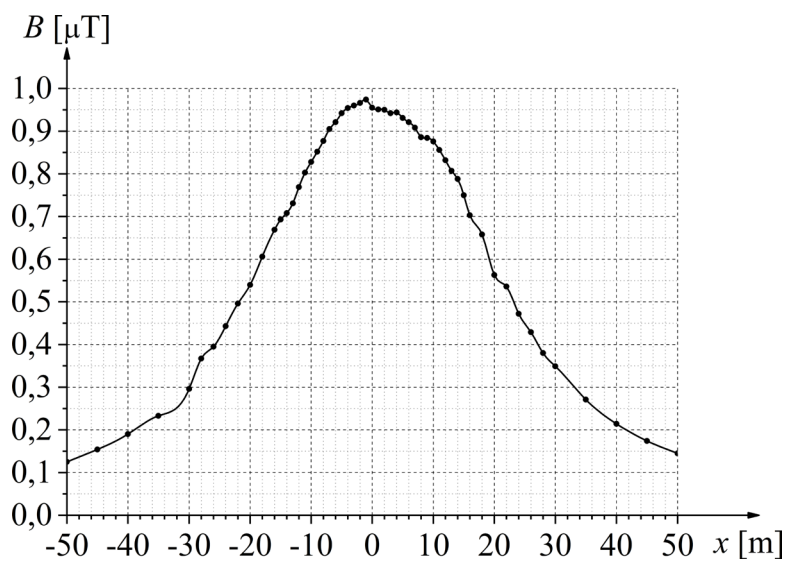


**Слика 3.18.** Стуб бр. 107  
(Y, угаоно-затезни)

Резултати мерења електричног поља и магнетске индукције дуж латералног правца P приказани су на сликама 3.19. и 3.20.

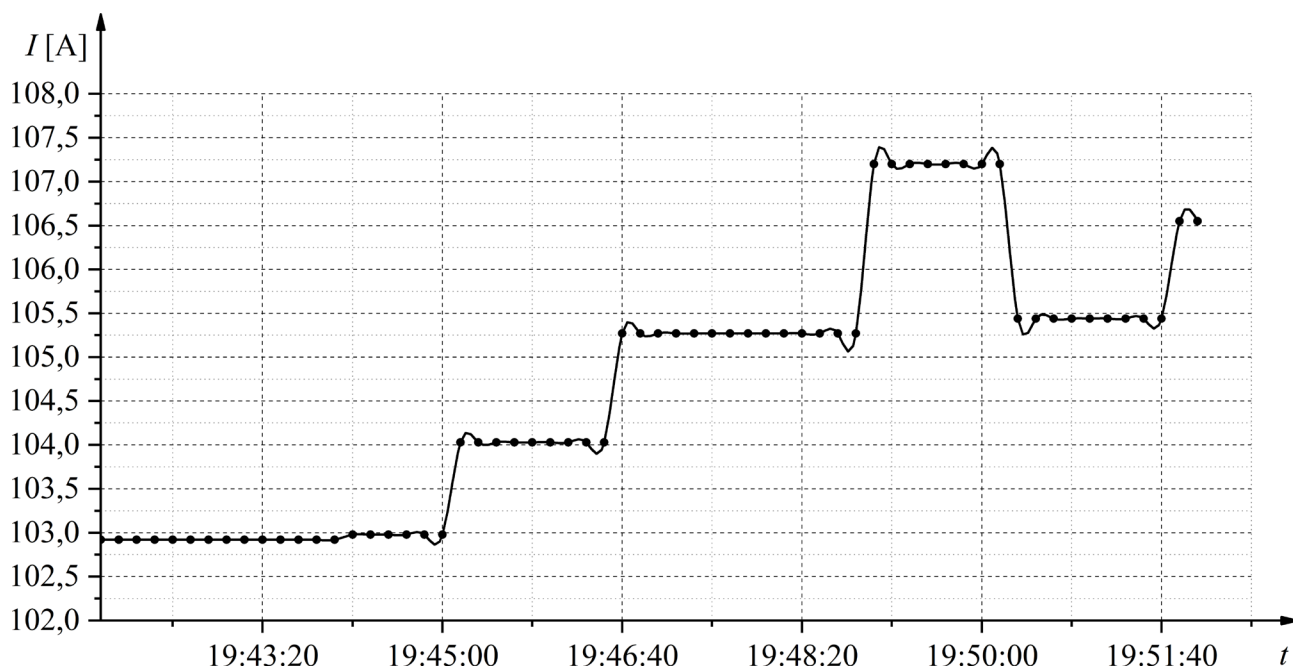


**Слика 3.19.** Резултати мерења јачине електричног поља дуж правца P



**Слика 3.20.** Резултати мерења магнетске индукције дуж правца P

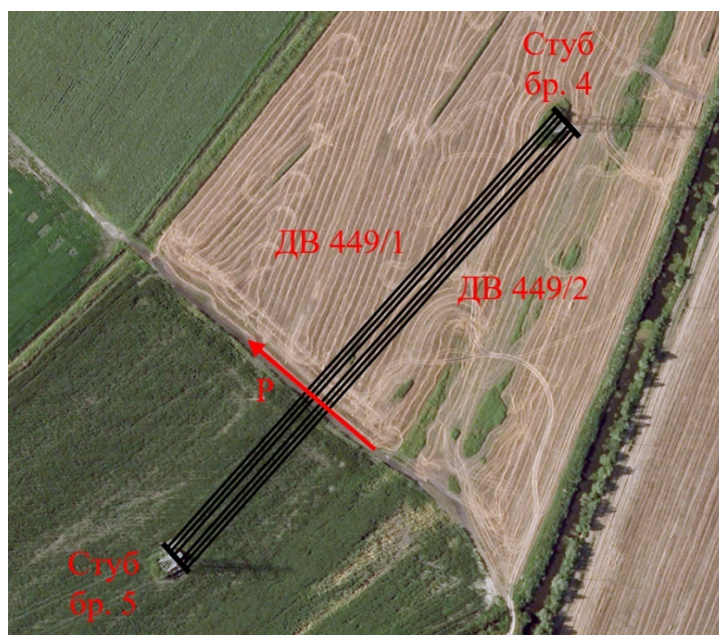
У конкретном случају добијени су подаци о струји само у фази 4, који су графички представљени на слици 3.21. Током мерења магнетске индукције дуж правца Р није било значајних промена струје оптерећења вода у фази 4, што се може видети са слике 3.21. Аритметичка средина свих тренутних вредности струје оптерећења у време мерења магнетске индукције износи 104,7 А.



Слика 3.21. Струја фазе 4 у време мерења магнетске индукције

#### 3.4.4. Двосистемски надземни вод напонског нивоа 400 kV бр. 449/1 и 449/2, распон 4–5

Мерења јачине електричног поља и магнетске индукције двосистемског надземног вода напонског нивоа 400 kV бр. 449/1 РП „Младост” – ТЕНТ Б Г1 и 449/2 РП „Младост” – ТЕНТ Б Г2 спроведена су на распону између стубова бр. 4 и 5. Локација на којој су вршена мерења приказана је на слици 3.22. Температура је у току мерења износила 20°C, а релативна влажност ваздуха 55%.



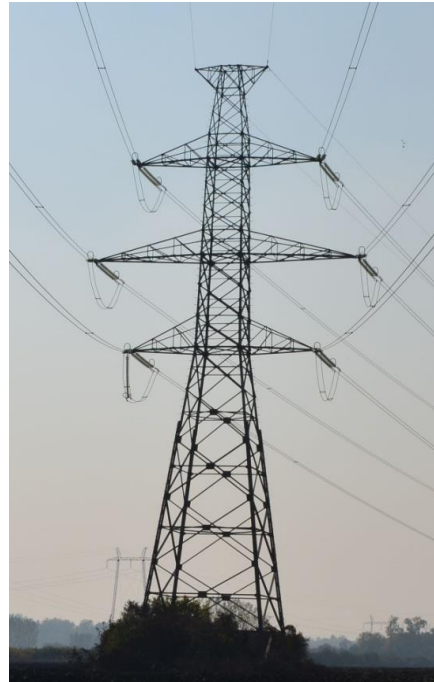
Слика 3.22. Позиција мерног правца Р с распоредом мерних места



Стубови бр. 4 и 5 приказани су на сликама 3.23. и 3.24. Фазни проводници надземног вода су типа  $Al/\check{C}e\ 2 \times 490/65$ . Трајно дозвољена струја у зимском периоду за овај тип проводника износи 2280 А, док краткотрајно дозвољена струја у зимском периоду износи 2740 А.

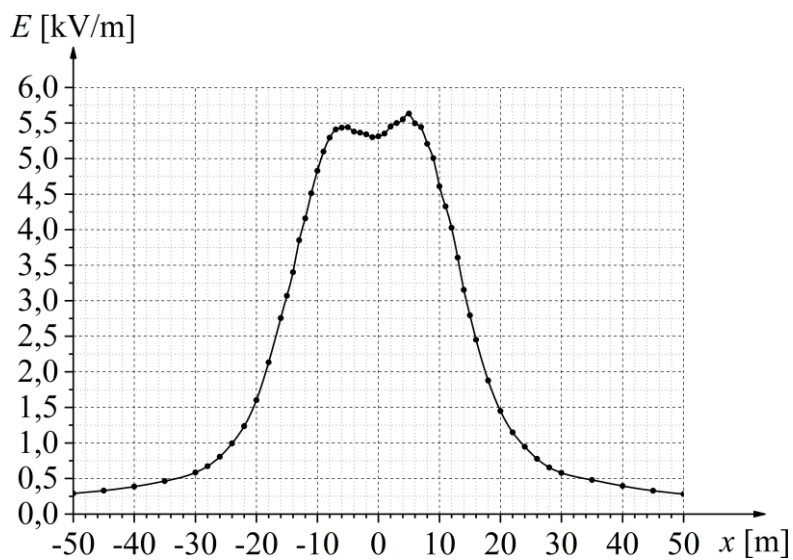


Слика 3.23. Стуб бр. 4  
(буре, носећи)

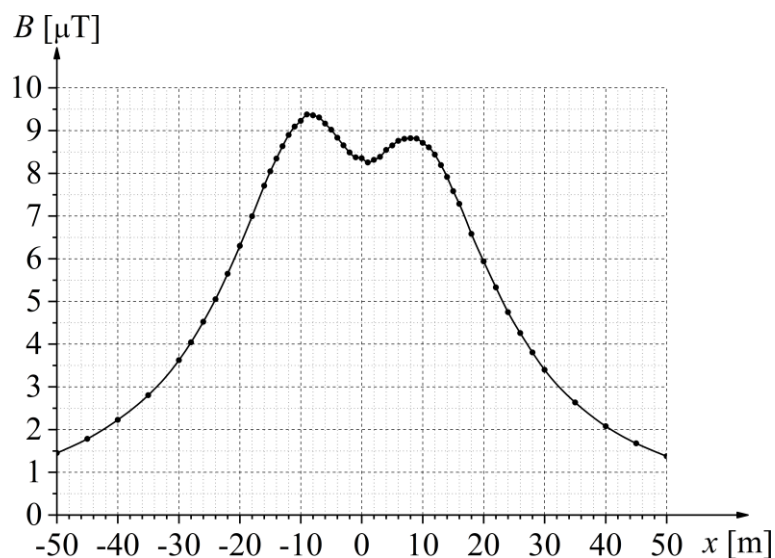


Слика 3.24. Стуб бр. 5  
(буре, затезни)

Резултати мерења електричног поља и магнетске индукције дуж латералног правца Р приказани су на сликама 3.25. и 3.26.

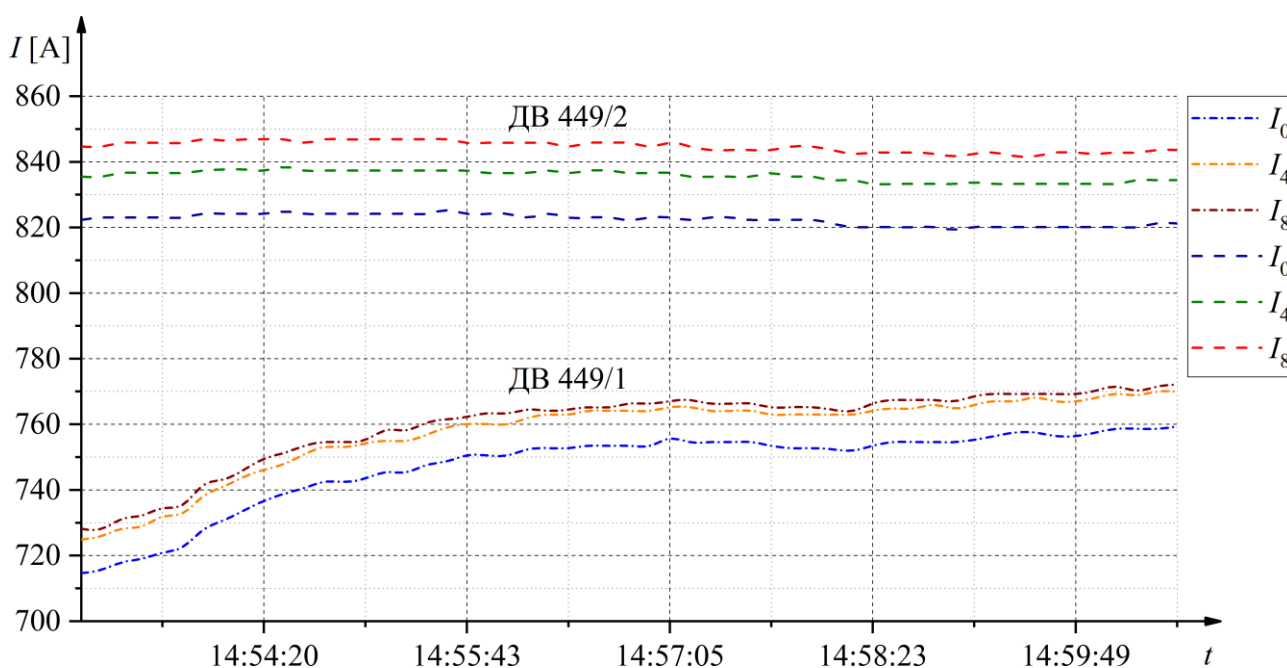


Слика 3.25. Резултати мерења јачине електричног поља дуж правца Р



Слика 3.26. Резултати мерења магнетске индукције дуж правца P

Струје оптерећења свих фаза оба вода у време мерења магнетске индукције приказане су на слици 3.27.



Слика 3.27. Струје оптерећења свих фаза у време мерења магнетске индукције

### 3.4.5. Коментар добијених резултата мерења

Мерења која су приказана у претходним примерима спроведена су у потпуности у складу са захтевима стандарда [7]–[12], при чему су добијени резултати који се односе на ситуацију у датом тренутку. Захтев стандарда [8] јесте да оцена изложености људи мора да буде спроведена за најнеповољнији случај, који подразумева највише нивое електричног поља и магнетске индукције. Због тога се поставља питање на који начин је могуће доћи до закључка о нивоима електричног поља и магнетске индукције у најнеповољнијем случају, тј. у случају када су висине фазних проводника изнад тла минималне и када је оптерећење надземног вода максимално.

## 4. Прорачун јачине електричног поља и магнетске индукције надземних електроенергетских водова

### 4.1. Увод

Приликом оцењивања усаглашености неопходно је имати у виду погонске услове вода који су најнеповољнији са аспекта нивоа поља који се јављају у његовој околини, у складу са захтевима [8]. Уколико погонски услови у време мерења не одговарају најнеповољнијим условима са аспекта нивоа поља, поред мерења је потребно вршити и прорачуне поља, при чему је неопходно моделовати најкритичнији случај у погледу изложености људи. Прорачуном се може одредити јачина електричног поља за случај када би висина фазних проводника била мања од висине приликом мерења, као и за случај када не би постојали објекти који доводе до пертурбације електричног поља. Такође, може се израчунати магнетска индукција која би се јавила при мањим висинама фазних проводника, као и приликом максималног оптерећења вода.

Различите методе прорачуна јачине електричног поља и магнетске индукције у околини надземних електроенергетских водова описане су и примењене у [49]–[62]. Прорачуни у дисертацији спроведени су применом две различите методе. Прва метода се заснива на прорачуну електричног и магнетског поља у околини праволинијских бесконачно дугих проводника. Ова метода је детаљно описана у поглављу 4.2. Друга метода је описана у поглављу 4.3, и она у прорачуну уважава стварни облик проводника, тј. облик ланчанице. Уколико није другачије наглашено, прорачуни приказани у дисертацији добијени су применом методе која се заснива на прорачуну у околини праволинијских проводника. Ова метода је једноставна за примену и захтева познавање и уношење мањег броја улазних података, чиме се скраћује време потребно за спровођење прорачуна и смањује могућност грешке. Примена наведене методе препоручена је у [12] и [66]. У поглављима 8 и 9 дато је поређење резултата јачине електричног поља и магнетске индукције који се добијају применом две поменуте методе.

### 4.2. Прорачун јачине електричног поља и магнетске индукције за случај праволинијских проводника

У даљем тексту је приказана метода прорачуна јачине електричног поља и магнетске индукције која се заснива на претпоставци да су фазни и заштитни проводници надземног вода прави и бесконачно дугачки и да се налазе изнад равног тла [12], [42], [43].

#### 4.2.1. Прорачун јачине електричног поља

Ради израчунавања електричног поља које се јавља у близини надземног вода потребно је поћи од израза за интензитет вектора јачине електричног поља у околини праволинијског проводника:

$$E(t) = \frac{q(t)}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (4.1)$$

где су:

$E(t)$  – тренутна вредност јачине електричног поља у околини праволинијског проводника;

$q(t)$  – тренутно подужно наелектрисање проводника;

$r$  – растојање од центра проводника до тачке у којој се рачуна електрично поље;

$\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$  F/m – диелектрична константа вакуума.

Прорачун се заснива се на следећим претпоставкама:

- Фазни и заштитни проводници надземног вода моделовани су скупом бесконачно дугих, праволинијских проводника, који су међусобно паралелни изнад равног тла.
- Наелектрисања су распоређена површински, на проводницима и на површини земље, при чему не постоје запремински распоређена наелектрисања.
- Тло се сматра идеалним проводником, јер је време које је потребно да се наелектрисања распореде по површини тла услед промене електричног поља изузетно мало у поређењу с индустријском учестаношћу од 50 Hz [42].
- Пермитивност ваздуха једнака је пермитивности вакуума и независна је од промене амбијенталних услова, тј. од промене релативне влажности ваздуха и температуре.
- Променљиво електрично поље сматра се квазистатичким, односно потпуно статичким, имајући у виду да је таласна дужина поља знатно већа од димензија које су од интереса за анализу [42].
- Прорачун се спроводи у две просторне димензије, коришћењем теореме ликова.

Наелектрисања која су распоређена по површини фазних и заштитних проводника надземног вода моделују се наелектрисањима која се налазе у центрима проводника. Наелектрисања распоређена по површини тла моделују се наелектрисањима ликова који имају једнаке количине наелектрисања супротног поларитета у односу на наелектрисања проводника. Ликови су постављени симетрично оригиналним проводницима у односу на површину земље као раван огледања.

Овако формираним системом наелектрисања моделује се електрично поље које се јавља у простору између проводника надземног вода и тла. Електрично поље у свакој тачки простора у околини надземног вода може се израчунати из наелектрисања проводника, полазећи од познатих потенцијала сваког проводника и познате геометрије.

У случају система од  $n$  проводника, важи следећа веза између њихових подужних наелектрисања и потенцијала:

$$\begin{bmatrix} \varphi_1(t) \\ \varphi_2(t) \\ \vdots \\ \varphi_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ \vdots \\ q_n(t) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

где су:

$q_i(t)$  – тренутна вредност подужног наелектрисања  $i$ -тог проводника;

$\varphi_i(t)$  – тренутна вредност потенцијала  $i$ -тог проводника;

$a_{ii}$  – сопствени потенцијални коефицијент  $i$ -тог проводника;

$a_{ij}$  – међусобни потенцијални коефицијент  $i$ -тог и  $j$ -тог проводника.

Сопствени потенцијални коефицијенти  $a_{ii}$  рачунају се применом следећег израза:

$$a_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{2h_i}{r_i} \quad (4.3)$$

при чему су:

$h_i$  – висина  $i$ -тог проводника;

$r_i$  – полупречник  $i$ -тог проводника.

Уколико су фазни проводници у снопу, као што је случај код водова напонског нивоа 400 kV, сноп се еквивалентира једним проводником. Еквивалентни полупречник снопа фазних проводника рачуна се као:

$$r_{es} = \sqrt[n]{n \cdot r_k \cdot R^{n-1}} \quad (4.4)$$

где су:

$r_{es}$  – еквивалентни полупречник снопа фазних проводника;

$r_k$  – полупречник проводника који чине сноп;

$R$  – полупречник круга који образују центри проводника у снопу;

$n$  – број проводника у снопу.

Пошто је код надземних водова напонског нивоа 400 kV број проводника у снопу једнак 2, претходни израз постаје:

$$r_{es} = \sqrt{2 \cdot r_k \cdot R} \quad (4.5)$$

Међусобни потенцијални коефицијенти  $a_{ij}$  рачунају се као:

$$a_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} \quad (4.6)$$

где су:

$d_{ij}$  – међусобно растојање  $i$ -тог и  $j$ -тог проводника;

$D_{ij}$  – међусобно растојање  $i$ -тог проводника и lika  $j$ -тог проводника.

Пошто се фазни напони вода дефинишу као разлика потенцијала фазног проводника и потенцијала земље, следи да се уместо с потенцијалима, може радити с напонима. При томе се сматра да напони образују симетричан систем напона, тј. да важи:

$$u_a(t) + u_b(t) + u_c(t) = 0 \quad (4.7)$$

Пошто су од интереса подужна наелектрисања на проводницима вода, она се могу изразити преко познатих величина на основу израза 4.2:

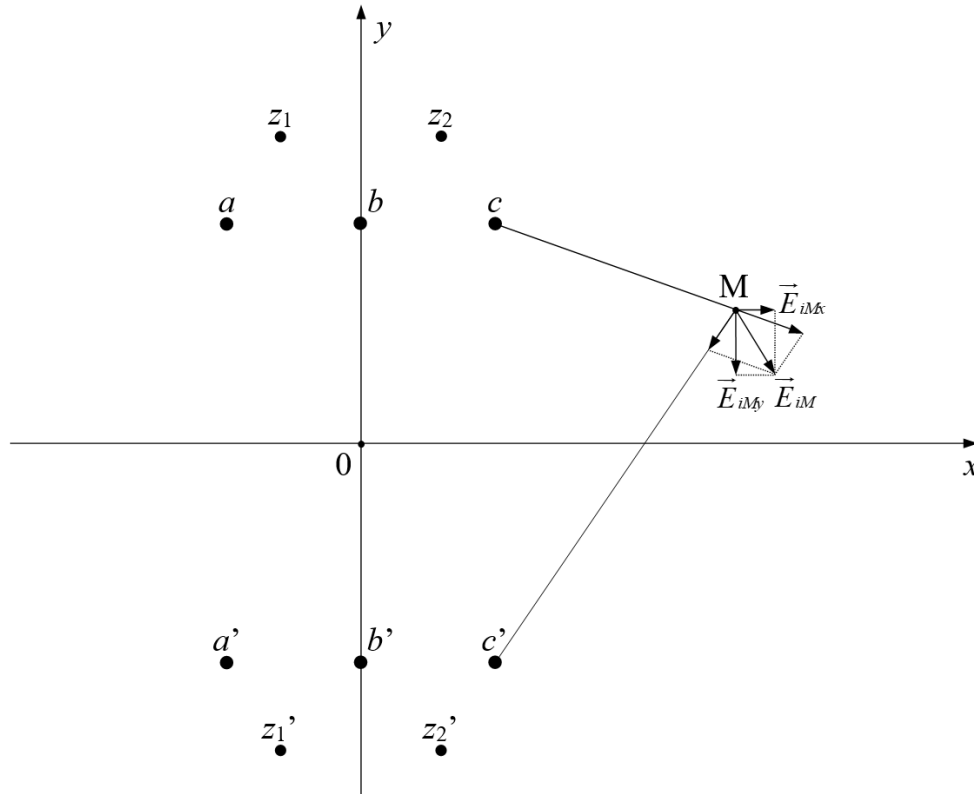
$$\begin{bmatrix} q_a(t) \\ q_b(t) \\ q_c(t) \\ q_{z1}(t) \\ q_{z2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{aa} & a_{ab} & a_{ac} & a_{az1} & a_{az2} \\ a_{ab} & a_{bb} & a_{bc} & a_{bz1} & a_{bz2} \\ a_{ac} & a_{bc} & a_{cc} & a_{cz1} & a_{cz2} \\ a_{az1} & a_{bz1} & a_{cz1} & a_{z1z1} & a_{z1z2} \\ a_{az2} & a_{bz2} & a_{cz2} & a_{z1z2} & a_{z2z2} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} U_m \cos(\omega t) \\ U_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ U_m \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Израз (4.8) односи се на једносистемски надземни вод с два заштитна проводника. У вектору напона последње две нуле представљају напоне заштитних проводника.

На овај начин се добијају подужна наелектрисања за временски тренутак  $t$ . Варирањем  $t$  за више дискретних тренутака током периоде добија се промена подужних наелектрисања у времену.

Након израчунавања подужних наелектрисања проводника вода, може се прећи на прорачун јачине електричног поља.

За произвољну тачку М у околини вода, вектор јачине електричног поља који потиче од проводника  $i$  потребно је разложити на  $x$  и  $y$  компоненту, као што је приказано на слици 4.1, да би се допринеси вредности јачине поља свих проводника сабрали и на крају израчунала укупна вредност јачине електричног поља у тој тачки.



Слика 4.1. Израчунавање компонента вектора јачине електричног поља у тачки М

Изрази за израчунавање  $x$  и  $y$  компонента електричног поља које потичу од  $i$ -тог проводника у тачки М су:

$$E_{iMx}(t) = \frac{q_i(t)}{2\pi\epsilon_0 r} \cdot \frac{x}{r} = \frac{q_i(t)}{2\pi\epsilon_0} \left( \frac{x_M - x_i}{(x_M - x_i)^2 + (y_M - y_i)^2} - \frac{x_M - x_i'}{(x_M - x_i')^2 + (y_M - y_i')^2} \right) \quad (4.9)$$

$$E_{iMy}(t) = \frac{q_i(t)}{2\pi\epsilon_0 r} \cdot \frac{y}{r} = \frac{q_i(t)}{2\pi\epsilon_0} \left( \frac{y_M - y_i}{(x_M - x_i)^2 + (y_M - y_i)^2} - \frac{y_M - y_i'}{(x_M - x_i')^2 + (y_M - y_i')^2} \right) \quad (4.10)$$

Након одређивања  $x$  и  $y$  компоненте електричног поља, које потичу од свих проводника и њихових ликова, укупна вредност електричног поља у тачки М израчунава се применом следећих израза:

$$E_{Mx} = \sum_{i=1}^n E_{iMx} \quad (4.11)$$

$$E_{My} = \sum_{i=1}^n E_{iMy} \quad (4.12)$$

$$E_M = \sqrt{E_{Mx}^2 + E_{My}^2} \quad (4.13)$$

Померањем тачке М дуж латералног правца са одређеним кораком и коришћењем претходних израза добија се расподела електричног поља дуж тог правца. Добијена је расподела јачине електричног поља за временски тренутак  $t$ . Потребно је да се сада варира  $t$  и на тај начин добије расподела и у времену. Даље се на основу временске расподеле израчунава ефективна вредност јачине електричног поља.

#### 4.2.2. Прорачун магнетске индукције

Ради израчунавања магнетске индукције у близини надземног вода полази се од израза за интензитет вектора магнетске индукције у околини праволинијског проводника:

$$B(t) = \frac{\mu_0 \cdot i(t)}{2\pi r} \quad (4.14)$$

где су:

$B(t)$  – тренутна вредност магнетске индукције у околини праволинијског проводника;

$i(t)$  – тренутна вредност струје која протиче кроз проводник;

$r$  – растојање од центра проводника до тачке у којој се рачуна магнетска индукција;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$  – магнетска пермеабилност вакуума.

Прорачун се заснива на следећим претпоставкама:

– Проводници надземног вода моделовани су скупом бесконачно дугих, праволинијских проводника, који су међусобно паралелни изнад равног тла.

– Земља је лош проводник магнетског поља. Присуство тла се може моделовати ликовима проводника који се налазе на великој дубини, па се за потребе прорачуна магнетског поља у околини надземног вода присуство ликова може занемарити без утицаја на тачност прорачуна. Пермеабилност земље блиска је пермеабилности вакуума. На индустријској учестаности од 50 Hz и при специфичној отпорности тла од 100  $\Omega\text{m}$ , дубина на којој се налазе ликови износи око 930 m, тако да се утицај ликова може занемарити.

– Променљиво магнетско поље сматра се квазистатичким, односно потпуно статичким, имајући у виду да је таласна дужина поља знатно већа од димензија које су од интереса за анализу [42].

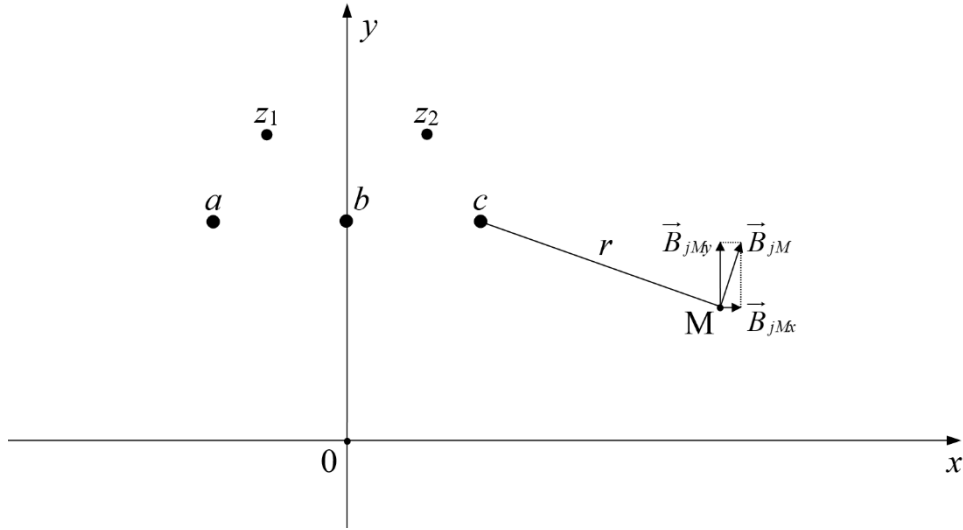
За израчунавање магнетске индукције неопходно је познавати струје које протичу кроз проводнике вода.

Прорачун магнетске индукције такође укључује разлагање вектора магнетске индукције на  $x$  и  $y$  компоненту, као што је приказано на слици 4.2.

Изрази за  $x$  и  $y$  компоненту вектора магнетске индукције у тачки М, која потиче од  $j$ -тог проводника су:

$$B_{jMx}(t) = \frac{\mu_0 \cdot i(t)}{2\pi r} \cdot \frac{y}{r} = \frac{\mu_0 \cdot i(t)}{2\pi} \cdot \frac{y_j - y_M}{(x_M - x_j)^2 + (y_M - y_j)^2} \quad (4.15)$$

$$B_{jMy}(t) = \frac{\mu_0 \cdot i(t)}{2\pi r} \cdot \frac{x}{r} = \frac{\mu_0 \cdot i(t)}{2\pi} \cdot \frac{x_M - x_j}{(x_M - x_j)^2 + (y_M - y_j)^2} \quad (4.16)$$



Слика 4.2. Израчунавање компонената вектора магнетске индукције у тачки М

Након израчунавања  $x$  и  $y$  компоненте вектора магнетске индукције које потичу од свих проводника, укупна вредност магнетске индукције у тачки М рачуна се на следећи начин:

$$B_{Mx} = \sum_{j=1}^n B_{jMx} \quad (4.17)$$

$$B_{My} = \sum_{j=1}^n B_{jMy} \quad (4.18)$$

$$B_M = \sqrt{B_{Mx}^2 + B_{My}^2} \quad (4.19)$$

На описани начин се рачунају вредности магнетске индукције које потичу од фазних проводника надземног вода, при чему је занемарен утицај струја које се индукују у заштитним проводницима. Занемаривање овог утицаја доводи до разлике од неколико процената у односу на случај када се прорачун изводи уз уважавање овог утицаја [42]. Поменуте разлике су детаљно анализирани у [43].

Уколико је у прорачунима потребно уважити и утицај заштитне ужади, неопходно је прво израчунати струје које се у њима индукују.

У случају једносистемског надземног вода који има два заштитна проводника, матрична једначина која повезује напоне и струје проводника вода има следећи облик:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} & M_{az1} & M_{az2} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} & M_{bz1} & M_{bz2} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c & M_{cz1} & M_{cz2} \\ M_{az1} & M_{bz1} & M_{cz1} & L_{z1} & M_{z1z2} \\ M_{az2} & M_{bz2} & M_{cz2} & M_{z1z2} & L_{z2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \\ \underline{I}_{z1} \\ \underline{I}_{z2} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$



при чему су:

$L_i$  – сопствена подужна индуктивност  $i$ -тог проводника;

$M_{ij}$  – међусобна подужна индуктивност  $i$ -тог и  $j$ -тог проводника.

У претходном изразу су занемарене активне отпорности.

Сопствена подужна индуктивност фазних проводника се рачуна као:

$$L_{f_i} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \left( \frac{D_e + h_{f_i}}{r_{es}} \right) \quad (4.21)$$

где су:

$L_{f_i}$  – сопствена подужна индуктивност  $i$ -тог фазног проводника;

$h_{f_i}$  – висина  $i$ -тог фазног проводника;

$r_{es}$  – еквивалентни полупречник снопа фазних проводника;

$D_e$  – дубина еквивалентног повратног пута струје кроз земљу.

Дубина еквивалентног повратног пута струје кроз земљу  $D_e$  израчунава се као:

$$D_e = 658 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (4.22)$$

где су:

$\rho$  – специфични отпор тла;

$f$  – фреквенција.

Еквивалентни полупречник снопа фазних проводника који фигурише у изразу 4.21. израчунава се применом израза (4.4). При томе се полупречник једног фазног проводника снопа рачуна као:

$$r_k = 0,9 \cdot r_f \quad (4.23)$$

На овај начин се уважава унутрашња индуктивност проводника.

Сопствена подужна индуктивност заштитних проводника се рачуна као:

$$L_{z_i} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \left( \frac{D_e + h_{z_i}}{r_{ez}} \right) \quad (4.24)$$

где су:

$L_{z_i}$  – сопствена подужна индуктивност  $i$ -тог заштитног проводника;

$h_{z_i}$  – висина  $i$ -тог заштитног проводника;

$r_{ez}$  – еквивалентни полупречник заштитног проводника.

Еквивалентни полупречник заштитног проводника рачуна се као:

$$r_{ez} = 0,85 \cdot r_z \quad (4.25)$$

при чему је:

$r_z$  – полупречник заштитног проводника.

Међусобна подужна индуктивност проводника рачуна се као:

$$M_{ij} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + \left(D_e + \frac{y_i}{2} + \frac{y_j}{2}\right)^2}}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}} \quad (4.26)$$

где су:

$M_{ij}$  – међусобна подужна индуктивност проводника  $i$  и  $j$ ;

$x_i, y_i$  –  $x$  и  $y$  координате  $i$ -тог проводника;

$x_j, y_j$  –  $x$  и  $y$  координате  $j$ -тог проводника.

Пошто су израчунате сопствене и међусобне подужне индуктивности, може се приступити израчунавању струја које протичу кроз заштитне проводнике. Ако се пође од израза (4.20), може се написати:

$$0 = M_{az_1} \cdot \underline{I}_a + M_{bz_1} \cdot \underline{I}_b + M_{cz_1} \cdot \underline{I}_c + L_{z_1} \cdot \underline{I}_{z_1} + M_{z_1 z_2} \cdot \underline{I}_{z_2} \quad (4.27)$$

$$0 = M_{az_2} \cdot \underline{I}_a + M_{bz_2} \cdot \underline{I}_b + M_{cz_2} \cdot \underline{I}_c + L_{z_2} \cdot \underline{I}_{z_1} + M_{z_1 z_2} \cdot \underline{I}_{z_2} \quad (4.28)$$

Ако се ради поједностављења уведу следећи коефицијенти:

$$\underline{k}_1 = -\left(M_{az_1} \cdot \underline{I}_a + M_{bz_1} \cdot \underline{I}_b + M_{cz_1} \cdot \underline{I}_c\right) \quad (4.29)$$

$$\underline{k}_2 = -\left(M_{az_2} \cdot \underline{I}_a + M_{bz_2} \cdot \underline{I}_b + M_{cz_2} \cdot \underline{I}_c\right) \quad (4.30)$$

добија се:

$$L_{z_1} \cdot \underline{I}_{z_1} + M_{z_1 z_2} \cdot \underline{I}_{z_2} = \underline{k}_1 \quad (4.31)$$

$$L_{z_2} \cdot \underline{I}_{z_1} + M_{z_1 z_2} \cdot \underline{I}_{z_2} = \underline{k}_2 \quad (4.32)$$

Решавањем овог система по струјама кроз заштитне проводнике добија се:

$$\underline{I}_{z_1} = \frac{\underline{k}_1 \cdot L_{z_2} - \underline{k}_2 \cdot M_{z_1 z_2}}{L_{z_1} \cdot L_{z_2} - M_{z_1 z_2}^2} \quad (4.33)$$

$$\underline{I}_{z_2} = \frac{\underline{k}_2 \cdot L_{z_1} - \underline{k}_1 \cdot M_{z_1 z_2}}{L_{z_1} \cdot L_{z_2} - M_{z_1 z_2}^2} \quad (4.34)$$

### 4.3. Прорачун јачине електричног поља и магнетске индукције уз уважавање стварног облика проводника

Прорачун јачине електричног поља и магнетске индукције методом која уважава стварни облик проводника спроведен је применом софтверског пакета *XGSLab* [87], [88].

Софтверски пакет *XGSLab* намењен је за прорачуне који се односе на надземне водове, уземљивачке системе и атмосферска пражњења. Софтверски пакет садржи следећих пет модула: *GSA* (*Grounding System Analysis*), *GSA\_FD* (*Grounding System Analysis in the Frequency Domain*), *XGSA\_FD* (*Over and Under Ground System Analysis in the Frequency Domain*), *XGSA\_TD* (*Over and Under Ground System Analysis in the Time Domain*) и *NETS* (*Network Solver*). Модули *GSA*, *GSA\_FD*, *XGSA\_FD* и *XGSA\_TD* су засновани на Максвеловим једначинама, Гриновим функцијама и Зомерфелдовим интегралима, који су имплементирани у нумерички приступ који се назива *PEEC* (енгл. *Partial Element Equivalent Circuit*) метод [87]. Прорачуни електричног и магнетског поља у дисертацији спроведени су применом модула *XGSA\_FD*, који је намењен за прорачуне који се односе на надземне водове. У наведеном модулу надземни вод је могуће моделовати праволинијским проводницима, као и проводницима који имају облик ланчанице.

### 4.4. Примери прорачуна јачине електричног поља и магнетске индукције

У овом поглављу су, применом методе засноване на праволинијским проводницима, спроведени прорачуни јачине електричног поља и магнетске индукције у околини неколико типичних преносних надземних водова напонских нивоа 110 kV, 220 kV и 400 kV. Вредности јачине електричног поља и магнетске индукције у околини надземних водова првенствено зависе од висине фазних проводника изнад тла, геометрије главе стуба и растојања од осе надземног вода. Осим тога, вредности јачине електричног поља зависе од напонског нивоа, док вредности магнетске индукције зависе од струје оптерећења вода [69].

#### 4.4.1. Улазни подаци за прорачун

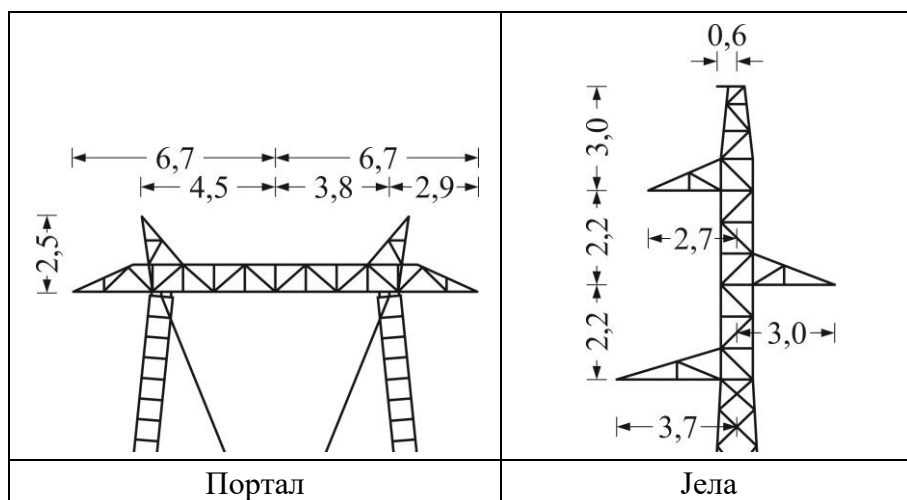
Прорачуни су спроведени за типичне конфигурације надземних водова напонских нивоа 110 kV, 220 kV и 400 kV. Главе стубова које се најчешће користе код надземних водова поменутих напонских нивоа приказане су на сликама 4.3, 4.4. и 4.5.

Прорачуни су спроведени за геометрије водова које су приказане на сликама 4.3–4.5. Претпостављено је да су растојања између проводника дуж целог распона једнака њиховим растојањима на стубу. Приликом израчунавања вертикалног растојања између фазних и заштитних проводника узета је у обзир и дужина изолаторских ланаца.

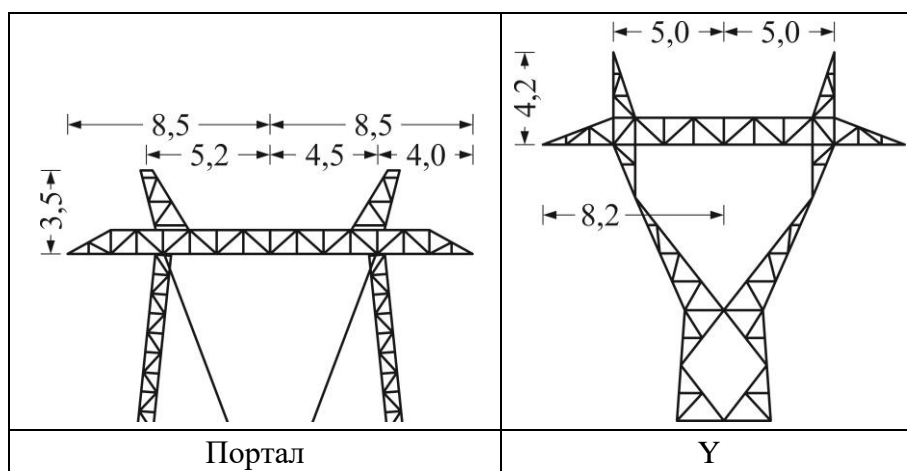
Прорачуни су спроведени за улазне податке приказане у табели 4.1, у којој су наведени најзначајнији технички подаци који се односе на анализирани надземне водове. Ови подаци се односе на типове (материјале), површине попречних пресека ( $S$ ) и полупречнике ( $r$ ) фазних проводника и заштитне ужади, дужине изолаторских ланаца за сваки анализирани напонски ниво, као и на максималне струје, тј. краткотрајно дозвољене струје надземног вода током зимског периода ( $I_{kdz}$ ), које су прописане у [78]. Ова струја представља максималну струју којом надземни вод може бити оптерећен у нормалном режиму рада, тако да су резултати прорачуна магнетске индукције који су добијени за ову струју на страни сигурности са аспекта изложености становништва.

Прорачуни су спроведени за висине фазних проводника  $h_f$ , које су наведене у табели 4.2. У овој табели су дате само висине најнижег фазног проводника, док се висине осталих фазних и заштитних проводника одређују на основу геометрија стубова које су дате на сликама 4.3–4.5. У случају водова с хоризонталним распоредом проводника (водови са стубовима типа „портал” и „Y”), висине  $h_f$  дате у табели 4.2. представљају висине свих

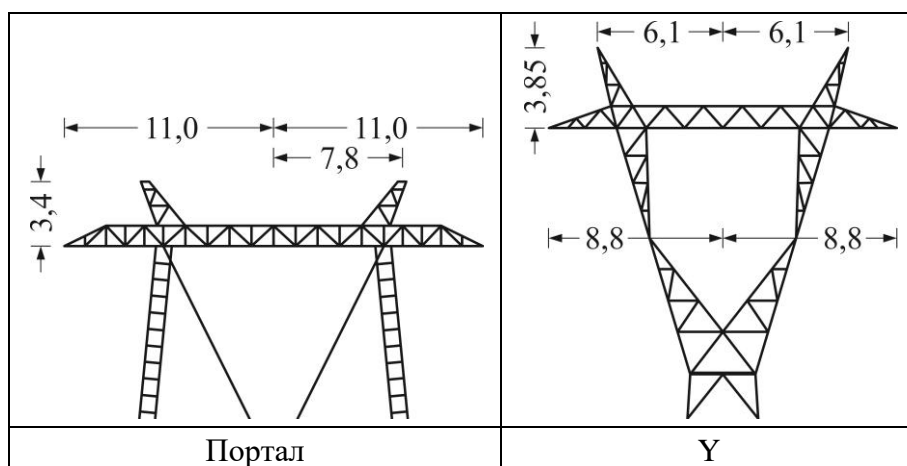
фазних проводника, док у случају вода с троугаоним распоредом проводника (вод са стубовима типа „јела”), висине  $h_f$  наведене у табели 4.2, представљају висине најнижег фазног проводника. Висине наведене у табели 4.2. почињу од минималних висина дозвољених у насељеним местима, које су прописане у [77], и повећавају се с циљем обухватања висина фазних проводника, које се у пракси најчешће јављају код анализираних надземних водова. Минималне дозвољене висине фазних проводника представљају минималне висине најнижег фазног проводника изнад тла дуж целог распона и односе се на распоне надземних водова који се налазе у насељеним зонама у Републици Србији [77].



Слика 4.3. Главе стубова надземних водова напонског нивоа 110 kV



Слика 4.4. Главе стубова надземних водова напонског нивоа 220 kV



Слика 4.5. Главе стубова надземних водова напонског нивоа 400 kV

**Табела 4.1.** Технички подаци о надземним водовима напонских нивоа 110 kV, 220 kV и 400 kV коришћени приликом прорачуна

Напонски ниво	110 kV	220 kV	400 kV
Тип, попречни пресек и полупречник фазног проводника	Al/Ће 240/40, $r_f = 10,95 \text{ mm}$	Al/Ће 490/65, $r_f = 15,3 \text{ mm}$	Al/Ће 2×490/65, $r_f = 15,3 \text{ mm}$
Тип (материјал), попречни пресек и полупречник заштитног ужета	Челик, $S = 35 \text{ mm}^2$ , $r_z = 3,75 \text{ mm}$	Челик, $S = 50 \text{ mm}^2$ , $r_z = 4,5 \text{ mm}$	Челик, $S = 50 \text{ mm}^2$ , $r_z = 4,5 \text{ mm}$
Дужина изолаторског ланца	1,7 m	2,8 m	4 m
Краткотрајно дозвољена струја у зимском периоду, $I_{kdz}$	880 A	1370 A	2740 A

**Табела 4.2.** Висине фазних проводника за које се спроводе прорачуни

Напонски ниво	110 kV	220 kV	400 kV
Висине најнижег фазног проводника, $h_f$	7 m	7,75 m	9 m
	10 m	10 m	/
	15 m	15 m	15 m
	20 m	20 m	20 m
	25 m	25 m	25 m
	30 m	30 m	30 m

Висине заштитних проводника за које су спроведени прорачуни дате су у табели 4.3. Ове висине су одређене тако што је на висину најнижег фазног проводника из табеле 4.2. додата разлика у висини конзола на које се причвршћују дати фазни проводник и заштитни проводник, која се преузима с пројеката глава стубова датих на сликама 4.3–4.5, као и дужина изолаторског ланца за одређени напонски ниво из табеле 4.1. Описани поступак представља поједностављени начин за одређивање висине на којој се налазе заштитни проводници. У реалности је угиб фазних проводника већи од угиба заштитних проводника, па се растојање између фазних и заштитних проводника мења дуж распона. Због тога ће се и растојања између фазних и заштитних проводника разликовати у зависности од тога на ком се растојању од стубова налази латерални правац дуж којег се врши прорачун, у зависности од тога да ли су стубови на крајевима распона носећи или затезни, од примењених типова фазних и заштитних проводника, као и од дужине и других карактеристика распона и затезног поља. Међутим, у [43] и [68] показано је да промена висине заштитних проводника нема значајан утицај на вредности јачине електричног поља и магнетске индукције које се добијају прорачуном за висину од 1 m изнад тла.

**Табела 4.3.** Висине заштитних проводника за које се спроводе прорачуни

Напонски ниво	110 kV		220 kV		400 kV	
Тип стуба	Портал	Јела	Портал	Y	Портал	Y
Висине заштитних проводника	11,2 m	16,1 m	14,05 m	14,75 m	16,4 m	16,85 m
	14,2 m	19,1 m	16,3 m	17 m	/	/
	19,2 m	24,1 m	21,3 m	22 m	22,4 m	22,85 m
	24,2 m	29,1 m	26,3 m	27 m	27,4 m	27,85 m
	29,2 m	34,1 m	31,3 m	32 m	32,4 m	32,85 m
	34,2 m	39,1 m	36,3 m	37 m	37,4 m	37,85 m

У табели 4.4. су за типичне проводнике који се најчешће користе на водовима напонских нивоа 110 kV, 220 kV и 400 kV дати подаци о пречнику и сезонским вредностима струја, који су преузети из [78].

Ознаке у табели 4.4. имају следеће значење:

$I_{td}$  – трајно дозвољена струја;

$I_{dp}$  – дозвољена погонска струја.

**Табела 4.4.** Подаци о сезонским вредностима струја  $I_{td}$ ,  $I_{dp}$  и  $I_{kd}$ , према [78]

Тип и пресек проводника	Пречник једног проводника [mm]	$I_{td}$ [A]		$I_{dp}$ [A]		$I_{kd}$ [A]	
		Летњи период	Зимски период	Летњи период	Зимски период	Летњи период	Зимски период
Al/Ће 150/25	17,1	290	540	414	460	585	650
Al/Ће 240/40	21,9	380	740	567	630	792	880
Al/Ће 360/57	26,6	480	940	729	810	1026	1140
Al/Ће 490/65	30,6	570	1140	873	970	1233	1370
2 × Al/Ће 490/65	30,2	1140	2280	1746	1940	2466	2740
2 × Al/Ће 482/60	30,6	1140	2280	1746	1940	2466	2740

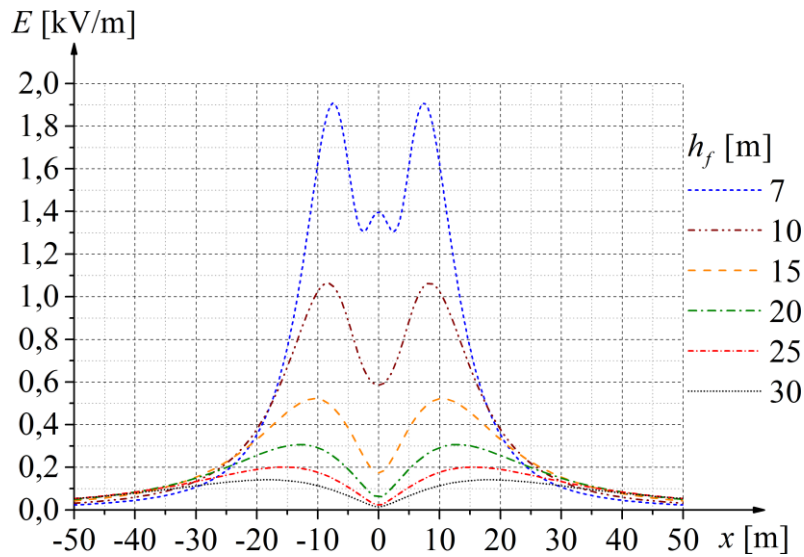
У табели 4.5. дата су дозвољена одступања напона у односу на назначени напон на надземним водовима напонских нивоа 10 kV, 20 kV, 35 kV, 110 kV, 220 kV и 400 kV, која су преузета из [89] и [90].

**Табела 4.5.** Дозвољена одступања од назначеног напона на надземним водовима напонских нивоа 10 kV, 20 kV, 35 kV, 110 kV, 220 kV, 400 kV, према [89] и [90]

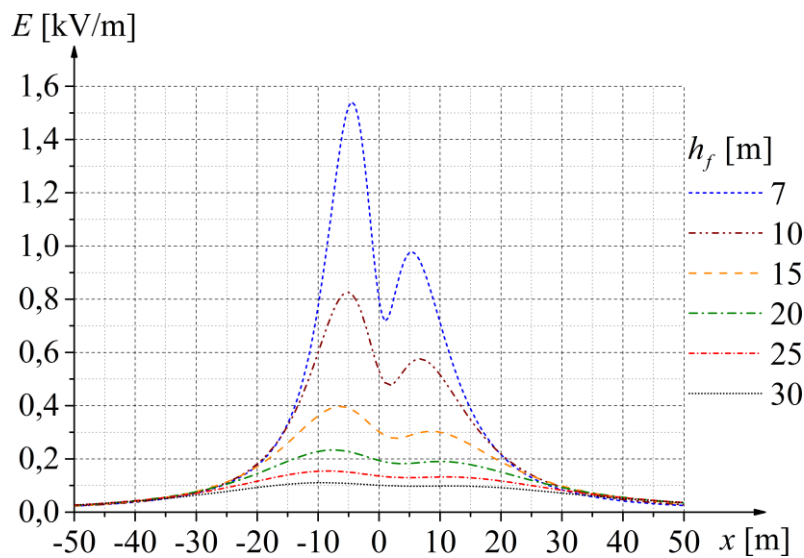
Назначени напон [kV]	Дозвољени опсег напона у нормалним условима рада [kV]	Дозвољено одступање од назначеног напона [%]
10	9,5–10,7	-5–7
20	19–21,4	-5–7
35	31,5–38	-10–8,6
110	99–121	±10
220	200–240	±9,1
400	380–420	±5

#### 4.4.2. Резултати прорачуна

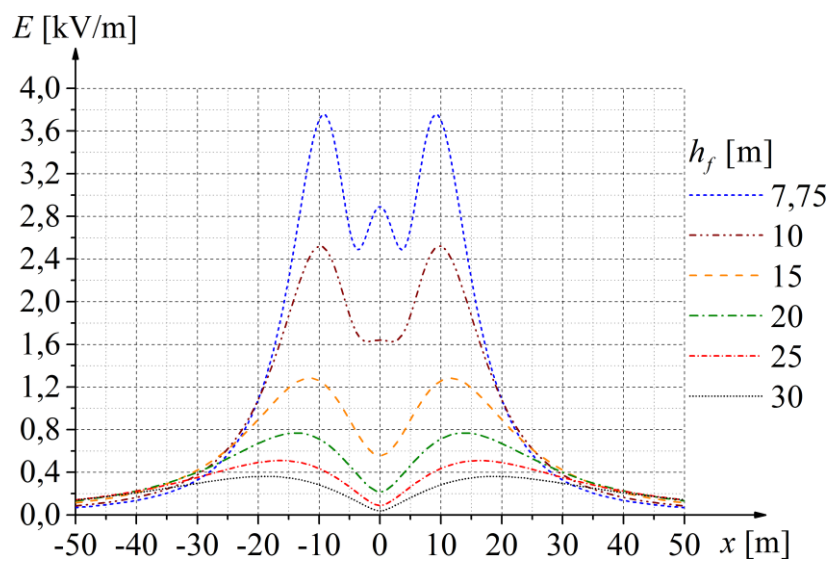
Резултати прорачуна јачине електричног поља приказани су на сликама 4.6–4.11, а резултати прорачуна магнетске индукције на сликама 4.12–4.17. Прорачуни су спроведени за геометрије водова приказане на сликама 4.3–4.5, податке о водовима дате у табели 4.1. и висине фазних и заштитних проводника дате у табелама 4.2. и 4.3.



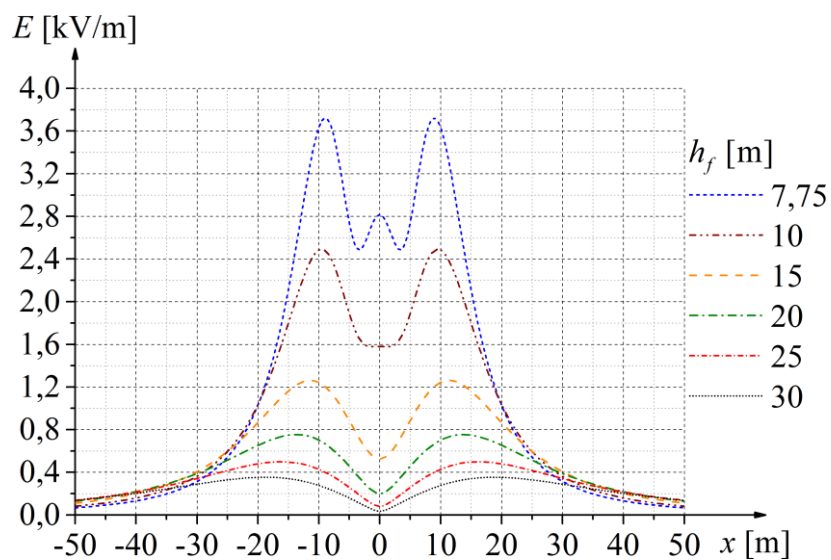
Слика 4.6. Резултати прорачуна јачине електричног поља за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”



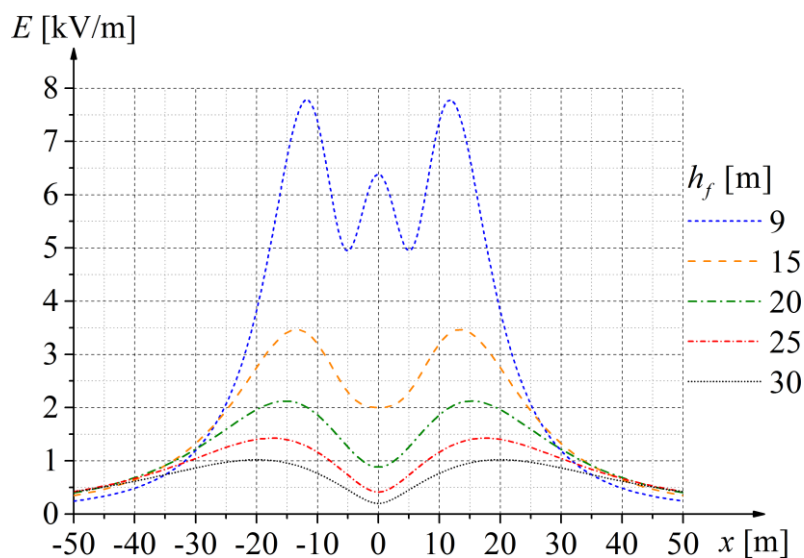
Слика 4.7. Резултати прорачуна јачине електричног поља за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „јела”



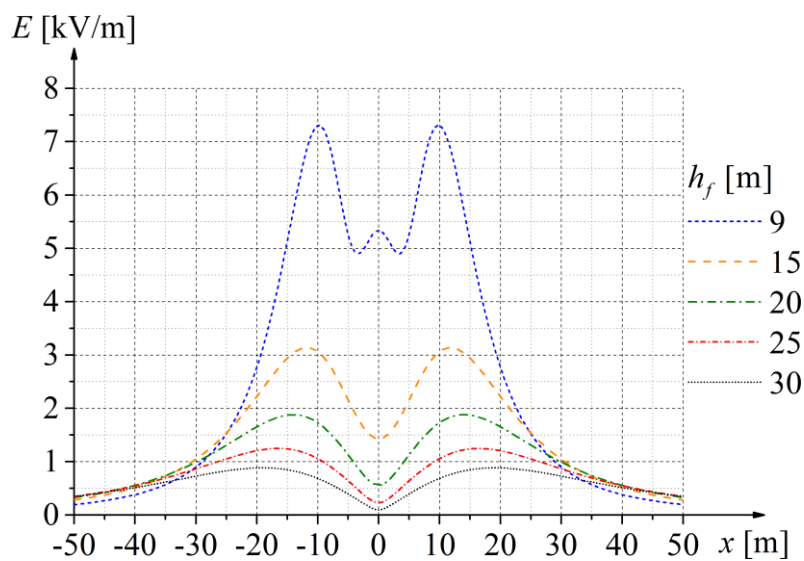
Слика 4.8. Резултати прорачуна јачине електричног поља за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „портал”



Слика 4.9. Резултати прорачуна јачине електричног поља за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „Y”

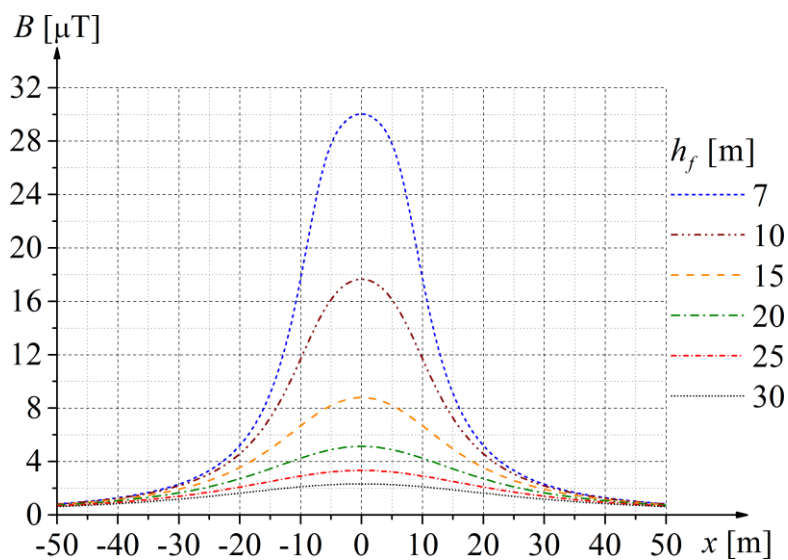


Слика 4.10. Резултати прорачуна јачине електричног поља за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „портал”

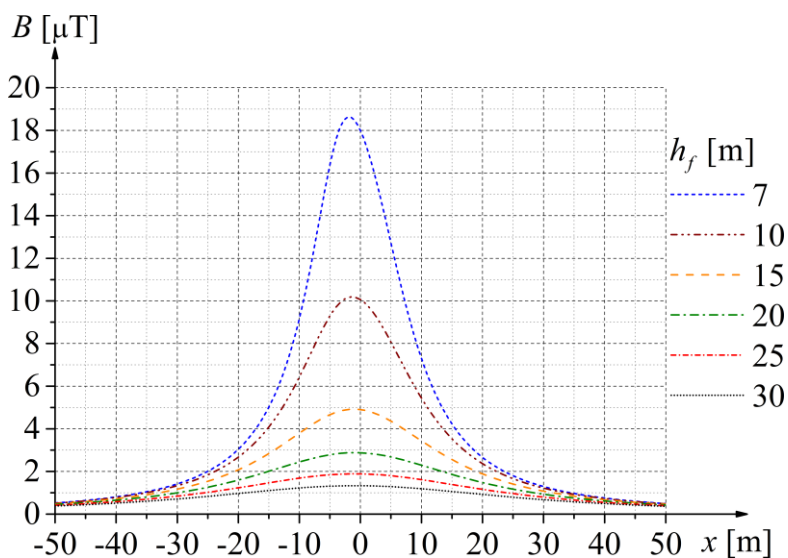


Слика 4.11. Резултати прорачуна јачине електричног поља за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „Y”

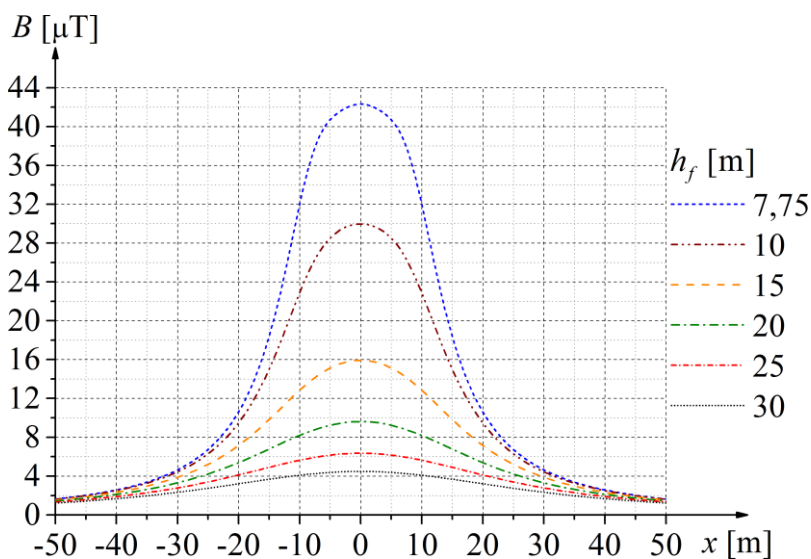




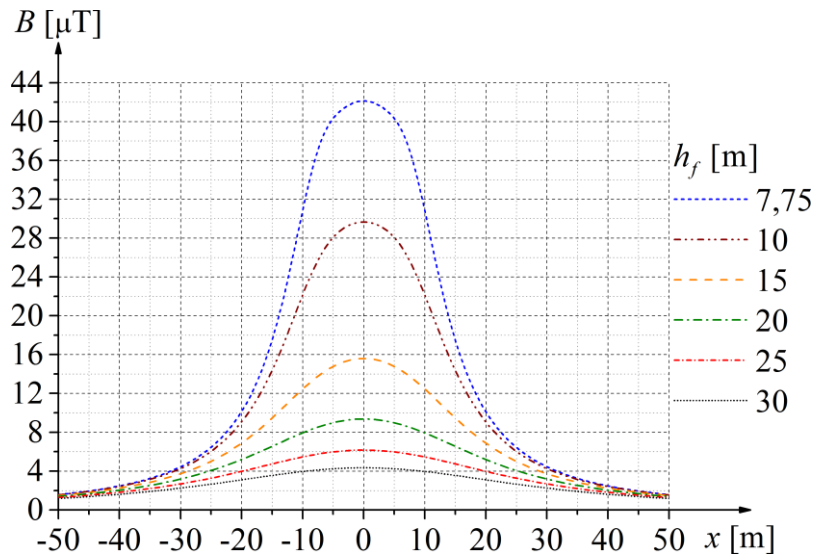
Слика 4.12. Резултати прорачуна магнетске индукције за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”



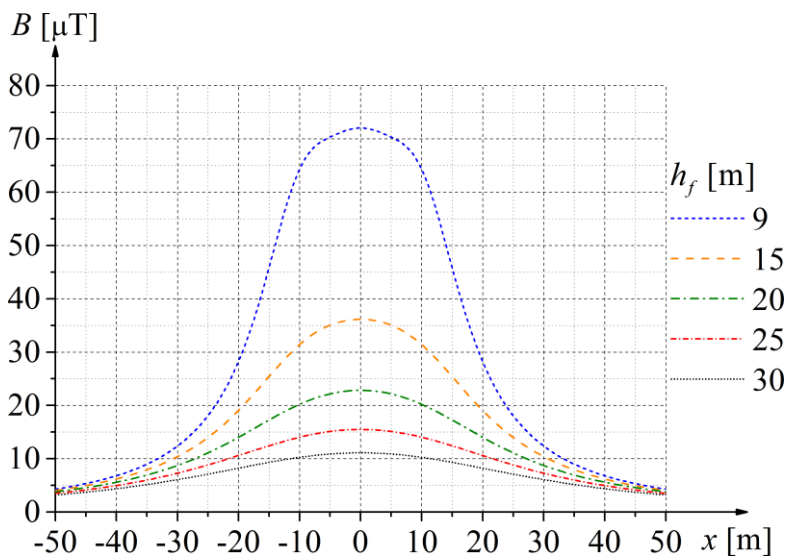
Слика 4.13. Резултати прорачуна магнетске индукције за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „јела”



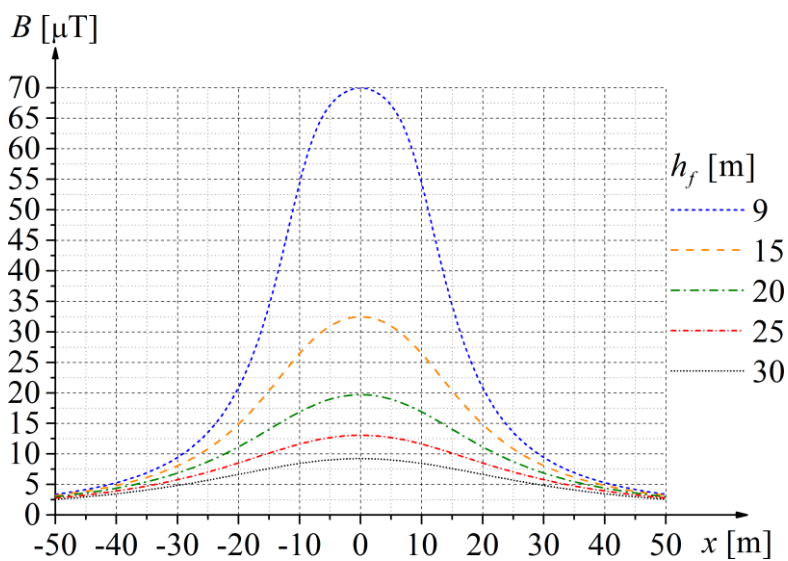
Слика 4.14. Резултати прорачуна магнетске индукције за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „портал”



Слика 4.15. Резултати прорачуна магнетске индукције за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „Y”



Слика 4.16. Резултати прорачуна магнетске индукције за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „портал”



Слика 4.17. Резултати прорачуна магнетске индукције за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „Y”

#### 4.4.3. Коментар добијених резултата прорачуна

Добијени резултати представљају теоријске вредности јачине електричног поља и магнетске индукције у слободном простору око надземних водова. Пошто објекти као што су куће, дрвеће, ограде и сл. не утичу на вредности магнетске индукције, израчунате вредности магнетске индукције одговараће стварним вредностима и у случају када на локацији постоје поменути објекти. Међутим, наведени објекти у великој мери утичу на вредности електричног поља. Због тога теоријске вредности јачине електричног поља добијене прорачунима одговарају стварним вредностима једино у случају када на локацији нема објеката који доводе до пертурбације електричног поља. У случају када је циљ мерења или прорачуна оцена изложености људи, испитивања се спроводе управо на локацијама где људи бораве у дужем временском периоду и где постоје поменути објекти. Због тога се поставља питање одређивања стварне вредности електричног поља које је пертурбисано присуством објеката. Вредности пертурбисаног поља могу се добити мерењем или прорачуном који уважава постојање поменутих објеката. Значајно је нагласити да овакав прорачун по правилу има знатно већу несигурност, јер је у том случају неопходно познавање тачног положаја и димензија свих објеката који доводе до пертурбације електричног поља, а поставља се и питање практичне применљивости оваквог приступа, нарочито ако је потребно спровести анализу на већем броју локација у околини надземног вода. Додатни проблем представља чињеница да у одређеном броју случајева није унапред познат податак о висини проводника вода на локацији за коју се врши анализа, већ се ове висине одређују мерењем на терену.

## 5. Основе израчунавања мерне несигурности

### 5.1. Увод

Сваки резултат мерења садржи одређену несигурност, што значи да се идеално тачна вредност мерене величине не може одредити, али је могуће, са одређеним степеном поверења, утврдити опсег у којем се мерена величина налази [91], [92]. Концепт мерне несигурности није у супротности с раније коришћеном теоријом грешака, већ обезбеђује приступ који је боље прилагођен условима реалних мерења [93]. Према [94], грешка мерења представља разлику између резултата мерења и тачне, односно условно тачне вредности мерене величине, на пример вредности добијене помоћу еталонског мерног инструмента [92]. Према томе, грешка може бити позитивна или негативна. С друге стране, мерна несигурност је позитивна величина и приписује се целокупном мерном процесу [93]. Мерна несигурност је дефинисана као параметар придружен резултату мерења који карактерише дисперзију вредности мерене величине [94]. Узроци мерне несигурности могу бити многобројни, при чему најчешће не могу сви бити узети у обзир [92]. Приликом одређивања мерне несигурности прво је потребно идентификовати факторе који утичу на резултат мерења. Након одређивања оних фактора који имају значајан утицај на резултат мерења, израчунавају се појединачне компоненте мерне несигурности и изражавају као стандардна несигурност. На основу израчунатих компонената несигурности израчунава се комбинована несигурност, а затим и проширена несигурност. Проширена мерна несигурност добија се множењем комбиноване несигурности фактором проширења, чија вредност зависи од расподеле вероватноће. Као крајњи резултат добијају се резултат мерења, проширена мерна несигурност и статистичка сигурност с којом важе добијени резултати [92].

### 5.2. Врсте грешака приликом мерења

Према [94], грешка мерења има две компоненте – случајну и систематску.

Случајна грешка потиче од непредвидивих или стохастичких временских и просторних промена утицајних величина. Ефекти оваквих промена, који се називају случајни ефекти, доводе до разлика између резултата поновљених мерења. Иако потпуно елиминисање случајне грешке није могуће, она се најчешће може смањити повећавањем броја мерења [94], под условом да се мерена величина не мења у времену.

Систематска грешка такође не може бити у потпуности елиминисана, али се најчешће може смањити. Ако систематска грешка потиче од познатог ефекта утицајне величине на резултат мерења, који се назива систематски ефекат, онда овај утицај може бити квантификован и уколико он значајно утиче на тачност мерења, може се применити корекциони фактор ради његовог елиминисања [94]. Корекциони фактор представља бројну вредност с којом се множи резултат мерења ради елиминисања систематске грешке [94]. Утицај систематске грешке може се одредити из уверења о еталонирању мерног инструмента.

Приликом анализе резултата мерења неопходно је идентификовати систематске ефекте и извршити њихову корекцију увек када је то могуће. Кориговани резултат мерења, који се добија након примене корекционог фактора, и даље садржи одређену несигурност која је последица случајних ефеката и непотпуне корекције систематских ефеката.

## 5.3. Врсте мерне несигурности

### 5.3.1. Стандардна мерна несигурност

Стандардна мерна несигурност,  $u$  (енгл. *uncertainty* – несигурност), по дефиницији је једнака стандардном одступању.

Постоје два основна типа мерне несигурности, тип А и тип Б, који се разликују по методама одређивања несигурности [91]–[107].

Мерна несигурност типа А постоји само ако се ради о мерењу које је поновљено више пута и одређује се искључиво методом статистичке обраде података.

Мерна несигурност типа Б може се одредити и код појединачног мерења, када не постоји мерна несигурност типа А. Мерна несигурност типа Б одређује се свим осталим методама изузев статистичке анализе серије поновљених мерења. При томе се користе сви расположиви подаци о коришћеној мерној опреми, уверење о еталонирању, каталози које произвођачи дају уз инструмент, теоријско знање и искуство испитивача, подаци о утицају параметара окружења на мерење, прорачуни итд. [102].

### 5.3.2. Функције расподеле вероватноће резултата мерења

Приликом обраде резултата мерења примењује се неколико врста расподела, при чему су најчешће коришћене равномерна (униформна, правоугаона), троугаона и Гаусова расподела [92], [93].

У случају равномерне расподеле интервал унутар којег се налазе резултати је ограничен, при чему је свака вредност унутар интервала расподеле једнако вероватна. Овај тип расподеле најчешће се примењује када се располаже са мало информација о мерном инструменту. Примера ради, ако се из спецификације произвођача мерног инструмента преузме податак о гарантованој грешци мерног инструмента, може се претпоставити равномерна расподела уколико не постоје подаци о груписању резултата око средње вредности. Стандардна несигурност у случају равномерне расподеле израчунава се као  $u = a / \sqrt{3}$ , где  $a$  представља полуширину расподеле.

Основна карактеристика троугаоне расподеле јесте груписање резултата око средње вредности, што значи да су мања одступања резултата од средње вредности вероватнија од већих одступања. Интервал унутар којег се налазе резултати је ограничен, као и код равномерне расподеле. Троугаона расподела се примењује у случају када је изражено груписање резултата мерења око средње вредности. Стандардна несигурност у случају троугаоне расподеле израчунава се као  $u = a / \sqrt{6}$ .

За разлику од равномерне и троугаоне расподеле, код којих је интервал унутар којег се налазе резултати ограничен, Гаусова расподела је дефинисана у неограниченом опсегу променљиве  $x$ . Гаусова расподела се најчешће примењује у случају када постоји серија поновљених мерења, као и онда када се подаци о мерној несигурности добијају из уверења о еталонирању. У случају када се Гаусова расподела односи на низ поновљених резултата мерења, стандардна несигурност једнака је израчунатом стандардном одступању,  $u = s$ . У уверењима о еталонирању се по правилу наводи проширена мерна несигурност  $U$  и коефицијент проширења  $k$ , или интервал поверења  $p$ . Када је у уверењу о еталонирању наведено да је број ефективних степени слободе бесконачан, величини се придружује Гаусова расподела. У случају када број ефективних степени слободе није наведен, претпоставља се да је бесконачан и усваја се Гаусова расподела [108]. Да би се на основу податка о проширеној мерној несигурности који је дат у уверењу о еталонирању израчунала стандардна несигурност, неопходно је поделити проширену несигурност примењеним коефицијентом проширења, тако да је  $u = U / k$  [96]. Код Гаусове расподеле коефицијент

проширења зависи од интервала поверења и износи  $k = 1$  за  $p = 68,27\%$ ,  $k = 1,645$  за  $p = 90\%$ ,  $k = 1,96$  за  $p = 95\%$ ,  $k = 2$  за  $p = 95,45\%$ ,  $k = 2,576$  за  $p = 99\%$ ,  $k = 3$  за  $p = 99,73\%$  [94].

Мерној несигурности типа А по правилу се придружује Гаусова расподела, док се мерној несигурности типа Б могу придружити различите расподеле.

### 5.3.3. Комбинована мерна несигурност

Комбинована мерна несигурност израчунава се у следећим случајевима [92]:

- 1) код поновљених мерења код којих су одређене мерне несигурности типа А и типа Б и
- 2) код мерења која су извршена једанпут, при чему не постоји мерна несигурност типа А, али на крајњи резултат утичу несигурности бар две или више утицајних величина.

Када се идентификују сви параметри који утичу на резултат мерења и израчунају њима одговарајуће мерне несигурности, следи израчунавање комбиноване мерне несигурности [92].

Разматра се величина у која је дата следећим изразом:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \quad (5.1)$$

Претпоставља се да су величине  $x_i$  некорелисане, што значи да промена једне од њих не изазива предвидљиве промене друге величине. У том случају је комбинована мерна несигурност величине у дата следећим изразом:

$$u_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u_{x_i}^2 \right]} \quad (5.2)$$

где је  $u_{x_i}$  мерна несигурност утицајне величине  $x_i$  изражена као стандардна несигурност.

Претходни израз се може написати и на следећи начин:

$$u_y = \sqrt{\left( \frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 \cdot u_{x_1}^2 + \dots + \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u_{x_i}^2 + \dots + \left( \frac{\partial y}{\partial x_n} \right)^2 \cdot u_{x_n}^2} \quad (5.3)$$

Ако се уведе да је  $c_i = \frac{\partial y}{\partial x_i}$  претходни израз постаје:

$$u_y = \sqrt{c_1^2 \cdot u_{x_1}^2 + \dots + c_i^2 \cdot u_{x_i}^2 + \dots + c_n^2 \cdot u_{x_n}^2} \quad (5.4)$$

где су  $c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_n$  коефицијенти осетљивости.

Претходни израз се такође може представити као:

$$u_y = \sqrt{u_1^2 + \dots + u_i^2 + \dots + u_n^2} \quad (5.5)$$

где је  $u_i = c_i \cdot u_{x_i}$ .

У случају када је  $y = x_1 + x_2 + \dots + x_i + \dots + x_n = \sum_{i=1}^n x_i$  важи да је:

$$\frac{\partial y}{\partial x_i} = 1 \quad (5.6)$$

па израз (5.4) постаје:

$$u_y = \sqrt{u_{x_1}^2 + \dots + u_{x_i}^2 + \dots + u_{x_n}^2} \quad (5.7)$$

Мерне несигурности типа А ( $u_A$ ) и типа Б ( $u_B$ ) у случају поновљених мерења добијају се различитим методама, тако да су ове две врсте несигурности увек некорелисане величине, па се комбинована несигурност израчунава из следећег израза:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (5.8)$$

### 5.3.4. Проширена мерна несигурност

Проширена мерна несигурност  $U$  представља производ комбиноване стандардне мерне несигурности и коефицијента проширења  $k$ :

$$U = k \cdot u_c \quad (5.9)$$

Вредност коефицијента  $k$  зависи од расподеле вероватноће и интервала поверења. Примера ради, у случају Гаусове расподеле, коефицијенту проширења од 1,96 одговара интервал поверења од 95%. То значи да је вероватноћа 95% да се мерена величина у налази у интервалу од  $y-U$  до  $y+U$ . У стандарду [8] наведено је да би интервал поверења од 95% требало користити приликом изражавања несигурности мерења електричног и магнетског поља.

Одређивање проширене мерне несигурности јесте крајњи циљ обраде резултата мерења. Као крајњи резултат приказују се резултат мерења, проширена мерна несигурност и интервал поверења.

## 5.4. Примена методе „Монте Карло” у прорачунима мерне несигурности

Метода „Монте Карло” јесте нумеричка метода која се користи за решавање великог броја сложених математичких проблема [108]–[114]. Једна од примена методе „Монте Карло” јесте израчунавање комбиноване мерне несигурности. Проблем код примене приступа који је описан у претходном тексту јесте то што се поставља питање коју расподелу вероватноће треба приписати комбинованој и проширеној мерној несигурности, имајући у виду чињеницу да утицајни фактори који чине комбиновану мерну несигурност у општем случају имају различите расподеле вероватноће. Овај проблем се може решити применом методе „Монте Карло”. Приликом примене методе „Монте Карло”, први корак чини представљање физичког система математичким моделом. Такође је неопходно дефинисати опсег у којем се налазе улазне величине, као и њихове функције расподеле вероватноће. Затим се изводи велики број прорачуна излазне величине, при чему се као улазни подаци користе случајни бројеви из дефинисаних опсега с претходно одређеном функцијом

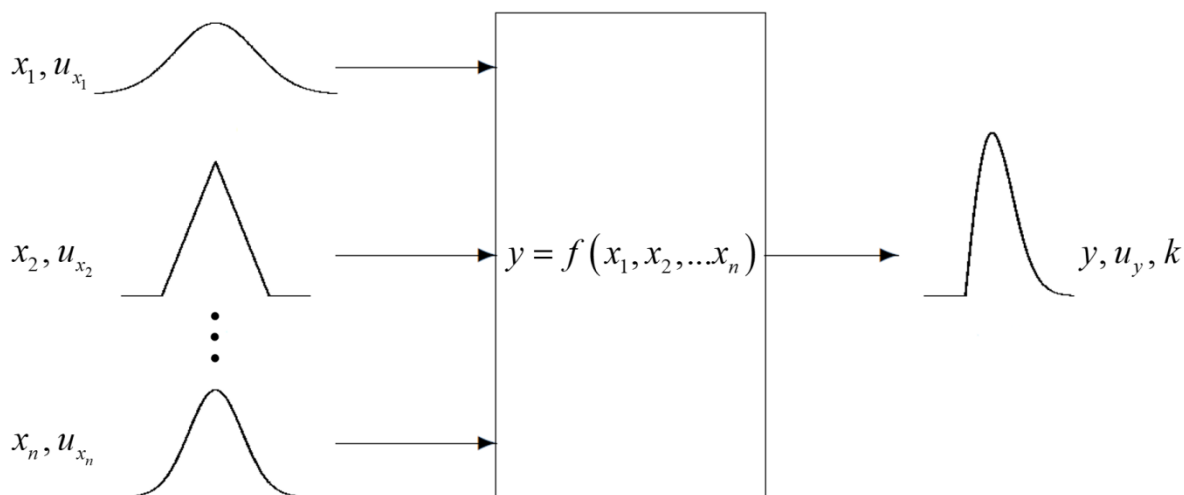
расподеле. Као резултат примене методе „Монте Карло” добијају се излазна величина, стандардна несигурност излазне величине и интервал поверења [108]. Када се дефинише модел који повезује улазне и излазну величину и када се одреде расподеле вероватноће улазних величина, онда постоји јединствена расподела вероватноће излазне величине која се може одредити применом ове методе. Метода „Монте Карло” може се користити и за верификацију мерне несигурности која је израчуната на претходно описани начин.

Метода „Монте Карло” може се применити на случај када су улазне величине међусобно независне, када се свакој величини додељује одговарајућа расподела вероватноће, али и на случај када оне нису независне и када им се додељује заједничка расподела вероватноће [108].

Основни кораци приликом примене методе „Монте Карло” јесу [108]:

- дефинисање излазне величине  $y$ , тј. величине која се мери;
- дефинисање улазних величина  $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ , од којих зависи излазна величина  $y$ ;
- дефинисање модела који представља везу између улазних и излазне величине,  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$ ;
- додељивање расподеле вероватноће улазним величинама  $x_i$ ;
- спровођење прорачуна излазне величине  $M$  пута, под претпоставком да улазним величинама одговарају случајни бројеви из дефинисаног опсега, који се одређују према дефинисаним расподелама вероватноће;
- одређивање излазне величине  $y$ , њене стандардне несигурности  $u$  и интервала поверења.

Илустрација поступка примене методе „Монте Карло” дата је на слици 5.1.



Слика 5.1. Поступак примене методе „Монте Карло” [108]

Број спровођења прорачуна,  $M$ , може бити унапред изабран, или се може применити адаптивна процедура, тако да се постигне захтевана нумеричка толеранција. У највећем броју случајева, за  $M = 10^6$  прорачуна може се очекивати да ће интервал поверења од 95% бити одређен [108].

Ако се прорачуни означе са  $x_1, \dots, x_M$ , при чему се  $r$ -ти прорачун  $x_r$  спроводи за  $x_{1,r}, \dots, x_{n,r}$  као резултат се добија:

$$y_r = f(x_r), \quad r = 1, \dots, M \quad (5.10)$$



Средња вредност излазне величине добија се из следећег израза:

$$y_{sr} = \frac{1}{M} \sum_{r=1}^M y_r \quad (5.11)$$

Стандардно одступање, тј. стандардна несигурност излазне величине, израчунава се као:

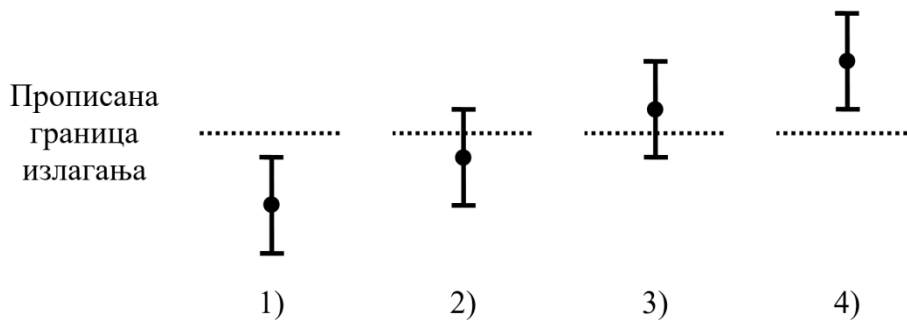
$$u^2(y_{sr}) = \frac{1}{M-1} \sum_{r=1}^M (y_r - y_{sr})^2 \quad (5.12)$$

Интервал поверења се може одредити из дискретне представе расподеле вероватноће излазне величине у.

Уколико се приликом прорачуна варира само једна улазна величина, док се остале не мењају, може се добити расподела вероватноће излазне величине за модел који има као променљиву само ту једну улазну величину [108].

### 5.5. Уважавање мерне несигурности приликом давања изјаве о усаглашености

Када се на основу резултата мерења доносе закључци о усаглашености мерене величине с одређеном спецификацијом, неопходно је узети у обзир и мерну несигурност [76]. Такав је управо случај код испитивања електричног и магнетског поља, где је на основу добијеног резултата неопходно дати изјаву о усаглашености с прописаном границом излагања. Када се добијени резултат с проширеном несигурношћу пореди с границом излагања, могућа су четири случаја, која су приказана на слици 5.2.



Слика 5.2. Четири могућа положаја резултата мерења и проширене несигурности у односу на прописану границу излагања

Са слике 5.2. јасно је да у првом случају постоји усаглашеност, пошто резултат с урачунатом проширеном несигурношћу не прекорачује прописану границу излагања. Такође је јасно да у четвртном случају није постигнута усаглашеност, односно да је прописана граница излагања прекорачена. Међутим, поставља се питање тумачења усаглашености у другом и трећем случају. Изјава о усаглашености у случајевима 2 и 3 зависи од усвојеног правила одлучивања. Смернице за избор правила одлучивања дате су у [115]. Пошто се резултати испитивања који су предмет анализе односе на изложеност људи електромагнетском пољу, у дисертацији је усвојено правило одлучивања према којем се случај 1 сматра усаглашеним, док се случајеви 2, 3 и 4 сматрају неусаглашеним.

Како би број случајева 2 и 3 у пракси био што мањи, неопходно је смањење проширене несигурности, што се постиже смањењем или елиминисањем одређених компонената мерне несигурности на које је могуће утицати. У случају мерења јачине електричног поља и

магнетске индукције, начини за смањење компонената несигурности између осталог подразумевају примену корекционих фактора ради елиминисања систематских ефеката, избор мерних инструмената веће тачности, еталонирање мерних инструмената у лабораторији која има што мању несигурност поступка еталонирања, примену адекватног поступка испитивања, спровођење испитивања у адекватним временским условима итд., о чему ће бити речи у наредним поглављима.

## 6. Израчунавање компонената несигурности мерења јачине електричног поља

### 6.1. Увод

У овом поглављу описани су извори мерне несигурности за које је, на основу искуства с великог броја мерења, уочено да имају највећи утицај на резултате мерења електричног поља које потиче од надземних електроенергетских водова. За сваки од ових утицајних фактора одређена је вредност мерне несигурности, мерењем или прорачуном. Несигурност мерења електричног поља разматрана је у [20], [116]–[118].

Фактори за које је генерално уочено да имају утицај на мерење јачине електричног поља индустријске учестаности јесу [20]:

- тачност и стабилност мерног инструмента;
- сталак за позиционирање мерне сонде;
- близина испитивача;
- позиционирање мерне сонде по  $x$ ,  $y$  и  $z$  осима;
- температура;
- влажност ваздуха;
- неуниформност поља;
- корона.

### 6.2. Несигурност услед грешке мерног система

Грешка мерног система представља једну од основних компонената мерне несигурности. Ова компонента се одређује на основу података датих у уверењу о еталонирању. Да би се побољшала тачност мерења у случајевима када постоји систематска грешка, на резултат мерења се може применити корекциони фактор заснован на подацима наведеним у уверењу о еталонирању.

Ова компонента мерне несигурности одређена је за случај мерног система приказаног на слици 3.1, који чине мерни инструмент EFA-300 и изотропна сонда за мерење јачине електричног поља. Наведени мерни систем је коришћен за већину мерења приказаних у дисертацији.

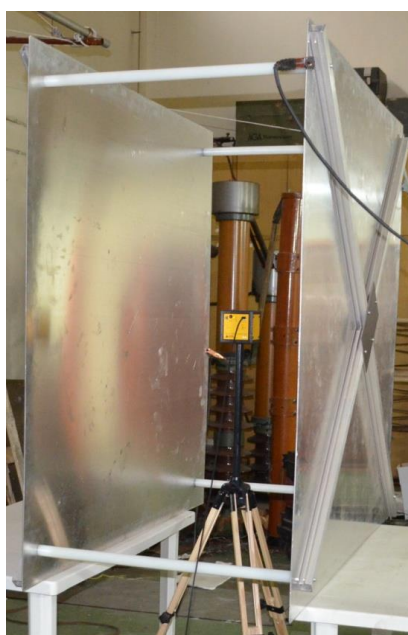
Метролошке карактеристике мерног инструмента EFA-300 [81], које гарантује произвођач, дате су у прилогу. На основу спецификације произвођача види се да несигурност мерења јачине електричног поља износи  $\pm 3\%$ . При томе мора да буде испуњен услов да је мерена вредност јачине електричног поља већа од  $5 \text{ V/m}$  приликом коришћења филтера пропусног опсега  $5 \text{ Hz} - 2 \text{ kHz}$ ,  $40 \text{ V/m}$  за филтер  $5 \text{ Hz} - 32 \text{ kHz}$ , односно  $1 \text{ V/m}$  у случају коришћења филтера пропусног опсега  $50 \text{ Hz} - 400 \text{ Hz}$ . Приликом свих мерења коришћен је филтер пропусног опсега  $5 \text{ Hz} - 2 \text{ kHz}$ . Услов да измерена вредност јачине електричног поља мора да буде већа од  $5 \text{ V/m}$  испуњен је код свих мерења.

Вредност мерне несигурности коју гарантује произвођач важи под условом да је мерени сигнал синусног облика и да има вредност која је за  $10\%$  већа од доње границе изабраног мерног опсега. Такође важе услови да релативна влажност ваздуха треба да буде мања од  $95\%$ , а амбијентална температура у опсегу  $0-50^\circ\text{C}$ . Ови захтеви су такође испуњени код свих мерења приказаних у дисертацији, као и генерално код свих мерења која се спроводе у пракси.

Према спецификацији произвођача, укупна мерна несигурност од  $\pm 3\%$  обухвата следеће изворе мерне несигурности:

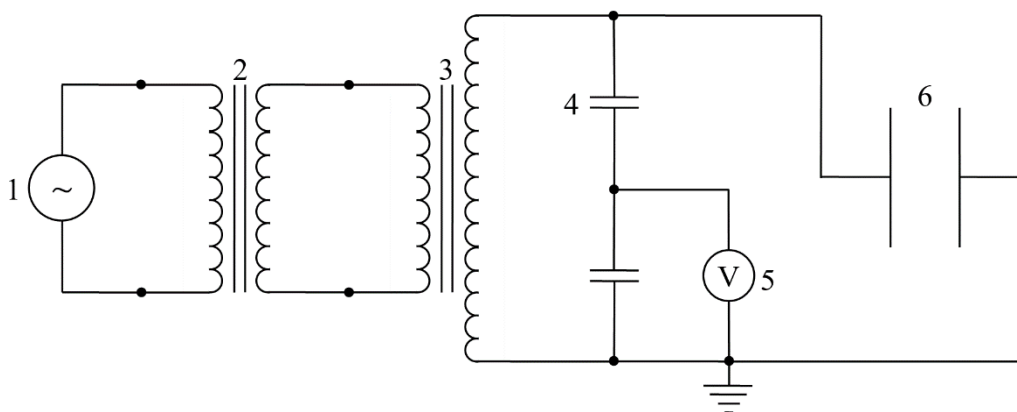
- грешку мерног инструмента;
- несигурност услед утицаја анизотропије;
- нелинеарност;
- фреквентни одзив;
- несигурност услед промене температуре и влажности ваздуха.

Грешка мерног система коју гарантује произвођач проверава се еталонирањем, које се спроводи у утврђеним временским интервалима. У конкретном случају, интервал еталонирања износи две године. Методе еталонирања уређаја за мерење јачине електричног поља дате су у [10]. Овде ће бити примењена једна од ових метода, која се заснива на постављању мерне сонде у стабилно поље познате јачине, које се генерише помоћу еталон-кондензатора приказаног на слици 6.1. Еталонирање применом наведене методе спроведено је у лабораторији Електротехничког института „Никола Тесла”.



**Слика 6.1.** Еталон-кондензатор за генерисање стабилног електричног поља познате јачине

На електроде плочастог кондензатора доводи се познати напон  $U$ , што доводи до појаве електричног поља између плоча кондензатора (слика 6.2).



**Слика 6.2.** Мерна шема (1 – регулисани извор наизменичног напона; 2 – изолациони трансформатор; 3 – високонапонски трансформатор; 4 – делитељ напона; 5 – волтметар; 6 – еталон-кондензатор)

Вредност јачине електричног поља унутар кондензатора одређује се из израза:

$$E_t = \frac{U}{d} \quad (6.1)$$

где је:

$E_t$  – јачина електричног поља између плоча кондензатора (тачна вредност);

$U$  – напон на плочама кондензатора;

$d$  – растојање између плоча кондензатора, које у конкретном случају износи 0,75 m.

На основу израчунате тачне вредности  $E_t$  и измерене вредности јачине електричног поља  $E_m$  релативна грешка  $\delta_E$  израчунава се као:

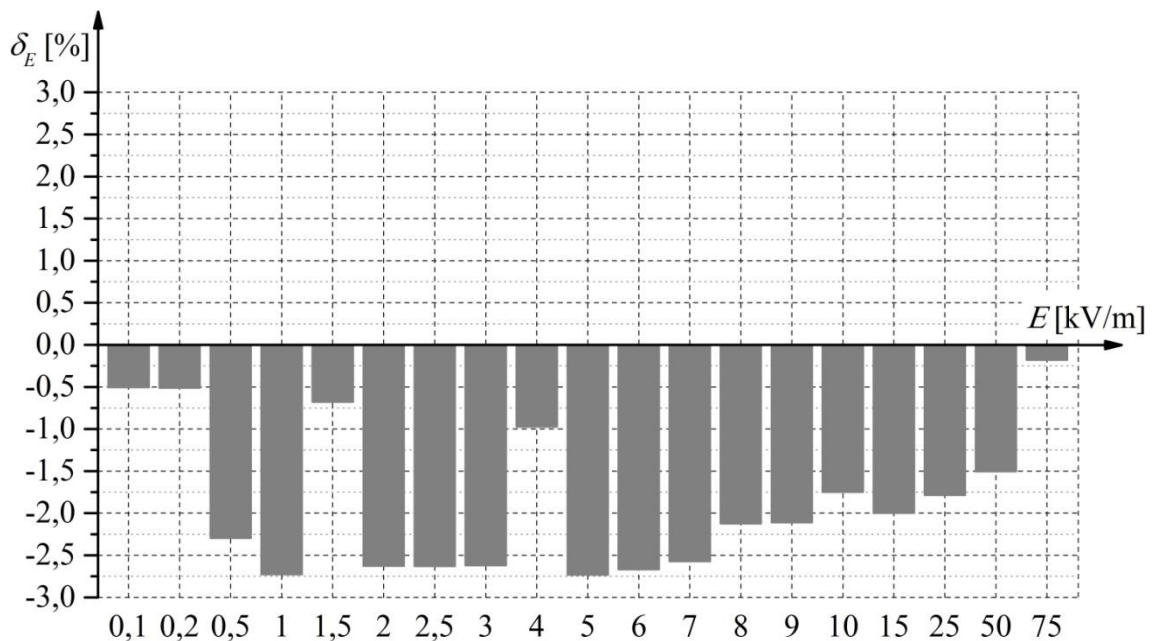
$$\delta_E = \frac{E_m - E_t}{E_t} \cdot 100\% \quad (6.2)$$

Пошто напон на плочама кондензатора није апсолутно стабилан, а самим тим ни интензитет електричног поља, вредност напона је бележена током целокупног периода мерења електричног поља.

Еталонирање система за мерење јачине електричног поља неопходно је спровести за различите вредности јачине електричног поља и различите вредности фреквенције поља из опсега мерног инструмента, при чему је акценат на вредностима које се јављају у пракси. У наставку је приказан део ових резултата који се односи на поље учестаности 50 Hz и вредности електричног поља у опсегу од 0,1 kV/m до 75 kV/m, чиме је обухваћен шири опсег вредности поља од оних које се у пракси могу измерити у околини надземних водова.

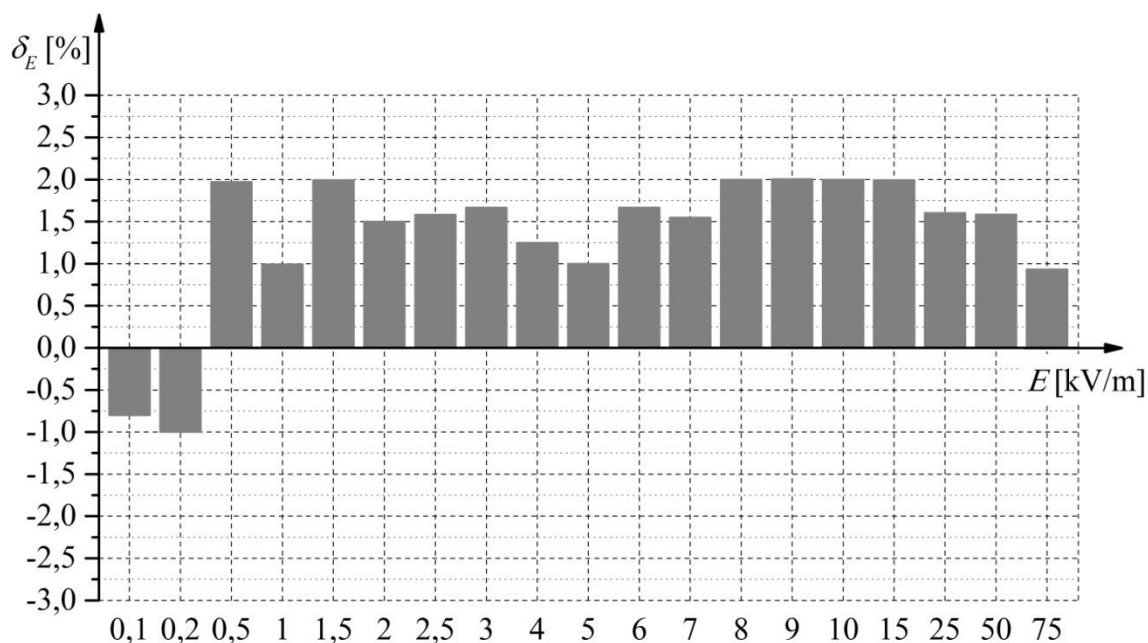
Пре почетка еталонирања, у лабораторији је извршено мерење амбијенталног поља у трајању од неколико минута. Средња вредност добијених резултата износила је 3,03 V/m.

Ради одређивања грешке мерења  $x$  компоненте вектора јачине електричног поља еталонирање је извршено тако што је мерна сонда постављена на такав начин да се њена  $x$  оса подударала с правцем вектора јачине електричног поља који је управан на плоче еталон-кондензатора. Резултати добијени на овај начин за различите вредности јачине електричног поља приказани су на слици 6.3.

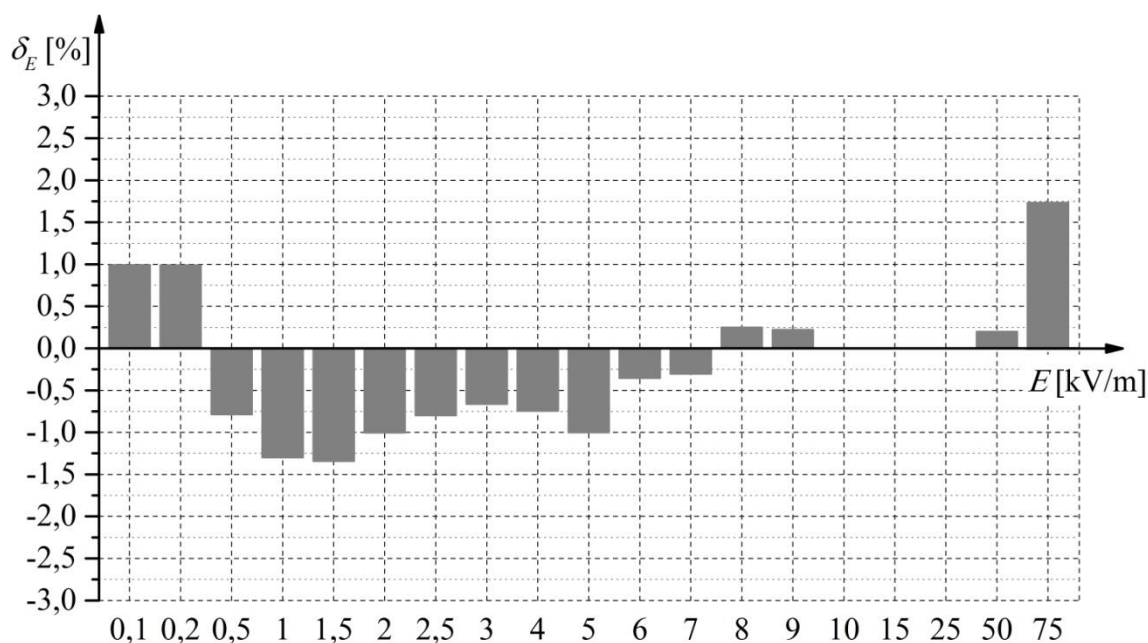


Слика 6.3. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  у случају када се правац вектора електричног поља подударала са  $x$  осом мерне сонде

Описани поступак је поновљен ради одређивања грешке мерења у и z компонената вектора јачине електричног поља. Добијени резултати приказани су на сликама 6.4. и 6.5.



Слика 6.4. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  у случају када се правац вектора електричног поља подударе са у осом мерне сонде



Слика 6.5. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  у случају када се правац вектора електричног поља подударе са z осом мерне сонде

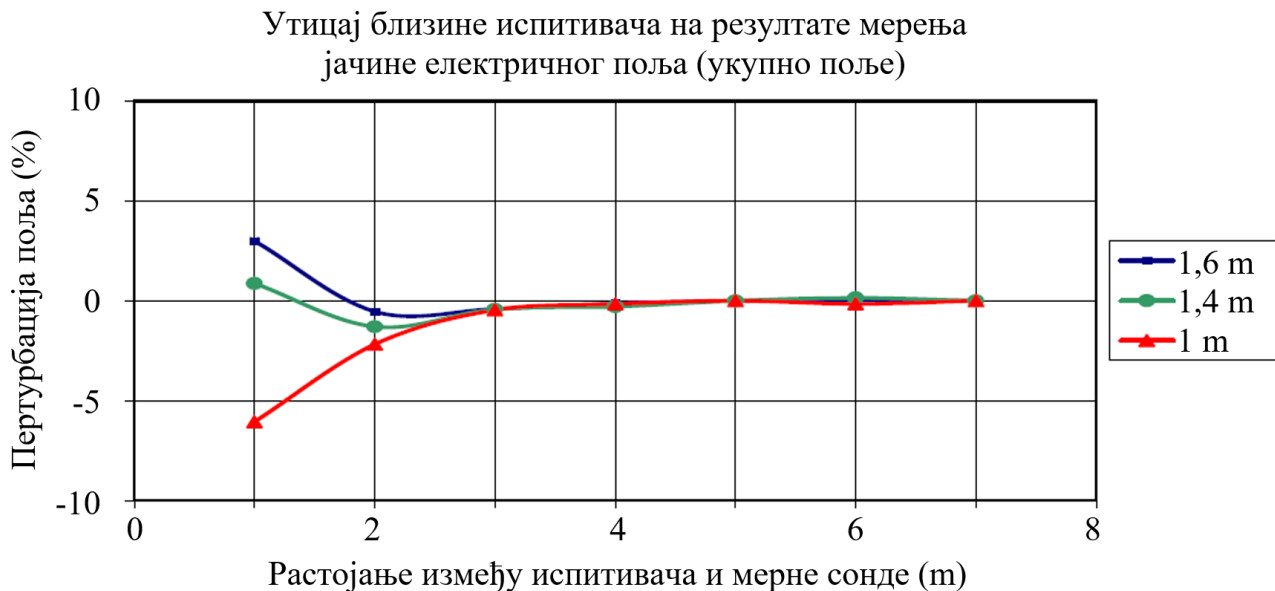
На основу приказаних резултата може се закључити да се релативна грешка  $\delta_E$  у свим разматраним случајевима налази унутар опсега  $\pm 3\%$ , који је наведен од стране произвођача. Због тога се овој компоненти мерне несигурности може доделити вредност од  $\pm 3\%$ , која представља проширену мерну несигурност.

### 6.3. Несигурност услед присуства испитивача

Присуство испитивача у близини мерне сонде изазива пертурбацију електричног поља, што доводи до грешке мерења. Из тог разлога мерење јачине електричног поља треба спровести тако да се утицај испитивача смањи на најмању могућу меру. Утицај испитивача на резултате мерења јачине електричног поља анализиран је у [20], [119].

Предвиђено је да се поједина мерила електричног поља користе с кратком ручком, чија дужина износи неколико десетина центиметара. Такви инструменти имају велику грешку мерења и слабу поновљивост, због чега се могу користити за приближна мерења и провере, али не у случају када се захтева висока тачност резултата [20].

Када се захтевају тачни резултати, испитивач треба да се налази на одређеном растојању од мерне сонде да би се ограничио његов утицај на резултате мерења. Према [20], минимално растојање је 1,5 m, а препоручена вредност је 3 m. У случају мерења на висини од 1 m грешка мерења јачине електричног поља мања је од 5% када је испитивач удаљен од мерне сонде 1,5 m. У случају растојања између испитивача и сонде од 3 m, грешка мерења је мања од 1%, док је за растојања већа од 4 m овај утицај практично занемарљив, као што је приказано на слици 6.6, која је преузета из [20].



**Слика 6.6.** Грешка мерења електричног поља услед присуства испитивача за различите висине сонде, према [20] (сонда облика коцке странице 10 cm на дрвеном сталку; испитивач висок 1,7 m)

Смањење овог утицаја постиже се тако што се мерна сонда и инструмент за мерење јачине електричног поља повезују оптичким каблом дужине неколико метара, чиме је омогућено да се испитивач налази на растојању од неколико метара од мерне сонде.

Ради поређења с резултатима датим у [20], а имајући у виду чињеницу да у [20] није наведено да ли се приказани резултати односе на мерења у околини водова различитих напонских нивоа и геометрија, спроведена је експериментална провера утицаја испитивача на резултате мерења јачине електричног поља. Као и у [20], за мерења је коришћена сонда облика коцке, странице 10 cm, која се налазила на дрвеном сталку, а испитивача је спровео испитивач висок 1,7 m. Испитивања су спроведена у околини два надземна вода, од којих је један напонског нивоа 110 kV, а други напонског нивоа 220 kV. Резултати ових испитивања дати су у наставку.

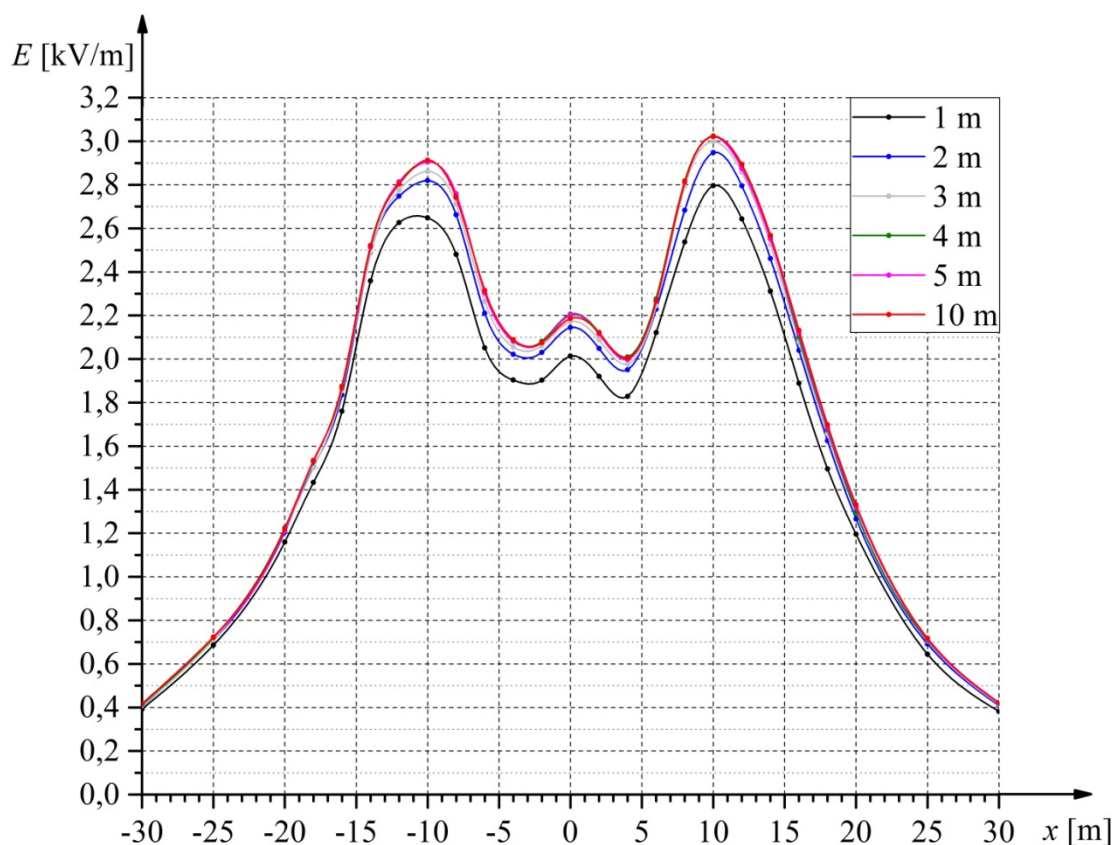
### 6.3.1. Мерење утицаја испитивача у близини надземног вода напонског нивоа 220 kV

Мерења утицаја испитивача на вредности јачине електричног поља спроведена су у близини надземног вода напонског нивоа 220 kV бр. 278, на распону између стубова бр. 9 и 10. Резултати ових испитивања детаљно су приказани у [120]. Стубови бр. 9 и 10 приказани су на сликама 3.11. и 3.12.

Мерења су спроведена дуж латералног правца који се налази на растојању од 132 m од стуба бр. 9 и 193 m од стуба бр. 10. Изабрана је локација на којој је терен раван и на којој нема објеката који би могли да утичу на расподелу јачине електричног поља.

Приликом мерења, сонда је била постављена на изолациони сталак и повезана с мерним инструментом оптичким каблом дужине 10 m. Растојање између испитивача и сонде ( $d$ ) током испитивања постепено је повећавано од 1 m до 10 m.

У првом делу испитивања мерења су спроведена дуж латералног правца на висини од 1 m изнад тла. На сваком мерном месту мерења су спроведена при растојањима од 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m и 10 m између испитивача и сонде. Резултати мерења су приказани на слици 6.7. Мерења су спроведена у смеру  $x$  осе, при чему се испитивач налазио на истом латералном правцу иза мерне сонде. На основу резултата приказаних на слици 6.7. може се закључити да је утицај испитивача најизраженији у случају када растојање  $d$  износи 1 m и да су у овом случају измерене вредности јачине електричног поља ниже од стварних вредности на свим мерним местима, што је у складу с резултатима датим у [20].

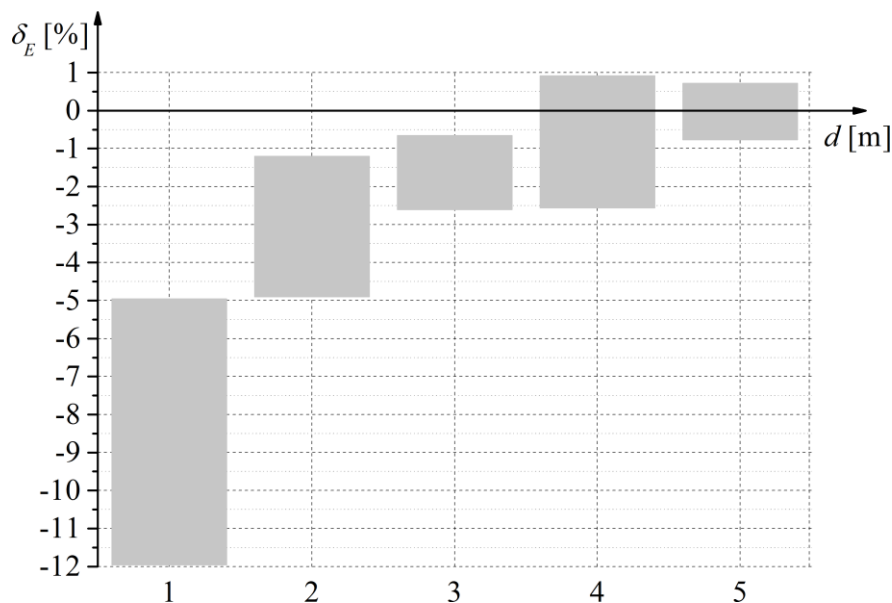


Слика 6.7. Резултати мерења на висини од 1 m изнад тла, при растојањима између испитивача и мерне сонде од 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m и 10 m

За сваки резултат мерења израчуната је одговарајућа релативна грешка, при чему је за тачну вредност усвојена вредност јачине електричног поља добијена при растојању од 10 m између испитивача и сонде. Вредности релативне грешке зависе од растојања  $d$  и од позиције мерног места  $x$ . На слици 6.8. приказани су опсежи у којима се налази релативна грешка када



се узму у обзир сви резултати добијени дуж мерног правца, при одређеном растојању између испитивача и сонде. Вредности грешке дате у [20] налазе се унутар опсега приказаних на слици 6.8. Пошто су мерења вршена у близини реалног вода, током мерења су постојале одређене варијације напона, које су утицале на добијене резултате. Будући да су на одређеној позицији мерења при различитим растојањима између испитивача и сонде спроведена у веома кратком временском интервалу, претпостављено је да варијације напона нису биле значајне. Осим тога, неопходно је имати у виду да је на добијене резултате утицала и грешка мерне сонде, тако да добијене вредности релативне грешке не могу у потпуности бити приписане утицају испитивача, али се генерално може закључити да постоји слагање с резултатима датим у [20].



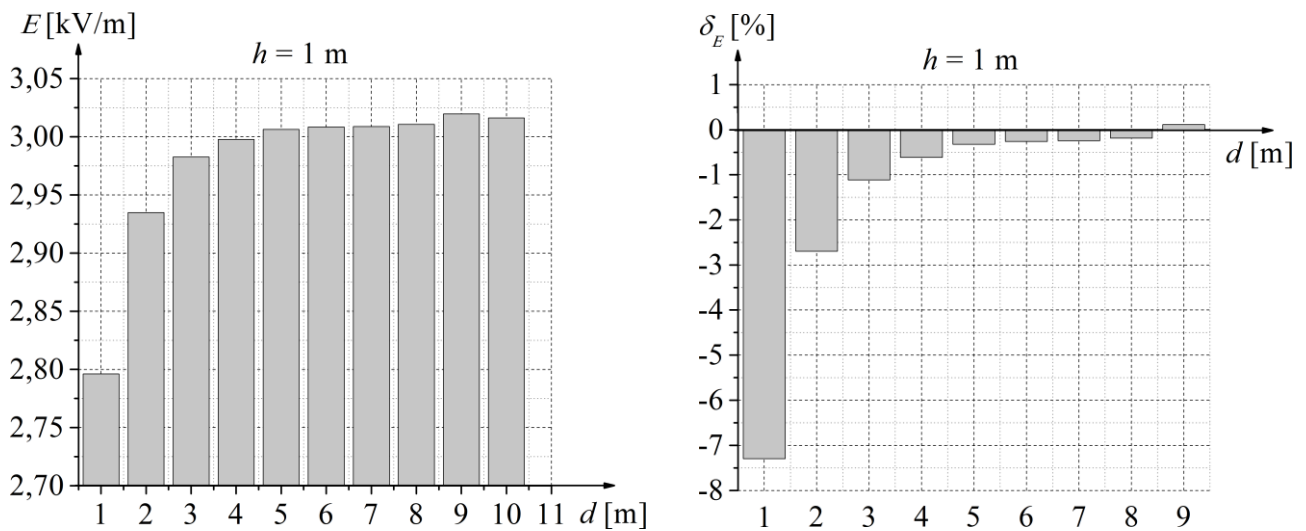
**Слика 6.8.** Опсег релативне грешке  $\delta_E$  за различите позиције мерних места дуж правца Р, при растојањима између испитивача и мерне сонде од 1 m, 2 m, 3 m, 4 m и 5 m

У наставку испитивања мерења су вршена на позицији  $x = +10$  m, на којој су измерене највеће вредности електричног поља дуж правца. Растојање између испитивача и сонде је постепено повећавано у опсегу од 1 m до 10 m, са кораком од 1 m. Приликом мерења испитивач се налазио на истом латералном правцу као мерна сонда, на позицијама од  $x = +11$  m до  $x = +20$  m, у зависности од растојања од сонде. Мерења су спроведена за висине сонде од 1 m, 1,5 m и 1,7 m изнад тла. За сваку висину сонде  $h$  и растојање  $d$  мерење јачине електричног поља извршено је 10 пута, при чему крајњи резултат представља средња вредност ових мерења. Релативна грешка је израчуната за растојања  $d$  у опсегу од 1 m до 9 m, при чему је за тачну вредност електричног поља усвојена вредност измерена при растојању од 10 m. Измерене вредности јачине електричног поља и израчунате вредности релативне грешке за висине мерне сонде од 1 m, 1,5 m и 1,7 m приказане су на сликама 6.9–6.11.

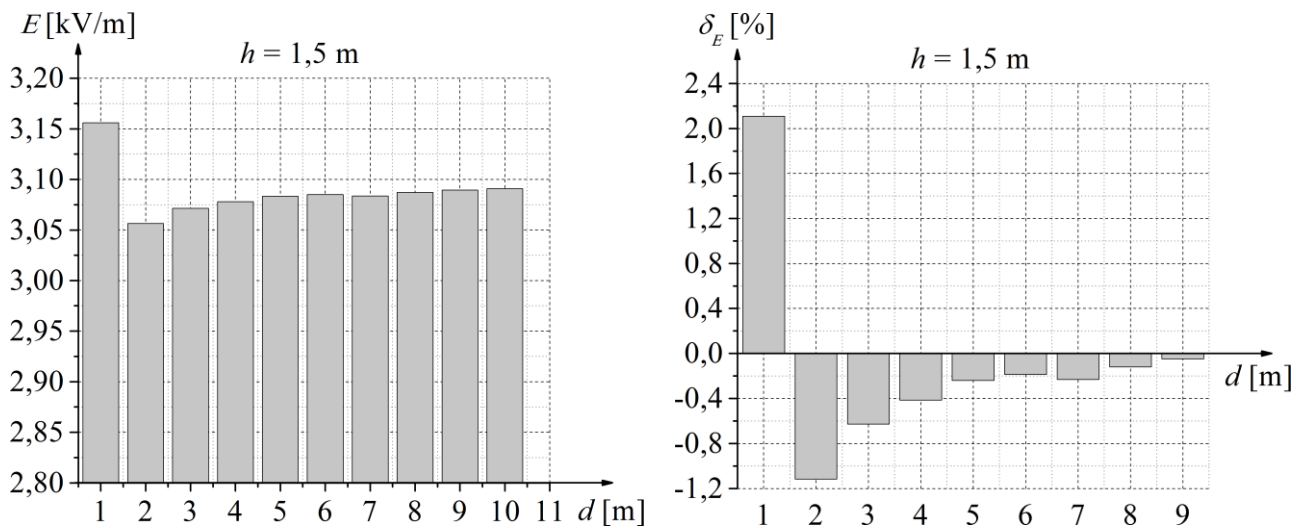
Вредности релативне грешке за све три висине мерне сонде збирно су приказане на слици 6.12. и у табели 6.1.

На основу приказаних резултата види се да у случају када се испитивач налази на растојању од 1 m од мерне сонде, његово присуство доводи до смањења измерених вредности поља у случају када се сонда налази на висини од 1 m, док у случају када се сонда налази на висинама од 1,5 m и 1,7 m доводи до повећања измерених вредности.

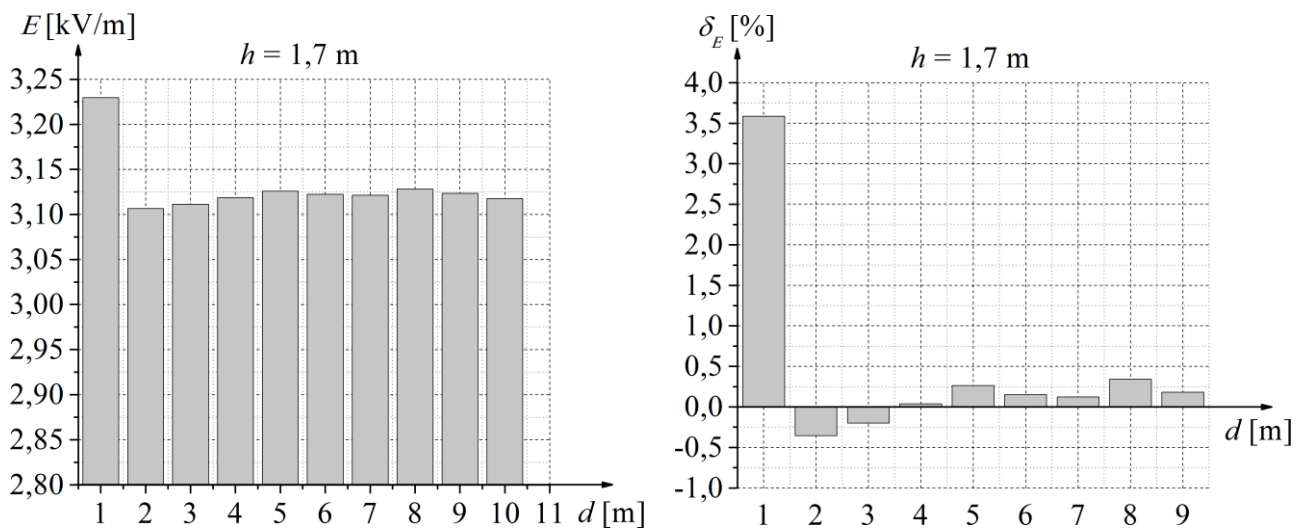
На основу резултата приказаних на слици 6.12. и у табели 6.1. може се закључити да постоји слагање између добијених вредности релативне грешке и резултата датих у [20], који су приказани на слици 6.6.



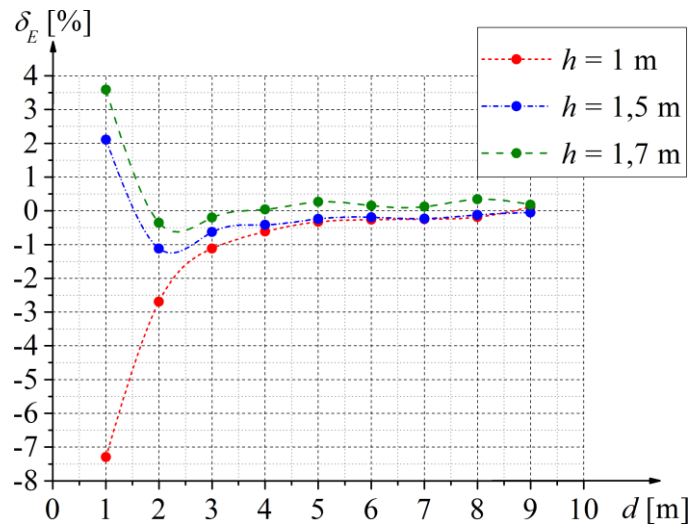
Слика 6.9. Резултати мерења на позицији  $x = 10$  m на висини од 1 m изнад тла



Слика 6.10. Резултати мерења на позицији  $x = 10$  m на висини од 1,5 m изнад тла



Слика 6.11. Резултати мерења на позицији  $x = 10$  m на висини од 1,7 m изнад тла



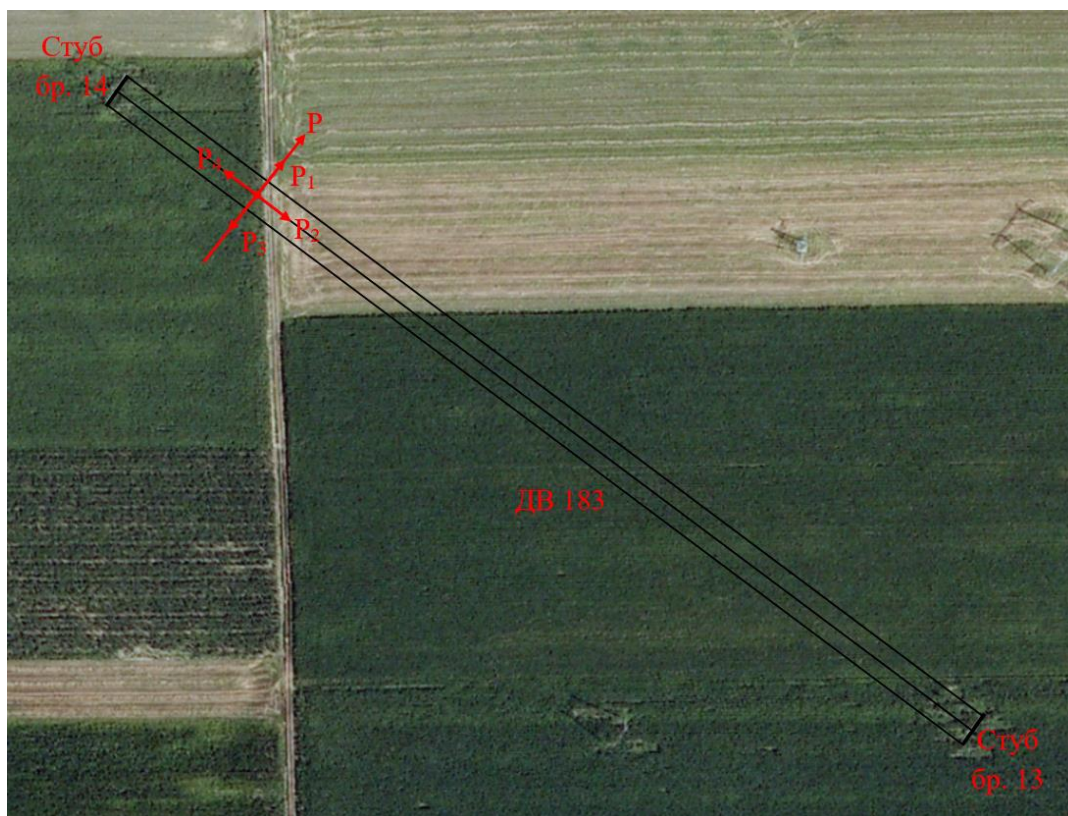
Слика 6.12. Релативне грешке резултата мерења на позицији  $x = 10$  m за висине мерне сонде од 1 m, 1,5 m и 1,7 m изнад тла

Табела 6.1. Релативне грешке резултата мерења на позицији  $x = 10$  m за висине мерне сонде од 1 m, 1,5 m и 1,7 m изнад тла

$d$ [m]	$\delta_E$ [%]		
	$h = 1$ m	$h = 1,5$ m	$h = 1,7$ m
1	-7,297	2,108	3,587
2	-2,695	-1,116	-0,355
3	-1,116	-0,628	-0,200
4	-0,613	-0,415	0,038
5	-0,325	-0,239	0,263
6	-0,262	-0,188	0,153
7	-0,246	-0,231	0,122
8	-0,186	-0,120	0,342
9	0,112	-0,048	0,182

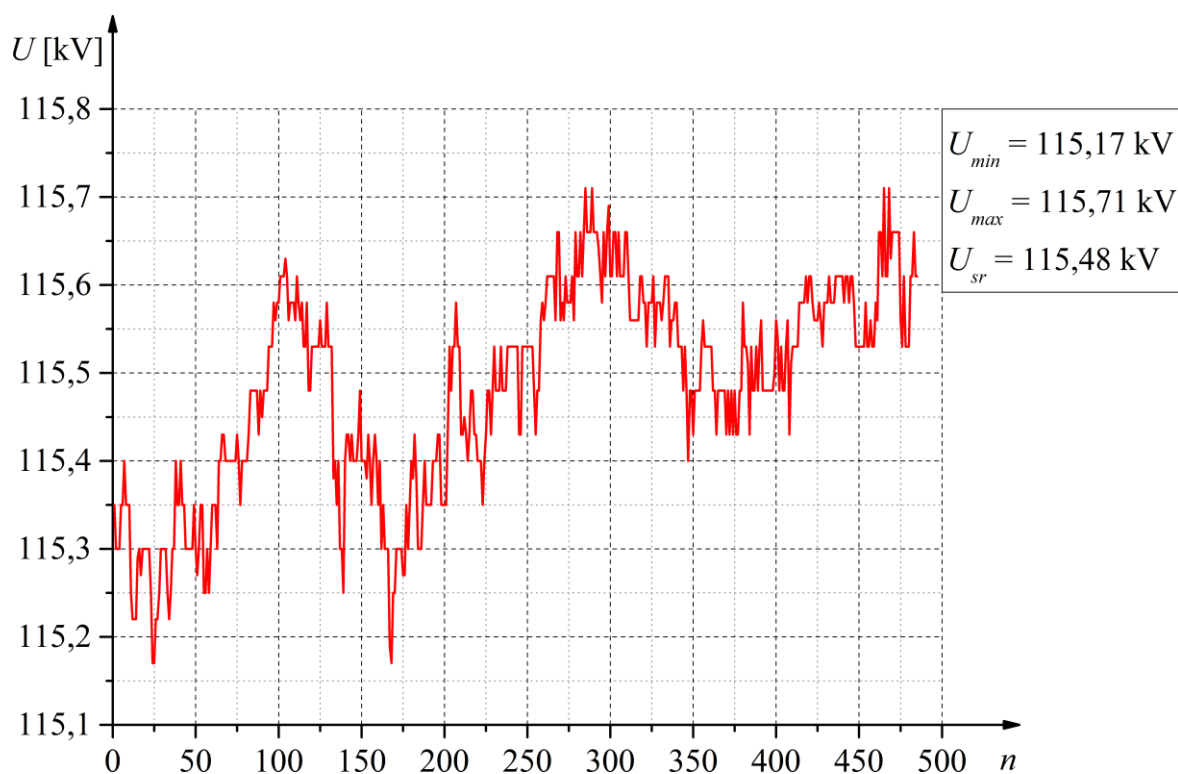
### 6.3.2. Мерење утицаја испитивача у близини надземног вода напонског нивоа 110 kV

Ради анализе утицаја испитивача на вредности јачине електричног поља у случају када се мерења спроведу у околини водова различитих напонских нивоа и карактеристика, спроведено је додатно мерење у близини надземног вода напонског нивоа 110 kV бр. 183 ТС „Зрењанин 1” – ТС „Зрењанин 2”, на распону између стубова бр. 13 и 14. Стубови бр. 13 и 14 приказани су на сликама 3.4. и 3.5. Локација на којој су извођена мерења приказана је на слици 6.13. Мерења су вршена на латералном правцу  $P$ , који се налази на растојању од 63 m од стуба бр. 14 и 306 m од стуба бр. 13. Мерење утицаја испитивача вршено је тако што је постепено повећавано растојање између испитивача и мерне сонде и то дуж четири правца који су на слици 6.13. означени са  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  и  $P_4$ . На тај начин је уважен и случај када се испитивач налази с различитих страна мерне сонде.



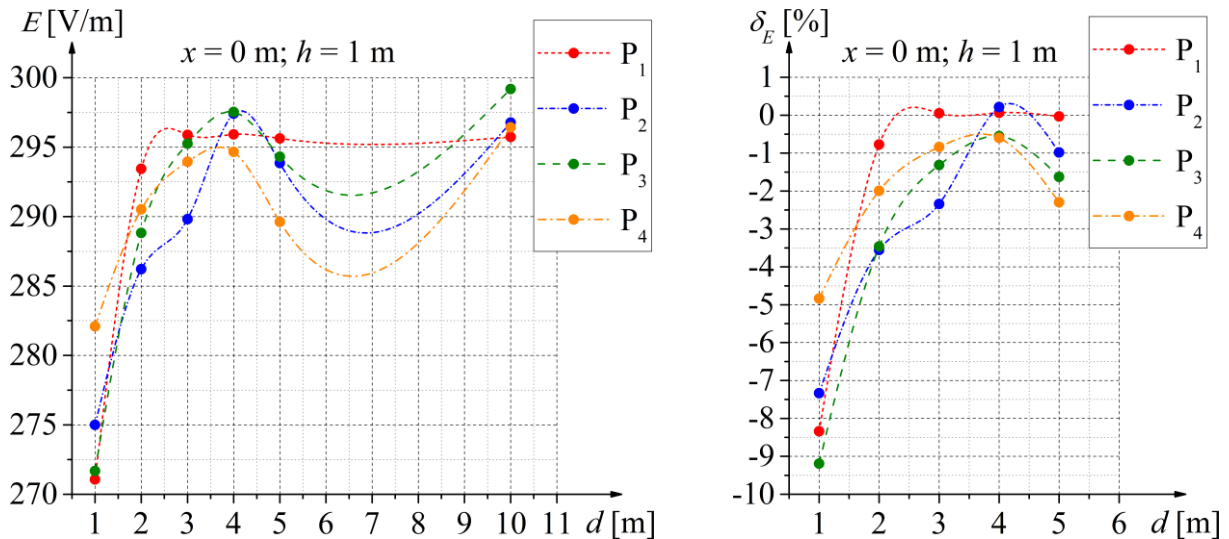
Слика 6.13. Позиција мерног правца  $P$  дуж кога су вршена мерења

На слици 6.14. приказани су резултати мерења напона надземног вода у функцији редног броја мерења  $n$ . Мерење напона је вршено током целокупног времена трајања мерења електричног поља. На предметном надземном воду били су расположиви подаци о напону само у једној фази. Током мерења напон се кретао у опсегу од 115,17 kV до 115,71 kV, што представља промену од 0,47%.

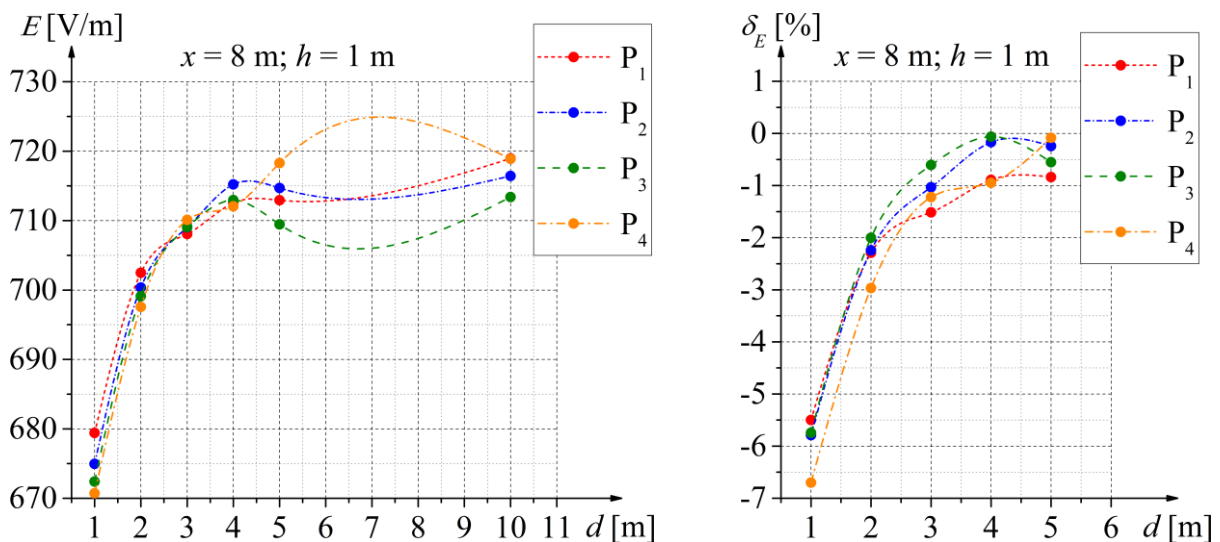


Слика 6.14. Вредности напона у време мерења јачине електричног поља

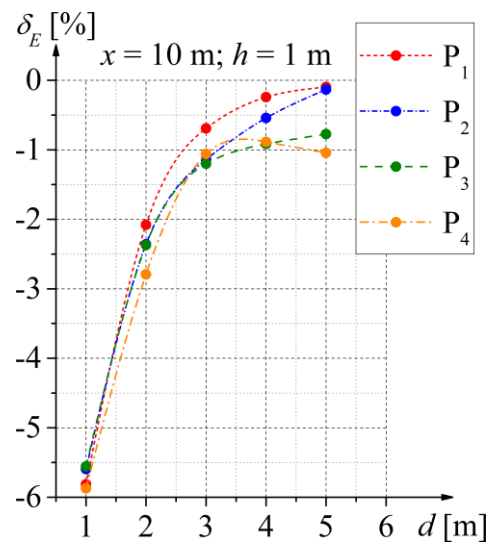
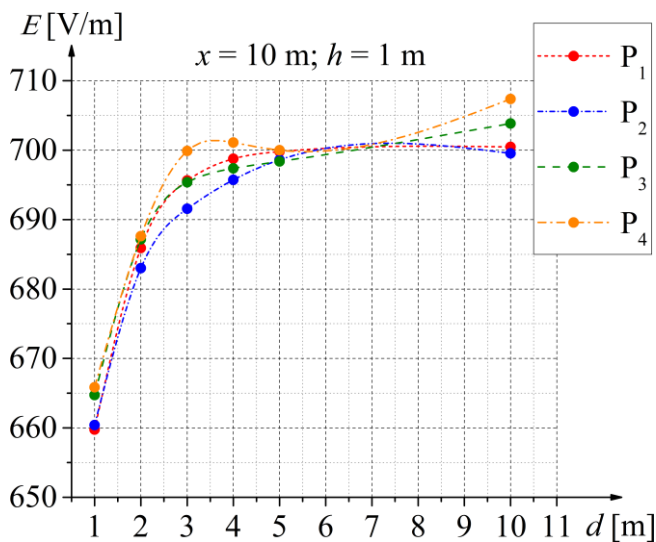
Мерења су вршена при растојањима  $d$  између испитивача и сонде која износе 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m и 10 m. За сваки резултат добијен при растојањима 1 m, 2 m, 3 m, 4 m и 5 m израчуната је и одговарајућа релативна грешка  $\delta_E$ , при чему је за тачну вредност усвојена вредност електричног поља која се добија при растојању од 10 m између испитивача и сонде. Мерења су извршена на висини  $h$  од 1 m изнад тла, на позицијама  $x = 0$  m,  $x = 8$  m,  $x = 10$  m,  $x = 12$  m и  $x = 15$  m. На свакој од наведених позиција мерења су спроведена постепеним удаљавањем испитивача од мерне сонде и то дуж праваца  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  и  $P_4$ . Добијени резултати приказани су на сликама 6.15–6.19. Код сваке слике је наведен и опсег промене напона током мерења дуж појединих праваца.



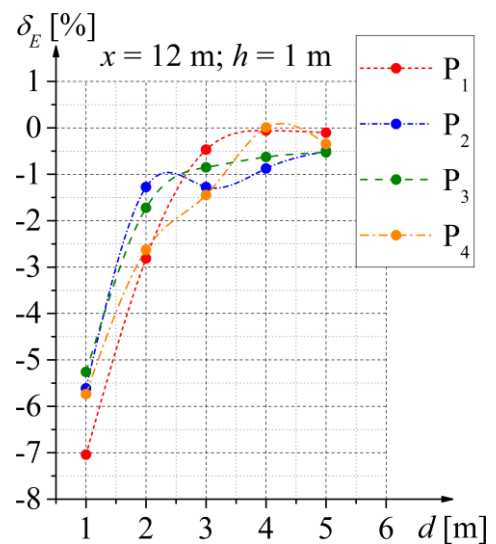
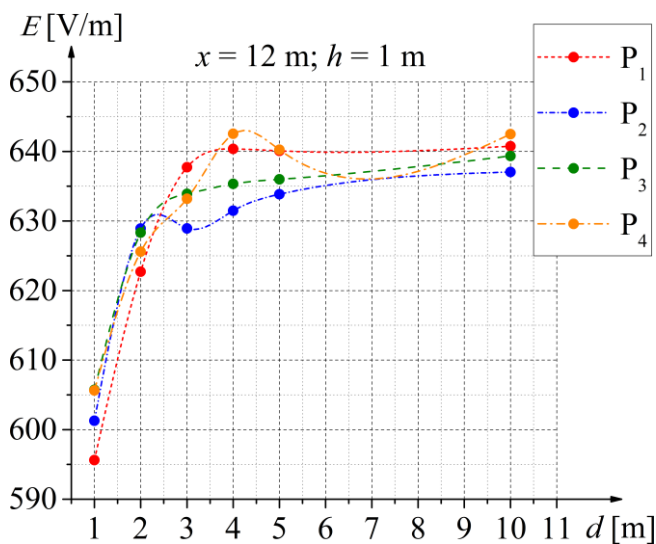
Слика 6.15. Резултати мерења на позицији  $x = 0$  m,  $h = 1$  m ( $U(P_1)$ : 115,30–115,40 kV;  $U(P_2)$ : 115,22–115,35 kV;  $U(P_3)$ : 115,17–115,30 kV;  $U(P_4)$ : 115,25–115,30 kV)



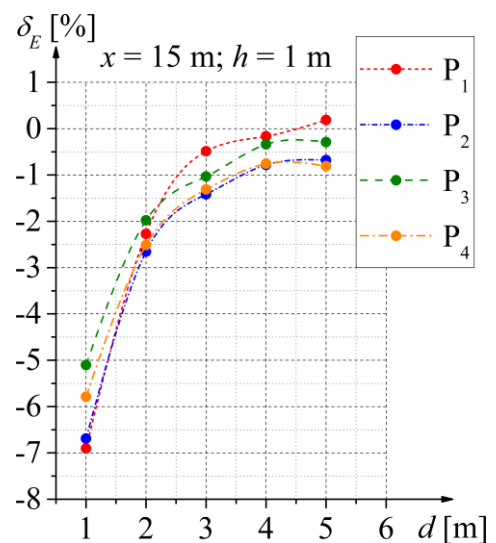
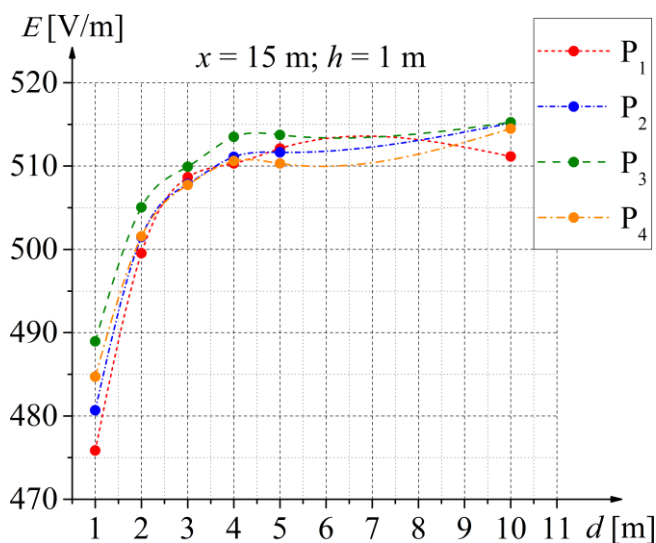
Слика 6.16. Резултати мерења на позицији  $x = 8$  m,  $h = 1$  m ( $U(P_1)$ : 115,30–115,40 kV;  $U(P_2)$ : 115,35–115,43 kV;  $U(P_3)$ : 115,48–115,53 kV;  $U(P_4)$ : 115,43–115,48 kV)



Слика 6.17. Резултати мерења на позицији  $x = 10 \text{ m}$ ,  $h = 1 \text{ m}$  ( $U(P_1)$ : 115,48–115,53 kV;  $U(P_2)$ : 115,43–115,53 kV;  $U(P_3)$ : 115,48–115,53 kV;  $U(P_4)$ : 115,56–115,61 kV)

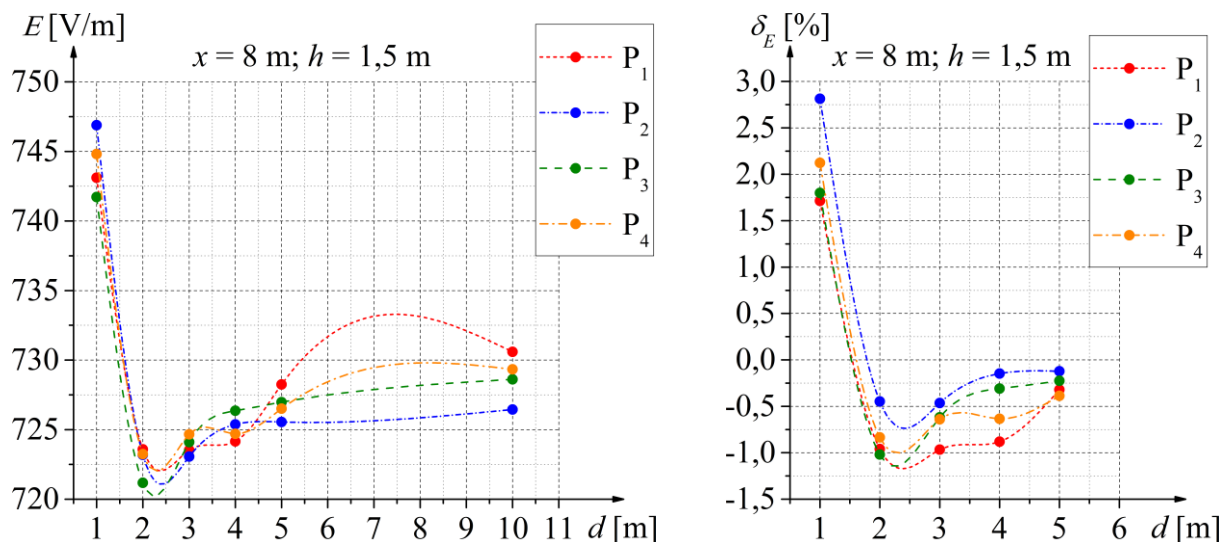


Слика 6.18. Резултати мерења на позицији  $x = 12 \text{ m}$ ,  $h = 1 \text{ m}$  ( $U(P_1)$ : 115,61–115,71 kV;  $U(P_2)$ : 115,58–115,69 kV;  $U(P_3)$ : 115,61–115,66 kV;  $U(P_4)$ : 115,56–115,61 kV)

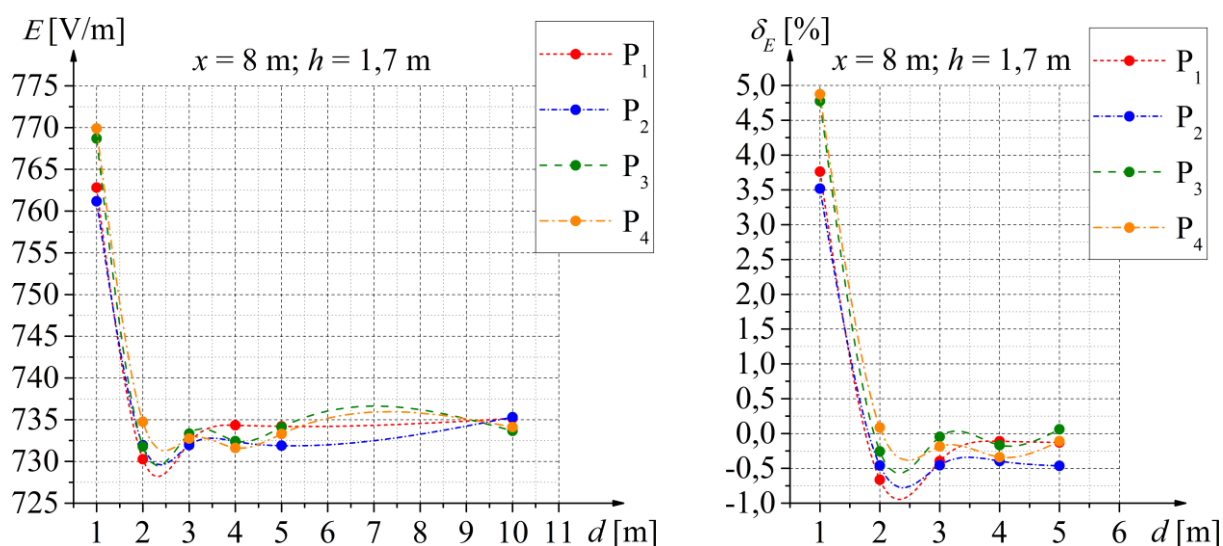


Слика 6.19. Резултати мерења на позицији  $x = 15 \text{ m}$ ,  $h = 1 \text{ m}$  ( $U(P_1)$ : 115,53–115,58 kV;  $U(P_2)$ : 115,40–115,48 kV;  $U(P_3)$ : 115,48–115,56 kV;  $U(P_4)$ : 115,43–115,48 kV)

На позицији  $x = 8$  m, на којој је измерена највећа вредност јачине електричног поља, мерења су спроведена и на висинама од 1,5 m и 1,7 m. Резултати ових мерења приказани су на сликама 6.20. и 6.21. На основу приказаних резултата може се закључити да постоји слагање између добијених резултата и резултата датих у [20]. Одступања која се јављају на појединим местима могу бити последица грешке мерења која потиче од грешке мерне сонде, као и мањих варијација напона током мерења.



Слика 6.20. Резултати мерења на позицији  $x = 8$  m,  $h = 1,5$  m ( $U(P_1)$ : 115,48–115,56 kV;  $U(P_2)$ : 115,43–115,58 kV;  $U(P_3)$ : 115,56–115,61 kV;  $U(P_4)$ : 115,58–115,61 kV)



Слика 6.21. Резултати мерења на позицији  $x = 8$  m,  $h = 1,7$  m ( $U(P_1)$ : 115,53–115,58 kV;  $U(P_2)$ : 115,61–115,71 kV;  $U(P_3)$ : 115,53–115,66 kV;  $U(P_4)$ : 115,53–115,66 kV)

На основу приказаних резултата закључује се да се ова компонента мерне несигурности може успешно смањити и чак потпуно елиминисати повећањем растојања између испитивача и мерне сонде, у складу са препорукама датим у [20]. Увек када је то могуће овај утицај би требало елиминисати, а када то није могуће, потребно га је уважити у прорачуну комбиноване мерне несигурности. Овој компоненти мерне несигурности може се приписати правоугаона расподела вероватноће.

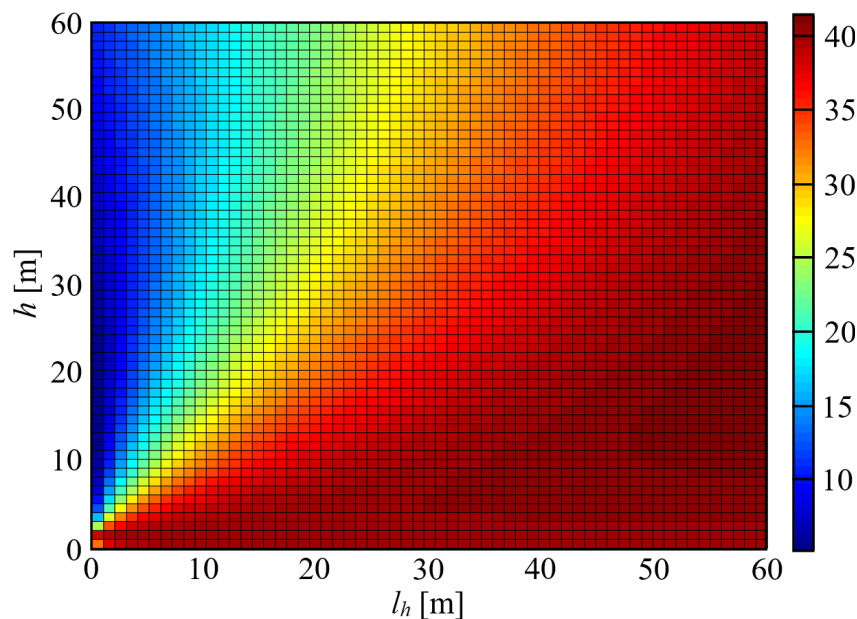
Приликом свих мерења која су приказана у дисертацији растојање између испитивача и мерне сонде износило је 10 m, због чега се у конкретним случајевима може сматрати да је ова компонента мерне несигурности занемарљива.

## 6.4. Несигурност позиционирања мерне сонде дуж латералног правца

### 6.4.1. Метода за израчунавање несигурности

Несигурност позиционирања мерне сонде дуж латералног правца може да доведе до одступања уколико се резултати мерења пореде с резултатима добијеним прорачунима. Позиција мерног места на латералном правцу, тј. хоризонтално растојање од осе вода, најчешће се одређује на један од следећа два начина. Ако се мерења врше на већем броју мерних места дуж латералног правца, најчешће се дуж правца постави мерна трака и на тај начин одређује позиција сваког мерног места. Уколико се мерења врше на неколико мерних места на којима су претходним прелиминарним испитивањем утврђене највише вредности електричног поља, хоризонтална растојања мерних места до осе вода могу бити одређена мерењем помоћу ласерског даљиномера. Без обзира на то који се од два наведена начина примењује у конкретном случају, постоји одређена грешка мерења хоризонталног растојања.

На слици 6.22. приказане су максималне вредности грешке мерења хоризонталног растојања  $\Delta l_h$  за случај када се мерење врши ласерским даљиномером који има декларисану грешку мерења растојања  $\Delta l_s = \pm 40$  cm и грешку мерења угла  $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$ . Поступак израчунавања грешке мерења хоризонталног растојања детаљно је објашњен у поглављу 8.4. Када је потребно одредити позицију мерног места на латералном правцу, тј. хоризонтално растојање мерног места од осе вода, ласерским даљиномером се мери растојање до проводника који се налази у осе вода. Уколико се ради о воду с хоризонталним распоредом фазних проводника, као што су водови са стубовима типа „портал” или „Y”, мери се растојање до средњег фазног проводника. Уколико је у питању вод са стубовима типа „јела” или „буре” с једним заштитним проводником, мери се растојање до заштитног проводника. Ако се ради о воду са стубовима типа „буре” с два заштитна ужета, или о водовима напонског нивоа 35 kV са стубовима типа „јела” или „буре” без заштитног ужета, може се измерити растојање до било ког проводника, а затим на основу познатих података о дужинама конзола одредити растојање до осе вода. На слици 6.22. ознаком  $h$  обележена је висина проводника до којег се мери растојање, а ознаком  $l_h$  хоризонтално растојање до проводника.



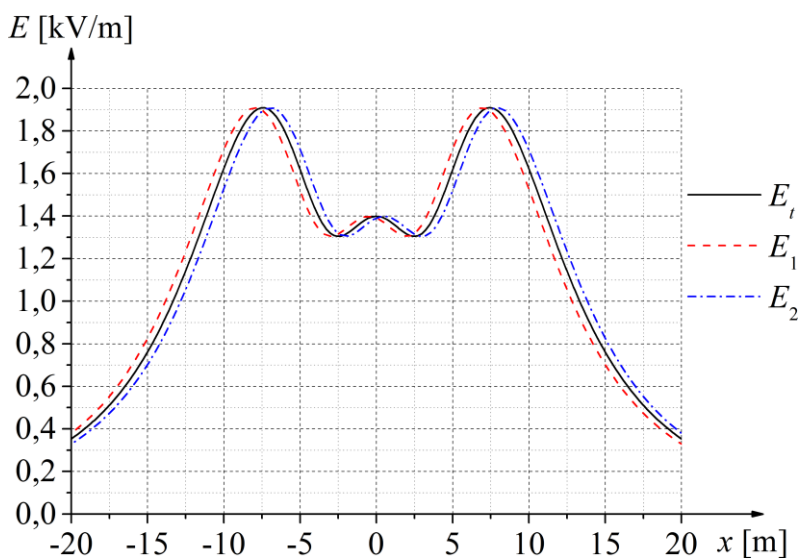
Слика 6.22. Грешка мерења хоризонталног растојања  $\Delta l_h$  [cm] за ласерски даљиномер са декларисаним грешкама  $\Delta l_s = \pm 40$  cm и  $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$



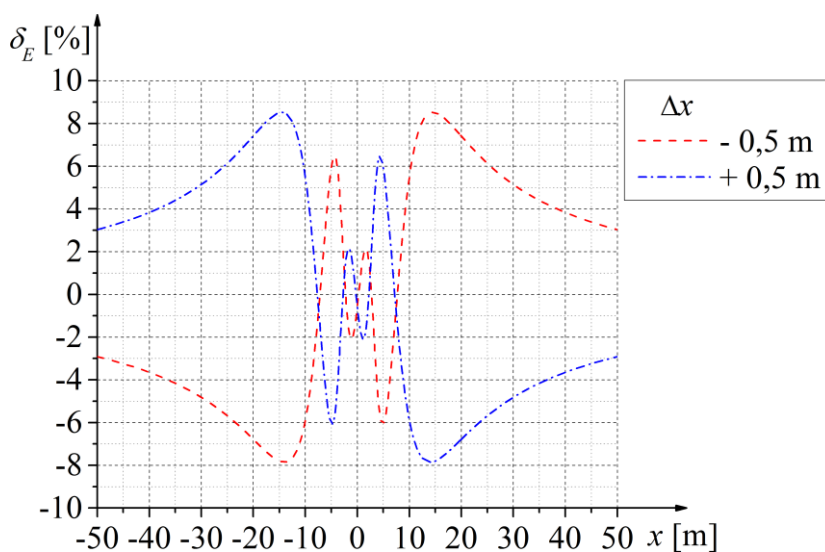
Вредности грешке мерења хоризонталног растојања  $\Delta l_h$  приказане на слици 6.22. израчунате су за висине и хоризонтална растојања до 60 m, чиме је обухваћен највећи број случајева који се јављају у пракси. Максимална вредност грешке мерења хоризонталног растојања у наведеном опсегу износи 41 cm.

Несигурност услед позиционирања мерне сонде дуж латералног правца одређена је прорачуном јачине електричног поља. Претпостављено је да максимална вредност грешке позиционирања  $\Delta x$  износи  $\pm 0,5$  m, што представља реалну вредност и обухвата оба наведена начина одређивања хоризонталног растојања мерног места до осе вода.

На слици 6.23. приказани су резултати прорачуна јачине електричног поља за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”, који је приказан на слици 4.3. Висине фазних проводника изнад тла износе 7 m. Прорачун је спроведен за случај када не постоји грешка позиционирања, чиме се добијају тачне вредности јачине електричног поља  $E_t$ , као и за случајеве када ова грешка износи -0,5 m (случај 1) и +0,5 m (случај 2), чиме се добијају вредности  $E_1$  и  $E_2$ . Вредности релативне грешке за случајеве 1 и 2 приказане су на слици 6.24. Вредност релативне грешке  $\delta_E$  мења се дуж латералног правца и налази се у опсегу од -7,85% до 8,52%.

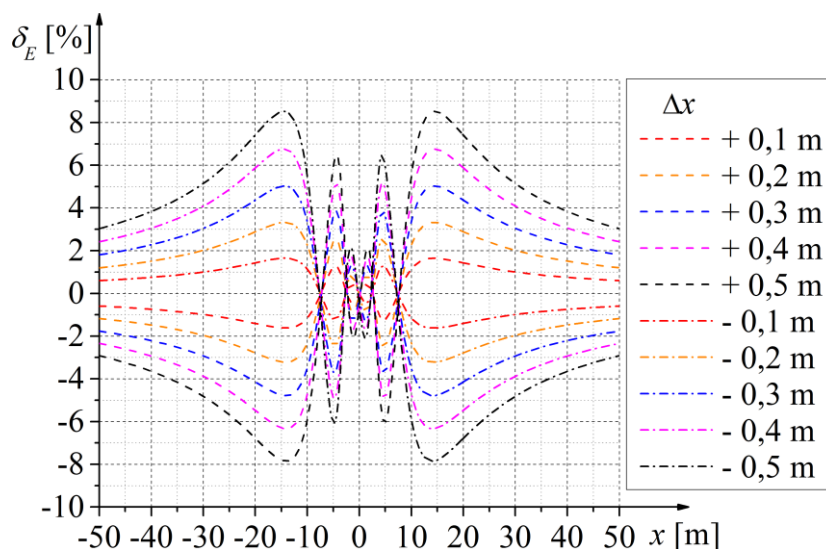


Слика 6.23. Резултати прорачуна јачине електричног поља за  $\Delta x = 0$  m ( $E_t$ ),  $\Delta x = -0,5$  m ( $E_1$ ) и  $\Delta x = +0,5$  m ( $E_2$ )



Слика 6.24. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за случајеве 1 ( $\Delta x = -0,5$  m) и 2 ( $\Delta x = +0,5$  m)

На слици 6.25. приказане су вредности релативне грешке у случајевима када  $\Delta x$  износи  $\pm 0,1$  m,  $\pm 0,2$  m,  $\pm 0,3$  m,  $\pm 0,4$  m и  $\pm 0,5$  m.

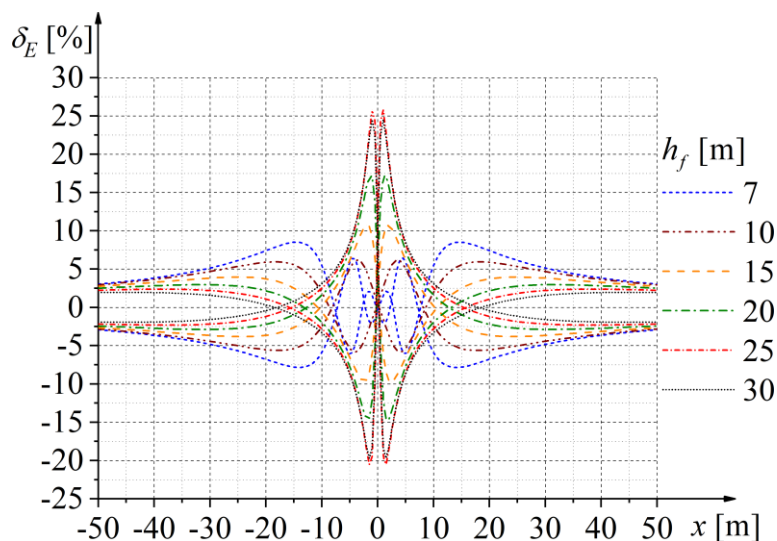


Слика 6.25. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за случајеве  $-0,5 \text{ m} \leq \Delta x \leq +0,5 \text{ m}$

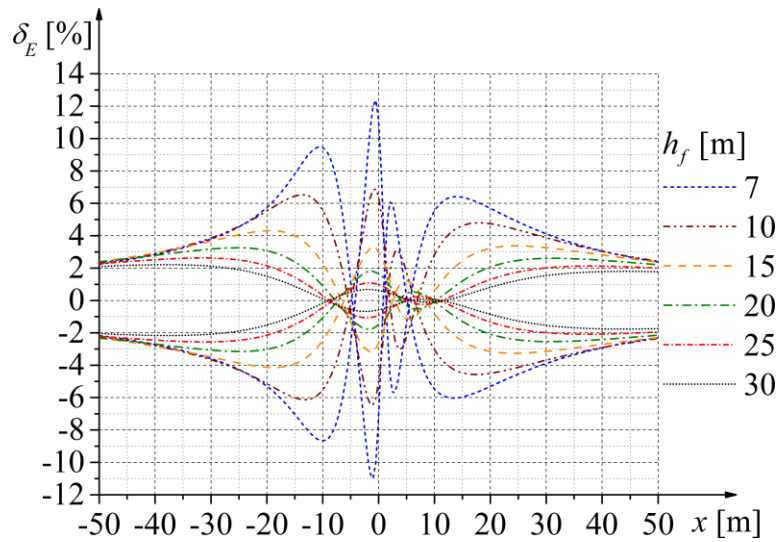
У случајевима када  $\Delta x$  износи  $\pm 0,1$  m,  $\pm 0,2$  m,  $\pm 0,3$  m и  $\pm 0,4$  m, вредности релативне грешке  $\delta_E$  од  $x = -50$  m до  $x = +50$  m налазе се у опсезима  $-1,62$ – $-1,65\%$ ,  $-3,22$ – $-3,33\%$ ,  $-4,79$ – $-5,03\%$  и  $-6,33$ – $-6,76\%$ .

#### 6.4.2. Резултати прорачуна

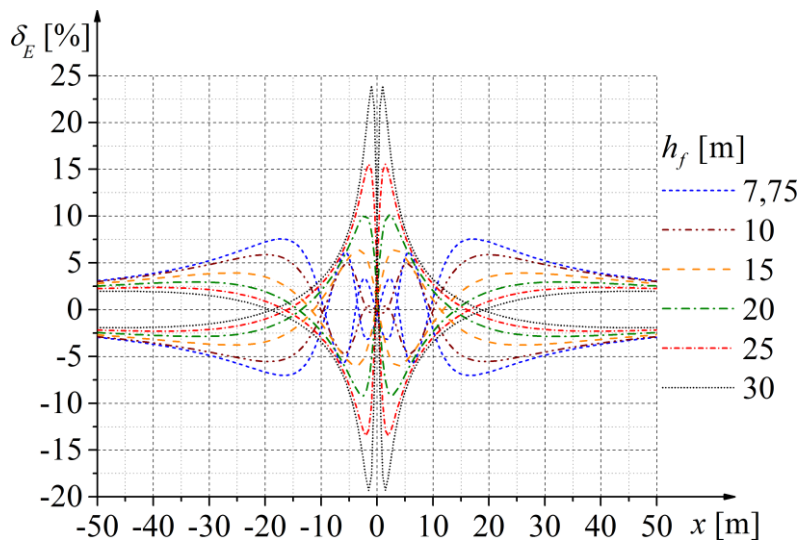
Израчунавање грешке позиционирања мерне сонде дуж латералног правца на описани начин спроведено је за надземне водове чије су геометрије дате на сликама 4.3–4.5, и то за податке о водовима дате у табели 4.1. и висине фазних и заштитних проводника дате у табелама 4.2. и 4.3. Резултати прорачуна приказани су на сликама 6.26–6.31. Прорачуни су спроведени под претпоставком да  $\Delta x$  износи  $\pm 0,5$  m.



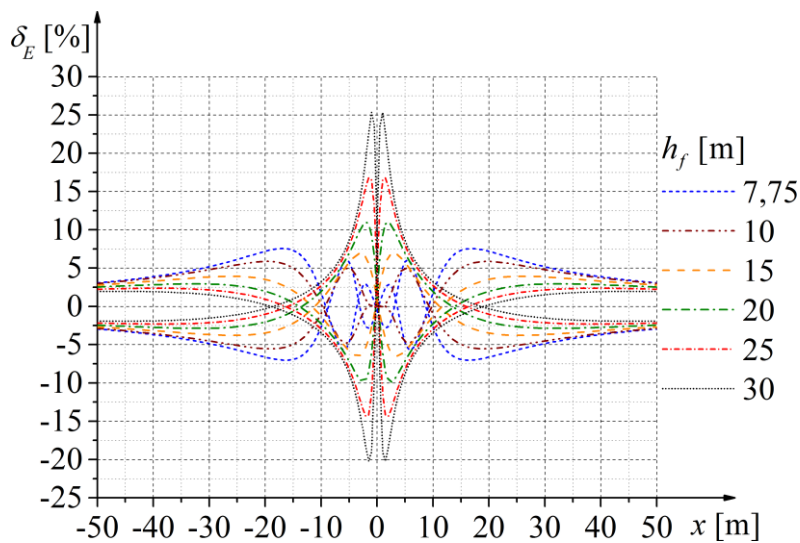
Слика 6.26. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”



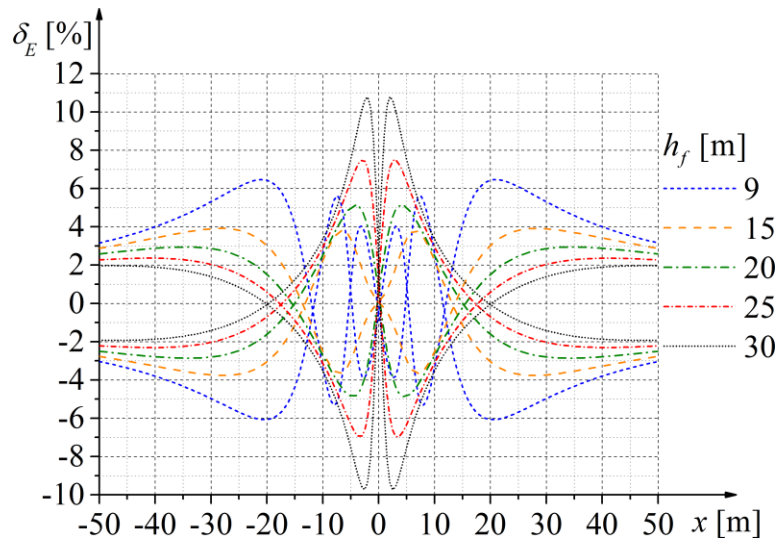
Слика 6.27. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „јела”



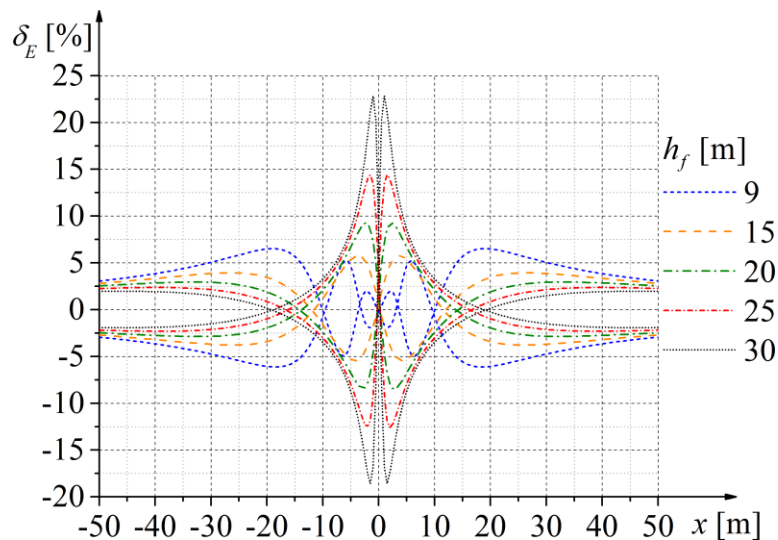
Слика 6.28. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „портал”



Слика 6.29. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „Y”



Слика 6.30. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „портал”



Слика 6.31. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „Y”

На основу резултата приказаних на сликама 6.26–6.31. може се закључити да се у највећем броју случајева веће вредности грешке добијају у зони испод надземног вода, док се мање вредности добијају на већим растојањима од осе вода. На растојањима од осе вода већим од 10 m вредности грешке  $\delta_E$  опадају испод 9,5% у свим разматраним случајевима, који обухватају различите напонске нивое, геометрије водова и висине проводника. На овим растојањима највеће вредности грешке добијене су у случају вода са стубовима типа „јела”, и налазе се у опсегу од -8,7% до 9,5%.

Опсеги у којима се налазе вредности релативне грешке  $\delta_E$  од  $x = -50$  m до  $x = +50$  m код разматраних надземних водова дати су у табели 6.2. У појединим случајевима максимална вредност релативне грешке  $\delta_E$  износила је око 25%.

На основу приказаних резултата може се закључити да грешка позиционирања мерне сонде дуж латералног правца може имати значајан утицај на одступања између резултата мерења и резултата прорачуна јачине електричног поља, због чега је одређивање позиције мерног места на латералном правцу потребно спровести тако да се ова грешка сведе на најмању могућу меру.

**Табела 6.2.** Максимални опсежи грешке  $\delta_E$  добијени за  $\Delta x = \pm 0,5$  m

$h_f$ [m]	110 kV		220 kV		400 kV	
	Портал	Јела	Портал	Y	Портал	Y
7	-7,85–8,52	-11,01–12,37	/	/	/	/
7,75	/	/	-7,02–7,55	-7,03–7,56	/	/
9	/	/	/	/	-6,07–6,47	-6,12–6,52
10	-5,84–6,20	-6,44–6,89	-5,54–5,87	-5,55–5,87	/	/
15	-9,74–10,79	-4,14–4,32	-5,99–6,37	-6,49–6,94	-3,77–3,92	-5,45–5,76
20	-14,64–17,15	-3,15–3,26	-9,23–10,16	-9,93–11,03	-4,88–5,13	-8,47–9,25
25	-20,50–25,79	-2,56–2,63	-13,45–15,54	-14,38–16,79	-6,98–7,51	-12,60–14,42
30	-19,70–24,53	-2,17–2,22	-19,32–23,94	-20,22–25,35	-9,73–10,78	-18,59–22,84

## 6.5. Несигурност позиционирања мерне сонде по висини

### 6.5.1. Метода за израчунавање несигурности

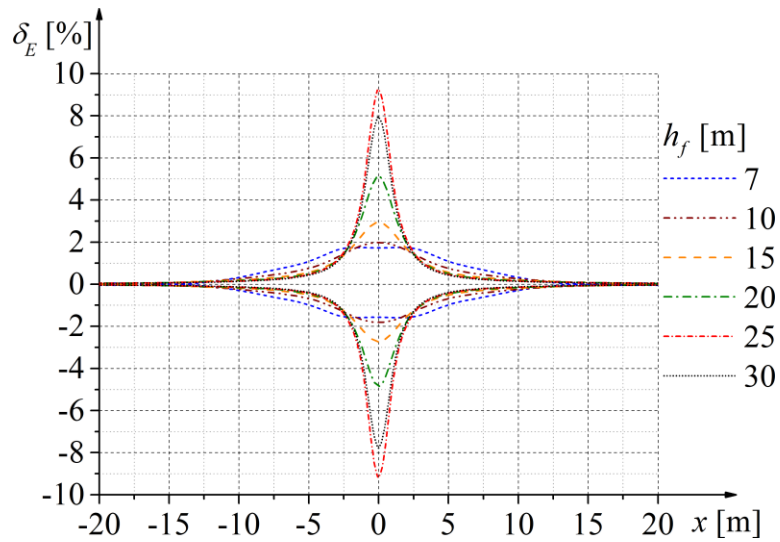
Као што је описано у поглављу 3, сонда за мерење електричног поља се током мерења налази на сталку од изолационог материјала. Приликом позиционирања сонде могућа су одређена одступања од њеног планираног положаја. До ових одступања може доћи приликом постављања сонде на сталак, али и услед мањих неравнина које постоје на локацији на којој се врше мерења, тј. одступања површине тла од идеално равне површине. Без обзира на њен узрок, ова грешка може довести до одступања између резултата мерења и прорачуна.

Несигурност услед позиционирања мерне сонде по висини израчуната је за случај када планирана висина на којој се врши мерење износи 1 m, а грешка позиционирања  $\Delta u$  износи  $\pm 0,1$  m. На овај начин се уважава грешка приликом постављања сонде на сталак и постојање мањих неравнина. Несигурност услед позиционирања мерне сонде одређена је прорачуном, тако што је прорачун спроведен за висине од 0,9 m и 1,1 m изнад тла и израчунате су одговарајуће релативне грешке у односу на случај када се прорачун спроведе за висину од 1 m изнад тла.

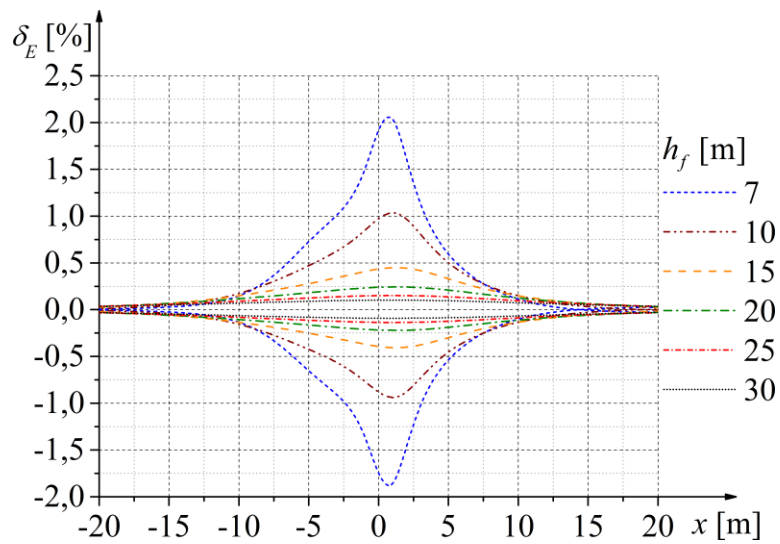
### 6.5.2. Резултати прорачуна

Прорачун је спроведен за надземне водове чије су геометрије дате на сликама 4.3–4.5, за улазне податке из табеле 4.1. и висине фазних и заштитних проводника из табела 4.2. и 4.3. Резултати прорачуна приказани су на сликама 6.32–6.37.

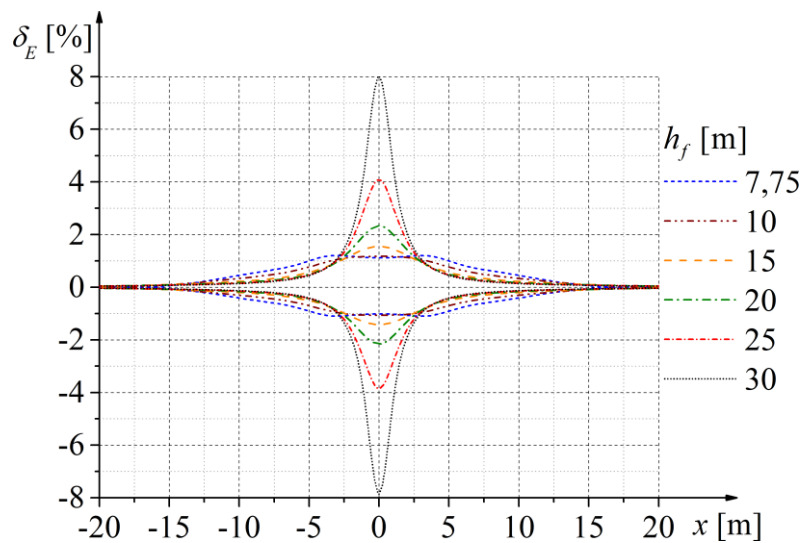
На основу резултата приказаних на сликама 6.32–6.37. може се закључити да се код свих анализираних водова највеће вредности грешке јављају у зони која се налази непосредно испод надземног вода, тј. у зони од -10 m до +10 m. На растојањима од осе вода која су већа од 10 m грешка опада испод 0,5% код свих анализираних водова.



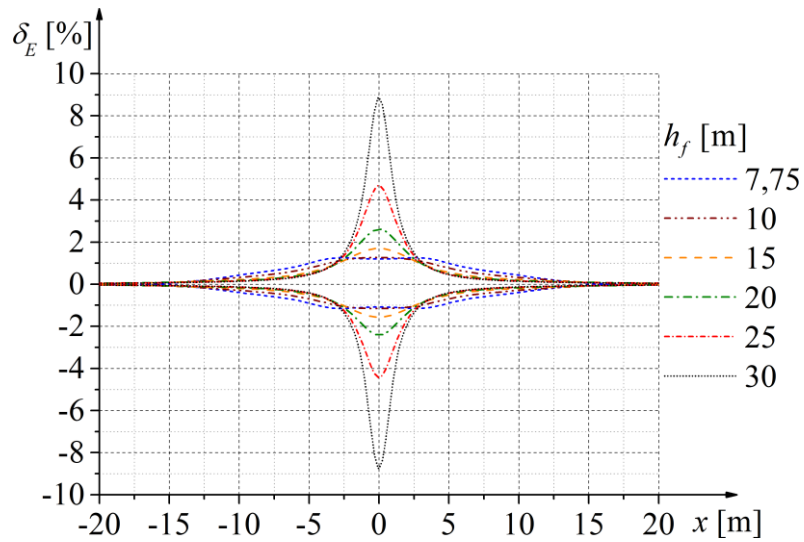
Слика 6.32. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”



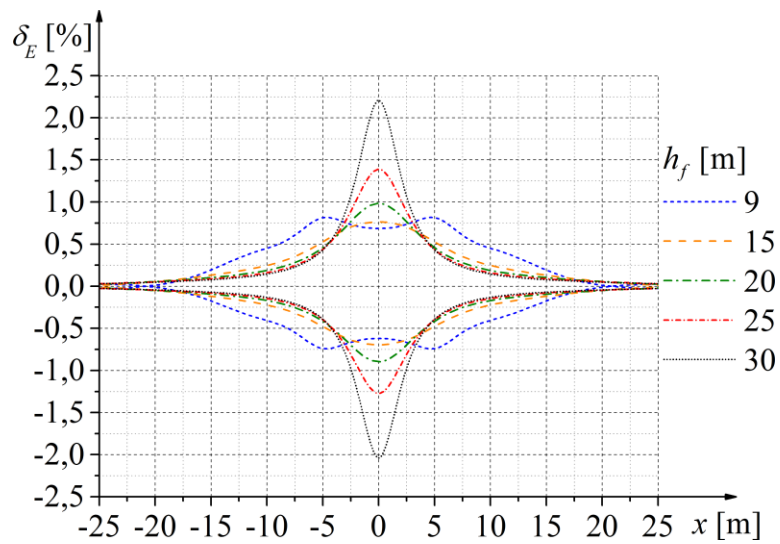
Слика 6.33. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „јела”



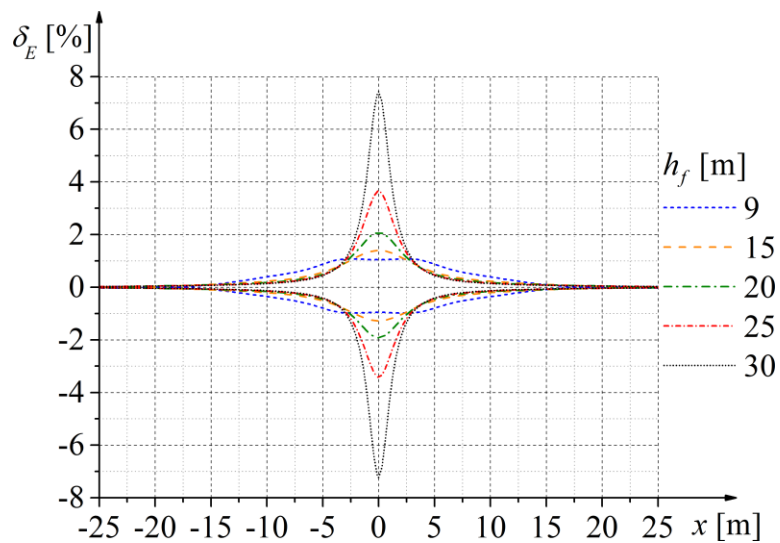
Слика 6.34. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „портал”



Слика 6.35. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „Y”



Слика 6.36. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „портал”



Слика 6.37. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „Y”

Опсези у којима се налазе вредности релативне грешке  $\delta_E$  код разматраних надземних водова дати су у табели 6.3.

**Табела 6.3.** Максимални опсези грешке  $\delta_E$  добијени за  $\Delta y = \pm 0,1$  m

$h_f$ [m]	110 kV		220 kV		400 kV	
	Портал	Јела	Портал	У	Портал	У
7	-1,58–1,74	-1,86–2,04	/	/	/	/
7,75	/	/	-1,10–1,21	-1,14–1,26	/	/
9	/	/	/	/	-0,74–0,81	-0,98–1,08
10	-1,81–1,98	-0,94–1,04	-1,07–1,17	-1,16–1,27	/	/
15	-2,73–2,95	-0,41–0,45	-1,42–1,55	-1,57–1,71	-0,69–0,76	-1,28–1,40
20	-4,88–5,15	-0,22–0,24	-2,16–2,34	-2,43–2,62	-0,90–0,99	-1,92–2,09
25	-9,20–9,29	-0,14–0,15	-3,86–4,11	-4,44–4,70	-1,27–1,39	-3,43–3,66
30	-7,78–7,96	-0,09–0,10	-7,86–8,04	-8,77–8,88	-2,04–2,21	-7,23–7,43

На основу приказаних резултата може се закључити да релативна грешка зависи од висине фазних проводника и да у појединим случајевима достиже вредност од 9,3%. Највећи опсег грешке, од -9,20% до +9,29%, добијен је код надземног вода напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” и висином фазних проводника од 25 m. Наведене закључке је потребно имати у виду да би се приликом постављања сонде на изолациони сталак грешка позиционирања сонде по висини свела на минимум.

## 6.6. Несигурност позиционирања мерне сонде дуж лонгитудиналног правца

### 6.6.1. Метода за израчунавање несигурности

Приликом позиционирања мерне сонде може доћи до одступања и дуж лонгитудиналног правца, што такође доводи до одступања у односу на резултате прорачуна. У пракси се може јавити случај да је потребно извршити мерење јачине електричног поља и магнетске индукције на одређеном растојању од стубова, на којем су висине фазних проводника изнад тла најмање на датом распону. Растојање од стубова на којем су висине фазних проводника изнад тла најмање, као и висина најнижег фазног проводника на датом месту, могу бити дати на уздужном профилу надземног вода. Уколико се прорачун јачине електричног поља и магнетске индукције врши за висине фазних проводника које су преузете из пројекта надземног вода, може доћи до одступања између резултата мерења и прорачуна услед грешке позиционирања мерне сонде дуж лонгитудиналног правца.

Позиција мерног места на лонгитудиналном правцу најчешће се одређује мерењем хоризонталног растојања до стубова помоћу ласерског даљиномера. Приликом анализе ове компоненте несигурности претпостављено је да се хоризонтално растојање до стубова мери ласерским даљиномером који има следеће карактеристике:

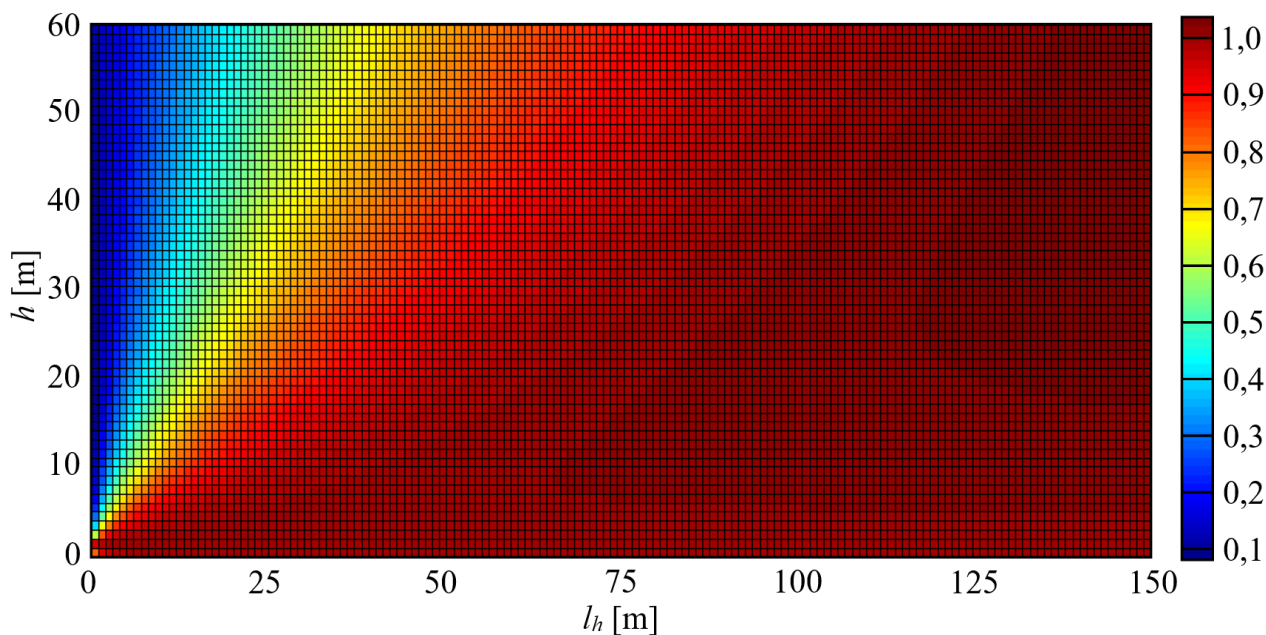
– грешка мерења растојања  $\Delta l_s = \pm 0,4$  m, грешка мерења угла  $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$  (за растојања мања од 100 m);

– грешка мерења растојања  $\Delta l_s = \pm 1$  m, грешка мерења угла  $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$  (за растојања већа од 100 m).



У случају када је растојање мање од 100 m, грешка мерења растојања  $\Delta l_s$  износи  $\pm 0,4$  m, док грешка мерења угла  $\Delta \alpha$  износи  $\pm 0,1^\circ$ . Максималне вредности грешке мерења хоризонталног растојања  $\Delta l_h$  у овом случају дате су у поглављу 6.4.1, на слици 6.22. Вредности грешке мерења хоризонталног растојања  $\Delta l_h$  приказане на слици 6.22. израчунате су за висине и хоризонтална растојања до 60 m. Максимална вредност грешке мерења хоризонталног растојања у наведеном опсегу износи 41 cm.

У случају када је растојање веће од 100 m, грешка мерења растојања  $\Delta l_s$  износи  $\pm 1$  m, док грешка мерења угла  $\Delta \alpha$  износи  $\pm 0,1^\circ$ . Максималне вредности грешке мерења хоризонталног растојања  $\Delta l_h$  у овом случају приказане су на слици 6.38. Вредности грешке приказане на слици 6.38. добијене су под претпоставком да се хоризонтално растојање до објекта  $l_h$  налази у опсегу 0–150 m, док се висина објекта до кога се мери растојање  $h$  налази у опсегу 0–60 m. Ради једноставнијег приказа, претпостављено је да грешка мерења растојања  $\Delta l_s$  износи  $\pm 1$  m и на растојањима која су мања од 100 m.



**Слика 6.38.** Грешка мерења хоризонталног растојања  $\Delta l_h$  [m] за ласерски даљиномер са декларисаним грешкама  $\Delta l_s = \pm 1$  m и  $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$

Највећа вредност грешке  $\Delta l_h$  у разматраном опсегу висине  $h$  и хоризонталног растојања  $l_h$  износи 1,036 m. Највећа вредност грешке  $\Delta l_h$  када се узму у обзир хоризонтална растојања до 500 m износи 1,095 m.

Осим грешке мерења хоризонталног растојања  $\Delta l_h$  која потиче од декларисане грешке ласерског даљиномера, потребно је уважити и могућност постојања додатног одступања, у зависности од тога до које је тачке на стубу измерено растојање. Због тога се за максималну вредност грешке позиционирања мерне сонде дуж лонгитудиналног правца  $\Delta z$  усваја вредност од 1 m када се мери растојање које је мање од 100 m, односно вредност од 1,5 m када се мери растојање које је веће од 100 m.

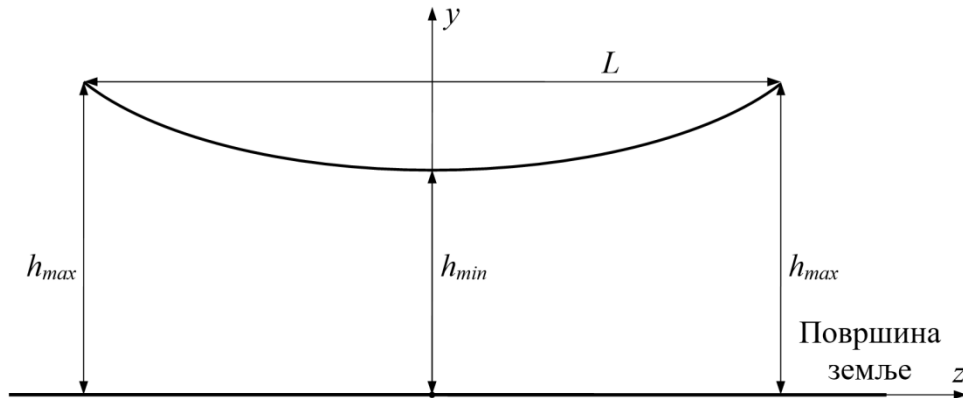
Да би се установило у којој мери се грешка позиционирања мерне сонде дуж лонгитудиналног правца  $\Delta z$  одражава на одступање између резултата мерења и прорачуна, разматра се неколико правих распона с хоризонталним распоредом фазних проводника, који се међусобно разликују по дужини и висини тачака вешања.

Прав распон надземног вода приказан је на слици 6.39. Ознаке на овој слици имају следеће значење:

$L$  – дужина распона;

$h_{min}$  – висина проводника у темену ланчанице;

$h_{max}$  – висина проводника у тачкама вешања.



Слика 6.39. Прав распон надземног вода

Једначина ланчанице у координатном систему који је везан за површину земље гласи:

$$y = k \cdot ch\left(\frac{z}{k}\right) - y_d \quad (6.3)$$

при чему су  $k$  и  $y_d$  константе ланчанице.

На основу претходног израза, висина фазних проводника изнад тла се може изразити на следећи начин:

$$h_f = k \cdot ch\left(\frac{z}{k}\right) - y_d. \quad (6.4)$$

Разматра се десет распона, чије су карактеристике дате у табели 6.4. Висина фазних проводника на средини распона, тј. у темену ланчанице, код свих распона износи 10 m. Распони се међусобно разликују по дужини и висини фазних проводника у тачки вешања. На основу познатих величина  $L$ ,  $h_{f_{min}}$  и  $h_{f_{max}}$ , помоћу софтверског пакета *XGSLab* израчунати су параметри ланчаница  $k$  и  $y_d$ .

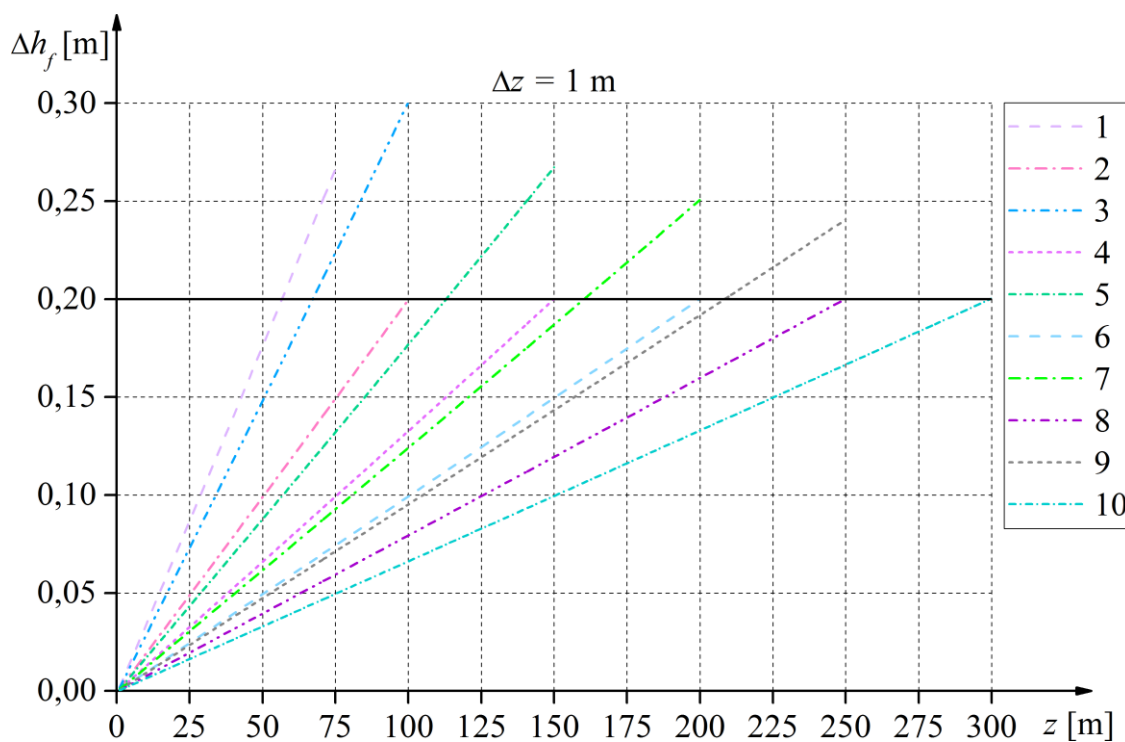
На основу израза (6.4) за сваки од наведених распона рачуна се висина фазних проводника дуж лонгитудиналног правца, тј. дуж  $z$  осе, са кораком 0,1 m. За све тачке дуж лонгитудиналног правца, почевши од тачке  $z = \Delta z$  до тачке вешања проводника на стубу, рачуна се разлика у висини фазних проводника  $\Delta h_f$  на основу следећег израза:

$$\Delta h_f(z) = h_f(z) - h_f(z - \Delta z). \quad (6.5)$$

**Табела 6.4.** Карактеристике разматраних распона

Редни број	$L$ [m]	$h_{f_{min}}$ [m]	$h_{f_{max}}$ [m]	$k$ [m]	$y_d$ [m]
1	150	10	20	282,9	-272,9
2	200	10	20	501,66	-491,66
3	200	10	25	335,8	-325,8
4	300	10	25	752,49	-742,49
5	300	10	30	565,8	-555,8
6	400	10	30	1003,32	-993,32
7	400	10	35	804,13	-794,13
8	500	10	35	1254,14	-1244,14
9	500	10	40	1046,63	-1036,63
10	600	10	40	1504,97	-1494,97

Вредности  $\Delta h_f$  за распоне 1–10, израчунате под претпоставком да  $\Delta z$  износи 1 m, дате су на слици 6.40.

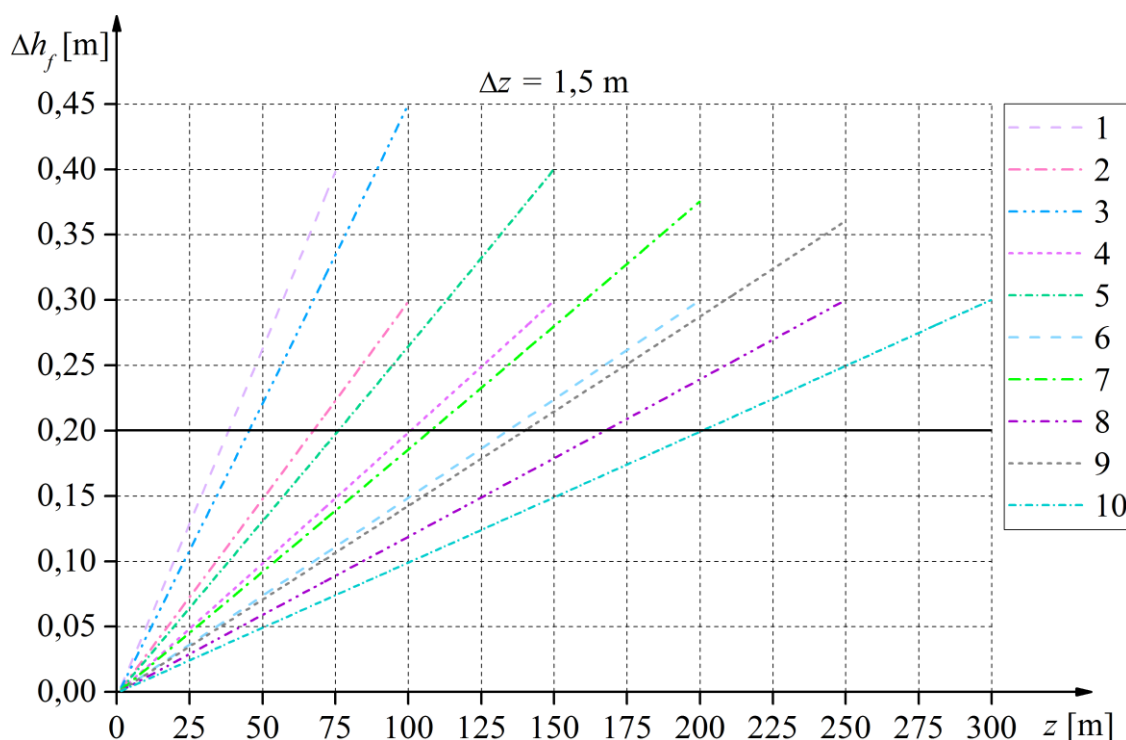


**Слика 6.40.** Вредности  $\Delta h_f$  за воде 1–10 за  $\Delta z = 1$  m

На основу резултата приказаних на слици 6.40. може се закључити да је у највећем броју случајева  $\Delta h_f$  мање од 0,2 m. Вредности  $\Delta h_f$  веће од 0,2 m јављају се код пет од десет разматраних распона (распони бр. 1, 3, 5, 7 и 9), и то искључиво на растојањима која се налазе у опсегу од 18,1 m до 41 m од стуба. Растојања до ближег стуба при којима вредност  $\Delta h_f$  постаје већа од 0,2 m за распоне бр. 1, 3, 5, 7 и 9, редом износе 18,1 m, 32,6 m, 36,8 m, 39,3 m и 41 m. Пошто се ради о малим растојањима до стуба оправдано је претпоставити да

ће у овим случајевима грешка  $\Delta z$  бити мања од максималне вредности, која износи 1 m, односно да ће бар делимично бити елиминисан део грешке који потиче од тога што је мерење растојања извршено до тачке на стубу која не одговара тачној позицији краја распона.

Вредности  $\Delta h_f$  за распоне 1–10, у случају када  $\Delta z$  износи 1,5 m, дате су на слици 6.41. Растојања до ближег стуба при којима вредност  $\Delta h_f$  постаје већа од 0,2 m за распоне 1–10 редом износе 36,5 m, 32,3 m, 54,4 m, 48,9 m, 73,8 m, 65,5 m, 92 m, 82,1 m, 109,7 m и 98,6 m. Види се да вредност  $\Delta h_f$  постаје већа од 0,2 m на растојањима од ближег стуба која су у највећем броју случајева мања од 100 m, тако да би грешка мерења хоризонталног растојања при овим растојањима од стуба била мања од 1,5 m. Осим тога, значајно је напоменути да се највећи број мерења електричног и магнетског поља спроводи у зони која је ближа средини распона, тј. месту на коме су висине фазних проводника изнад тла минималне, а вредности електричног и магнетског поља највише на датом распону. Због тога се за максималну вредност  $\Delta h_f$  која ће бити коришћена у даљим прорачунима усваја вредност 0,2 m.



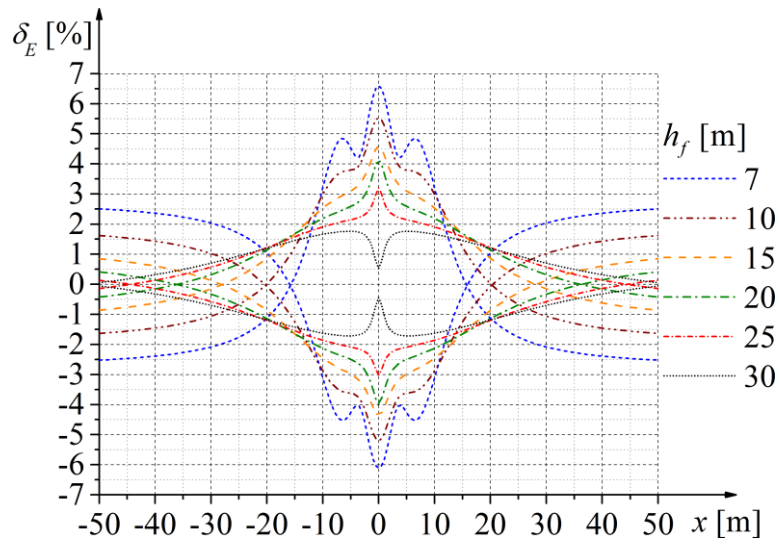
Слика 6.41. Вредности  $\Delta h_f$  за водове 1–10 за  $\Delta z = 1,5$  m

Ради израчунавања грешке  $\delta_E$  прво се израчунава јачина електричног поља за тачне вредности висине фазних проводника  $h_f$ , чиме се добија тачна вредност јачине електричног поља  $E_t$ , а затим се прорачун понавља за висине  $h_f \pm \Delta h_f$ , чиме се добијају вредности јачине електричног поља  $E$  када постоји грешка позиционирања дуж лонгитудиналног правца.

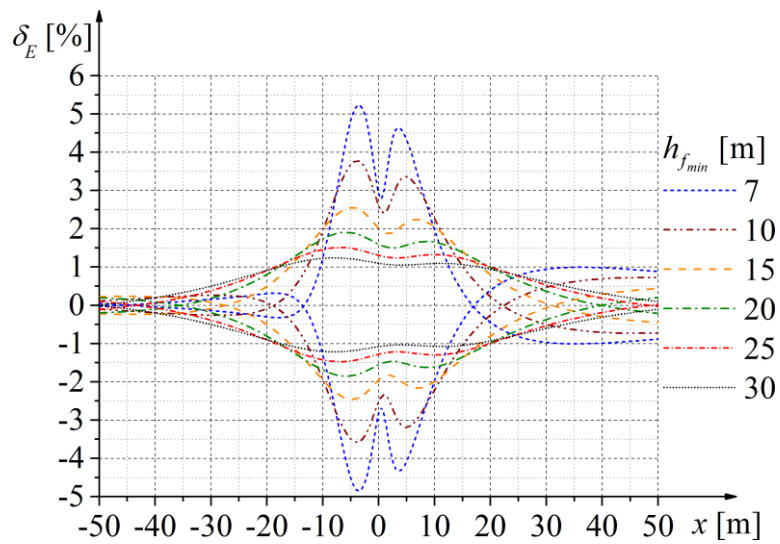
### 6.6.2. Резултати прорачуна

Прорачун је спроведен за надземне водове чије су геометрије дате на сликама 4.3–4.5. под претпоставком да  $\Delta h_f$  износи 0,2 m. Резултати прорачуна дати су на сликама 6.42–6.47.

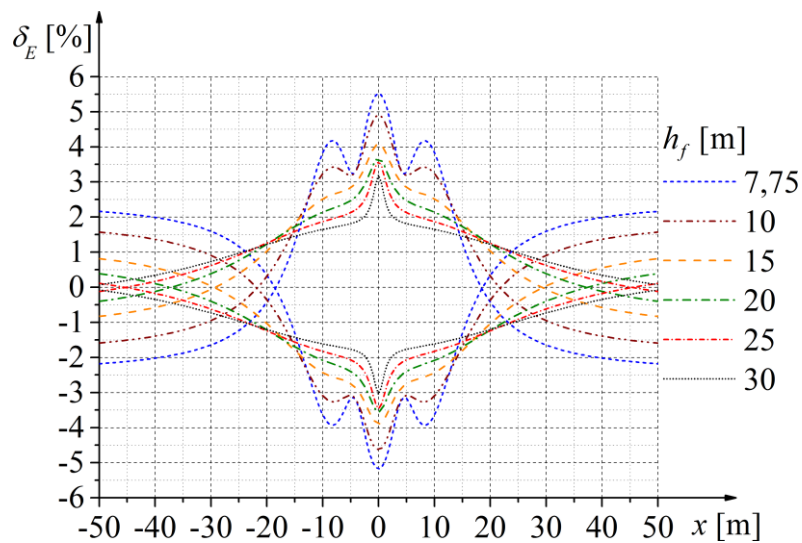
На основу приказаних резултата може се закључити да се код свих анализираних водова и висина проводника највеће вредности релативне грешке  $\delta_E$  добијају у зони испод надземног вода, док се мање вредности грешке добијају на већим растојањима од осе вода. На растојањима од осе вода већим од 10 m вредности релативне грешке ниже су од 3,9%, док су на растојањима већим од 20 m ниже од 2,6% код свих анализираних водова и за све разматране висине проводника.



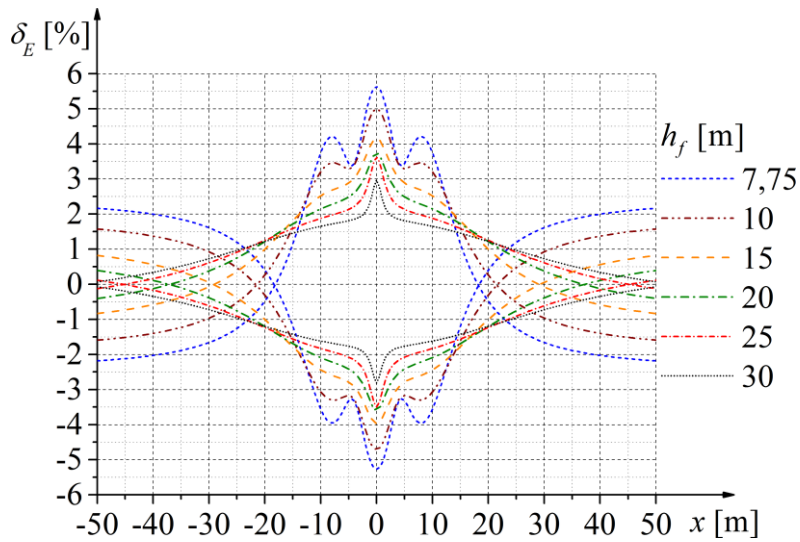
Слика 6.42. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”



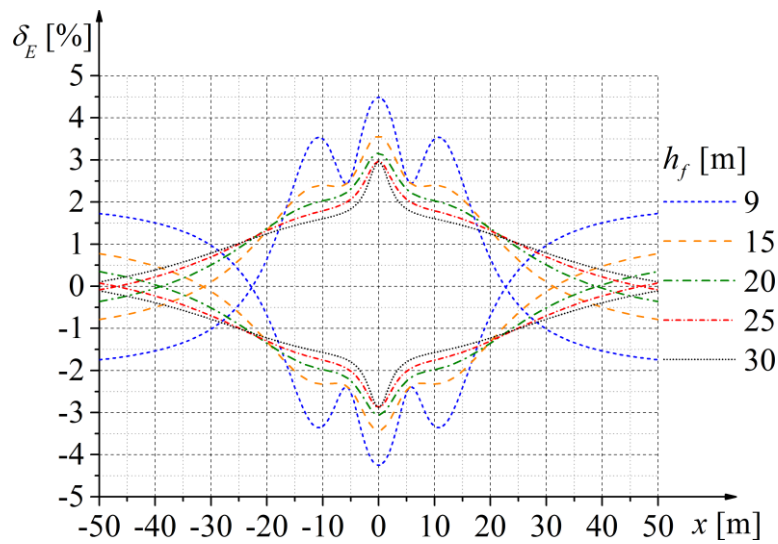
Слика 6.43. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „јела”



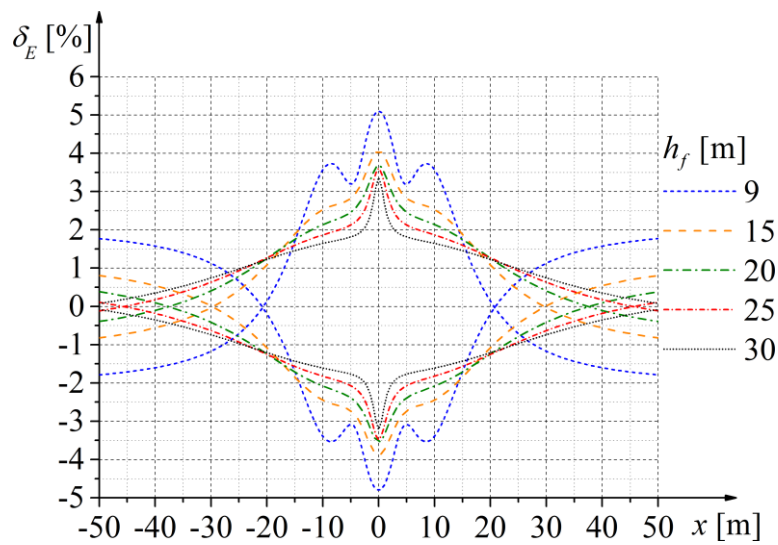
Слика 6.44. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „портал”



Слика 6.45. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „Y”



Слика 6.46. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „портал”



Слика 6.47. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „Y”

Опсези у којима се налазе вредности релативне грешке  $\delta_E$  од  $x = -50$  m до  $x = +50$  m код разматраних надземних водова дати су у табели 6.5.

**Табела 6.5.** Максимални опсези грешке  $\delta_E$  добијени за  $\Delta h_f = \pm 0,2$  m

$h_f$ [m]	110 kV		220 kV		400 kV	
	Портал	Јела	Портал	Y	Портал	Y
7	-6,11–6,60	-4,86–5,23	/	/	/	/
7,75	/	/	-5,18–5,53	-5,27–5,63	/	/
9	/	/	/	/	-4,26–4,49	-4,81–5,10
10	-5,20–5,54	-3,58–3,78	-4,64–4,91	-4,72–4,99	/	/
15	-4,37–4,60	-2,46–2,55	-3,91–4,09	-3,97–4,15	-3,43–3,57	-3,89–4,07
20	-3,99–4,17	-1,85–1,91	-3,56–3,70	-3,62–3,76	-3,06–3,17	-3,55–3,69
25	-3,02–3,20	-1,47–1,51	-3,47–3,59	-3,50–3,64	-2,88–2,97	-3,48–3,61
30	-1,72–1,76	-1,22–1,24	-3,05–3,20	-2,82–2,97	-2,88–2,96	-3,22–3,36

На основу приказаних резултата може се закључити да се код свих анализираних водова максималне вредности грешке  $\delta_E$  смањују са повећањем висине фазних проводника. Највећа вредност релативне грешке од 6,6% добијена је у случају надземног вода напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” и висинама фазних проводника од 7 m изнад тла.

На основу резултата приказаних на сликама 6.42–6.47. и у табели 6.5, може се закључити да утицај грешке позиционирања мерне сонде дуж лонгитудиналног правца на одступања између резултата мерења и резултата прорачуна јачине електричног поља није занемарљив, нарочито у случају када се фазни проводници налазе на мањим висинама изнад тла, због чега је одређивање позиције мерног места на лонгитудиналном правцу потребно спровести тако да се ова грешка сведе на најмању могућу меру. Мерење хоризонталног растојања до стуба требало би спровести тако да се мери растојање до тачке на стубу која одговара тачној позицији краја распона, тако да се грешка мерења хоризонталног растојања сведе само на декларисану грешку ласерског даљиномера.

## 6.7. Остале компоненте мерне несигурности

### 6.7.1. Утицај сталка за позиционирање мерне сонде

Мерено електрично поље може да буде пертурбисано услед присуства изолационог сталка на који се поставља мерна сонда. Утицај сталка на резултате мерења јачине електричног поља првенствено зависи од материјала и облика сталка. У [20] је препоручено коришћење сталка у виду треношца од изолационог материјала, пошто овакав сталак уноси најмању грешку. Уколико се сталак коришћен приликом еталонирања разликује од онога који се користи приликом мерења, овај утицај такође треба узети у обзир применом корекционог фактора или у виду додатне несигурности [20]. Компоненти мерне несигурности услед утицаја сталка такође се може приписати правоугаона расподела вероватноће.

Приликом свих мерења јачине електричног поља приказаних у дисертацији коришћен је дрвени сталак у облику треношца. Исти сталак је коришћен и приликом еталонирања, при чему је показано да је укупна мерна несигурност система за мерење јачине електричног поља мања од  $\pm 3\%$ . На основу тога се може закључити да коришћени сталак не уноси додатну мерну несигурност.

### **6.7.2. Утицај температуре и влажности ваздуха**

Произвођач мерне опреме треба да назначи у ком опсегу температуре и влажности ваздуха инструмент има наведену тачност. Према спецификацији произвођача, компонента мерне несигурности услед утицаја температуре и релативне влажности ваздуха већ је обухваћена мерном несигурношћу од  $\pm 3\%$  уколико се амбијентална температура налази у опсегу  $0-50^{\circ}\text{C}$  и уколико је релативна влажност ваздуха нижа од  $95\%$ . Приликом свих мерења приказаних у дисертацији температура и релативна влажност ваздуха су се налазиле у наведеним опсезима, тако да су ови услови задовољени.

Лабораторијска испитивања чији су резултати приказани у [20] показала су да влажност ваздуха може да утиче на систем за мерење електричног поља ако је њена вредност довољно висока да може да изазове кондензацију на сонди и на изолационом сталку. Ова истраживања су показала да повећање релативне влажности ваздуха изнад  $70\%$  значајно утиче на резултате мерења електричног поља, као и да је електрично поље мерено у условима високе влажности увек повишено. Због тога су оваква мерења прихватљива за проверу усаглашености с граничним вредностима. При томе, ако мерена вредност прекорачи прописану границу излагања, то не мора обавезно да значи да усаглашеност није постигнута. У случајевима када се захтева висока тачност, мерења не треба вршити када је влажност ваздуха виша од дозвољене. Приликом мерења приказаних у дисертацији релативна влажност ваздуха није прекорачила вредност од  $70\%$ , тако да се може закључити да није потребно уводити додатну компоненту мерне несигурности у вези са овим утицајем.

### **6.7.3. Неуниформност електричног поља**

Униформност електричног поља највише нарушавају проводни објекти који се налазе у близини мерне сонде, због чега их треба удаљити од мерне сонде увек када је то могуће. У супротном, овај утицај треба уважити применом корекционог фактора или додатне мерне несигурности. На мерење могу да утичу чак и непроводни објекти уколико је њихова релативна пермитивност већа од 1. Према [20], разлика између измереног и стварног поља у центру сонде може се сматрати занемарљивом ако је растојање између објекта и сонде бар пет пута веће од дијагонале мерне сонде.

### **6.7.4. Утицај короне**

Према [20], електрично поље изнад нивоа тла повећава се услед постојања короне. Појава короне је најизраженија при кишовитом времену и у условима високе влажности ваздуха. Пошто се мерења јачине електричног поља не врше у оваквим временским условима, може се сматрати да је овај утицај занемарљив.



## 7. Израчунавање компонената несигурности мерења магнетске индукције

### 7.1. Увод

У овом поглављу описани су извори мерне несигурности за које је уочено да имају највећи утицај на резултате мерења магнетске индукције која потиче од надземних електроенергетских водова. За сваки од ових утицајних фактора одређена је вредност мерне несигурности, мерењем или прорачуном.

Фактори за које је генерално уочено да имају утицај на мерење магнетске индукције индустријске учестаности су [20]:

- тачност и стабилност мерног инструмента;
- позиционирање мерне сонде по  $x$ ,  $y$  и  $z$  оси;
- температура;
- влажност ваздуха;
- временска константа мерног инструмента и покретање сонде;
- неуниформност поља.

### 7.2. Несигурност услед грешке мерног система

Грешка мерног система представља једну од основних компонената мерне несигурности, која се одређује на основу података датих у уверењу о еталонирању. У случајевима када постоји систематска грешка, на резултат мерења се може применити корекциони фактор заснован на подацима наведеним у уверењу о еталонирању. Компонента мерне несигурности која потиче од грешке мерног инструмента разматрана је у [121], [122].

Ова компонента мерне несигурности одређена је за случај мерног система приказаног на слици 3.1, који чине мерни инструмент EFA-300 и изотропна сонда за мерење магнетске индукције. Наведени мерни систем је коришћен за већину мерења приказаних у дисертацији. Према метролошким карактеристикама овог мерног система [81], које гарантује произвођач, несигурност мерења магнетске индукције износи  $\pm 3\%$ . При томе мора да буде испуњен услов да је мерена вредност индукције већа од 40 nT приликом коришћења филтера пропусног опсега 5 Hz – 2 kHz, 80 nT за филтер 5 Hz – 32 kHz, односно 10 nT у случају коришћења филтера пропусног опсега 50–400 Hz. Приликом свих мерења коришћен је филтер пропусног опсега 5 Hz – 2 kHz. Услов да измерена вредност магнетске индукције мора да буде већа од 40 nT испуњен је у свим мерним тачкама. Наведена вредност мерне несигурности односи се на случај коришћења раније поменуте екстерне сонде површине 100 cm<sup>2</sup>, која се користи приликом мерења.

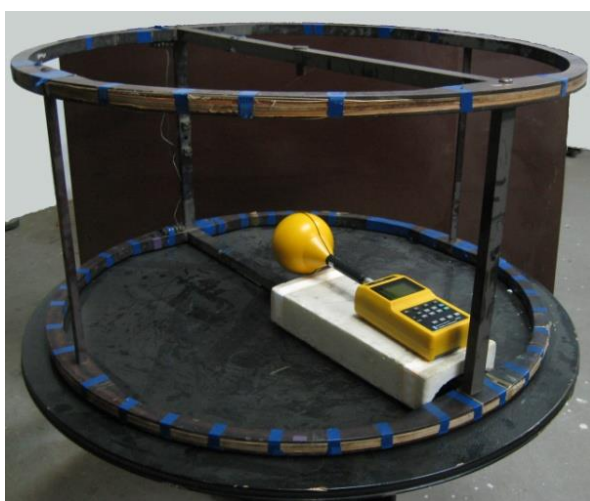
Вредност мерне несигурности коју гарантује произвођач важи под условом да је мерени сигнал синусног облика и да има вредност која је за 10% већа од доње границе изабраног мерног опсега. Такође важе услови да релативна влажност ваздуха треба да буде мања од 95%, а амбијентална температура у опсегу 0–50°C. Као што је већ речено, ови услови су били испуњени приликом свих мерења.

Укупна мерна несигурност од  $\pm 3\%$  обухвата следеће изворе мерне несигурности:

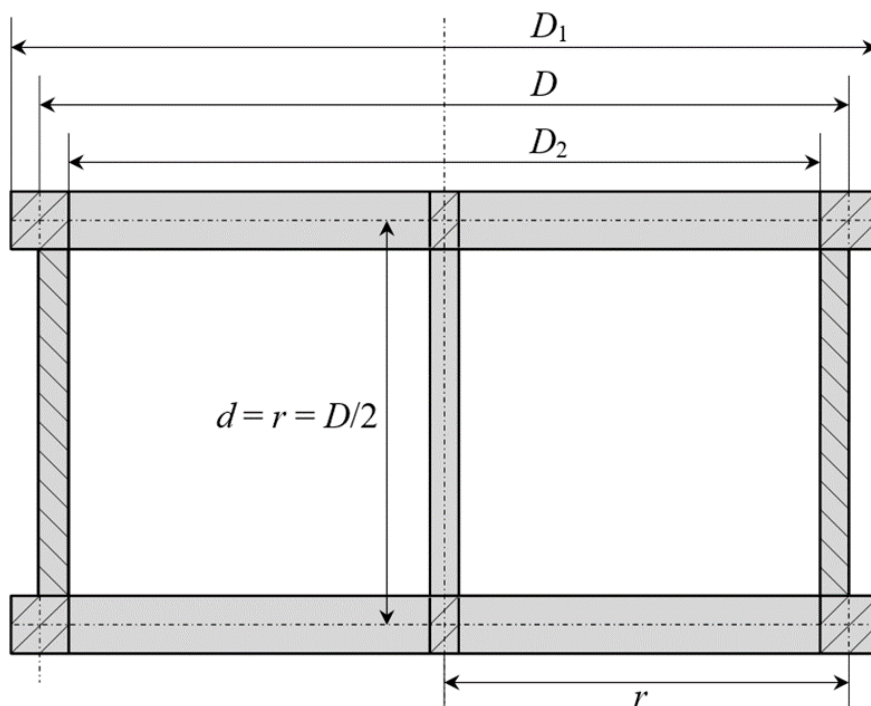
- грешку мерног инструмента;
- несигурност услед утицаја анизотропије;
- нелинеарност;
- фреквентни одзив;
- несигурност услед промене температуре и влажности ваздуха.

Грешка мерног система коју гарантује произвођач проверава се еталонирањем, које се спроводи у утврђеним временским интервалима, применом метода описаних у [10]. Овде ће бити примењена једна од ових метода, која се заснива на постављању мерне сонде у стабилно поље познате јачине, које се генерише помоћу Хелмхолцовог калема приказаног на слици 7.1. Конструкција коришћеног Хелмхолцовог калема детаљно је описана у [123]–[125]. Еталонирање применом наведене методе спроведено је у лабораторији Електротехничког института „Никола Тесла”. Попречни пресек Хелмхолцовог калема приказан је на слици 7.2. Ознаке на слици 7.2. имају следеће значење:

- $D_1$  – спољашњи пречник калемова,
- $D_2$  – унутрашњи пречник калемова,
- $D$  – средњи пречник калемова,
- $r$  – средњи полупречник калемова,
- $d$  – растојање између калемова.

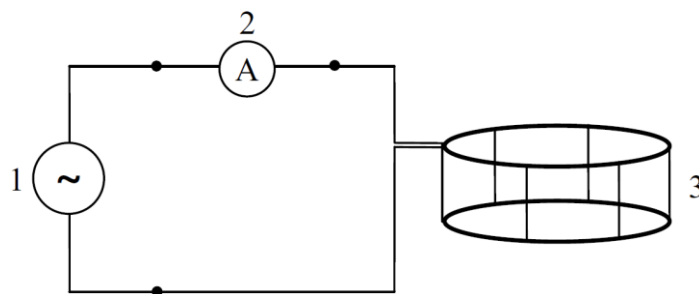


Слика 7.1. Хелмхолцов калем за генерисање стабилног магнетског поља познате јачине [121]



Слика 7.2. Попречни пресек Хелмхолцовог калема

Кроз Хелмхолцов калем протиче струја познате јачине  $I$ , што доводи до појаве магнетског поља унутар калема (слика 7.3).



Слика 7.3. Мерна шема (1 – регулисани извор наизменичне струје; 2 – амперметар; 3 – Хелмхолцов калем)

Вредност магнетске индукције у центру калема одређује се из израза:

$$B_t = k \cdot I \quad (7.1)$$

где је:

$B_t$  – магнетска индукција у центру калема (тачна вредност),

$I$  – јачина струје која протиче кроз калем,

$k$  – константа калема, која у конкретном случају износи  $2,354 \cdot 10^{-4}$  Т/А.

Поступак израчунавања константе калема дат је у [121].

Када се вредност константе калема уврсти у израз (7.1), добија се:

$$B_t [\mu\text{T}] = 0,2354 \cdot I [\text{mA}] \quad (7.2)$$

На основу израчунате тачне вредности  $B_t$  и измерене вредности магнетске индукције  $B_m$  релативна грешка  $\delta_B$  израчунава се као:

$$\delta_B = \frac{B_m - B_t}{B_t} \cdot 100\% \quad (7.3)$$

Пошто струја која протиче кроз калем није апсолутно стабилна, а самим тим ни интензитет магнетске индукције, вредност струје бележена је током целокупног периода мерења магнетске индукције.

Еталонирање система за мерење магнетске индукције неопходно је спровести за различите вредности магнетске индукције и различите вредности фреквенције поља из опсега мерног инструмента, при чему је акценат на вредностима које се јављају у пракси. У наставку је приказан део ових резултата који се односи на поље учестаности 50 Hz и вредности магнетске индукције у опсегу од 1  $\mu\text{T}$  до 300  $\mu\text{T}$ , чиме је обухваћен шири опсег вредности магнетске индукције од оних које се у пракси могу измерити у околини надземних водава.

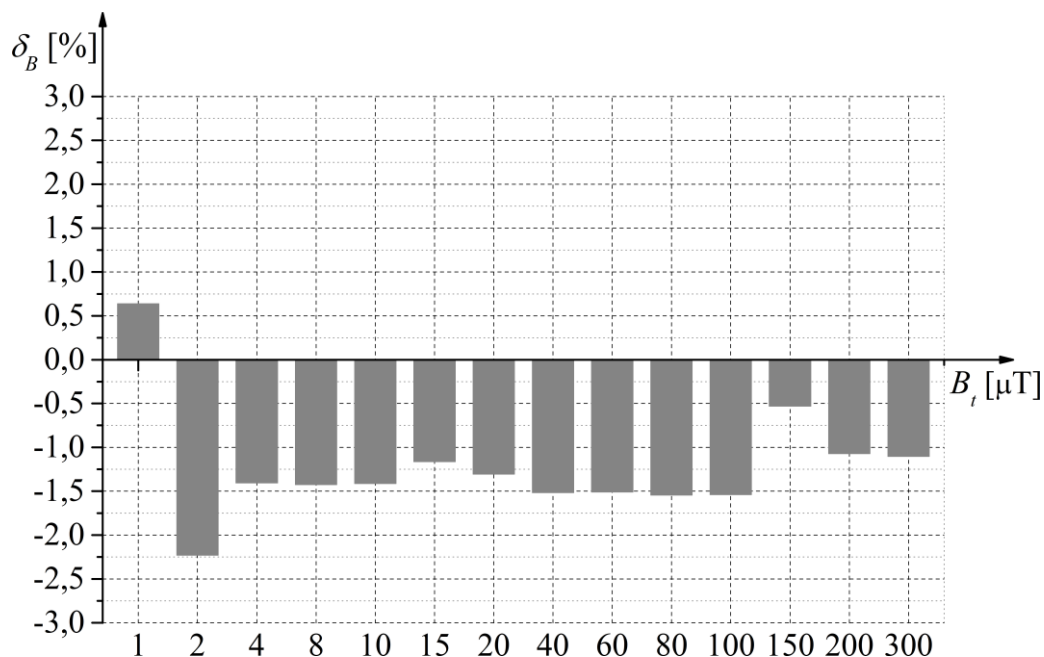
Пре почетка еталонирања, у лабораторији је извршено мерење амбијенталног поља у трајању од неколико минута. Средња вредност добијених резултата износила је 20 nT.

Ради одређивања грешке мерења  $x$  компоненте вектора магнетске индукције еталонирање је извршено тако што је мерна сонда постављена на такав начин да се њена  $x$  оса подударе с правцем вектора магнетске индукције, тј. са осом Хелмхолцовог калема која је назначена на

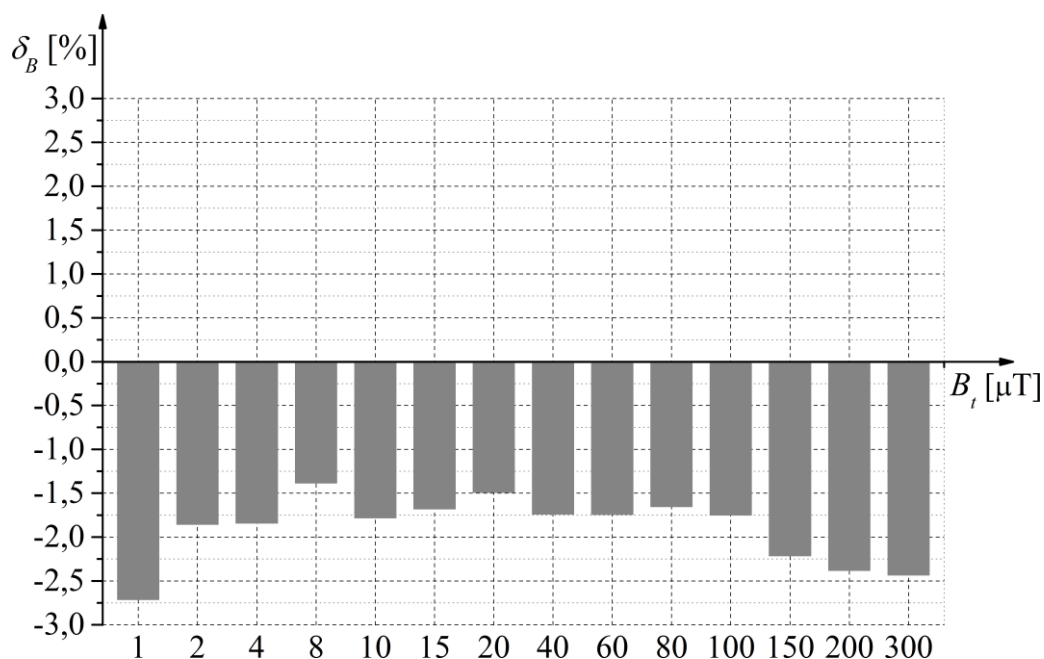
слици 7.2. Резултати добијени на овај начин за различите вредности магнетске индукције приказани су на слици 7.4.

Описани поступак је поновљен ради одређивања грешке мерења у и z компонената вектора магнетске индукције. Добијени резултати приказани су на сликама 7.5. и 7.6.

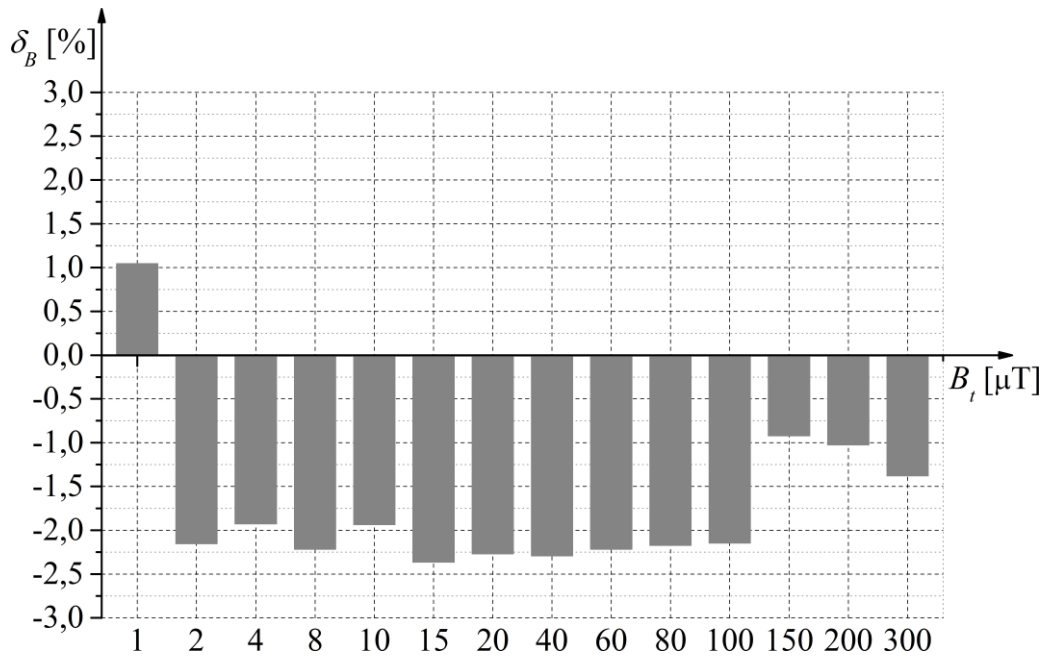
На основу приказаних резултата може се закључити да се вредности релативне грешке  $\delta_B$  у свим случајевима налазе унутар опсега  $\pm 3\%$ , који је наведен од стране произвођача, па се овој компоненти мерне несигурности може доделити вредност од  $\pm 3\%$ , која представља проширену мерну несигурност.



Слика 7.4. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  у случају када се правац вектора магнетске индукције подударара са x осом мерне сонде



Слика 7.5. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  у случају када се правац вектора магнетске индукције подударара са y осом мерне сонде



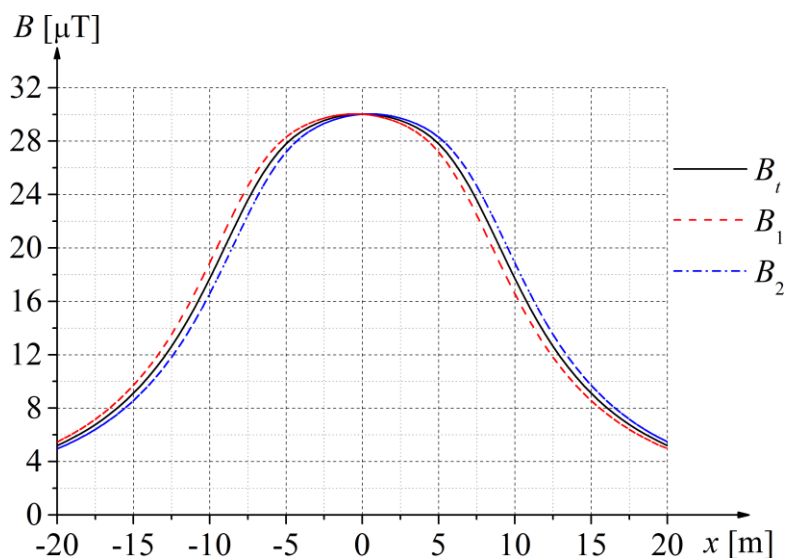
Слика 7.6. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  у случају када се правац вектора магнетске индукције подудара са  $z$  осом мерне сонде

### 7.3. Несигурност позиционирања мерне сонде дуж латералног правца

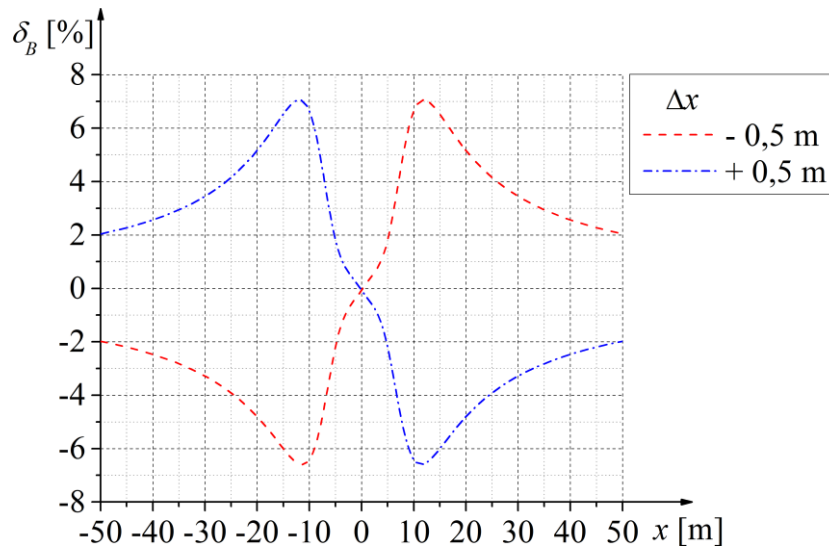
#### 7.3.1. Метода за израчунавање несигурности

Несигурност услед позиционирања мерне сонде дуж латералног правца одређена је прорачуном магнетске индукције, на исти начин као у случају електричног поља. Претпостављено је да максимална вредност грешке позиционирања мерне сонде  $\Delta x$  износи  $\pm 0,5$  m.

На слици 7.7. приказани су резултати прорачуна магнетске индукције за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”, код кога висине фазних проводника изнад тла износе 7 m. Прорачун је спроведен за случај када не постоји грешка позиционирања, чиме се добијају тачне вредности магнетске индукције  $B_t$ , као и за случајеве када ова грешка износи  $-0,5$  m (случај 1) и  $+0,5$  m (случај 2), чиме се добијају вредности  $B_1$  и  $B_2$ . Вредности релативне грешке за случајеве 1 и 2 приказане су на слици 7.8.



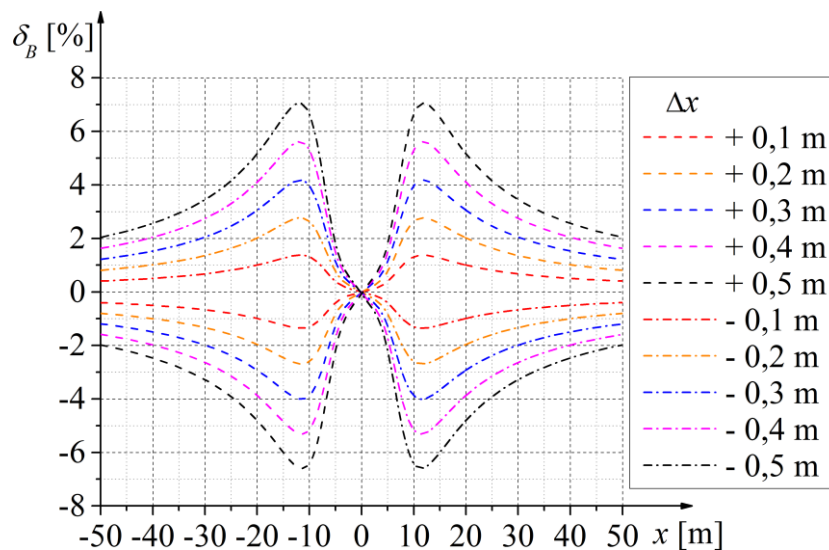
Слика 7.7. Резултати прорачуна магнетске индукције за  $\Delta x = 0$  m ( $B_t$ ),  $\Delta x = -0,5$  m ( $B_1$ ) и  $\Delta x = +0,5$  m ( $B_2$ )



Слика 7.8. Релативне грешке  $\delta_B$  за случајеве 1 ( $\Delta x = -0,5$  m) и 2 ( $\Delta x = +0,5$  m)

Вредност релативне грешке  $\delta_B$  мења се дуж латералног правца и налази се у опсегу од  $-6,59\%$  до  $7,06\%$ .

На слици 7.9. приказане су вредности релативне грешке у случајевима када  $\Delta x$  износи  $\pm 0,1$  m,  $\pm 0,2$  m,  $\pm 0,3$  m,  $\pm 0,4$  m и  $\pm 0,5$  m.

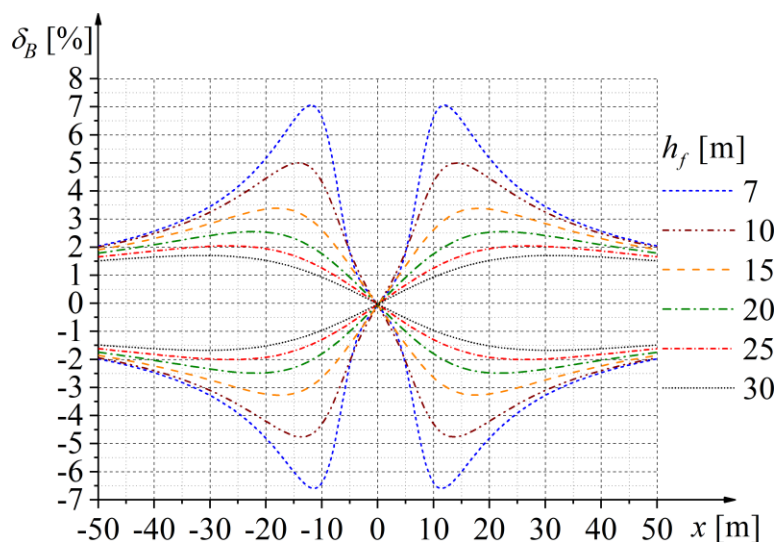


Слика 7.9. Релативне грешке  $\delta_B$  за случајеве  $-0,5$  m  $\leq \Delta x \leq +0,5$  m

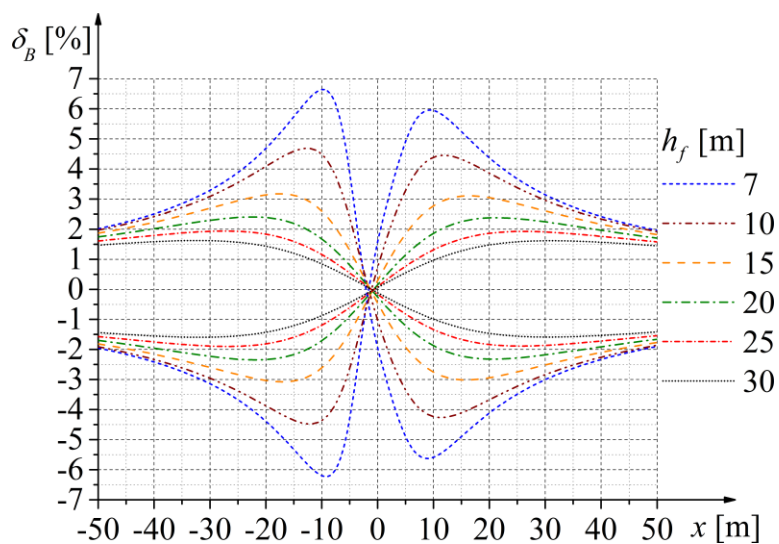
У случајевима када  $\Delta x$  износи  $\pm 0,1$  m,  $\pm 0,2$  m,  $\pm 0,3$  m и  $\pm 0,4$  m, вредности релативне грешке  $\delta_B$  од  $x = -50$  m до  $x = +50$  m налазе се у опсезима  $-1,36$ – $-1,37\%$ ,  $-2,69$ – $-2,77\%$ ,  $-4,01$ – $-4,18\%$  и  $-5,31$ – $-5,61\%$ .

### 7.3.2. Резултати прорачуна

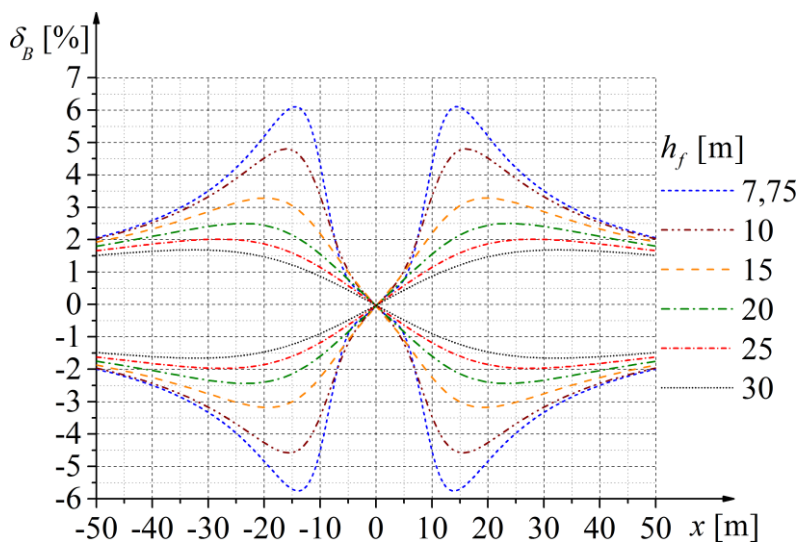
Израчунавање утицаја грешке позиционирања мерне сонде дуж латералног правца спроведено је за надземне водове чије су геометрије дате на сликама 4.3–4.5, за податке о водовима из табеле 4.1. и висине фазних и заштитних проводника из табела 4.2. и 4.3. Резултати прорачуна, који су спроведени под претпоставком да  $\Delta x$  износи  $\pm 0,5$  m, приказани су на сликама 7.10–7.15.



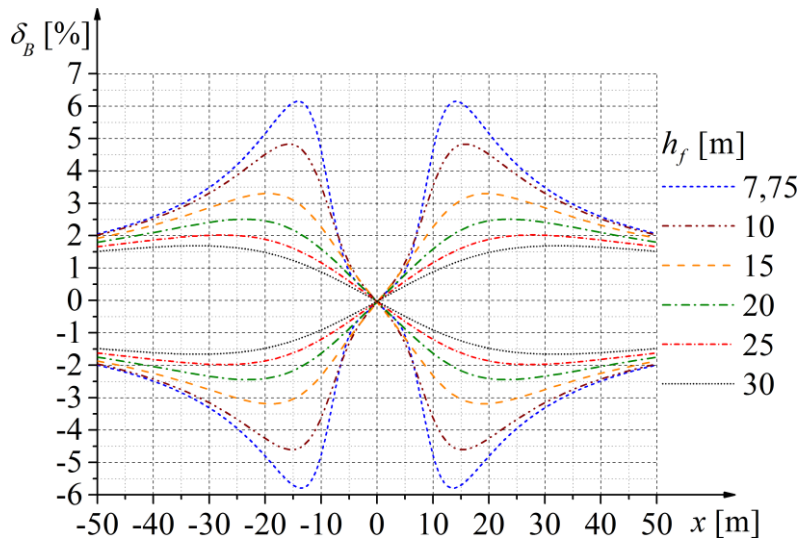
Слика 7.10. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”



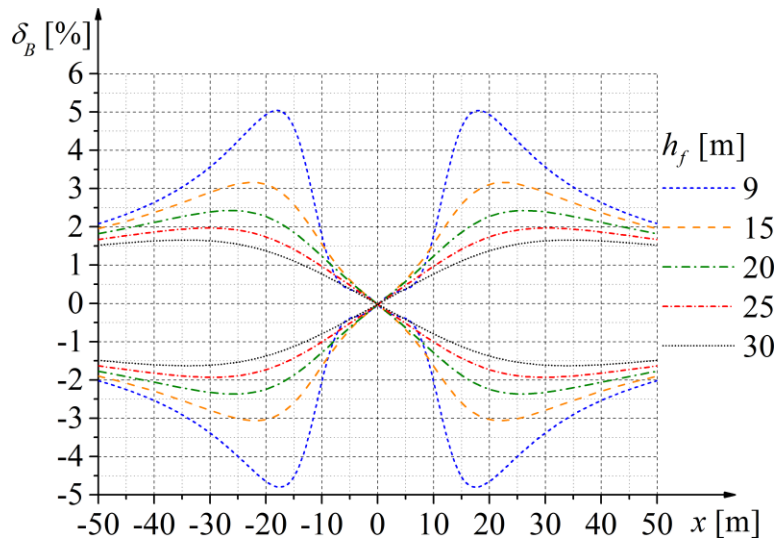
Слика 7.11. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „јела”



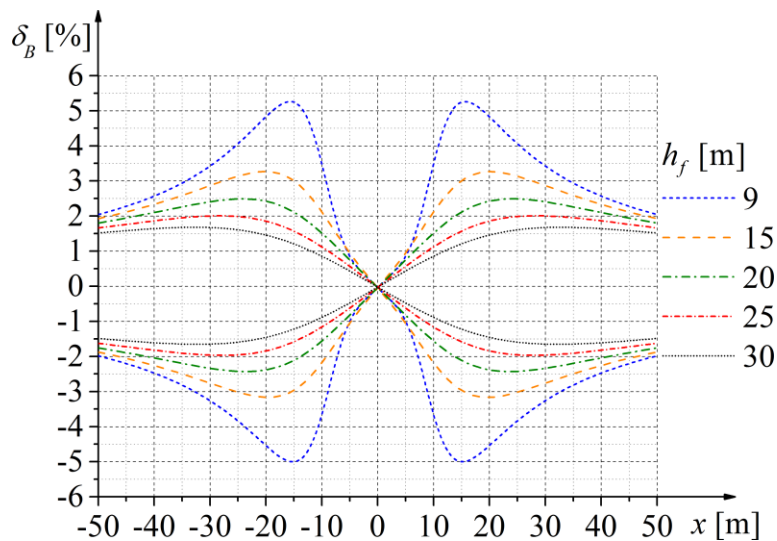
Слика 7.12. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „портал”



Слика 7.13. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „Y”



Слика 7.14. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „портал”



Слика 7.15. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „Y”



Опсези у којима се налазе вредности релативне грешке  $\delta_B$  од  $x = -50$  m до  $x = +50$  m код разматраних надземних водова дати су у табели 7.1.

На основу приказаних резултата може се закључити да се код свих разматраних водова грешка  $\delta_B$  смањује с повећањем висине фазних проводника. Уколико се вредности релативне грешке  $\delta_B$  дате у табели 7.1. за конкретан надземни вод с одређеном висином фазних проводника упореде с вредностима релативне грешке  $\delta_E$  из табеле 6.2, може се закључити да су вредности грешке  $\delta_E$  веће од  $\delta_B$ . Наведени закључак важи за све разматране надземне водове и висине проводника. Иако су добијене вредности релативне грешке мање него у случају електричног поља, грешка позиционирања мерне сонде дуж латералног правца може имати значајан утицај на одступања између резултата мерења и резултата прорачуна магнетске индукције, што је нарочито изражено код надземних водова с мањим висинама фазних проводника. Из тог разлога би одређивање позиције мерног места на латералном правцу требало спровести тако да се ова грешка сведе на најмању могућу меру.

**Табела 7.1.** Максимални опсези грешке  $\delta_B$  добијени за  $\Delta x = \pm 0,5$  m

$h_f$ [m]	110 kV		220 kV		400 kV	
	Портал	Јела	Портал	У	Портал	У
7	-6,59–7,06	-6,23–6,64	/	/	/	/
7,75	/	/	-5,76–6,11	-5,79–6,15	/	/
9	/	/	/	/	-4,80–5,04	-5,00–5,27
10	-4,76–5,00	-4,48–4,69	-4,58–4,80	-4,61–4,83	/	/
15	-3,27–3,38	-3,08–3,18	-3,18–3,28	-3,19–3,30	-3,06–3,16	-3,17–3,27
20	-2,49–2,55	-2,35–2,41	-2,44–2,50	-2,45–2,51	-2,37–2,42	-2,43–2,49
25	-2,00–2,04	-1,90–1,94	-1,97–2,01	-1,98–2,02	-1,93–1,97	-1,97–2,01
30	-1,67–1,70	-1,60–1,62	-1,66–1,68	-1,66–1,69	-1,63–1,65	-1,65–1,68

## 7.4. Несигурност позиционирања мерне сонде по висини

### 7.4.1. Метода за израчунавање несигурности

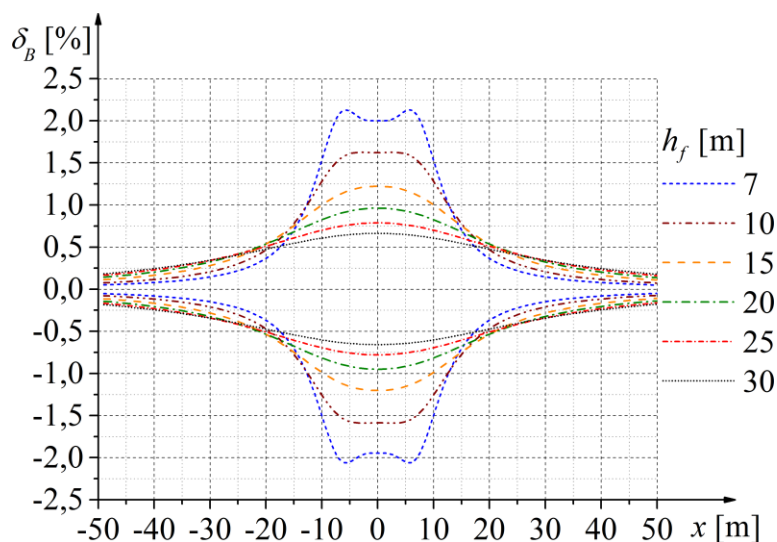
У зависности од типа мерног система, сонда за мерење магнетске индукције током мерења може бити постављена на сталак, као у случају мерења јачине електричног поља, или се уређај на који је прикључена мерна сонда може држати у руци, пошто у овом случају присуство испитивача не утиче на резултате мерења. Приликом позиционирања сонде могућа су одступања од њеног планираног положаја, о чему је потребно водити рачуна нарочито уколико је мерни систем такав да није предвиђена могућност за постављање сонде на сталак, већ се уређај током мерења држи у руци. До одступања између стварне и планиране висине мерне сонде може доћи и у случају када се сонда налази на сталку, услед мањих неравнина које постоје на локацији на којој се врше мерења.

Као и у случају електричног поља, претпостављено је да постоји грешка позиционирања сонде по висини  $\Delta u$ , која износи  $\pm 0,1$  m, док планирана висина на којој се врши мерење износи 1 m. Прорачун је спроведен за висине од 0,9 m и 1,1 m изнад тла и израчунате су одговарајуће релативне грешке у односу на случај када се прорачун спроведе за висину од 1 m изнад тла.

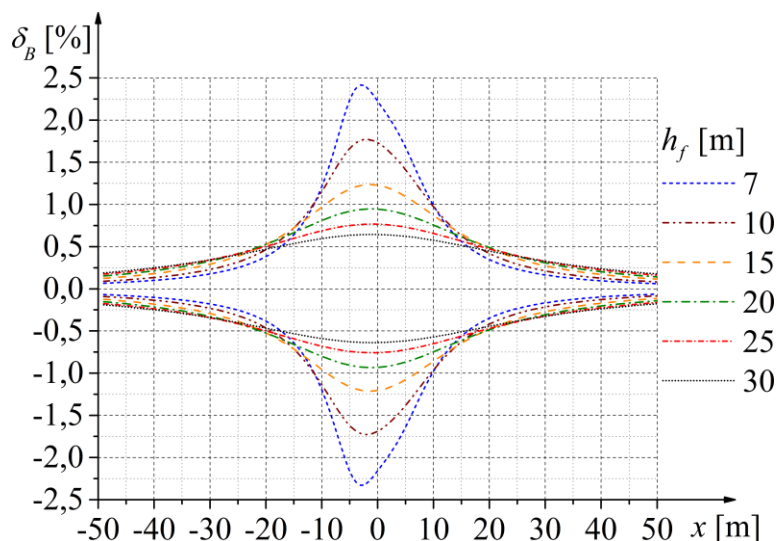
#### 7.4.2. Резултати прорачуна

Прорачун је спроведен за надземне водове чије су геометрије дате на сликама 4.3–4.5, за улазне податке дате у табели 4.1. и висине фазних и заштитних проводника дате у табелама 4.2. и 4.3. Резултати прорачуна приказани су на сликама 7.16–7.21.

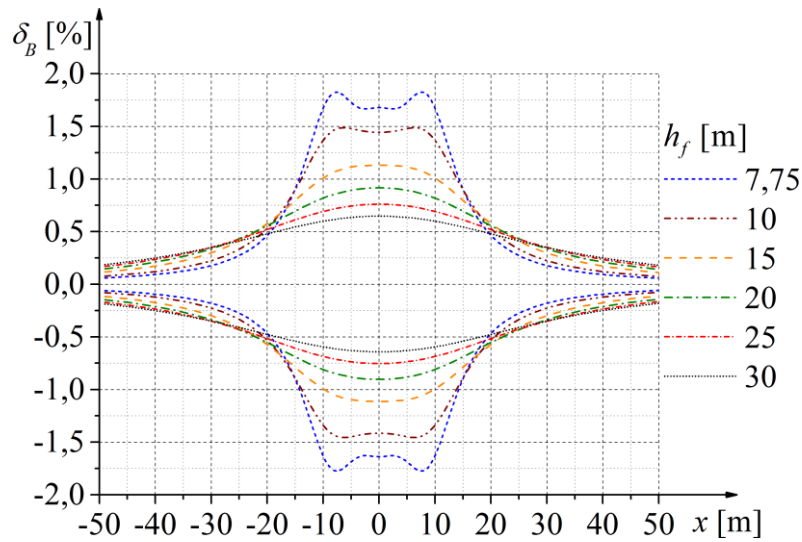
На основу резултата приказаних на сликама 7.16–7.21. може се закључити да се код свих анализираних водова највеће вредности грешке јављају у зони испод надземног вода, тј. у зони од -20 m до +20 m. На растојањима од осе вода која су већа од 20 m грешка опада испод 0,6% код свих анализираних водова. У зони испод водова вредности грешке се смањују с повећањем висине фазних проводника.



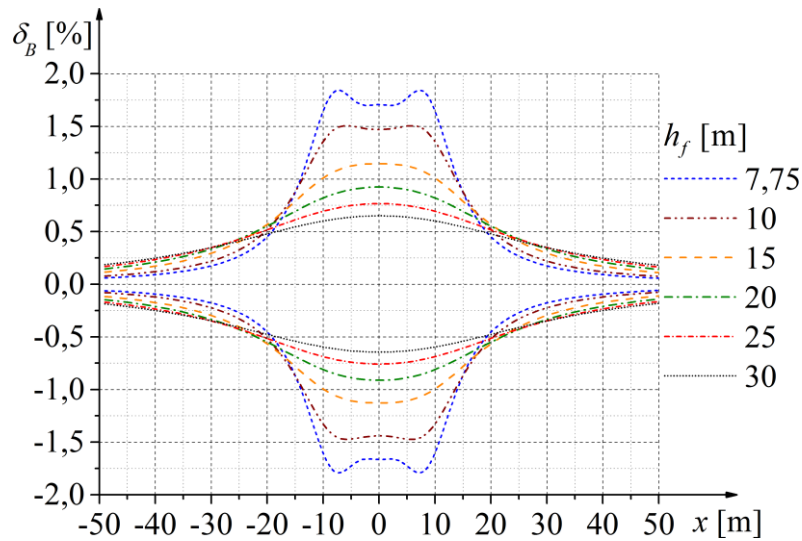
Слика 7.16. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал“



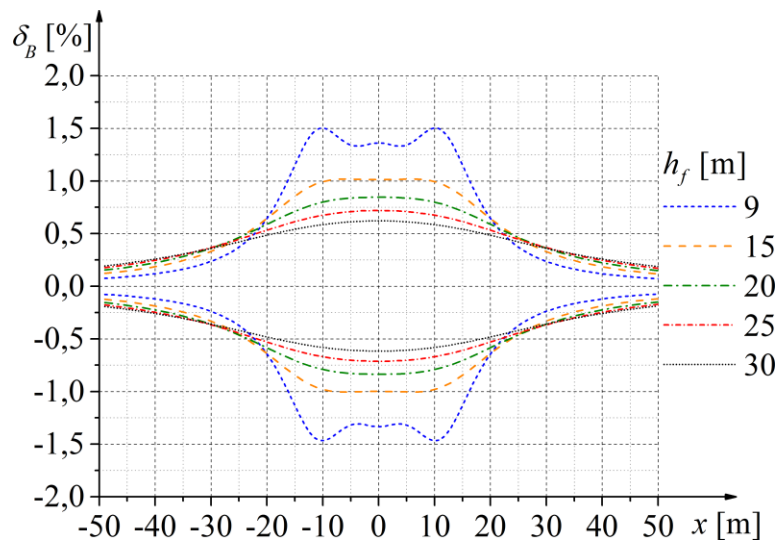
Слика 7.17. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „јела“



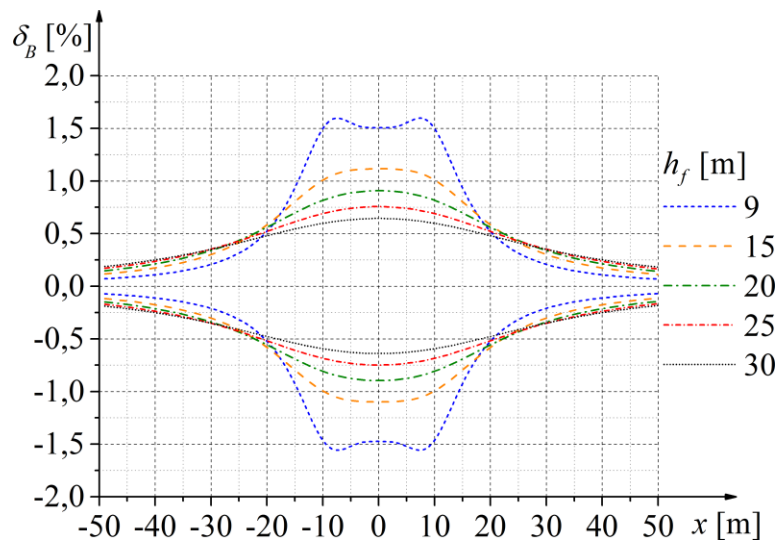
Слика 7.18. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „портал”



Слика 7.19. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „Y”



Слика 7.20. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „портал”



Слика 7.21. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „Y”

Опсежи у којима се налазе вредности релативне грешке  $\delta_B$  код разматраних надземних водова дати су у табели 7.2.

Табела 7.2. Максимални опсежи грешке  $\delta_B$  добијени за  $\Delta y = \pm 0,1$  m

$h_f$ [m]	110 kV		220 kV		400 kV	
	Портал	Јела	Портал	Y	Портал	Y
7	-2,06–2,13	-2,33–2,42	/	/	/	/
7,75	/	/	-1,77–1,82	-1,79–1,84	/	/
9	/	/	/	/	-1,47–1,50	-1,56–1,60
10	-1,59–1,63	-1,73–1,77	-1,46–1,49	-1,47–1,51	/	/
15	-1,20–1,22	-1,21–1,24	-1,11–1,13	-1,13–1,15	-1,00–1,02	-1,10–1,12
20	-0,95–0,96	-0,93–0,95	-0,90–0,92	-0,91–0,92	-0,84–0,85	-0,90–0,91
25	-0,78–0,79	-0,76–0,77	-0,75–0,76	-0,76–0,77	-0,71–0,72	-0,75–0,76
30	-0,66–0,66	-0,64–0,64	-0,64–0,65	-0,64–0,65	-0,62–0,62	-0,64–0,64

На основу резултата датих у табели 7.2. може се закључити да релативна грешка зависи од висине фазних проводника и да се мање вредности максималне грешке добијају код водова с већим висинама проводника. Највећи опсег грешке, од -2,33% до +2,42%, добијен је код надземног вода напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „јела”, код којег висина најнижег фазног проводника износи 7 m.

## 7.5. Несигурност позиционирања мерне сонде дуж лонгитудиналног правца

### 7.5.1. Метода за израчунавање несигурности

Несигурност услед позиционирања мерне сонде дуж лонгитудиналног правца одређена је прорачуном магнетске индукције, на исти начин као у случају електричног поља. Претпостављено је да грешка позиционирања мерне сонде  $\Delta z$  доводи до разлике у висини фазних проводника  $\Delta h_f$ , која је последица разлике у висинама фазних проводника на месту латералног правца на којем је планирано спровођење мерења и на месту латералног правца на којем се врши мерење.

На основу анализе дате у поглављу 6.6.1, за максималну вредност  $\Delta h_f$  која ће бити коришћена у даљим прорачунима усвојена је вредност  $\pm 0,2$  m.

Ради израчунавања грешке  $\delta_B$  прво се израчунава магнетска индукција за тачне вредности висине фазних проводника  $h_f$ , чиме се добија тачна вредност магнетске индукције  $B_i$ , а затим се прорачун понавља за висине  $h_f \pm \Delta h_f$ , чиме се добијају вредности магнетске индукције  $B$  када постоји грешка позиционирања дуж лонгитудиналног правца.

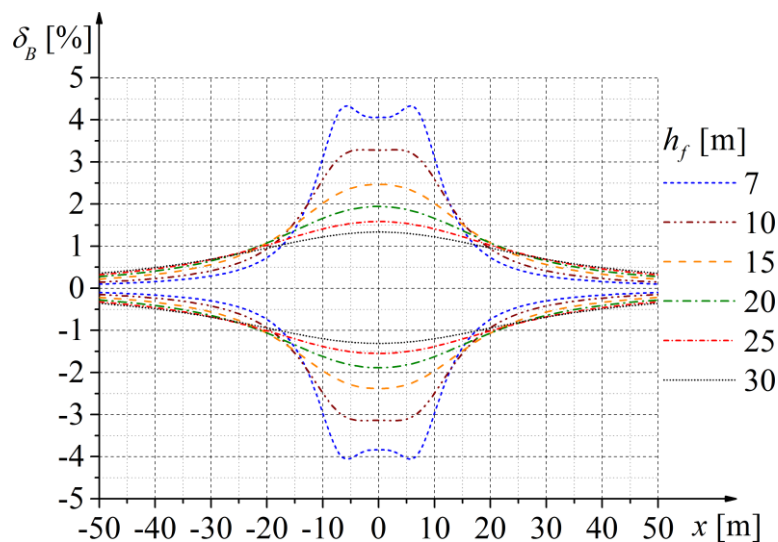
### 7.5.2. Резултати прорачуна

Резултати прорачуна, који је спроведен за надземне водове чије су геометрије дате на сликама 4.3–4.5, за улазне податке дате у табели 4.1. и висине фазних и заштитних проводника дате у табелама 4.2. и 4.3, приказани су на сликама 7.22–7.27.

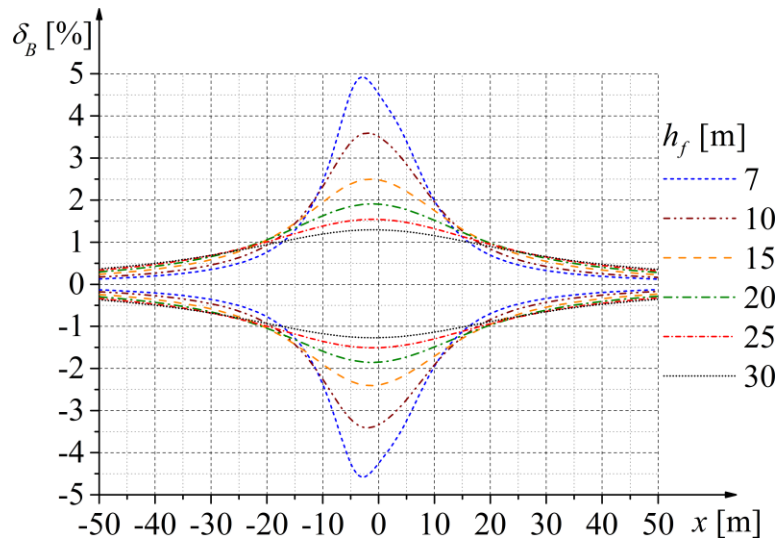
Код свих разматраних водова највеће вредности релативне грешке добијају се у зони испод надземног вода и опадају с повећањем растојања од осе вода.

Опсези у којима се налазе вредности релативне грешке  $\delta_B$  од  $x = -50$  m до  $x = +50$  m код разматраних надземних водова дати су у табели 7.3.

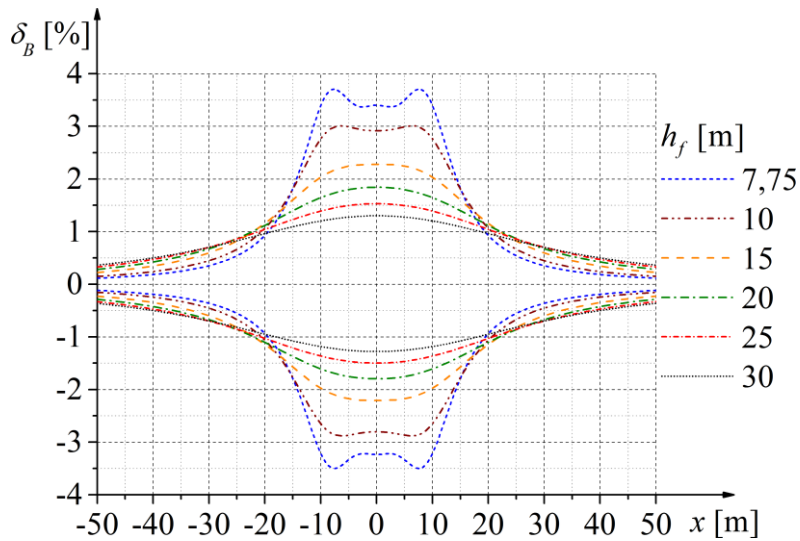
На основу приказаних резултата може се закључити да се код свих разматраних водова вредности грешке  $\delta_B$  у зони испод надземног вода смањују с повећањем висине фазних проводника. Такође се може закључити да су код свих разматраних надземних водова и висина фазних проводника вредности релативне грешке ниже од 5%. Највећа вредност релативне грешке од 4,92% добијена је код надземног вода са стубовима типа „јела” и висином фазних проводника од 7 m изнад тла.



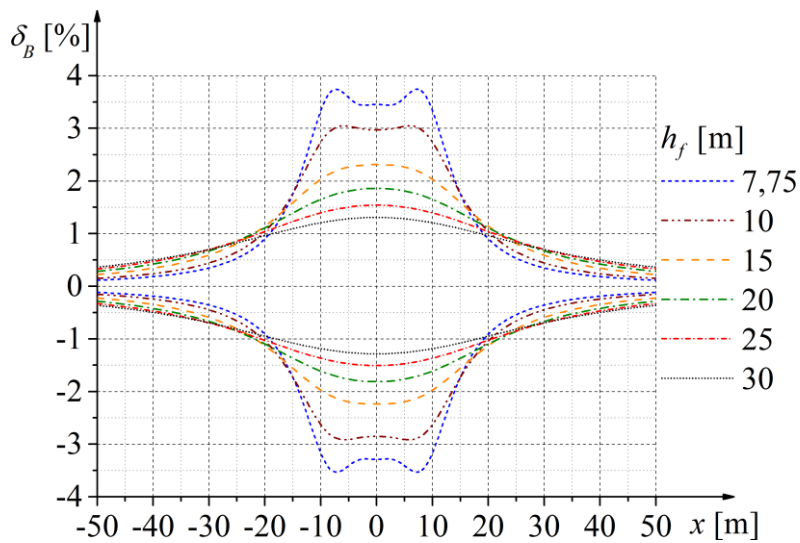
Слика 7.22. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”



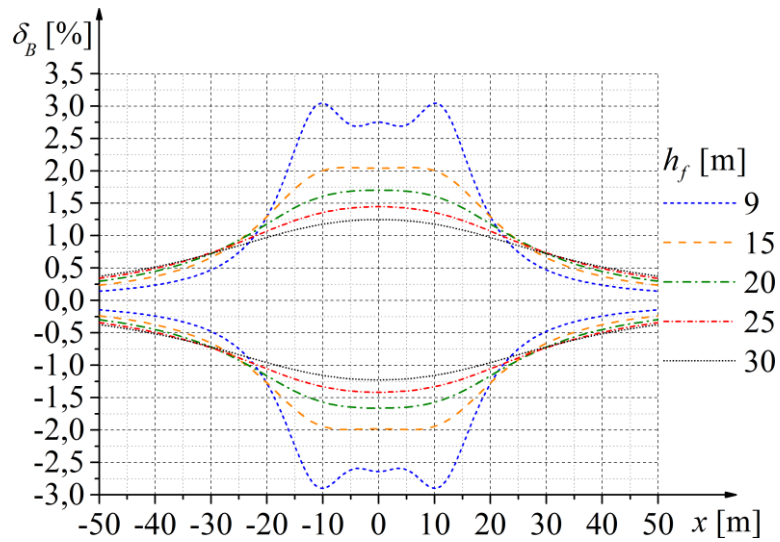
Слика 7.23. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „јела”



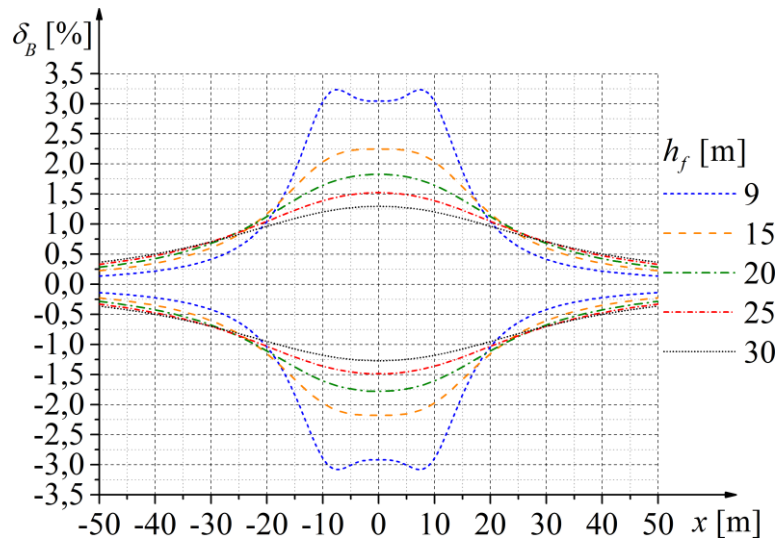
Слика 7.24. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „портал”



Слика 7.25. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „Y”



Слика 7.26. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „портал“



Слика 7.27. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „Y“

Табела 7.3. Максимални опсежи грешке  $\delta_B$  добијени за  $\Delta h_f = \pm 0,2$  m

$h_f$ [m]	110 kV		220 kV		400 kV	
	Портал	Јела	Портал	Y	Портал	Y
7	-4,06–4,33	-4,58–4,92	/	/	/	/
7,75	/	/	-3,50–3,71	-3,53–3,74	/	/
9	/	/	/	/	-2,90–3,04	-3,08–3,24
10	-3,14–3,29	-3,41–3,59	-2,88–3,01	-2,92–3,05	/	/
15	-2,38–2,47	-2,41–2,50	-2,21–2,28	-2,24–2,31	-1,99–2,05	-2,18–2,25
20	-1,89–1,94	-1,86–1,91	-1,80–1,84	-1,81–1,86	-1,66–1,70	-1,78–1,83
25	-1,55–1,59	-1,51–1,54	-1,50–1,53	-1,51–1,54	-1,42–1,45	-1,49–1,52
30	-1,31–1,33	-1,27–1,30	-1,28–1,30	-1,28–1,31	-1,23–1,25	-1,27–1,30

## **7.6. Остале компоненте мерне несигурности**

### **7.6.1. Утицај температуре и влажности ваздуха**

Произвођач мерне опреме треба да назначи у ком опсегу температуре и влажности ваздуха инструмент има наведену тачност. У конкретном случају, компонента мерне несигурности услед утицаја температуре и релативне влажности ваздуха већ је обухваћена мерном несигурношћу од  $\pm 3\%$  уколико се температура амбијента налази у опсегу  $0-50^{\circ}\text{C}$  и уколико је релативна влажност ваздуха нижа од  $95\%$ . Приликом свих мерења приказаних у дисертацији температура и релативна влажност ваздуха су се налазиле у наведеним опсезима, тако да није потребно уводити додатну компоненту мерне несигурности у вези са утицајем температуре и влажности ваздуха.

### **7.6.2. Временска константа мерног инструмента и покретање сонде**

Изненадне промене мереног поља могу да доведу до грешке приликом мерења због временске константе мерног инструмента. До погрешног читавања може доћи ако је показивање мерила прочитано одмах након постављања сонде у јако поље или ако је показивање мерила забележено одмах након померања сонде. Грешке у мерењу такође се могу јавити у случају промена поља услед брзих флукуација оптерећења у односу на брзину одзива мерила.

Сонде за мерење магнетског поља осетљиве су на брзе покрете, због чега је потребно мерни инструмент пре мерења држати у статичној позицији неколико секунди, како би се овај утицај свео на минимум [20]. Приликом мерења, вредности магнетске индукције се не снимају одмах након премештања мерног инструмента из једне мерне тачке у другу, већ након неколико секунди, чиме се овај утицај елиминише. Такође се води рачуна да се мерење не спроводи непосредно након уношења сонде у јако поље, ради елиминисања ове компоненте мерне несигурности.

### **7.6.3. Неуниформност расподеле магнетског поља**

Присуство проводних и феромагнетних објеката утиче на расподелу магнетског поља, што уноси додатну грешку у мерење. Из тог разлога ове објекте треба удаљити од мерне сонде током спровођења мерења кад год је то могуће. У супротном, овај утицај треба уважити као додатну компоненту мерне несигурности. Према [20], ако је сонда удаљена од објеката бар  $1\text{ m}$ , може се сматрати да је овај утицај занемарљив.

Приликом избора локације на којој се врши мерење увек се тежи да у близини мерног места не буде проводних ни феромагнетних објеката, тако да се овај утицај може сматрати занемарљивим.



## 8. Израчунавање компонената несигурности прорачуна јачине електричног поља

### 8.1. Увод

Када се вредности јачине електричног поља одређују прорачуном, неопходно је навести несигурност тако добијених резултата [8]. Навођење несигурности резултата прорачуна представља директан захтев стандарда [8]. Стандард [8] бави се поступцима мерења и прорачуна електричног, магнетског и електромагнетског поља у широком опсегу учестаности од 0 Hz до 300 GHz. Имајући у виду широку област примене, поменути стандард даје опште смернице за израчунавање несигурности мерења и прорачуна, које се односе на све изворе поља у наведеном опсегу учестаности. На основу ових смерница неопходно је израчунати несигурност прорачуна за конкретан извор поља и ситуацију излагања. Из наведених разлога у овом поглављу анализиране су компоненте несигурности за које је на основу искуства из праксе закључено да имају најзначајнији утицај на резултате прорачуна и развијене су методе за израчунавање ових компонената несигурности.

У случају када је извор поља надземни електроенергетски вод, први корак приликом израчунавања проширене несигурности резултата прорачуна представља одређивање и израчунавање најзначајнијих компонената несигурности, тј. компонената које имају највећи допринос проширеној несигурности. Компоненте несигурности прорачуна потичу од несигурности примењеног математичког модела, као и од несигурности мерења величина које представљају улазне податке за прорачун. Уколико се прорачун врши под претпоставком да су проводници вода прави и бесконачно дугачки, постоји компонента несигурности која потиче од чињенице да је занемарен стварни облик проводника. Међутим, несигурност са којом су познати улазни подаци врло често је већа од несигурности која потиче од изабране методе прорачуна, због чега не сме бити занемарена. Значајну компоненту несигурности представља несигурност познавања геометрије надземног вода. Под геометријом се подразумевају висина фазних и заштитних проводника и њихова међусобна растојања. При томе је најзначајнија несигурност познавања висина фазних проводника, пошто овај податак има највећи утицај на вредности јачине електричног поља у околини надземног вода [79]. Подаци о вредностима напона надземног вода у време мерења такође садрже несигурност која примарно зависи од грешке напонских мерних трансформатора [80]. Уколико се прорачун спроводи за услове који су постојали у време мерења, неопходно је уважити и несигурност мерења напона [126]–[129]. Ако се локација на којој се изводи испитивање налази на значајном растојању од трансформаторске станице или разводног постројења у којем се врши мерење напона, потребно је уважити и постојање падова напона дуж вода. Наведене компоненте несигурности су у наставку овог поглавља детаљно анализирани. Анализиран је утицај примене различитих метода прорачуна, утицај занемарења стварног облика проводника, грешке мерења висине проводника [79] и растојања између њих, као и утицај грешке мерења напона [80] и падова напона дуж вода. За све наведене компоненте несигурности развијена је и приказана методологија за њихово израчунавање. Такође је извршено израчунавање ових компонената несигурности за одабране типичне примере једносистемских преносних надземних водова напонских нивоа 110 kV, 220 kV и 400 kV. Применом приказане методологије могу се израчунати наведене компоненте несигурности за различите случајеве који се јављају у пракси, који обухватају преносне и дистрибутивне, једносистемске и вишесистемске водове различитих напонских нивоа, геометрија и других релевантних карактеристика.

Наведене компоненте несигурности одређене су прорачуном. При томе се прво израчунава тачна вредност јачине електричног поља ( $E_t$ ), а затим вредност јачине електричног поља ( $E$ ), која садржи грешку услед одређеног утицајног фактора. На основу тога се израчунава вредност релативне грешке  $\delta_E$ , применом следећег израза:

$$\delta_E = \frac{E - E_t}{E_t} \cdot 100\% \quad (8.1)$$

У овом поглављу су детаљно анализиране компоненте несигурности које су у мањој или већој мери присутне у свим ситуацијама. У случају када терен на коме се врше испитивања није раван [130]–[138], постоји додатна несигурност услед овог утицаја.

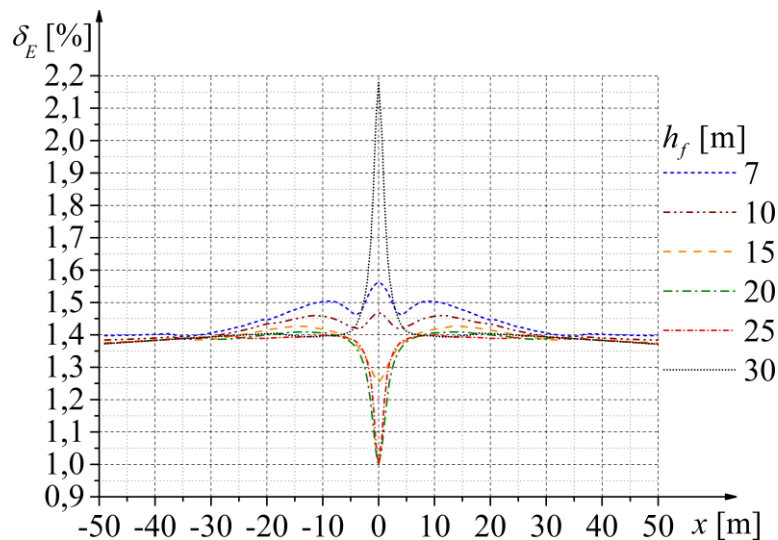
## 8.2. Несигурност услед примене различитих метода прорачуна

У овом поглављу је извршено поређење резултата прорачуна јачине електричног поља добијених применом два различита метода. Први метод је детаљно описан у поглављу 4.2. и заснива се на моделовању надземног вода бесконачно дугим праволинијским проводницима. Овако добијени резултати су упоређени с резултатима који се добијају применом софтверског пакета *XGSLab*, који је описан у поглављу 4.3.

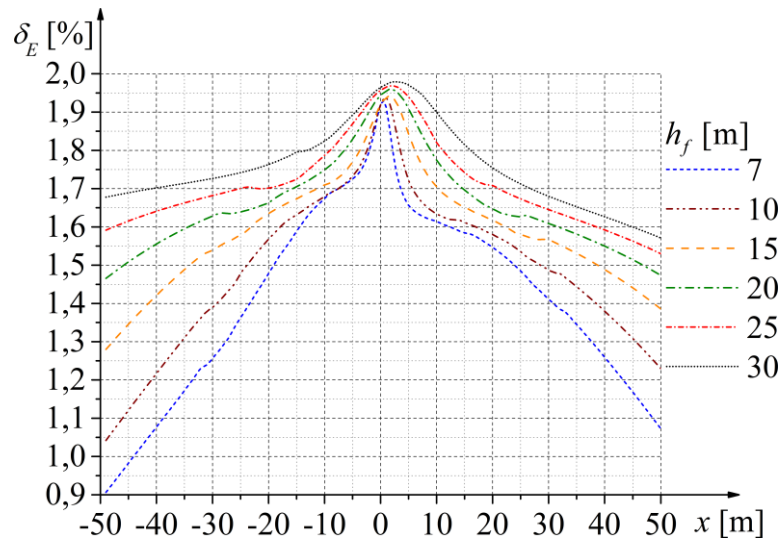
Прорачун је спроведен за надземне водове чије су геометрије дате на сликама 4.3–4.5, за улазне податке дате у табели 4.1. и висине фазних и заштитних проводника дате у табелама 4.2. и 4.3.

Прорачун је спроведен дуж латералног правца који се налази на висини од 1 m. Резултати прорачуна добијени применом првог и другог метода означени су редом са  $E_1$  и  $E_2$ . У првом случају проводници вода су прави и бесконачно дугачки. У другом случају проводници су такође прави, а њихова дужина износи 1200 m, тј. простиру се од  $z = -600$  m до  $z = +600$  m. При томе се прорачун спроводи на средини вода, тј. дуж правца који се налази на позицији  $z = 0$  m, да би се избегао ефекат крајева. У оба случаја проводници се налазе на истим висинама, које су дате у табелама 4.2. и 4.3.

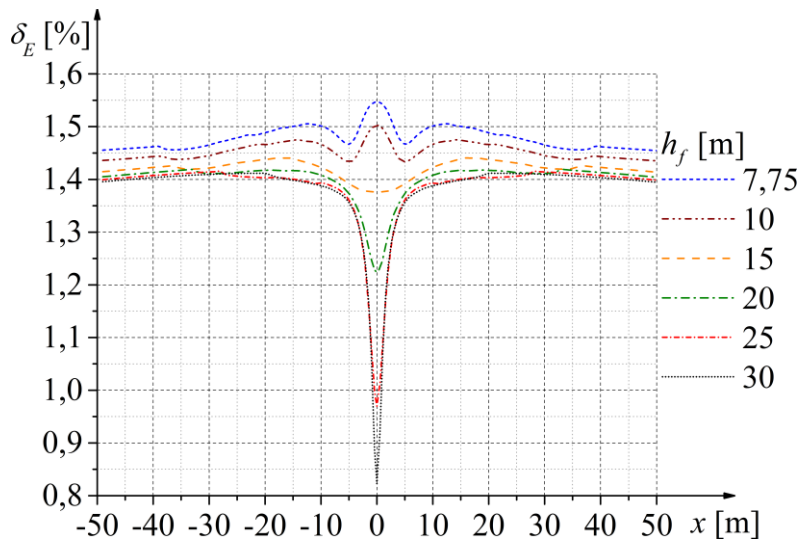
Вредности релативне грешке  $\delta_E$ , које су израчунате под претпоставком да се као тачна вредност усваја вредност добијена првим методом, приказане су на сликама 8.1–8.6.



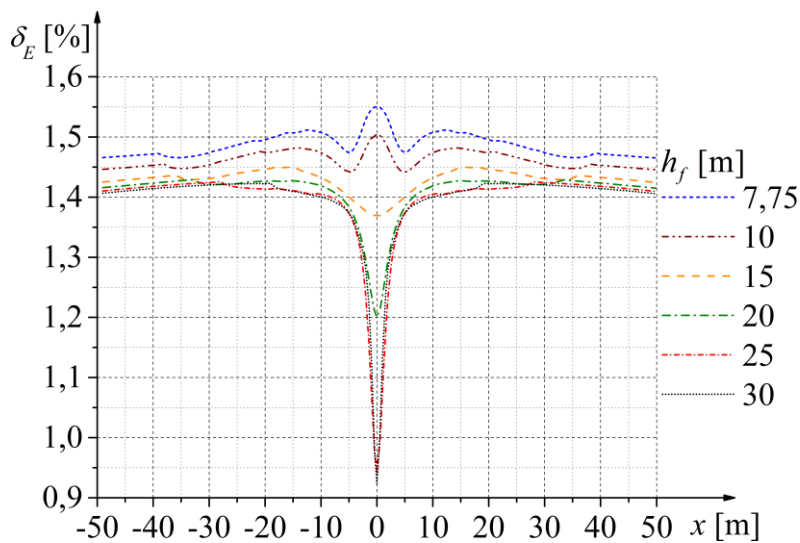
Слика 8.1. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”



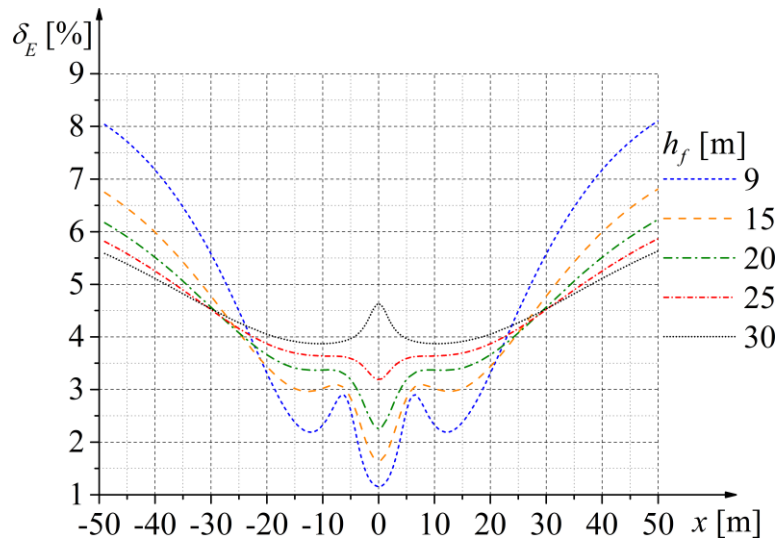
Слика 8.2. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „јела”



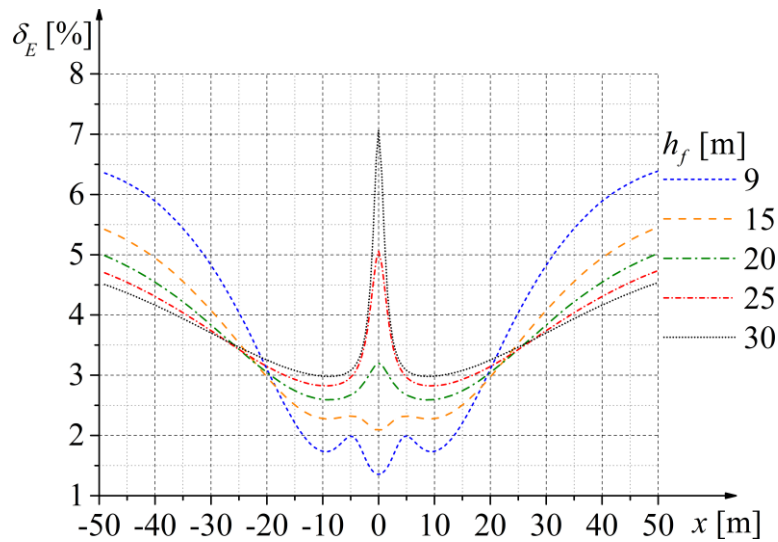
Слика 8.3. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „портал”



Слика 8.4. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „Y”



Слика 8.5. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „портал”



Слика 8.6. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „Y”

На основу приказаних резултата закључује се да су релативна одступања  $\delta_E$  код водова напонског 220 kV и код вода напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „јела” мања од 2% за све разматране висине и све тачке дуж латералног правца, док су код вода напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” мања од 2,2%.

Код водова напонског нивоа 400 kV релативна одступања су нешто већа и износе до 7,1% код вода са стубовима типа „Y”, односно до 8,1% код вода са стубовима типа „портал”. У зонама од  $x = -15$  m до  $x = -5$  m и од  $x = +5$  m до  $x = +15$  m, у којима се јављају највеће вредности јачине електричног поља дуж латералног правца, вредности релативних одступања мање су од 4% код оба вода и за све разматране висине проводника.

## 8.3. Несигурност услед занемарења стварног облика проводника

### 8.3.1. Увод

Прорачун електричног поља у околини надземних водова може се спровести са уважавањем стварног облика проводника, или без њега. Најједноставнији, а уједно и најчешће коришћен модел заснован је на претпоставци да су проводници вода бесконачно дугачки, међусобно паралелни и паралелни с равном површином земље. Овакав приступ има низ предности, међу којима су једноставност и брзина примене, као и мањи број улазних података који је неопходан за спровођење прорачуна.

У реалности проводници надземног вода нису прави, већ заузимају облик ланчанице. Из тог разлога је у овом поглављу извршено поређење резултата прорачуна јачине електричног поља који се добијају када се у прорачуну уважи стварни облик проводника и када се прорачун спроведе под претпоставком да су проводници праволинијски.

Ланчаница у сопственом координатном систему, за случај правог распона, приказана је на слици 8.7. Ознаке на слици 8.7. имају следеће значење:

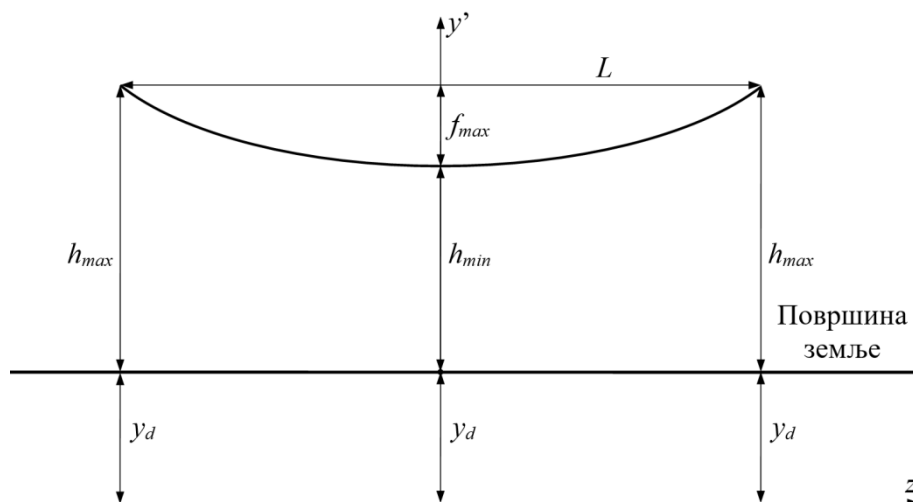
$h_{min}$  – висина најниже тачке ланчанице (висина у темену ланчанице),

$h_{max}$  – висина највише тачке ланчанице (висина у тачки вешања),

$y_d$  – растојање између сопственог координатног система ланчанице и координатног система везаног за површину земље,

$f_{max}$  – максимални угиб проводника,

$L$  – дужина распона, тј. растојање између суседних стубова.



Слика 8.7. Ланчаница у сопственом координатном систему

Једначина ланчанице у сопственом координатном систему дата је следећим изразом:

$$y' = \frac{\sigma}{\gamma} \cdot ch\left(\frac{\gamma}{\sigma} \cdot z\right) \quad (8.2)$$

који се може представити и на следећи начин:

$$y' = k \cdot ch\left(\frac{z}{k}\right) \quad (8.3)$$

при чему је:

$k = \sigma/\gamma$  – параметар ланчанице,

$\sigma$  [N/m<sup>2</sup>] – напрезање проводника,

$\gamma$  [N/m<sup>3</sup>] – специфична тежина проводника.

Да би се из сопственог координатног система прешло у координатни систем који је везан за површину земље, неопходно је одредити растојање  $y_d$  [55]. У тачки  $z = 0$  m је  $y' = h_{min} + y_d$ . Заменом у једначини ланчанице (8.3), добија се:

$$k = h_{min} + y_d \quad (8.4)$$

У тачки  $z = L/2$  је  $y' = h_{max} + y_d$ . Заменом у (8.3) добија се:

$$h_{max} + y_d = (h_{min} + y_d) \cdot ch\left(\frac{L/2}{h_{min} + y_d}\right) \quad (8.5)$$

одакле следи:

$$\frac{h_{max} + y_d}{h_{min} + y_d} = ch\left(\frac{L}{2 \cdot (h_{min} + y_d)}\right) \quad (8.6)$$

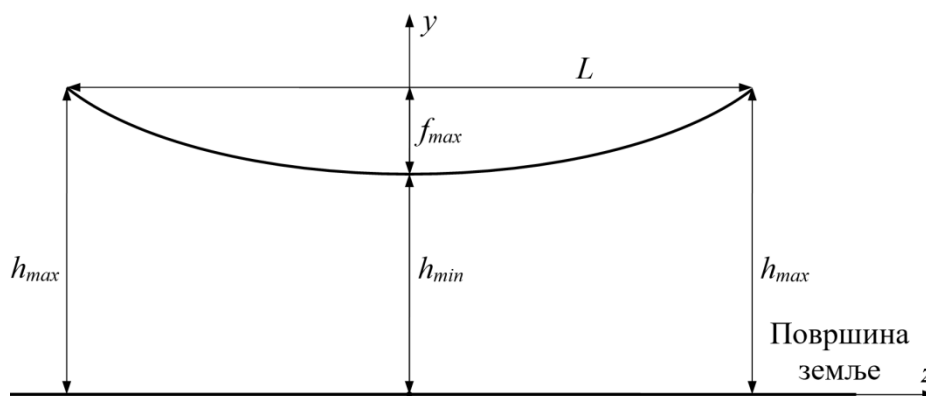
Растојање између два координатна система,  $y_d$ , одређује се из израза (8.6). Након одређивања растојања  $y_d$  може се прећи у координатни систем који је везан за површину земље. Једначина ланчанице у овом координатном систему гласи:

$$y = k \cdot ch\left(\frac{z}{k}\right) - y_d \quad (8.7)$$

то јест:

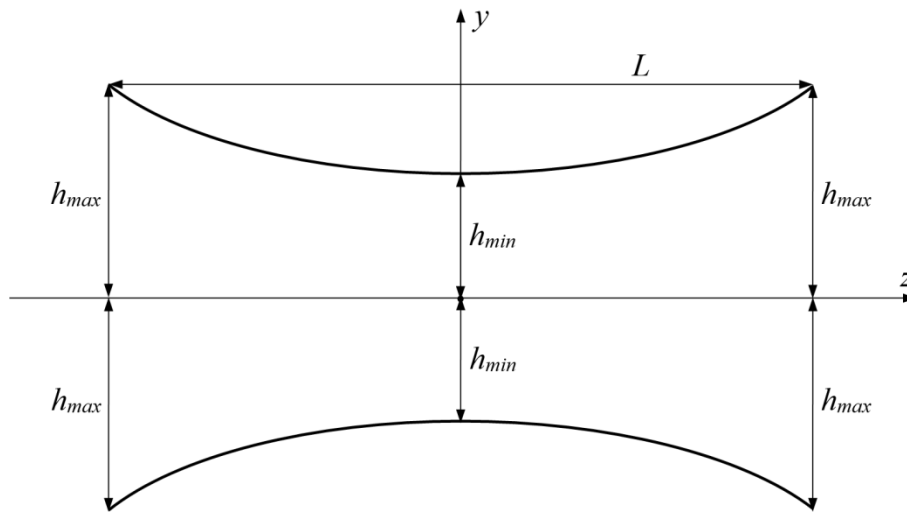
$$y = (h_{min} + y_d) \cdot ch\left(\frac{z}{h_{min} + y_d}\right) - y_d \quad (8.8)$$

Ланчаница у координатном систему везаном за површину земље приказана је на слици 8.8.



Слика 8.8. Ланчаница у координатном систему везаном за површину земље

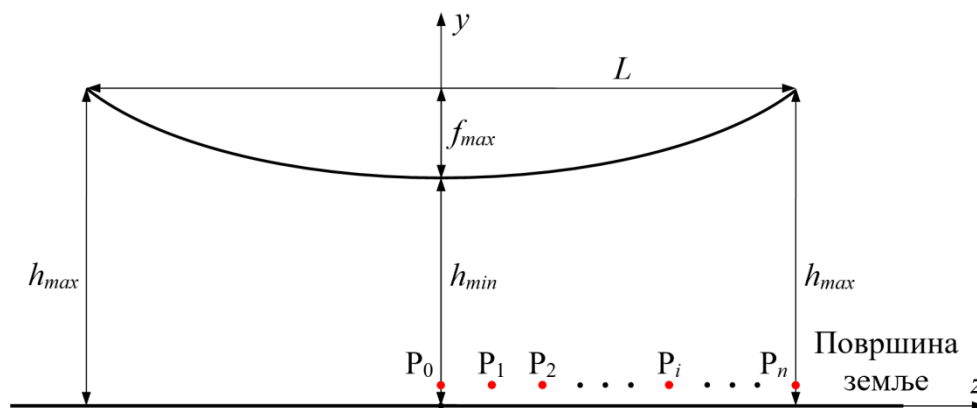
Приликом прорачуна јачине електричног поља, поред оригиналног проводника, уважава се и утицај лика, као што је приказано на слици 8.9.



Слика 8.9. Оригинални проводник и његов лик у односу на земљу као раван огледања

### 8.3.2. Метода за израчунавање утицаја занемарења стварног облика проводника

Као што је објашњено у ранијим поглављима, испитивања електричног и магнетског поља спроводе се дуж латералних праваца, тј. праваца управних на осу надземног вода. Због тога се поређење резултата прорачуна добијених применом различитих модела врши за различите латералне правце, који су на слици 8.10. означени са  $P_0, P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n$ . У случају правога распона, приказаног на слици 8.10, први латерални правац налази се на месту темена ланчанице, док се последњи налази на месту тачке вешања проводника. Сви латерални правци налазе се на висини од 1 m изнад тла.

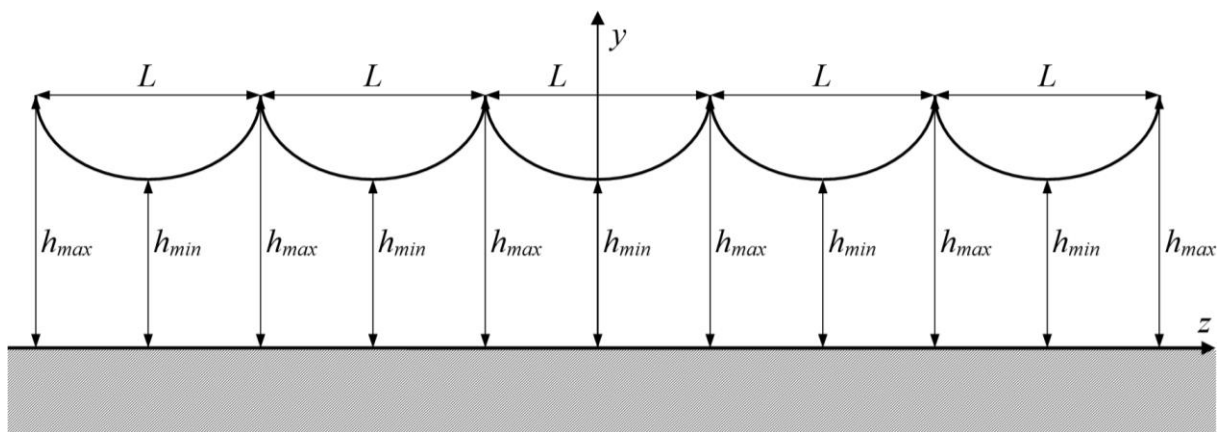


Слика 8.10. Позиције латералних праваца дуж којих се врши прорачун

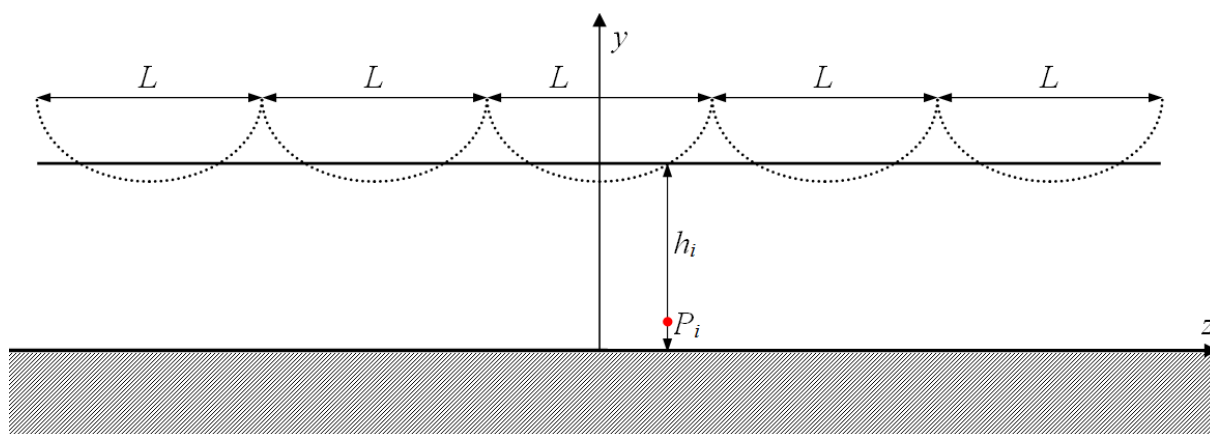
Проводници надземног вода моделовани су на следећа четири начина:

- 1) ланчаницом, при чему се осим распона за који се врши прорачун, моделују још по један или два додатна распона са сваке стране (слика 8.11);
- 2) праволинијским проводницима коначне дужине који се налазе на висини која одговара висини ланчанице на месту датог латералног правца (слика 8.12);
- 3) ланчаницом, при чему се моделује само распон за који се врши прорачун, тј. не уважава се постојање суседних распона (слика 8.13);
- 4) праволинијским проводницима коначне дужине који се налазе на висини која износи  $h = h_{max} - 2/3 \cdot f_{max}$  (слика 8.14).

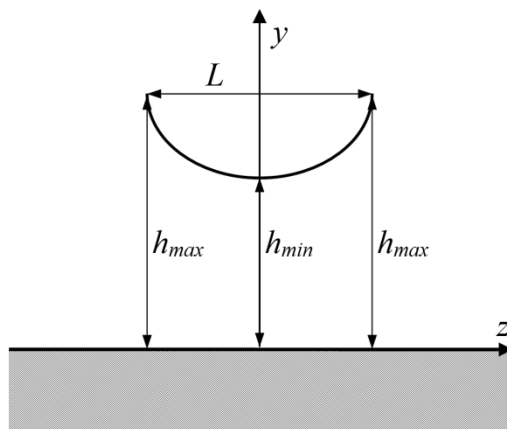
Прорачун заснован на моделима 1–4 врши се у софтверском пакету *XGSLab*.



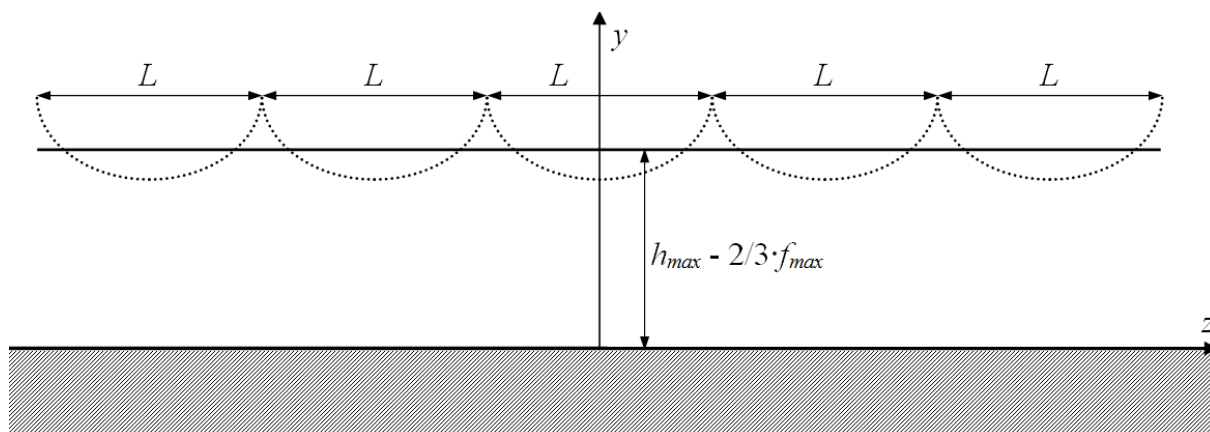
Слика 8.11. Модел 1



Слика 8.12. Модел 2



Слика 8.13. Модел 3



Слика 8.14. Модел 4



Први модел уважава стварни облик проводника, као и постојање суседних распона. У даљим анализама је усвојено да резултати добијени применом овог модела представљају тачну вредност јачине електричног поља с којом се пореде резултати добијени применом осталих модела. Међутим, значајно је напоменути да је за примену овог модела неопходно познавање података не само о распону за који се врши прорачун већ и о суседним распонима.

Други модел подразумева да се праволинијски проводници налазе на висини која одговара висини ланчанице на месту датог латералног правца. Дужина праволинијских проводника једнака је збиру дужина распона у првом моделу. Овакав начин моделовања надземног вода веома је погодан за примену у пракси, пошто је неопходно познавање висина фазних и заштитних проводника само на месту латералног правца дуж којег се врши прорачун. Ове висине се могу измерити ласерским даљиномером приликом спровођења мерења електричног и магнетског поља на датој локацији.

Трећи модел такође уважава стварни облик проводника, али за разлику од првог модела, не уважава постојање суседних распона. Пошто се у литератури [55] примењује и овакав начин моделовања вода, значајно је утврдити колика су одступања у односу на случај када је уважено и постојење суседних распона. За примену овог модела неопходно је познавање података о распону за који се врши прорачун.

Четврти модел подразумева да се праволинијски проводници налазе на висини која износи  $h = h_{max} - 2/3 \cdot f_{max}$ . Примена овог модела разматрана је у [55]. Дужина праволинијских проводника једнака је збиру дужина распона у првом моделу. За примену овог модела неопходно је познавање висине у тачкама вешања и максималног угиба проводника. Иако је унапред јасно да ће примена оваквог модела довести до значајних одступања, ради комплетности анализе извршен је прорачун и применом овог модела.

У [55] је извршено поређење резултата добијених применом модела 1, 3 и 4, али само на две локације, тј. на латералним правцима који се налазе на месту темена ланчанице и тачке вешања. Мерења и прорачуни се у пракси изузетно ретко изводе на правцу који се налази на месту вешања проводника, пошто су висине проводника на овом месту највеће, што има за последицу ниске вредности електричног и магнетског поља. Због тога поређење резултата добијених прорачуном на овом месту првенствено има теоријски значај. За примену у пракси неопходно је извршити поређење резултата на више латералних праваца који се налазе између темена ланчанице и тачке вешања, пошто се на овим локацијама спроводи највећи број испитивања електричног и магнетског поља. Прорачун применом модела 2, који има највећи значај за примену у пракси, није разматран у [55].

На сликама 8.11–8.14. приказан је један проводник, али се приликом прорачуна уважава утицај свих фазних и заштитних проводника, као и одговарајућих ликова.

### **8.3.3. Прорачун за прав распон надземног вода напонског нивоа 110 kV**

Анализира се прав распон надземног вода напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” дужине 200 m. Висина фазних проводника у темену ланчанице износи 7 m, а у тачки вешања 15 m. Прорачун се врши применом описана четири модела. У моделу 1 се, осим анализираног распона, уважава постојање још по два распона истих карактеристика са сваке стране, тако да модел садржи укупно пет распона дужине по 200 m. У моделу 3 уважава се постојање само анализираног распона, при чему се не моделују суседни распони. Модели 2 и 4 засновани су на праволинијским проводницима дужине 1000 m. Висина фазних проводника у моделу 4 износи 9,67 m, а висина заштитних проводника 13,87 m.

Прорачун се врши дуж латералних праваца  $P_0$ – $P_{10}$ , чије су позиције дате у табели 8.1. Правац  $P_0$  се налази на месту темена ланчанице, а правац  $P_{10}$  на месту вешања проводника на стуб. Растојање између суседних праваца износи 10 m. Висине фазних и заштитних проводника на местима латералних праваца  $P_0$ – $P_{10}$  дате су у табели 8.1.

Резултати прорачуна јачине електричног поља добијени применом описана четири модела приказани су у табели 8.1. Ознаке у табели 8.1. имају следеће значење:

$P_1, P_2, \dots, P_{10}$  – латерални правци дуж којих се врши прорачун;

$z$  –  $z$  координата латералног правца;

$h_f$  – висина фазних проводника на месту латералног правца;

$h_z$  – висина заштитних проводника на месту латералног правца;

$E_1, E_2, E_3, E_4$  – вредности јачине електричног поља израчунате применом модела 1–4;

$E_{max_1}, E_{max_2}, E_{max_3}, E_{max_4}$  – највеће вредности јачине електричног поља добијене прорачуном дуж одговарајућег латералног правца применом модела 1–4;

$\delta_{E_2}, \delta_{E_3}, \delta_{E_4}$  – вредности релативне грешке израчунате под претпоставком да се као тачна вредност јачине електричног поља усваја вредност  $E_1$ ;

$\delta_{E_{max_2}}, \delta_{E_{max_3}}, \delta_{E_{max_4}}$  – вредности релативне грешке израчунате под претпоставком да се као тачна вредност јачине електричног поља усваја вредност  $E_{max_1}$ .

Наведене релативне грешке  $\delta_E$  рачунају се применом следећих израза:

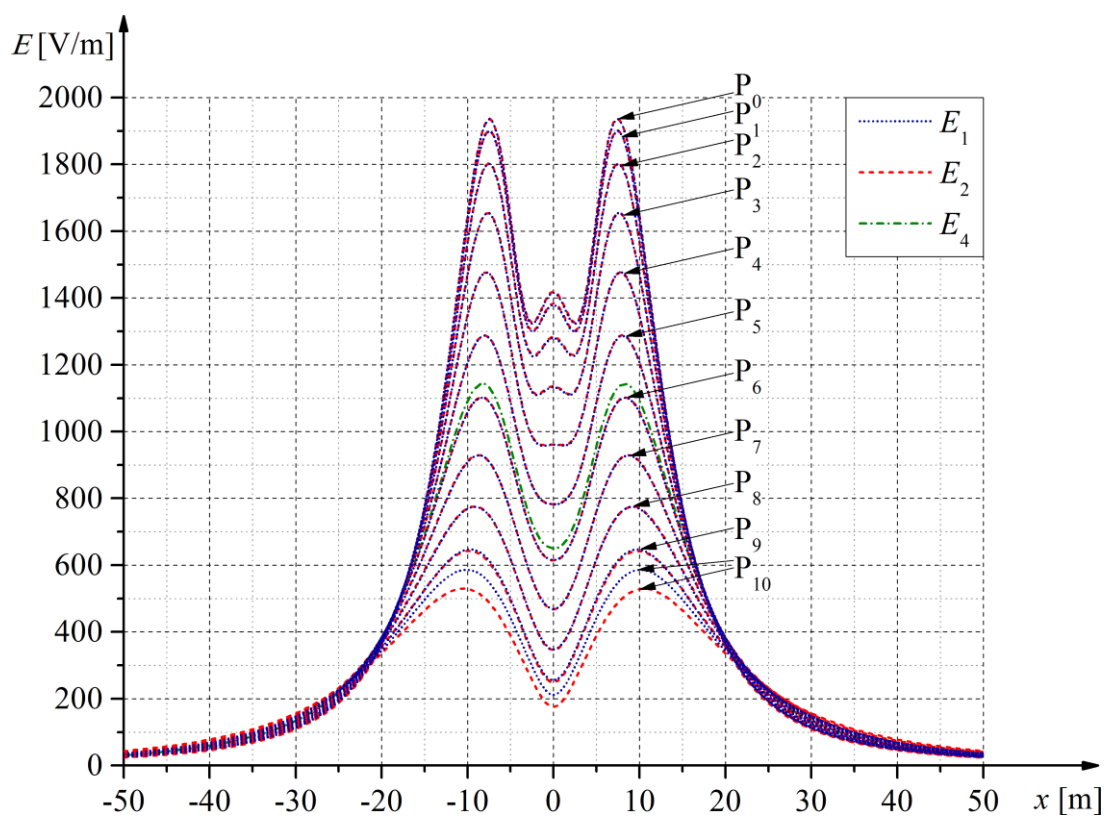
$$\delta_{E_i} = \frac{E_i - E_1}{E_1} \cdot 100\%, \quad i = 2, 3, 4 \quad (8.9)$$

$$\delta_{E_{max_i}} = \frac{E_{max_i} - E_{max_1}}{E_{max_1}} \cdot 100\%, \quad i = 2, 3, 4 \quad (8.10)$$

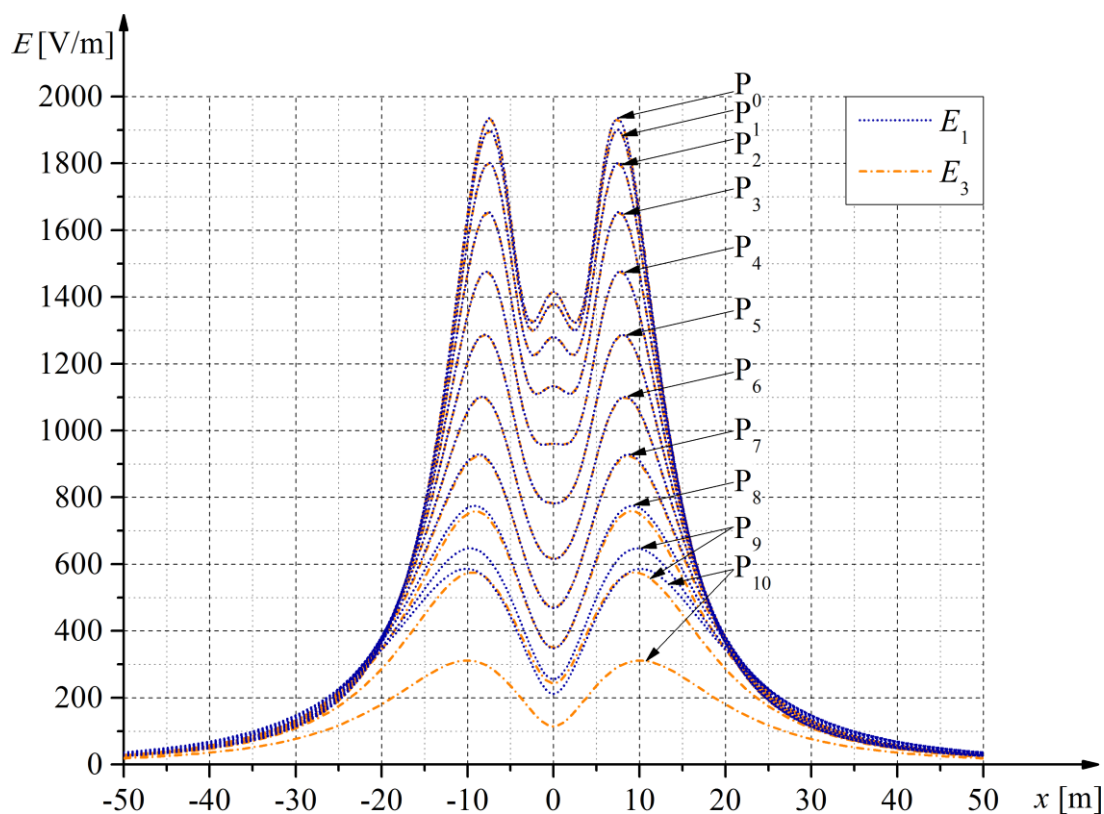
**Табела 8.1.** Резултати прорачуна јачине електричног поља применом модела 1–4

Латерални правцац	$z$ [m]	$h_f$ [m]	$h_z$ [m]	$E_{max_1}$ [V/m]	$E_{max_2}$ [V/m]	$E_{max_3}$ [V/m]	$E_{max_4}$ [V/m]	$\delta_{E_{max_2}}$ [%]	$\delta_{E_{max_3}}$ [%]	$\delta_{E_{max_4}}$ [%]
P <sub>0</sub>	0	7,000	11,200	1935,79	1937,75	1935,61	1143,42	0,10	-0,01	-40,93
P <sub>1</sub>	10	7,080	11,280	1901,22	1903,00	1901,03		0,09	-0,01	-39,86
P <sub>2</sub>	20	7,319	11,519	1802,83	1804,73	1802,61		0,11	-0,01	-36,58
P <sub>3</sub>	30	7,719	11,919	1655,23	1656,66	1654,93		0,09	-0,02	-30,92
P <sub>4</sub>	40	8,278	12,478	1477,55	1478,77	1477,09		0,08	-0,03	-22,61
P <sub>5</sub>	50	8,997	13,197	1288,23	1289,24	1287,40		0,08	-0,06	-11,24
P <sub>6</sub>	60	9,876	14,076	1102,10	1102,99	1100,34		0,08	-0,16	3,75
P <sub>7</sub>	70	10,916	15,116	929,15	929,95	924,44		0,09	-0,51	23,06
P <sub>8</sub>	80	12,116	16,316	775,06	775,83	758,73		0,10	-2,11	47,53
P <sub>9</sub>	90	13,477	17,677	647,32	642,55	575,39		-0,74	-11,11	76,64
P <sub>10</sub>	100	15,000	19,200	586,32	529,84	311,48		-9,63	-46,88	95,02

Упоредни приказ резултата прорачуна јачине електричног поља дуж латералних правцаца P<sub>0</sub>–P<sub>10</sub> добијених применом модела 1, 2 и 4 дат је на слици 8.15. Упоредни приказ резултата добијених применом модела 1 и 3 дат је на слици 8.16.

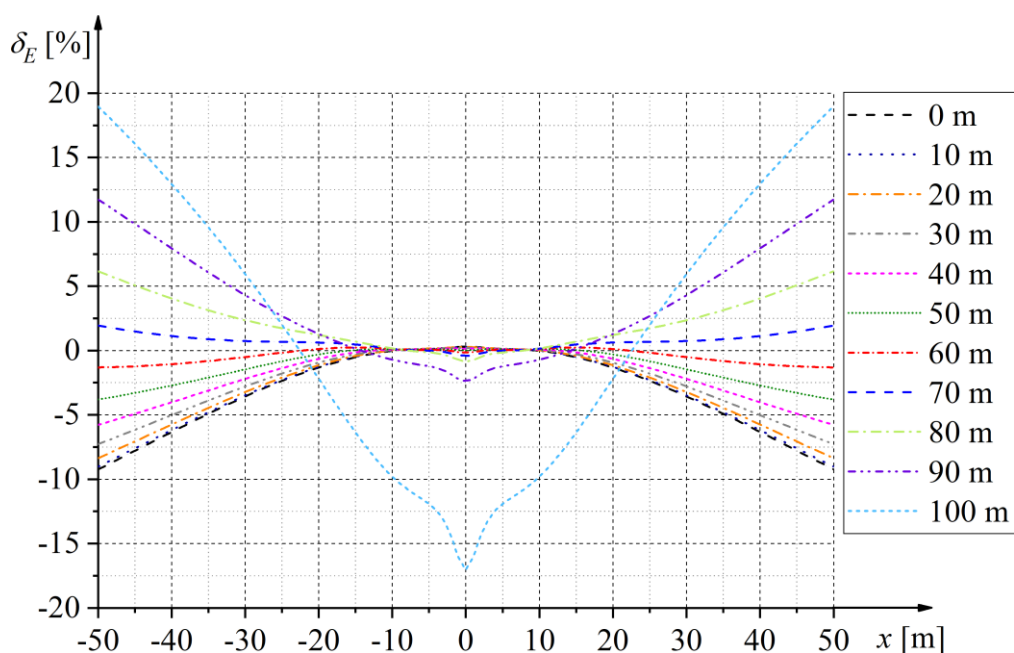


Слика 8.15. Упоредни приказ резултата прорачуна јачине електричног поља дуж латералних праваца  $P_0$ – $P_{10}$  добијених применом модела 1, 2 и 4



Слика 8.16. Упоредни приказ резултата прорачуна јачине електричног поља дуж латералних праваца  $P_0$ – $P_{10}$  добијених применом модела 1 и 3

Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_E$  дуж латералних праваца  $P_0$ – $P_{10}$  за резултате прорачуна добијене применом модела 2 дат је на слици 8.17.



**Слика 8.17.** Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_E$  дуж латералних праваца  $P_0$ – $P_{10}$  за резултате прорачуна јачине електричног поља добијене применом модела 2

Вредности релативне грешке  $\delta_E$  на различитим позицијама на латералним правцима  $P_0$ – $P_{10}$  за резултате прорачуна добијене применом модела 2 дате су у табели 8.2.

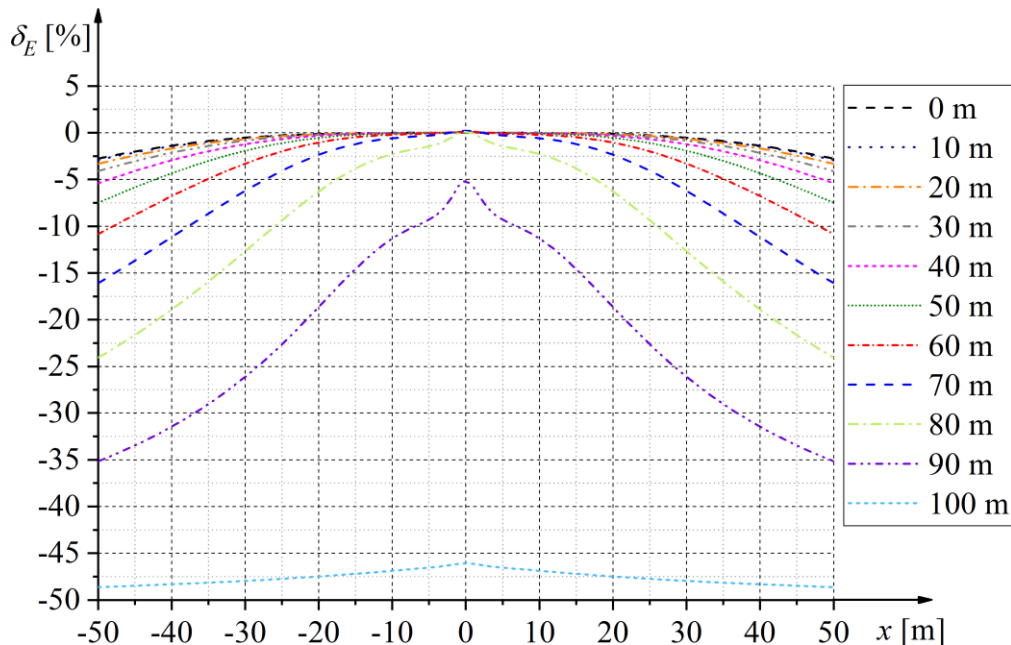
**Табела 8.2.** Вредности релативне грешке на различитим позицијама на латералним правцима

Латерални правац	z [m]	$\delta_E$ [%]											
		x [m]											
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
$P_0$	0	0,30	0,13	-0,01	-0,51	-1,32	-2,36	-3,58	-4,92	-6,33	-7,79	-9,24	
$P_1$	10	0,29	0,13	-0,01	-0,49	-1,27	-2,29	-3,49	-4,80	-6,18	-7,60	-9,02	
$P_2$	20	0,29	0,14	0,02	-0,41	-1,14	-2,11	-3,23	-4,46	-5,75	-7,07	-8,37	
$P_3$	30	0,22	0,13	0,03	-0,29	-0,93	-1,79	-2,80	-3,89	-5,02	-6,16	-7,28	
$P_4$	40	0,15	0,12	0,07	-0,13	-0,64	-1,36	-2,21	-3,11	-4,03	-4,92	-5,78	
$P_5$	50	0,03	0,10	0,10	0,04	-0,30	-0,83	-1,45	-2,10	-2,72	-3,30	-3,82	
$P_6$	60	-0,15	0,06	0,13	0,24	0,12	-0,17	-0,50	-0,81	-1,05	-1,22	-1,31	
$P_7$	70	-0,43	-0,01	0,16	0,47	0,63	0,68	0,74	0,88	1,14	1,49	1,94	
$P_8$	80	-0,84	-0,13	0,17	0,70	1,21	1,74	2,36	3,14	4,05	5,07	6,17	
$P_9$	90	-2,43	-1,21	-0,70	0,16	1,30	2,69	4,31	6,08	7,94	9,84	11,74	
$P_{10}$	100	Локација стуба			-6,36	-2,18	2,01	5,94	9,58	12,95	16,07	18,98	

На основу резултата приказаних на слици 8.17. и у табели 8.2, може се закључити да се дуж свих латералних праваца највеће вредности релативне грешке јављају на већим растојањима од осе вода. Ниже вредности релативне грешке добијају се у зони испод надземног вода, што представља повољну околност, пошто су вредности јачине електричног поља у овој зони више, због чега се испитивања најчешће врше управо у овој зони. Уколико се посматра зона од -20 m до +20 m, може се закључити да се вредности релативне грешке на правцима  $P_0$ – $P_9$  налазе у опсегу од -2,43% до 1,30%. Вредности релативне грешке на правцима  $P_0$ – $P_9$  у зони од -50 m до +50 m налазе се у опсегу од -9,24% до 11,74%. Нешто веће вредности релативне грешке јављају се на правцу  $P_{10}$ , који се налази на месту вешања

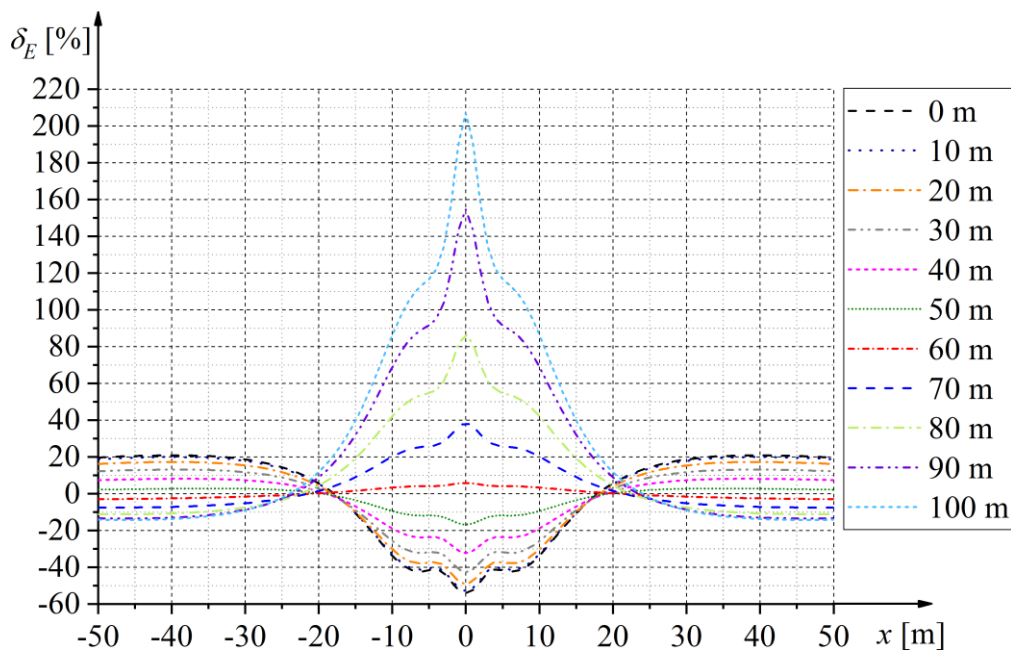
проводника на стуб. Међутим, због велике висине проводника, а самим тим и нижих вредности јачине електричног поља, испитивања на овом правцу се ретко спроводе.

Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_E$  дуж латералних праваца  $P_0-P_{10}$  за резултате прорачуна јачине електричног поља добијене применом модела 3 дат је на слици 8.18. Пошто модел 3 не уважава постојање суседних распона, вредности релативне грешке се повећавају с удаљавањем од средине распона, тј. с приближавањем крају распона.



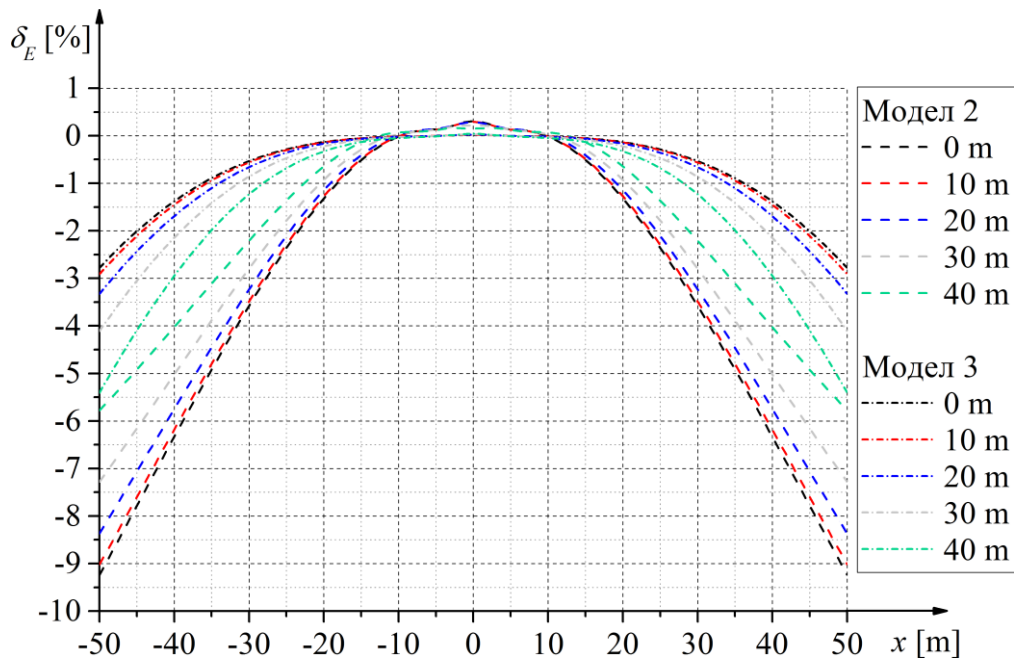
Слика 8.18. Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_E$  дуж латералних праваца  $P_0-P_{10}$  за резултате прорачуна јачине електричног поља добијене применом модела 3

Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_E$  дуж латералних праваца  $P_0-P_{10}$  за резултате прорачуна јачине електричног поља добијене применом модела 4 дат је на слици 8.19. Јасно је да овакав начин моделовања доводи до великих одступања резултата прорачуна, која су сувише висока да би модел био применљив у пракси.

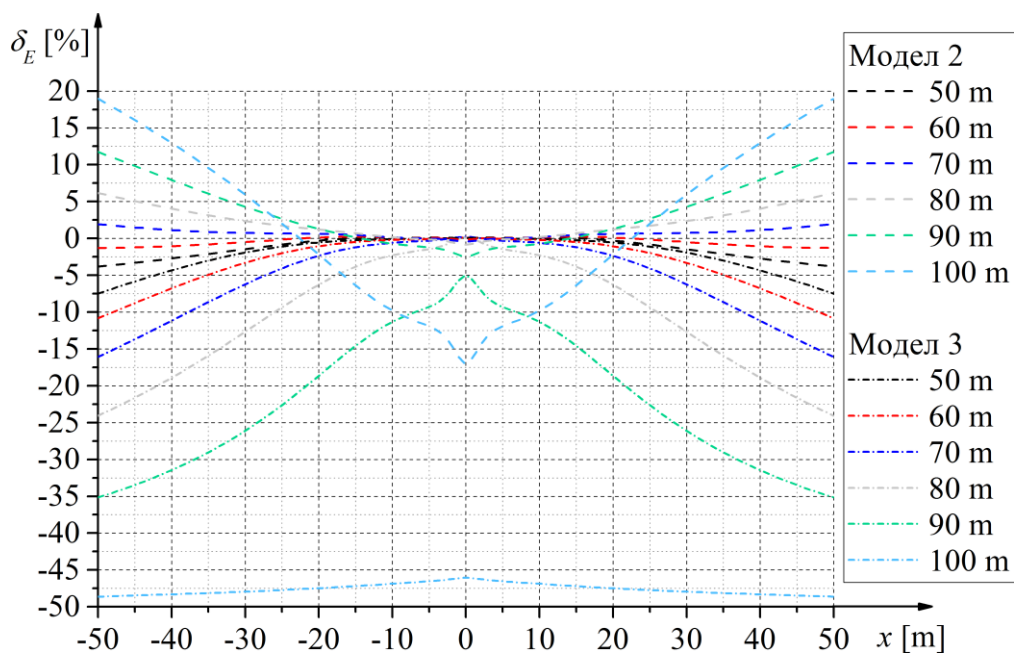


Слика 8.19. Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_E$  дуж латералних праваца  $P_0-P_{10}$  за резултате прорачуна јачине електричног поља добијене применом модела 4

На сликама 8.20. и 8.21. дат је упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_E$  за резултате прорачуна јачине електричног поља добијене применом модела 2 и 3. На слици 8.20. приказани су резултати прорачуна дуж праваца  $P_0$ – $P_4$ , док су на слици 8.21. приказани резултати прорачуна дуж праваца  $P_5$ – $P_{10}$ . На основу приказаних резултата може се закључити да се на правцима  $P_0$ – $P_4$  мање вредности релативне грешке добијају применом модела 3. На правцима  $P_5$ – $P_{10}$  мање вредности релативне грешке добијају се применом модела 2, док се веће вредности грешке добијају применом модела 3, који не уважава постојање суседних распона.



**Слика 8.20.** Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_E$  дуж латералних праваца  $P_0$ – $P_4$  за резултате прорачуна јачине електричног поља добијене применом модела 2 и 3



**Слика 8.21.** Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_E$  дуж латералних праваца  $P_5$ – $P_{10}$  за резултате прорачуна јачине електричног поља добијене применом модела 2 и 3

### 8.3.4. Прорачун за прав распон надземног вода напонског нивоа 220 kV

Анализира се прав распон надземног вода напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „портал” дужине 300 m. Висина фазних проводника у темену ланчанице износи 7,75 m, а у тачки вешања 20 m. Прорачун се врши у софтверском пакету *XGSLab*, применом модела 1 и 2. У моделу 1 се поред анализираниг распона, уважава постојање још по једног распона истих карактеристика са сваке стране, тако да модел садржи укупно три распона дужине по 300 m. Модел 2 заснован је на праволинијским проводницима дужине 900 m.

Прорачун се врши дуж латералних праваца  $P_0$ – $P_{15}$ , чије су позиције дате у табели 8.3. Правац  $P_0$  се налази на месту темена ланчанице, а правац  $P_{15}$  на месту вешања проводника на стуб. Растојање између суседних праваца износи 10 m. Висине фазних и заштитних проводника на местима латералних праваца  $P_0$ – $P_{15}$  дате су у табели 8.3.

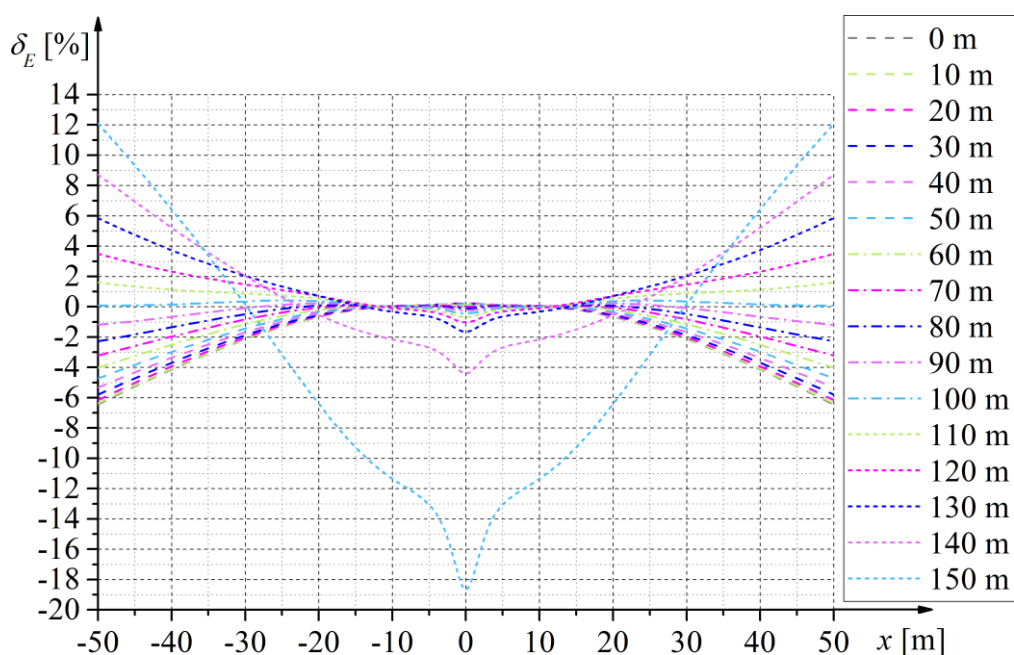
Резултати прорачуна јачине електричног поља добијени применом модела 1 и 2 дати су у табели 8.3.

**Табела 8.3.** Резултати прорачуна јачине електричног поља применом модела 1 и 2

Латерални правац	$z$ [m]	$h_f$ [m]	$h_z$ [m]	$E_{max_1}$ [V/m]	$E_{max_2}$ [V/m]	$\delta_{E_{max_2}}$ [%]
$P_0$	0	7,750	14,050	3811,62	3813,81	0,06
$P_1$	10	7,804	14,104	3770,95	3773,35	0,06
$P_2$	20	7,967	14,267	3653,09	3655,35	0,06
$P_3$	30	8,239	14,539	3468,84	3470,74	0,05
$P_4$	40	8,619	14,919	3234,14	3235,99	0,06
$P_5$	50	9,108	15,408	2966,37	2967,93	0,05
$P_6$	60	9,706	16,006	2682,62	2683,81	0,04
$P_7$	70	10,413	16,713	2397,07	2397,82	0,03
$P_8$	80	11,229	17,529	2120,90	2121,26	0,02
$P_9$	90	12,154	18,454	1861,48	1861,53	0,00
$P_{10}$	100	13,188	19,488	1623,40	1623,34	0,00
$P_{11}$	110	14,331	20,631	1408,87	1408,91	0,00
$P_{12}$	120	15,584	21,884	1218,39	1218,50	0,01
$P_{13}$	130	16,946	23,246	1053,02	1051,51	-0,14
$P_{14}$	140	18,418	24,718	922,80	906,22	-1,80
$P_{15}$	150	20,000	26,300	867,21	780,73	-9,97

Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_E$  дуж латералних праваца  $P_0$ – $P_{15}$  за резултате прорачуна јачине електричног поља добијене применом модела 2 дат је на слици 8.22. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  на различитим позицијама на латералном правцу дате су у табели 8.4.

На основу резултата приказаних на слици 8.22. и у табели 8.4, може се закључити да се дуж свих латералних праваца највеће вредности релативне грешке јављају на већим растојањима од осе вода. Вредности релативне грешке на правцима  $P_0$ – $P_{14}$  у зони од -20 m до +20 m налазе се у опсегу од -4,41% до 0,71%, док се у зони од -50 m до +50 m налазе у опсегу од -6,45% до 8,71%. Нешто веће вредности релативне грешке јављају се на правцу  $P_{15}$ , који се налази на месту вешања проводника на стуб. Највећа вредност релативне грешке на правцу  $P_{15}$  налази се на месту стуба, због чега вредности грешке у овој зони треба занемарити.



**Слика 8.22.** Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_E$  дуж латералних праваца  $P_0$ – $P_{15}$  за резултате прорачуна јачине електричног поља добијене применом модела 2

Вредности релативне грешке  $\delta_E$  на различитим позицијама на латералним правцима дате су у табели 8.4.

**Табела 8.4.** Вредности релативне грешке на различитим позицијама на латералним правцима

Латерални правац	z [m]	$\delta_E$ [%]											
		x [m]											
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
$P_0$	0	0,22	0,09	0,04	-0,20	-0,68	-1,34	-2,15	-3,09	-4,13	-5,26	-6,45	
$P_1$	10	0,23	0,09	0,05	-0,19	-0,66	-1,32	-2,12	-3,05	-4,09	-5,20	-6,38	
$P_2$	20	0,22	0,10	0,05	-0,17	-0,62	-1,25	-2,03	-2,94	-3,94	-5,02	-6,16	
$P_3$	30	0,20	0,10	0,04	-0,14	-0,54	-1,14	-1,88	-2,74	-3,70	-4,72	-5,80	
$P_4$	40	0,18	0,11	0,05	-0,09	-0,45	-0,99	-1,68	-2,49	-3,38	-4,33	-5,33	
$P_5$	50	0,15	0,11	0,05	-0,04	-0,33	-0,82	-1,44	-2,17	-2,98	-3,84	-4,73	
$P_6$	60	0,09	0,11	0,04	0,01	-0,20	-0,61	-1,16	-1,80	-2,51	-3,26	-4,03	
$P_7$	70	0,01	0,08	0,03	0,06	-0,07	-0,39	-0,84	-1,38	-1,97	-2,59	-3,21	
$P_8$	80	-0,11	0,05	0,01	0,10	0,07	-0,14	-0,49	-0,91	-1,36	-1,83	-2,28	
$P_9$	90	-0,25	-0,01	-0,01	0,14	0,22	0,12	-0,09	-0,37	-0,66	-0,95	-1,20	
$P_{10}$	100	-0,44	-0,08	-0,03	0,18	0,37	0,41	0,35	0,25	0,15	0,08	0,07	
$P_{11}$	110	-0,69	-0,18	-0,05	0,23	0,54	0,74	0,87	0,98	1,13	1,33	1,60	
$P_{12}$	120	-1,04	-0,31	-0,10	0,26	0,70	1,10	1,47	1,86	2,32	2,86	3,50	
$P_{13}$	130	-1,66	-0,64	-0,33	0,12	0,71	1,34	2,04	2,83	3,73	4,74	5,85	
$P_{14}$	140	-4,41	-2,69	-2,16	-1,50	-0,55	0,64	2,03	3,57	5,22	6,94	8,71	
$P_{15}$	150	Локација стуба			-9,28	-6,41	-3,16	0,15	3,36	6,42	9,33	12,08	



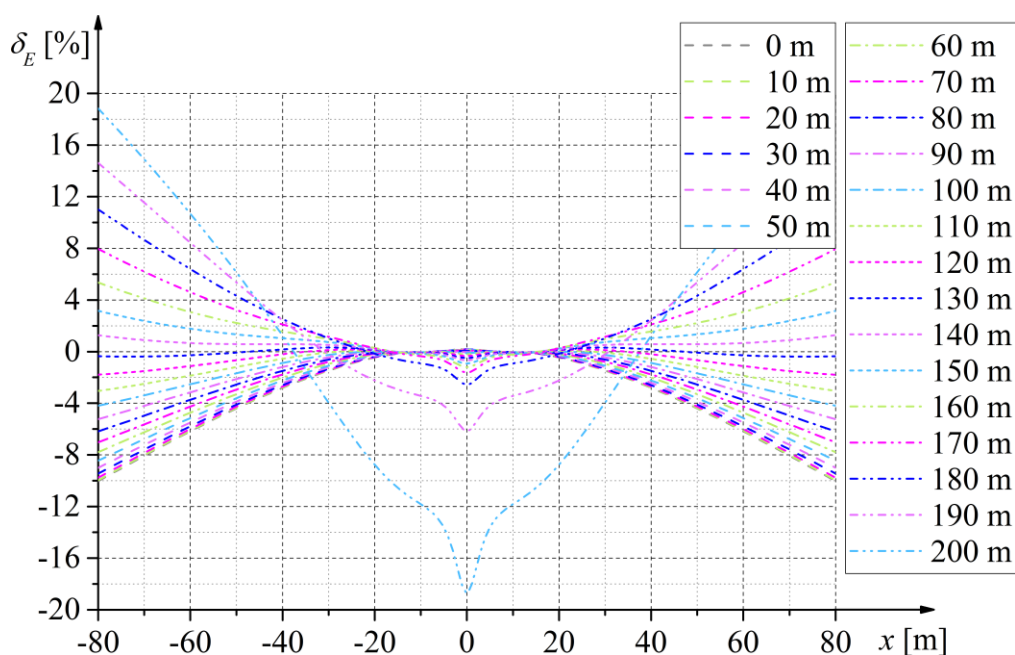
### 8.3.5. Прорачун за прав распон надземног вода напонског нивоа 400 kV

Анализира се прав распон надземног вода напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „портал” дужине 400 m. Висина фазних проводника у темену ланчанице износи 9 m, а у тачки вешања 25 m. Прорачун се врши у софтверском пакету *XGSLab*, применом модела 1 и 2, при чему се у моделу 1 уважава постојање још по једног распона истих карактеристика са сваке стране. Прорачун се изводи дуж латералних праваца  $P_0$ – $P_{20}$ , чије су позиције дате у табели 8.5. Правац  $P_0$  се налази на месту темена ланчанице, а правац  $P_{20}$  на месту вешања проводника на стуб. Растојање између суседних праваца износи 10 m. Висине фазних и заштитних проводника на местима латералних праваца  $P_0$ – $P_{20}$ , као и резултати прорачуна јачине електричног поља добијени применом модела 1 и 2, дати су у табели 8.5.

Табела 8.5. Резултати прорачуна јачине електричног поља применом модела 1 и 2

Латерални правац	$z$ [m]	$h_f$ [m]	$h_z$ [m]	$E_{max_1}$ [V/m]	$E_{max_2}$ [V/m]	$\delta_{E_{max_2}}$ [%]
$P_0$	0	9,000	16,400	7949,29	7944,74	-0,06
$P_1$	10	9,040	16,440	7897,08	7892,48	-0,06
$P_2$	20	9,160	16,560	7743,49	7738,73	-0,06
$P_3$	30	9,359	16,759	7497,35	7493,60	-0,05
$P_4$	40	9,639	17,039	7171,99	7167,94	-0,06
$P_5$	50	9,998	17,398	6783,87	6780,48	-0,05
$P_6$	60	10,437	17,837	6350,58	6347,61	-0,05
$P_7$	70	10,956	18,356	5889,41	5886,82	-0,04
$P_8$	80	11,555	18,955	5416,16	5413,79	-0,04
$P_9$	90	12,235	19,635	4949,11	4946,35	-0,06
$P_{10}$	100	12,994	20,394	4504,18	4501,69	-0,06
$P_{11}$	110	13,833	21,233	4075,28	4072,93	-0,06
$P_{12}$	120	14,752	22,152	3668,16	3665,87	-0,06
$P_{13}$	130	15,752	23,152	3292,65	3290,82	-0,06
$P_{14}$	140	16,831	24,231	2950,15	2948,49	-0,06
$P_{15}$	150	17,992	25,392	2632,90	2631,02	-0,07
$P_{16}$	160	19,232	26,632	2350,99	2350,12	-0,04
$P_{17}$	170	20,553	27,953	2094,29	2092,89	-0,07
$P_{18}$	180	21,955	29,355	1875,20	1865,35	-0,53
$P_{19}$	190	23,437	30,837	1707,17	1661,31	-2,69
$P_{20}$	200	25,000	32,400	1641,09	1479,15	-9,87

Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_E$  дуж латералних праваца  $P_0$ – $P_{20}$  за резултате прорачуна добијене применом модела 2 дат је на слици 8.23. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  на различитим позицијама на латералном правцу дате су у табели 8.6. Може се закључити да се дуж свих латералних праваца највеће вредности релативне грешке јављају на већим растојањима од осе вода. Вредности релативне грешке на правцима  $P_0$ – $P_{19}$  у зони од -20 m до +20 m налазе се у опсегу од -6,18% до 0,29%, у зони од -50 m до +50 m у опсегу од -6,18% до 5,37%, а у зони од -80 m до +80 m у опсегу од -10,04% до 14,62%. Нешто веће вредности релативне грешке јављају се на правцу  $P_{20}$ , који се налази на месту вешања проводника на стуб. На слици 8.23. потребно је занемарити вредности релативне грешке на правцу  $P_{20}$  које се јављају на месту стуба.



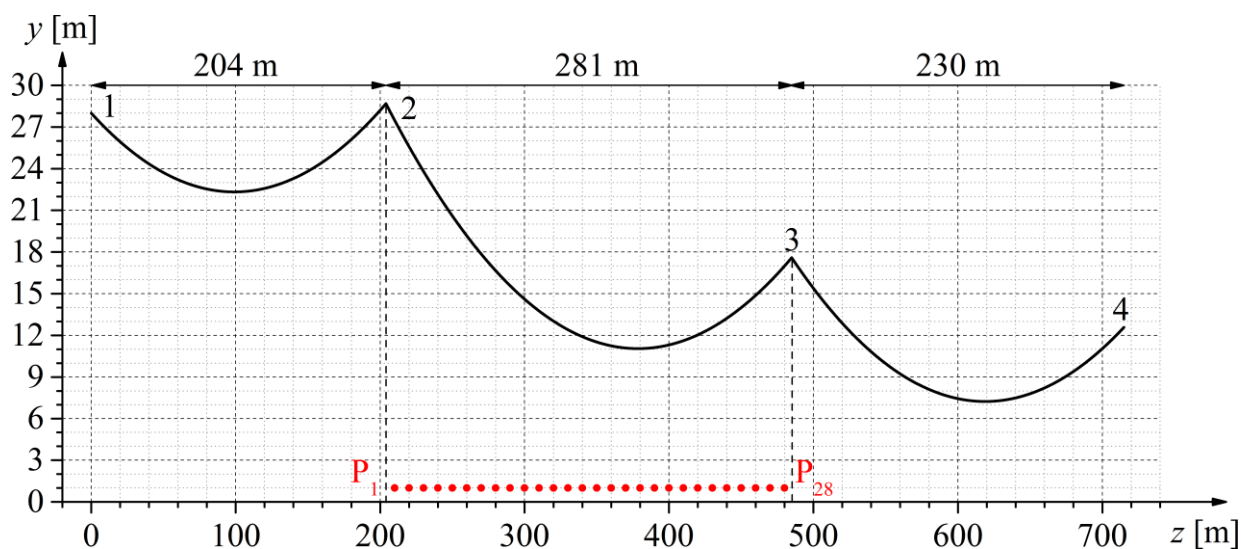
Слика 8.23. Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_E$  дуж латералних праваца  $P_0$ – $P_{20}$  за резултате прорачуна јачине електричног поља добијене применом модела 2

Табела 8.6. Вредности релативне грешке на различитим позицијама на латералним правцима

Латерални правац	$z$ [m]	$\delta_E$ [%]										
		$x$ [m]										
		0	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80
$P_0$	0	0,19	0,00	-0,05	-0,14	-0,45	-1,47	-2,81	-4,40	-6,17	-8,07	-10,04
$P_1$	10	0,19	0,00	-0,05	-0,14	-0,44	-1,45	-2,79	-4,37	-6,13	-8,02	-9,97
$P_2$	20	0,18	0,00	-0,05	-0,14	-0,42	-1,40	-2,72	-4,27	-6,00	-7,85	-9,77
$P_3$	30	0,18	0,02	-0,04	-0,12	-0,39	-1,33	-2,60	-4,11	-5,79	-7,59	-9,45
$P_4$	40	0,16	0,02	-0,05	-0,11	-0,34	-1,22	-2,44	-3,89	-5,50	-7,23	-9,00
$P_5$	50	0,15	0,04	-0,04	-0,09	-0,29	-1,09	-2,24	-3,62	-5,15	-6,78	-8,45
$P_6$	60	0,12	0,05	-0,04	-0,08	-0,23	-0,95	-2,02	-3,30	-4,74	-6,25	-7,79
$P_7$	70	0,09	0,06	-0,03	-0,06	-0,17	-0,79	-1,76	-2,95	-4,26	-5,64	-7,03
$P_8$	80	0,04	0,05	-0,04	-0,05	-0,11	-0,61	-1,49	-2,56	-3,74	-4,97	-6,18
$P_9$	90	-0,03	0,03	-0,05	-0,04	-0,05	-0,43	-1,19	-2,13	-3,16	-4,21	-5,24
$P_{10}$	100	-0,11	0,00	-0,06	-0,03	0,01	-0,25	-0,88	-1,68	-2,54	-3,40	-4,20
$P_{11}$	110	-0,21	-0,03	-0,07	-0,03	0,06	-0,07	-0,55	-1,19	-1,86	-2,50	-3,06
$P_{12}$	120	-0,33	-0,08	-0,08	-0,02	0,11	0,12	-0,20	-0,66	-1,12	-1,50	-1,78
$P_{13}$	130	-0,49	-0,16	-0,11	-0,03	0,15	0,32	0,17	-0,07	-0,28	-0,38	-0,35
$P_{14}$	140	-0,67	-0,24	-0,13	-0,02	0,20	0,52	0,58	0,58	0,67	0,90	1,27
$P_{15}$	150	-0,91	-0,35	-0,18	-0,03	0,24	0,74	1,04	1,34	1,77	2,38	3,16
$P_{16}$	160	-1,20	-0,48	-0,23	-0,04	0,29	0,97	1,56	2,22	3,07	4,13	5,36
$P_{17}$	170	-1,62	-0,69	-0,35	-0,11	0,26	1,16	2,11	3,23	4,60	6,20	7,95
$P_{18}$	180	-2,57	-1,36	-0,90	-0,60	-0,16	1,04	2,53	4,33	6,40	8,65	11,01
$P_{19}$	190	-6,18	-4,18	-3,43	-2,94	-2,24	-0,20	2,43	5,37	8,44	11,54	14,62
$P_{20}$	200	Локација стуба			-10,55	-8,76	-3,96	1,23	6,15	10,69	14,90	18,83

### 8.3.6. Прорачун за кос распон надземног вода напонског нивоа 110 kV

Анализира се кос распон надземног вода напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” дужине 281 m, који је приказан на слици 8.24. Висине вешања фазних проводника на стубове 1, 2, 3 и 4, редом износе 28 m, 28,68 m, 17,59 m и 12,58 m. Прорачун се врши у софтверском пакету *XGSLab*, применом модела 1 и 2, дуж латералних праваца  $P_1$ – $P_{28}$ , чије су позиције приказане на слици 8.24. и у табели 8.7. Растојање између суседних праваца износи 10 m. Прорачун се врши за распон 2–3, при чему се уважава и утицај суседних распона 1–2 и 3–4.



Слика 8.24. Кос распон надземног вода напонског нивоа 110 kV

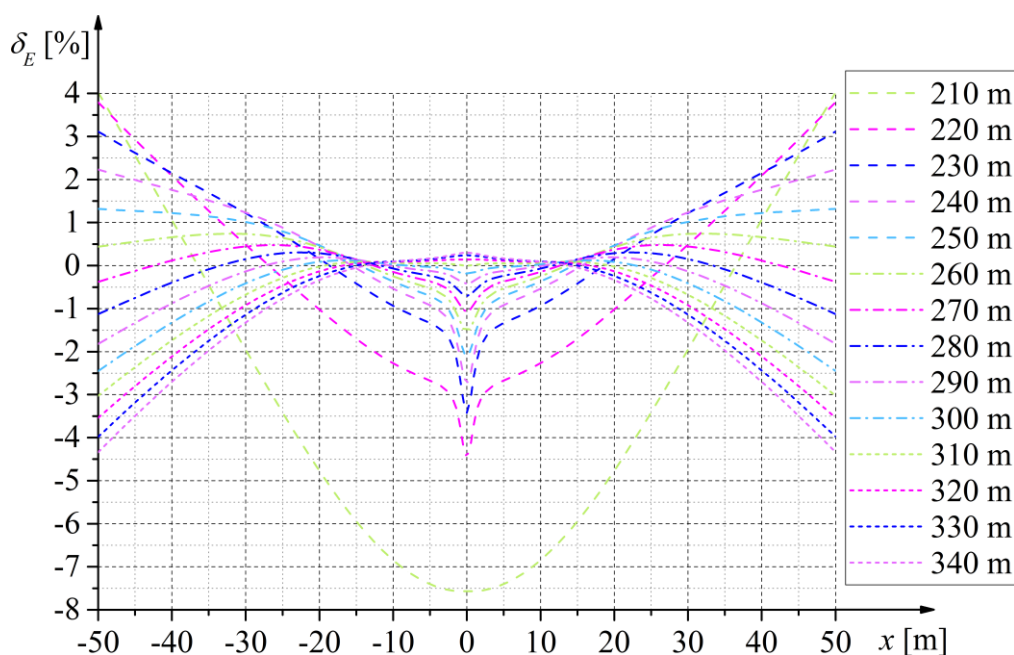
Висине фазних и заштитних проводника на местима латералних праваца  $P_1$ – $P_{28}$  дате су у табели 8.7. У табели 8.7. су такође приказане максималне вредности јачине електричног поља дуж праваца  $P_1$ – $P_{28}$ , добијене применом разматрана два модела, као и релативно одступање ових резултата. Може се закључити да се ова релативна одступања налазе у опсегу од  $-5,51\%$  до  $+0,16\%$ . На правцу  $P_1$ , који се налази на растојању од 6 m од места вешања проводника на стуб бр. 2, релативно одступање је највеће и износи  $-5,51\%$ . На правцу  $P_2$ , који се налази на растојању од 16 m од места вешања проводника на стуб бр. 2, релативно одступање износи  $-1,57\%$ , док на правцу  $P_3$  износи  $-0,42\%$ . На правцу  $P_{28}$ , који се налази на растојању од 5 m од места вешања проводника на стуб бр. 3, релативно одступање износи  $-3,53\%$ . На свим осталим правцима ( $P_4$ – $P_{27}$ ) вредности релативних одступања налазе се у опсегу од  $-0,16\%$  до  $+0,16\%$  и могу се сматрати занемарљивим.

Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_E$  дуж латералних праваца  $P_1$ – $P_{14}$  за резултате прорачуна добијене применом модела 2 дат је на слици 8.25. Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_E$  дуж латералних праваца  $P_{15}$ – $P_{28}$  дат је на слици 8.26. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  на различитим позицијама на латералним правцима дате су у табели 8.8.

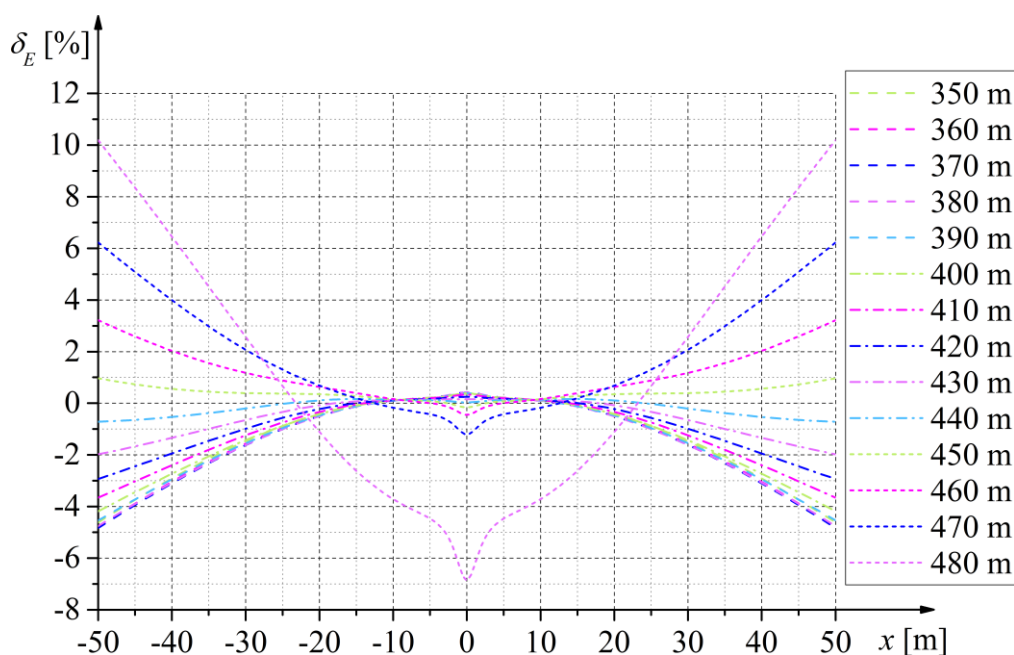
**Табела 8.7.** Резултати прорачуна јачине електричног поља применом модела 1 и 2

Латерални правац	$z$ [m]	$h_f$ [m]	$h_z$ [m]	$E_{max_1}$ [V/m]	$E_{max_2}$ [V/m]	$\delta_{E_{max_2}}$ [%]
P <sub>1</sub>	210	27,485	31,685	179,927	170,008	-5,51
P <sub>2</sub>	220	25,587	29,787	198,090	194,971	-1,57
P <sub>3</sub>	230	23,807	28,007	224,677	223,738	-0,42
P <sub>4</sub>	240	22,143	26,343	257,191	256,769	-0,16
P <sub>5</sub>	250	20,597	24,797	294,692	294,319	-0,13
P <sub>6</sub>	260	19,167	23,367	336,893	336,631	-0,08
P <sub>7</sub>	270	17,853	22,053	384,846	384,707	-0,04
P <sub>8</sub>	280	16,656	20,856	437,368	437,245	-0,03
P <sub>9</sub>	290	15,575	19,775	494,442	494,530	0,02
P <sub>10</sub>	300	14,610	18,810	555,158	555,329	0,03
P <sub>11</sub>	310	13,760	17,960	618,628	619,046	0,07
P <sub>12</sub>	320	13,026	17,226	680,936	681,552	0,09
P <sub>13</sub>	330	12,408	16,608	742,399	743,197	0,11
P <sub>14</sub>	340	11,906	16,106	798,968	799,845	0,11
P <sub>15</sub>	350	11,518	15,718	846,402	847,484	0,13
P <sub>16</sub>	360	11,247	15,447	881,895	882,953	0,12
P <sub>17</sub>	370	11,090	15,290	903,200	904,382	0,13
P <sub>18</sub>	380	11,049	15,249	908,896	910,090	0,13
P <sub>19</sub>	390	11,124	15,324	898,593	899,689	0,12
P <sub>20</sub>	400	11,313	15,513	872,988	874,141	0,13
P <sub>21</sub>	410	11,618	15,818	833,761	834,860	0,13
P <sub>22</sub>	420	12,039	16,239	783,348	784,310	0,12
P <sub>23</sub>	430	12,575	16,775	724,632	725,501	0,12
P <sub>24</sub>	440	13,226	17,426	662,870	663,766	0,14
P <sub>25</sub>	450	13,993	18,193	599,779	600,711	0,16
P <sub>26</sub>	460	14,876	19,076	536,219	537,078	0,16
P <sub>27</sub>	470	15,874	20,074	478,364	477,827	-0,11
P <sub>28</sub>	480	16,989	21,189	436,660	421,240	-3,53

Као и у претходним примерима, који су се односили на праве распоне, највеће вредности релативне грешке јављају се на већим растојањима од осе вода. Највеће вредности релативних грешака добијају се на правцима P<sub>1</sub> и P<sub>28</sub>, који се налазе у близини стубова 2 и 3. На свим осталим правцима (P<sub>2</sub>–P<sub>27</sub>) вредности релативне грешке у зони од -50 m до +50 m налазе се у опсегу од -4,83% до 6,23%. Вредности релативне грешке у зони од -20 m до +20 m на правцима P<sub>2</sub>–P<sub>27</sub> налазе се у опсегу од -4,83% до 0,68%.



**Слика 8.25.** Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_E$  дуж латералних праваца  $P_1$ – $P_{14}$  за резултате прорачуна јачине електричног поља добијене применом модела 2



**Слика 8.26.** Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_E$  дуж латералних праваца  $P_{15}$ – $P_{28}$  за резултате прорачуна јачине електричног поља добијене применом модела 2

На основу приказаних примера се може закључити да се значајнија одступања између резултата добијених применом модела 1 и 2 јављају искључиво на правцима који се налазе у непосредној близини стубова. На овим локацијама је за добијање тачних вредности јачине електричног поља поред уважавања стварног облика проводника неопходно и моделовање стубова. Из наведених разлога, на овим локацијама за поуздану оцену изложености људи првенствено треба имати у виду резултат добијен мерењем.

На правцима који се не налазе у непосредној близини стубова, одступања између резултата добијених применом модела 1 и 2 су прихватљива, па се закључује да се модел 2, који се заснива на моделовању вода праволинијским проводницима, може користити за оцену изложености људи, уз уважавање несигурности оваквог прорачуна и уз истовремено

уважавање резултата добијених мерењем. Посебно је повољна околност што се веће вредности одступања између резултата добијених применом модела 1 и 2 јављају на већим растојањима од осе вода, тј. у зони где су вредности јачине електричног поља ниже, па су нешто већа одступања прихватљива. У зони у којој се јављају највеће вредности јачине електричног поља дуж латералног правца, вредности релативних одступања су знатно ниже.

**Табела 8.8.** Вредности релативне грешке на различитим позицијама на латералним правцима

Латерални правац	z [m]	$\delta_E$ [%]										
		x [m]										
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
P <sub>1</sub>	210	-7,56	-7,40	-6,85	-5,94	-4,77	-3,41	-1,96	-0,45	1,06	2,56	4,02
P <sub>2</sub>	220	-4,48	-2,67	-2,27	-1,70	-1,02	-0,28	0,49	1,27	2,09	2,93	3,80
P <sub>3</sub>	230	-3,43	-1,33	-0,93	-0,42	0,16	0,71	1,22	1,69	2,15	2,62	3,12
P <sub>4</sub>	240	-2,76	-0,92	-0,54	-0,06	0,44	0,88	1,23	1,52	1,76	1,99	2,23
P <sub>5</sub>	250	-2,14	-0,71	-0,37	0,05	0,47	0,80	1,02	1,15	1,22	1,27	1,32
P <sub>6</sub>	260	-1,56	-0,53	-0,25	0,10	0,43	0,65	0,74	0,73	0,66	0,56	0,44
P <sub>7</sub>	270	-1,08	-0,37	-0,15	0,14	0,37	0,47	0,44	0,31	0,12	-0,12	-0,37
P <sub>8</sub>	280	-0,70	-0,23	-0,07	0,15	0,29	0,29	0,15	-0,09	-0,39	-0,75	-1,13
P <sub>9</sub>	290	-0,42	-0,12	-0,01	0,14	0,19	0,10	-0,13	-0,47	-0,87	-1,33	-1,82
P <sub>10</sub>	300	-0,19	-0,03	0,03	0,11	0,09	-0,10	-0,41	-0,83	-1,32	-1,87	-2,45
P <sub>11</sub>	310	0,00	0,05	0,07	0,08	-0,02	-0,28	-0,68	-1,17	-1,74	-2,36	-3,03
P <sub>12</sub>	320	0,14	0,11	0,09	0,05	-0,13	-0,46	-0,92	-1,48	-2,11	-2,80	-3,54
P <sub>13</sub>	330	0,24	0,15	0,10	0,00	-0,24	-0,63	-1,14	-1,75	-2,44	-3,18	-3,98
P <sub>14</sub>	340	0,30	0,17	0,09	-0,05	-0,34	-0,77	-1,32	-1,97	-2,70	-3,50	-4,34
P <sub>15</sub>	350	0,37	0,20	0,11	-0,08	-0,41	-0,88	-1,47	-2,15	-2,91	-3,74	-4,61
P <sub>16</sub>	360	0,38	0,20	0,09	-0,11	-0,47	-0,96	-1,57	-2,27	-3,05	-3,89	-4,77
P <sub>17</sub>	370	0,42	0,21	0,10	-0,13	-0,50	-1,01	-1,62	-2,33	-3,11	-3,95	-4,83
P <sub>18</sub>	380	0,42	0,22	0,10	-0,13	-0,51	-1,01	-1,62	-2,31	-3,08	-3,90	-4,76
P <sub>19</sub>	390	0,39	0,20	0,09	-0,12	-0,48	-0,96	-1,55	-2,22	-2,95	-3,73	-4,54
P <sub>20</sub>	400	0,38	0,21	0,11	-0,09	-0,42	-0,88	-1,43	-2,06	-2,73	-3,45	-4,18
P <sub>21</sub>	410	0,33	0,19	0,11	-0,05	-0,34	-0,75	-1,25	-1,81	-2,41	-3,03	-3,66
P <sub>22</sub>	420	0,25	0,16	0,11	0,00	-0,23	-0,57	-0,99	-1,46	-1,95	-2,45	-2,94
P <sub>23</sub>	430	0,15	0,14	0,12	0,07	-0,08	-0,34	-0,65	-1,00	-1,34	-1,67	-1,98
P <sub>24</sub>	440	0,02	0,11	0,14	0,16	0,11	-0,03	-0,21	-0,38	-0,54	-0,65	-0,72
P <sub>25</sub>	450	-0,16	0,07	0,16	0,27	0,35	0,37	0,39	0,44	0,55	0,73	0,96
P <sub>26</sub>	460	-0,46	0,00	0,16	0,39	0,63	0,88	1,18	1,56	2,04	2,59	3,22
P <sub>27</sub>	470	-1,22	-0,43	-0,17	0,19	0,68	1,30	2,07	2,98	4,00	5,09	6,23
P <sub>28</sub>	480	-6,88	-4,47	-3,71	-2,62	-1,11	0,66	2,57	4,52	6,46	8,35	10,19

За примену модела 2 у пракси неопходно је само познавање висина фазних и заштитних проводника и њихових међусобних растојања на латералном правцу на којем се врши мерење и прорачун поља. Ови подаци се добијају мерењем помоћу ласерског даљиномера, о чему ће бити речи у наредном поглављу.

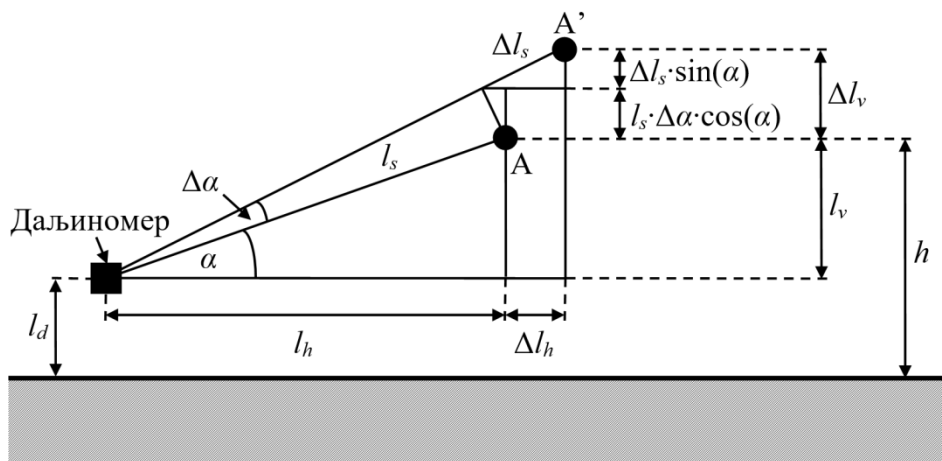
## 8.4. Несигурност мерења висине фазних проводника

### 8.4.1. Поступак мерења висине проводника

Приликом испитивања електричног и магнетског поља, висине проводника се обично мере ласерским даљиномером. Ласерски даљиномер има одређену грешку мерења, која је декларисана од стране произвођача. Када се тако добијени резултат користи као улазни податак за прорачун, то доводи до одређене грешке, а самим тим и до одступања резултата прорачуна у односу на резултате добијене мерењем. Методологија за израчунавање ове грешке, као и добијени резултати, који су приказани у овом поглављу, дати су у [79].

Висине проводника се најчешће мере на месту латералног правца дуж којег се врши мерење и прорачун електричног и магнетског поља. Пре мерења висине проводника надземног вода помоћу ласерског даљиномера неопходно је унети податак о висини изнад тла на којој се налази даљиномер ( $l_d$ ). Ради добијања тачних резултата, даљиномер је током мерења постављен на сталак. Мерење се може извршити и тако што се даљиномер током мерења држи у руци, али се на овај начин у мерење уноси додатна грешка, због чега се овај начин мерења не препоручује. Мерење висине проводника ласерским даљиномером приказано је на слици 8.27. На слици 8.27. је ознаком А обележена позиција проводника чија се висина мери. Ласерски даљиномер мери растојање од мерног места до проводника ( $l_s$ ), као и угао између линије која повезује мерно место и проводник и хоризонталне линије ( $\alpha$ ). На основу мерења ове две величине, растојања  $l_s$  и угла  $\alpha$ , даљиномер израчунава хоризонтално растојање ( $l_h$ ) и вертикално растојање ( $l_v$ ). Након додавања висине изнад тла на којој се налази даљиномер ( $l_d$ ) на вертикално растојање  $l_v$ , даљиномер приказује висину проводника изнад тла ( $h$ ).

Пошто се растојање  $l_s$  мери са грешком  $\Delta l_s$ , а угао  $\alpha$  са грешком  $\Delta \alpha$ , јавља се грешка мерења висине  $\Delta l_v$  и грешка мерења хоризонталног растојања  $\Delta l_h$ . Због тога се добија позиција проводника која одступа од његове стварне позиције. Погрешна позиција проводника је на слици 8.27. означена са А'.



Слика 8.27. Мерење висине проводника ласерским даљиномером

Применом описаног поступка добијају се коректни резултати уколико је на локацији тло приближно равно, као што је приказано на слици 8.27. Уколико тло није равно, примењује се нешто другачији поступак, како би се измерила висина проводника у односу на тло испод проводника. На тло испод проводника чија се висина мери поставља се маркер, а затим се мери висинска разлика између проводника и маркера.

#### 8.4.2. Метода за израчунавање утицаја грешке мерења висине фазних проводника на резултате прорачуна јачине електричног поља

Ради одређивања грешке мерења висине  $\Delta l_v$ , на основу слике 8.27. може се написати следећи израз:

$$l_v = l_s \cdot \sin(\alpha) \quad (8.11)$$

Диференцирањем претходне једначине добија се следећи израз:

$$dl_v = dl_s \cdot \sin(\alpha) + l_s \cdot \cos(\alpha) \cdot d\alpha \quad (8.12)$$

који се такође може написати и на следеће начине:

$$dl_v = dl_s \cdot \frac{l_v}{l_s} + l_s \cdot \frac{l_h}{l_s} \cdot d\alpha \quad (8.13)$$

$$dl_v = \frac{dl_s}{l_s} \cdot (h - l_d) + l_h \cdot d\alpha \quad (8.14)$$

Ради избегавања инфинитезимальа  $dl_v$ ,  $dl_s$  и  $d\alpha$ , диференцијална једначина (8.14) конвертована је у еквивалентну једначину с коначним разликама:

$$\Delta l_v = \frac{\Delta l_s}{l_s} \cdot (h - l_d) + l_h \cdot \Delta\alpha \quad (8.15)$$

Из израза (8.15) може се уочити да грешка  $\Delta l_v$  није константна, зато што зависи од растојања до објекта  $l_s$  и угла  $\alpha$ . Због тога је ову грешку потребно израчунати за сваки конкретан случај.

У наставку су анализирани резултати мерења добијени ласерским даљинометром који се у пракси користи за наведену намену. На основу података из спецификације произвођача усвојено је да даљинометар мери растојање са грешком  $\Delta l_s$ , која износи  $\pm 0,4$  m када се мере растојања краћа од 100 m, што је готово увек случај када се врше мерења висина проводника надземног вода. Опсег мерења угла је од  $-55^\circ$  до  $+85^\circ$ , а грешка мерења угла  $\Delta\alpha$  износи  $\pm 0,1^\circ$ .

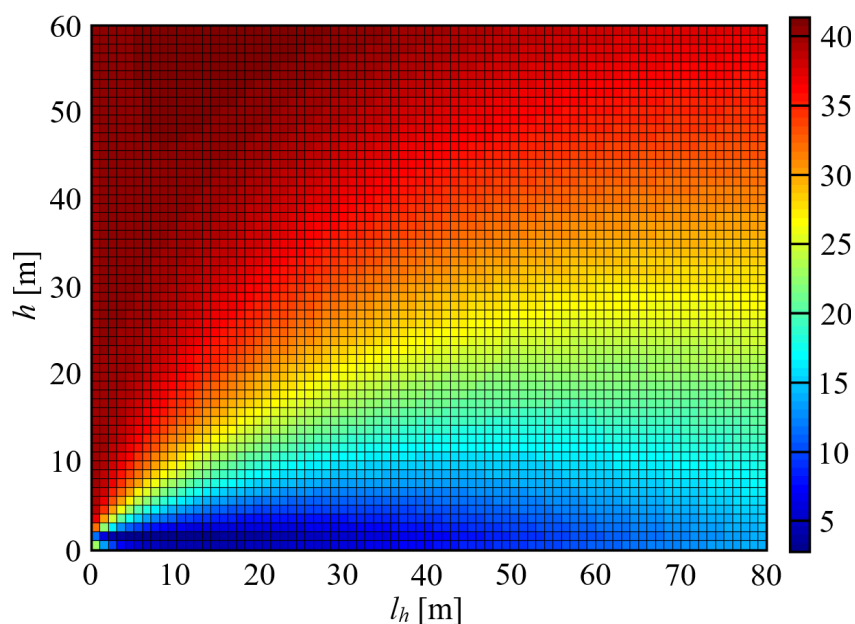
Прорачуни  $\Delta l_v$  спроведени су за висине проводника у опсегу 2–60 m и за растојања од проводника у опсегу 1–80 m, ради уважавања што већег броја реалних ситуација. На овај начин обухваћени су случајеви мерења висина проводника надземних водова различитих напонских нивоа, од нисконапонских до високонапонских, као и случајеви мерења висина проводника више паралелних надземних водова када се мерења врше из исте тачке. Висине проводника мање од 6 m односе се на ситуације када се мерења висине не врше са земље, него с тераса стамбених објеката који се налазе у близини надземних водова. Приликом прорачуна је усвојено да се ласерски даљинометар налази на висини од 1,7 m изнад тла, што представља реалан случај када мерење врши испитивач који се налази у стојећем положају.



Пошто се према спецификацији произвођача грешка мерења растојања  $\Delta l_s$  налази у опсегу од  $-0,4\text{ m}$  до  $+0,4\text{ m}$ , а грешка мерења угла  $\Delta\alpha$  у опсегу од  $-0,1^\circ$  до  $+0,1^\circ$ , грешка мерења висине израчуната је за следећа четири гранична случаја:

- 1)  $\Delta l_s = +0,4\text{ m}$ ,  $\Delta\alpha = +0,1^\circ$ ;
- 2)  $\Delta l_s = -0,4\text{ m}$ ,  $\Delta\alpha = +0,1^\circ$ ;
- 3)  $\Delta l_s = +0,4\text{ m}$ ,  $\Delta\alpha = -0,1^\circ$  и
- 4)  $\Delta l_s = -0,4\text{ m}$ ,  $\Delta\alpha = -0,1^\circ$ .

На основу прорачуна за ова четири случаја, може се одредити максимални опсег грешке, одређивањем његове доње и горње границе. Пошто је разлика између апсолутних вредности доње и горње границе мања или једнака  $1\text{ mm}$ , само је горња граница приказана на слици 8.28, и то за све анализираних вредности висине проводника и растојања до њега.



**Слика 8.28.** Грешка мерења висине  $\Delta l_v$  [cm] за ласерски даљиномер са декларисаним грешкама  $\Delta l_s = \pm 40\text{ cm}$  и  $\Delta\alpha = \pm 0,1^\circ$

Изабране вредности горње границе максималног опсега грешке које одговарају најчешћим ситуацијама у пракси приказане су у табели 8.9.

Црте у табели 8.9. означавају вредности изван мерног опсега. На основу резултата приказаних у табели 8.9. може се закључити да највећа вредност  $\Delta l_v$  износи  $0,414\text{ m}$ . Као што се може видети из табеле 8.9. и са слике 8.28, веће вредности грешке се јављају када се врше мерења висине проводника који се налазе на већој висини и на мањем хоризонталном растојању. Овај закључак се односи искључиво на мерења ласерским даљиномером који има претходно наведене карактеристике.

**Табела 8.9.** Грешка мерења висине за изабране случајеве,  $\Delta l_v$  [cm]

		$l_h$ [m]												
		1	2	4	6	8	10	15	20	25	30	40	60	80
$h$ [m]	2	–	–	–	–	–	3,0	3,5	4,2	4,9	5,7	7,4	10,7	14,2
	4	–	–	–	–	–	10,8	8,7	8,1	8,1	8,4	9,3	12,1	15,2
	6	–	–	–	–	20,4	17,6	13,7	12,0	11,2	11,0	11,3	13,4	16,2
	8	–	–	–	30,1	26,2	23,1	18,2	15,6	14,2	13,5	13,3	14,7	17,2
	10	39,9	39,3	36,8	33,5	30,2	27,3	22,0	18,9	17,0	16,0	15,2	16,0	18,2
	12	40,0	39,6	38,0	35,6	33,0	30,5	25,3	21,9	19,7	18,3	17,0	17,3	19,1
	14	–	39,8	38,8	37,0	35,0	32,8	28,0	24,5	22,1	20,5	18,8	18,6	20,1
	16	–	40,0	39,2	38,0	36,3	34,6	30,3	26,8	24,3	22,5	20,5	19,8	21,1
	18	–	40,1	39,6	38,6	37,3	35,9	32,1	28,8	26,3	24,4	22,1	21,0	22,0
	20	–	40,1	39,8	39,1	38,1	36,9	33,6	30,5	28,0	26,1	23,7	22,2	22,9
	22	–	40,2	40,0	39,4	38,6	37,7	34,8	32,0	29,6	27,7	25,1	23,4	23,9
	24	–	40,2	40,1	39,7	39,1	38,3	35,8	33,3	31,0	29,2	26,5	24,5	24,8
	26	–	–	40,2	39,9	39,4	38,8	36,7	34,4	32,3	30,5	27,8	25,5	25,7
	28	–	–	40,2	40,1	39,7	39,2	37,4	35,4	33,4	31,7	29,0	26,6	26,5
	30	–	–	40,3	40,2	39,9	39,5	38,0	36,2	34,4	32,7	30,1	27,6	27,4
	35	–	–	40,4	40,4	40,3	40,1	39,1	37,8	36,4	35,0	32,6	29,9	29,4
40	–	–	40,5	40,6	40,6	40,5	39,9	39,0	37,9	36,8	34,7	32,0	31,3	
50	–	–	–	40,7	40,9	40,9	40,8	40,5	39,9	39,2	37,8	35,6	34,7	
60	–	–	–	40,8	41,0	41,2	41,4	41,3	41,1	40,8	40,0	38,4	37,6	

Утицај грешке мерења висине проводника одређен је прорачуном јачине електричног поља за типичне геометрије надземних водова, које су дате на сликама 4.3, 4.4. и 4.5. Подаци о овим водовима дати су у табели 4.1, а висине фазних и заштитних проводника у табелама 4.2. и 4.3. Прорачуни су спроведени дуж латералног правца који се налази на висини од 1 m изнад тла, од  $x = -50$  m до  $x = +50$  m. Приликом прорачуна је претпостављено да се проводник налази на висини која представља минималну висину проводника изнад тла на датом распону.

Прорачуни су прво спроведени за усвојене тачне вредности висине проводника из табеле 4.2, ради добијања тачних вредности јачине електричног поља ( $E_t$ ) за анализирани случај. Након тога, прорачуни су поновљени узимајући у обзир максималну грешку мерења висине ( $\Delta l_v$ ), ради добијања вредности јачине електричног поља ( $E$ ) када ласерски даљиномер мери с наведеном грешком. На бази ових резултата је израчуната релативна грешка ( $\delta_E$ ), према следећем изразу:

$$\delta_E = \frac{E - E_t}{E_t} \cdot 100\% = \frac{E(h_f \pm \Delta l_v) - E(h_f)}{E(h_f)} \cdot 100\% \quad (8.16)$$

### 8.4.3. Резултати прорачуна за случај када су висине свих фазних проводника измерене са истом грешком

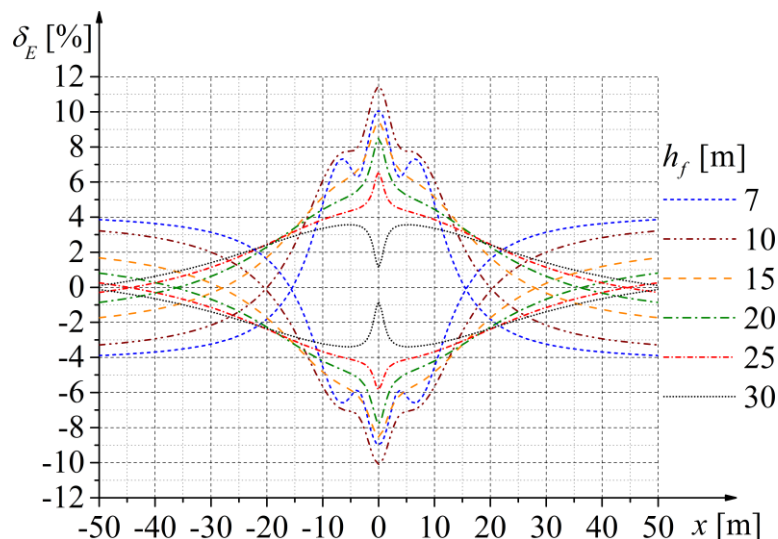
Приликом прорачуна јачине електричног поља за одређену висину фазних проводника узета је у обзир максимална вредност грешке  $\Delta l_v$  за ту висину, која обухвата различите вредности растојања  $l_h$ . Због тога су за фазне проводнике који се налазе на висинама од 7 m и 7,75 m, прорачуни спроведени под претпоставком да  $\Delta l_v$  износи  $\pm 0,3$  m, што представља вредност узету из табеле 8.9, која се односи на најближу висину од 8 m. За све друге висине фазних проводника, почев од 9 m, прорачуни су спроведени за  $\Delta l_v = \pm 0,4$  m, у складу с резултатима приказаним у табели 8.9.

Вредности  $\delta_E$  [%] добијене прорачуном за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” приказане су на слици 8.29. Прорачуни су спроведени за различите висине фазних проводника у опсегу 7–30 m, према табели 4.2.

Уколико се посматрају максималне вредности грешке  $\delta_E$  у опсегу од  $x = -50$  m до  $x = +50$  m, може се закључити да релативна грешка  $\delta_E$  опада са повећањем висине фазних проводника. Овакав закључак је очекиван зато што се максимална вредност  $\Delta l_v$  веома мало мења с повећањем висине фазних проводника у опсегу 10–30 m (табела 8.9). С друге стране, висине фазних проводника се повећавају, тако да се однос  $\Delta l_v/h_f$  смањује.

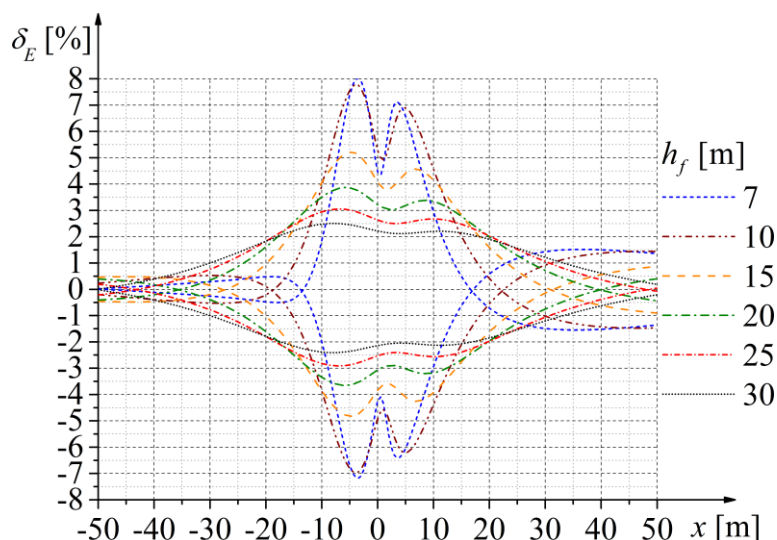
Такође се може уочити да се вредности  $\delta_E$  знатно мењају дуж  $x$  осе. За сваку конкретну висину фазних проводника вредности релативне грешке  $\delta_E$  веће су у области која се налази непосредно испод надземног вода и опадају с повећањем растојања од осе вода. Разлог за то јесте чињеница да висине фазних проводника имају највећи утицај на вредности електричног поља у области која се налази непосредно испод вода, до одређеног растојања од осе вода, које се назива критично растојање [42]. Након овог растојања утицај висине фазних проводника на нивое поља није толико изражен [43], [68].

За висину фазних проводника од 10 m вредности  $\delta_E$  налазе се у опсегу од -10,1% до 11,4%, док се за висину од 30 m налазе у опсегу од -3,4% до 3,6%.



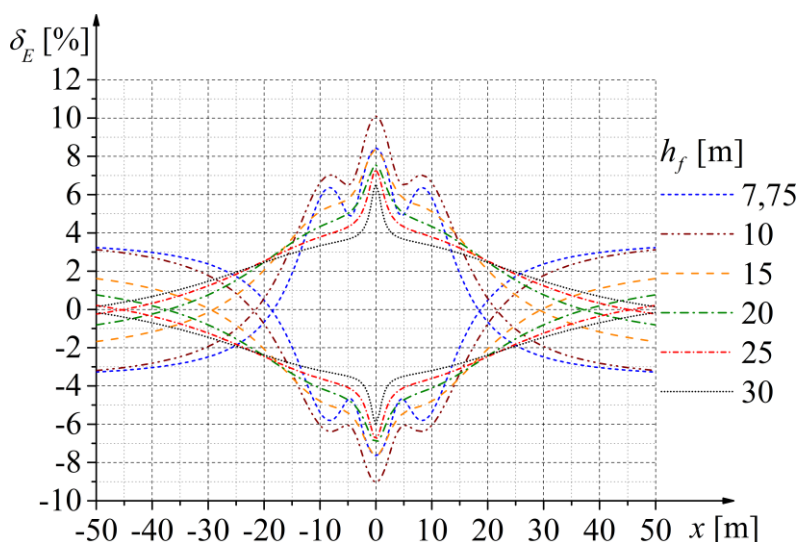
Слика 8.29. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”

Претходна анализа је поновљена за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „јела”. Добијени резултати су приказани на слици 8.30. У овом случају се вредности  $\delta_E$  налазе у опсегу од -7,1% до 8,0% за висину најнижег фазног проводника од 7 m. У случају када висина најнижег фазног проводника износи 30 m, вредности  $\delta_E$  налазе се у опсегу од -2,4% до 2,5%.



**Слика 8.30.** Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „јела“

Резултати добијени за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „портал“, приказани су на слици 8.31. Вредности  $\delta_E$  за висину фазних проводника од 10 m крећу се од -9,0% до 10,1%, док се за висину од 30 m крећу од -6,0% до 6,5%.



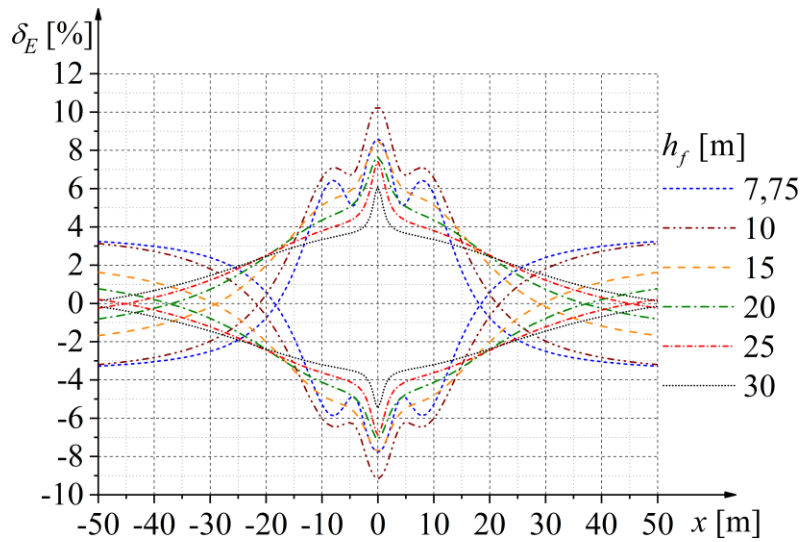
**Слика 8.31.** Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „портал“

Резултати добијени за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „Y“ приказани су на слици 8.32. Добијени резултати су веома слични резултатима који се односе на надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „портал“, због сличне геометрије ових водова. За све анализиране висине проводника и у свим тачкама од интереса разлике су мање од 0,5%.

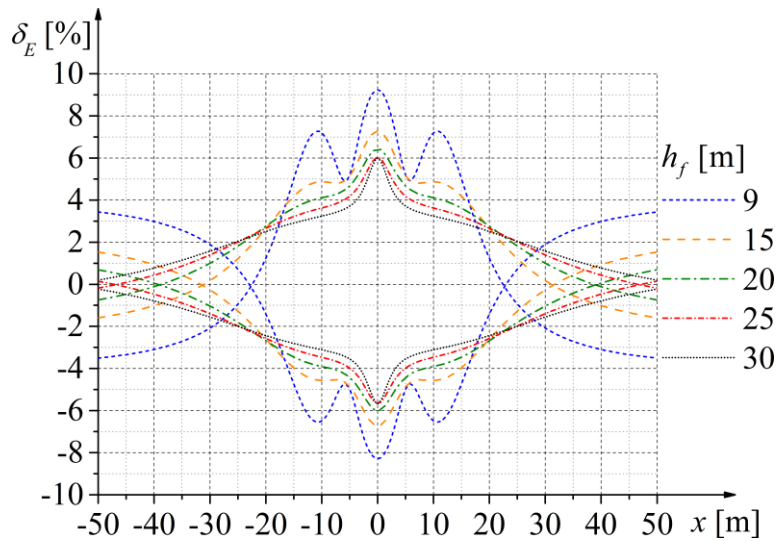
Резултати добијени за надземне водове напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „портал“ и „Y“, приказани су на сликама 8.33. и 8.34.

У случају вода са стубовима типа „портал“ и висинама фазних проводника од 9 m вредности  $\delta_E$  налазе се у опсегу од -8,3% до 9,2%, док се у случају вода са висинама фазних проводника од 30 m ове вредности налазе у опсегу -5,7% до 6,0%.

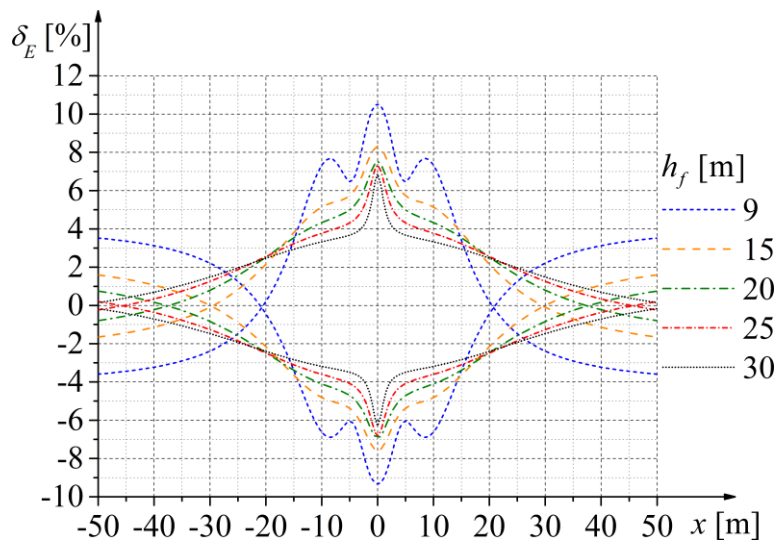
У случају вода са стубовима типа „Y“ вредности  $\delta_E$  налазе се у опсегу од -9,3% до 10,5% за висину фазних проводника од 9 m, док се за висину од 30 m налазе у опсегу од -6,3% до 6,9%.



Слика 8.32. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „Y”



Слика 8.33. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „портал”

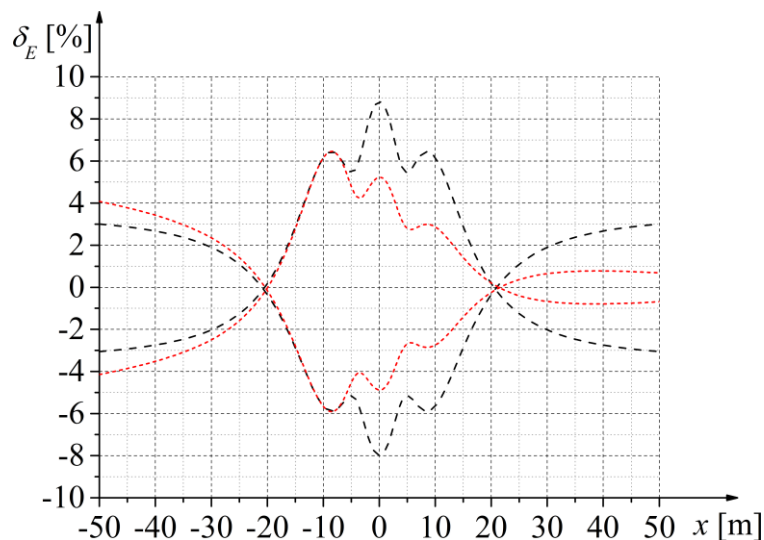


Слика 8.34. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „Y”

#### 8.4.4. Резултати прорачуна за случај када су висине свих фазних проводника измерене са различитом грешком

У претходним анализама је претпостављено да су висине сва три фазна проводника измерене са истом грешком. Међутим, у реалним ситуацијама, висине сва три фазна проводника често се мере са истог места. Због тога су растојања до фазних проводника различита, а самим тим грешке мерења висине за ова растојања такође могу бити различита. Зато је прорачун за случај надземног вода напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „Y”, код којег висине фазних проводника износе 9 m, поновљен под претпоставком да су висине фазних проводника измерене с различитим грешкама. Хоризонтално растојање до најближег фазног проводника износи 5 m. Самим тим, хоризонтална растојања до осталих фазних проводника износе 14 m и 23 m. Максималне грешке  $\Delta l_v$  које одговарају висини проводника од 9 m и наведеним растојањима износе, редом, 33,9 cm, 21,0 cm и 16,2 cm. Резултати добијени за случај када је претпостављено да су све три висине измерене с максималном грешком од 33,9 cm упоређени су с резултатима добијеним за случај када је претпостављено да је свака висина измерена с одговарајућом грешком. Претпостављено је да грешка  $\Delta l_v$  има исти знак током мерења висина сва три фазна проводника. Грешке мерења висина заштитне ужади износе 36,9 cm и 27,8 cm. Поређење добијених резултата приказано је на слици 8.35.

Опсег  $\delta_E$  добијен за случај када је висина сваког фазног проводника мерена с одговарајућом грешком, у већини анализираних тачака ужи је од опсега који је добијен када су висине сва три проводника измерене с максималном грешком. Из наведеног разлога, резултати приказани на сликама 8.29–8.34, који су добијени поједностављеном анализом која подразумева случај када су висине сва три фазна проводника измерене са истом, максималном грешком, могу бити коришћени у већини ситуација када је неопходна брза процена ове компоненте несигурности. Међутим, у посебним случајевима, када је потребна тачнија процена несигурности прорачуна, може се спровести детаљнија анализа, која подразумева случај када је висина сваког проводника измерена с одговарајућом грешком.



Слика 8.35. Поређење резултата  $\delta_E$  (црна линија – све три висине измерене са максималном грешком; црвена линија – свака висина измерена са одговарајућом грешком)

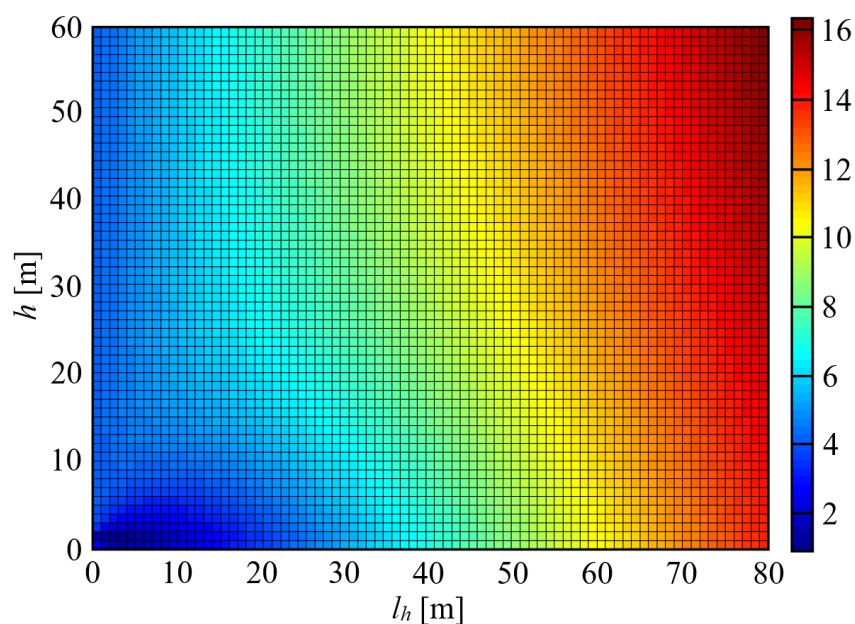
### 8.4.5. Резултати прорачуна за различите грешке мерења висине

Прорачуни су поновљени за случај мерења висине ласерским даљиномерима који имају следеће карактеристике:

- 1)  $\Delta l_s = \pm 4 \text{ cm}$ ,  $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$ ;
- 2)  $\Delta l_s = \pm 1 \text{ mm}$ ,  $\Delta \alpha = +0,1^\circ$ .

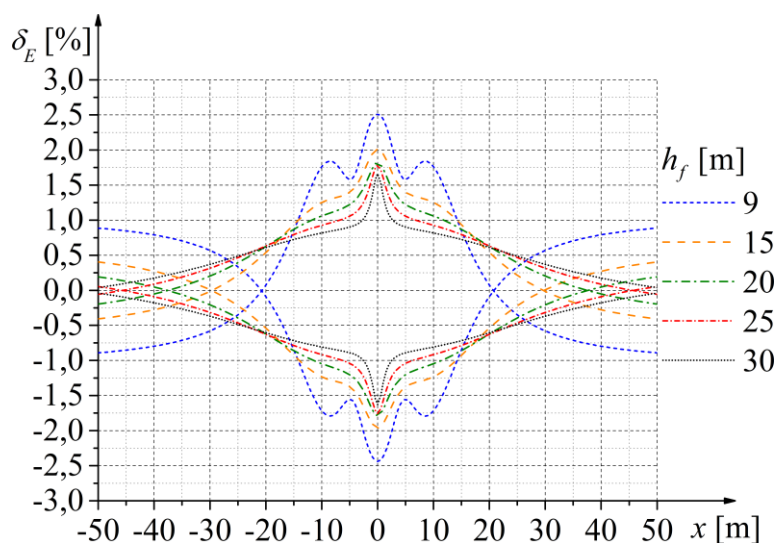
Наведене карактеристике ласерских даљиномера преузете су из спецификација њихових произвођача.

Максималне вредности  $\Delta l_v$  за случај ласерског даљиномера с декларисаним грешкама  $\Delta l_s = \pm 4 \text{ cm}$  и  $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$  приказане су на слици 8.36. На основу приказаних резултата може се уочити да се грешка  $\Delta l_v$  повећава с повећањем  $l_h$ .



Слика 8.36. Грешка мерења висине  $\Delta l_v$  [cm] за ласерски даљиномер с декларисаним грешкама  $\Delta l_s = \pm 4 \text{ cm}$  и  $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$

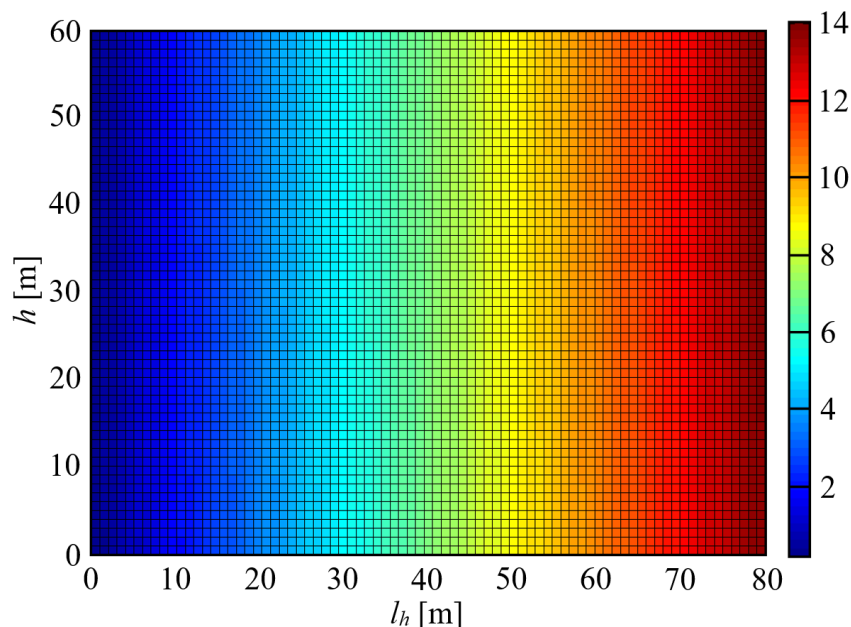
Резултати прорачуна за вод напонског нивоа 400 kV са „Y” стубовима дати су на слици 8.37.



Слика 8.37. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „Y”

Пошто се мерења висине ретко врше са позиције која се налази на хоризонталном растојању већем од 50 m, прорачуни за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „Y” спроведени су за  $l_h = 50$  m. За висине фазних проводника које се налазе у опсегу 9–30 m грешка  $\Delta l_v$  варира од 9,3 cm до 10,7 cm. Ради поједностављења, вредност грешке  $\Delta l_v$  заокружена је на 10 cm приликом прорачуна за све висине. Релативна грешка  $\delta_E$  варира од -2,44% до 2,51%.

Максималне вредности  $\Delta l_v$  за случај ласерског даљиномера с декларисаним грешкама  $\Delta l_s = \pm 1$  mm и  $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$  приказане су на слици 8.38.



**Слика 8.38.** Грешка мерења висине  $\Delta l_v$  [cm] за ласерски даљиномер с декларисаним грешкама  $\Delta l_s = \pm 1$  mm и  $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$

Иако грешка  $\Delta l_s$  износи свега  $\pm 1$  mm, што је знатно мање него у претходном случају, разлика која се односи на грешку мерења висине  $\Delta l_v$  готово је занемарљива, пошто сада у овој грешци највећи удео има грешка мерења угла  $\Delta \alpha$ , која износи  $\pm 0,1^\circ$  и иста је као у претходном случају.

У случају када хоризонтално растојање до проводника износи 50 m, грешка  $\Delta l_v$  износи 8,8 cm, што је незнатно мање него у претходном случају, где је износила око 10 cm.

#### 8.4.6. Упоредни приказ резултата за ласерске даљиномере различитих карактеристика

Прорачуни приказани у претходним поглављима спроведени су за три ласерска даљиномера следећих карактеристика:

- 1)  $\Delta l_s = \pm 40$  cm,  $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$ ;
- 2)  $\Delta l_s = \pm 4$  cm,  $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$ ;
- 3)  $\Delta l_s = \pm 1$  mm,  $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$ .

Декларисана грешка мерења угла је код сва три даљиномера иста и износи  $\pm 0,1^\circ$ , тако да се даљиномери разликују једино по грешци мерења растојања.

У табели 8.10. дат је упоредни приказ максималних вредности  $\delta_E$  за сва три анализирана ласерска даљиномера. Поређење је извршено на примеру надземног вода напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „Y”. За сваки анализирани модел ласерског даљиномера и за све



разматране висине фазних проводника дат је опсег у којем се налазе вредности релативне грешке  $\delta_E$  за вредности  $x$  координате од -50 m до +50 m.

Уколико се посматрају опсези грешке из табеле 8.10, може се закључити да се са повећањем висине фазних проводника максимална грешка  $\delta_E$  смањује у сва три разматрана случаја. Уколико се посматрају опсези грешке за исту висину фазних проводника и за различите ласерске даљиномере, може се закључити да су вредности грешке  $\delta_E$  највеће у првом случају, што је и очекивано пошто је грешка  $\Delta l_s$  у овом случају највећа и износи  $\pm 40$  cm. Најниже вредности грешке добијају се у трећем случају, иако разлике у односу на други случај нису велике.

**Табела 8.10.** Поређење резултата  $\delta_E$  за три ласерска даљиномера различитих карактеристика

$h_f$	$\delta_E$		
	$\Delta l_s = \pm 40$ cm, $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$	$\Delta l_s = \pm 4$ cm, $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$	$\Delta l_s = \pm 1$ mm, $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$
9 m	-9,3% – 10,5%	-2,4% – 2,5%	-2,2% – 2,2%
15 m	-7,6% – 8,3%	-2,0% – 2,0%	-1,7% – 1,8%
20 m	-7,0% – 7,5%	-1,8% – 1,8%	-1,6% – 1,6%
25 m	-6,8% – 7,3%	-1,8% – 1,8%	-1,5% – 1,6%
30 m	-6,3% – 6,9%	-1,6% – 1,7%	-1,4% – 1,5%

На основу приказаних резултата закључује се да се сви разматрани ласерски даљиномери могу користити за мерење висина проводника надземних водова, али се утицај њихове грешке на резултате прорачуна јачине електричног поља мора квантификовати и узети у обзир приликом прорачуна проширене несигурности прорачуна. На основу резултата приказаних на сликама 8.28, 8.36. и 8.38, може се закључити како се грешка  $\Delta l_s$  мења с променом хоризонталног растојања од проводника, за дату висину проводника и за примењени ласерски даљиномер. На основу тога се може изабрати позиција за мерење која ће обезбедити да грешка мерења висине буде минимална могућа.

На основу спроведених анализа може се закључити да грешка мерења висина фазних проводника може имати значајан утицај на проширену несигурност прорачуна јачине електричног поља и да стога не сме бити занемарена. Овај утицај веома зависи од висина фазних проводника, геометрије надземног вода и позиције тачке у којој се рачуна поље у односу на надземни вод. Генерално, релативне грешке су највеће у зони која се налази непосредно испод надземног вода и опадају с повећањем растојања од осе вода.

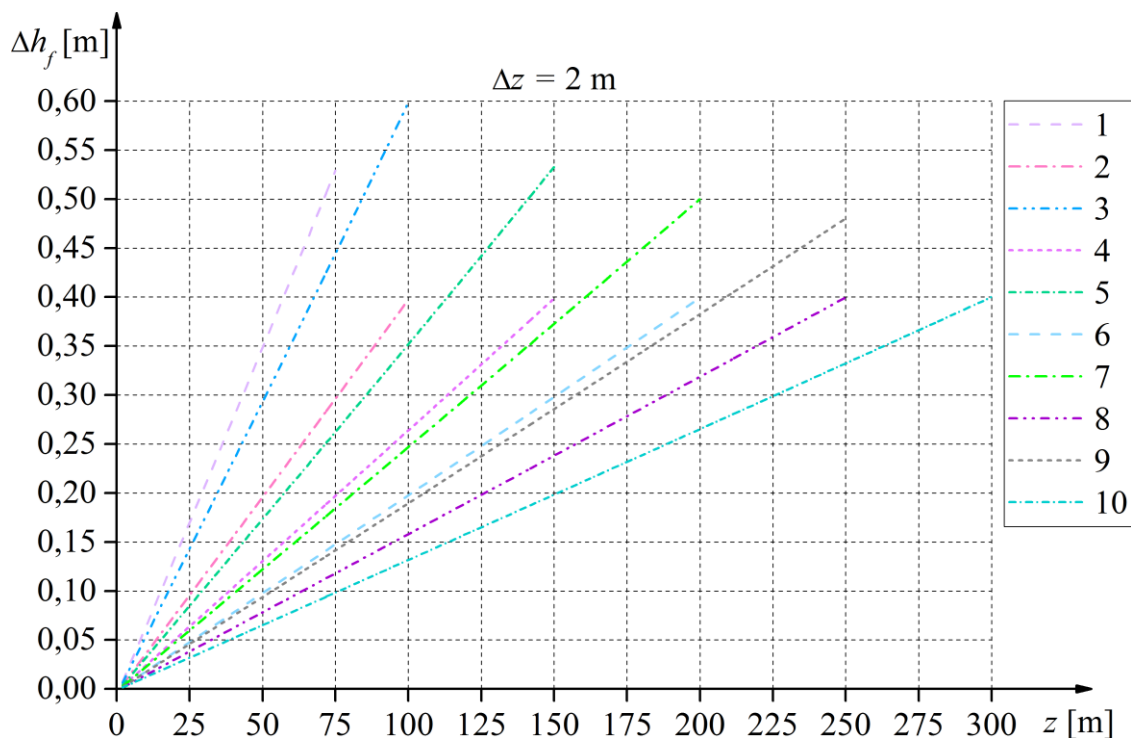
#### **8.4.7. Несигурност услед одступања између латералног правца на којем се мери висина и правца дуж којег се врше мерење и прорачун јачине електричног поља**

У претходним поглављима у којима је анализиран утицај грешке мерења висине фазних проводника узета је у обзир само грешка мерења коју уноси ласерски даљиномер. Међутим, приликом мерења висине може доћи до додатне грешке, која се јавља ако постоји одступање између латералног правца на којем се мери висина и правца дуж којег се врше мерење и прорачун јачине електричног поља. У том случају висина проводника се услед појаве наведене грешке не мери на латералном правцу од интереса, већ на неком суседном латералном правцу који се налази на растојању  $\Delta z$ .

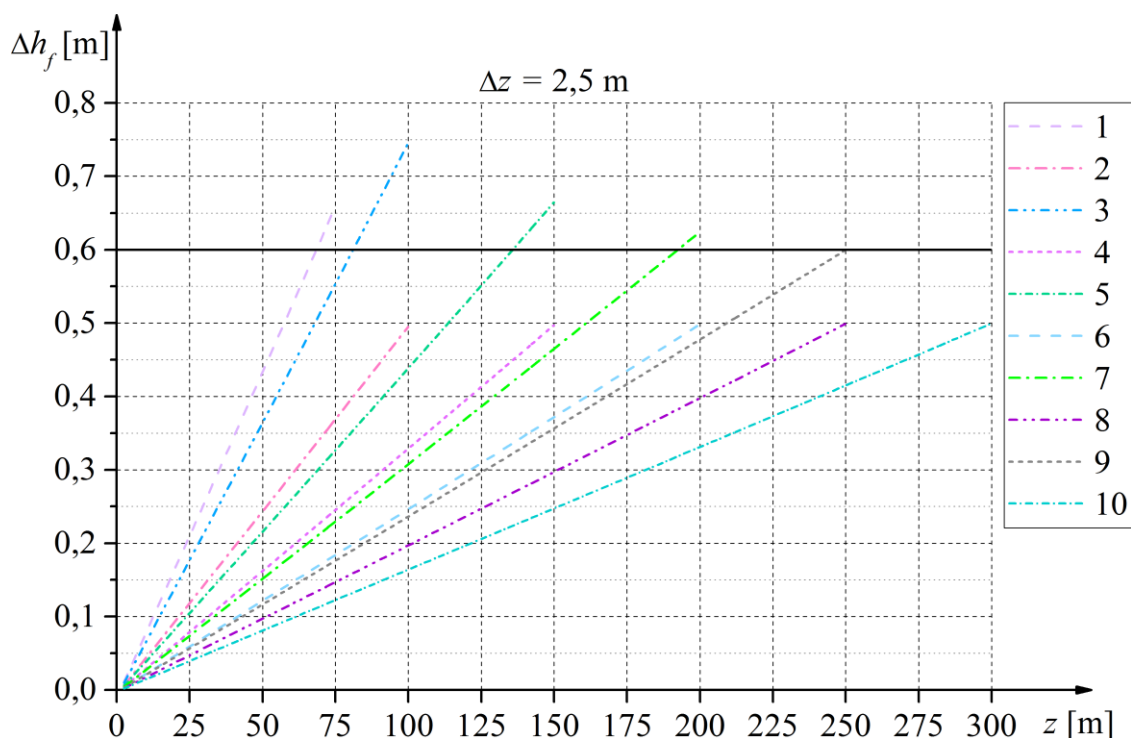
Анализа описаног утицаја спроведена је за десет распона чије су карактеристике дате у табели 6.4. у поглављу 6.6.1. Вредности  $\Delta h_f$  за распоне 1–10 израчунате под претпоставком да  $\Delta z$  износи 2 m, 2,5 m, 3 m и 3,5 m дате су на сликама 8.39–8.42. У случајевима када је  $\Delta z \leq 2$  m, вредности  $\Delta h_f$  ниже су од 0,6 m код свих анализираних распона.

У случају када је  $\Delta z = 2,5$  m, вредности  $\Delta h_f$  веће од 0,6 m јављају се код четири од десет разматраних распона (распони бр. 1, 3, 5 и 7), и то на растојањима која се налазе у опсегу од 6,4 m до 18,8 m од ближег стуба. Растојања до ближег стуба при којима вредност  $\Delta h_f$  постаје већа од 0,6 m за распоне бр. 1, 3, 5 и 7 редом износе 6,4 m, 18,8 m, 14,1 m и 7,4 m.

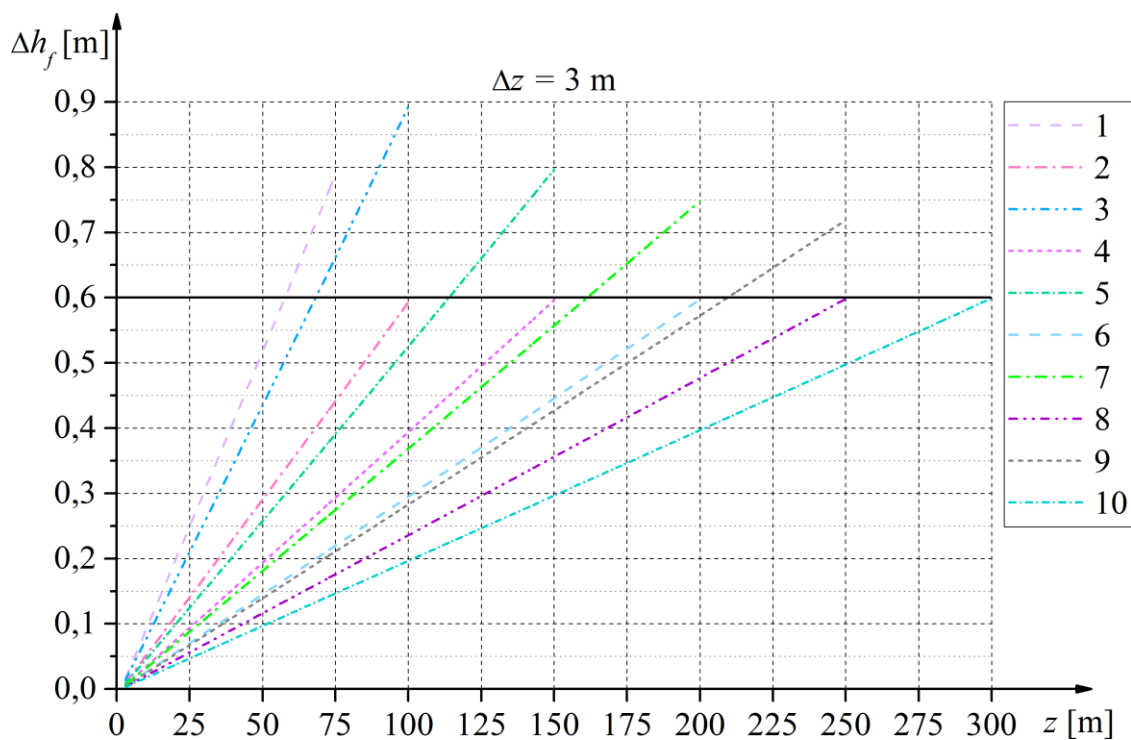
Када  $\Delta z$  износи 3 m, вредности  $\Delta h_f$  веће од 0,6 m јављају се код пет од десет разматраних распона. Растојања до ближег стуба при којима вредност  $\Delta h_f$  постаје већа од 0,6 m за распоне бр. 1, 3, 5, 7 и 9 редом износе 17,2 m, 31,7 m, 35,9 m, 38,5 m и 40,3 m.



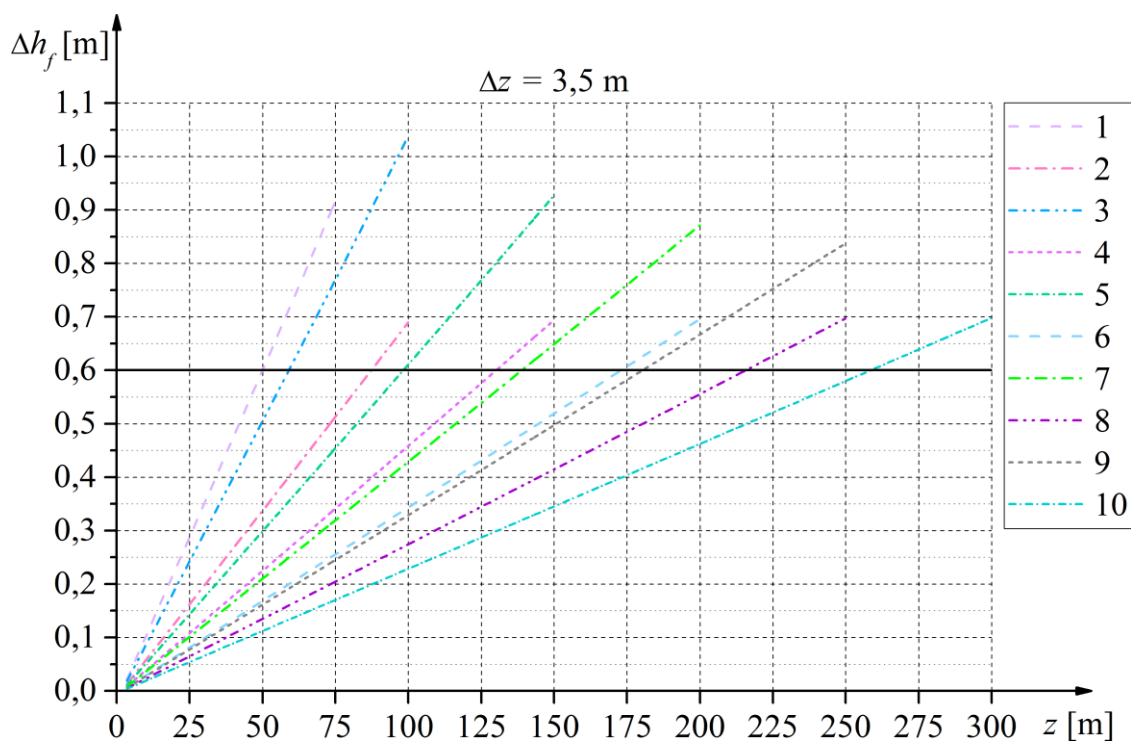
Слика 8.39. Вредности  $\Delta h_f$  за водове 1–10 за  $\Delta z = 2$  m



Слика 8.40. Вредности  $\Delta h_f$  за водове 1–10 за  $\Delta z = 2,5$  m



Слика 8.41. Вредности  $\Delta h_f$  за водове 1–10 за  $\Delta z = 3$  m

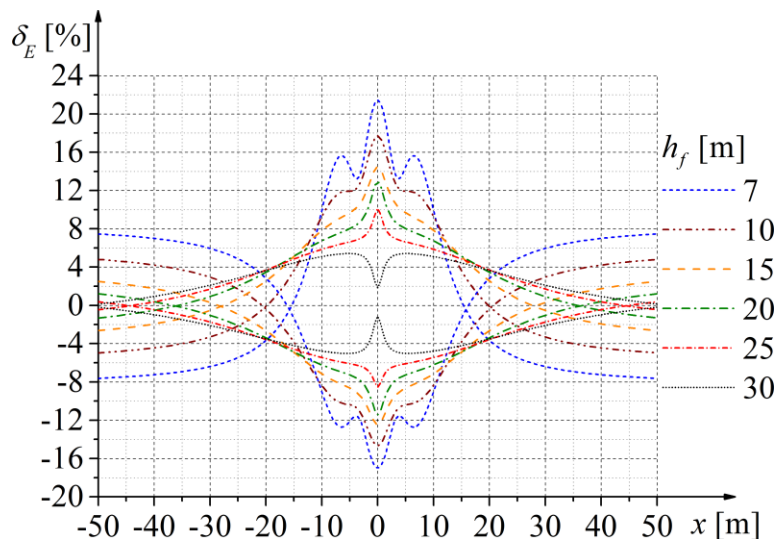


Слика 8.42. Вредности  $\Delta h_f$  за водове 1–10 за  $\Delta z = 3,5$  m

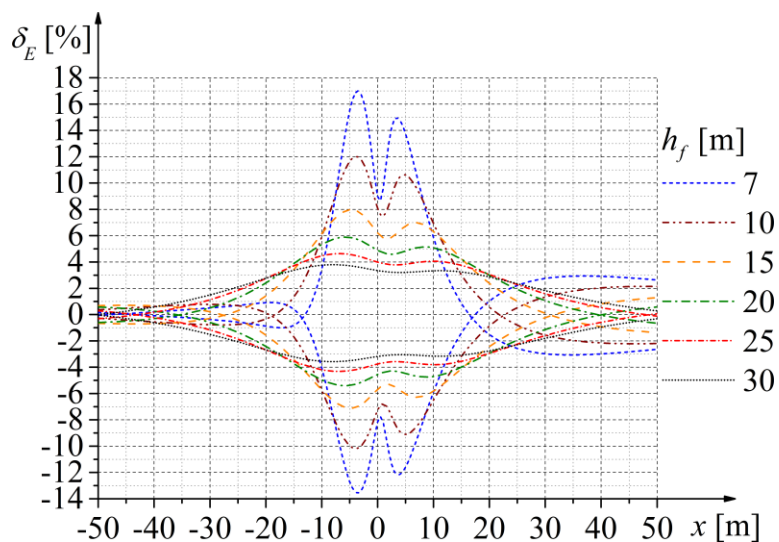
У случају када  $\Delta z$  износи 3,5 m, вредности  $\Delta h_f$  веће од 0,6 m јављају се код свих десет разматраних распона, и то на растојањима која се налазе у опсегу од 12,5 m до 69,5 m од ближег стуба. Растојања до ближег стуба при којима вредност  $\Delta h_f$  постаје већа од 0,6 m за распоне бр. 1–10, редом износе 24,9 m, 12,5 m, 40,9 m, 19,7 m, 51,6 m, 26,9 m, 60,9 m, 34,1 m, 69,5 m и 41,2 m. Може се закључити да су вредности  $\Delta h_f$  ниже од 0,6 m на највећем делу разматраних распона чак и у случају када  $\Delta z$  износи 3,5 m. Вредности  $\Delta h_f$  ниже су од 0,6 m на 59,1–87,5% дужине анализираних распона.

Имајући у виду резултате приказане на сликама 8.39–8.42, као и чињеницу да се највећи број мерења електричног и магнетског поља спроводи у зони која је ближа средини распона, за максималну вредност  $\Delta h_f$  која ће бити коришћена у даљим прорачунима усваја се вредност 0,6 m. Вредности  $\Delta h_f$  веће од 0,6 m могле би да се јаве када се мерења врше у зони која се налази у близини стубова. Због тога је приликом мерења на оваквим локацијама неопходно тежити смањењу ове компоненте несигурности.

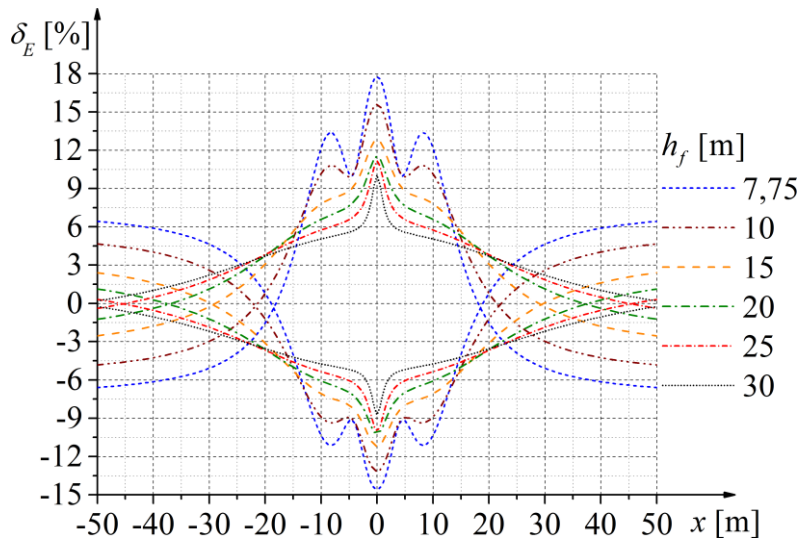
Вредности релативне грешке добијене под претпоставком да  $\Delta h_f$  износи 0,6 m дате су на сликама 8.43–8.48.



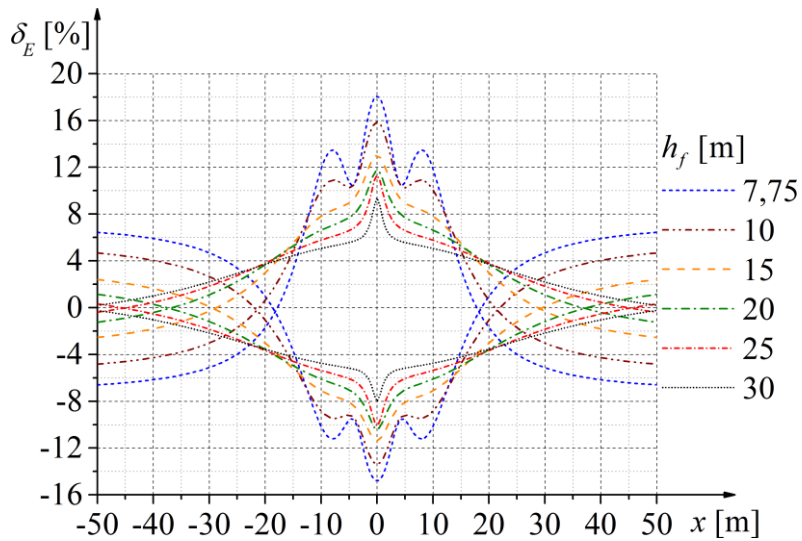
Слика 8.43. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”



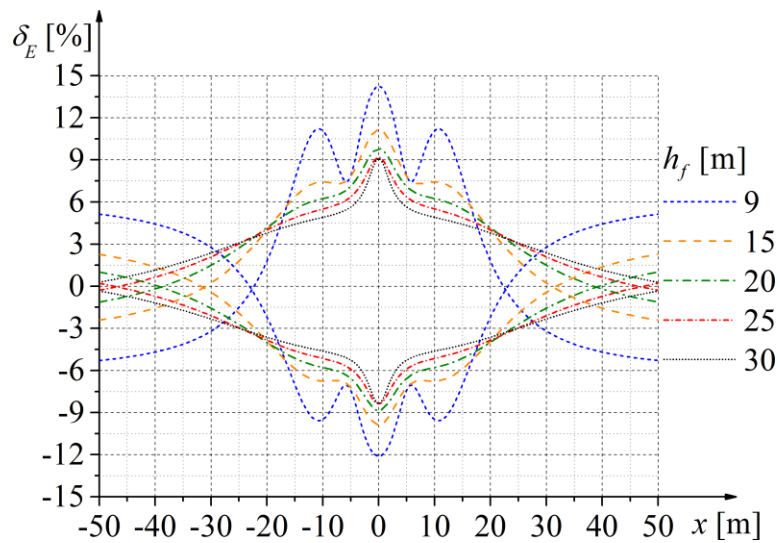
Слика 8.44. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „јела”



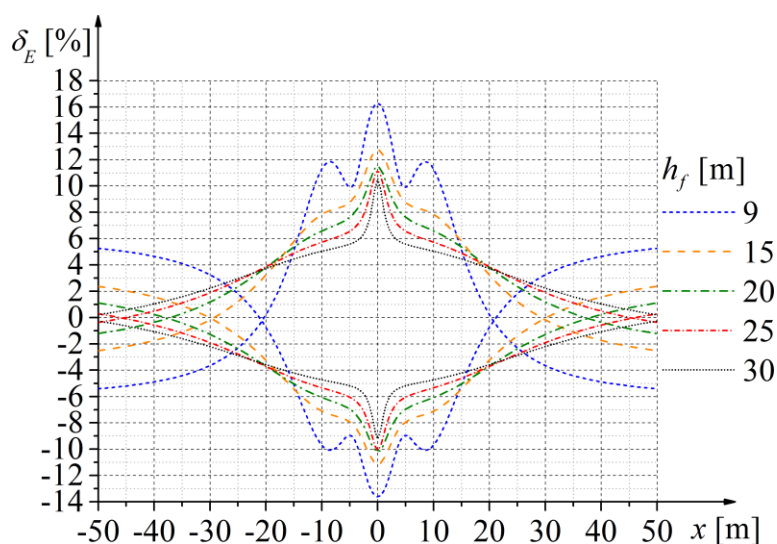
Слика 8.45. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „портал”



Слика 8.46. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „Y”



Слика 8.47. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „портал”



**Слика 8.48.** Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „Y”

Опсези у којима се налазе вредности релативне грешке  $\delta_E$  од  $x = -50$  m до  $x = +50$  m код разматраних надземних водова, дати су у табели 8.11.

**Табела 8.11.** Максимални опсези грешке  $\delta_E$  добијени за  $\Delta h_f = \pm 0,6$  m

$h_f$ [m]	110 kV		220 kV		400 kV	
	Портал	Јела	Портал	Y	Портал	Y
7	-17,02–21,46	-13,57–17,01	/	/	/	/
7,75	/	/	-14,59–17,76	-14,83–18,11	/	/
9	/	/	/	/	-12,12–14,26	-13,62–16,28
10	-14,68–17,74	-10,19–12,01	-13,17–15,61	-13,38–15,90	/	/
15	-12,50–14,52	-7,11–7,97	-11,21–12,85	-11,38–13,07	-9,88–11,16	-11,16–12,78
20	-11,45–13,08	-5,40–5,89	-10,28–11,54	-10,45–11,75	-8,88–9,85	-10,26–11,51
25	-8,54–10,16	-4,32–4,64	-10,03–11,17	-10,13–11,32	-8,39–9,20	-10,09–11,22
30	-5,02–5,42	-3,58–3,80	-8,73–10,05	-8,00–9,38	-8,40–9,14	-9,22–10,54

На основу приказаних резултата може се закључити да су вредности релативне грешке значајне, због чега је приликом мерења висине фазних проводника неопходно водити рачуна да се овај утицај сведе на најмању могућу меру. Смањење овог утицаја се може постићи тако што се приликом мерења висине ласерски даљиномер налази на сталку који се поставља на позицију латералног правца на којем се врше мерења електричног и магнетског поља, при чему је омогућено померање даљиномера само у  $x$ -у равни.

## 8.5. Несигурност мерења растојања између фазних проводника

### 8.5.1. Метода за израчунавање утицаја грешке мерења хоризонталног растојања између фазних проводника на резултате прорачуна јачине електричног поља

Ради одређивања грешке мерења хоризонталног растојања  $\Delta l_h$ , на основу слике 8.27. може се написати следећи израз:

$$l_h = l_s \cdot \cos(\alpha) \quad (8.17)$$

Диференцирањем претходне једначине добија се следећи израз:

$$dl_h = dl_s \cdot \cos(\alpha) - l_s \cdot \sin(\alpha) \cdot d\alpha \quad (8.18)$$

који се такође може написати и на следеће начине:

$$dl_h = dl_s \cdot \frac{l_h}{l_s} - l_s \cdot \frac{l_v}{l_s} \cdot d\alpha \quad (8.19)$$

$$dl_h = \frac{dl_s}{l_s} \cdot l_h - (h - l_d) \cdot d\alpha \quad (8.20)$$

Ради избегавања инфинитезимала  $dl_v$ ,  $dl_s$  и  $d\alpha$ , диференцијална једначина (8.20) конвертована је у еквивалентну једначину с коначним разликама:

$$\Delta l_h = \frac{\Delta l_s}{l_s} \cdot l_h - (h - l_d) \cdot \Delta \alpha \quad (8.21)$$

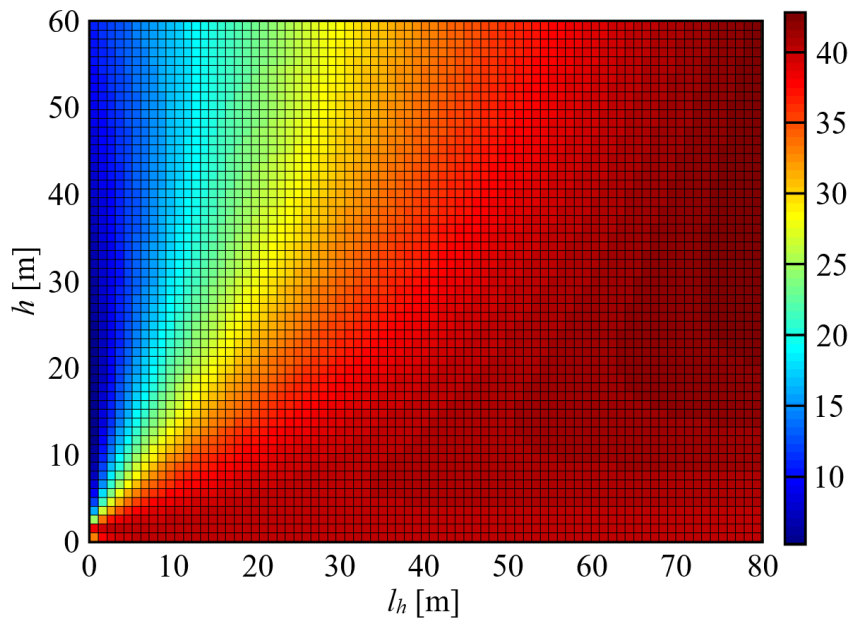
Из израза (8.21) види се да грешка  $\Delta l_h$  није константна, зато што зависи од растојања до објекта  $l_s$  и угла  $\alpha$ , због чега је ову грешку потребно израчунати за сваки конкретан случај.

У наставку је израчуната вредност грешке  $\Delta l_h$  за случај када се за мерење користи ласерски даљиномер који има грешку мерења растојања  $\Delta l_s = \pm 0,4$  m и грешку мерења угла  $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$ . Приликом прорачуна је усвојено да се ласерски даљиномер налази на висини од 1,7 m изнад тла.

Пошто се грешка мерења растојања  $\Delta l_s$  налази у опсегу од -0,4 m до +0,4 m, а грешка мерења угла  $\Delta \alpha$  у опсегу од  $-0,1^\circ$  до  $+0,1^\circ$ , грешка мерења хоризонталног растојања израчуната је за следећа четири гранична случаја:

- 1)  $\Delta l_s = +0,4$  m,  $\Delta \alpha = +0,1^\circ$ ;
- 2)  $\Delta l_s = -0,4$  m,  $\Delta \alpha = +0,1^\circ$ ;
- 3)  $\Delta l_s = +0,4$  m,  $\Delta \alpha = -0,1^\circ$  и
- 4)  $\Delta l_s = -0,4$  m,  $\Delta \alpha = -0,1^\circ$ .

На основу прорачуна за ова четири случаја, може се одредити максимални опсег грешке, одређивањем његове доње и горње границе. Пошто је разлика између апсолутних вредности доње и горње границе мања или једнака 1 mm, само је горња граница приказана на слици 8.49, и то за све анализирание вредности висине проводника и растојања до њега.

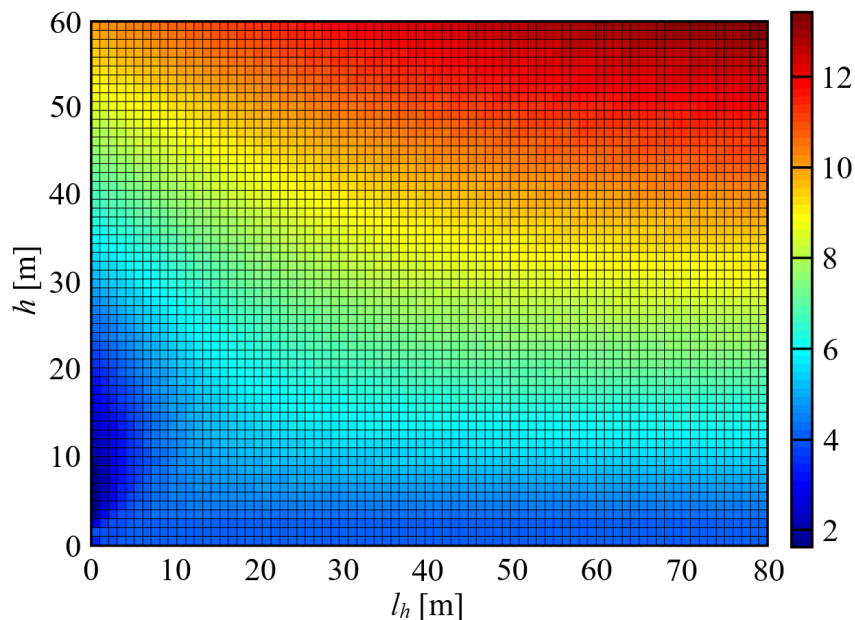


**Слика 8.49.** Грешка мерења хоризонталног растојања  $\Delta l_h$  [cm] за ласерски даљиномер с декларисаним грешкама  $\Delta l_s = \pm 40$  cm и  $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$

Прорачун је спроведен за још два ласерска даљиномера следећих карактеристика:

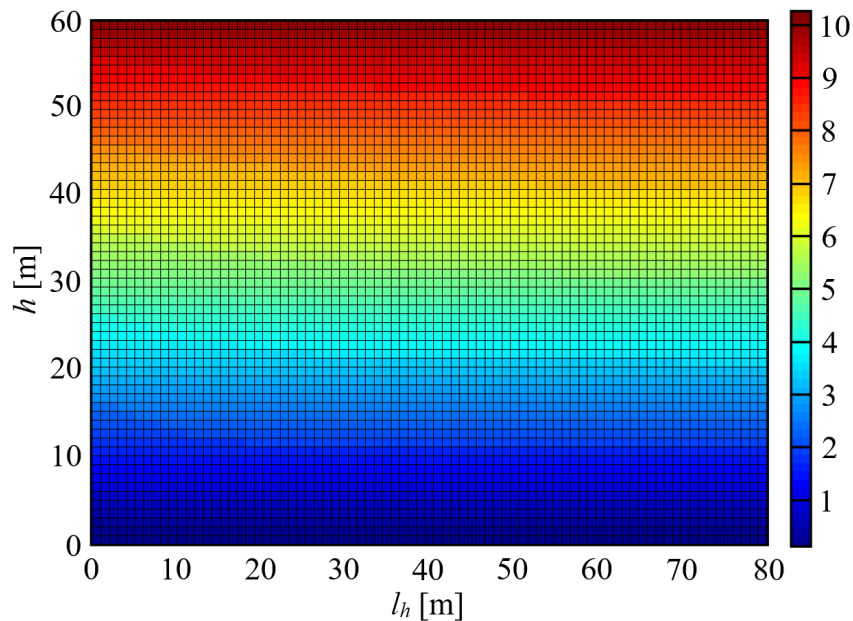
- 1)  $\Delta l_s = \pm 4$  cm,  $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$ ;
- 2)  $\Delta l_s = \pm 1$  mm,  $\Delta \alpha = +0,1^\circ$ .

Израчунате вредности грешке мерења хоризонталног растојања  $\Delta l_h$  за ова два даљиномера приказане су на сликама 8.50. и 8.51.



**Слика 8.50.** Грешка мерења хоризонталног растојања  $\Delta l_h$  [cm] за ласерски даљиномер с декларисаним грешкама  $\Delta l_s = \pm 4$  cm и  $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$

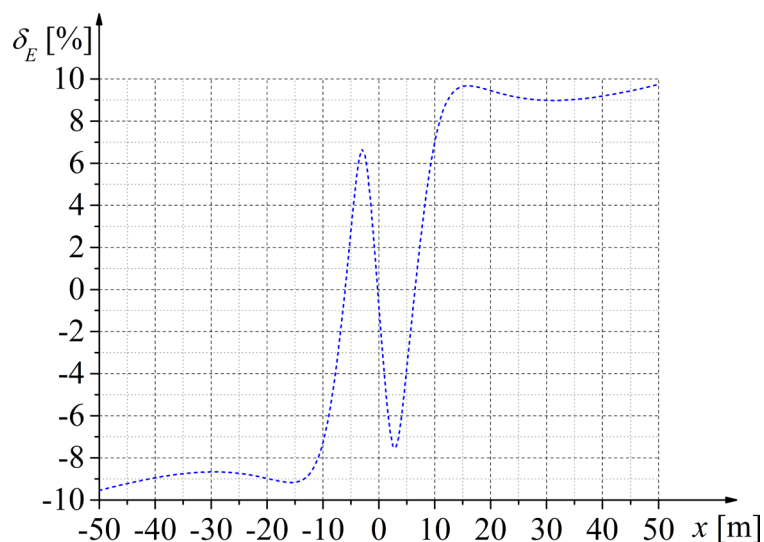




Слика 8.51. Грешка мерења хоризонталног растојања  $\Delta l_h$  [cm] за ласерски даљиномер с декларисаним грешкама  $\Delta l_s = \pm 1$  mm и  $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$

### 8.5.2. Резултати прорачуна

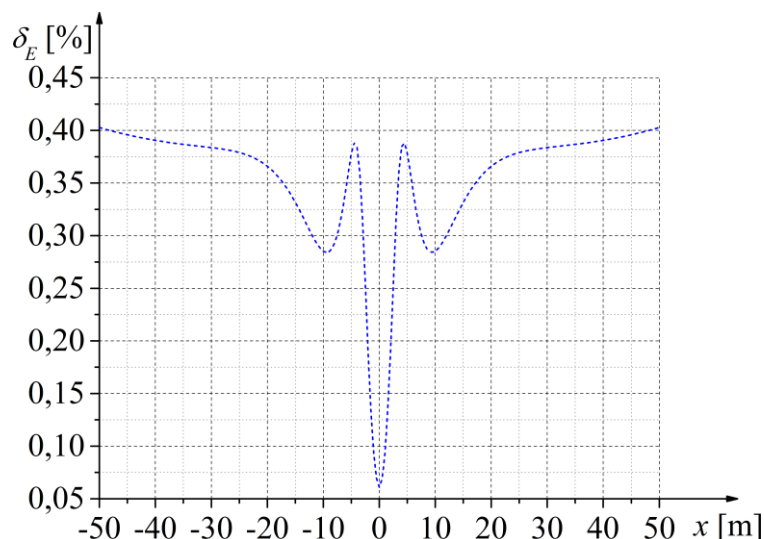
Прорачун је спроведен за случај надземног вода напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” и висинама фазних проводника од 7 m. Ради добијања највећих вредности грешке претпостављено је да грешка мерења хоризонталног растојања износи  $\pm 40$  cm. Тачне вредности  $x$  координата фазних проводника износе -6,7 m, 0 m, 6,7 m. Претпостављено је да су услед грешке мерења хоризонталног растојања измерена погрешна растојања до фазних проводника и да грешка у неким случајевима износи +40 cm, а у неким -40 cm, па  $x$  координате фазних проводника добијене на основу ових мерења износе -6,3 m, -0,4 m, +7,1 m. Релативна одступања резултата прорачуна за овај случај дата су на слици 8.52. Види се да се у анализираном примеру релативна одступања налазе у опсегу од -10% до +10%. Због тога је увек када је то могуће потребно одредити растојања између проводника на основу њихових растојања која су дата на пројектима стубова.



Слика 8.52. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” и висинама фазних проводника од 7 m

## 8.6. Несигурност мерења висине заштитних проводника

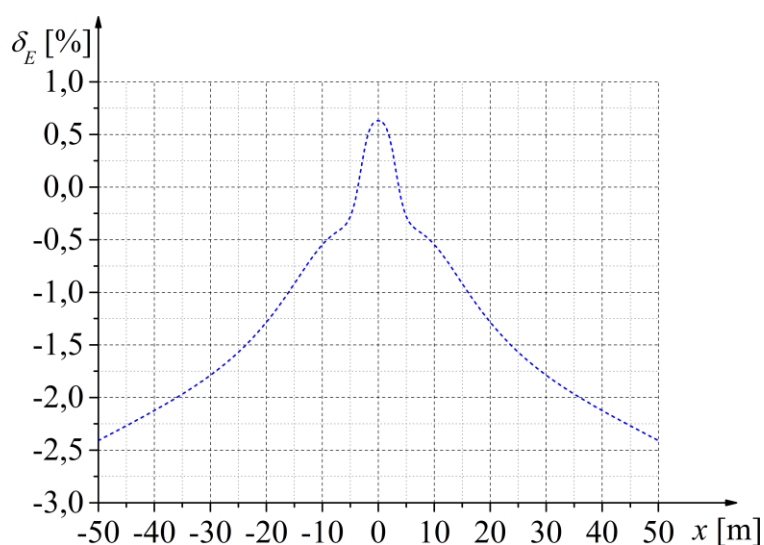
Прорачун је спроведен за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” и висинама фазних проводника од 7 m. Претпостављено је да грешка мерења висине износи +40 cm и да су мерењем висина заштитних проводника уместо висина од 11,2 m добијене висине од 11,6 m. Релативна одступања резултата прорачуна за овај случај дата су на слици 8.53. Види се да су релативна одступања у свим тачкама мања од 0,41%.



Слика 8.53. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” и висинама фазних проводника од 7 m

## 8.7. Несигурност мерења растојања између заштитних проводника

Прорачун је спроведен за случај вода напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” и висинама фазних проводника од 7 m. Тачне вредности  $x$  координата заштитних проводника износе -4,5 m и +4,5 m. Претпостављено је да су услед грешке мерења хоризонталног растојања измерена погрешна растојања до заштитних проводника и да грешка у једном случају износи -40 cm, а у другом +40 cm, па  $x$  координате заштитних проводника добијене мерењем износе -4,9 m и +4,9 m. Релативна одступања резултата прорачуна дата су на слици 8.54. У зони од -50 m до +50 m вредности  $\delta_E$  се налазе у опсегу од -2,41% до +0,63%, док се у зони од -10 m до +10 m налазе у опсегу од -0,55% до +0,55%.



Слика 8.54. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” и висинама фазних проводника од 7 m

## 8.8. Несигурност мерења напона надземног вода

Прорачун јачине електричног поља може се вршити за два случаја. Први случај подразумева прорачун за услове у време мерења, док се други случај односи на прорачун за најнеповољније услове са аспекта изложености људи. Уколико се прорачун јачине електричног поља спроводи за услове који су постојали у време мерења, податак о напону се добија од компаније која је власник надземног вода. При томе постоји одређена несигурност мерења напона, која зависи од грешке мерних напонских трансформатора. Методологија за израчунавање ове компоненте несигурности, као и добијени резултати, који су приказани у овом поглављу, дати су у [80].

### 8.8.1. Максималне дозвољене грешке напонских мерних трансформатора

Напонска грешка напонских мерних трансформатора ( $\varepsilon$ ) дефинише се као грешка коју мерни трансформатор уноси у мерење и која потиче од чињенице да стварни однос трансформације није једнак назначеном односу трансформације [126]. Назначени однос трансформације напонских мерних трансформатора ( $k_r$ ) представља однос назначеног примарног напона и назначеног секундарног напона. С друге стране, стварни однос трансформације представља однос стварног примарног и стварног секундарног напона. Напонска грешка, изражена у процентима, дата је следећим изразом [127], [128]:

$$\varepsilon[\%] = \frac{k_r \cdot U_s - U_p}{U_p} \cdot 100\% \quad (8.22)$$

где су:

$k_r$  – назначени однос трансформације;

$U_p$  – стварни примарни напон;

$U_s$  – стварни секундарни напон када је примењен напон  $U_p$  под условима мерења.

Границе напонске грешке за индуктивне и капацитивне напонске мерне трансформаторе приказане су у табели 8.12, за различите класе тачности ових трансформатора. Вредности дате у табели 8.12. прописане су у [127] и [128].

**Табела 8.12.** Границе напонске грешке индуктивних и капацитивних мерних напонских трансформатора [127], [128]

Индуктивни		Капацитивни	
Класа тачности	Напонска грешка	Класа тачности	Напонска грешка
0,1	±0,1%	/	/
0,2	±0,2%	0,2	±0,2%
0,5	±0,5%	0,5	±0,5%
1,0	±1,0%	1,0	±1,0%
3,0	±3,0%	3,0	±3,0%

## 8.8.2. Метода за израчунавање утицаја грешке мерења напона на резултате прорачуна јачине електричног поља

Утицај грешке мерења напона одређен је прорачуном јачине електричног поља за типичне геометрије надземних водова, које су дате на сликама 4.3, 4.4. и 4.5. Подаци о овим водовима дати су у табели 4.1, а висине фазних и заштитних проводника у табелама 4.2. и 4.3. Прорачуни су спроведени дуж латералног правца који се налази на висини од 1 m изнад тла, од  $x = -50$  m до  $x = +50$  m.

Пошто се напонски мерни трансформатори класе 3 веома ретко користе, разматрани су мерни трансформатори класе 1, будући да они представљају најнеповољнији реалан случај. Према подацима датим у табели 8.12, напонска грешка у овом случају износи  $\pm 1\%$ .

Иницијални прорачуни спроведени су за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”, ради одређивања утицаја различитих фактора на резултате прорачуна електричног поља.

Прорачуни су прво спроведени без урачунавања напонске грешке, и на тај начин је добијена тачна вредност јачине електричног поља за анализирани случај ( $E_t$ ). Након тога, прорачуни су поновљени узимајући у обзир напонску грешку, с циљем израчунавања вредности јачине електричног поља ( $E$ ) које се добијају када мерни трансформатор мери са максималном декларисаном грешком. На бази ових резултата, релативна грешка  $\delta_E$  израчунава се применом израза (8.1).

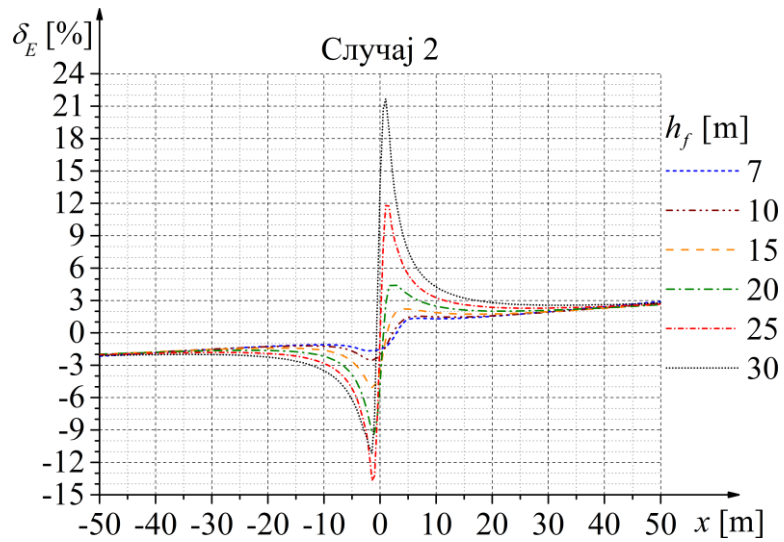
У случају када је напон у све три фазе измерен с напонском грешком од  $+1\%$ , релативна грешка  $\delta_E$  такође износи  $+1\%$  у свим тачкама у којима се врши прорачун, што је и очекивано. Међутим, такође је потребно анализирати и случајеве када вредност напонске грешке у свакој фази износи или  $-1\%$  или  $+1\%$ , као што је приказано у табели 8.13.

**Табела 8.13.** Анализирани случајеви

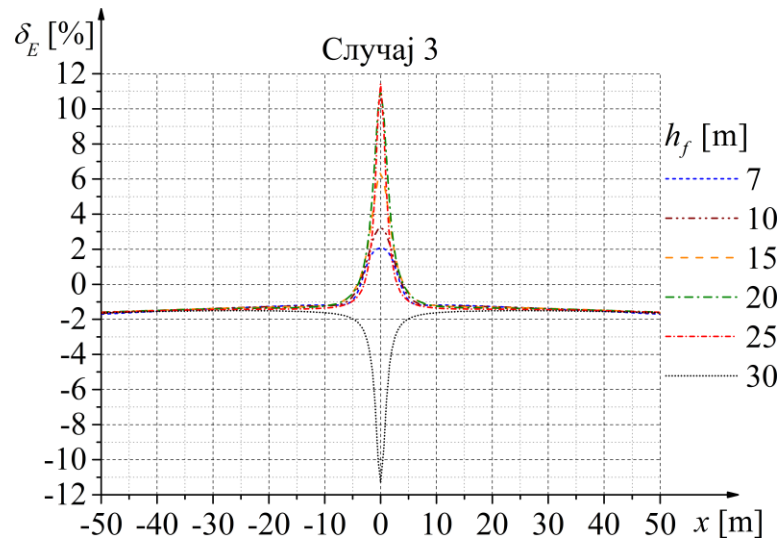
Случај	Фаза 0	Фаза 4	Фаза 8
1	-1%	-1%	-1%
2	-1%	-1%	+1%
3	-1%	+1%	-1%
4	-1%	+1%	+1%
5	+1%	-1%	-1%
6	+1%	-1%	+1%
7	+1%	+1%	-1%
8	+1%	+1%	+1%

У случају 1, где је напон у све три фазе мерен са грешком од  $-1\%$ , релативна грешка  $\delta_E$  такође износи  $-1\%$  у свим тачкама у којима се врши прорачун. Слично томе, релативна грешка  $\delta_E$  износи  $+1\%$  у случају 8, као што је претходно речено. Међутим, у случајевима 2–7, када напонске грешке мерних трансформатора у различитим фазама имају различит знак, грешка  $\delta_E$  нема константну вредност дуж  $x$  осе, тј. зависи од позиције тачке за коју се врши прорачун, као последица суперпозиције електричног поља.

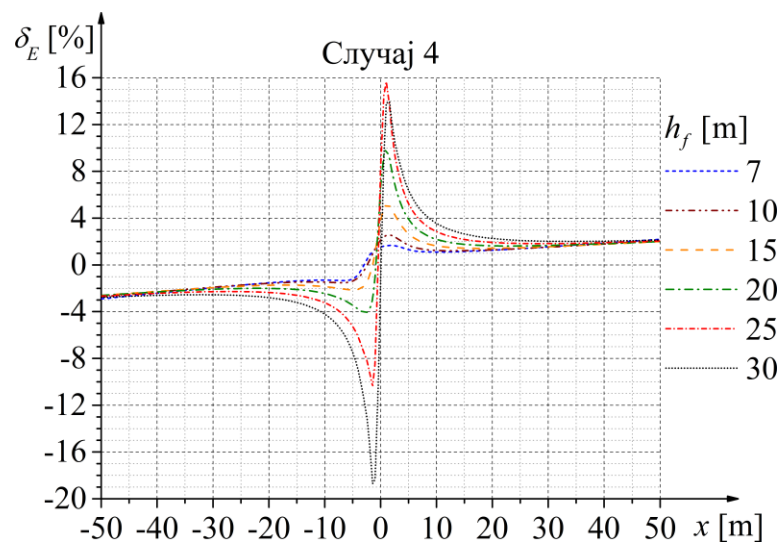
На сликама 8.55–8.60. приказане су релативне грешке за случајеве 2–7. Криве које се односе на случајеве 2 и 5 међусобно су симетричне у односу на осу  $x = 0$  m, што је и очекивано пошто је и распоред проводника такође симетричан у односу на исту осу. Исто важи и за случајеве 4 и 7. Криве које се односе на случај 3 симетричне су у односу на осу  $x = 0$  m, што такође важи и за криве које се односе на случај 6.



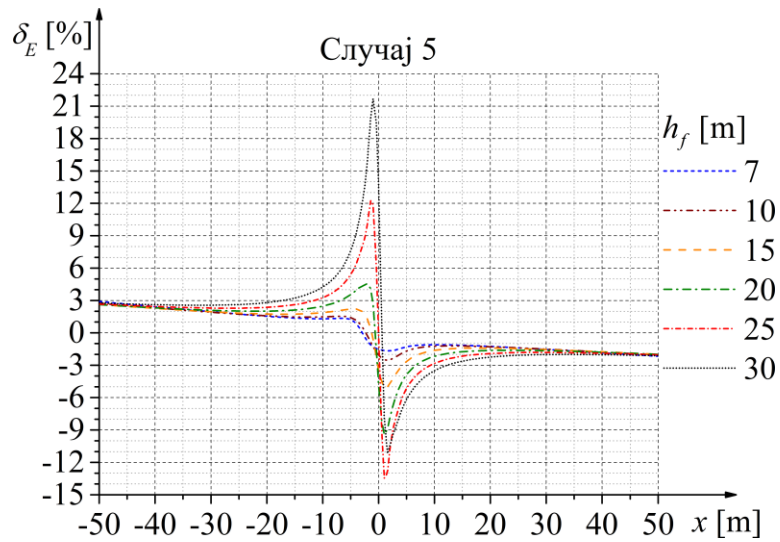
Слика 8.55. Релативне грешке  $\delta_E$  за случај 2 за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”



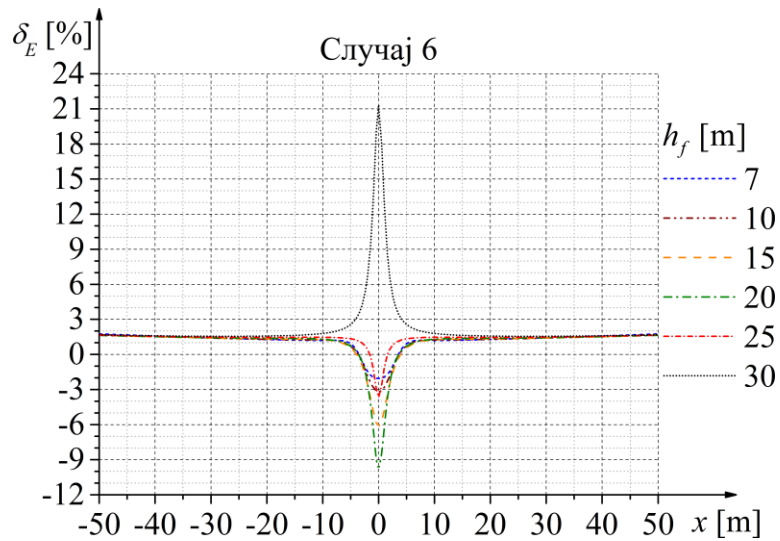
Слика 8.56. Релативне грешке  $\delta_E$  за случај 3 за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”



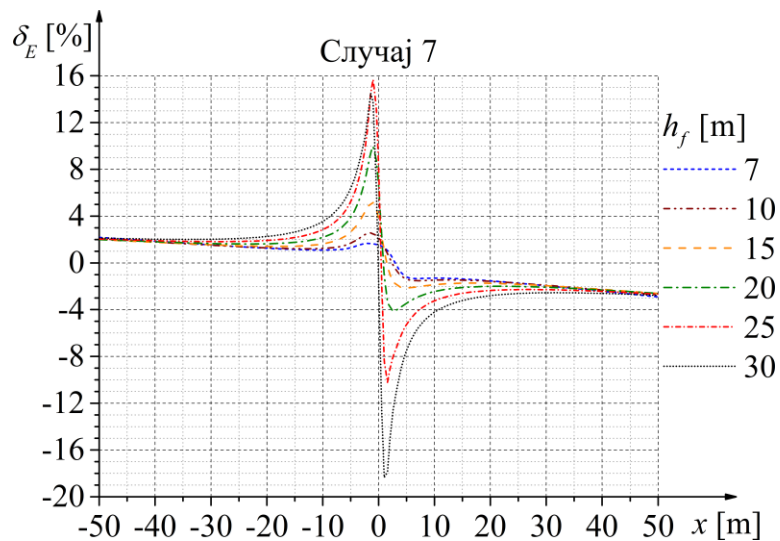
Слика 8.57. Релативне грешке  $\delta_E$  за случај 4 за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”



Слика 8.58. Релативне грешке  $\delta_E$  за случај 5 за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”



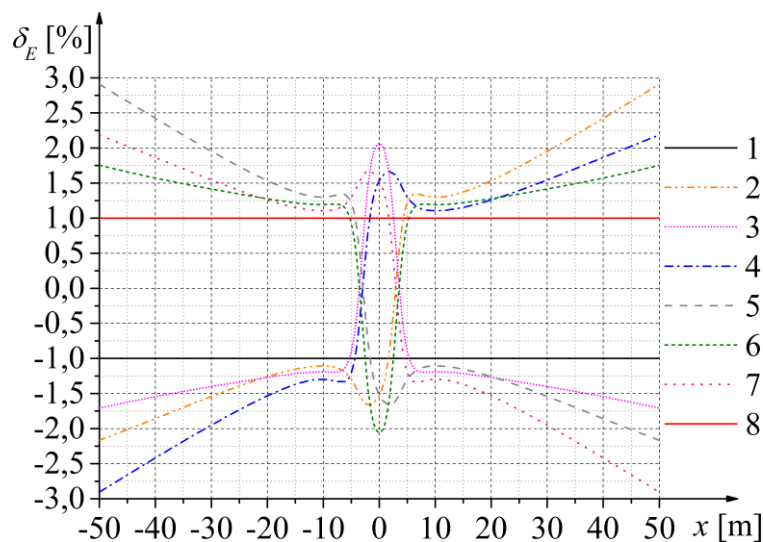
Слика 8.59. Релативне грешке  $\delta_E$  за случај 6 за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”



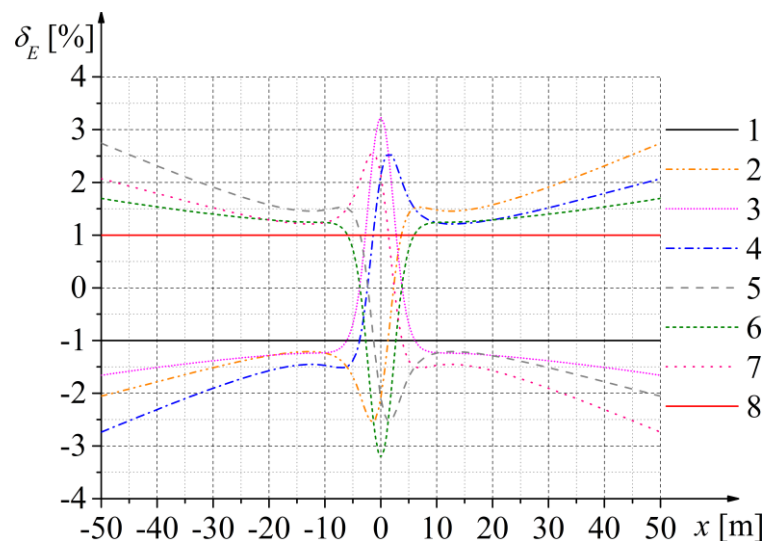
Слика 8.60. Релативне грешке  $\delta_E$  за случај 7 за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”

Графикони приказани на сликама 8.55–8.60. јасно показују како се у конкретном случају мења релативна грешка при различитим висинама фазних проводника ( $h_f$ ). Генерално, може се закључити да у конкретном случају релативна грешка расте с порастом висина фазних проводника. То је разумљиво, имајући у виду да с порастом висина фазних проводника јачина електричног поља на висини од 1 m изнад тла опада, док напонска грешка остаје непромењена.

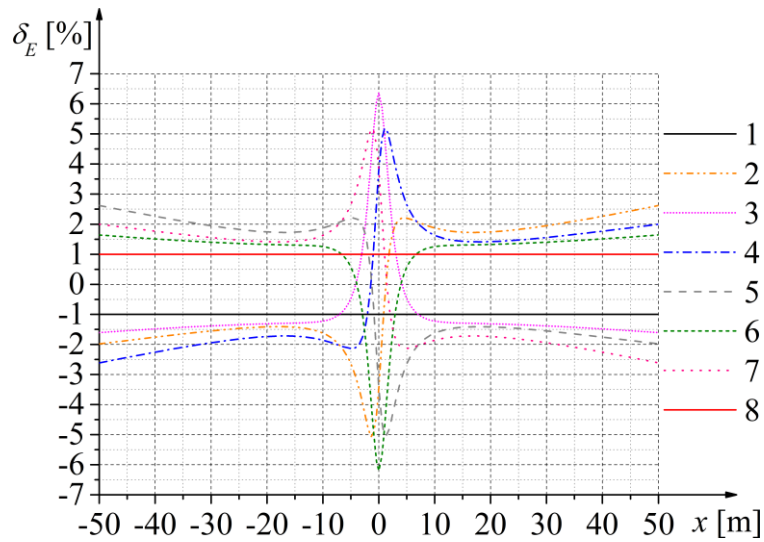
Међутим, у реалности, напонске грешке мерних трансформатора у различитим фазама нису познате. Могуће је добити информацију о класи тачности напонских мерних трансформатора, али знак и тачна вредност напонске грешке у различитим фазама остају непознати. Зато у конкретној ситуацији није могуће одредити који је од наведених осам случајева релевантан. С друге стране, висине фазних проводника у конкретном случају су познате. Из тог разлога су графикони који приказују релативну грешку за све разматране случајеве 1–8, као и за фиксну висину проводника, примеренији за практичну употребу. Овакви графикони, који приказују релативне грешке за све разматране случајеве и за висине фазних проводника из табеле 4.2, приказани су на сликама 8.61–8.66.



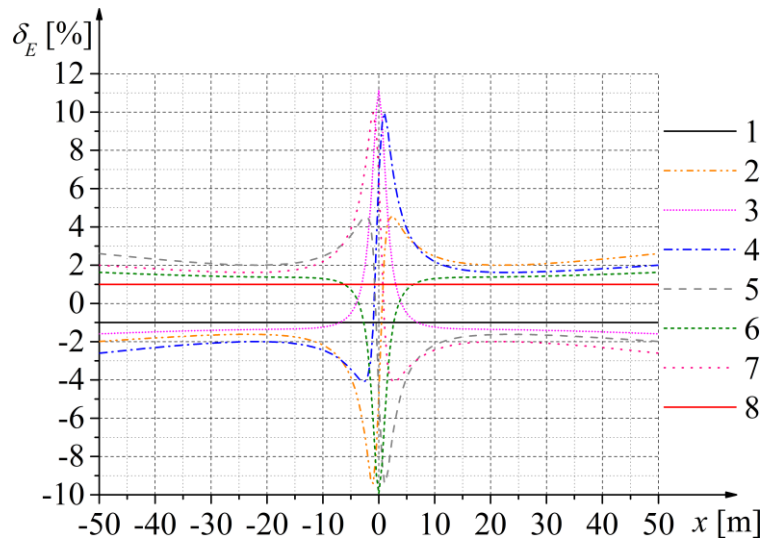
**Слика 8.61.** Релативне грешке  $\delta_E$  за случајеве 1–8 за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” и висинама фазних проводника од 7 m



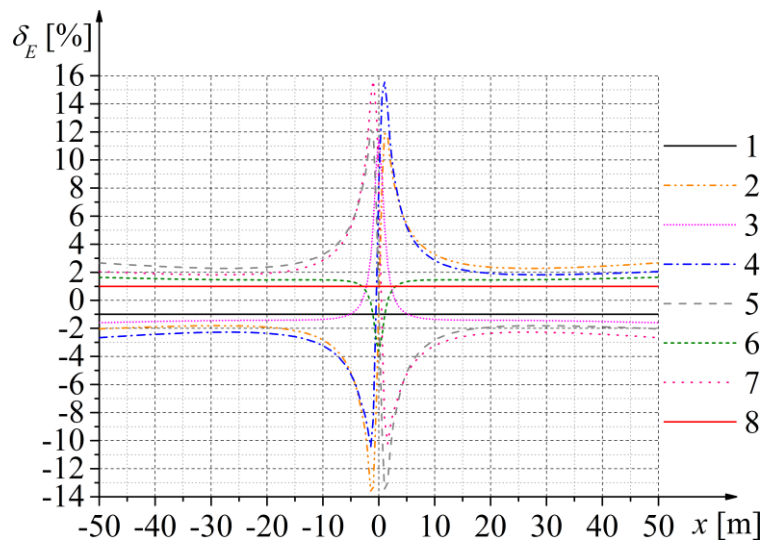
**Слика 8.62.** Релативне грешке  $\delta_E$  за случајеве 1–8 за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” и висинама фазних проводника од 10 m



Слика 8.63. Релативне грешке  $\delta_E$  за случајеве 1–8 за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” и висинама фазних проводника од 15 m

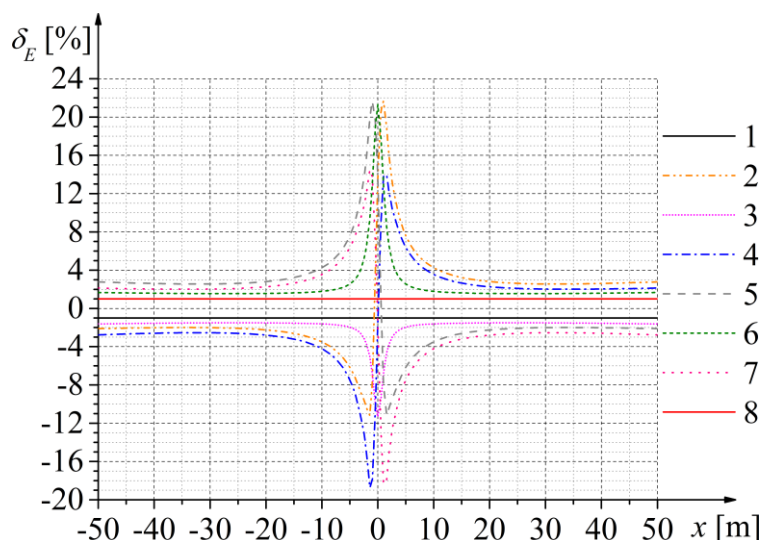


Слика 8.64. Релативне грешке  $\delta_E$  за случајеве 1–8 за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” и висинама фазних проводника од 20 m



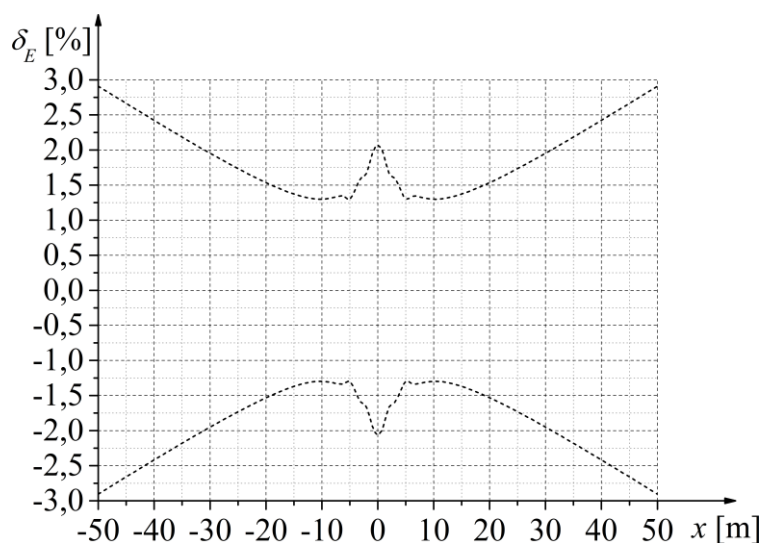
Слика 8.65. Релативне грешке  $\delta_E$  за случајеве 1–8 за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” и висинама фазних проводника од 25 m





**Слика 8.66.** Релативне грешке  $\delta_E$  за случајеве 1–8 за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” и висинама фазних проводника од 30 m

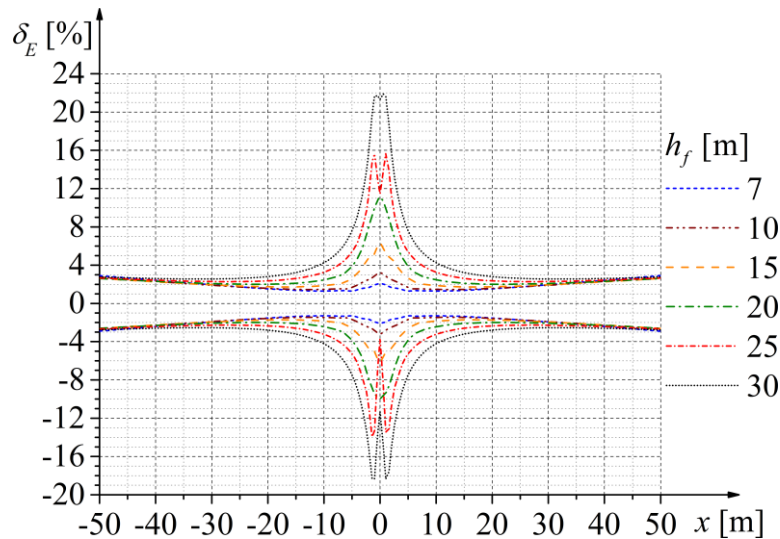
На основу графика приказаних на сликама 8.61–8.66. може се одредити опсег релативне грешке  $\delta_E$  за место које се налази на одређеном растојању од осе вода при датим висинама фазних проводника. На основу графика приказаних на слици 8.61, који се односе на вод са висинама фазних проводника од 7 m, може се одредити максимални опсег унутар којег се налазе релативне грешке које се односе на све анализирани случајеве за дату висину проводника. Овакав максимални опсег грешке приказан је на слици 8.67.



**Слика 8.67.** Опсег који обухвата вредности грешке за случајеве 1–8 за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” и висинама фазних проводника од 7 m

Одређивање опсега који обухвата релативне грешке за све анализирани случајеве (1–8) може се поновити и за остале разматране висине фазних проводника, чиме се добијају графикони приказани на слици 8.68.

Када се фазни проводници налазе на висини од 7 m изнад тла, релативна грешка се креће од -2,90% до 2,91%. Међутим, када се фазни проводници налазе на висини од 30 m, релативна грешка се налази у опсегу од -18,34% до 21,68%.

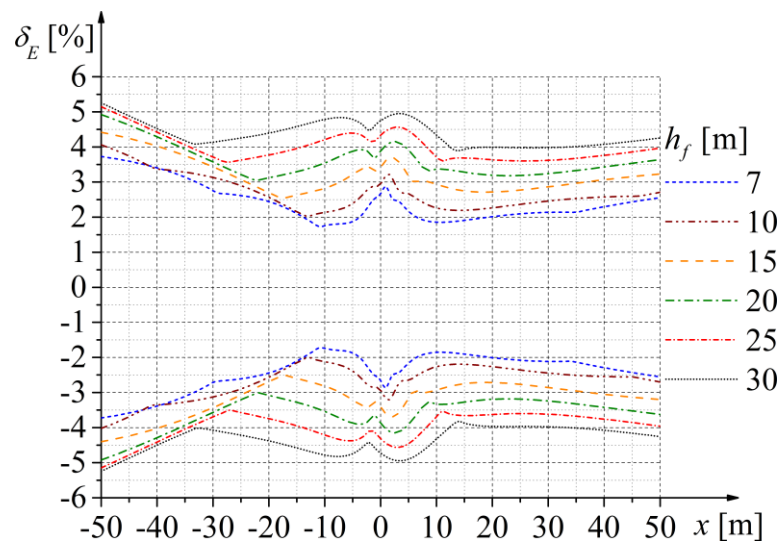


Слика 8.68. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал“

На основу резултата приказаних на слици 8.68, може се уочити да у случајевима када напонске грешке мерних трансформатора у различитим фазама имају различит знак, вредности релативне грешке  $\delta_E$  могу знатно премашити опсег од -1% до +1%, као последица суперпозиције електричног поља.

### 8.8.3. Резултати прорачуна за мерне трансформаторе класе 1

Претходна анализа поновљена је за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „јела“. Опсежи који обухватају грешке за све анализиране случајеве, и то за различите висине фазних проводника, приказани су на слици 8.69. Висине дате на слици 8.69. представљају висине најнижег фазног проводника.

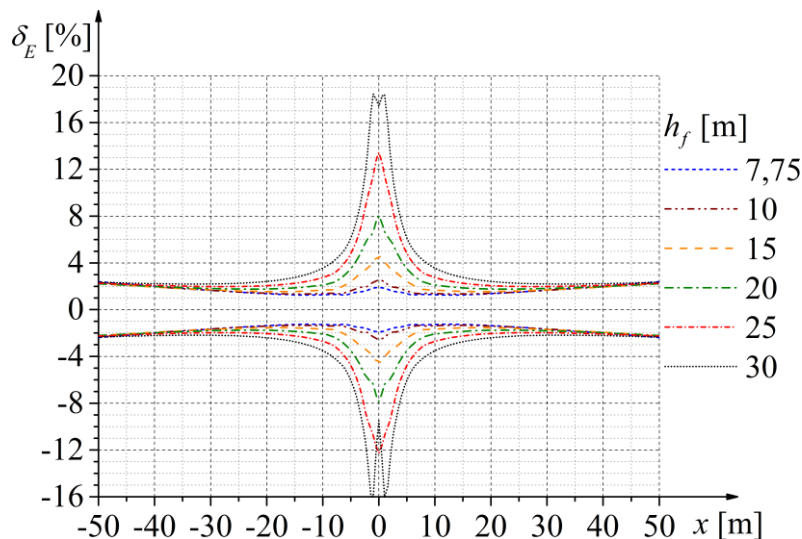


Слика 8.69. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „јела“

У случају када висина најнижег фазног проводника износи 7 m, релативна грешка се налази у опсегу од -3,72% до 3,73%, када се узму у обзир сви разматрани случајеви. Када се најнижи фазни проводник налази на висини од 30 m, грешка се креће од -5,25% до 5,26%.

У случају надземног вода са стубовима типа „јела”, опсег релативне грешке се такође повећава са повећањем висине фазних проводника. Међутим, ово повећање није толико изражено као у претходном случају који се односио на вод са стубовима типа „портал”.

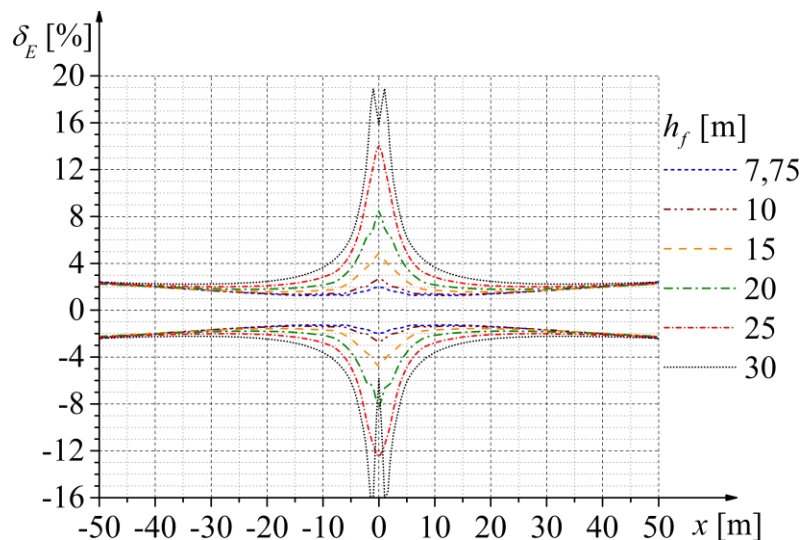
Резултати добијени за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „портал” приказани су на слици 8.70.



**Слика 8.70.** Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „портал”

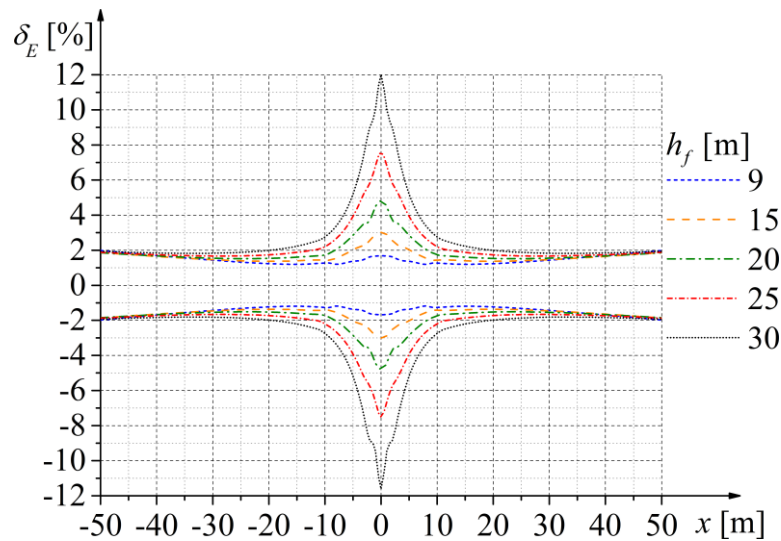
У случају када се фазни проводници налазе на висини од 7,75 m, релативна грешка се налази у опсегу од -2,39% до 2,39%. С друге стране, када се проводници налазе на висини од 30 m, грешке су знатно веће и налазе се у опсегу од -15,99% до 18,43%.

Резултати добијени за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „Y” приказани су на слици 8.71. Добијени резултати су веома слични резултатима приказаним на слици 8.70, који се односе на надземни вод са стубовима типа „портал”, због веома сличне геометрије ових стубова. У случају најмање висине фазних проводника, релативна грешка варира од -2,42% до 2,42%, док у случају највеће висине проводника варира од -15,96% до 18,91%.



**Слика 8.71.** Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „Y”

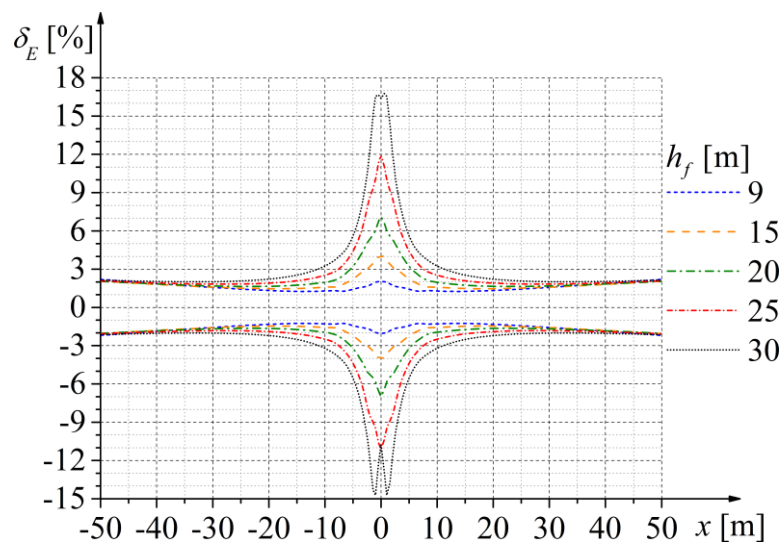
Резултати прорачуна који се односе на надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „портал” приказани су на слици 8.72.



**Слика 8.72.** Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „портал”

У случају најмањих висина фазних проводника од 9 м грешка се налази у опсегу од -1,98% до 1,99%, док у случају када висине фазних проводника износе 30 м грешка варира од -11,60% до 12,01%.

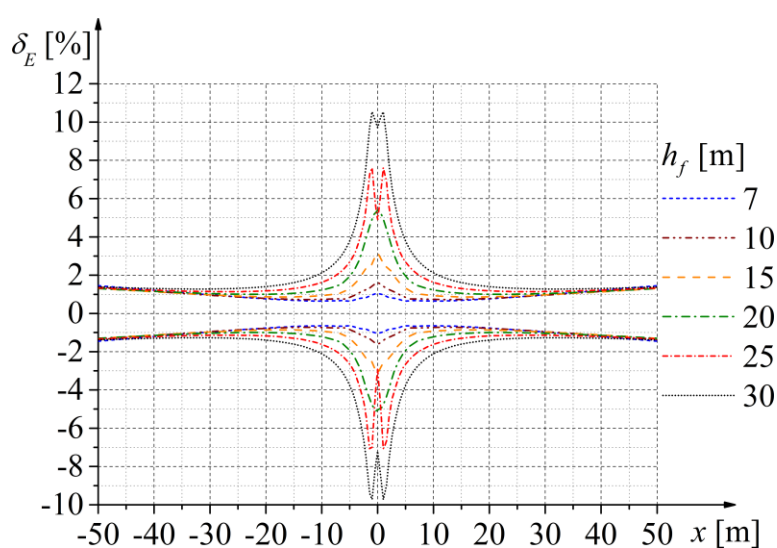
На слици 8.73. приказани су резултати добијени за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „Y”. У случају најмање висине проводника грешка варира од -2,20% до 2,20%, док у случају највеће висине варира од -14,72% до 16,55%.



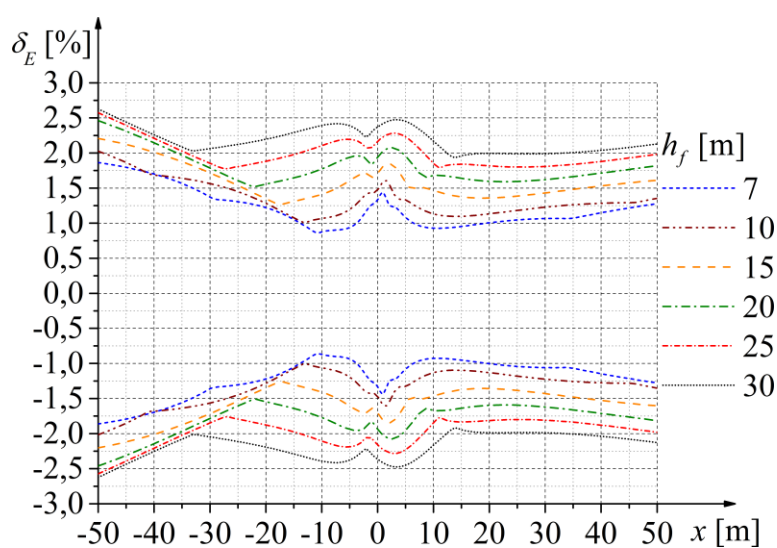
**Слика 8.73.** Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „Y”

### 8.8.4. Резултати прорачуна за мерне трансформаторе класе 0,5

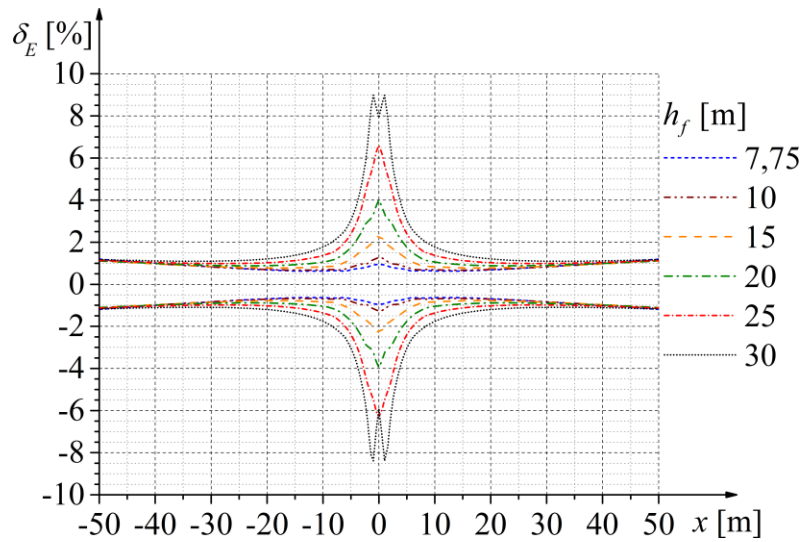
У претходним поглављима спроведена је детаљна анализа за напонске мерне трансформаторе класе 1, пошто они представљају најнеповољнији случај. Међутим, чест је случај у пракси да су подаци о напонима добијени с мерних трансформатора неке друге класе тачности. Најчешће су то класе 0,2 или 0,5. У таквим случајевима, коришћење података добијених прорачунима у претходном поглављу може да доведе до тога да ова компонента несигурности прорачуна буде прецењена. Иако је у неким случајевима то прихватљиво, постоје ситуације у којима се јавља потреба за тачнијом проценом ове компоненте несигурности прорачуна. Због тога је прорачун поновљен за напонске мерне трансформаторе класа тачности 0,2 и 0,5. Резултати прорачуна добијени за случај када се за мерење напона користе мерни напонски трансформатори класе 0,5 дати су на сликама 8.74–8.79. и у табели 8.14. У овој табели је за сваки конкретан надземни вод и висину проводника дат максимални опсег грешке који обухвата вредности грешке од  $x = -50$  m до  $x = 50$  m.



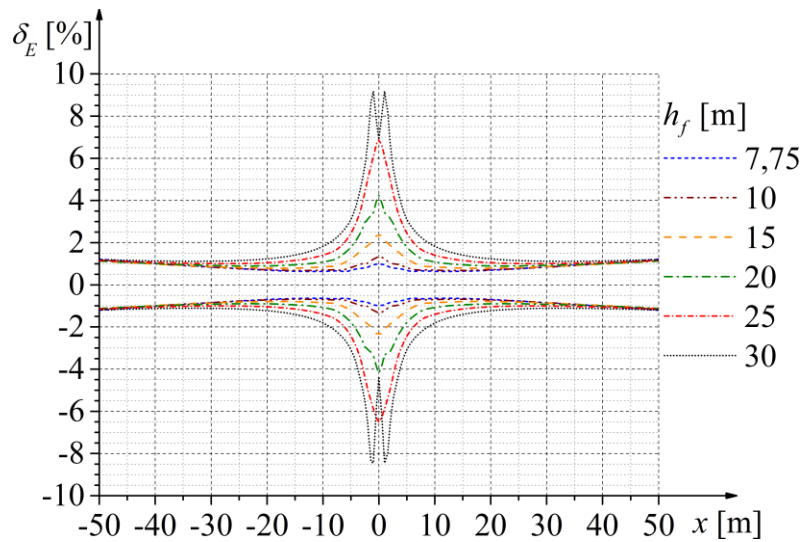
Слика 8.74. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал“



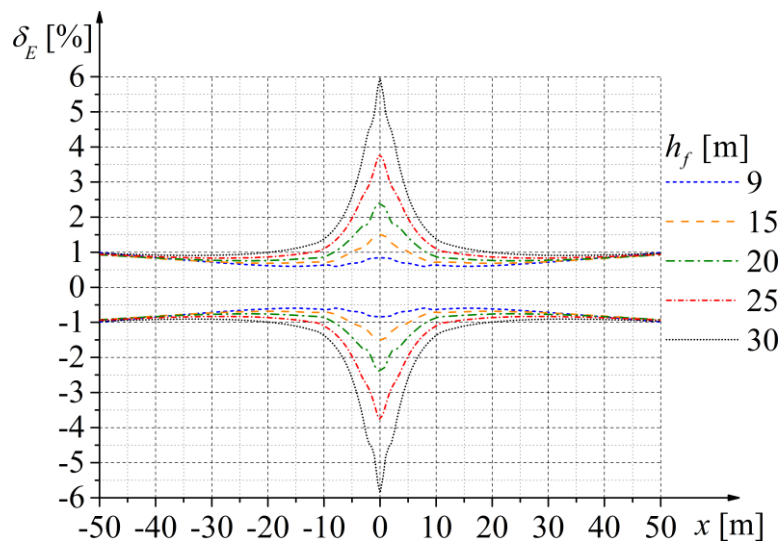
Слика 8.75. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „јела“



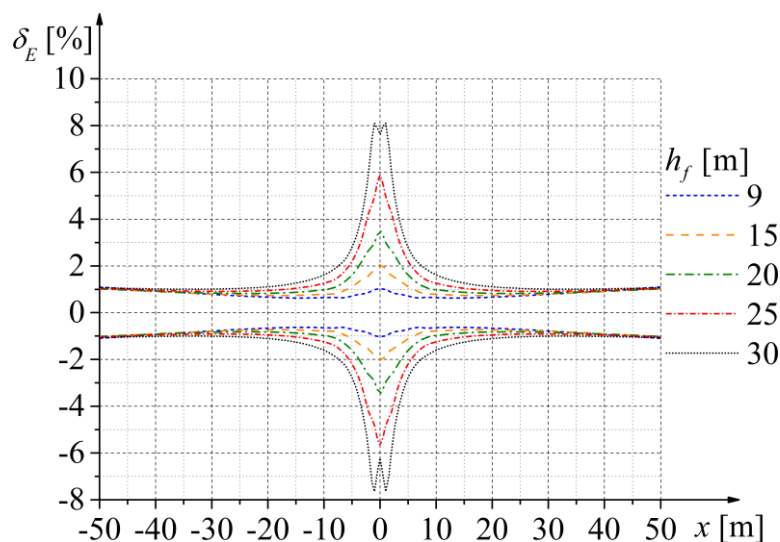
Слика 8.76. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „портал”



Слика 8.77. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „Y”



Слика 8.78. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „портал”



Слика 8.79. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „Y”

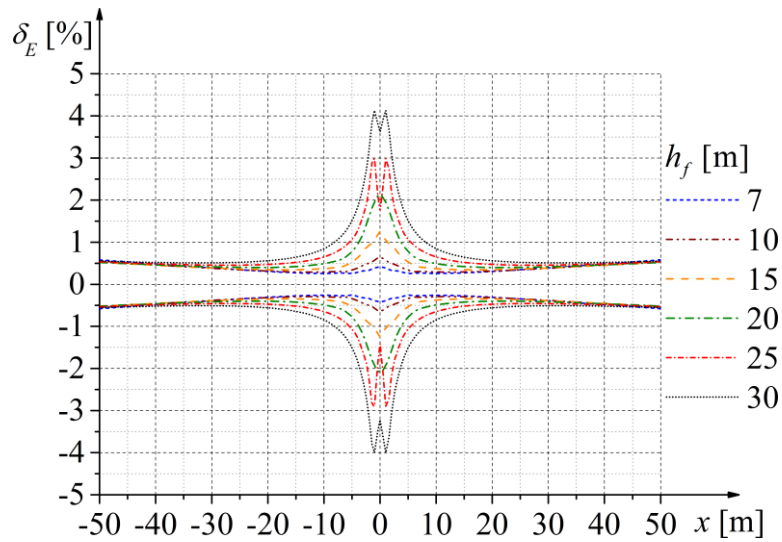
Табела 8.14. Максимални опсежи грешке добијени за напонске мерне трансформаторе класе 0,5

$h_f$ [m]	110 kV		220 kV		400 kV	
	Портал	Јела	Портал	Y	Портал	Y
7	-1,45–1,45	-1,86–1,86	/	/	/	/
7,75	/	/	-1,19–1,19	-1,21–1,21	/	/
9	/	/	/	/	-0,99–0,99	-1,10–1,10
10	-1,61–1,62	-2,02–2,03	-1,26–1,26	-1,31–1,31	/	/
15	-3,12–3,16	-2,20–2,21	-2,29–2,30	-2,42–2,43	-1,51–1,51	-2,05–2,05
20	-5,14–5,44	-2,46–2,46	-3,96–4,00	-4,19–4,25	-2,40–2,41	-3,51–3,54
25	-7,07–7,61	-2,57–2,57	-6,31–6,60	-6,50–6,90	-3,77–3,79	-5,69–5,88
30	-9,72–10,54	-2,62–2,63	-8,38–8,98	-8,45–9,18	-5,86–5,96	-7,65–8,10

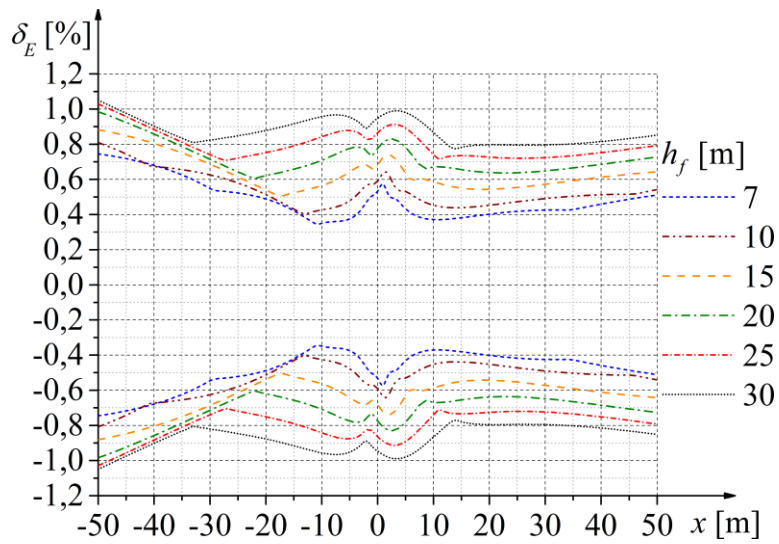
### 8.8.5. Резултати прорачуна за мерне трансформаторе класе 0,2

Резултати прорачуна добијени за случај када се за мерење напона користе мерни напонски трансформатори класе 0,2 дати су на сликама 8.80–8.85. У табели 8.15. је за сваки конкретан надземни вод и висину проводника дат максимални опсег грешке који обухвата вредности грешке од  $x = -50$  m до  $x = 50$  m.

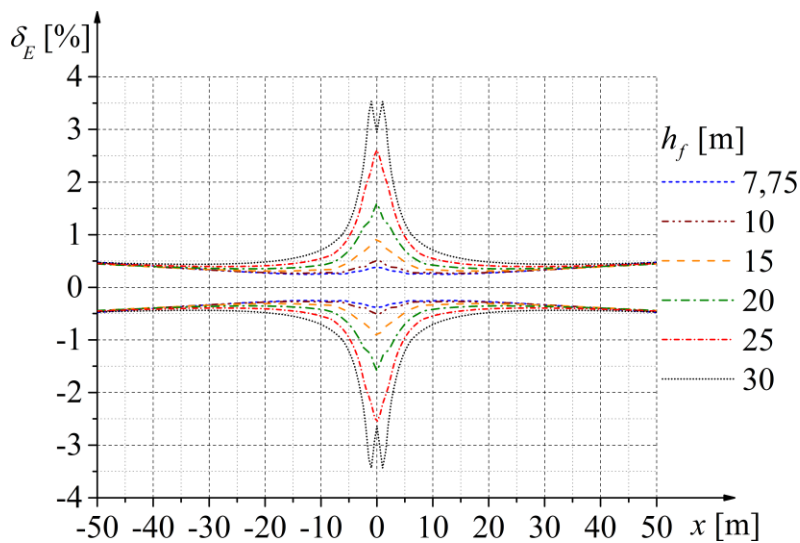
За све анализиране класе тачности напонских мерних мерних трансформатора, најшири опсег грешке добија се код надземног вода напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” и висином фазних проводника од 30 m изнад тла. У наведеном случају грешка се налази у опсегу од -4,00% до 4,13% за мерне трансформаторе класе тачности 0,2, од -9,72% до 10,54% за трансформаторе класе 0,5, док се за мерне трансформаторе класе 1 налази у опсегу од -18,34% до 21,68%.



Слика 8.80. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”

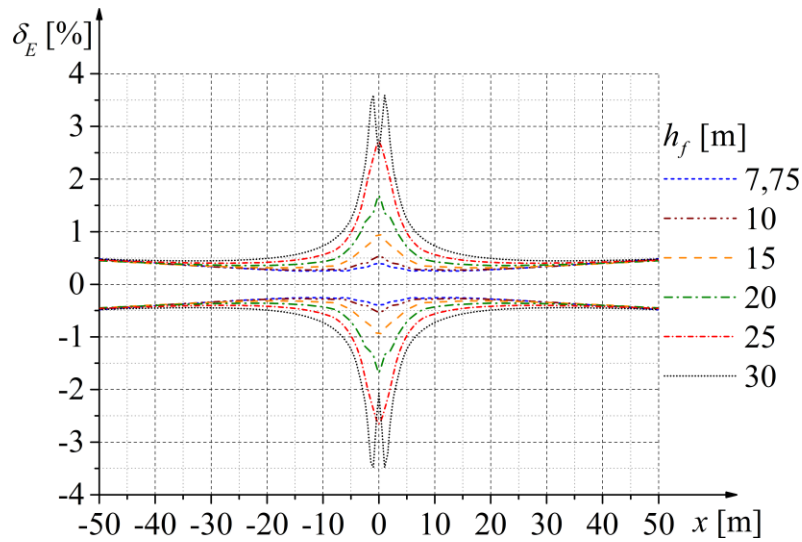


Слика 8.81. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „јела”

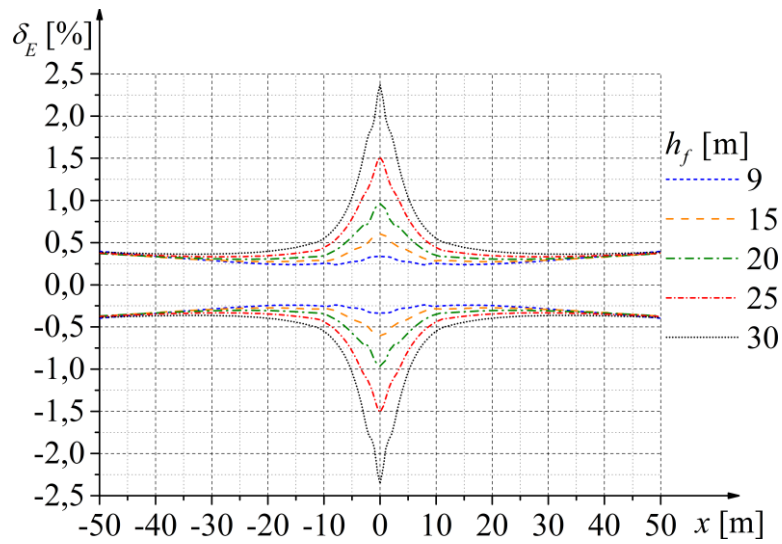


Слика 8.82. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „портал”

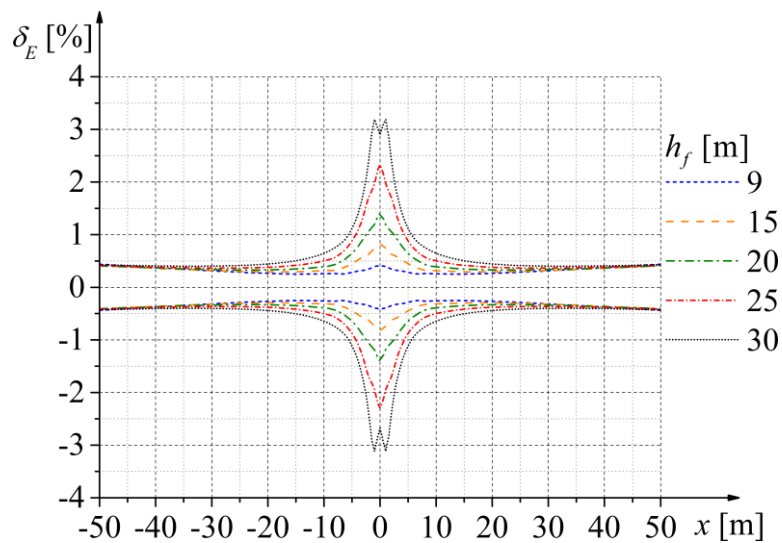




Слика 8.83. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „Y”



Слика 8.84. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „портал”



Слика 8.85. Вредности релативне грешке  $\delta_E$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „Y”

**Табела 8.15.** Максимални опсези грешке добијени за напонске мерне трансформаторе класе 0,2

$h_f$ [m]	110 kV		220 kV		400 kV	
	Портал	Јела	Портал	Y	Портал	Y
7	-0,58–0,58	-0,75–0,75	/	/	/	/
7,75	/	/	-0,48–0,48	-0,48–0,48	/	/
9	/	/	/	/	-0,40–0,40	-0,44–0,44
10	-0,65–0,65	-0,81–0,81	-0,50–0,50	-0,53–0,53	/	/
15	-1,25–1,26	-0,88–0,88	-0,92–0,92	-0,97–0,97	-0,60–0,60	-0,82–0,82
20	-2,10–2,14	-0,99–0,99	-1,59–1,60	-1,68–1,69	-0,96–0,96	-1,41–1,41
25	-2,90–2,99	-1,03–1,03	-2,56–2,61	-2,65–2,72	-1,51–1,52	-2,30–2,33
30	-4,00–4,13	-1,05–1,05	-3,43–3,53	-3,48–3,60	-2,36–2,37	-3,12–3,19

### 8.9. Несигурност услед пада напона дуж вода

Приликом испитивања јачине електричног поља податак о напону се добија из једне и/или друге крајње трансформаторске станице. Уколико се прорачун јачине електричног поља спроводи за услове који су постојали у време испитивања, приликом прорачуна се може усвојити вредност напона добијена из ближе трансформаторске станице. При томе се уноси одређена грешка због тога што постоји разлика између напона на месту на којем се врше испитивања и напона у трансформаторској станици. Уколико су познати напони у обе крајње трансформаторске станице, може се израчунати напон на месту на којем се врши испитивање, применом следећег израза:

$$U = U_1 - \frac{\Delta U}{L} \cdot l = U_1 - \frac{U_1 - U_2}{L} \cdot l \quad (8.23)$$

где су:

$U_1, U_2$  – напони у крајњим трансформаторским станицама;

$\Delta U$  – разлика напона у крајњим трансформаторским станицама;

$U$  – напон на месту на којем се врши испитивање;

$L$  – дужина вода;

$l$  – растојање између трансформаторске станице 1 и места на којем се врши испитивање.

## 9. Израчунавање компонената несигурности прорачуна магнетске индукције

### 9.1. Увод

Када се вредности магнетске индукције одређују прорачуном, неопходно је навести несигурност тако добијених резултата, у складу са захтевима стандарда [8]. Први корак приликом израчунавања проширене несигурности резултата прорачуна магнетске индукције представља одређивање и израчунавање компонената несигурности које имају највећи допринос проширеној несигурности. Као и у случају електричног поља, компоненте несигурности прорачуна потичу од несигурности примењеног математичког модела и од несигурности мерења величина које представљају улазне податке за прорачун. Ако се прорачун врши под претпоставком да су проводници вода прави и бесконачно дугачки, постоји компонента несигурности која је последица занемарења стварног облика проводника. Осим компонената несигурности које потичу од примењеног математичког модела, неопходно је уважити и компоненте које потичу од несигурности мерења величина које представљају улазне податке за прорачун. С тим у вези, потребно је анализирати утицај несигурности мерења висине фазних и заштитних проводника и њихових међусобних растојања. Уколико се прорачун спроводи за услове који су постојали у време мерења, неопходно је уважити и несигурност мерења струја, која примарно зависи од грешке струјних мерних трансформатора. Све наведене компоненте несигурности су у наставку овог поглавља детаљно анализирани и квантификовани. За све наведене компоненте несигурности развијена је методологија за њихово израчунавање, која се може применити на једносистемске и вишесистемске водове различитих напонских нивоа и карактеристика.

Наведене компоненте несигурности одређене су прорачуном. При томе се прво израчунава тачна вредност магнетске индукције ( $B_t$ ), а затим вредност магнетске индукције ( $B$ ) која садржи грешку услед одређеног утицајног фактора. На основу тога се израчунава вредност релативне грешке  $\delta_B$ , применом следећег израза:

$$\delta_B = \frac{B - B_t}{B_t} \cdot 100\% \quad (9.1)$$

### 9.2. Несигурност услед примене различитих метода прорачуна

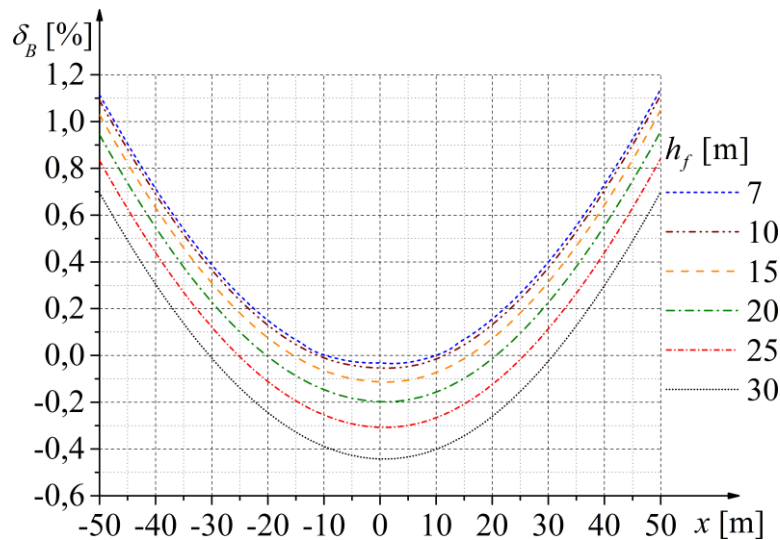
У овом поглављу је извршено поређење резултата прорачуна магнетске индукције добијених применом два различита метода. Резултати прорачуна добијени применом метода који се заснива на моделовању надземног вода бесконачно дугим праволинијским проводницима упоређени су с резултатима који се добијају применом софтверског пакета *XGSLab*.

Прорачун је спроведен за надземне водове чије су геометрије дате на сликама 4.3–4.5, за улазне податке дате у табели 4.1. и висине фазних и заштитних проводника дате у табелама 4.2 и 4.3.

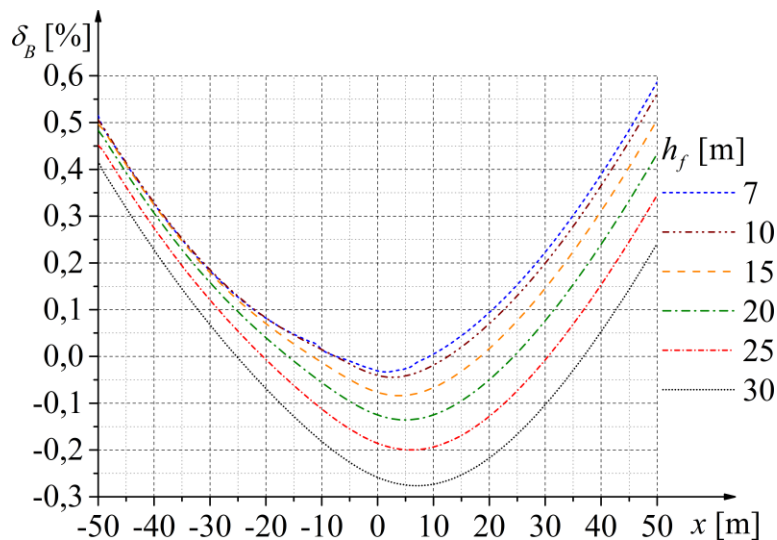
Прорачун је спроведен дуж латералног правца који се налази на висини од 1 m. Резултати прорачуна добијени применом метода заснованог на праволинијским проводницима означени су са  $B_1$ , док су резултати добијени применом софтверског пакета *XGSLab* означени са  $B_2$ . У првом случају проводници вода су прави и бесконачно дугачки. У другом случају проводници су такође прави, а њихова дужина износи 1200 m, тј. простиру се од  $z = -600$  m до  $z = +600$  m. При томе се прорачун спроводи на средини вода, тј. дуж правца који се налази

на позицији  $z = 0$  m, да би се избегао ефекат крајева. У оба случаја проводници се налазе на истим висинама, које су дате у табелама 4.2. и 4.3.

Вредности релативне грешке  $\delta_B$ , које су израчунате под претпоставком да се као тачна вредност усваја вредност добијена првим методом, приказане су на сликама 9.1–9.2. На слици 9.1. приказани су резултати који се односе на надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”, док су на слици 9.2. приказани резултати за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „јела”. Резултати добијени за водове напонских нивоа 220 kV и 400 kV са стубовима типа „портал” и „Y” исти су као резултати добијени за вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”, па из тог разлога нису графички приказани. На основу приказаних резултата се може закључити да су релативна одступања у свим разматраним случајевима нижа од 1,2%.



Слика 9.1. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”



Слика 9.2. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „јела”

### 9.3. Несигурност услед занемарења стварног облика проводника

Прорачун магнетске индукције у околини надземних вода може се спровести са уважавањем стварног облика проводника, или без њега. У пракси се најчешће користи модел заснован на претпоставци да су проводници вода бесконачно дугачки, међусобно паралелни и паралелни с равном површином земље. Ради израчунавања компоненте несигурности услед занемарења стварног облика проводника разматрана су четири модела, који су детаљно описани у поглављу 8.3.2.

Проводници надземног вода су моделовани на следећа четири начина:

- 1) ланчаницом, при чему се осим распона за који се врши прорачун, моделују још по један или два додатна распона са сваке стране (слика 8.11);
- 2) праволинијским проводницима коначне дужине који се налазе на висини која одговара висини ланчанице на месту датог латералног правца (слика 8.12);
- 3) ланчаницом, при чему се моделује само распон за који се врши прорачун, тј. не уважава се постојање суседних распона (слика 8.13);
- 4) праволинијским проводницима коначне дужине који се налазе на висини која износи  $h = h_{max} - 2/3 \cdot f_{max}$  (слика 8.14).

Прорачун заснован на моделима 1–4 врши се у софтверском пакету *XGSLab*.

#### 9.3.1. Прорачун за прав распон надземног вода напонског нивоа 110 kV

Као и у случају јачине електричног поља, анализира се прав распон надземног вода напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”, дужине 200 m, код којег висина фазних проводника у темену ланчанице износи 7 m, а у тачки вешања 15 m. Прорачун се врши применом описана четири модела. У моделу 1 се поред анализираниог распона, уважава постојање још по два распона истих карактеристика са сваке стране, тако да модел садржи укупно пет распона дужине по 200 m. У моделу 3 уважава се постојање само анализираниог распона, док се суседни распони не моделују. Модели 2 и 4 су засновани на праволинијским проводницима дужине 1000 m. У моделу 4 висина фазних проводника износи 9,67 m, а висина заштитних проводника 13,87 m.

Прорачун се врши дуж латералних праваца  $P_0$ – $P_{10}$ , чије су позиције дате у табели 9.1. Правац  $P_0$  се налази на месту темена ланчанице, а правац  $P_{10}$  на месту вешања проводника на стуб, при чему растојање између суседних праваца износи 10 m. Висине фазних и заштитних проводника на местима латералних праваца  $P_0$ – $P_{10}$  дате су у табели 9.1.

Резултати прорачуна магнетске индукције добијени применом описана четири модела приказани су у табели 9.1, при чему ознаке имају следеће значење:

$P_1, P_2, \dots, P_{10}$  – латерални правци дуж којих се врши прорачун;

$z$  –  $z$  координата латералног правца;

$h_f$  – висина фазних проводника на месту латералног правца;

$h_z$  – висина заштитних проводника на месту латералног правца;

$B_1, B_2, B_3, B_4$  – вредности магнетске индукције израчунате применом модела 1–4;

$B_{max_1}, B_{max_2}, B_{max_3}, B_{max_4}$  – највеће вредности магнетске индукције добијене прорачуном дуж одговарајућег латералног правца применом модела 1–4;

$\delta_{B_2}, \delta_{B_3}, \delta_{B_4}$  – вредности релативне грешке израчунате под претпоставком да се као тачна вредност магнетске индукције усваја вредност  $B_1$ ;

$\delta_{B_{max_2}}, \delta_{B_{max_3}}, \delta_{B_{max_4}}$  – вредности релативне грешке израчунате под претпоставком да се као тачна вредност магнетске индукције усваја вредност  $B_{max_1}$ .

Наведене релативне грешке  $\delta_B$  рачунају се применом следећих израза:

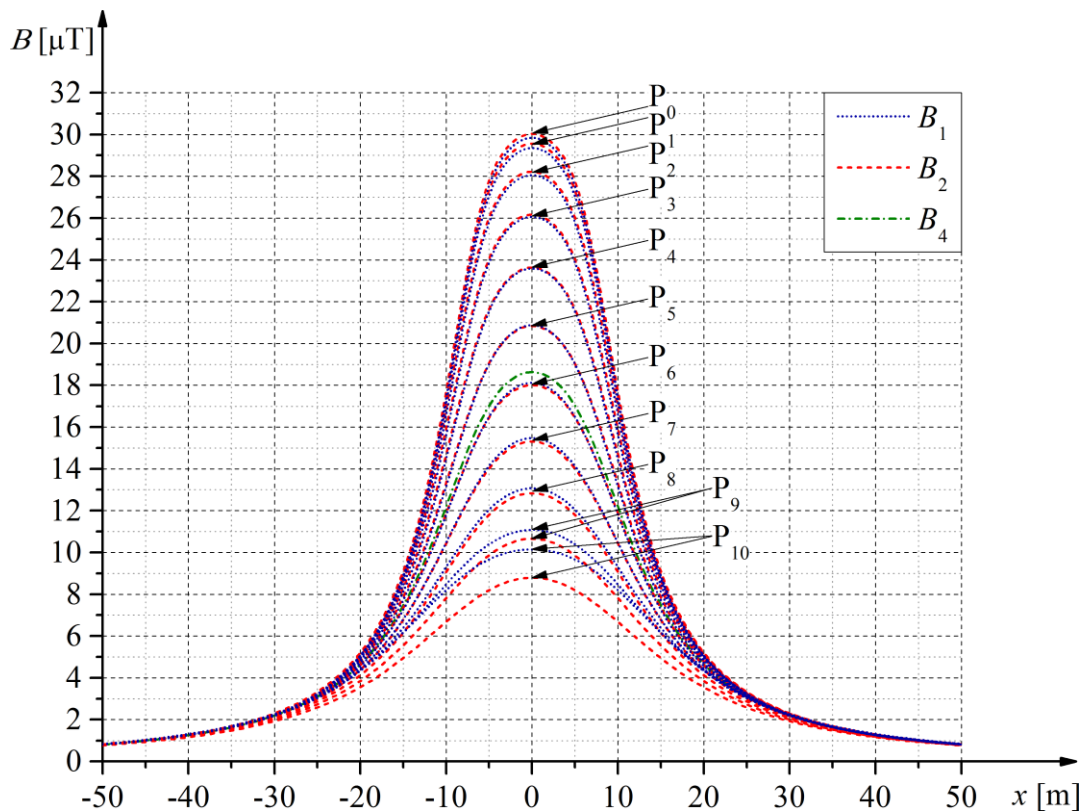
$$\delta_{B_i} = \frac{B_i - B_1}{B_1} \cdot 100\%, \quad i = 2, 3, 4 \quad (9.2)$$

$$\delta_{B_{max_i}} = \frac{B_{max_i} - B_{max_1}}{B_{max_1}} \cdot 100\%, \quad i = 2, 3, 4 \quad (9.3)$$

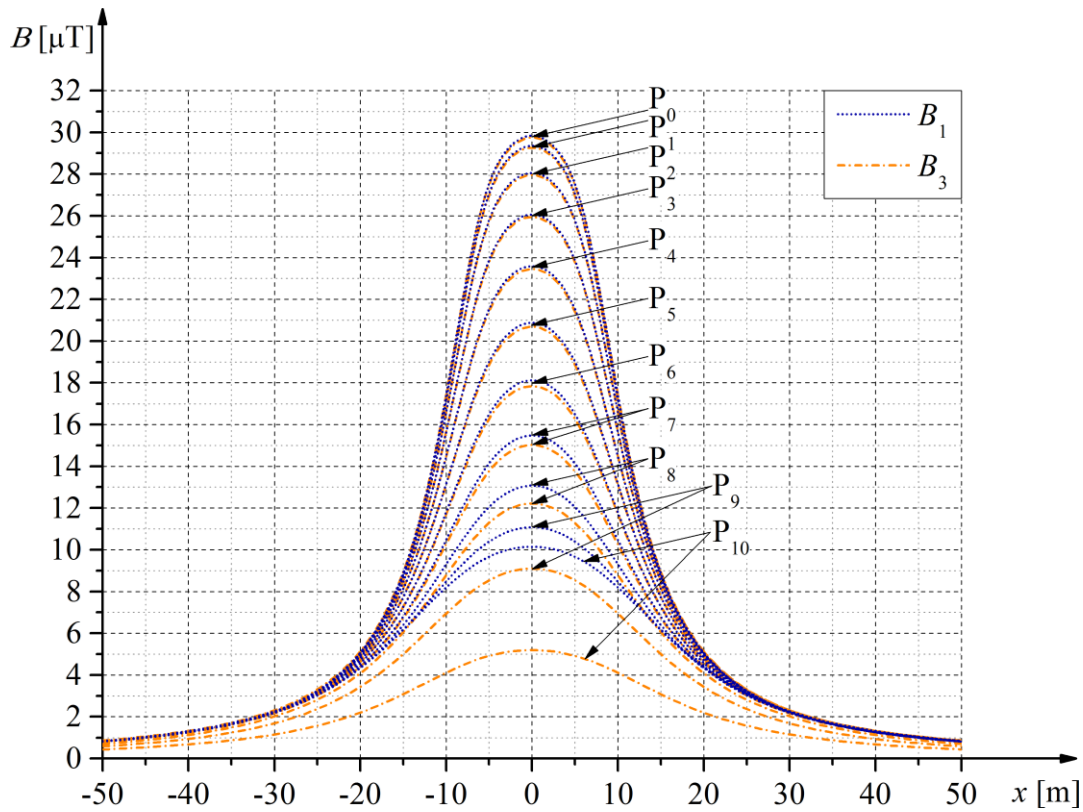
**Табела 9.1.** Резултати прорачуна магнетске индукције применом модела 1–4

Латерални правац	$z$ [m]	$h_f$ [m]	$h_z$ [m]	$B_{max_1}$ [ $\mu$ T]	$B_{max_2}$ [ $\mu$ T]	$B_{max_3}$ [ $\mu$ T]	$B_{max_4}$ [ $\mu$ T]	$\delta_{B_{max_2}}$ [%]	$\delta_{B_{max_3}}$ [%]	$\delta_{B_{max_4}}$ [%]
P <sub>0</sub>	0	7,000	11,200	29,846	30,039	29,763	18,635	0,65	-0,28	-37,56
P <sub>1</sub>	10	7,080	11,280	29,358	29,570	29,273		0,72	-0,29	-36,53
P <sub>2</sub>	20	7,319	11,519	28,061	28,230	27,966		0,60	-0,34	-33,59
P <sub>3</sub>	30	7,719	11,919	26,065	26,172	25,954		0,41	-0,43	-28,51
P <sub>4</sub>	40	8,278	12,478	23,595	23,633	23,455		0,16	-0,59	-21,02
P <sub>5</sub>	50	8,997	13,197	20,878	20,842	20,690		-0,17	-0,90	-10,74
P <sub>6</sub>	60	9,876	14,076	18,119	18,012	17,843		-0,59	-1,52	2,85
P <sub>7</sub>	70	10,916	15,116	15,479	15,305	15,027		-1,12	-2,92	20,39
P <sub>8</sub>	80	12,116	16,316	13,078	12,835	12,219		-1,86	-6,57	42,49
P <sub>9</sub>	90	13,477	17,677	11,084	10,659	9,097		-3,83	-17,93	68,12
P <sub>10</sub>	100	15,000	19,200	10,146	8,794	5,199		-13,33	-48,76	83,67

Упоредни приказ резултата прорачуна магнетске индукције дуж латералних праваца P<sub>0</sub>–P<sub>10</sub> добијених применом модела 1, 2, 3 и 4 дат је на сликама 9.3. и 9.4.

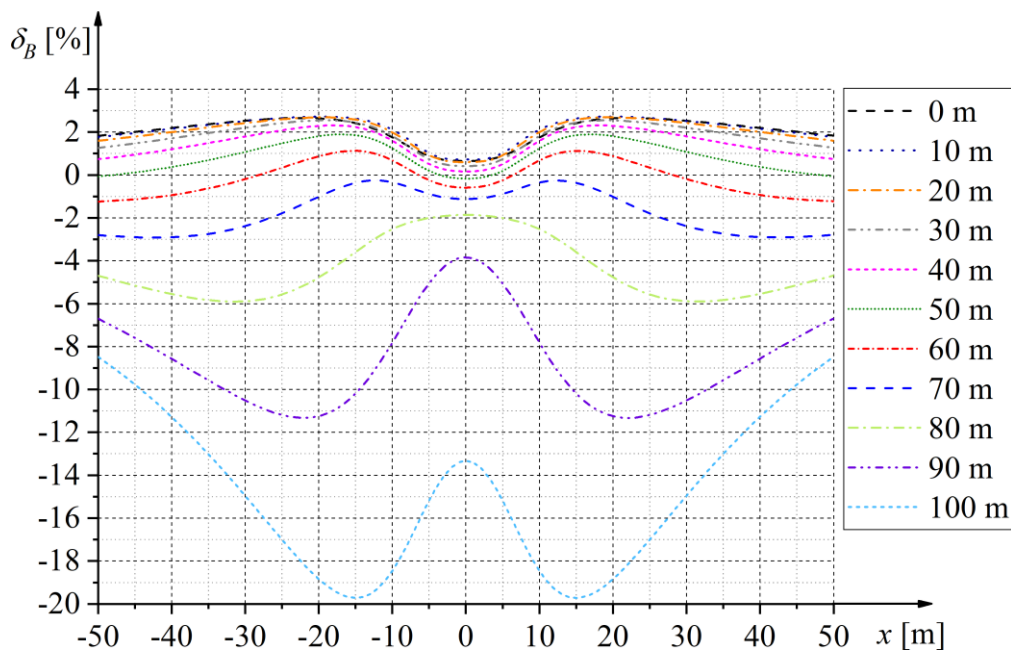


**Слика 9.3.** Упоредни приказ резултата прорачуна магнетске индукције дуж латералних праваца P<sub>0</sub>–P<sub>10</sub> добијених применом модела 1, 2 и 4



Слика 9.4. Упоредни приказ резултата прорачуна магнетске индукције дуж латералних праваца  $P_0$ – $P_{10}$  добијених применом модела 1 и 3

Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_B$  дуж латералних праваца  $P_0$ – $P_{10}$  за резултате прорачуна магнетске индукције добијене применом модела 2 дат је на слици 9.5.



Слика 9.5. Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_B$  дуж латералних праваца  $P_0$ – $P_{10}$  за резултате прорачуна магнетске индукције добијене применом модела 2

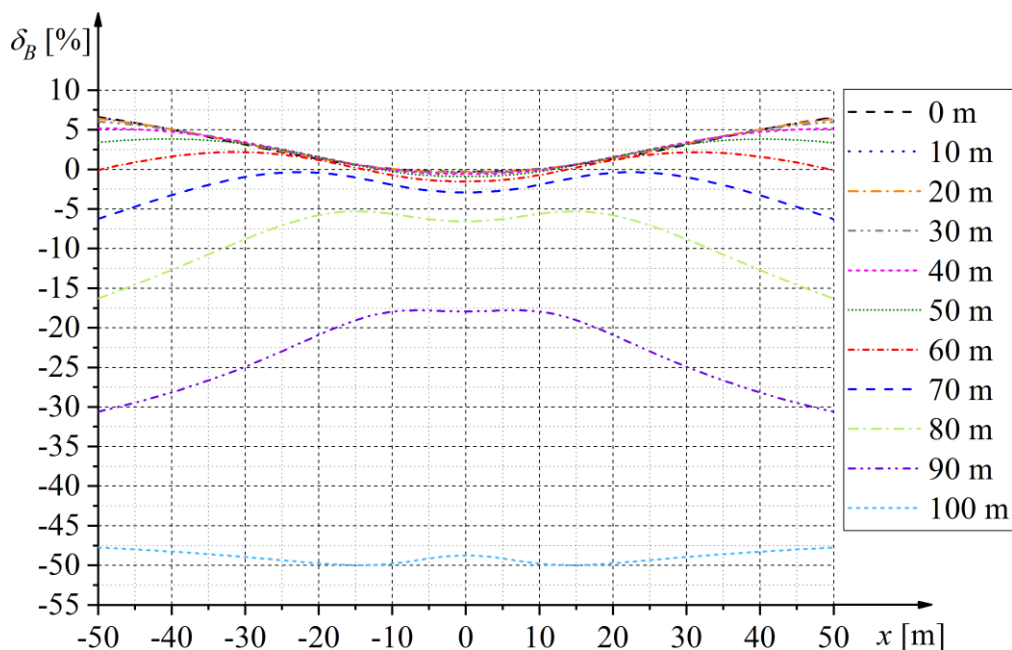
Вредности релативне грешке  $\delta_B$  на различитим позицијама на латералним правцима  $P_0$ – $P_{10}$  за резултате прорачуна добијене применом модела 2 дате су у табели 9.2.

**Табела 9.2.** Вредности релативне грешке на различитим позицијама на латералним правцима

Латерални правац	z [m]	$\delta_B$ [%]										
		x [m]										
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
P <sub>0</sub>	0	0,65	0,89	1,76	2,42	2,64	2,64	2,53	2,37	2,19	2,01	1,83
P <sub>1</sub>	10	0,72	1,02	2,12	2,63	2,72	2,66	2,52	2,34	2,15	1,96	1,77
P <sub>2</sub>	20	0,60	0,91	1,99	2,58	2,69	2,60	2,42	2,22	2,01	1,80	1,60
P <sub>3</sub>	30	0,41	0,74	1,82	2,44	2,54	2,42	2,20	1,96	1,71	1,48	1,27
P <sub>4</sub>	40	0,16	0,51	1,60	2,23	2,29	2,09	1,80	1,49	1,21	0,95	0,74
P <sub>5</sub>	50	-0,17	0,19	1,25	1,85	1,81	1,48	1,08	0,70	0,38	0,12	-0,07
P <sub>6</sub>	60	-0,59	-0,25	0,68	1,12	0,87	0,34	-0,19	-0,62	-0,93	-1,13	-1,23
P <sub>7</sub>	70	-1,12	-0,89	-0,34	-0,37	-1,02	-1,79	-2,38	-2,74	-2,89	-2,89	-2,79
P <sub>8</sub>	80	-1,86	-2,01	-2,53	-3,59	-4,78	-5,57	-5,88	-5,83	-5,54	-5,14	-4,69
P <sub>9</sub>	90	-3,83	-5,05	-7,82	-10,20	-11,25	-11,19	-10,51	-9,57	-8,56	-7,59	-6,69
P <sub>10</sub>	100	Локација стуба		-19,73	-18,84	-17,00	-14,95	-13,01	-11,28	-9,77	-8,48	

На основу резултата приказаних на слици 9.5. и у табели 9.2, може се закључити да се највеће вредности релативне грешке јављају на правцима који се налазе у непосредној близини стуба. Вредности релативне грешке на правцима који се налазе у близини средине распона су ниже и повећавају се с приближавањем стубу. Уколико се посматрају правци P<sub>0</sub>–P<sub>7</sub>, може се закључити да се вредности релативне грешке у зони од -50 m до +50 m налазе у опсегу од -2,91% до 2,72%. Вредности релативне грешке на правцу P<sub>8</sub> у зони од -50 m до +50 m налазе се у опсегу од -5,90% до -1,86%, а на правцу P<sub>9</sub> у опсегу од -11,33% до -3,83%. Нешто веће вредности релативне грешке добијају се на правцу P<sub>10</sub>, који се налази на месту вешања проводника на стуб, али се због велике висине проводника, а самим тим и нижих вредности магнетске индукције, испитивања на овом правцу ретко спроводе.

Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_B$  дуж латералних праваца P<sub>0</sub>–P<sub>10</sub> за резултате прорачуна магнетске индукције добијене применом модела 3 дат је на слици 9.6.



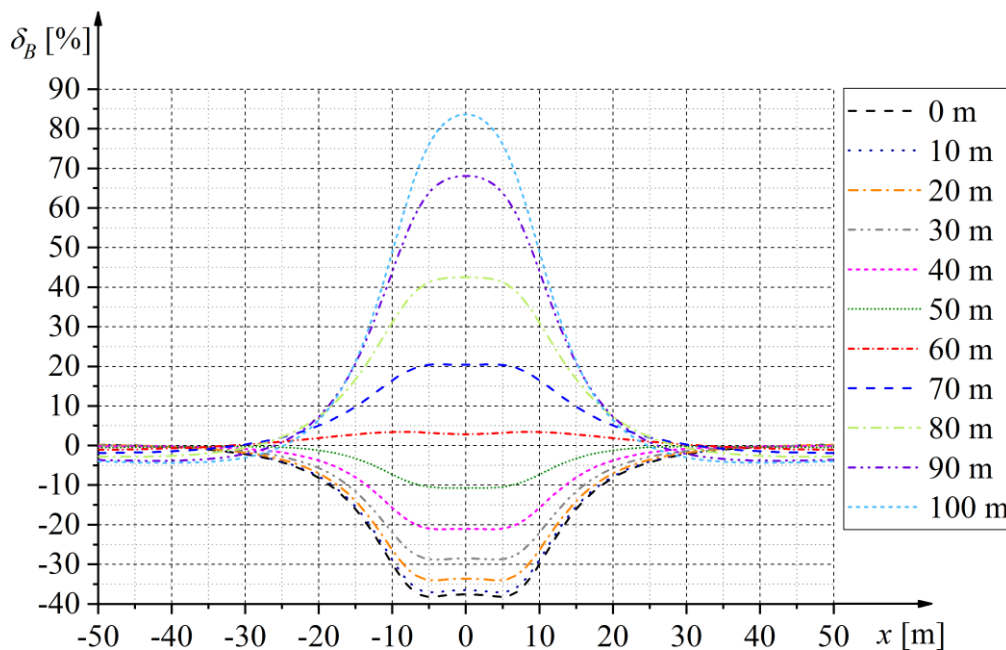
**Слика 9.6.** Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_B$  дуж латералних праваца P<sub>0</sub>–P<sub>10</sub> за резултате прорачуна магнетске индукције добијене применом модела 3



Пошто модел 3 не уважава постојање суседних распона, вредности релативне грешке се повећавају с удаљавањем од средине распона, тј. с приближавањем крају распона. Вредности релативне грешке у зони од -50 m до +50 m дуж правца P<sub>0</sub>-P<sub>7</sub> налазе у опсегу од -6,29% до 6,59%. Вредности релативне грешке на правцу P<sub>8</sub> у зони од -50 m до +50 m налазе у опсегу од -16,33% до -5,29%, а на правцу P<sub>9</sub> у опсегу од -30,62% до -17,79%. Веће вредности релативне грешке добијају се на правцу P<sub>10</sub>, који се налази на месту вешања проводника на стуб.

На основу поређења вредности релативне грешке добијених применом модела 2 и 3 закључује се да се мање вредности релативне грешке добијају применом модела 2, који се заснива на моделовању вода праволинијским проводницима постављеним на висини која одговара висини ланчанице на месту датог латералног правца, него применом модела 3, који уважава да проводник има облик ланчанице, али не уважава постојање суседних распона.

Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_B$  дуж латералних правца P<sub>0</sub>-P<sub>10</sub> за резултате прорачуна магнетске индукције добијене применом модела 4 дат је на слици 9.7. Као и у случају електричног поља, јасно је да овакав начин моделовања доводи до сувише великих одступања резултата прорачуна за примену у пракси.



Слика 9.7. Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_B$  дуж латералних правца P<sub>0</sub>-P<sub>10</sub> за резултате прорачуна магнетске индукције добијене применом модела 4

### 9.3.2. Прорачун за прав распон надземног вода напонског нивоа 220 kV

Анализира се прав распон надземног вода напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „портал” дужине 300 m, код којег висина фазних проводника у темену ланчанице износи 7,75 m, а у тачки вешања 20 m. Прорачун се врши у софтверском пакету *XGSLab*, применом модела 1 и 2. У моделу 1 се поред анализираниг распона, уважава постојање још по једног распона истих карактеристика са сваке стране, тако да модел садржи укупно три распона дужине по 300 m. Модел 2 је заснован на праволинијским проводницима дужине 900 m.

Прорачун се врши дуж латералних праваца  $P_0$ – $P_{15}$ , чије су позиције дате у табели 9.3. Правац  $P_0$  се налази на месту темена ланчанице, а правац  $P_{15}$  на месту вешања проводника на стуб, при чему растојање између суседних праваца износи 10 m. Висине фазних и заштитних проводника на местима латералних праваца  $P_0$ – $P_{15}$  дате су у табели 9.3.

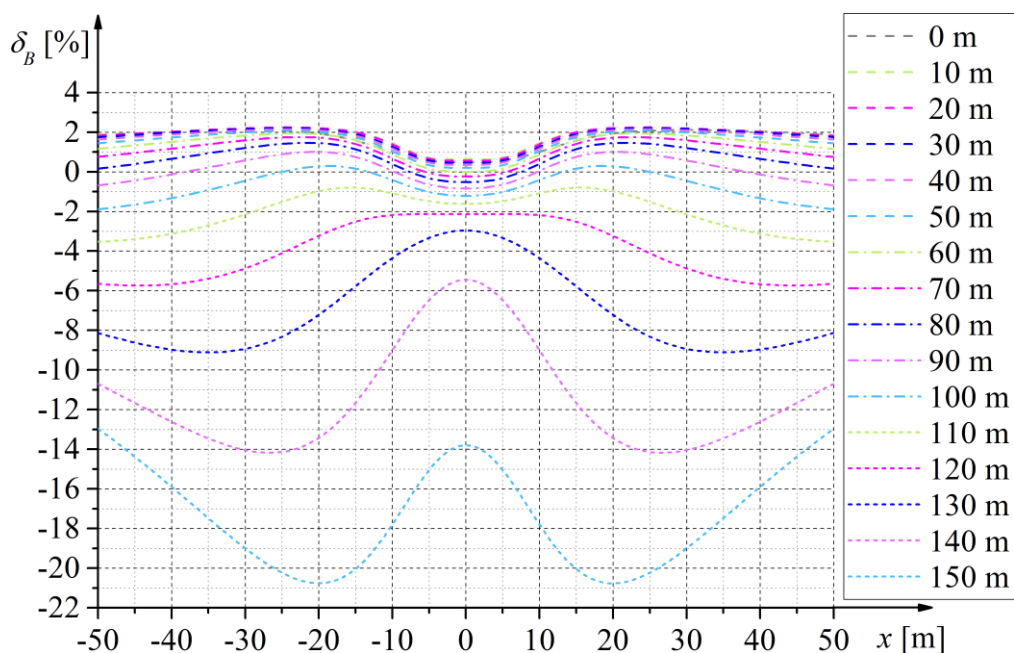
Резултати прорачуна магнетске индукције добијени применом модела 1 и 2 дати су у табели 9.3.

**Табела 9.3.** Резултати прорачуна магнетске индукције применом модела 1 и 2

Латерални правац	$z$ [m]	$h_f$ [m]	$h_z$ [m]	$B_{max_1}$ [ $\mu T$ ]	$B_{max_2}$ [ $\mu T$ ]	$\delta_{B_{max_2}}$ [%]
$P_0$	0	7,750	14,050	42,119	42,324	0,49
$P_1$	10	7,804	14,104	41,680	41,948	0,64
$P_2$	20	7,967	14,267	40,611	40,841	0,57
$P_3$	30	8,239	14,539	38,907	39,088	0,46
$P_4$	40	8,619	14,919	36,688	36,816	0,35
$P_5$	50	9,108	15,408	34,096	34,163	0,20
$P_6$	60	9,706	16,006	31,270	31,270	0,00
$P_7$	70	10,413	16,713	28,340	28,272	-0,24
$P_8$	80	11,229	17,529	25,418	25,285	-0,52
$P_9$	90	12,154	18,454	22,591	22,400	-0,85
$P_{10}$	100	13,188	19,488	19,927	19,686	-1,21
$P_{11}$	110	14,331	20,631	17,470	17,187	-1,62
$P_{12}$	120	15,584	21,884	15,251	14,927	-2,13
$P_{13}$	130	16,946	23,246	13,310	12,915	-2,97
$P_{14}$	140	18,418	24,718	11,788	11,146	-5,44
$P_{15}$	150	20,000	26,300	11,141	9,605	-13,79

Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_B$  дуж латералних праваца  $P_0$ – $P_{15}$  за резултате прорачуна магнетске индукције добијене применом модела 2 дат је на слици 9.8. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  на различитим карактеристичним позицијама на латералним правцима дате су у табели 9.4.

На основу резултата приказаних на слици 9.8. и у табели 9.4, може се закључити да се, као и у претходном примеру који се односио на вод напонског нивоа 110 kV, највеће вредности релативне грешке јављају на правцима који се налазе у близини стуба. Вредности релативне грешке на правцима  $P_0$ – $P_{12}$  у зони од -50 m до +50 m налазе у опсегу од -5,74% до 2,24%. Вредности релативне грешке на правцу  $P_{13}$  у зони од -50 m до +50 m налазе се у опсегу од -9,11% до -2,97%, а на правцу  $P_{14}$  у опсегу од -14,18% до -5,44%. Веће вредности релативне грешке добијају се на правцу  $P_{15}$ , који се налази на месту вешања проводника на стуб.



Слика 9.8. Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_B$  дуж латералних праваца  $P_0$ – $P_{15}$  за резултате прорачуна магнетске индукције добијене применом модела 2

Табела 9.4. Вредности релативне грешке на различитим позицијама на латералним правцима

Латерални правац	$z$ [m]	$\delta_B$ [%]										
		$x$ [m]										
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$P_0$	0	0,49	0,57	1,01	1,58	1,94	2,08	2,12	2,09	2,03	1,96	1,87
$P_1$	10	0,64	0,71	1,46	1,98	2,15	2,18	2,16	2,11	2,04	1,96	1,87
$P_2$	20	0,57	0,66	1,39	2,00	2,21	2,24	2,19	2,12	2,03	1,93	1,83
$P_3$	30	0,46	0,57	1,27	1,90	2,15	2,20	2,16	2,08	1,98	1,87	1,76
$P_4$	40	0,35	0,47	1,18	1,83	2,09	2,14	2,09	2,00	1,88	1,76	1,63
$P_5$	50	0,20	0,34	1,05	1,73	2,02	2,06	1,99	1,88	1,74	1,59	1,44
$P_6$	60	0,00	0,16	0,88	1,60	1,90	1,93	1,84	1,69	1,51	1,33	1,16
$P_7$	70	-0,24	-0,06	0,67	1,41	1,73	1,73	1,59	1,39	1,17	0,96	0,75
$P_8$	80	-0,52	-0,32	0,40	1,14	1,45	1,41	1,21	0,94	0,66	0,39	0,16
$P_9$	90	-0,85	-0,64	0,05	0,75	1,01	0,88	0,58	0,22	-0,13	-0,44	-0,69
$P_{10}$	100	-1,21	-1,02	-0,41	0,16	0,28	0,00	-0,45	-0,92	-1,33	-1,65	-1,89
$P_{11}$	110	-1,62	-1,48	-1,08	-0,80	-0,98	-1,51	-2,14	-2,70	-3,12	-3,39	-3,53
$P_{12}$	120	-2,13	-2,13	-2,19	-2,52	-3,23	-4,11	-4,87	-5,39	-5,67	-5,73	-5,64
$P_{13}$	130	-2,97	-3,33	-4,35	-5,78	-7,22	-8,32	-8,93	-9,11	-8,96	-8,61	-8,13
$P_{14}$	140	-5,44	-6,48	-9,01	-11,67	-13,44	-14,14	-14,04	-13,45	-12,61	-11,66	-10,69
$P_{15}$	150	Локација стуба			-20,04	-20,77	-20,23	-19,00	-17,48	-15,90	-14,37	-12,96

### 9.3.3. Прорачун за прав распон надземног вода напонског нивоа 400 kV

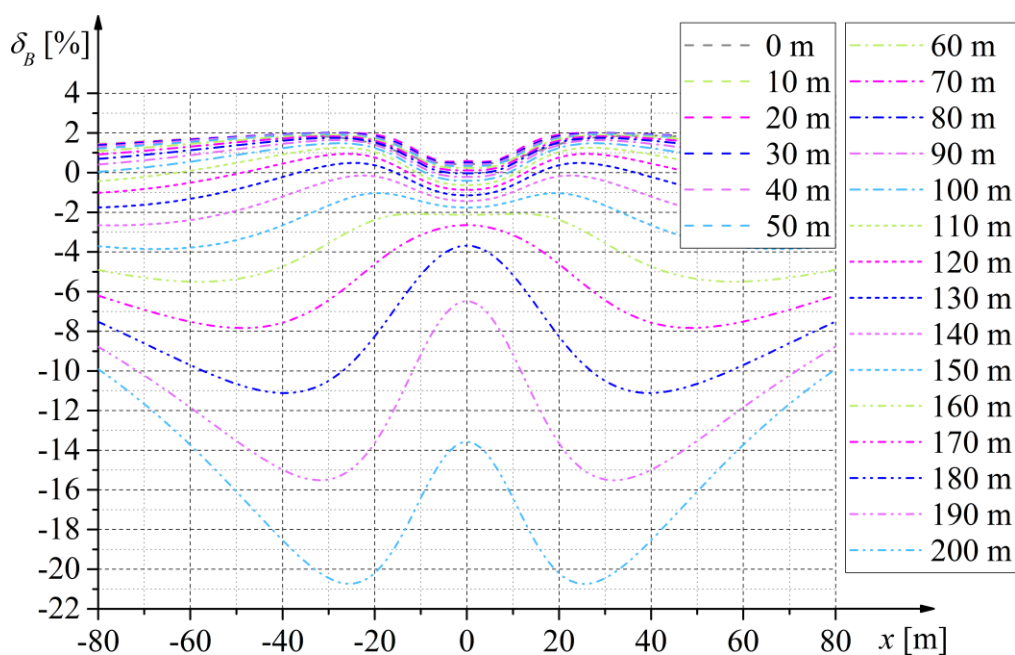
Анализира се прав распон надземног вода напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „портал” дужине 400 m. Висина фазних проводника у темену ланчанице износи 9 m, а у тачки вешања 25 m. Прорачун се врши у софтверском пакету *XGSLab*, применом модела 1 и 2, при чему се у моделу 1 уважава постојање још по једног распона истих карактеристика са сваке стране. Прорачун се врши дуж латералних праваца  $P_0$ – $P_{20}$ , чије су позиције дате у табели 9.5. Правац  $P_0$  се налази на месту темена ланчанице, а правац  $P_{20}$  на месту вешања проводника на стуб. Растојање између суседних праваца износи 10 m. У табели 9.5. дате су висине фазних и заштитних проводника на местима латералних праваца  $P_0$ – $P_{20}$ , као и резултати прорачуна магнетске индукције добијени применом модела 1 и 2.

Табела 9.5. Резултати прорачуна магнетске индукције применом модела 1 и 2

Латерални правац	$z$ [m]	$h_f$ [m]	$h_z$ [m]	$B_{max_1}$ [ $\mu$ T]	$B_{max_2}$ [ $\mu$ T]	$\delta_{B_{max_2}}$ [%]
$P_0$	0	9,000	16,400	71,739	72,047	0,43
$P_1$	10	9,040	16,440	71,252	71,660	0,57
$P_2$	20	9,160	16,560	70,109	70,518	0,58
$P_3$	30	9,359	16,759	68,339	68,686	0,51
$P_4$	40	9,639	17,039	65,946	66,228	0,43
$P_5$	50	9,998	17,398	63,047	63,265	0,35
$P_6$	60	10,437	17,837	59,756	59,901	0,24
$P_7$	70	10,956	18,356	56,184	56,249	0,12
$P_8$	80	11,555	18,955	52,436	52,419	-0,03
$P_9$	90	12,235	19,635	48,607	48,502	-0,22
$P_{10}$	100	12,994	20,394	44,780	44,595	-0,41
$P_{11}$	110	13,833	21,233	41,025	40,766	-0,63
$P_{12}$	120	14,752	22,152	37,399	37,073	-0,87
$P_{13}$	130	15,752	23,152	33,947	33,558	-1,15
$P_{14}$	140	16,831	24,231	30,699	30,260	-1,43
$P_{15}$	150	17,992	25,392	27,679	27,192	-1,76
$P_{16}$	160	19,232	26,632	24,901	24,372	-2,13
$P_{17}$	170	20,553	27,953	22,389	21,797	-2,64
$P_{18}$	180	21,955	29,355	20,208	19,464	-3,68
$P_{19}$	190	23,437	30,837	18,565	17,363	-6,48
$P_{20}$	200	25,000	32,400	17,912	15,480	-13,58

Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_B$  дуж латералних праваца  $P_0$ – $P_{20}$  за резултате прорачуна добијене применом модела 2 дат је на слици 9.9. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  на различитим позицијама на латералним правцима дате су у табели 9.6.

Као и у претходним примерима, највеће вредности релативне грешке јављају се на правцима у близини стуба. Вредности релативне грешке на правцима  $P_0$ – $P_{16}$  у зони од -80 m до +80 m налазе се у опсегу од -5,51% до 2,01%. На правцима  $P_{17}$ ,  $P_{18}$  и  $P_{19}$  вредности релативне грешке налазе се у опсезима од -7,83% до -2,64%, од -11,12% до -3,68% и од -15,52% до -6,48%.



Слика 9.9. Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_B$  дуж латералних праваца  $P_0$ – $P_{20}$  за резултате прорачуна магнетске индукције добијене применом модела 2

Табела 9.6. Вредности релативне грешке на различитим позицијама на латералним правцима

Латерални правац	z [m]	$\delta_B$ [%]										
		x [m]										
		0	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80
P <sub>0</sub>	0	0,43	0,46	0,67	1,06	1,44	1,81	1,86	1,80	1,70	1,57	1,45
P <sub>1</sub>	10	0,57	0,55	0,92	1,46	1,74	1,90	1,89	1,81	1,69	1,57	1,44
P <sub>2</sub>	20	0,58	0,56	0,99	1,61	1,92	2,00	1,92	1,81	1,68	1,55	1,42
P <sub>3</sub>	30	0,51	0,51	0,90	1,50	1,85	2,00	1,93	1,80	1,66	1,51	1,37
P <sub>4</sub>	40	0,43	0,44	0,83	1,42	1,78	1,97	1,90	1,77	1,61	1,46	1,31
P <sub>5</sub>	50	0,35	0,36	0,76	1,35	1,73	1,93	1,86	1,71	1,54	1,37	1,21
P <sub>6</sub>	60	0,24	0,27	0,67	1,28	1,68	1,88	1,80	1,63	1,45	1,26	1,09
P <sub>7</sub>	70	0,12	0,16	0,57	1,19	1,61	1,83	1,72	1,53	1,31	1,10	0,92
P <sub>8</sub>	80	-0,03	0,03	0,44	1,08	1,53	1,75	1,61	1,38	1,13	0,90	0,70
P <sub>9</sub>	90	-0,22	-0,14	0,28	0,93	1,40	1,63	1,45	1,17	0,88	0,62	0,41
P <sub>10</sub>	100	-0,41	-0,32	0,11	0,76	1,25	1,47	1,23	0,89	0,55	0,26	0,04
P <sub>11</sub>	110	-0,63	-0,53	-0,10	0,55	1,04	1,23	0,92	0,49	0,10	-0,21	-0,43
P <sub>12</sub>	120	-0,87	-0,76	-0,34	0,29	0,76	0,88	0,46	-0,06	-0,51	-0,82	-1,02
P <sub>13</sub>	130	-1,15	-1,03	-0,63	-0,05	0,37	0,36	-0,22	-0,84	-1,32	-1,61	-1,75
P <sub>14</sub>	140	-1,43	-1,33	-0,98	-0,50	-0,19	-0,43	-1,21	-1,92	-2,39	-2,61	-2,64
P <sub>15</sub>	150	-1,76	-1,68	-1,44	-1,14	-1,04	-1,66	-2,65	-3,40	-3,77	-3,84	-3,70
P <sub>16</sub>	160	-2,13	-2,12	-2,08	-2,12	-2,38	-3,55	-4,72	-5,36	-5,49	-5,29	-4,90
P <sub>17</sub>	170	-2,64	-2,77	-3,15	-3,77	-4,61	-6,43	-7,56	-7,82	-7,51	-6,91	-6,19
P <sub>18</sub>	180	-3,68	-4,07	-5,16	-6,68	-8,26	-10,50	-11,12	-10,65	-9,70	-8,60	-7,51
P <sub>19</sub>	190	-6,48	-7,22	-9,17	-11,59	-13,65	-15,48	-14,99	-13,53	-11,84	-10,23	-8,77
P <sub>20</sub>	200	Локација стуба			-18,66	-20,20	-20,45	-18,54	-16,09	-13,74	-11,67	-9,91

### 9.3.4. Прорачун за кос распон надземног вода напонског нивоа 110 kV

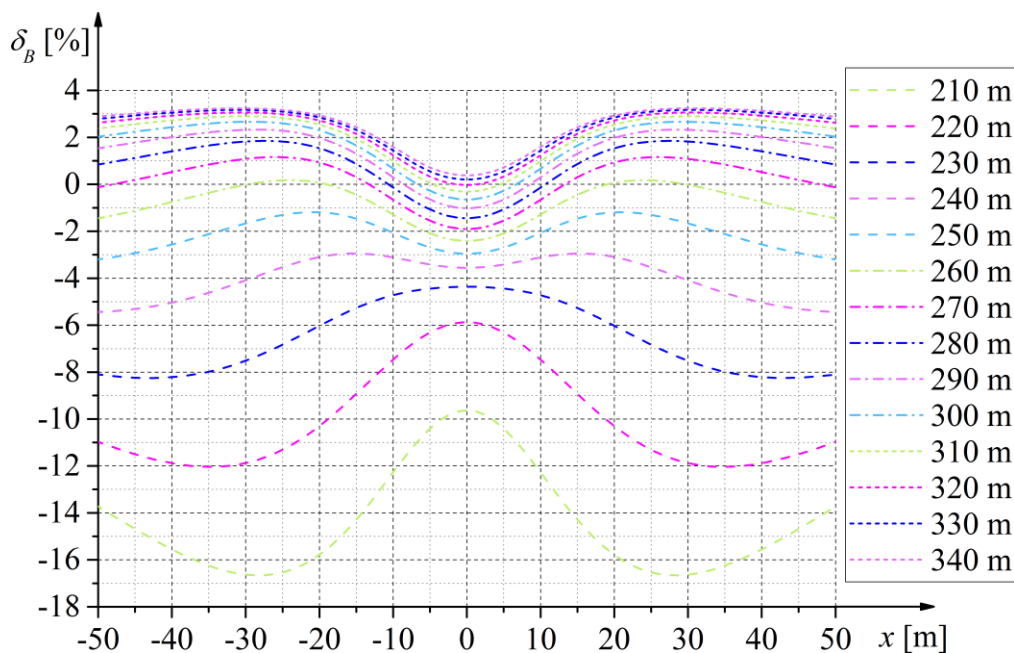
Анализиран је кос распон надземног вода напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” дужине 281 m, који је приказан на слици 8.24. Прорачун се врши у софтверском пакету *XGSLab*, применом модела 1 и 2, дуж латералних праваца  $P_1$ – $P_{28}$ , који се налазе на међусобном растојању од 10 m. Позиције латералних праваца  $P_1$ – $P_{28}$  дате су у табели 9.7. Прорачун се врши за распон 2–3, при чему се уважава и утицај суседних распона 1–2 и 3–4.

У табели 9.7. такође су приказане максималне вредности магнетске индукције дуж праваца  $P_1$ – $P_{28}$ , добијене применом разматрана два модела, као и релативна одступања ових резултата. Може се закључити да се ова релативна одступања налазе у опсегу од -9,64% до +0,69%. На правцу  $P_1$ , који се налази на растојању од 6 m од места вешања проводника на стуб бр. 2, релативно одступање је највеће и износи -9,64%.

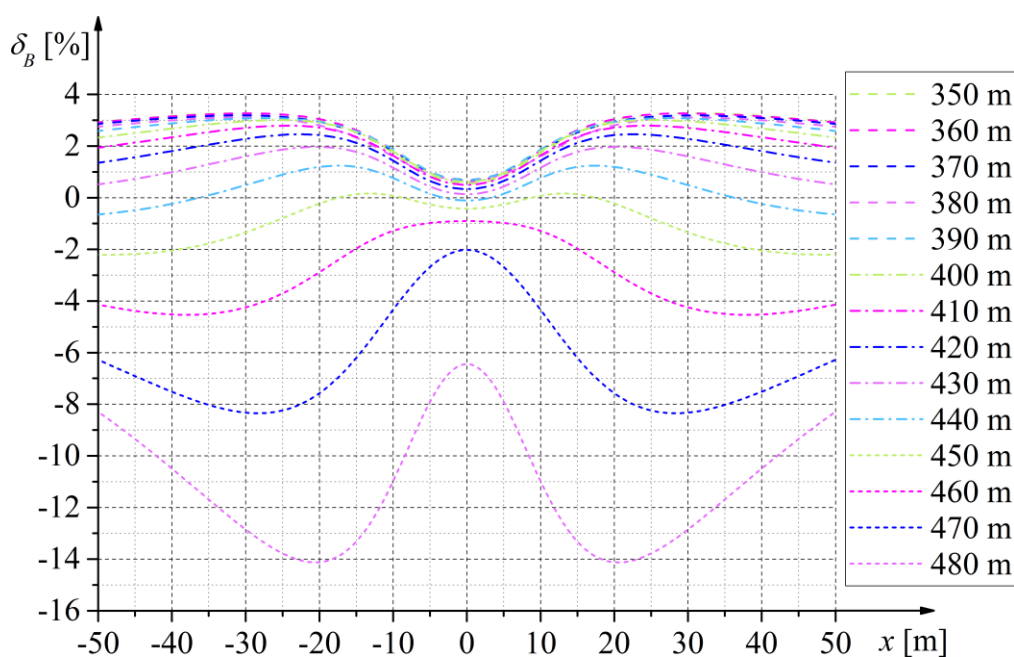
Табела 9.7. Резултати прорачуна магнетске индукције применом модела 1 и 2

Латерални правац	$z$ [m]	$h_f$ [m]	$h_z$ [m]	$B_{max_1}$ [ $\mu$ T]	$B_{max_2}$ [ $\mu$ T]	$\delta_{B_{max_2}}$ [%]
$P_1$	210	27,485	31,685	3,047	2,753	-9,64
$P_2$	220	25,587	29,787	3,370	3,172	-5,87
$P_3$	230	23,807	28,007	3,822	3,655	-4,36
$P_4$	240	22,143	26,343	4,366	4,211	-3,56
$P_5$	250	20,597	24,797	4,992	4,844	-2,96
$P_6$	260	19,167	23,367	5,698	5,561	-2,41
$P_7$	270	17,853	22,053	6,486	6,363	-1,90
$P_8$	280	16,656	20,856	7,352	7,247	-1,44
$P_9$	290	15,575	19,775	8,289	8,204	-1,02
$P_{10}$	300	14,610	18,810	9,279	9,219	-0,65
$P_{11}$	310	13,760	17,960	10,299	10,267	-0,31
$P_{12}$	320	13,026	17,226	11,316	11,313	-0,03
$P_{13}$	330	12,408	16,608	12,289	12,314	0,20
$P_{14}$	340	11,906	16,106	13,170	13,220	0,38
$P_{15}$	350	11,518	15,718	13,911	13,986	0,54
$P_{16}$	360	11,247	15,447	14,467	14,557	0,63
$P_{17}$	370	11,090	15,290	14,801	14,903	0,69
$P_{18}$	380	11,049	15,249	14,896	14,996	0,67
$P_{19}$	390	11,124	15,324	14,728	14,827	0,68
$P_{20}$	400	11,313	15,513	14,327	14,415	0,61
$P_{21}$	410	11,618	15,818	13,714	13,782	0,50
$P_{22}$	420	12,039	16,239	12,928	12,971	0,33
$P_{23}$	430	12,575	16,775	12,015	12,031	0,13
$P_{24}$	440	13,226	17,426	11,025	11,013	-0,11
$P_{25}$	450	13,993	18,193	10,006	9,963	-0,43
$P_{26}$	460	14,876	19,076	9,002	8,921	-0,90
$P_{27}$	470	15,874	20,074	8,083	7,920	-2,02
$P_{28}$	480	16,989	21,189	7,462	6,982	-6,44

Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_B$  дуж латералних праваца  $P_1$ – $P_{14}$  за резултате прорачуна добијене применом модела 2 дат је на слици 9.10. Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_B$  дуж латералних праваца  $P_{15}$ – $P_{28}$  дат је на слици 9.11.



Слика 9.10. Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_B$  дуж латералних праваца  $P_1$ – $P_{14}$  за резултате прорачуна магнетске индукције добијене применом модела 2



Слика 9.11. Упоредни приказ вредности релативне грешке  $\delta_B$  дуж латералних праваца  $P_{15}$ – $P_{28}$  за резултате прорачуна магнетске индукције добијене применом модела 2

Као и у претходним примерима, који су се односили на праве распоне, највеће вредности релативне грешке јављају се на правцима који се налазе у близини стубова. Највеће вредности релативних грешака добијају се на правцима  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_{28}$ , који се налазе у близини стубова 2 и 3. На свим осталим правцима ( $P_3$ – $P_{27}$ ) вредности релативне грешке у зони од -50 m до +50 m налазе се у опсегу од -8,35% до 3,28%.

Вредности релативне грешке  $\delta_B$  на различитим позицијама на латералним правцима дате су у табели 9.8.

**Табела 9.8.** Вредности релативне грешке на различитим позицијама на латералним правцима

Латерални правац	z [m]	$\delta_B$ [%]										
		x [m]										
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
P <sub>1</sub>	210	-9,64	-10,41	-12,28	-14,29	-15,78	-16,54	-16,63	-16,25	-15,55	-14,68	-13,73
P <sub>2</sub>	220	-5,87	-6,31	-7,47	-8,93	-10,30	-11,31	-11,88	-12,04	-11,88	-11,50	-10,97
P <sub>3</sub>	230	-4,36	-4,44	-4,72	-5,27	-6,02	-6,83	-7,52	-7,98	-8,22	-8,24	-8,10
P <sub>4</sub>	240	-3,56	-3,42	-3,12	-2,95	-3,10	-3,53	-4,09	-4,62	-5,04	-5,31	-5,44
P <sub>5</sub>	250	-2,96	-2,69	-2,07	-1,46	-1,19	-1,30	-1,66	-2,12	-2,56	-2,93	-3,20
P <sub>6</sub>	260	-2,41	-2,09	-1,29	-0,44	0,07	0,17	-0,02	-0,36	-0,75	-1,12	-1,44
P <sub>7</sub>	270	-1,90	-1,55	-0,66	0,30	0,93	1,16	1,08	0,84	0,52	0,19	-0,12
P <sub>8</sub>	280	-1,44	-1,07	-0,14	0,86	1,54	1,82	1,82	1,65	1,40	1,12	0,84
P <sub>9</sub>	290	-1,02	-0,65	0,30	1,30	1,98	2,28	2,32	2,21	2,01	1,78	1,53
P <sub>10</sub>	300	-0,65	-0,28	0,67	1,65	2,30	2,60	2,66	2,59	2,43	2,24	2,03
P <sub>11</sub>	310	-0,31	0,05	0,98	1,93	2,54	2,83	2,90	2,85	2,72	2,56	2,38
P <sub>12</sub>	320	-0,03	0,33	1,24	2,15	2,72	2,98	3,06	3,02	2,92	2,78	2,62
P <sub>13</sub>	330	0,20	0,55	1,44	2,31	2,84	3,09	3,17	3,14	3,05	2,93	2,78
P <sub>14</sub>	340	0,38	0,72	1,59	2,43	2,93	3,17	3,24	3,21	3,13	3,02	2,88
P <sub>15</sub>	350	0,54	0,87	1,73	2,54	3,01	3,22	3,27	3,25	3,16	3,05	2,93
P <sub>16</sub>	360	0,63	0,96	1,84	2,61	3,04	3,22	3,26	3,23	3,15	3,04	2,92
P <sub>17</sub>	370	0,69	1,00	1,81	2,53	2,94	3,13	3,19	3,16	3,09	2,98	2,86
P <sub>18</sub>	380	0,67	0,92	1,60	2,32	2,80	3,03	3,10	3,08	3,00	2,88	2,75
P <sub>19</sub>	390	0,68	1,01	1,87	2,58	2,94	3,07	3,07	2,99	2,88	2,74	2,58
P <sub>20</sub>	400	0,61	0,94	1,79	2,54	2,91	3,01	2,96	2,84	2,68	2,50	2,33
P <sub>21</sub>	410	0,50	0,82	1,63	2,36	2,71	2,79	2,70	2,54	2,34	2,13	1,93
P <sub>22</sub>	420	0,33	0,65	1,43	2,12	2,42	2,43	2,28	2,05	1,81	1,57	1,35
P <sub>23</sub>	430	0,13	0,43	1,16	1,77	1,97	1,86	1,60	1,29	0,99	0,73	0,52
P <sub>24</sub>	440	-0,11	0,15	0,76	1,19	1,19	0,89	0,49	0,09	-0,24	-0,48	-0,65
P <sub>25</sub>	450	-0,43	-0,26	0,07	0,13	-0,23	-0,79	-1,34	-1,77	-2,04	-2,18	-2,21
P <sub>26</sub>	460	-0,90	-0,98	-1,28	-1,97	-2,89	-3,70	-4,25	-4,50	-4,52	-4,38	-4,14
P <sub>27</sub>	470	-2,02	-2,68	-4,34	-6,20	-7,58	-8,24	-8,33	-8,03	-7,52	-6,91	-6,27
P <sub>28</sub>	480	-6,44	-7,91	-10,98	-13,32	-14,12	-13,78	-12,85	-11,69	-10,49	-9,35	-8,29

На основу приказаних примера се може закључити да се значајнија одступања између резултата добијених применом модела 1 и 2 јављају искључиво на правцима који се налазе у непосредној близини стубова. На свим разматраним правцима се најмање вредности одступања јављају управо у зони испод вода, што представља повољну околност, пошто се у овој зони јављају највише вредности магнетске индукције и спроводи највећи број испитивања. Закључује се да се модел 2, који се заснива на моделовању вода праволинијским проводницима, може користити за оцену изложености људи, уз уважавање несигурности оваквог прорачуна и уз истовремено уважавање резултата добијених мерењем.



## 9.4. Несигурност мерења висине фазних проводника

### 9.4.1. Метода за израчунавање утицаја грешке мерења висине фазних проводника на резултате прорачуна магнетске индукције

Утицај грешке мерења висине проводника одређен је прорачуном магнетске индукције за типичне геометрије надземних водова, које су дате на сликама 4.3, 4.4. и 4.5. Подаци о овим водовима дати су у табели 4.1, а висине фазних и заштитних проводника у табелама 4.2. и 4.3. Прорачуни су спроведени дуж латералног правца који се налази на висини од 1 m изнад тла, од  $x = -50$  m до  $x = +50$  m. Приликом прорачуна је претпостављено да се проводник налази на висини која представља минималну висину проводника изнад тла на датом распону. Метода за израчунавање утицаја грешке мерења висине фазних проводника на резултате прорачуна детаљно је описана у поглављу 8.4.2. [79].

Ради добијања тачних вредности магнетске индукције ( $B_t$ ) за анализирани случај, прорачуни су прво спроведени за усвојене тачне вредности висине проводника из табеле 4.2. Прорачуни су након тога поновљени узимајући у обзир максималну грешку мерења висине ( $\Delta l_v$ ) из табеле 8.9, ради добијања вредности магнетске индукције ( $B$ ) када ласерски даљиномер мери с наведеном грешком. На основу ових резултата израчунава се релативна грешка ( $\delta_B$ ), према следећем изразу:

$$\delta_B = \frac{B - B_t}{B_t} \cdot 100\% = \frac{B(h_f \pm \Delta l_v) - B(h_f)}{B(h_f)} \cdot 100\% \quad (9.4)$$

### 9.4.2. Резултати прорачуна за случај када су висине свих фазних проводника измерене са истом грешком

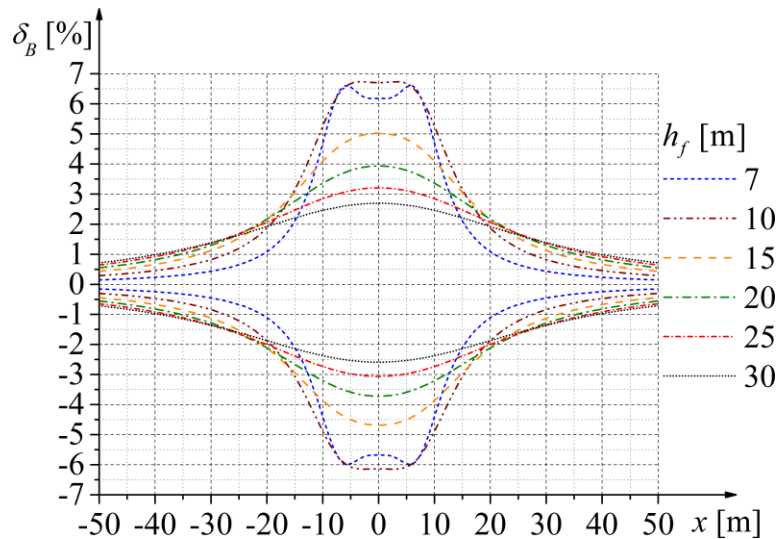
Приликом прорачуна магнетске индукције за одређену висину фазних проводника узета је у обзир максимална вредност грешке  $\Delta l_v$  за дату висину, која обухвата различите вредности растојања  $l_h$ , према табели 8.9. За фазне проводнике који се налазе на висинама од 7 m и 7,75 m, прорачуни су спроведени под претпоставком да  $\Delta l_v$  износи  $\pm 0,3$  m, што представља вредност узету из табеле 8.9, која се односи на најближу висину од 8 m. За све друге висине фазних проводника почев од 9 m, прорачуни су спроведени за  $\Delta l_v = \pm 0,4$  m, у складу с резултатима приказаним у табели 8.9.

Вредности  $\delta_B$  [%] добијене прорачуном за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” приказане су на слици 9.12.

Уколико се посматрају максималне вредности грешке  $\delta_B$  у опсегу од  $x = -50$  m до  $x = +50$  m може се закључити да релативна грешка  $\delta_B$  опада с повећањем висине фазних проводника. Разлог је то што се максимална вредност  $\Delta l_v$  веома мало мења с повећањем висине фазних проводника у опсегу 10–30 m (табела 8.9), тако да се однос  $\Delta l_v/h_f$  смањује с повећањем висине фазних проводника.

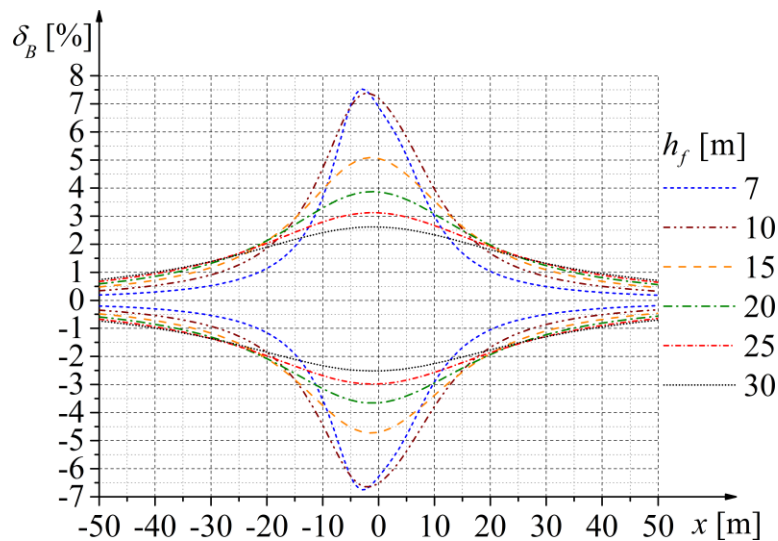
Такође се може уочити да се вредности  $\delta_B$  значајно мењају дуж  $x$  осе. За сваку конкретну висину фазних проводника вредности  $\delta_B$  су веће у области која се налази непосредно испод надземног вода и опадају с повећањем растојања од осе вода. Разлог за то је чињеница да висине фазних проводника имају највећи утицај на вредности магнетске индукције у области која се налази непосредно испод вода.

Вредности  $\delta_B$  налазе се у опсегу од -6,1% до 6,7% за висину фазних проводника од 10 m, док се за висину од 30 m налазе у опсегу од -2,6% до 2,7%.



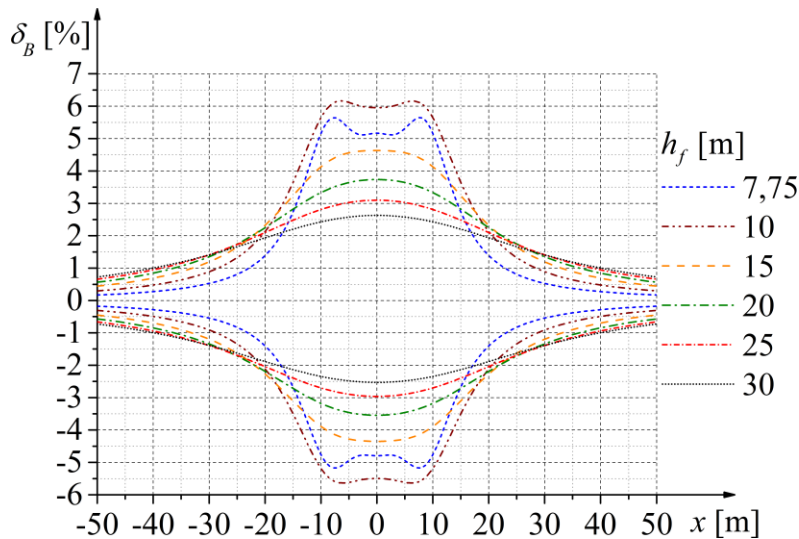
**Слика 9.12.** Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”

Претходна анализа поновљена је за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „јела”, а добијени резултати су приказани на слици 9.13. У овом случају се вредности  $\delta_B$  налазе у опсегу од -6,7% до 7,5% за висину најнижег проводника од 7 m, док се за висину од 30 m налазе у опсегу од -2,5% до 2,6%.



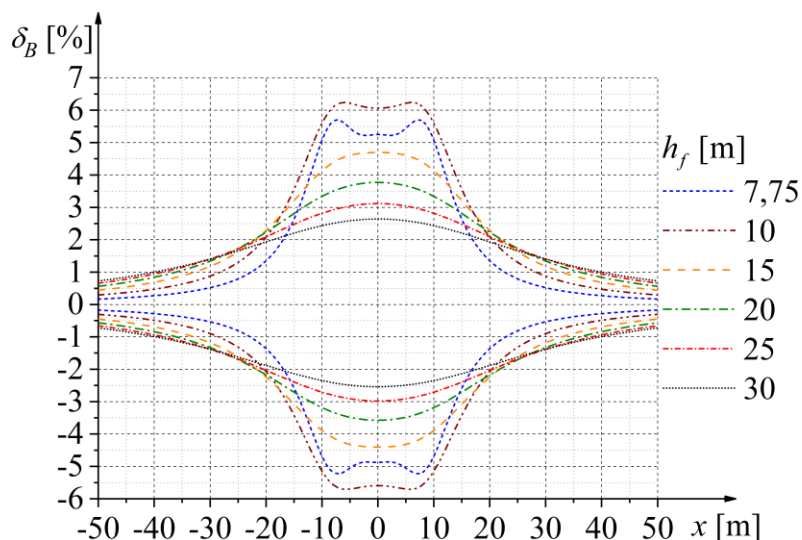
**Слика 9.13.** Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „јела”

Резултати добијени за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „портал”, приказани су на слици 9.14. Вредности  $\delta_B$  крећу се од -5,6% до 6,2% за висину фазних проводника од 10 m, док се за висину од 30 m крећу од -2,5% до 2,6%.



**Слика 9.14.** Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „портал“

Резултати добијени за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „Y“ приказани су на слици 9.15. Добијени резултати су веома слични резултатима који се односе на надземни вод 220 kV са стубовима типа „портал“, због њихових сличних геометрија. За све анализиране висине проводника и у свим тачкама од интереса разлике су мање од 0,5%.

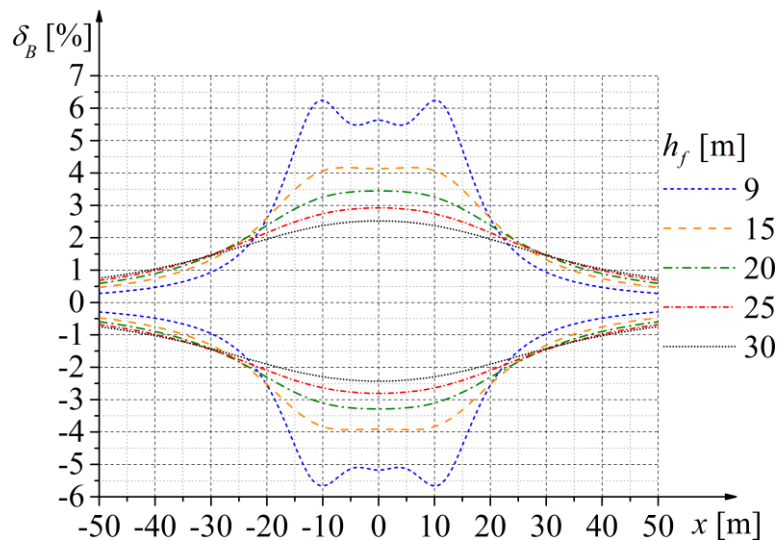


**Слика 9.15.** Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „Y“

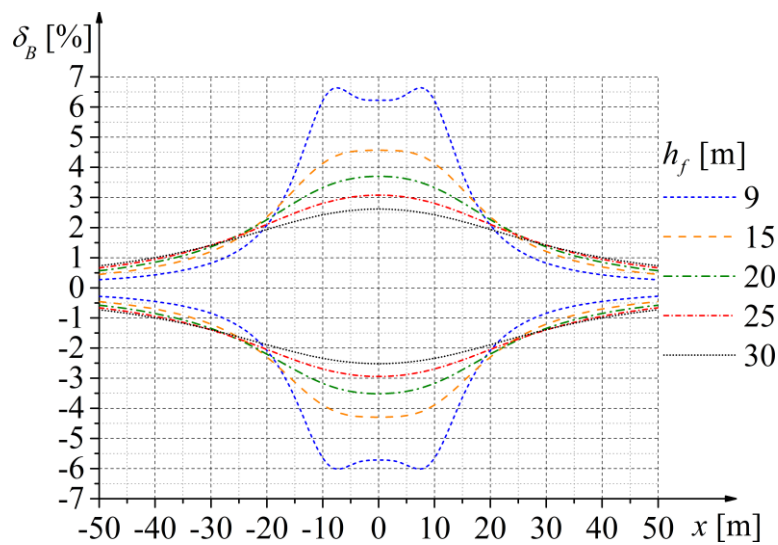
Резултати добијени за надземне воде напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „портал“ и „Y“, приказани су на сликама 9.16. и 9.17.

У случају вода са стубовима типа „портал“ и висинама фазних проводника од 9 m вредности  $\delta_B$  налазе се у опсегу од -5,7% до 6,2%, док се у случају вода са висинама фазних проводника од 30 m ове вредности налазе у опсегу од -2,4% до 2,5%.

У случају вода са стубовима типа „Y“ вредности  $\delta_B$  налазе се у опсегу од -6,0% до 6,6% за висину фазних проводника од 9 m, док се за висину од 30 m налазе у опсегу од -2,5% до 2,6%.



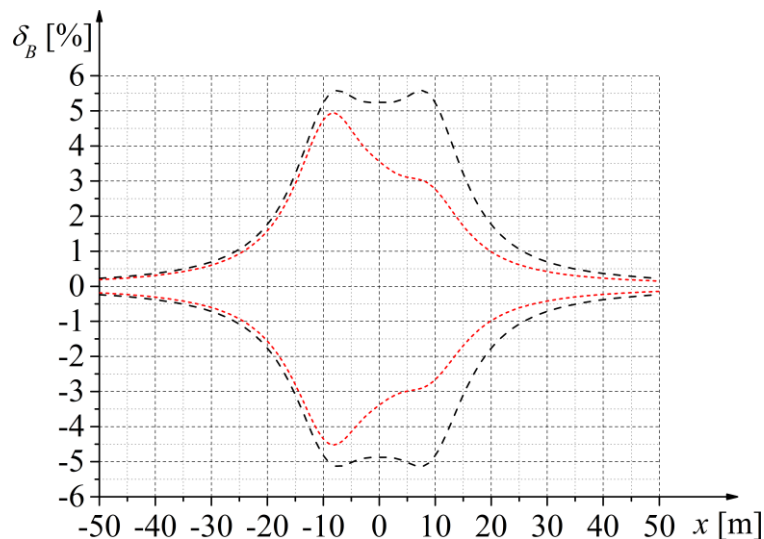
Слика 9.16. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „портал“



Слика 9.17. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „Y“

### 9.4.3. Резултати прорачуна за случај када су висине свих фазних проводника измерене с различитом грешком

У случају када се висине сва три фазна проводника мере са истог места, растојања до појединих фазних проводника су различита, због чега и грешке мерења висине за ова растојања такође могу бити различита. Прорачун за случај надземног вода напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „Y“ код којег висине фазних проводника износе 9 m је због тога поновљен под претпоставком да су висине фазних проводника измерене с различитим грешкама. Хоризонтално растојање до фазних проводника износи 5 m, 14 m и 23 m, а одговарајуће максималне грешке  $\Delta l_v$  износе 33,9 cm, 21,0 cm и 16,2 cm. Грешке мерења висина заштитне ужади износе 36,9 cm и 27,8 cm. Претпостављено је да грешка  $\Delta l_v$  има исти знак током мерења висина свих проводника. На слици 9.18. дат је упоредни приказ резултата добијених за случај када је претпостављено да су све три висине измерене с максималном грешком од 33,9 cm и за случај када је претпостављено да је свака висина измерена с одговарајућом грешком.



**Слика 9.18.** Поређење резултата  $\delta_B$  (црна линија – све три висине измерене са максималном грешком; црвена линија – свака висина измерена с одговарајућом грешком)

Опсег  $\delta_B$ , добијен за случај када је висина сваког фазног проводника мерена с одговарајућом грешком, у свим анализираним тачкама ужи је од опсега који је добијен када су висине сва три фазна проводника измерене с максималном грешком. Због тога резултати приказани на сликама 9.12–9.17, који су добијени под претпоставком да су висине сва три фазна проводника измерене с максималном грешком, могу бити коришћени за брзу процену ове компоненте несигурности.

#### 9.4.4. Резултати прорачуна за различите грешке мерења висине

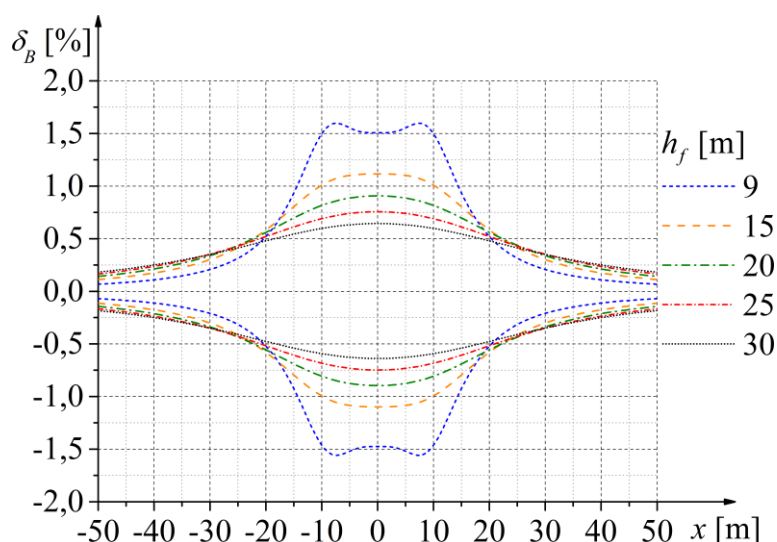
Прорачуни су поновљени за мерење висине спроведено ласерским даљиномерима који имају следеће карактеристике:

- 1)  $\Delta l_s = \pm 4 \text{ cm}$ ,  $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$ ;
- 2)  $\Delta l_s = \pm 1 \text{ mm}$ ,  $\Delta \alpha = +0,1^\circ$ .

Максималне вредности  $\Delta l_v$  за све анализираних вредности висина проводника и растојања до њега које су добијене за ласерске даљиномере наведених карактеристика дате су сликама 8.36. и 8.38.

Прорачуни су спроведени за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „У”, под претпоставком да хоризонтално растојање између фазног проводника и мерног места износи 50 m. За висине фазних проводника које се налазе у опсегу 9–30 m грешка  $\Delta l_v$  варира од 9,3 cm до 10,7 cm. Ради поједностављења, вредност грешке  $\Delta l_v$  заокружена је на 10 cm приликом прорачуна за све висине. Резултати прорачуна  $\delta_B$  приказани су на слици 9.19. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  налазе се у опсегу од -1,6% до 1,6%.

У случају ласерског даљиномера с декларисаним грешкама  $\Delta l_s = \pm 1 \text{ mm}$  и  $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$ , грешка  $\Delta l_v$  за  $l_h = 50 \text{ m}$  износи 8,8 cm, што је незнатно мање него у претходном случају, где је износила око 10 cm.



Слика 9.19. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „Y”

#### 9.4.5. Упоредни приказ резултата за ласерске даљиномере различитих карактеристика

Прорачуни приказани у претходним поглављима спроведени су за три ласерска даљиномера следећих карактеристика:

- 1)  $\Delta l_s = \pm 40$  cm,  $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$ ;
- 2)  $\Delta l_s = \pm 4$  cm,  $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$ ;
- 3)  $\Delta l_s = \pm 1$  mm,  $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$ .

У табели 9.9, на примеру надземног вода напонског нивоа 400 kV са „Y” стубовима, дат је упоредни приказ максималних вредности  $\delta_B$  за сва три анализирана ласерска даљиномера. За сваки анализирани модел ласерског даљиномера и за све разматране висине фазних проводника дат је опсег у којем се налазе вредности релативне грешке  $\delta_B$  за вредности  $x$  координате од -50 m до +50 m.

Табела 9.9. Поређење резултата  $\delta_B$  за три ласерска даљиномера различитих карактеристика

$h_f$	$\delta_B$		
	$\Delta l_s = \pm 40$ cm, $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$	$\Delta l_s = \pm 4$ cm, $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$	$\Delta l_s = \pm 1$ mm, $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$
9 m	-6,0% – 6,6%	-1,6% – 1,6%	-1,4% – 1,4%
15 m	-4,3% – 4,6%	-1,1% – 1,1%	-1,0% – 1,0%
20 m	-3,5% – 3,7%	-0,9% – 0,9%	-0,8% – 0,8%
25 m	-2,9% – 3,1%	-0,7% – 0,8%	-0,7% – 0,7%
30 m	-2,5% – 2,6%	-0,6% – 0,6%	-0,6% – 0,6%

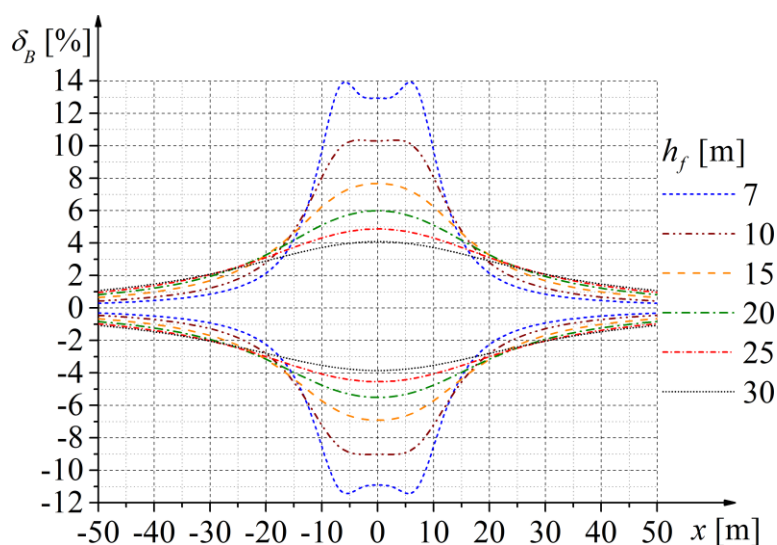
Уколико се узму у разматрање опсези грешке из табеле 9.9, може се закључити да се с повећањем висине фазних проводника максимална грешка  $\delta_B$  у свим случајевима смањује. Уколико се посматрају опсези грешке за исту висину фазних проводника, закључује се да су вредности грешке  $\delta_B$  највеће у првом случају, пошто је грешка  $\Delta l_s$  у овом случају највећа и износи  $\pm 40$  cm. Најниже вредности грешке добијају се у трећем случају, иако су разлике у односу на други случај незнатне.

На основу приказаних резултата закључује се да се сви разматрани ласерски даљиномери могу користити за мерење висина проводника надземних водова, али се утицај њихове грешке на резултате прорачуна магнетске индукције мора уважити приликом прорачуна проширене несигурности прорачуна. Приликом мерења висине, увек када је то могуће, требало би изабрати оптималну позицију мерног места, тј. хоризонтално растојање од проводника које обезбеђује најмању могућу грешку мерења, према резултатима приказаним на сликама 8.28, 8.36. и 8.38.

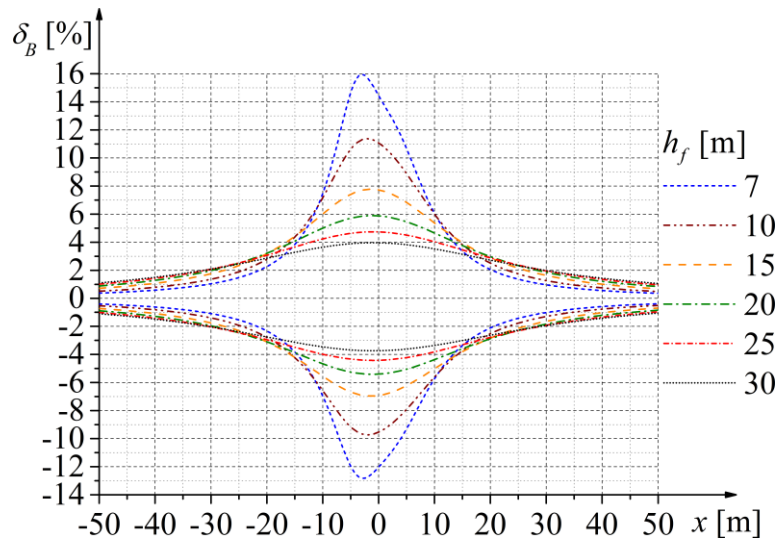
На основу спроведених анализа закључује се да грешка мерења висина фазних проводника може имати значајан утицај на проширену несигурност прорачуна магнетске индукције и да због тога мора бити узета у обзир. Као и код електричног поља, овај утицај зависи од висина фазних проводника, геометрије надземног вода и позиције тачке у којој се рачуна поље у односу на надземни вод, при чему се веће вредности релативне грешке јављају у зони непосредно испод надземног вода.

#### 9.4.6. Несигурност услед одступања између латералног правца на којем се мери висина и правца дуж којег се врше мерење и прорачун магнетске индукције

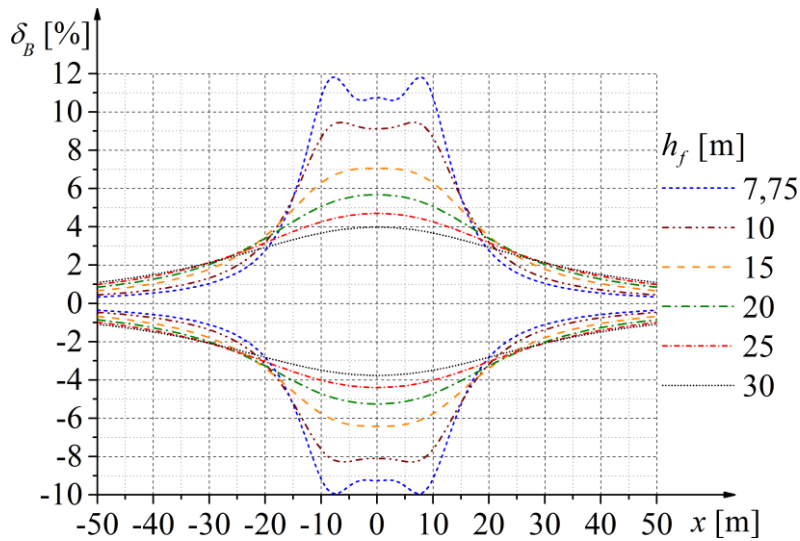
У претходним поглављима је узета у обзир само грешка мерења коју уноси ласерски даљиномер. Приликом мерења висине може доћи до додатне грешке, која се јавља услед одступања између латералног правца на којем се мери висина и правца дуж којег се врше мерење и прорачун магнетске индукције, због чега се висина проводника не мери на латералном правцу од интереса, већ на правцу који се налази на растојању  $\Delta z$ , што доводи до грешке мерења висине фазних проводника, која износи  $\Delta h_f$ . На основу образложења датих у поглављу 8.4.7, усвојено је да  $\Delta h_f$  износи 0,6 m, и за ову вредност су спроведени даљи прорачуни. Резултати прорачуна приказани су на сликама 9.20–9.25.



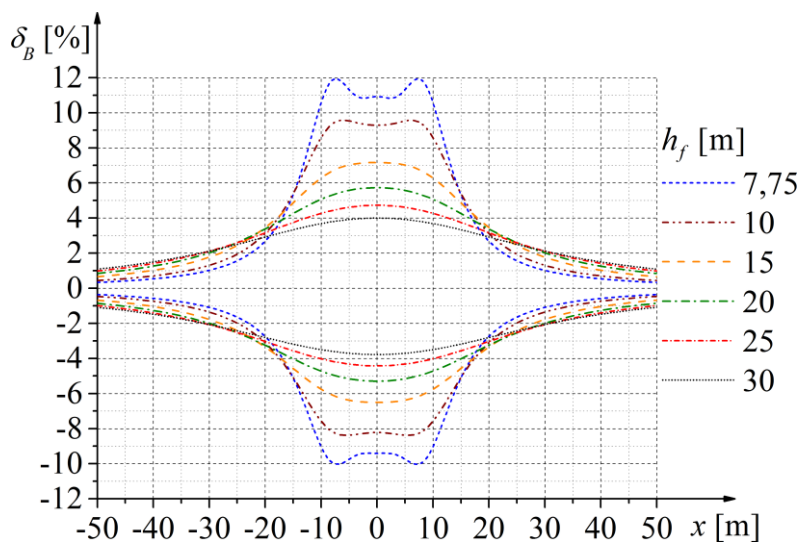
Слика 9.20. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”



Слика 9.21. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „јела”

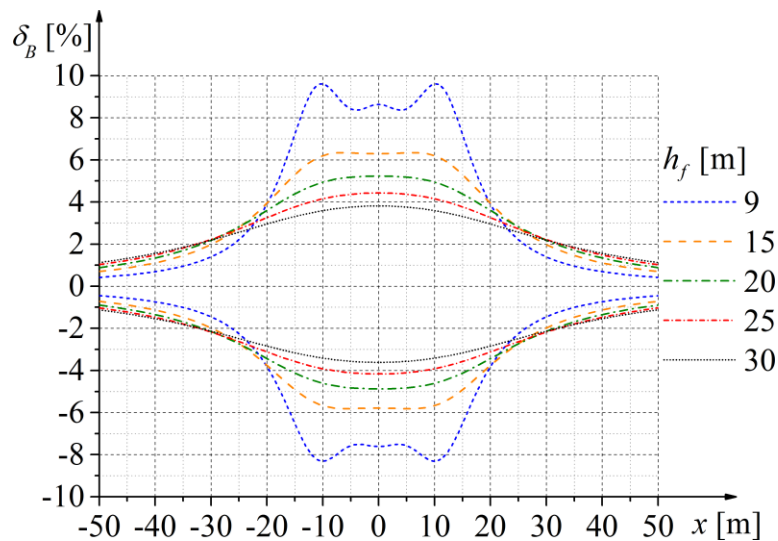


Слика 9.22. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „портал”

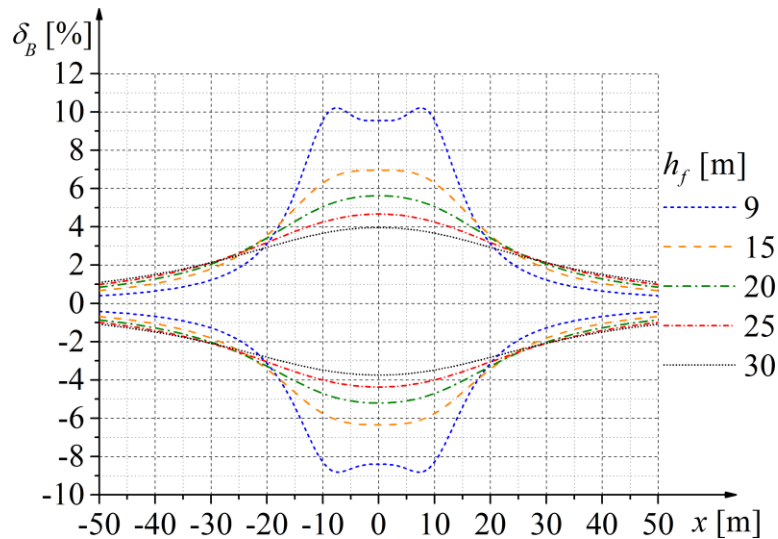


Слика 9.23. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „Y”





Слика 9.24. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „портал“



Слика 9.25. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „Y“

Опсежи у којима се налазе вредности релативне грешке  $\delta_B$  од  $x = -50$  m до  $x = +50$  m код разматраних надземних водова, дати су у табели 9.10.

Табела 9.10. Максимални опсежи грешке  $\delta_B$  добијени за  $\Delta h_f = \pm 0,6$  m

$h_f$ [m]	110 kV		220 kV		400 kV	
	Портал	Јела	Портал	Y	Портал	Y
7	-11,44–13,93	-12,83–15,96	/	/	/	/
7,75	/	/	-9,94–11,82	-10,03–11,94	/	/
9	/	/	/	/	-8,31–9,61	-8,82–10,22
10	-9,02–10,34	-9,73–11,38	-8,28–9,46	-8,38–9,58	/	/
15	-6,92–7,67	-6,97–7,78	-6,43–7,06	-6,51–7,16	-5,82–6,34	-6,35–6,96
20	-5,51–5,99	-5,42–5,89	-5,25–5,68	-5,30–5,73	-4,87–5,23	-5,21–5,63
25	-4,54–4,87	-4,43–4,74	-4,40–4,70	-4,42–4,73	-4,17–4,43	-4,37–4,67
30	-3,85–4,08	-3,74–3,96	-3,76–3,98	-3,78–4,00	-3,61–3,81	-3,74–3,96

На основу резултата приказаних на сликама 9.20–9.25. и у табели 9.10, закључује се да су вредности релативне грешке значајне, што је нарочито изражено код водава с мањим висинама фазних проводника. Посебно је неповољна околност што се веће вредности грешке јављају у зони испод надземног вода, где се јављају и веће вредности магнетске индукције, које у неким случајевима по вредности могу бити блиске прописаним границама излагања, па је смањење несигурности прорачуна веома значајно. Због тога је мерење потребно спровести тако да се ова грешка сведе на минимум, као што је описано у поглављу 8.4.7.

## 9.5. Несигурност мерења растојања између фазних проводника

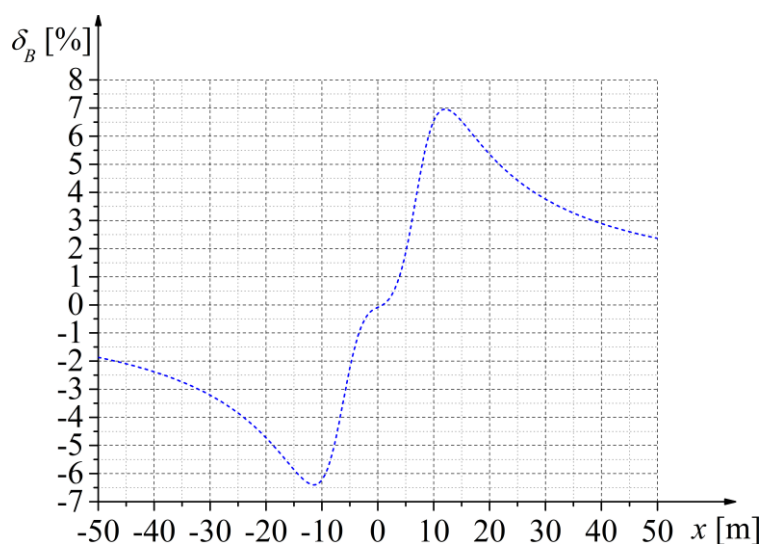
Метода за израчунавање утицаја грешке мерења хоризонталног растојања између фазних проводника на резултате прорачуна детаљно је описана у поглављу 8.5.1.

Разматрани су ласерски даљиномери следећих карактеристика:

- 1)  $\Delta l_s = \pm 40 \text{ cm}$ ,  $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$ ;
- 2)  $\Delta l_s = \pm 4 \text{ cm}$ ,  $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$ ;
- 3)  $\Delta l_s = \pm 1 \text{ mm}$ ,  $\Delta \alpha = \pm 0,1^\circ$ .

Ради добијања највећих вредности грешке, претпостављено је да грешка мерења хоризонталног растојања износи  $\pm 40 \text{ cm}$ , што одговара случају када се мерење спроводи првим наведеним даљиномером.

Прорачун је спроведен за вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” и висинама фазних проводника од 7 m. Тачне вредности  $x$  координата фазних проводника износе -6,7 m, 0 m, 6,7 m. Претпостављено је да су услед грешке мерења хоризонталног растојања од  $\pm 40 \text{ cm}$  измерена погрешна растојања до фазних проводника и да  $x$  координате фазних проводника, добијене на основу ових мерења, износе -6,3 m, -0,4 m, +7,1 m. Релативна одступања резултата прорачуна за овај случај дата су на слици 9.26. Релативна одступања се у анализираном примеру налазе у опсегу од -7% до +7%. Због тога је растојања између проводника потребно одредити на основу њихових растојања која су дата на пројектима стубова, увек када је то могуће.



**Слика 9.26.** Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” и висинама фазних проводника од 7 m

## 9.6. Несигурност мерења висине заштитних проводника

Прорачун је спроведен за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” и висинама фазних проводника од 7 m. Претпостављено је да грешка мерења висине износи +40 cm и да су мерењем висина заштитних проводника уместо висина од 11,2 m, добијене висине од 11,6 m. У зони од  $x = -50$  m до  $x = +50$  m релативна одступања резултата прорачуна за овај случај налазе се у опсегу од 0,44% до 0,66%.

## 9.7. Несигурност мерења растојања између заштитних проводника

Прорачун је спроведен за случај надземног вода напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” и висинама фазних проводника од 7 m. Ради добијања највећих вредности грешке, претпостављено је да грешка мерења хоризонталног растојања износи  $\pm 40$  cm. Тачне вредности  $x$  координата заштитних проводника износе  $-4,5$  m и  $+4,5$  m, а њихове  $x$  координате добијене на основу мерења с грешком од  $\pm 40$  cm износе  $-4,9$  m и  $+4,9$  m. Релативна одступања резултата прорачуна за овај случај у зони од  $x = -50$  m до  $x = +50$  m налазе се у опсегу од  $-1,74\%$  до  $-0,56\%$ .

## 9.8. Несигурност мерења струје надземног вода

Прорачун магнетске индукције може се вршити за услове који су постојали у време мерења или за најнеповољније услове са аспекта изложености људи. Када се прорачун спроводи за услове који су постојали у време мерења, податак о струји добија се од компаније која је власник надземног вода, при чему постоји одређена несигурност мерења струје, која зависи од грешке мерних струјних трансформатора.

### 9.8.1. Максималне дозвољене грешке струјних мерних трансформатора

Струјна грешка струјних мерних трансформатора ( $\varepsilon$ ) дефинише се као грешка коју мерни трансформатор уноси у мерење и која потиче од чињенице да стварни однос трансформације није једнак назначеном односу трансформације [126]. Назначени однос трансформације струјних мерних трансформатора ( $k_r$ ) представља однос назначене примарне струје и назначене секундарне струје, док стварни однос трансформације представља однос стварне примарне и стварне секундарне струје. Струјна грешка, изражена у процентима, дата је следећим изразом [129]:

$$\varepsilon [\%] = \frac{k_r \cdot I_s - I_p}{I_p} \cdot 100\% \quad (9.5)$$

где су:

$k_r$  – назначени однос трансформације;

$I_p$  – стварна примарна струја;

$I_s$  – стварна секундарна струја када протиче струја  $I_p$ , под условима мерења.

Границе струјне грешке струјних мерних трансформатора приказане су у табели 9.11, за различите класе тачности ових трансформатора. Вредности дате у табели 9.11. прописане су у [129]. У табели 9.11. ознака  $I$  [%] представља струју изражену у процентима од назначене струје.

**Табела 9.11.** Границе струјне грешке мерних струјних трансформатора [129]

Класа тачности	$I$ [%]			
	5	20	100	120
0,1	$\pm 0,40$	$\pm 0,20$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$
0,2	$\pm 0,75$	$\pm 0,35$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$
0,5	$\pm 1,50$	$\pm 0,75$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$
1,0	$\pm 3,00$	$\pm 1,50$	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$

### 9.8.2. Метода за израчунавање утицаја грешке мерења струје на резултате прорачуна магнетске индукције

Утицај грешке мерења струје одређен је прорачуном магнетске индукције. Прорачуни су спроведени дуж латералног правца који се налази на висини од 1 m изнад тла, од  $x = -50$  m до  $x = +50$  m, и то за геометрије надземних водова дате на сликама 4.3, 4.4. и 4.5, податке о водовима из табеле 4.1. и висине фазних и заштитних проводника из табела 4.2. и 4.3.

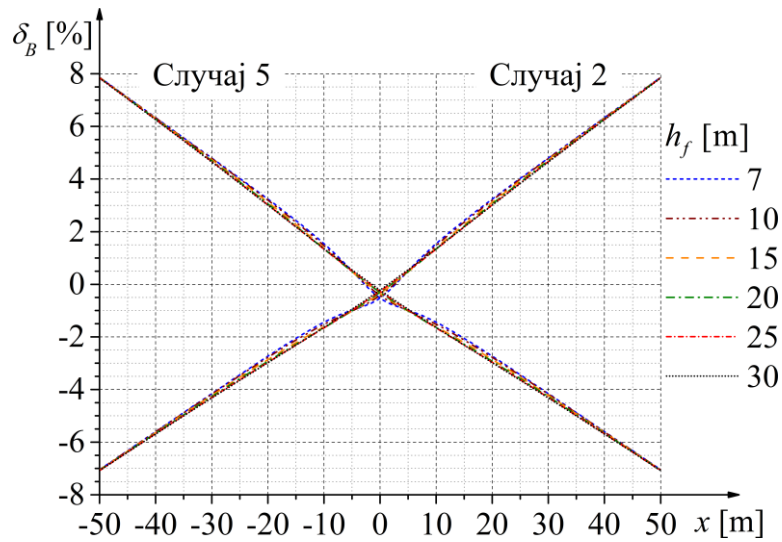
Разматрани су мерни трансформатори класе 1, пошто они представљају најнеповољнији реалан случај. Према подацима датим у табели 9.11, струјна грешка у овом случају износи  $\pm 1\%$  за оптерећење од 100%.

Иницијални прорачуни су спроведени за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”.

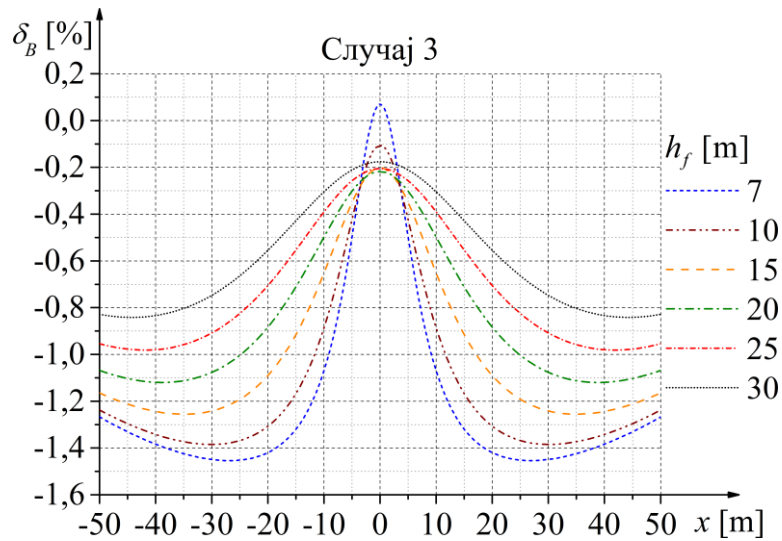
Прорачуни су прво спроведени без урачунавања струјне грешке и на тај начин је добијена тачна вредност магнетске индукције за анализирани случај ( $B_t$ ), а затим су поновљени узимајући у обзир струјну грешку, ради израчунавања вредности магнетске индукције ( $B$ ) које се добијају када мерни трансформатор мери с максималном декларисаном грешком. На бази ових резултата, релативна грешка  $\delta_B$  се израчунава применом израза (9.1).

У случају када је струја у све три фазе измерена са струјном грешком од  $+1\%$ , релативна грешка  $\delta_B$  такође износи  $+1\%$  у свим тачкама у којима се врши прорачун. Такође, у случају када вредност струјне грешке у све три фазе износи  $-1\%$ , релативна грешка  $\delta_B$  такође износи  $-1\%$ . Међутим, као и код анализе утицаја грешке мерења напонских мерних трансформатора на резултате прорачуна јачине електричног поља, потребно је анализирати и случајеве када вредност струјне грешке у свакој фази износи или  $-1\%$  или  $+1\%$ , тј. потребно је анализирати осам случајева наведених у табели 8.13. У случајевима 2–7, где струјне грешке мерних трансформатора у различитим фазама имају различит знак, грешка  $\delta_B$  нема константну вредност дуж  $x$  осе, већ зависи од позиције тачке за коју се врши прорачун, као последица суперпозиције магнетског поља.

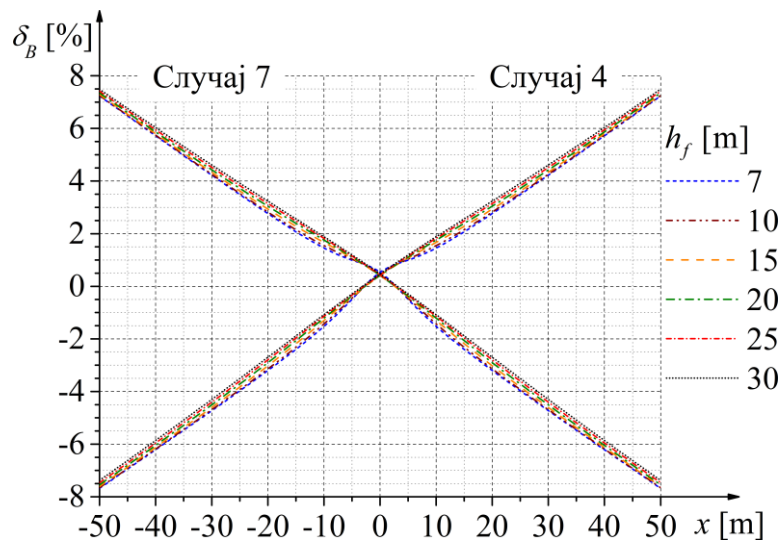
На сликама 9.27–9.30. приказане су релативне грешке за случајеве 2–7. Криве које се односе на случајеве 2 и 5 међусобно су симетричне у односу на осу  $x = 0$  m, пошто је и распоред проводника такође симетричан у односу на исту осу. Исто важи и за случајеве 4 и 7. Криве које се односе на случај 3 су симетричне у односу на осу  $x = 0$  m, што такође важи и за криве које се односе на случај 6.



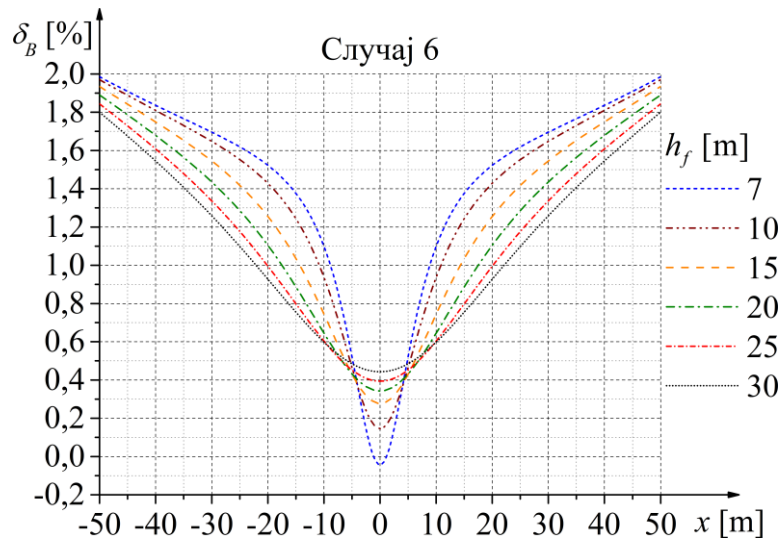
Слика 9.27. Релативне грешке  $\delta_B$  за случајеве 2 и 5 за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”



Слика 9.28. Релативне грешке  $\delta_B$  за случај 3 за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”



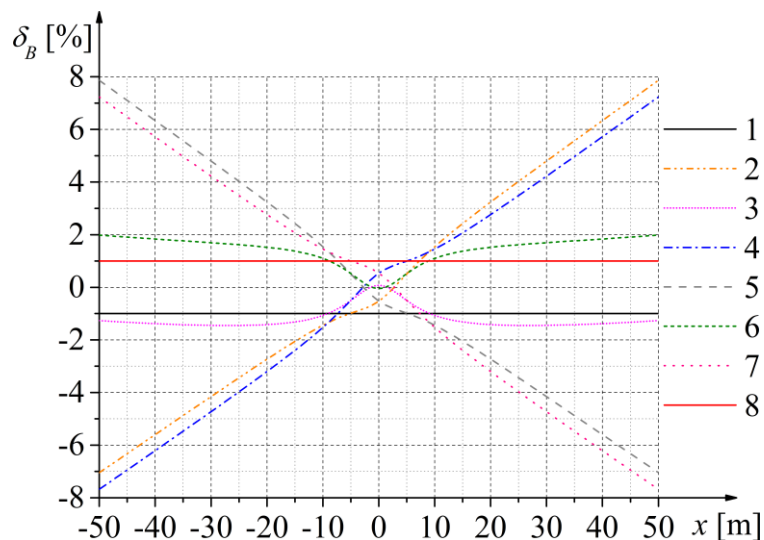
Слика 9.29. Релативне грешке  $\delta_B$  за случајеве 4 и 7 за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”



**Слика 9.30.** Релативне грешке  $\delta_B$  за случај 6 за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”

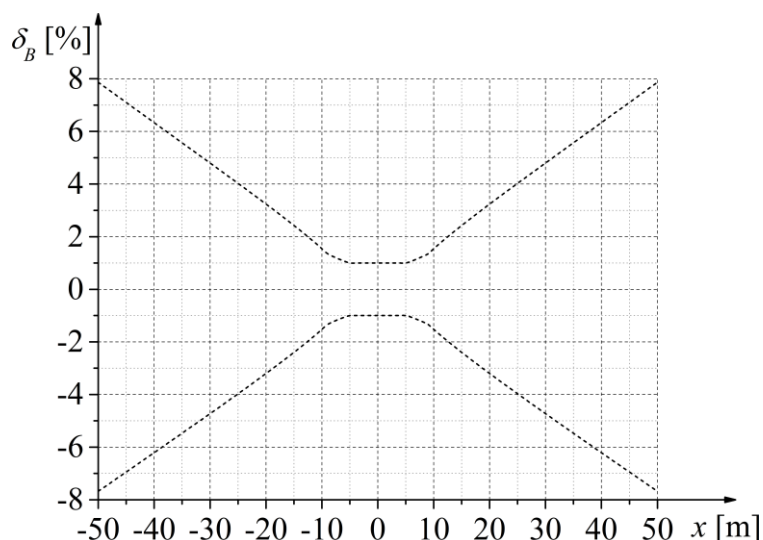
Графикони приказани на сликама 9.27–9.30. јасно показују како се у конкретном случају мења релативна грешка при различитим висинама фазних проводника.

Међутим, у реалности је могуће добити информацију о класи тачности струјних мерних трансформатора, али знак и тачна вредност струјне грешке у различитим фазама остају непознати, због чега није могуће одредити који је од наведених осам случајева релевантан. Пошто су висине фазних проводника у конкретном случају познате, графикони који приказују релативну грешку за све разматране случајеве 1–8, као и за фиксну висину проводника примеренији су за практичну употребу. Пример оваквог графикона, који приказује релативне грешке за све разматране случајеве и за висину фазних проводника од 7 m, приказан је на слици 9.31.



**Слика 9.31.** Релативне грешке  $\delta_B$  за случајеве 1–8 за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” и висинама фазних проводника од 7 m

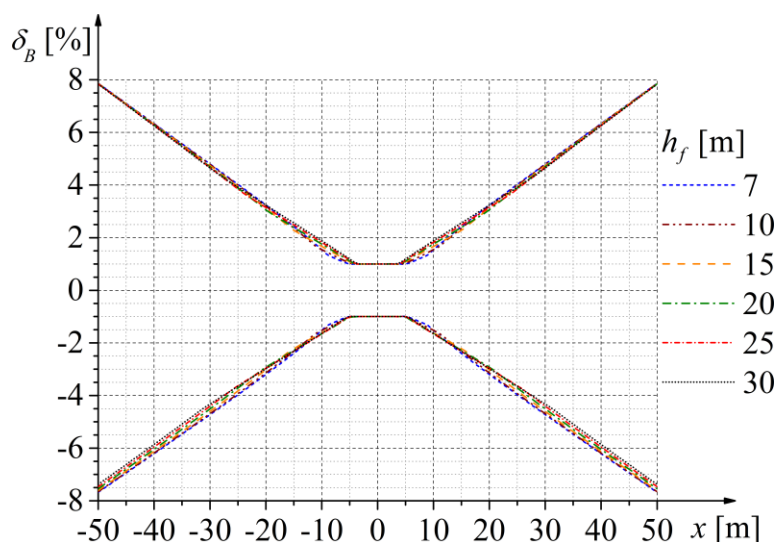
На основу графикона приказаних на слици 9.31. може се одредити опсег релативне грешке  $\delta_B$  за место које се налази на одређеном растојању од осе вода при датим висинама фазних проводника. На основу графикона приказаних на слици 9.31, који се односе на вод са висинама фазних проводника од 7 m, може се одредити максимални опсег унутар којег се налазе релативне грешке које се односе на све анализиране случајеве за дату висину проводника. Овакав максимални опсег грешке приказан је на слици 9.32.



**Слика 9.32.** Опсег који обухвата вредности грешке за случајеве 1–8 за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” и висинама фазних проводника од 7 m

Одређивање опсега који обухвата релативне грешке за све анализиране случајеве (1–8) може се поновити и за остале разматране висине фазних проводника, чиме се добијају графикони приказани на слици 9.33.

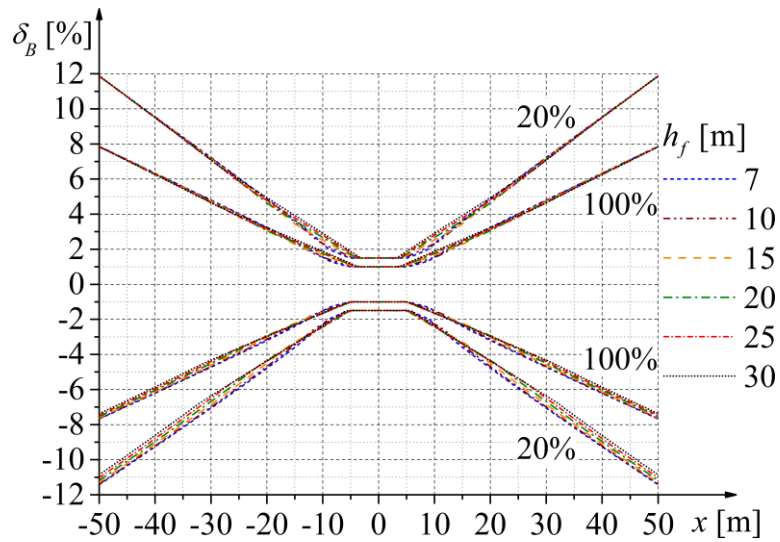
На основу резултата приказаних на слици 9.33. може се уочити да у случајевима када напонске грешке мерних трансформатора у различитим фазама имају различит знак, вредности релативне грешке  $\delta_B$  могу знатно премашити опсег од -1% до +1%, као последица суперпозиције магнетског поља. Такође се може закључити да се у анализираној зони од  $x = -50$  m до  $x = +50$  m вредности релативне грешке налазе у опсегу од -8% до +8% и да су вредности релативне грешке приближно исте код свих висина проводника.



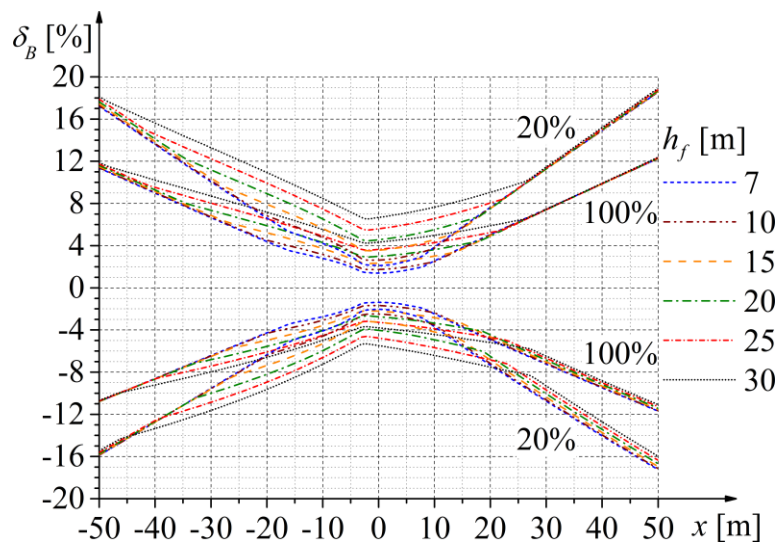
**Слика 9.33.** Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”

### 9.8.3. Резултати прорачуна за мерне трансформаторе класе 1

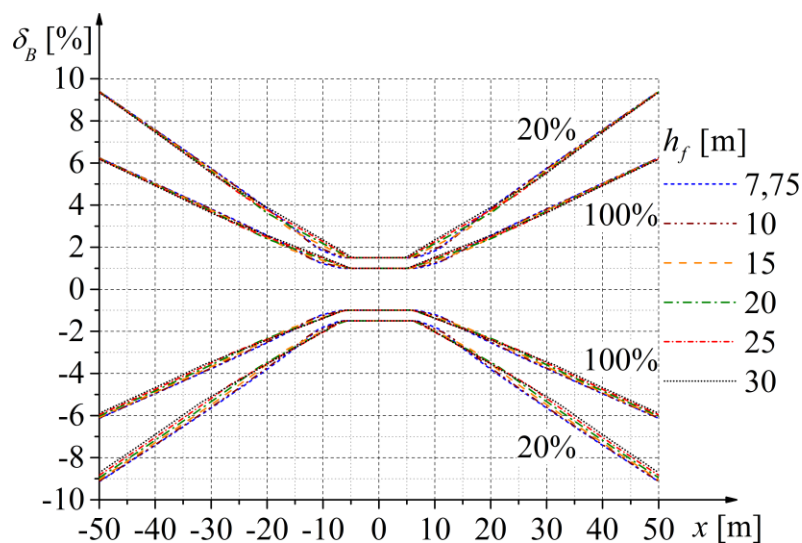
Претходна анализа је поновљена за остале надземне водове са слика 4.3–4.5. Пошто за одређену класу тачности мерног струјног трансформатора веће вредности грешке одговарају мањим оптерећењима, прорачун је, осим за оптерећење од 100%, спроведен и за оптерећење од 20%. Резултати прорачуна за разматране надземне водове напонских нивоа 110 kV, 220 kV и 400 kV, за оптерећења од 20% и 100%, приказани су на сликама 9.34–9.39.



Слика 9.34. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”

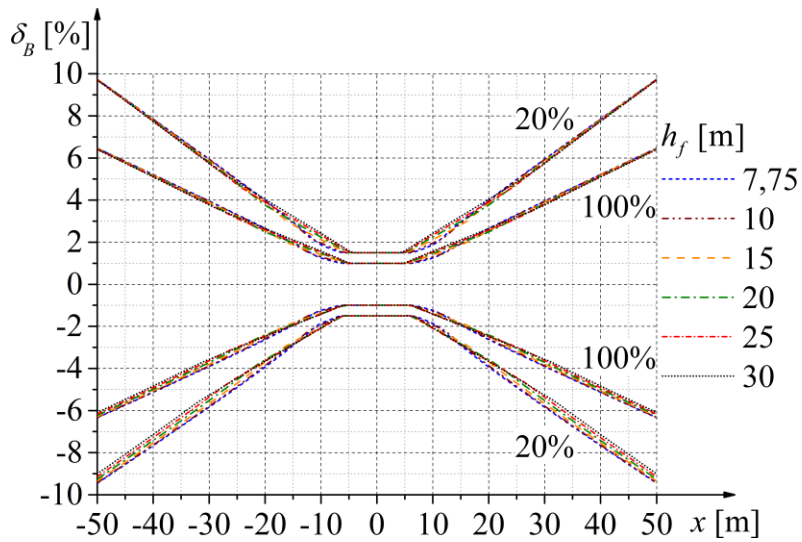


Слика 9.35. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „јела”

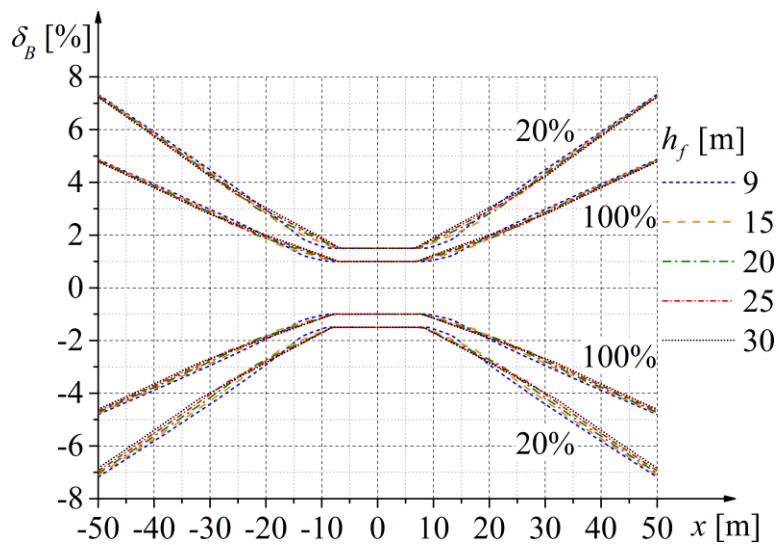


Слика 9.36. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „портал”

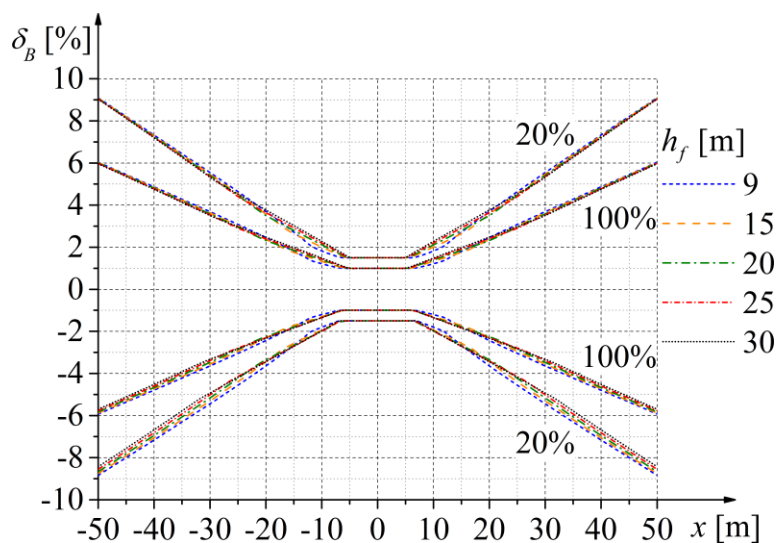




Слика 9.37. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „Y”



Слика 9.38. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „портал”

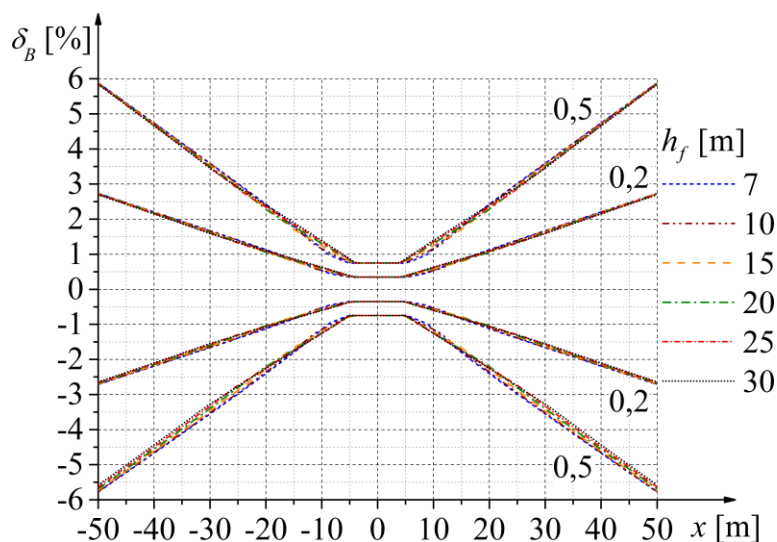


Слика 9.39. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „Y”

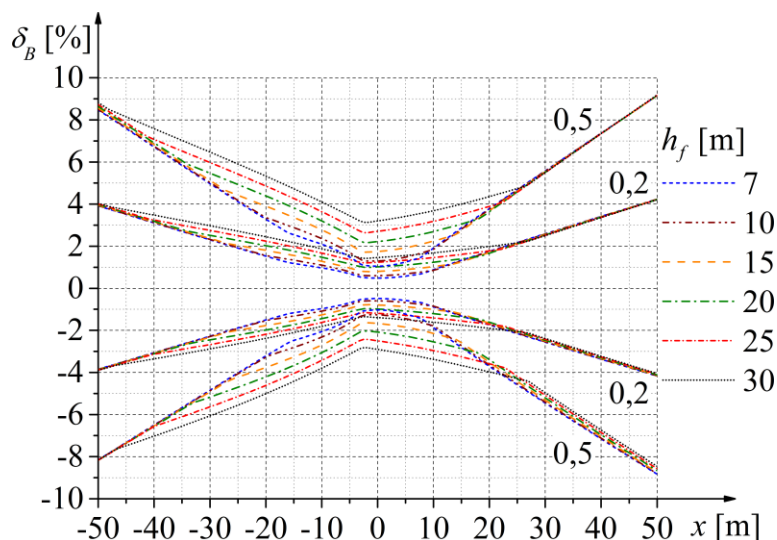
На основу резултата приказаних на сликама 9.34–9.39. закључује се да се код свих разматраних водова веће вредности релативне грешке добијају при оптерећењу од 20%, као што је и очекивано. Највеће вредности  $\delta_B$  добијене су у случају вода са стубовима типа „јела” и у зони од  $x = -50$  m до  $x = +50$  m налазе се у опсегу од -18% до +19%. Код вода напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал” вредности грешке се налазе у опсегу од -12% до +12% приликом оптерећења од 20%. Код осталих разматраних водова вредности релативне грешке налазе се у опсегу од -10% до +10%. Такође је значајно напоменути да се код свих водова мање вредности грешке добијају у зони испод вода, док се веће вредности грешке јављају на већим растојањима од осе вода, што представља повољну околност.

#### 9.8.4. Резултати прорачуна за мерне трансформаторе класа 0,2 и 0,5

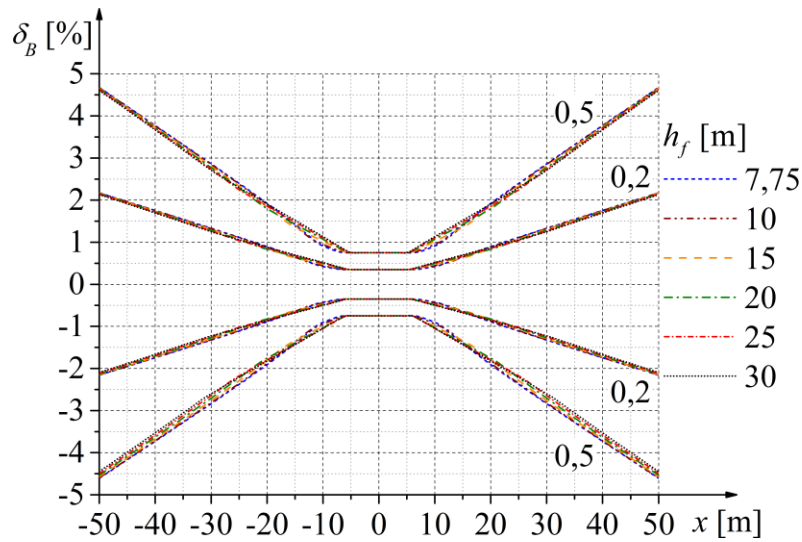
Пошто се у пракси често користе мерни трансформатори класа 0,2 или 0,5, претходни прорачун је поновљен за случај када се за мерење струје користе мерни трансформатори наведених класа. Како би добијени резултати били на страни сигурности, прорачун је спроведен за оптерећење од 20%, пошто се у овом случају добијају веће вредности грешке. Резултати прорачуна приказани су на сликама 9.40–9.45. На овим сликама су упоредо приказани резултати добијени за обе разматране класе тачности.



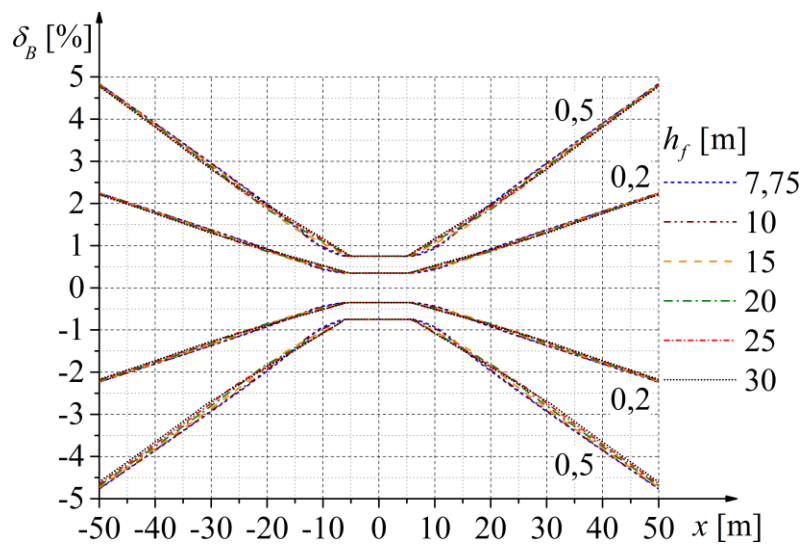
Слика 9.40. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „портал”



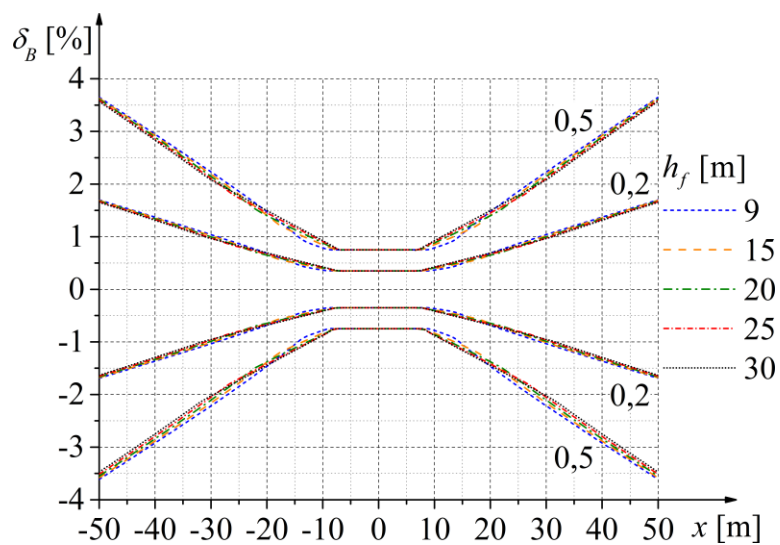
Слика 9.41. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 110 kV са стубовима типа „јела”



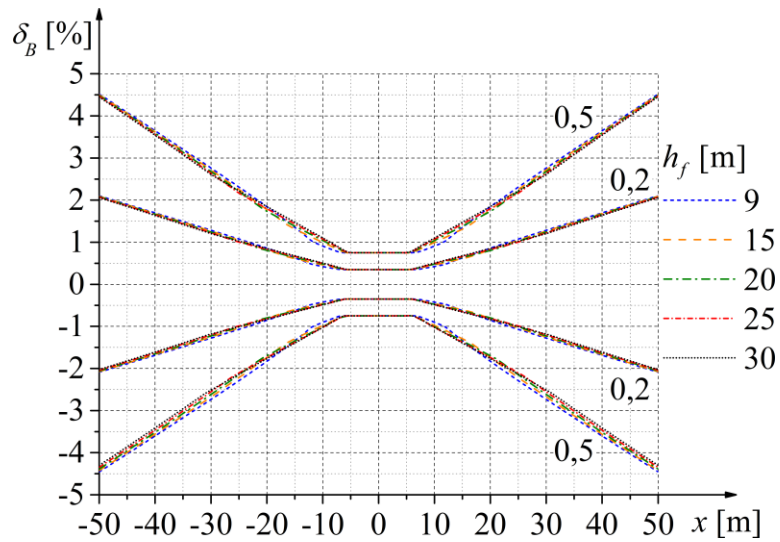
Слика 9.42. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „портал”



Слика 9.43. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 220 kV са стубовима типа „Y”



Слика 9.44. Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „портал”



**Слика 9.45.** Вредности релативне грешке  $\delta_B$  за надземни вод напонског нивоа 400 kV са стубовима типа „Y”

Као што је и очекивано, веће вредности релативне грешке добијене су за класу тачности 0,5. Вредности релативне грешке за овај случај се код вода напонског нивоа 110 kV налазе у опсегу од -6% до +6% код вода са стубовима типа „портал”, односно од -10% до +10% код вода са стубовима типа „јела”. Код осталих разматраних вода вредности релативне грешке налазе се у опсегу од -5% до +5%.

## **10. Поређење резултата мерења и прорачуна ради обезбеђења валидности резултата**

### **10.1. Увод**

Обезбеђење валидности резултата испитивања представља директан захтев стандарда [76]. Поређење резултата јачине електричног поља и магнетске индукције добијених мерењем и прорачуном веома је значајно за обезбеђење валидности резултата испитивања [76]. Према [76], постоји више начина за обезбеђење валидности резултата, који, између осталог, подразумевају коришћење алтернативних инструмената који су еталонирани тако да дају следљиве резултате, функционалну проверу мерне опреме и опреме за испитивање, коришћење еталона, међупровере мерне опреме, понављање испитивања коришћењем истих или различитих метода, међулабораторијска поређења итд. Поређење резултата мерења и прорачуна представља начин обезбеђења валидности резултата који се заснива на понављању испитивања применом различитих метода, у складу са [76]. Овакав начин обезбеђења валидности резултата је нарочито погодан уколико није могуће извршити мерење применом два инструмента ради поређења резултата, или уколико два инструмента показују резултате између којих постоји значајније одступање. Поређење резултата се може спровести приликом сваког испитивања електричног и магнетског поља на терену, чиме се обезбеђује континуирано праћење валидности резултата, као и провера мерне опреме у периоду између два еталонирања или две међупровере. Поређење резултата мерења и прорачуна се такође може спроводити у оквиру међулабораторијских поређења [139]–[142], током којих лабораторије, осим мерења, могу спроводити и прорачуне електричног и магнетског поља [141], [142]. Уколико у оквиру међулабораторијског поређења више лабораторија спроводи испитивања заснована на мерењима, прорачун се може користити као метода за одређивање додељене вредности величине која је предмет испитивања, тј. вредности која се проглашава тачном и са којом се пореде резултати добијени мерењем. У сваком случају, резултатима мерења и прорачуна неопходно је придружити проширену несигурност.

У наставку су дата два примера испитивања електричног поља и магнетске индукције у околини надземног вода напонског нивоа 220 kV и извршено је упоређивање резултата добијених мерењем и прорачуном. На овим примерима је показано на који начин се резултати мерења и прорачуна могу користити за интерну контролу валидности резултата, али и за спровођење међулабораторијских поређења у реалним условима.

### **10.2. Пример 1**

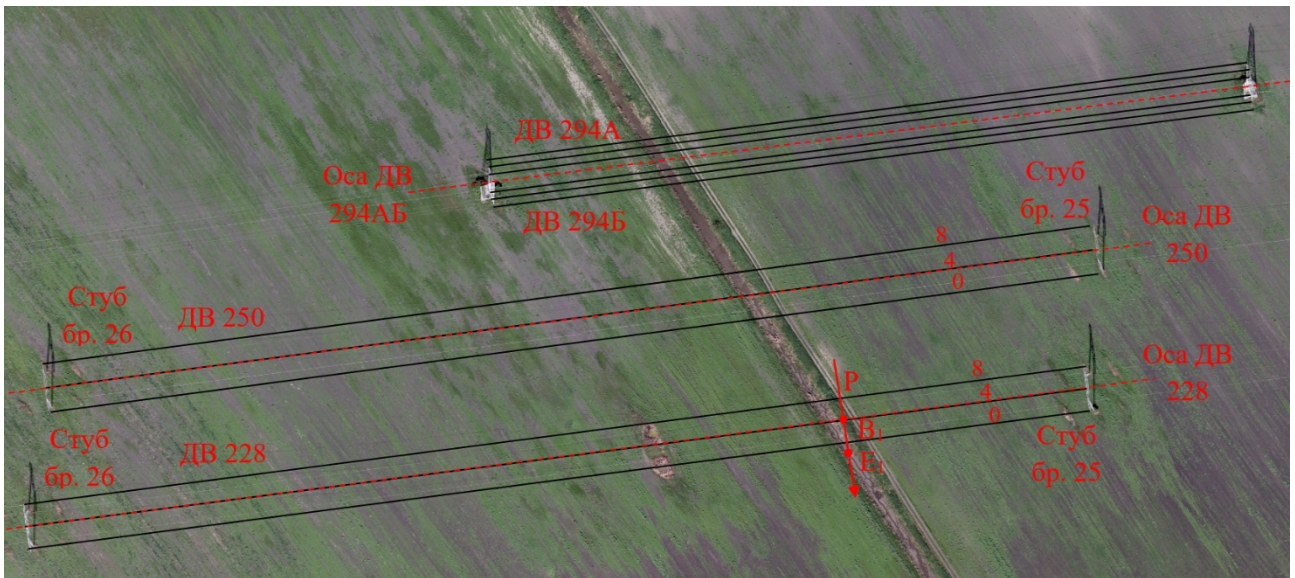
#### **10.2.1. Опис локације и резултати испитивања**

Испитивања електричног поља и магнетске индукције спроведена су у близини надземног вода напонског нивоа 220 kV бр. 228 ТС „Београд 5” – ТС „Обреновац А”, на распону између стубова бр. 25 и 26, на локацији која је приказана на слици 10.1. За испитивања је изабрана локација на којој се може сматрати да је терен раван и на којој није било објеката који би могли да доведу до пертурбације електричног поља.

На слици 10.1, са  $E_1$  означено је место на којем је вршено мерење јачине електричног поља, а са  $B_1$  место на којем је вршено мерење магнетске индукције. Испитивања су спроведена на висини од 1 m изнад тла.

Стубови бр. 25 и 26 приказани су на сликама 10.2. и 10.3.

На слици 10.4. приказана је геометрија надземног вода на месту латералног правца Р, на којем су извођена мерења. Тип фазних проводника вода је Al/Се 490/65.



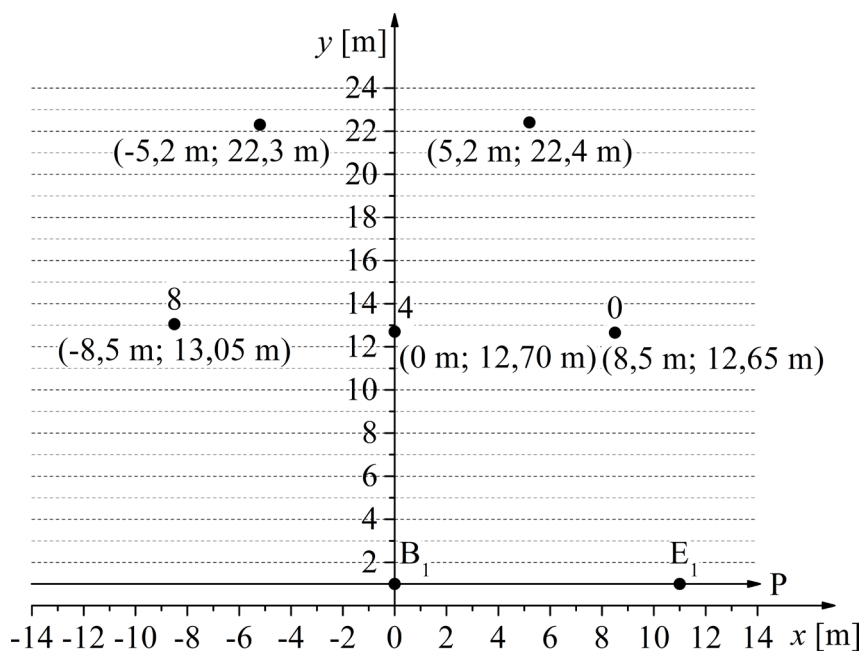
Слика 10.1. Локација на којој су спроведена испитивања и положај мерних места  $E_1$  и  $B_1$



Слика 10.2. Стуб бр. 25  
(портал, носећи)



Слика 10.3. Стуб бр. 26  
(портал, носећи)



Слика 10.4. Геометрија надземног вода са позицијом мерних места  $E_1$  и  $B_1$   
(посматрано од стуба бр. 26 ка стубу бр. 25)

Мерно место  $E_1$  налази се на растојању од 11 m од осе вода ( $x = 11$  m). Мерно место  $B_1$  налази се у осе вода ( $x = 0$  m), тј. испод средњег фазног проводника (фаза 4). Мерна места  $E_1$  и  $B_1$  налазе се на местима на којима се јављају највеће вредности јачине електричног поља и магнетске индукције дуж латералног правца.

За мерење јачине електричног поља и магнетске индукције коришћен је мерни систем приказан на слици 3.1. Прорачун јачине електричног поља и магнетске индукције спроведен је применом методе засноване на моделовању вода праволинијским проводницима.

Приликом мерења јачине електричног поља растојање између испитивача и мерне сонде износило је 10 m, ради елиминисања утицаја испитивача на резултате мерења.

У близини надземног вода бр. 228, који је предмет испитивања, налазе се надземни водови бр. 250 и бр. 294АБ. Имајући у виду растојања између ових водова и вода бр. 228, закључује се да је утицај поменутих водова на резултате мерења на мерним местима  $E_1$  и  $B_1$  занемарљив, тј. да измерене вредности јачине електричног поља и магнетске индукције на овим мерним местима потичу искључиво од испитиваног надземног вода бр. 228.

Подаци о напонима и струјама надземног вода бр. 228 у време мерења јачине електричног поља и магнетске индукције добијени су од надлежне службе власника надземног вода и приказани су у табелама 10.1. и 10.2.

**Табела 10.1.** Вредности напона надземног вода у време мерења

$U_{f_0}$ [kV]	$U_{f_4}$ [kV]	$U_{f_8}$ [kV]
131,12	131,39	131,00

**Табела 10.2.** Вредности струја надземног вода у време мерења

$I_{f_0}$ [A]	$I_{f_4}$ [A]	$I_{f_8}$ [A]
606,74	600,13	597,89

У табели 10.3. приказани су резултати мерења и прорачуна јачине електричног поља и магнетске индукције.

**Табела 10.3.** Резултати мерења и прорачуна јачине електричног поља и магнетске индукције

	$E$ [kV/m]	$B$ [ $\mu$ T]
Прорачун	1,79	9,07
Мерење	1,76	9,27

Ради упоређивања резултата добијених мерењем и прорачуном и обезбеђења валидности неопходно је израчунавање несигурности мерења и прорачуна.

### 10.2.2. Израчунавање проширене несигурности резултата мерења јачине електричног поља и магнетске индукције

На основу резултата еталонирања утврђено је да се грешка мерења јачине електричног поља и магнетске индукције налази унутар опсега од  $\pm 3$ . Пошто је растојање између испитивача и мерне сонде износило 10 m, сматра се да је компонента мерне несигурности услед присуства испитивача занемарљива. Пре испитивања проверена је висина на којој се налазе мерне сонде, која је у оба случаја износила 1 m. Хоризонтална растојања између мерних сонди и осе вода измерена су помоћу ласерског даљиномера и мерне траке. Због тога се може претпоставити да су у конкретном случају грешке услед позиционирања мерних сонди занемарљиве. Из наведених разлога је усвојено да проширена несигурност резултата мерења јачине електричног поља и магнетске индукције износи  $\pm 3\%$ .

### 10.2.3. Израчунавање проширене несигурности резултата прорачуна јачине електричног поља

Приликом израчунавања проширене несигурности резултата прорачуна јачине електричног поља уважене су компоненте несигурности које су анализирани у поглављу 8. Као доминантне компоненте несигурности усвојене су компоненте које потичу од несигурности мерења висина фазних проводника и несигурности мерења напона.

Компонента која потиче од несигурности мерења висина фазних проводника израчуната је на начин описан у поглављу 8.4, при чему је усвојено да грешка мерења висине износи  $\pm 0,4$  m. Прорачуном је добијено да тачна вредност јачине електричног поља износи 1,788 kV/m. Када се у прорачуну уважи грешка мерења висине од  $\pm 0,4$  m резултати прорачуна јачине електричног поља налазе се у опсегу од 1,698 kV/m до 1,885 kV/m, тј. у опсегу од 1,788 kV/m - 5,052% до 1,788 kV/m + 5,405%.

Компонента која потиче од несигурности мерења напона израчуната је на начин описан у поглављу 8.8, и то за случај када се мерење напона врши мерним трансформаторима класе 0,2. Када се у прорачуну уважи грешка мерења напона од  $\pm 0,2\%$  резултати прорачуна јачине електричног поља се налазе у опсегу од 1,783 kV/m до 1,794 kV/m, тј. у опсегу од 1,788 kV/m - 0,303% до 1,788 kV/m + 0,304%.

Ако се за обе компоненте несигурности усвоји правоугаона расподела вероватноће, добија се буџет несигурности прорачуна јачине електричног поља који је дат у табели 10.4. Према стандарду [8], препоручени ниво поверења је 95%, па коефицијент проширења износи 1,96.

**Табела 10.4.** Буџет несигурности прорачуна јачине електричног поља добијен методом описаном у поглављу 8

Компонента мерне несигурности	Проширена несигурност [%]	Расподела	Делилац	Стандардна несигурност [%]
Несигурност мерења висина фазних проводника	-5,05–5,41	Правоугаона	1,73	-2,92–3,12
Несигурност мерења напона	$\pm 0,3$	Правоугаона	1,73	$\pm 0,18$
Комбинована несигурност:				-2,92–3,13
Коефицијент проширења:				1,96
Проширена несигурност:				-5,73–6,13

Када се уважи проширена несигурност резултата прорачуна која је дата у табели 10.4, закључује се да се резултат прорачуна налази у опсегу од 1,686 kV/m до 1,898 kV/m, тј. у опсегу од 1,788 kV/m - 5,727% до 1,788 kV/m + 6,126%.

На основу приказаних резултата се може закључити да у анализираним примеру највећи утицај на проширену несигурност резултата прорачуна има компонента која потиче од несигурности мерења висина фазних проводника. Компонента која потиче од несигурности мерења напона у конкретном случају има незнатан утицај на проширену несигурност, пошто је мерење напона извршено мерним трансформаторима класе 0,2. У случајевима када се мерење напона врши мерним трансформаторима класе 0,5 или 1, утицај ове компоненте на проширену несигурност је знатно израженији.



#### 10.2.4. Израчунавање проширене несигурности резултата прорачуна магнетске индукције

Приликом израчунавања проширене несигурности резултата прорачуна магнетске индукције уважене су компоненте несигурности које су анализирани у поглављу 9. Као доминантне компоненте несигурности усвојене су компоненте које потичу од несигурности мерења висина фазних проводника и несигурности мерења струја.

Компонента која потиче од несигурности мерења висина фазних проводника израчуната је на начин описан у поглављу 9.4. Прорачуном је добијено да тачна вредност магнетске индукције износи  $9,068 \mu\text{T}$ . Када се у прорачуну уважи грешка мерења висине од  $\pm 0,4 \text{ m}$ , резултати прорачуна магнетске индукције налазе се у опсегу од  $8,632 \mu\text{T}$  до  $9,535 \mu\text{T}$ , тј. у опсегу од  $9,068 \mu\text{T} - 4,808\%$  до  $9,068 \mu\text{T} + 5,151\%$ .

Компонента која потиче од несигурности мерења струја израчуната је на начин описан у поглављу 9.8, и то за случај када се мерење струја врши мерним трансформаторима класе 0,2. Када се у прорачуну уважи грешка мерења струје од  $\pm 0,2\%$  резултати прорачуна магнетске индукције се налазе у опсегу од  $9,050 \mu\text{T}$  до  $9,086 \mu\text{T}$ , тј. у опсегу од  $9,068 \mu\text{T} - 0,200\%$  до  $9,068 \mu\text{T} + 0,200\%$ .

Ако се за обе компоненте несигурности усвоји правоугаона расподела вероватноће, добија се буџет несигурности прорачуна магнетске индукције који је дат у табели 10.5.

**Табела 10.5.** Буџет несигурности прорачуна магнетске индукције добијен методом описаном у поглављу 9

Компонента мерне несигурности	Проширена несигурност [%]	Расподела	Делилац	Стандардна несигурност [%]
Несигурност мерења висина фазних проводника	-4,81–5,15	Правоугаона	1,73	-2,78–2,97
Несигурност мерења струје	$\pm 0,2$	Правоугаона	1,73	$\pm 0,12$
	Комбинована несигурност:			-2,78–2,98
	Коефицијент проширења:			1,96
	Проширена несигурност:			-5,45–5,83

Када се уважи проширена несигурност резултата прорачуна која је дата у табели 10.5, закључује се да се резултат прорачуна налази у опсегу од  $8,574 \mu\text{T}$  до  $9,597 \mu\text{T}$ , тј. у опсегу од  $9,068 \mu\text{T} - 5,455\%$  до  $9,068 \mu\text{T} + 5,833\%$ .

У анализираном примеру највећи утицај на проширену несигурност резултата прорачуна има компонента која потиче од несигурности мерења висина фазних проводника. Компонента која потиче од несигурности мерења струја има незнатан утицај на проширену несигурност, пошто је мерење струја извршено мерним трансформаторима класе 0,2.

#### 10.2.5. Упоредни приказ резултата мерења и прорачуна јачине електричног поља и магнетске индукције

Упоредни приказ опсега у којима се налазе резултати јачине електричног поља и магнетске индукције добијени мерењем и прорачуном, с урачунатим проширеним несигурностима, дат је у табели 10.6.

Ознаке у табели 10.6. имају следеће значење:

$U_E$  – проширена несигурност резултата мерења/прорачуна јачине електричног поља;

$U_B$  – проширена несигурност резултата мерења/прорачуна магнетске индукције.

**Табела 10.6.** Резултати мерења и прорачуна јачине електричног поља и магнетске индукције с придруженим проширеним несигурностима

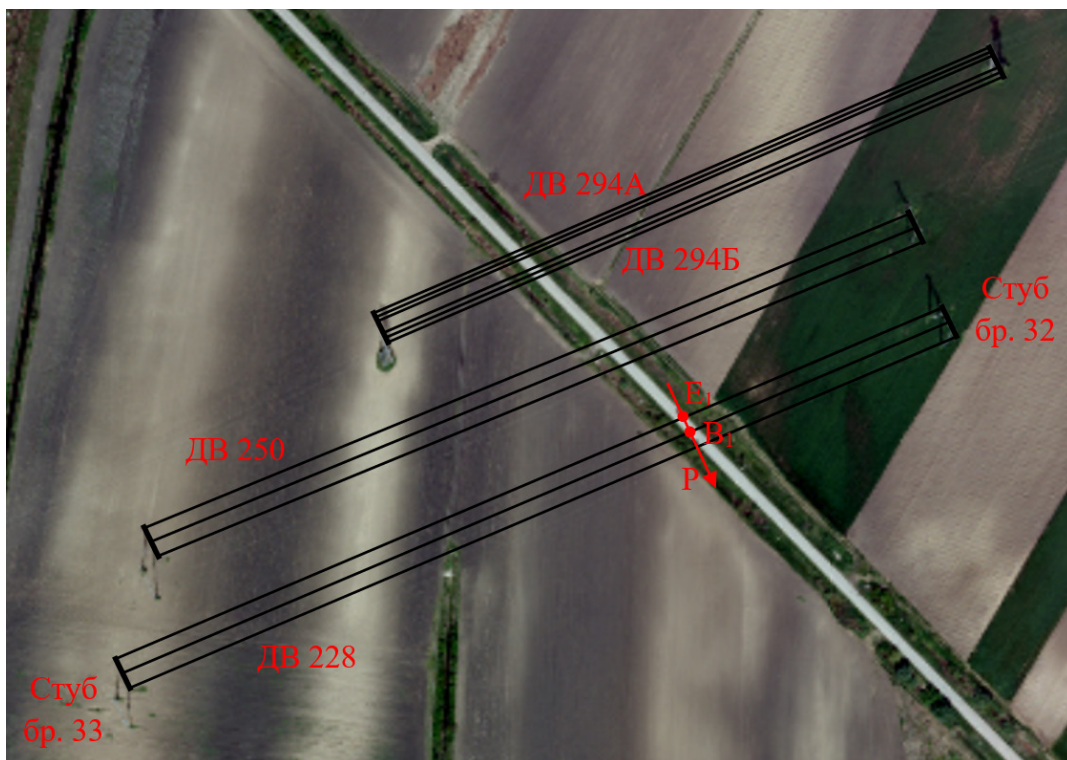
	$E \pm U_E$	$B \pm U_B$
Прорачун	1,79 kV/m -5,73%/+6,13% (1,69 kV/m – 1,90 kV/m)	9,07 $\mu$ T -5,46%/+5,83% (8,57 $\mu$ T – 9,60 $\mu$ T)
Мерење	1,76 kV/m $\pm$ 3% (1,71 kV/m – 1,81 kV/m)	9,27 $\mu$ T $\pm$ 3% (8,99 $\mu$ T – 9,55 $\mu$ T)

Пошто у оба случаја постоји преклапање опсега у којима се налазе резултати, може се закључити да је на описани начин обезбеђена валидност резултата мерења и прорачуна.

### 10.3. Пример 2

#### 10.3.1. Опис локације и резултати испитивања

Испитивања електричног поља и магнетске индукције спроведена су у близини надземног вода напонског нивоа 220 kV бр. 228 ТС „Београд 5” – ТС „Обреновац А”, на распону између стубова бр. 32 и 33, на локацији која је приказана на слици 10.5.



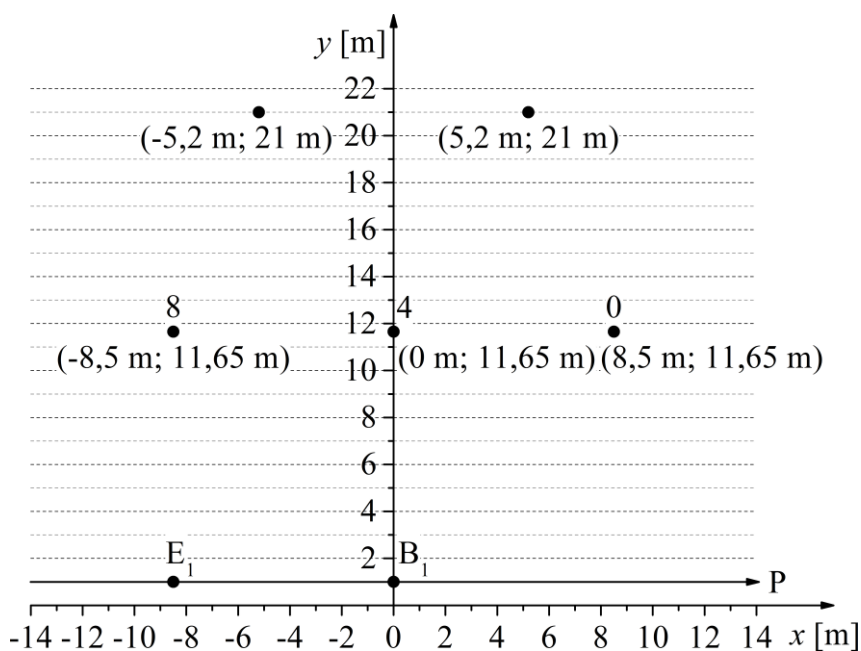
**Слика 10.5.** Локација на којој су спроведена испитивања и положај мерних места  $E_1$  и  $B_1$

Испитивања су спроведена у оквиру међулабораторијског поређења које је организовано од стране Електротехничког института „Никола Тесла” [142]. Поређење је спроведено у складу са захтевима [143], [144]. У наставку су приказани само резултати мерења и прорачуна добијени од стране лабораторије Електротехничког института „Никола Тесла”, тј. ауторке дисертације.

На слици 10.5, са  $E_1$  означено је место на којем је вршено мерење јачине електричног поља, а са  $B_1$  место на којем је вршено мерење магнетске индукције. Испитивања су спроведена на висини од 1 m изнад тла.

За спровођење испитивања изабрана је локација на којој се може сматрати да је терен раван и на којој није било објеката који би могли довести до пертурбације електричног поља.

На слици 10.6. приказана је геометрија надземног вода на месту латералног правца  $P$ , на којем су вршена мерења.



Слика 10.6. Геометрија надземног вода са позицијом мерних места  $E_1$  и  $B_1$  (посматрано од стуба бр. 33 ка стубу бр. 32)

Мерно место  $E_1$  налази се испод крајњег фазног проводника (фаза 8), на растојању од 8,5 m од осе вода ( $x = -8,5$  m). Мерно место  $B_1$  налази се у осе вода ( $x = 0$  m), тј. испод средњег фазног проводника (фаза 4). Приликом мерења је одабрано да се мерна места налазе испод наведених фазних проводника, да би се на тај начин додатно смањила грешка позиционирања дуж латералног правца. Мерно место  $B_1$  налази се на месту на којем се јавља највећа вредност магнетске индукције дуж латералног правца, док се мерно место  $E_1$  налази у близини места на којем се јавља највећа вредност јачине електричног поља дуж латералног правца.

За мерење јачине електричног поља и магнетске индукције коришћена су два мерна система. Мерни систем приказан на слици 3.1. означен је као мерни систем 1, а мерни систем приказан на слици 3.2. као мерни систем 2.

Прорачун јачине електричног поља и магнетске индукције спроведен је применом методе засноване на моделовању вода праволинијским проводницима.

Мерења магнетске индукције у тачки  $B_1$  применом наведена два мерна система извршена су истовремено, чиме је постигнуто мерење у истим условима тј. при истој струји оптерећења надземног вода. На тај начин је елиминисана могућност одступања резултата мерења због промене струје оптерећења вода.

Мерења јачине електричног поља у тачки  $E_1$  применом наведена два мерна система вршена су засебно, да би се избегла појава пертурбације електричног поља услед близине другог мерног система. Приликом мерења јачине електричног поља растојање између испитивача и мерне сонде износило је 10 m, ради елиминисања ове компоненте мерне несигурности.

У близини надземног вода бр. 228, који је предмет испитивања, налазе се надземни водови напонског нивоа 220 kV бр. 250 и бр. 294АБ. Имајући у виду растојања између ових водова и вода бр. 228, као и чињеницу да је у време мерења најближи вод бр. 250 био ван погона, закључено је да је утицај поменутих водова на резултате мерења на мерним местима

$E_1$  и  $B_1$  занемарљив, тј. да измерене вредности јачине електричног поља (на мерном месту  $E_1$ ) и магнетске индукције (на мерном месту  $B_1$ ) потичу искључиво од испитиваног надземног вода бр. 228.

Подаци о напонима и струјама надземног вода бр. 228 у време мерења јачине електричног поља и магнетске индукције добијени су од надлежне службе власника надземног вода и приказани су у табелама 10.7. и 10.8.

**Табела 10.7.** Вредности напона надземног вода у време мерења мерним системима 1 и 2

Мерни систем	$U_{f_0}$ [kV]	$U_{f_4}$ [kV]	$U_{f_8}$ [kV]
1	130,20	129,83	129,62
2	130,39	130,04	129,74

**Табела 10.8.** Вредности струја надземног вода у време мерења мерним системима 1 и 2

Мерни систем	$I_{f_0}$ [A]	$I_{f_4}$ [A]	$I_{f_8}$ [A]
1 и 2	850,87	851,28	847,64

На основу резултата приказаних у табели 10.7. може се закључити да је напон вода био веома стабилан у периоду од интереса, чиме је елиминисана могућност одступања резултата мерења јачине електричног поља мерним системом 1 и 2 услед промене напона надземног вода. Прорачуном јачине електричног поља, у оба случаја, тј. за оба сета вредности напона из табеле 10.7, добијена је вредност од 1,95 kV/m.

У табели 10.9. приказани су резултати мерења и прорачуна јачине електричног поља и магнетске индукције.

**Табела 10.9.** Резултати мерења и прорачуна јачине електричног поља и магнетске индукције

	$E$ [kV/m]	$B$ [ $\mu$ T]
Прорачун	1,95	14,85
Мерни систем 1	1,89	14,98
Мерни систем 2	1,82	15,23

Ради упоређивања резултата добијених мерењем и прорачуном и обезбеђења валидности неопходно је израчунавање несигурности мерења и прорачуна.

### 10.3.2. Израчунавање проширене несигурности резултата мерења јачине електричног поља и магнетске индукције

Приликом еталонирања оба мерна система утврђено је да се грешка мерења налази унутар опсега од  $\pm 3\%$ , код мерења електричног поља, као и код мерења магнетске индукције. Као што је претходно наведено, приликом мерења јачине електричног поља, растојање између испитивача и мерне сонде износило је 10 m, па се сматра да је ова компонента мерне несигурности занемарљива. Такође се може претпоставити да су грешке услед позиционирања мерних сонди дуж све три осе занемарљиве, имајући у виду начин на који је извршено позиционирање. Пре испитивања је проверена висина на којој се налази мерна сонда, која је у свим случајевима износила 1 m. Мерна места су се налазила директно испод фазних проводника, а њихове позиције су проверене мерењем помоћу ласерског даљиномера и помоћу мерне траке. Из наведених разлога је усвојено да проширена несигурност резултата мерења у свим случајевима износи  $\pm 3\%$ .

У табели 10.10. приказани су резултати мерења јачине електричног поља и магнетске индукције са израчунатим проширеним несигурностима.

Ознаке у табели 10.10. имају следеће значење:

$U_{E_m}$  – проширена несигурност резултата мерења јачине електричног поља;

$U_{B_m}$  – проширена несигурност резултата мерења магнетске индукције.

**Табела 10.10.** Резултати мерења јачине електричног поља и магнетске индукције с придруженим проширеним несигурностима

	$E \pm U_{E_m}$	$B \pm U_{B_m}$
Мерни систем 1	1,89 kV/m $\pm$ 3% (1,83 kV/m – 1,95 kV/m)	14,98 $\mu$ T $\pm$ 3% (14,53 $\mu$ T – 15,43 $\mu$ T)
Мерни систем 2	1,82 kV/m $\pm$ 3% (1,77 kV/m – 1,87 kV/m)	15,23 $\mu$ T $\pm$ 3% (14,77 $\mu$ T – 15,69 $\mu$ T)

### 10.3.3. Израчунавање проширене несигурности резултата прорачуна јачине електричног поља

Израчунавање проширене несигурности резултата прорачуна јачине електричног поља извршено је на начин описан у поглављу 8, као и применом методе „Монте Карло”. У оба случаја су као доминантне компоненте несигурности прорачуна јачине електричног поља усвојене компоненте које потичу од несигурности мерења висина фазних проводника и несигурности мерења напона.

Компонента која потиче од несигурности мерења висина фазних проводника израчуната је на начин описан у поглављу 8.4. Усвојено је да грешка мерења висине износи  $\pm 0,4$  m. Прорачуном је добијено да тачна вредност јачине електричног поља износи 1,951 kV/m. Када се у прорачуну уважи грешка мерења висине од  $\pm 0,4$  m резултати прорачуна јачине електричног поља се налазе у опсегу од 1,837 kV/m до 2,074 kV/m, тј. у опсегу од 1,951 kV/m - 5,845% до 1,951 kV/m + 6,335%.

Компонента која потиче од несигурности мерења напона израчуната је на начин описан у поглављу 8.8, и то за случај када се мерење напона врши мерним трансформаторима класе 0,2. Када се у прорачуну уважи грешка мерења напона од  $\pm 0,2\%$  резултати прорачуна јачине електричног поља налазе се у опсегу од 1,945 kV/m до 1,957 kV/m, тј. у опсегу од 1,951 kV/m - 0,299% до 1,951 kV/m + 0,300%.

Ако се за обе компоненте несигурности усвоји правоугаона расподела вероватноће, добија се буџет несигурности прорачуна јачине електричног поља који је дат у табели 10.11.

**Табела 10.11.** Буџет несигурности прорачуна јачине електричног поља добијен методом описаном у поглављу 8

Компонента мерне несигурности	Проширена несигурност [%]	Расподела	Делилац	Стандардна несигурност [%]
Несигурност мерења висина фазних проводника	-5,85–6,34	Правоугаона	1,73	-3,37–3,66
Несигурност мерења напона	$\pm 0,3$	Правоугаона	1,73	$\pm 0,17$
Комбинована несигурност:				-3,38–3,66
Коефицијент проширења:				1,96
Проширена несигурност:				-6,62–7,18

Према стандарду [8], препоручени ниво поверења је 95%, па коефицијент проширења износи 1,96.

Када се уважи проширена несигурност резултата прорачуна која је дата у табели 10.11, закључује се да се резултат прорачуна налази у опсегу од 1,822 kV/m до 2,091 kV/m, тј. у опсегу од 1,951 kV/m - 6,623% до 1,951 kV/m + 7,177%.

Израчунавање компонената несигурности поновљено је применом методе „Монте Карло“, при чему је број итерација  $M$  износио  $10^4$ . На овај начин се прорачуном добија  $M$  вредности јачине електричног поља, а затим се израчунава њихова средња вредност  $E_{sr}$  и стандардно одступање средње вредности  $\sigma$ . Вероватноћи од 95,45% одговара опсег вредности  $E_{sr} \pm 2\sigma$ .

Ради анализе појединих компонената несигурности, прорачун заснован на методи „Монте Карло“ најпре је спроведен за случај када постоји само несигурност мерења висине фазних проводника, а затим за случај када постоји само несигурност мерења напона. Прорачун је потом поновљен за случај када истовремено постоји и несигурност мерења висине и несигурност мерења напона. Добијени резултати приказани су у табели 10.12.

**Табела 10.12.** Буџет несигурности прорачуна јачине електричног поља добијен методом „Монте Карло“

Компонента мерне несигурности	$E_{sr}$ [kV/m]	$\sigma$ [kV/m]	$\sigma$ [%]	$E_{sr} - 2\sigma \leq E \leq E_{sr} + 2\sigma$ [kV/m]
Несигурност мерења висина фазних проводника	1,95	0,068	3,49	$1,82 \leq E \leq 2,09$
Несигурност мерења напона	1,95	0,003	0,15	$1,95 \leq E \leq 1,96$
Несигурност мерења висина фазних проводника и несигурност мерења напона	1,95	0,069	3,55	$1,82 \leq E \leq 2,09$

У табели 10.13. дат је упоредни приказ опсега у којима се налазе вредности јачине електричног поља, добијених применом методе описане у поглављу 8 и методе „Монте Карло“.

**Табела 10.13.** Упоредни приказ опсега у којима се налазе вредности јачине електричног поља добијених применом методе описане у поглављу 8 и методе „Монте Карло“

Несигурност	Метода описана у поглављу 8	Метода „Монте Карло“
Несигурност мерења висина фазних проводника	1,84 kV/m – 2,07 kV/m	1,82 kV/m – 2,09 kV/m
Несигурност мерења напона	1,95 kV/m – 1,96 kV/m	1,95 kV/m – 1,96 kV/m
Несигурност мерења висина фазних проводника и несигурност мерења напона	1,82 kV/m – 2,09 kV/m	1,82 kV/m – 2,09 kV/m

На основу резултата приказаних у табели 10.13. закључује се да постоји слагање добијених резултата, како у случају израчунавања појединачних компонената несигурности, тако и приликом израчунавања проширене несигурности.

### 10.3.4. Израчунавање проширене несигурности резултата прорачуна магнетске индукције

Израчунавање проширене несигурности резултата прорачуна магнетске индукције извршено је на начин описан у поглављу 9, као и применом методе „Монте Карло”. У оба случаја су као доминантне компоненте несигурности прорачуна магнетске индукције усвојене компоненте које потичу од несигурности мерења висина фазних проводника и несигурности мерења струја.

Компонента која потиче од несигурности мерења висина фазних проводника израчуната је на начин описан у поглављу 9.4. Прорачуном је добијено да тачна вредност магнетске индукције износи 14,845  $\mu\text{T}$ . Када се у прорачуну уважи грешка мерења висине од  $\pm 0,4\text{ m}$ , резултати прорачуна магнетске индукције налазе се у опсегу од 14,093  $\mu\text{T}$  до 15,653  $\mu\text{T}$ , тј. у опсегу од 14,845  $\mu\text{T}$  - 5,064% до 14,845  $\mu\text{T}$  + 5,444%.

Компонента која потиче од несигурности мерења струја израчуната је на начин описан у поглављу 9.8, и то за случај када се мерење струја врши мерним трансформаторима класе 0,2. Када се у прорачуну уважи грешка мерења струје од  $\pm 0,2\%$ , резултати прорачуна магнетске индукције налазе се у опсегу од 14,815  $\mu\text{T}$  до 14,875  $\mu\text{T}$ , тј. у опсегу од 14,845  $\mu\text{T}$  - 0,200% до 14,845  $\mu\text{T}$  + 0,200%.

Ако се за обе компоненте несигурности усвоји правоугаона расподела вероватноће, добија се буџет несигурности прорачуна магнетске индукције који је дат у табели 10.14.

Када се уважи проширена несигурност резултата прорачуна која је дата у табели 10.14, закључује се да се резултат прорачуна налази у опсегу од 13,994  $\mu\text{T}$  до 15,760  $\mu\text{T}$ , тј. у опсегу од 14,845  $\mu\text{T}$  - 5,735% до 14,845  $\mu\text{T}$  + 6,164%.

**Табела 10.14.** Буџет несигурности прорачуна магнетске индукције добијен методом описаном у поглављу 9

Компонента мерне несигурности	Проширена несигурност [%]	Расподела	Делилац	Стандардна несигурност [%]
Несигурност мерења висина фазних проводника	-5,06–5,44	Правоугаона	1,73	-2,92–3,14
Несигурност мерења струје	$\pm 0,2$	Правоугаона	1,73	$\pm 0,12$
Комбинована несигурност:				-2,93–3,15
Коефицијент проширења:				1,96
Проширена несигурност:				-5,74–6,16

Израчунавање компонената несигурности поновљено је методом „Монте Карло”, при чему је број итерација  $M$  износио  $10^4$ . Као резултат прорачуна се добија  $M$  вредности магнетске индукције, на основу којих се израчунава њихова средња вредност  $B_{sr}$  и стандардно одступање средње вредности  $\sigma$ . Вероватноћи од 95,45% одговара опсег вредности  $B_{sr} \pm 2\sigma$ .

Прорачун заснован на методи „Монте Карло” најпре је спроведен за случај када постоји само несигурност мерења висине фазних проводника, а затим за случај када постоји само несигурност мерења струја, ради анализе ових компонената несигурности. Прорачун је потом поновљен за случај када истовремено постоји и несигурност мерења висине и несигурност мерења струје. Добијени резултати приказни су у табели 10.15.

**Табела 10.15.** Буџет несигурности прорачуна магнетске индукције добијен методом „Монте Карло”

Компонента мерне несигурности	$B_{sr}$ [ $\mu\text{T}$ ]	$\sigma$ [ $\mu\text{T}$ ]	$\sigma$ [%]	$B_{sr} - 2\sigma \leq B \leq B_{sr} + 2\sigma$ [ $\mu\text{T}$ ]
Несигурност мерења висина фазних проводника	14,85	0,45	3,02	$13,96 \leq B \leq 15,75$
Несигурност мерења струје	14,85	0,01	0,07	$14,83 \leq B \leq 14,87$
Несигурност мерења висина фазних проводника и несигурност мерења струје	14,85	0,45	3,04	$13,95 \leq B \leq 15,76$

У табели 10.16. дат је упоредни приказ опсега у којима се налазе вредности магнетске индукције, добијених применом методе описане у поглављу 9 и методе „Монте Карло”.

**Табела 10.16.** Упоредни приказ опсега у којима се налазе вредности магнетске индукције добијених применом методе описане у поглављу 9 и методе „Монте Карло”

Несигурност	Метода описана у поглављу 9	Метода „Монте Карло”
Несигурност мерења висина фазних проводника	14,09 $\mu\text{T}$ – 15,65 $\mu\text{T}$	13,96 $\mu\text{T}$ – 15,75 $\mu\text{T}$
Несигурност мерења струје	14,82 $\mu\text{T}$ – 14,88 $\mu\text{T}$	14,83 $\mu\text{T}$ – 14,87 $\mu\text{T}$
Несигурност мерења висина фазних проводника и несигурност мерења струје	13,99 $\mu\text{T}$ – 15,76 $\mu\text{T}$	13,95 $\mu\text{T}$ – 15,76 $\mu\text{T}$

На основу резултата приказаних у табели 10.16. закључује се да постоји слагање добијених резултата, како у случају израчунавања појединачних компонената несигурности, тако и приликом израчунавања проширене несигурности.

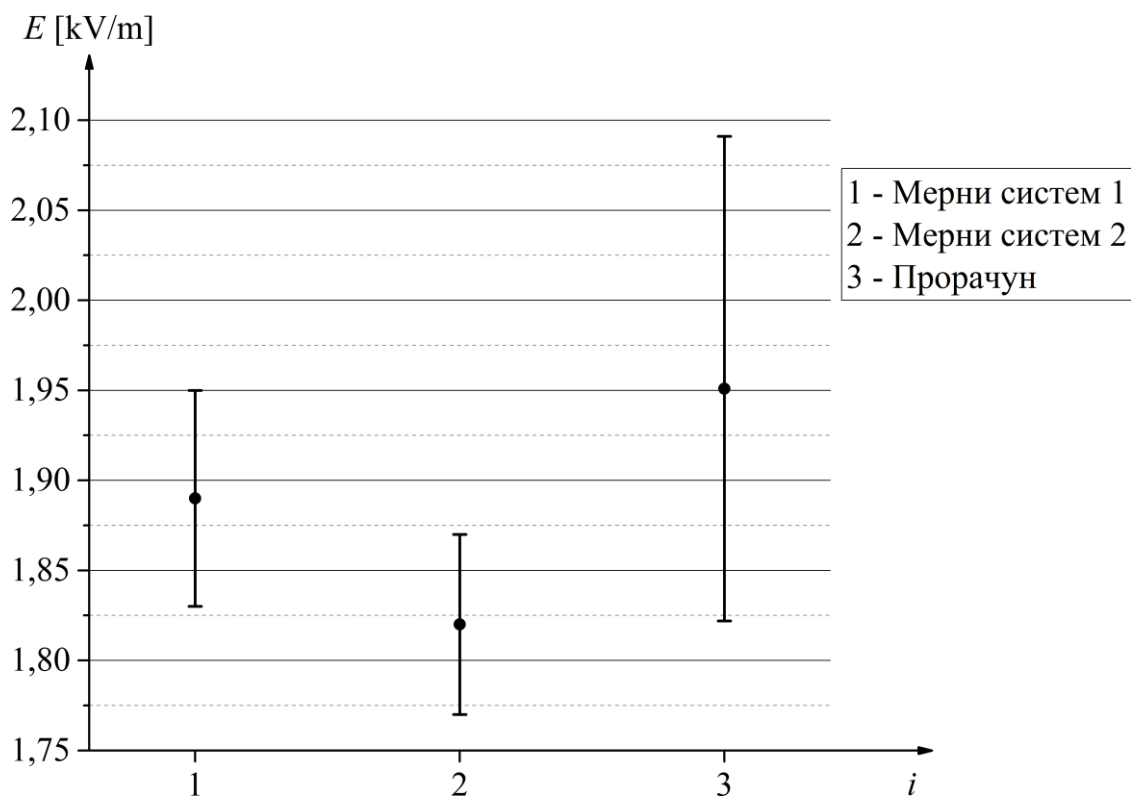
Израчунавање компонената несигурности применом методе „Монте Карло” спроведено је због упоређивања с вредностима ових компонената које су израчунате на начин описан у поглављу 9. Међутим, методом „Монте Карло” могуће је директно израчунавање проширене несигурности, што представља посебну погодност, јер у том случају није неопходно израчунавање појединих компонената несигурности.

### **10.3.5. Упоредни приказ резултата мерења и прорачуна јачине електричног поља и магнетске индукције**

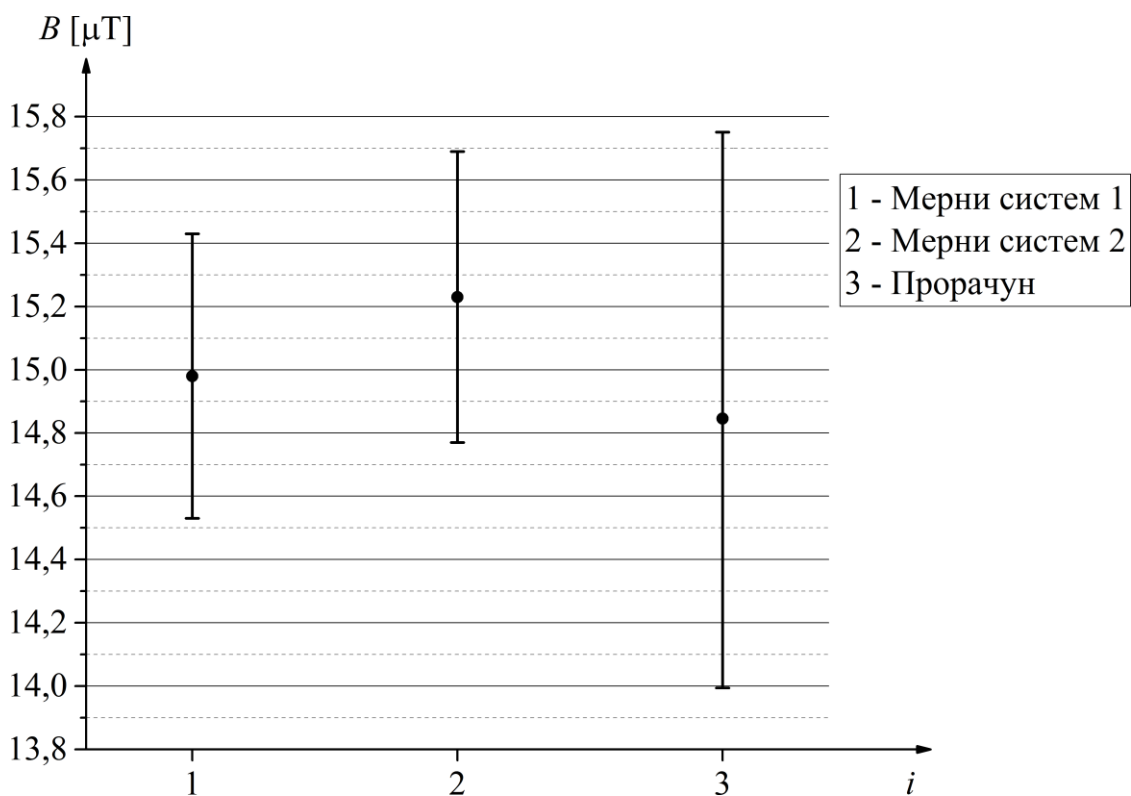
На сликама 10.7. и 10.8. дат је упоредни приказ опсега у којима се налазе резултати јачине електричног поља и магнетске индукције добијени мерењем и прорачуном, с урачунатим проширеним несигурностима. Као проширена несигурност резултата прорачуна дата је несигурност израчуната на начин описан у поглављима 8 и 9.

На основу добијених резултата може се закључити да постоји преклапање опсега у којима се налазе вредности јачине електричног поља добијене прорачуном и мерењем помоћу мерних система 1 и 2. Исти закључак важи и за вредности магнетске индукције добијене прорачуном и мерењем помоћу мерних система 1 и 2. На основу приказаних резултата може се закључити да је на описани начин обезбеђена валидност резултата мерења и прорачуна.





Слика 10.7. Опсеги у којима се налазе резултати јачине електричног поља добијени мерењем и прорачуном уз уважавање проширене несигурности



Слика 10.8. Опсеги у којима се налазе резултати магнетске индукције добијени мерењем и прорачуном уз уважавање проширене несигурности

### 10.3.6. Оцена резултата мерења и прорачуна заснована на израчунавању вредности $E_n$ броја

Стандард [143] односи се на спровођење међулабораторијских поређења и дефинише начине за оцену добијених резултата. Један од начина за оцену добијених резултата према наведеном стандарду заснива се на израчунавању  $E_n$  броја.

У случају јачине електричног поља,  $E_n$  број се израчунава на основу следећег израза:

$$E_{n_i} = \frac{E_i - E_{ref}}{\sqrt{U_{E_i}^2 + U_{E_{ref}}^2}} \quad (10.1)$$

при чему су:

$E_i$  – вредност јачине електричног поља добијена испитивањем;

$E_{ref}$  – додељена вредност јачине електричног поља (усвојена тачна вредност);

$U_{E_i}$  – проширена несигурност резултата  $E_i$ ;

$U_{E_{ref}}$  – проширена несигурност додељене вредности референтне лабораторије  $E_{ref}$ .

У случају магнетске индукције,  $E_n$  број се израчунава на следећи начин:

$$E_{n_i} = \frac{B_i - B_{ref}}{\sqrt{U_{B_i}^2 + U_{B_{ref}}^2}} \quad (10.2)$$

при чему су:

$B_i$  – вредност магнетске индукције добијена испитивањем;

$B_{ref}$  – додељена вредност магнетске индукције (усвојена тачна вредност);

$U_{B_i}$  – проширена несигурност резултата  $B_i$ ;

$U_{B_{ref}}$  – проширена несигурност додељене вредности референтне лабораторије  $B_{ref}$ .

Критеријум за оцењивање резултата је следећи:

$|E_n| < 1$  – указује на задовољавајуће резултате и не даје никакво упозорење;

$|E_n| > 1$  – указује на незадовољавајуће резултате и ствара сигнал за предузимање мера.

За израчунавање апсолутне вредности  $E_n$  броја коришћени су резултати мерења и прорачуна с проширеним несигурностима који су дати у табели 10.17.

**Табела 10.17.** Резултати мерења и прорачуна јачине електричног поља и магнетске индукције с придруженим проширеним несигурностима

	$E \pm U_E$	$B \pm U_B$
Мерни систем 1	1,89 kV/m $\pm$ 3%	14,98 $\mu$ T $\pm$ 3%
Мерни систем 2	1,82 kV/m $\pm$ 3%	15,23 $\mu$ T $\pm$ 3%
Прорачун	1,95 kV/m $\pm$ 7,2%	14,85 $\mu$ T $\pm$ 6,2%

Резултат прорачуна јачине електричног поља налази се у опсегу од 1,82 kV/m до 2,09 kV/m, тј. у опсегу од 1,95 kV/m - 6,62% до 1,95 kV/m + 7,18%. Ради једноставнијег израчунавања  $E_n$  броја, резултат прорачуна је у даљим анализама представљен као 1,95 kV/m  $\pm$  7,2%, чиме се добија опсег вредности од 1,81 kV/m до 2,09 kV/m.

Резултат прорачуна магнетске индукције налази се у опсегу од 13,99  $\mu\text{T}$  до 15,76  $\mu\text{T}$ , тј. у опсегу од 14,85  $\mu\text{T}$  - 5,74% до 14,85  $\mu\text{T}$  + 6,16%. Ради једноставнијег израчунавања  $E_n$  броја, резултат прорачуна је у даљим анализама представљен као 14,85  $\mu\text{T} \pm 6,2\%$ , чиме се добија опсег вредности од 13,93  $\mu\text{T}$  до 15,77  $\mu\text{T}$ .

Ако се за додељену вредност јачине електричног поља и магнетске индукције усвоје резултати добијени прорачуном, добијају се вредности  $E_n$  броја дате у табели 10.18.

**Табела 10.18.** Апсолутне вредности  $E_n$  броја израчунате под претпоставком да се за додељене вредности усвоје вредности добијене прорачуном

	$ E_n $	
	Електрично поље	Магнетска индукција
Мерни систем 1	0,40	0,13
Мерни систем 2	0,86	0,37

Уколико се за додељену вредност јачине електричног поља и магнетске индукције усвоје резултати добијени мерењем помоћу мерног система 1, добијају се вредности  $E_n$  броја дате у табели 10.19.

**Табела 10.19.** Апсолутне вредности  $E_n$  броја израчунате под претпоставком да се за додељене вредности усвоје вредности добијене мерењем помоћу мерног система 1

	$ E_n $	
	Електрично поље	Магнетска индукција
Прорачун	0,40	0,13
Мерни систем 2	0,89	0,39

Вредности  $E_n$  броја добијене под претпоставком да се за додељену вредност усвоје резултати добијени мерењем помоћу мерног система 2, дате су у табели 10.20.

**Табела 10.20.** Апсолутне вредности  $E_n$  броја израчунате под претпоставком да се за додељене вредности усвоје вредности добијене мерењем помоћу мерног система 2

	$ E_n $	
	Електрично поље	Магнетска индукција
Прорачун	0,86	0,37
Мерни систем 1	0,89	0,39

На основу резултата приказаних у табелама 10.18–10.20. закључује се да у свим случајевима важи да је  $|E_n| < 1$ , што значи да су добијени резултати коректни и да су проширене несигурности резултата мерења и прорачуна коректно одређене. Овај закључак је веома значајан имајући у виду чињеницу да приликом израчунавања несигурности мерења и прорачуна нису узете у обзир одређене компоненте несигурности, као што су несигурности позиционирања мерних сонди, несигурност услед занемарења стварног облика проводника и несигурност услед падова напона. На основу приказаних резултата потврђено је да су наведена занемарења у конкретном случају оправдана. Уважавање наведених компонената несигурности довело би до повећања проширене несигурности резултата и до додатног смањења апсолутне вредности  $E_n$  броја.

### 10.3.7. Оцена резултата мерења и прорачуна заснована на израчунавању вредности $\zeta$

Други начин за оцену добијених резултата према стандарду [143] подразумева израчунавање вредности  $\zeta$ .

У случају јачине електричног поља, вредност  $\zeta$  се израчунава на основу следећег израза:

$$\zeta_i = \frac{E_i - E_{ref}}{\sqrt{u_{E_i}^2 + u_{E_{ref}}^2}} \quad (10.3)$$

при чему су:

$u_{E_i}$  – комбинована стандардна несигурност резултата  $E_i$ ;

$u_{E_{ref}}$  – стандардна несигурност додељене вредности  $E_{ref}$ .

У случају магнетске индукције, вредност  $\zeta$  се израчунава на следећи начин:

$$\zeta_i = \frac{B_i - B_{ref}}{\sqrt{u_{B_i}^2 + u_{B_{ref}}^2}} \quad (10.4)$$

при чему су:

$u_{B_i}$  – комбинована стандардна несигурност резултата  $B_i$ ;

$u_{B_{ref}}$  – стандардна несигурност додељене вредности  $B_{ref}$ .

Критеријум за оцењивање резултата је следећи:

$|\zeta| \leq 2$  – указује на задовољавајуће резултате и не даје никакво упозорење;

$2 < |\zeta| < 3$  – указује на дискутабилне резултате и ствара сигнал упозорења;

$|\zeta| \geq 3$  – указује на незадовољавајуће резултате и ствара сигнал за предузимање мера.

За израчунавање апсолутне вредности  $\zeta$  коришћени су резултати мерења и прорачуна са проширеним несигурностима који су дати у табели 10.17. Стандардне несигурности су израчунате дељењем одговарајућих проширених несигурности коефицијентом проширења који износи 1,96.

Израчунате апсолутне вредности  $\zeta$  које се односе на резултате мерења и прорачуна јачине електричног поља и магнетске индукције дате су у табелама 10.21. и 10.22.

Ознаке у табелама 10.21. и 10.22. имају следеће значење:

$E_{m_1}, B_{m_1}$  – вредности јачине електричног поља и магнетске индукције добијене мерењем помоћу мерног система 1;

$E_{m_2}, B_{m_2}$  – вредности јачине електричног поља и магнетске индукције добијене мерењем помоћу мерног система 2;

$E_p, B_p$  – вредности јачине електричног поља и магнетске индукције добијене прорачуном.

На основу приказаних резултата закључује се да у свим случајевима важи да је  $|\zeta| < 2$ , што значи да су добијени резултати коректни и да су проширене несигурности резултата мерења и прорачуна коректно одређене.

**Табела 10.21.** Апсолутне вредности  $\zeta$  које се односе на резултате јачине електричног поља добијене мерењем и прорачуном

	$E_{ref} = E_p$	$E_{ref} = E_{m_1}$	$E_{ref} = E_{m_2}$
Мерни систем 1	0,78	/	1,74
Мерни систем 2	1,69	1,74	/
Прорачун	/	0,78	1,69

**Табела 10.22.** Апсолутне вредности  $\zeta$  које се односе на резултате магнетске индукције добијене мерењем и прорачуном

	$B_{ref} = B_p$	$B_{ref} = B_{m_1}$	$B_{ref} = B_{m_2}$
Мерни систем 1	0,25	/	0,76
Мерни систем 2	0,72	0,76	/
Прорачун	/	0,25	0,72

# **11. Методологија за оцену изложености људи заснована на резултатима мерења и прорачуна**

## **11.1. Увод**

У овом поглављу приказана је методологија за оцену изложености људи која се заснива на коришћењу резултата добијених мерењем и прорачуном јачине електричног поља и магнетске индукције. Методологија је развијена због потребе доношења поузданих закључака о изложености људи у зонама повећане осетљивости. Поменути методологија је у претходном периоду успешно примењена за доношење закључака о изложености људи електричном и магнетском пољу у великом броју зона повећане осетљивости које се налазе у околини једносистемских и двосистемских преносних и дистрибутивних водова различитих напонских нивоа, геометрија и других релевантних карактеристика. У студији [39] методологија заснована на резултатима мерења и прорачуна примењена је на више од четири стотине зона повећане осетљивости које се налазе у околини преносних надземних водова. У овом поглављу је на неколико примера зона повећане осетљивости приказана примена развијене методологије. Као што је наведено у поглављу 2, према члану 12 Правилника [24], прописи о заштити становништва у подручју повећане осетљивости не односе се на објекте који су накнадно изграђени унутар далеководних коридора. За потребе демонстрације развијене методологије наведени критеријум није узет у обзир, тако да је све зоне повећане осетљивости приказане у овом поглављу потребно сматрати потенцијалним зонама повећане осетљивости, пошто није вршена провера испуњености критеријума из члана 12 Правилника [24]. Такође је значајно напоменути да је методологија заснована на поређењу резултата мерења и прорачуна јачине електричног поља и магнетске индукције с прописаним референтним граничним нивоима. Уколико се наведеном методологијом докаже да референтни гранични нивои не могу да буду прекорачени, закључује се да постоји усаглашеност и да су захтеви прописа испуњени. Уколико се покаже да су референтни гранични нивои електричног и/или магнетског поља прекорачени, то и даље не значи да усаглашеност није постигнута, већ је у том случају потребно проверити да ли постоји могућност прекорачења базичних ограничења [2]. Ако се покаже да базична ограничења могу бити прекорачена, потребно је применити мере за смањење вредности електричног и/или магнетског поља [37], [145]–[147].

## **11.2. Методологија за оцену изложености људи електричном и магнетском пољу надземних електроенергетских водова**

Поступак мерења електричног и магнетског поља дефинисан је стандардима [8], [11] и [12], док су додатне смернице дате у препоруци [20]. Описана процедура се примењује када је потребно пронаћи максималне вредности електричног и магнетског поља на целом распону између два стуба, што представља изузетно редак случај. Пошто су границе излагања становништва прописане само за одређене зоне, у пракси се испитивања врше у конкретној зони повећане осетљивости која се налази у близини надземног вода, тако да је неопходно одредити највеће вредности електричног и магнетског поља којима могу бити изложени људи у датој зони повећане осетљивости, а не дуж целог распона. Из тог разлога се описана процедура прилагођава мерењима у зони повећане осетљивости. У зависности од конкретне ситуације, тј. од величине зоне повећане осетљивости и њеног положаја у односу на вод, мерења се могу спроводити дуж лонгитудиналног правца и/или дуж једног или више латералних праваца, а по потреби и дуж праваца постављених под произвољним углом у односу на вод, ради одређивања највећих вредности електричног и магнетског поља. Уместо мерења дуж праваца, може се извршити прелиминарно скенирање ради одређивања тачака у којима се јављају највеће вредности електричног и магнетског поља. У овим тачкама које су

репрезентативне за оцену изложености спроводе се мерења електричног и магнетског поља. Уколико објекат осим приземља има и један или више спратова, мерења се врше и на спратовима објекта. Електрично поље је унутар објекта екранизовано, али се мерења електричног поља врше на отвореним деловима објекта, као што су нпр. отворене терасе. Магнетско поље унутар објекта није екранизовано, тако да се мерења магнетске индукције врше и унутар и на отвореним деловима објекта. На отвореном простору у околини објекта врше се мерења и електричног и магнетског поља. Током мерења магнетске индукције бележи се податак о струјама оптерећења надземног вода, а током мерења електричног поља податак о напонима вода.

На вредности електричног и магнетског поља надземних водова у великој мери утиче висина фазних проводника вода изнад тла, због чега је податак о висинама проводника у време мерења веома значајан. За поуздано мерење висине користе се ласерски даљиномери, при чему се мерење спроводи на начин описан у поглављу 8.4.1. На угиб проводника, а самим тим и на њихову висину изнад тла, утиче температура проводника која зависи од температуре ваздуха, ветра и тренутног оптерећења вода. Из тог разлога је бележење ових параметара на терену значајно, због израчунавања минималне висине проводника на датом месту која би се јавила при највећој дозвољеној температури проводника, а ради одређивања највећих вредности електричног и магнетског поља које би се јавиле у том случају.

Блок-дијаграм методологије засноване на резултатима мерења и прорачуна приказан је на слици 11.1.

Први корак представља мерење које се спроводи на претходно описани начин, чиме се добијају вредности електричног поља  $E_m$  и магнетске индукције  $B_m$ . Затим се израчунавају проширене несигурности резултата мерења електричног поља  $U_{E_m}$  и магнетске индукције  $U_{B_m}$ . При томе се узимају у обзир компоненте несигурности које су детаљно анализирани у поглављима 6 и 7, док се проширена мерна несигурност израчунава на начин описан у поглављима 5 и 10. Коначни резултати мерења се исказују као  $E_m \pm U_{E_m}$  и  $B_m \pm U_{B_m}$ .

Прорачун се прво спроводи за услове који су постојали у време мерења, на основу чега се добијају вредности електричног поља  $E_p$  и магнетске индукције  $B_p$ . Израчунавају се проширене несигурности резултата прорачуна електричног поља  $U_{E_p}$  и магнетске индукције  $U_{B_p}$ , при чему се уважавају компоненте несигурности које су описане и израчунате у поглављима 8 и 9. Проширена несигурност прорачуна израчунава се на начин описан у поглављима 5 и 10. Коначни резултати прорачуна исказују се као  $E_p \pm U_{E_p}$  и  $B_p \pm U_{B_p}$ .

Следећи корак представља упоређивање резултата мерења и прорачуна ради обезбеђења валидности резултата. При томе се увек врши поређење опсега у коме се налазе резултати мерења и прорачуна магнетске индукције. Уколико је испуњен услов:

$$(B_m \pm U_{B_m}) \cap (B_p \pm U_{B_p}) \neq \{ \} \quad (11.1)$$

закључује се да је обезбеђена валидност резултата мерења и прорачуна магнетске индукције, мерења висина проводника и њихових међусобних растојања и израчунавања проширене несигурности. Уколико у разматраној зони повећане осетљивости на месту на којем је измерена вредност  $E_m$  није изражена пертурбација електричног поља, може се извршити поређење опсега у којем се налазе резултати мерења и прорачуна јачине електричног поља. Уколико је испуњен услов:

$$(E_m \pm U_{E_m}) \cap (E_p \pm U_{E_p}) \neq \{ \} \quad (11.2)$$

закључује се да је обезбеђена валидност резултата мерења и прорачуна јачине електричног поља. Имајући у виду чињеницу да је у зонама повећане осетљивости врло често изражена пертурбација електричног поља услед присуства објеката и да прорачун заснован на методама описаним у поглављу 4 не уважава овај утицај, поређење резултата мерења и прорачуна електричног поља не може се вршити у оваквим ситуацијама. Обезбеђење валидности резултата мерења и прорачуна електричног поља може се спровести на локацији на којој пертурбација електричног поља није изражена, као што је приказано у поглављу 10.

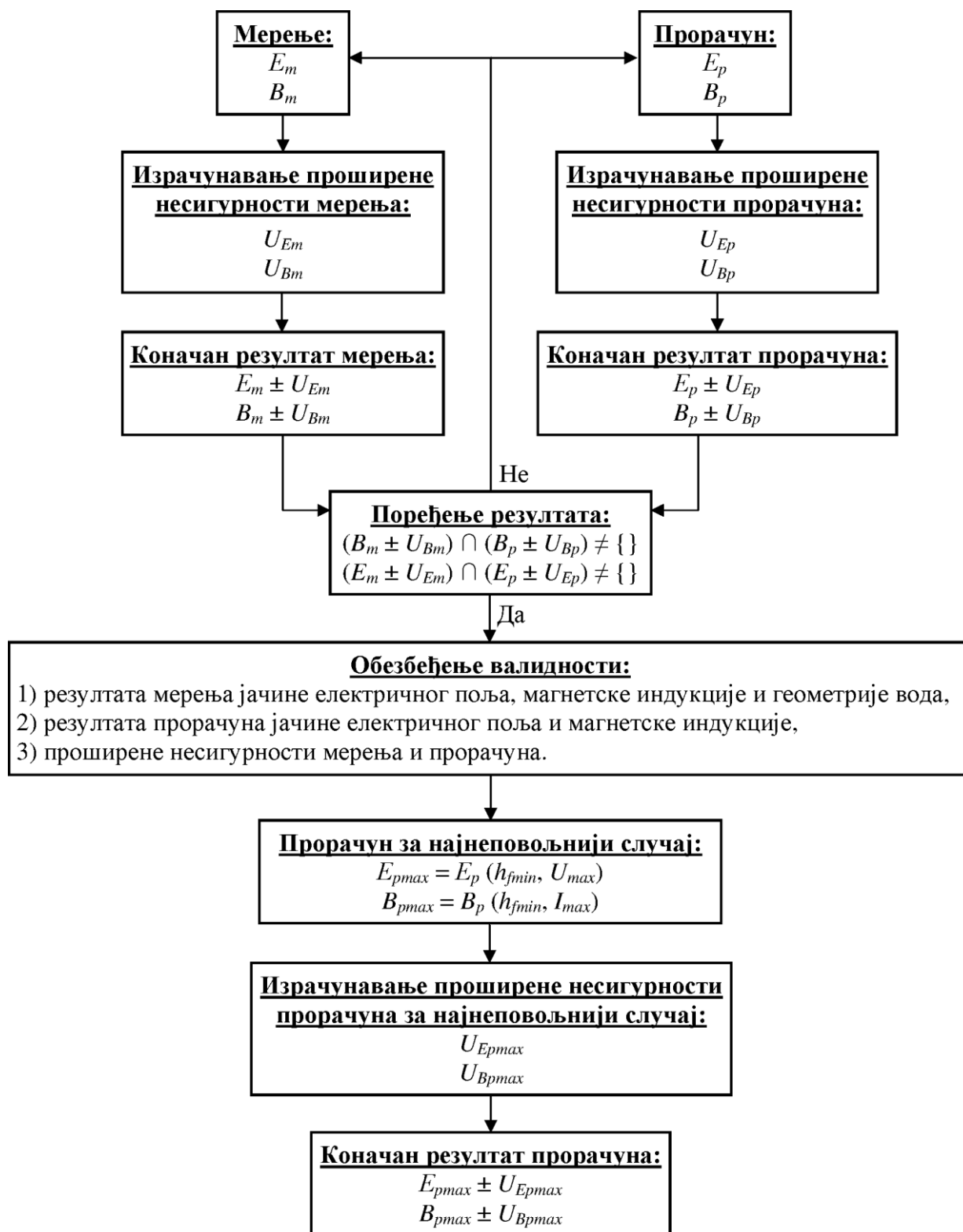
Након обезбеђења валидности резултата, спроводи се прорачун за најнеповољније услове, тј. услове при којима се јавља највећа изложеност људи, што представља захтев стандарда [8]. Са аспекта јачине електричног поља, најнеповољнији случај се јавља када су висине фазних проводника изнад тла најмање ( $h_f = h_{f_{min}}$ ) и када је напон једнак максималном радном напону ( $U = U_{max}$ ). Прорачун за најнеповољнији случај се, осим за максимални радни напон, може спровести и за назначени напон, али је у том случају промену напона потребно уважити у проширеној несигурности прорачуна, на основу вредности датих у табели 4.5. [148]. Најнеповољнији случај са аспекта магнетске индукције јавља се када су висине фазних проводника изнад тла најмање ( $h_f = h_{f_{min}}$ ) и када је струја оптерећења вода максимална ( $I = I_{max}$ ). Под максималном струјом се подразумева краткотрајно дозвољена струја у зимском периоду  $I_{kdz}$ . Уколико се прорачуном магнетске индукције за струју  $I_{kdz}$  добије вредност која је нижа од прописане границе излагања, закључује се да постоји усаглашеност. Уколико се добије вредност која прекорачује прописану границу, пре предузимања мера заштите потребно је проверити да ли на конкретном воду може да се јави ова вредност струје. Ради израчунавања вредности електричног и магнетског поља које се јављају у најнеповољнијим условима, потребно је одредити минималну висину фазних проводника вода изнад тла, која се јавља при температури проводника од 80°C. Ова висина се по правилу добија моделовањем затезног поља којем припада распон на којем се врше испитивања. За наведени модел неопходно је познавање кота тачака вешања фазних проводника на свим стубовима који чине дато затезно поље. На основу познатог податка о температури фазних проводника у време мерења, која зависи од оптерећења, брзине ветра и температуре амбијента, може се одредити максимална промена угиба на датом распону  $\Delta f_{max}$ . На основу познате позиције латералног правца на којем се налазе тачке у којима су спроведена испитивања може се одредити промена угиба  $\Delta f$ , као и промена висине фазних проводника  $\Delta h_f$  на месту датог латералног правца. Пошто је приликом мерења на терену измерена висина фазних проводника на датом латералном правцу  $h_f$ , минимална висина фазних проводника на овом правцу се може израчунати на следећи начин:

$$h_{f_{min}} = h_f - \Delta h_f \quad (11.3)$$

У случају када су вредности прорачуна с урачунатом проширеном несигурношћу ниже од прописаних граница излагања, за израчунавање  $h_{f_{min}}$  може се користити податак о максималној промени угиба на датом распону  $\Delta f_{max}$ , чиме се добијају резултати који су на страни сигурности. Такође, уколико су вредности прорачуна с урачунатом проширеном несигурношћу знатно ниже од прописаних граница излагања и уколико распони који чине затезно поље не одступају много од правих распона, за одређивање  $\Delta f_{max}$  могу се користити табеле угиба које се односе на праве распоне.

Након одређивања потребних улазних података спроводи се прорачун за најнеповољније услове, чиме се добијају вредности јачине електричног поља  $E_{P_{max}}$  и магнетске индукције  $B_{P_{max}}$ . Затим се одређују проширене несигурности прорачуна  $U_{E_{P_{max}}}$  и  $U_{B_{P_{max}}}$  које одговарају овим израчунатим вредностима.





Слика 11.1. Методологија за оцену изложености људи заснована на резултатима мерења и прорачуна

На вредности  $U_{E_{pmax}}$  и  $U_{B_{pmax}}$  највише утиче несигурност познавања геометрије надземног вода, и то првенствено несигурност мерења висине фазних проводника. Пошто се прорачун вредности  $E_{pmax}$  спроводи за напон  $U_{max}$ , а прорачун вредности  $B_{pmax}$  за струју  $I_{max}$ , на вредност  $U_{E_{pmax}}$  не утиче несигурност мерења напона, док на вредност  $U_{B_{pmax}}$  не утиче грешка мерења струје.

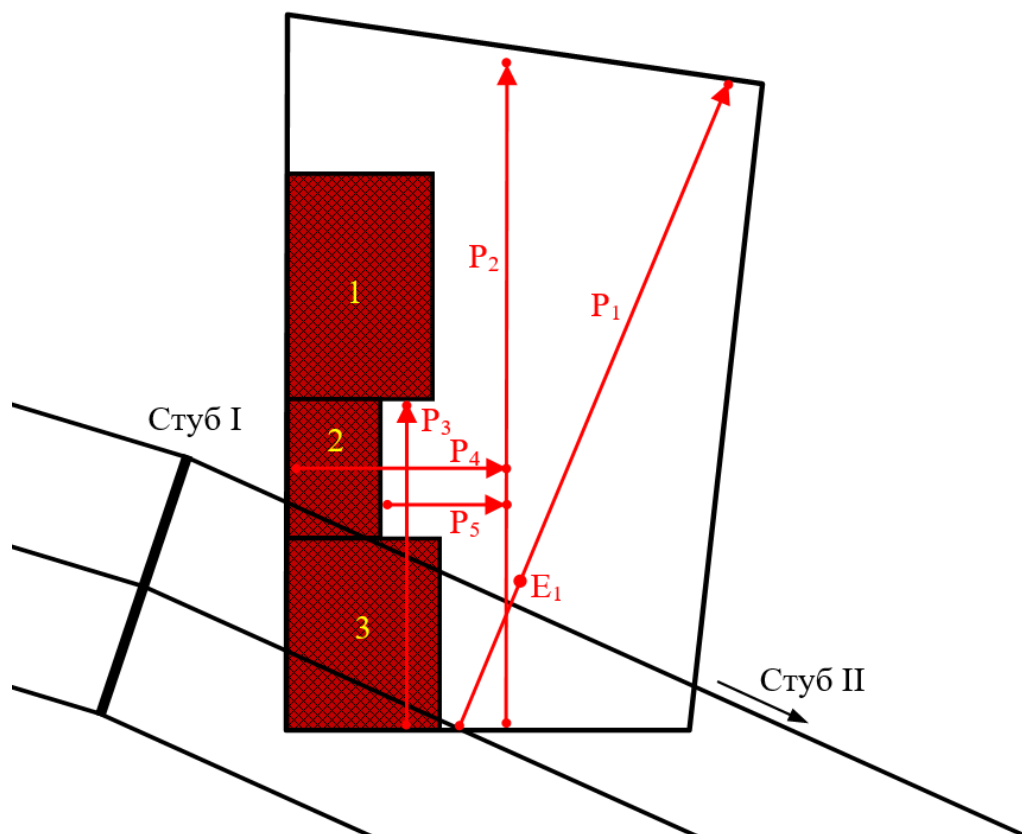
Закључак о усаглашености с прописаним границама излагања применом описане методологије заснива се на резултатима мерења и прорачуна, при чему се на резултате додају и проширене несигурности мерења и прорачуна.

У наставку је на неколико примера приказана примена описане методологије у пракси.

### 11.3. Испитивања јачине електричног поља мерењем и прорачуном

#### 11.3.1. Пример 1

Испитивање је спроведено у зони повећане осетљивости која је приказана на слици 11.2. На слици 11.2. ознаком 1 обележен је стамбени објекат, а ознакама 2 и 3 наткривени простор. Мерења електричног поља спроведена су дуж латералног правца  $P_1$ , као и дуж праваца  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  и  $P_5$ .



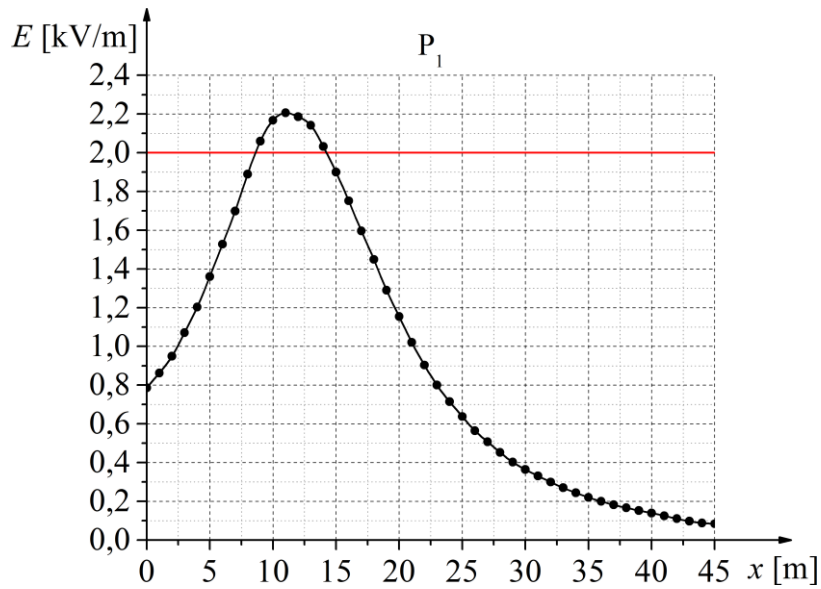
Слика 11.2. Распоред мерних места

Извор електричног поља у разматраној потенцијалној зони повећане осетљивости представља надземни вод напонског нивоа 220 kV, чији су основни подаци дати у табели 11.1.

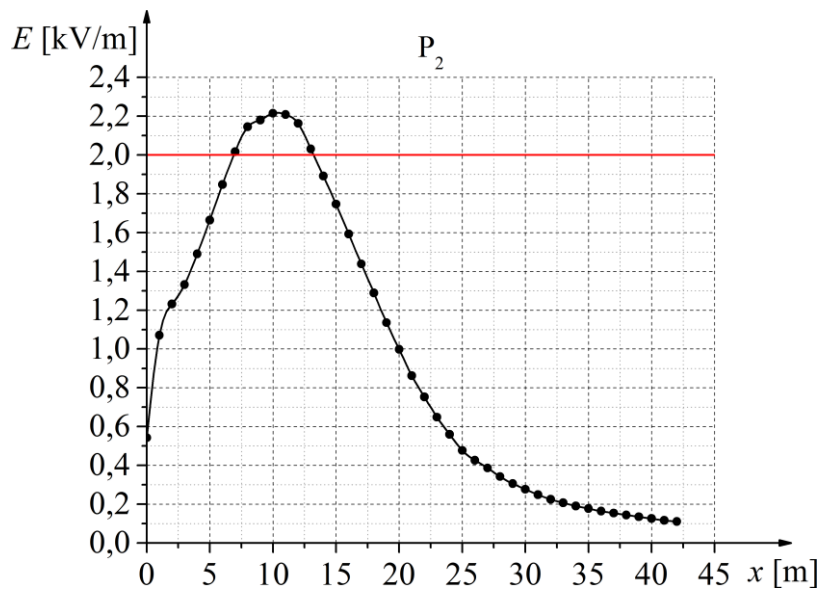
Табела 11.1. Подаци о надземном воду и распону на којем се врше испитивања

Напонски ниво	Фазни проводници	Типови стубова
220 kV	$3 \times \text{Al}/\check{\text{C}}\text{e } 360/57$ ( $r_f = 13,3 \text{ mm}$ , $I_{kdz} = 1140 \text{ A}$ )	I: портал (угаоно-затезни) II: портал (носећи)

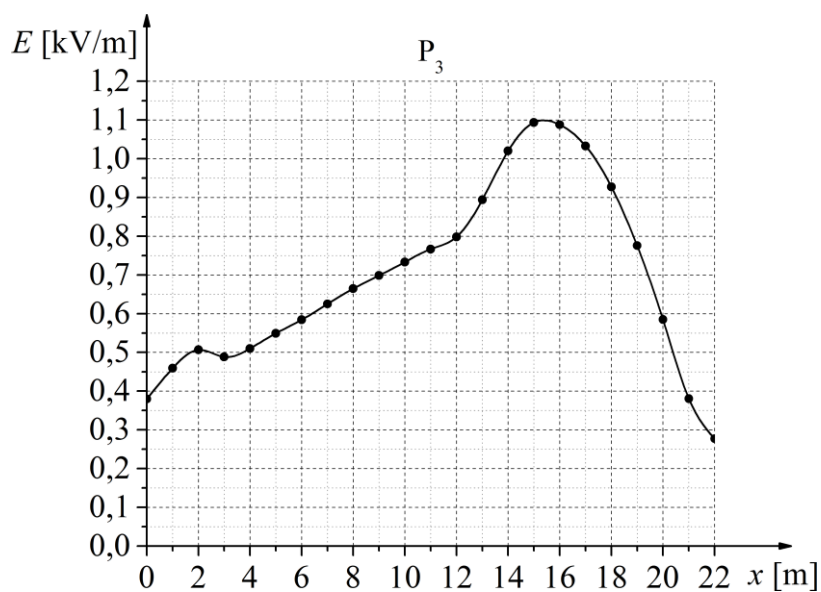
Резултати мерења јачине електричног поља дуж праваца  $P_1$ – $P_5$  дати су на сликама 11.3–11.7.



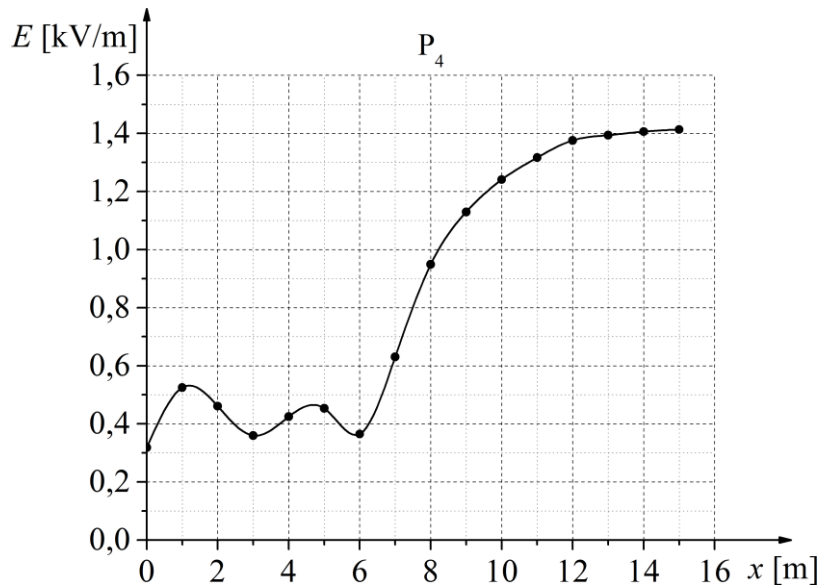
Слика 11.3. Резултати мерења јачине електричног поља дуж правца  $P_1$



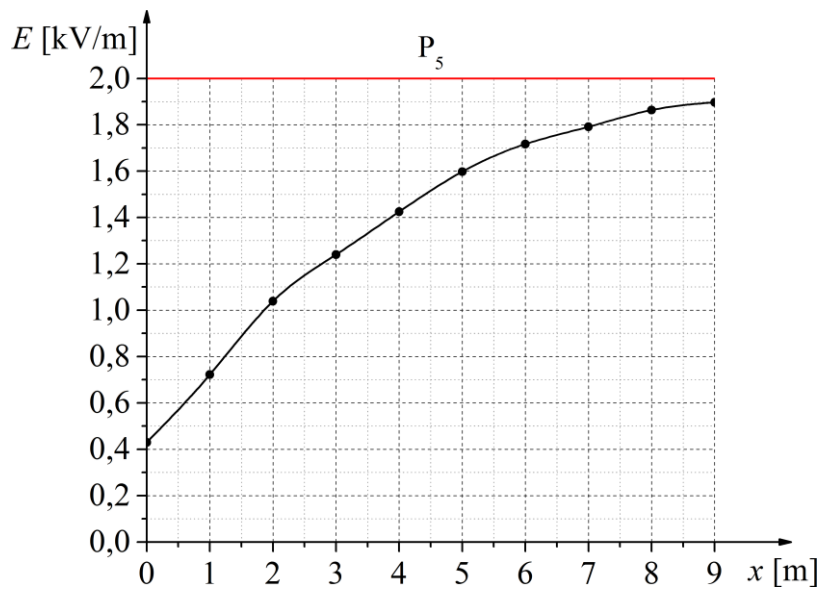
Слика 11.4. Резултати мерења јачине електричног поља дуж правца  $P_2$



Слика 11.5. Резултати мерења јачине електричног поља дуж правца  $P_3$



Слика 11.6. Резултати мерења јачине електричног поља дуж правца  $P_4$

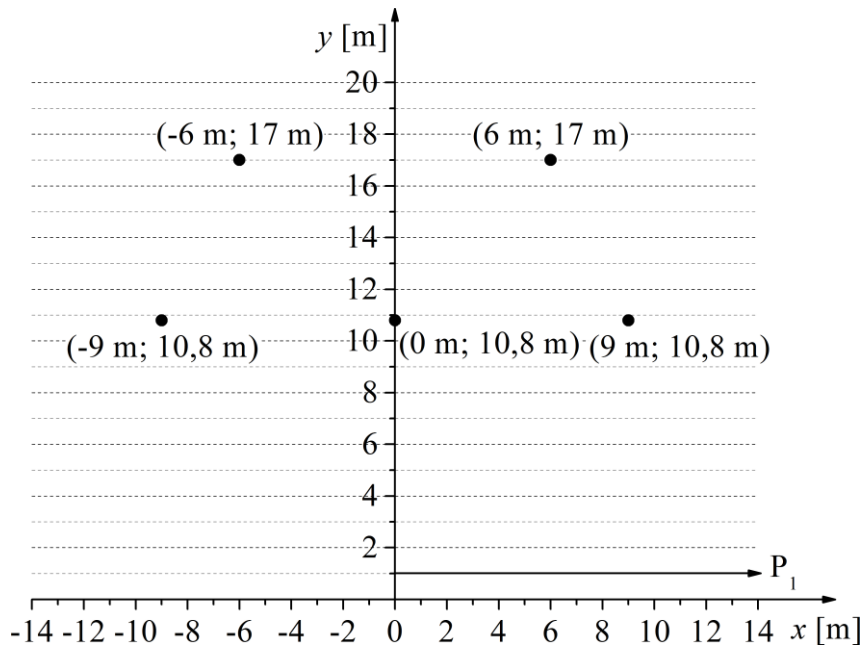


Слика 11.7. Резултати мерења јачине електричног поља дуж правца  $P_5$

Прорачун је спроведен за висине фазних проводника измерене у време мерења електричног поља, ради обезбеђења валидности резултата. У конкретном случају је обезбеђење валидности резултата електричног поља било могуће, пошто на већем делу правца  $P_1$  не постоји пертурбација електричног поља услед близине објеката. Прорачун је спроведен дуж латералног правца  $P_1$ . Подаци о висинама фазних проводника на месту правца  $P_1$  дати су у табели 11.2. Координате фазних и заштитних проводника у време мерења на месту латералног правца  $P_1$  дате су на слици 11.8.

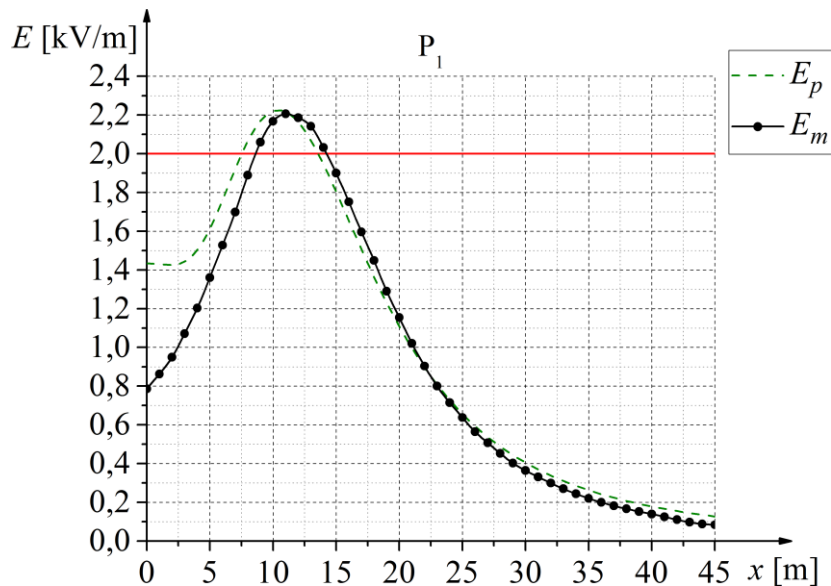
Табела 11.2. Подаци о висинама фазних проводника на месту латералног правца  $P_1$

$h_f$ [m]	$\Delta h_f$ [m]	$h_f - \Delta h_f$ [m]
10,8; 10,8; 10,8	0,8	10; 10; 10



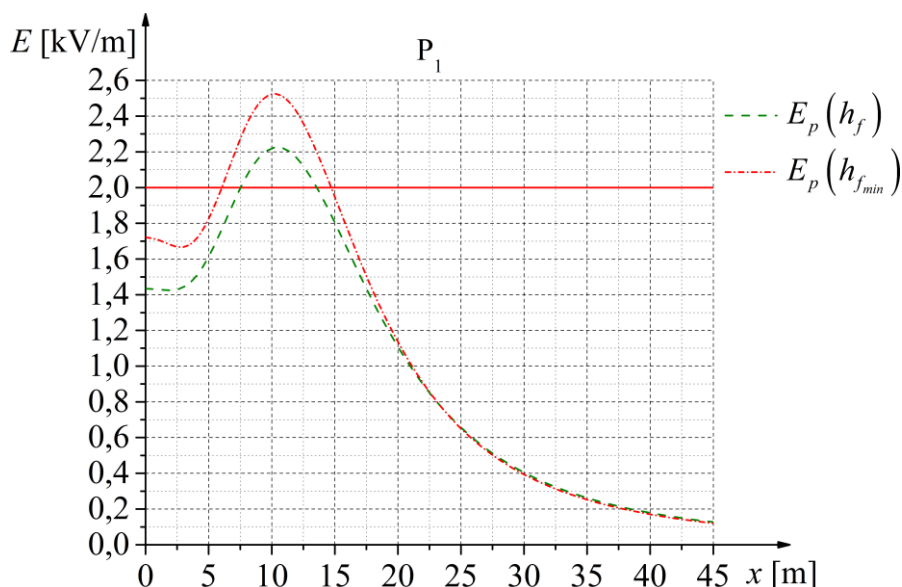
Слика 11.8. Координате проводника на месту латералног правца  $P_1$

Упоредни приказ резултата мерења и прорачуна јачине електричног поља дуж правца  $P_1$  дат је на слици 11.9. На основу резултата приказаних на слици 11.9. може се закључити да постоји слагање резултата добијених мерењем и прорачуном. Одступања између резултата мерења и прорачуна која се јављају у зони од  $x = 0$  m до  $x = 10$  m последица су екранизације електричног поља услед присуства ограде, жбуња и надстрешнице у непосредној близини ове зоне. На растојањима од осе вода већим од 10 m утицај екранизације електричног поља од околних објеката је занемарљив, тако да постоји подударње резултата добијених мерењем и прорачуном.



Слика 11.9. Упоредни приказ резултата мерења и прорачуна јачине електричног поља дуж правца  $P_1$

Пошто вредности јачине електричног поља добијене мерењем прекорачују референтни гранични ниво, није неопходно спровођење прорачуна јачине електричног поља за случај минималних висина фазних проводника. Овај прорачун је информативног карактера, а резултати су приказани на слици 11.10, упоредо с резултатима прорачуна за висине фазних проводника у време мерења.



Слика 11.10. Упоредни приказ резултата прорачуна јачине електричног поља  $E_p(h_f)$  и  $E_p(h_{f_{min}})$  дуж правца  $P_1$

У табели 11.3. дат је упоредни приказ резултата мерења и прорачуна на репрезентативном мерном месту, које је на слици 11.2. означено са  $E_1$ , на којем је измерена највећа вредност јачине електричног поља.

Табела 11.3. Резултати мерења и прорачуна јачине електричног поља на репрезентативном месту

Мерно место	Координате мерног места	Локација мерног места	$E_m$ [kV/m]	$E_p$ [kV/m]	$E_{p_{max}}$ [kV/m]
$E_1$	$x = 11 \text{ m}$ $y = 1 \text{ m}$	У дворишту	2,21	2,22	2,52

### 11.3.2. Пример 2

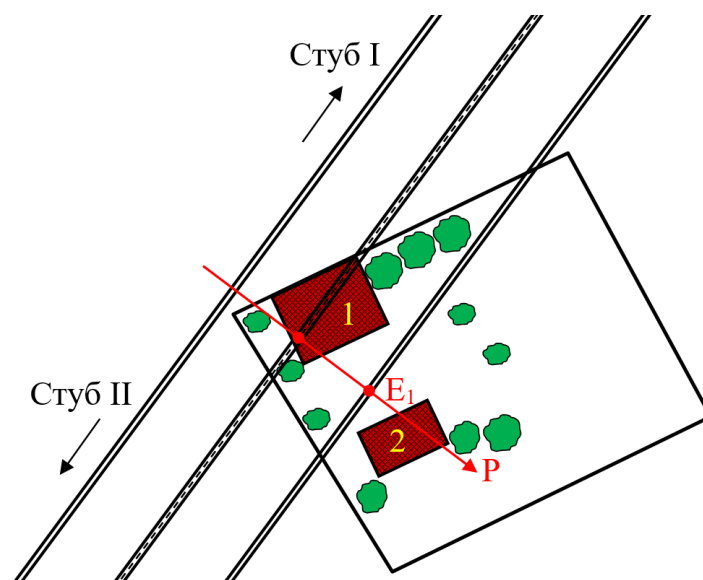
Извор електричног поља у разматраној зони повећане осетљивости представља надземни вод напонског нивоа 400 kV, чији су основни подаци дати у табели 11.4.

Табела 11.4. Подаци о надземном воду и распону на којем се врше испитивања

Напонски ниво	Фазни проводници	Типови стубова
400 kV	$3 \times 2 \times \text{Al}/\check{\text{C}}\text{e} 490/65$ ( $r_f = 15,3 \text{ mm}$ , $I_{kdz} = 2740 \text{ A}$ )	I: портал (носећи) II: портал (носећи)

Зона повећане осетљивости у којој је спроведено испитивање приказана је на слици 11.11. На овој слици је ознаком 1 обележен стамбени објекат, а ознаком 2 помоћни објекат.

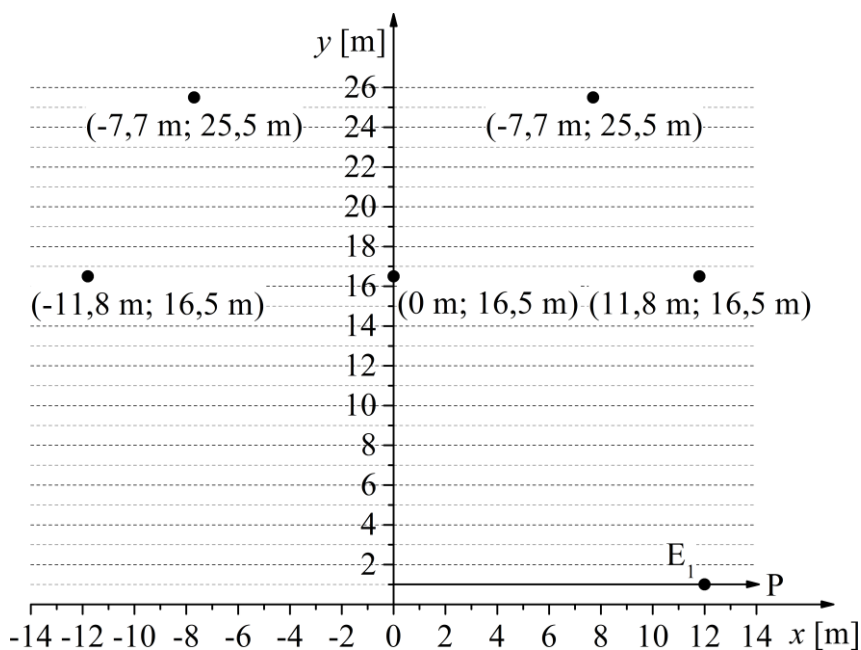
Највећа вредност јачине електричног поља измерена је на мерном месту  $E_1$ , које се налази на латералном правцу  $P$ . Подаци о висинама фазних проводника на месту правца  $P$  дати су у табели 11.5. Координате фазних и заштитних проводника у време мерења на месту латералног правца  $P$  дате су на слици 11.12.



Слика 11.11. Положај мерног места

Табела 11.5. Подаци о висинама фазних проводника на месту латералног правца P

$h_f$ [m]	$\Delta h_f$ [m]	$h_f - \Delta h_f$ [m]
16,5; 16,5; 16,5	1,9	14,6; 14,6; 14,6



Слика 11.12. Координате проводника на месту латералног правца P и положај мерног места

У табели 11.6. приказани су резултати мерења и прорачуна на мерном месту  $E_1$ , на којем је измерена највећа вредност јачине електричног поља. Као и у претходном примеру, пошто је мерењем добијена вредност која прекорачује референтни гранични ниво, прорачун електричног поља није неопходан за оцену усаглашености.

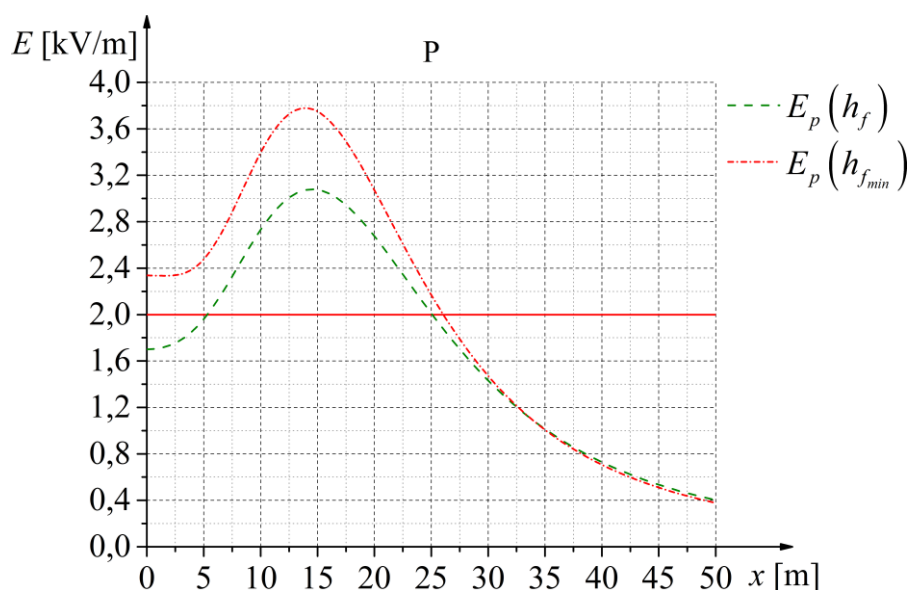
**Табела 11.6.** Резултати мерења и прорачуна јачине електричног поља на репрезентативном месту

Мерно место	Координате мерног места	Локација мерног места	$E_m$ [kV/m]	$E_p$ [kV/m]	$E_{p_{max}}$ [kV/m]
E <sub>1</sub>	x = 12 m y = 1 m	У дворишту, између стамбеног и помоћног објекта	2,33	2,97	3,68

На основу приказаних резултата се закључује да постоји одступање између резултата мерења и прорачуна на месту E<sub>1</sub>. Мерењем је добијена вредност од 2,33 kV/m, док је прорачуном добијена вредност од 2,97 kV/m. Разлика између измерене и израчунате вредности последица је екранизације електричног поља услед присуства околних објеката (стамбени и помоћни објекат, дрвеће и др.), коју прорачун не уважава. Из истог разлога постоји и одступање између локације мерног места на којем је измерена највећа вредност поља, која се налази на растојању од 12 m од осе вода, и локације теоријског максимума електричног поља, која се налази на растојању од 15 m од осе вода. Вредност јачине електричног поља добијена прорачуном на овом месту износи 3,08 kV/m.

Прорачуном за минималне висине фазних проводника на месту E<sub>1</sub> добијена је вредност од 3,68 kV/m. Највећа вредност електричног поља при минималним висинама проводника јавља се на растојању од 14 m од осе вода и износи 3,78 kV/m.

Резултати прорачуна јачине електричног поља дуж латералног правца Р за висине проводника у време мерења, као и за минималне висине, дати су упоредо на слици 11.13.



**Слика 11.13.** Упоредни приказ резултата прорачуна јачине електричног поља

$$E_p(h_f) \text{ и } E_p(h_{f_{min}}) \text{ дуж правца Р}$$



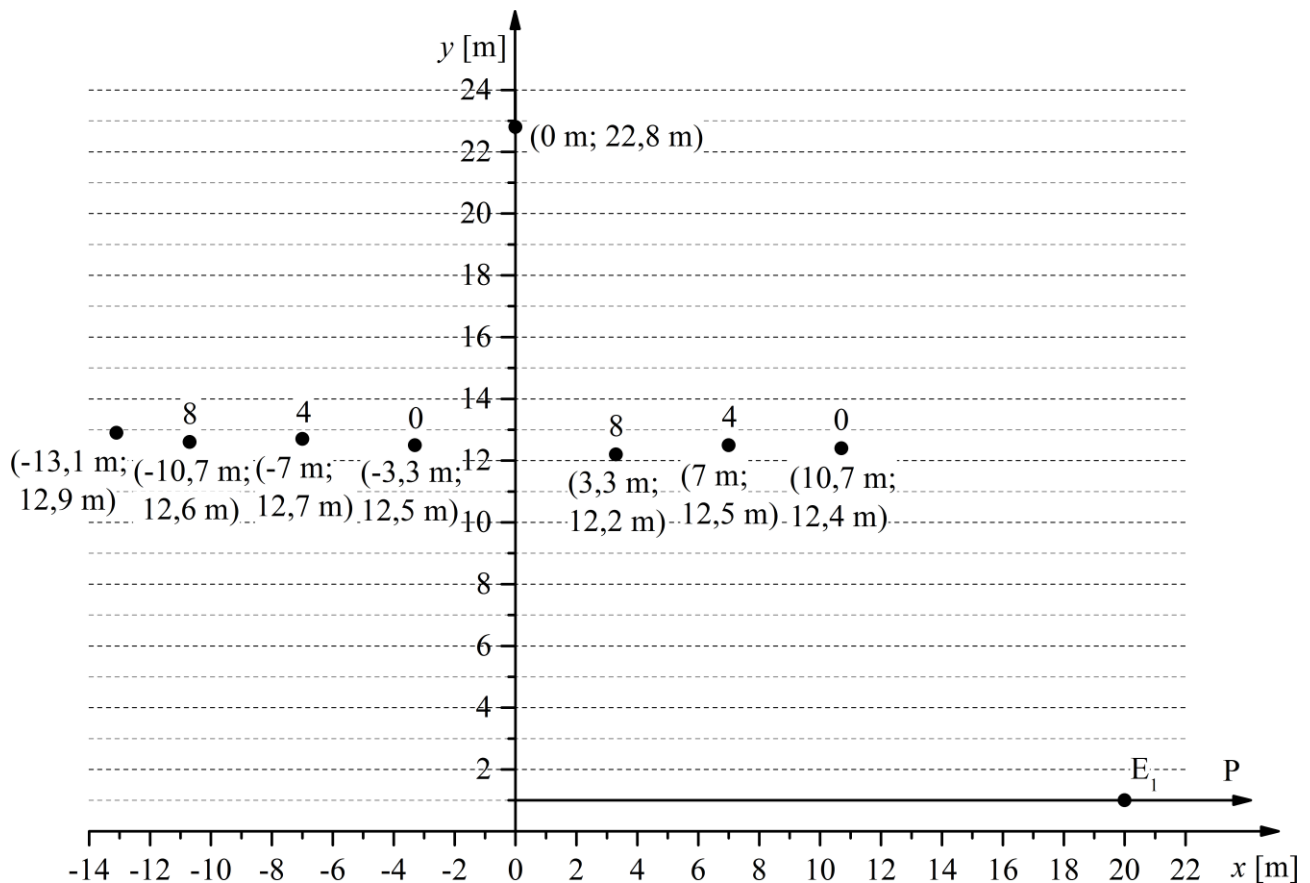
### 11.3.3. Пример 3

Извор електричног поља у разматраној зони повећане осетљивости представља двосистемски надземни вод напонског нивоа 110 kV, чији су основни подаци дати у табели 11.7.

**Табела 11.7.** Подаци о надземном воду и распону на којем се врше испитивања

Напонски ниво	Фазни проводници	Типови стубова
110 kV	$2 \times 3 \times \text{Al}/\check{\text{C}}\text{e} 150/25$ ( $r_f = 8,55 \text{ mm}$ , $I_{kdz} = 650 \text{ A}$ )	I: донау (затезни) II: донау (затезни)

Највећа вредност јачине електричног поља измерена је на мерном месту  $E_1$ , које се налази на латералном правцу  $P$ . Координате фазних и заштитних проводника у време мерења на месту латералног правца  $P$  дате су на слици 11.14. Промена висине фазних проводника  $\Delta h_f$  на правцу  $P$  износи 1,30 m.



**Слика 11.14.** Координате проводника на месту латералног правца  $P$  и положај мерног места

У табели 11.8. приказани су резултати мерења и прорачуна на мерном месту  $E_1$ , на којем је измерена највећа вредност јачине електричног поља. Мерно место се налази у углу дворишта. У близини мерног места није било објеката који би довели до пертурбације електричног поља, а терен на којем је вршено мерење је приближно раван, тако да постоји слагање између резултата мерења и прорачуна. Вредност  $E_{p_{max}}$  израчуната је под претпоставком да је напон једнак максималном радном напону од 121 kV и да је висина сваког фазног проводника за 1,30 m нижа од висина датих на слици 11.14.

**Табела 11.8.** Резултати мерења и прорачуна јачине електричног поља на репрезентативном месту

Мерно место	Координате мерног места	Локација мерног места	$E_m$ [kV/m]	$E_p$ [kV/m]	$E_{p_{max}}$ [kV/m]
E <sub>1</sub>	$x = 20 \text{ m}$ $y = 1 \text{ m}$	У дворишту	0,444	0,451	0,539

На основу приказаних резултата мерења и прорачуна, закључује се да постоји усаглашеност с прописаном границом излагања, тј. да референтни гранични ниво не може бити прекорачен ни при најнеповољнијим условима са аспекта изложености људи.

С обзиром на чињеницу да је мерењем добијена вредност која прекорачује 10% вредности референтног нивоа, према захтевима Правилника [24] на анализираној локацији би било потребно спровођење периодичних испитивања једном у четири године.

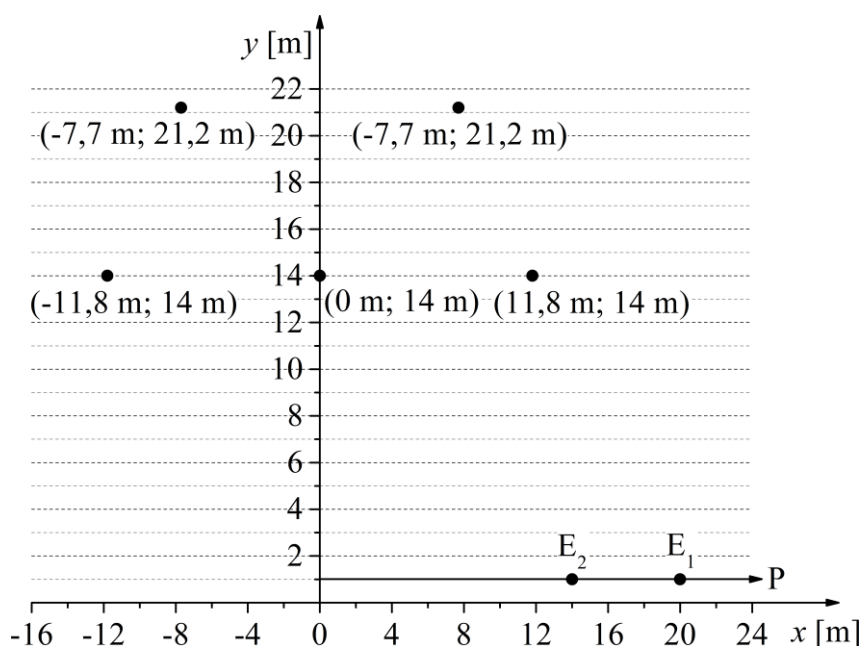
### 11.3.4. Пример 4

Извор електричног поља у разматраној зони повећане осетљивости представља надземни вод напонског нивоа 400 kV, чији су основни подаци дати у табели 11.9.

**Табела 11.9.** Подаци о надземном воду и распону на којем се врше испитивања

Напонски ниво	Фазни проводници	Типови стубова
400 kV	$3 \times 2 \times \text{Al}/\check{\text{C}}\text{e} 490/65$ ( $r_f = 15,3 \text{ mm}$ , $I_{kdz} = 2740 \text{ A}$ )	I: портал (носећи) II: портал (носећи)

Највећа вредност јачине електричног поља измерена је на мерном месту E<sub>1</sub>, које се налази на латералном правцу Р. Координате фазних и заштитних проводника у време мерења на месту латералног правца Р дате су на слици 11.15.



**Слика 11.15.** Координате проводника на месту латералног правца Р и положај мерног места

У табели 11.10. приказани су резултати мерења и прорачуна на мерном месту  $E_1$ , на којем је измерена највећа вредност јачине електричног поља. Мерно место се налази у дворишту, при чему је због дрвећа веома изражена екранизација електричног поља. Мерењем је добијена највећа вредност електричног поља од свега 0,164 kV/m, док је прорачуном за исто место добијена вредност од 3,17 kV/m. Због ефекта екранизације, локација места  $E_1$ , на којем је измерена највећа вредност електричног поља, померена је у односу на место на којем би теоријски требало да се нађе максимум. Теоријски максимум се налази на месту  $E_2$ , и на овом месту је прорачуном добијена вредност од 4 kV/m. С обзиром на чињеницу да су прорачуном за назначени напон и висине фазних проводника у време мерења добијене вредности електричног поља које прекорачују референтни гранични ниво, није неопходно израчунавање промене висине  $\Delta h_f$  на правцу Р, тј. одређивање минималне висине, као ни израчунавање  $E_{p_{max}}$ .

**Табела 11.10.** Резултати мерења и прорачуна јачине електричног поља на репрезентативном месту

Репрезентативно место	Координате мерног места	Локација мерног места	$E_m$ [kV/m]	$E_p$ [kV/m]	$E_{p_{max}}$ [kV/m]
$E_1$	$x = 20 \text{ m}$ $y = 1 \text{ m}$	У дворишту	0,164	3,17	/
$E_2$	$x = 14 \text{ m}$ $y = 1 \text{ m}$	У дворишту	/	4,00	/

На основу приказаних резултата мерења и прорачуна, закључује се да у тренутној ситуацији постоји усаглашеност с прописаном границом излагања, пошто референтни гранични ниво није прекорачен. Међутим, када на разматраној локацији не би било дрвећа које доводи до екранизације електричног поља, ситуација би се знатно променила и вредности електричног поља које би се добиле мерењем биле би далеко више и блиске теоријским вредностима. Због тога је у оваквој ситуацији неопходно спровођење периодичних испитивања.

Пошто је мерењем добијена вредност која не прекорачује 10% вредности референтног нивоа, према критеријуму из Правилника [24] на анализираној локацији не би било потребно спровођење периодичних испитивања.

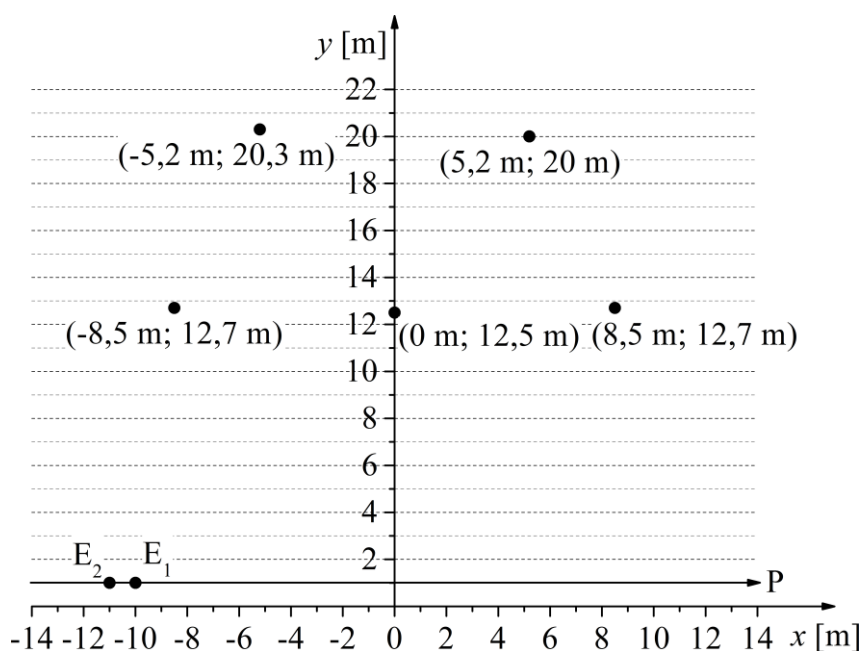
### 11.3.5. Пример 5

Извор електричног поља у разматраној зони повећане осетљивости представља надземни вод напонског нивоа 220 kV, чији су основни подаци дати у табели 11.11.

**Табела 11.11.** Подаци о надземном воду и распону на којем се врше испитивања

Напонски ниво	Фазни проводници	Типови стубова
220 kV	$3 \times \text{Al/}\check{\text{C}}\text{e } 490/65$ ( $r_f = 15,3 \text{ mm}$ , $I_{kdx} = 1370 \text{ A}$ )	I: портал (носећи) II: портал (затезни)

Највећа вредност јачине електричног поља измерена је на мерном месту  $E_1$ , које се налази на латералном правцу Р. Координате фазних и заштитних проводника у време мерења на месту латералног правца Р дате су на слици 11.16.



Слика 11.16. Координате проводника на месту латералног правца P и положај мерног места

У табели 11.12. приказани су резултати мерења и прорачуна на мерном месту  $E_1$ , на којем је измерена највећа вредност јачине електричног поља. Мерно место се налази у дворишту, у непосредној близини стамбеног и помоћног објекта, због чега је екранизација електричног поља веома изражена. Мерењем је добијена највећа вредност електричног поља од свега 0,285 kV/m, док је прорачуном за исто место добијена вредност од 1,70 kV/m. Због ефекта екранизације, локација места  $E_1$ , на којем је измерена највећа вредност електричног поља, померена је у односу на место на којем би теоријски требало да се највећи максимум. Теоријски максимум се налази на месту  $E_2$ , и на овом месту је прорачуном добијена вредност од 1,71 kV/m. Промена висине  $\Delta h_f$  на правцу P износи 0,7 m. Прорачуном за минималну висину и максимални радни напон од 240 kV, добијена је вредност од 2,05 kV/m на местима  $E_1$  и  $E_2$ . Иако је прорачуном добијена вредност која незнатно прекорачује референтни ниво од 2 kV/m, оправдано је закључити да ни у теоријски најнеповољнијем случају не би дошло до прекорачења референтног граничног нивоа, имајући у виду чињеницу да је због близине објеката екранизација електричног поља веома изражена и да потиче искључиво од перманентних објеката (стамбени и помоћни објекат).

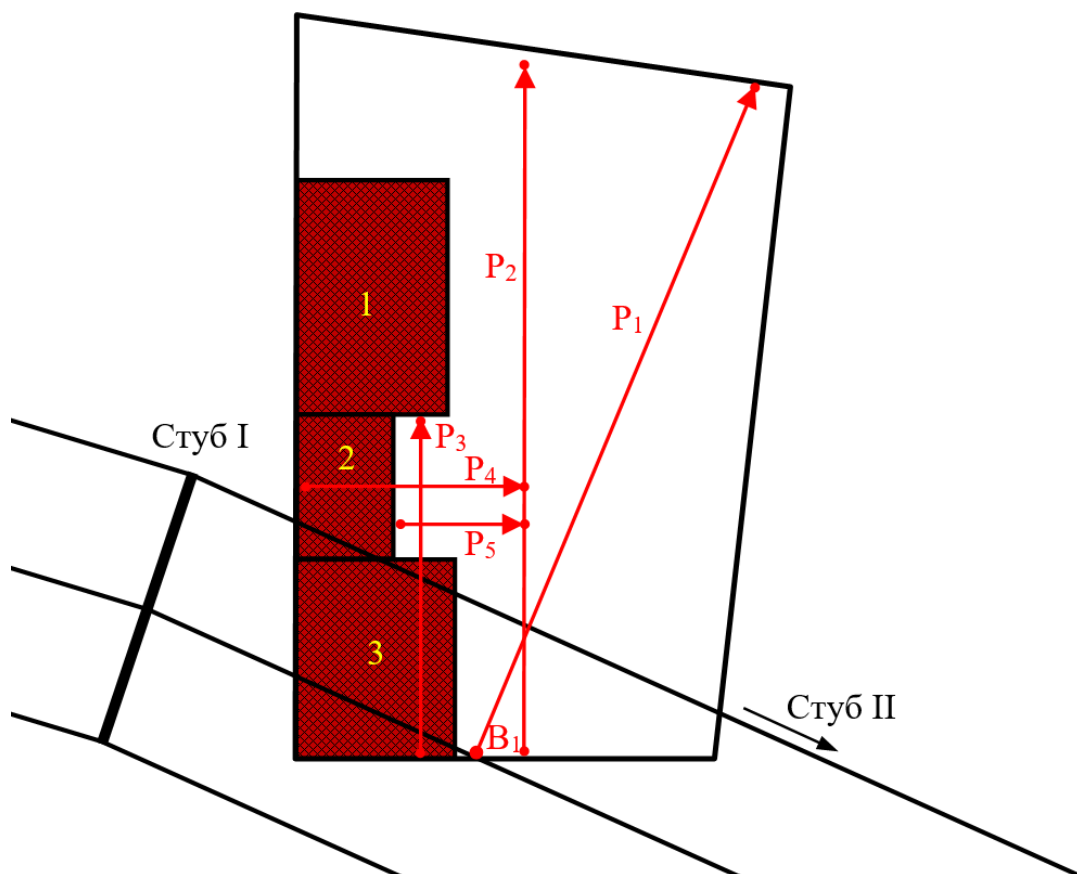
Табела 11.12. Резултати мерења и прорачуна јачине електричног поља на репрезентативном месту

Репрезентативно место	Координате мерног места	Локација мерног места	$E_m$ [kV/m]	$E_p$ [kV/m]	$E_{pmax}$ [kV/m]
$E_1$	$x = -10$ m $y = 1$ m	У дворишту	0,285	1,70	2,05
$E_2$	$x = -11$ m $y = 1$ m	У дворишту	/	1,71	2,05

## 11.4. Испитивања магнетске индукције мерењем и прорачуном

### 11.4.1. Пример 1

Испитивање је спроведено у зони повећане осетљивости која је разматрана у поглављу 11.3.1. Мерења магнетске индукције спроведена су дуж латералног правца  $P_1$ , као и дуж правца  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  и  $P_5$ . Позиције мерних правца и мерног места  $B_1$ , на којем је измерена највећа вредност магнетске индукције, приказани су на слици 11.17.

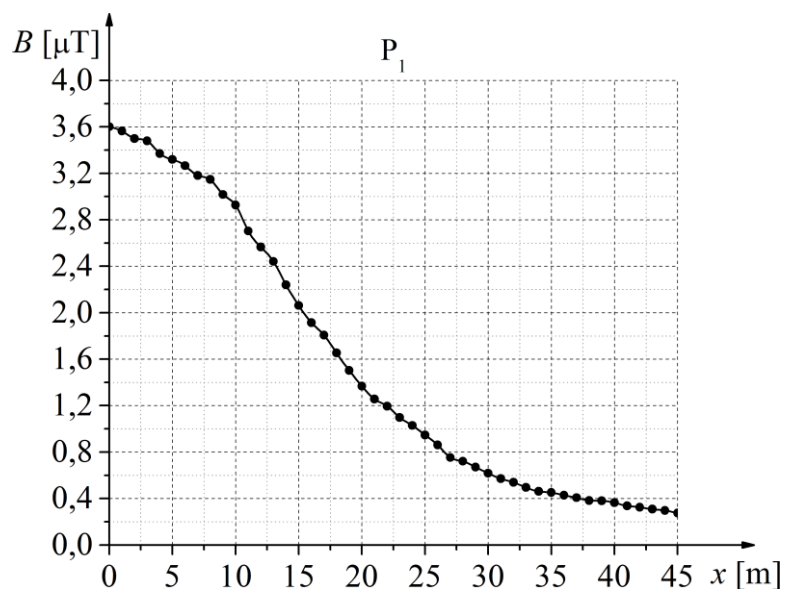


Слика 11.17. Распоред мерних места

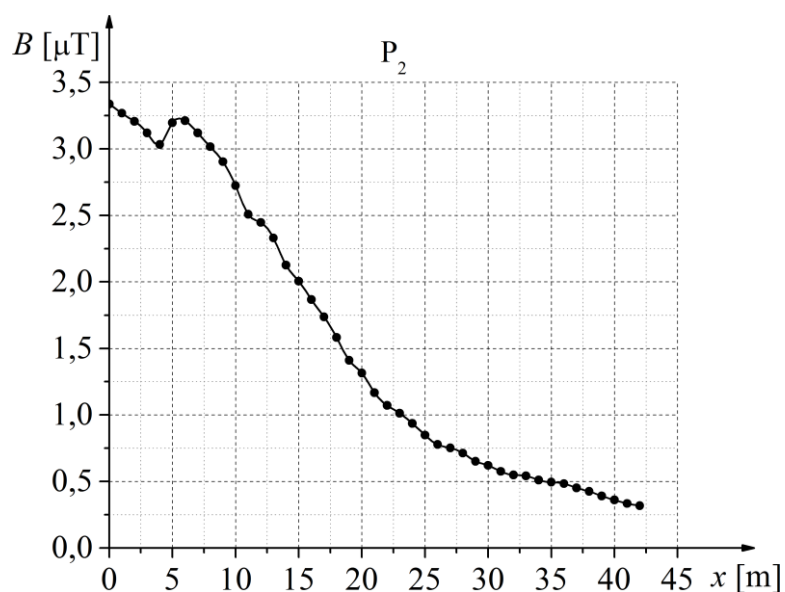
Извор магнетског поља у разматраној зони повећане осетљивости представља надземни вод напонског нивоа 220 kV, чији су основни подаци дати у табели 11.1.

Резултати мерења магнетске индукције дуж правца  $P_1$ – $P_5$  дати су на сликама 11.18–11.22.

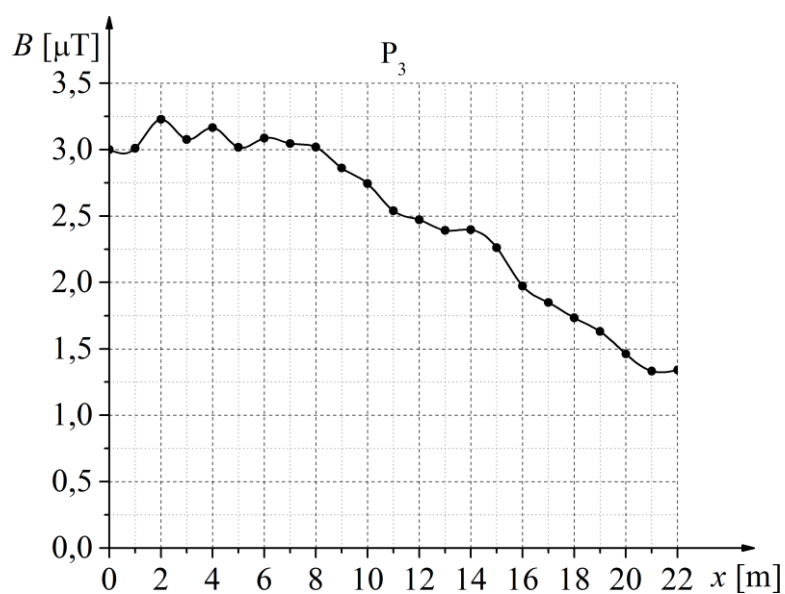
Највећа вредност магнетске индукције од  $3,60 \mu\text{T}$  измерена је у оси вода, на мерном правцу  $P_1$ . У тренутку овог мерења струја оптерећења вода је износила 180 А, при чему је у тренутку мерења био расположив податак о струји у само једној фази. Прорачуном у овој тачки добијена је вредност од  $3,59 \mu\text{T}$ , при чему је прорачун спроведен под претпоставком да све три фазне струје износе 180 А. На слици 11.23. дат је упоредни приказ резултата мерења и прорачуна магнетске индукције дуж правца  $P_1$ . На основу приказаних резултата може се закључити да постоји слагање добијених резултата мерења и прорачуна. Такође се може закључити да је оправдана претпоставка да струје у преостале две фазе такође износе 180 А, као и да се струја није значајно мењала током периода мерења магнетске индукције дуж правца  $P_1$ .



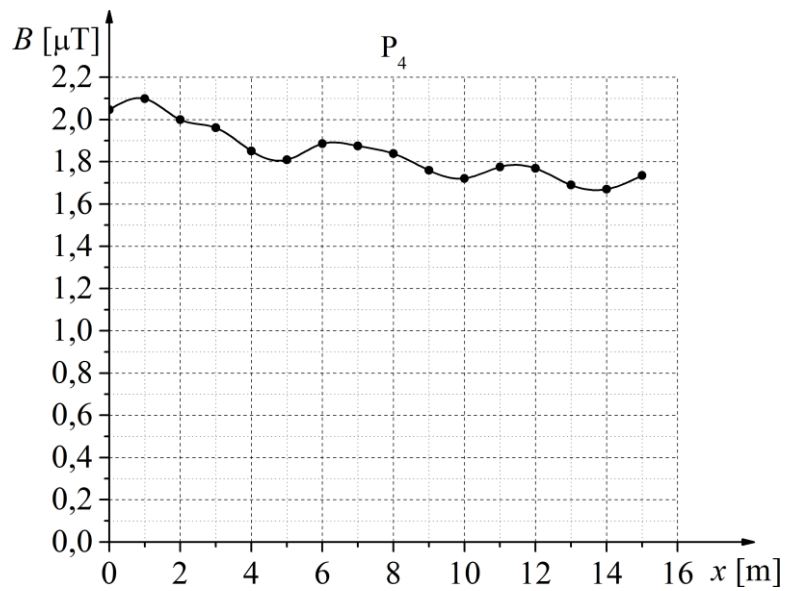
Слика 11.18. Резултати мерења магнетске индукције дуж правца P<sub>1</sub>



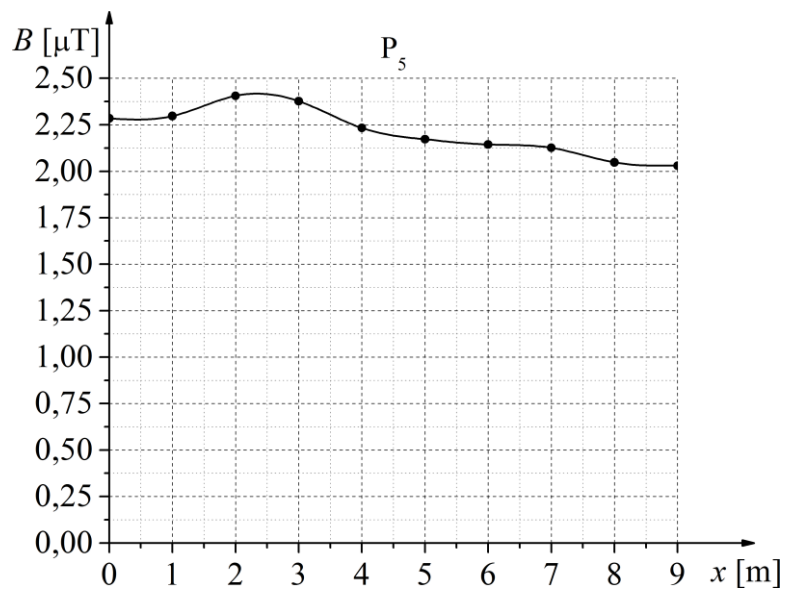
Слика 11.19. Резултати мерења магнетске индукције дуж правца P<sub>2</sub>



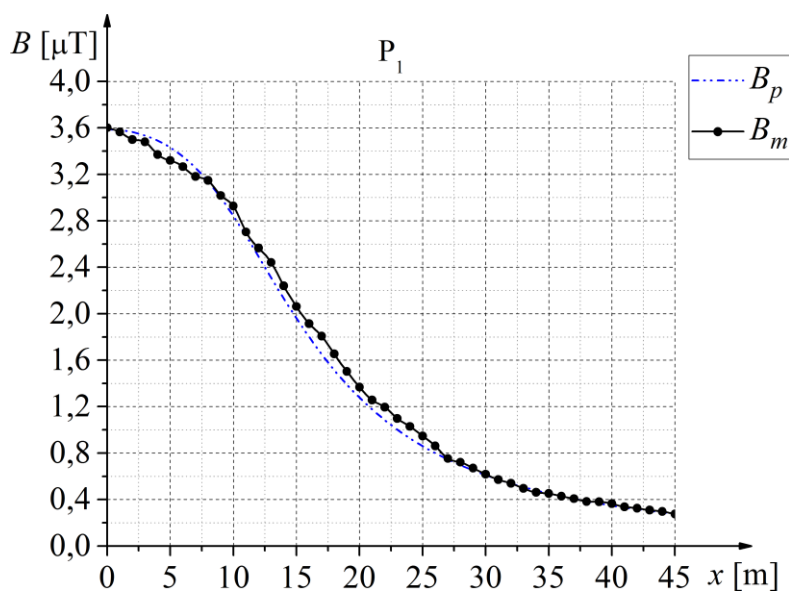
Слика 11.20. Резултати мерења магнетске индукције дуж правца P<sub>3</sub>



Слика 11.21. Резултати мерења магнетске индукције дуж правца P<sub>4</sub>

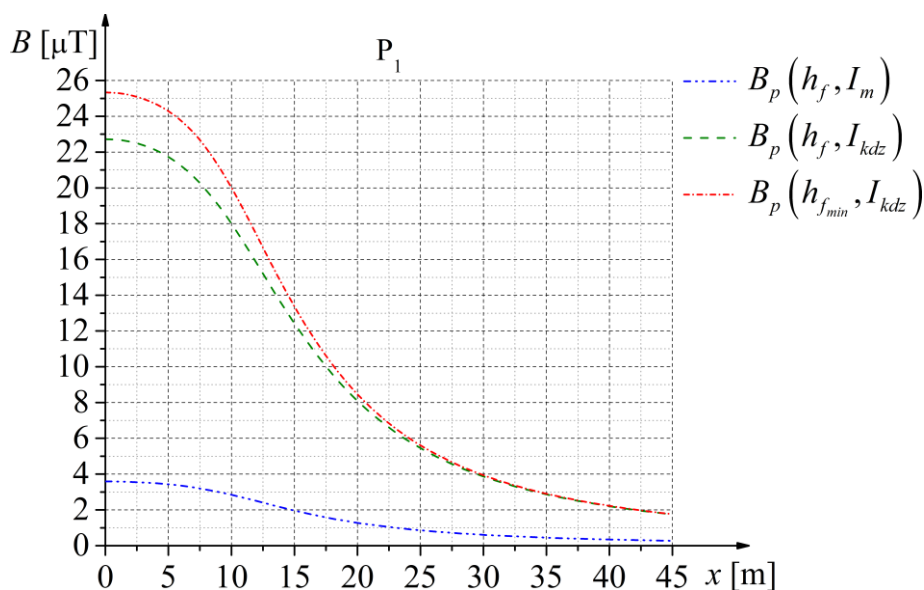


Слика 11.22. Резултати мерења магнетске индукције дуж правца P<sub>5</sub>



Слика 11.23. Упоредни приказ резултата мерења и прорачуна магнетске индукције дуж правца P<sub>1</sub>

На слици 11.24. дат је упоредни приказ резултата прорачуна магнетске индукције  $B_p(h_f, I_m)$ ,  $B_p(h_f, I_{kdz})$  и  $B_p(h_{f_{min}}, I_{kdz})$  дуж правца  $P_1$ .



Слика 11.24. Упоредни приказ резултата прорачуна магнетске индукције  $B_p(h_f, I_m)$ ,  $B_p(h_f, I_{kdz})$  и  $B_p(h_{f_{min}}, I_{kdz})$  дуж правца  $P_1$

У табели 11.13. дат је упоредни приказ резултата мерења и прорачуна на мерном месту које је на слици 11.17. означено са  $B_1$ , а на којем је измерена највећа вредност магнетске индукције, при чему је  $B_p = B_p(h_f, I_m)$ ,  $B'_p = B_p(h_f, I_{kdz})$  и  $B_{p_{max}} = B_p(h_{f_{min}}, I_{kdz})$ .

Табела 11.13. Резултати мерења и прорачуна магнетске индукције на репрезентативном месту

Мерно место	Координате мерног места	Локација мерног места	$I_m$ [A]	$B_m$ [ $\mu T$ ]	$B_p$ [ $\mu T$ ]	$B'_p$ [ $\mu T$ ]	$B_{p_{max}}$ [ $\mu T$ ]
$B_1$	$x = 0$ m $y = 1$ m	У дворишту, у оси вода	180	3,60 (180 A)	3,59 (180 A)	22,72 (1140 A)	25,33 (1140 A)

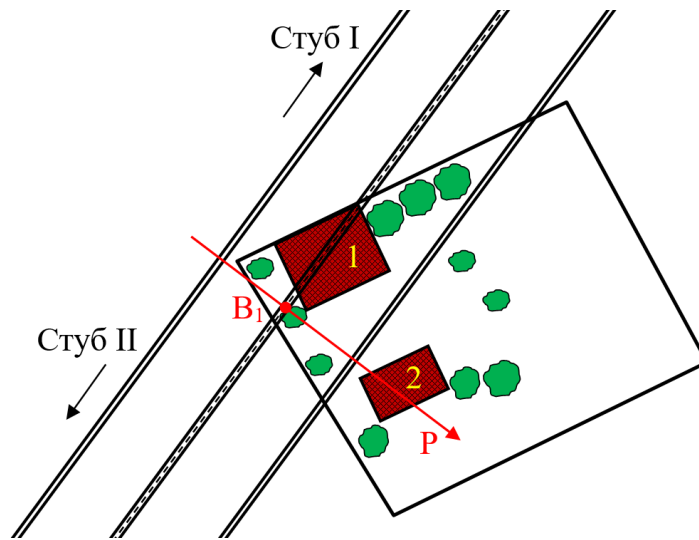
Пошто је мерењем добијена вредност која не прекорачује 10% вредности референтног нивоа, према критеријуму из Правилника [24] на анализираној локацији не би било потребно спровођење периодичних испитивања. Међутим, приликом ранијег мерења у разматраној зони повећане осетљивости измерена је вредност магнетске индукције од 5,18  $\mu T$  при струји оптерећења вода од 273 A, па би закључак на основу првог мерења био да је потребно периодично испитивање. Из приказане анализе следи да закључак о потреби спровођења периодичних испитивања према критеријуму из Правилника [24] директно зависи од тренутка мерења, тј. од тренутног оптерећења вода.

На основу резултата прорачуна може се закључити да вредност магнетске индукције неће прекорачити референтни ниво од 40  $\mu T$  ни у најнеповољнијем случају, који подразумева минималне висине фазних проводника и оптерећење вода краткотрајно дозвољеном струјом.



### 11.4.2. Пример 2

Испитивање је спроведено у зони повећане осетљивости која је приказана на слици 11.25. На овој слици је ознаком 1 обележен стамбени објекат, а ознаком 2 помоћни објекат.



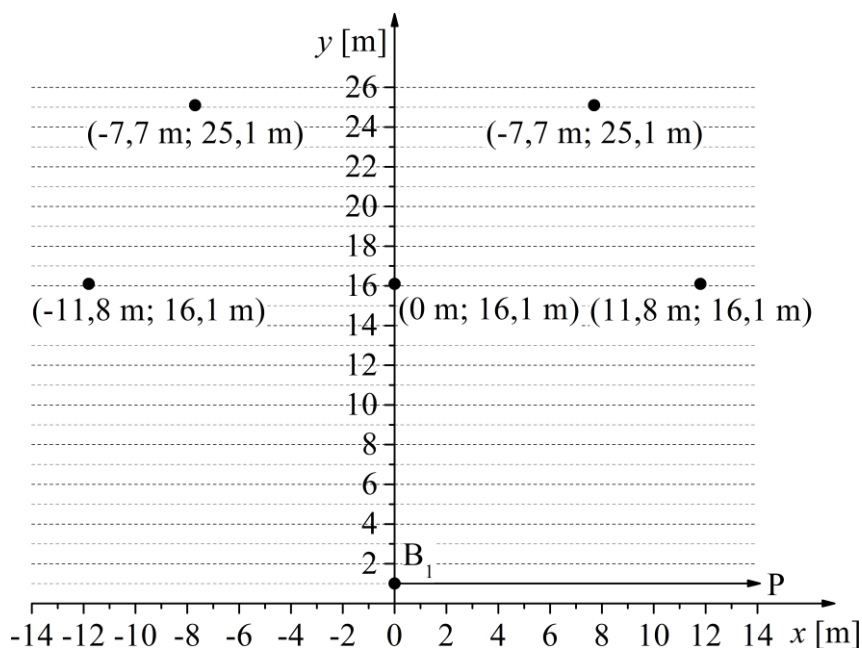
Слика 11.25. Положај мерног места

Извор магнетског поља у разматраној зони повећане осетљивости јесте надземни вод напонског нивоа 400 kV, чији су основни подаци претходно дати у табели 11.4.

Највећа вредност магнетске индукције измерена је у оси вода на мерном месту  $B_1$ , које се налази на латералном правцу  $P$ . Подаци о висинама фазних проводника на месту латералног правца  $P$  дати су у табели 11.14. Координате фазних и заштитних проводника у време мерења на месту латералног правца  $P$  дате су на слици 11.26.

Табела 11.14. Подаци о висинама фазних проводника на месту латералног правца  $P$

$h_f$ [m]	$\Delta h_f$ [m]	$h_f - \Delta h_f$ [m]
16,1; 16,1; 16,1	2	14,1; 14,1; 14,1



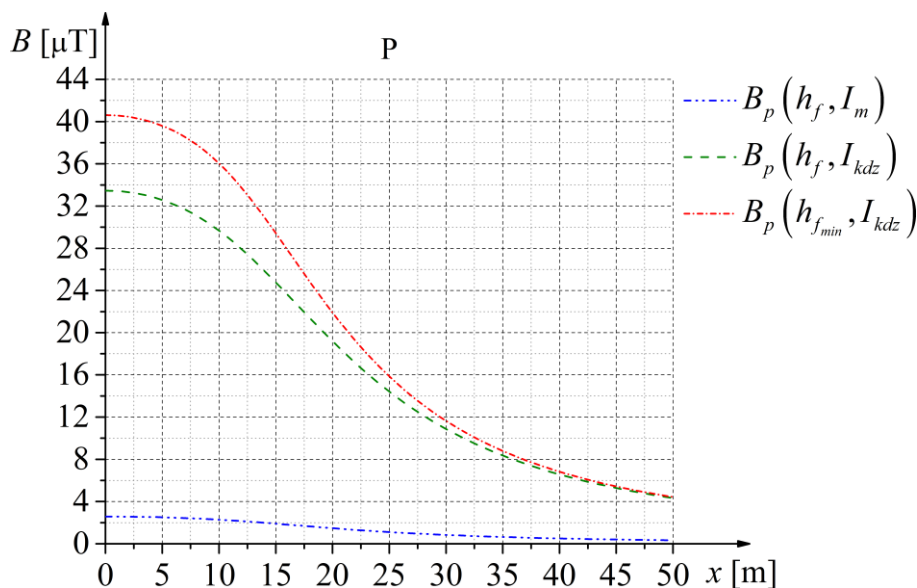
Слика 11.26. Координате проводника на месту латералног правца  $P$  и положај мерног места

У табели 11.15. приказани су резултати мерења и прорачуна на мерном месту В<sub>1</sub>, на којем је измерена највећа вредност магнетске индукције. Струја је у тренутку мерења магнетске индукције износила 211 А, при чему је био расположив податак о струји у само једној фази. Мерењем у тачки В<sub>1</sub> добијена је вредност од 2,61 μТ, док је прорачуном добијено 2,58 μТ, при чему је приликом прорачуна претпостављено да струје у све три фазе износе 211 А. На основу приказаних резултата може се закључити да постоји подударње добијених резултата мерења и прорачуна, чиме је обезбеђена валидност резултата мерења и прорачуна магнетске индукције, као и резултата мерења висине проводника. Такође се закључује да је оправдана претпоставка да и у преостале две фазе струја износи 211 А.

**Табела 11.15.** Резултати мерења и прорачуна магнетске индукције на репрезентативном месту

Мерно место	Координате мерног места	Локација мерног места	$I_m$ [А]	$B_m$ [μТ]	$B_p$ [μТ]	$B'_p$ [μТ]	$B_{p_{max}}$ [μТ]
В <sub>1</sub>	$x = 0$ m $y = 1$ m	У дворишту, поред стамбеног објекта	211	2,61 (211 А)	2,58 (211 А)	33,46 (2740 А)	40,61 (2740 А)

На слици 11.27. дат је упоредни приказ резултата прорачуна магнетске индукције  $B_p(h_f, I_m)$ ,  $B_p(h_f, I_{kdz})$  и  $B_p(h_{f_{min}}, I_{kdz})$  дуж правца Р.



**Слика 11.27.** Упоредни приказ резултата прорачуна магнетске индукције  $B_p(h_f, I_m)$ ,  $B_p(h_f, I_{kdz})$  и  $B_p(h_{f_{min}}, I_{kdz})$  дуж правца Р

Прорачуном за оптерећење вода краткотрајно дозвољеном струјом у зимском периоду од 2740 А и минималне висине фазних проводника, добијена је вредност магнетске индукције од 40,61 μТ. Иако добијена вредност прекорачује референтни гранични ниво, значајно је нагласити да је овако добијени резултат у великој мери на страни сигурности, пошто се наведени услови у пракси изузетно ретко јављају. Због тога би детаљнија анализа вредности магнетске индукције захтевала познавање реалних вредности струја на датом надземном воду у дужем временском периоду. На основу овакве анализе требало би донети закључак о даљим активностима, тј. о спровођењу даљих испитивања или примени мера заштите.

Такође је значајно напоменути да је измерена вредност магнетске индукције од  $2,61 \mu\text{T}$  нижа од 10% референтног нивоа прописаног Правилником [23]. На основу директне примене критеријума дефинисаног Правилником [24] следи закључак да са аспекта магнетске индукције није потребно периодично испитивање, што је у супротности с претходно датим закључцима. Приликом ранијег мерења у разматраној зони повећане осетљивости измерена је вредност магнетске индукције од  $4,29 \mu\text{T}$  при струји оптерећења вода од 340 А. Закључак према критеријуму из поменутог правилника на основу првог мерења био би да је потребно периодично испитивање. Као и у претходном примеру, закључак о потреби спровођења периодичних испитивања према Правилнику [24] зависи од тренутка мерења, тј. од тренутног оптерећења вода.

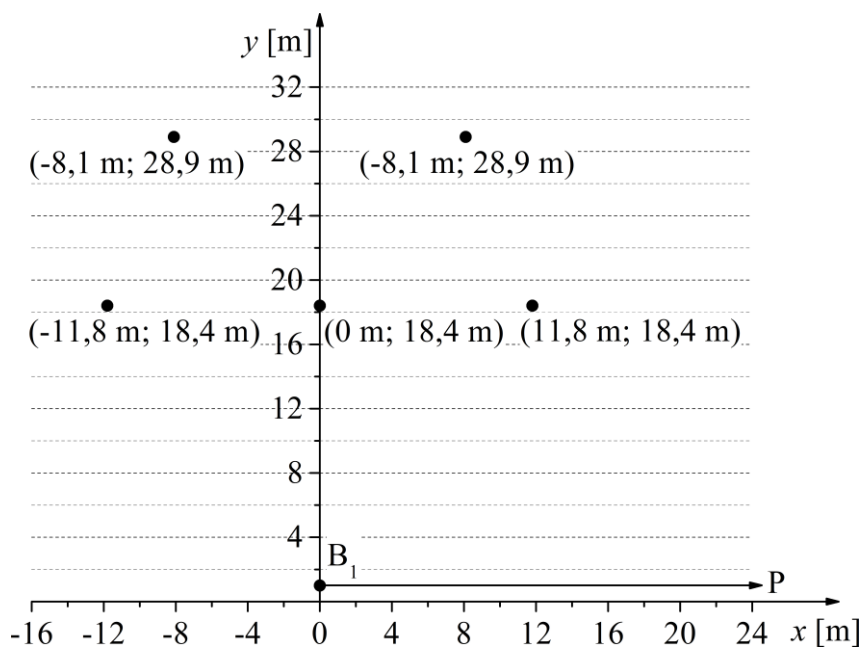
### 11.4.3. Пример 3

Извор магнетског поља у разматраној зони повећане осетљивости јесте надземни вод напонског нивоа 400 kV, чији су основни подаци дати у табели 11.16.

**Табела 11.16.** Подаци о надземном воду и распону на којем се врше испитивања

Напонски ниво	Фазни проводници	Типови стубова
400 kV	$3 \times 2 \times \text{Al}/\check{\text{C}}\text{e } 490/65$ ( $r_f = 15,3 \text{ mm}$ , $I_{kdz} = 2740 \text{ A}$ )	I: портал (носећи) II: портал (носећи)

Највећа вредност магнетске индукције измерена је у оси вода на мерном месту  $B_1$ , које се налази на латералном правцу Р. Координате фазних и заштитних проводника у време мерења на месту латералног правца Р дате су на слици 11.28. Промена висине  $\Delta h_f$  на правцу Р износи 1,2 m.



**Слика 11.28.** Координате проводника на месту латералног правца Р и положај мерног места

У табели 11.17. приказани су резултати мерења и прорачуна на мерном месту  $B_1$ , на којем је измерена највећа вредност магнетске индукције. Струја је у тренутку мерења магнетске индукције износила 250 А, при чему је био расположив податак о струји у само једној фази. Мерењем у тачки  $B_1$  добијена је вредност од  $2,47 \mu\text{T}$ , док је прорачуном

добијено 2,48  $\mu\text{T}$ , при чему је приликом прорачуна претпостављено да струје у све три фазе износе 250 А. На основу приказаних резултата закључује се да постоји слагање добијених резултата мерења и прорачуна, чиме је обезбеђена валидност резултата мерења и прорачуна магнетске индукције, као и резултата мерења висине проводника. Такође се закључује да је оправдана претпоставка да и у преостале две фазе струја износи 250 А.

**Табела 11.17.** Резултати мерења и прорачуна магнетске индукције на репрезентативном месту

Мерно место	Координате мерног места	Локација мерног места	$I_m$ [А]	$B_m$ [ $\mu\text{T}$ ]	$B_p$ [ $\mu\text{T}$ ]	$B'_p$ [ $\mu\text{T}$ ]	$B_{p_{max}}$ [ $\mu\text{T}$ ]
B <sub>1</sub>	$x = 0 \text{ m}$ $y = 1 \text{ m}$	У дворишту	250	2,47 (250 А)	2,48 (250 А)	27,21 (2740 А)	30,25 (2740 А)

На основу приказаних резултата мерења и прорачуна може се закључити да ни у најнеповољнијем случају вредности магнетске индукције не могу да прекораче прописану границу излагања. Прорачуном је добијена вредност  $B_{p_{max}}$ , која износи 30,25  $\mu\text{T}$ . Уколико се уважи да несигурност мерења висина фазних проводника износи  $\pm 20 \text{ cm}$ , добија се опсег вредности  $B_{p_{max}}$  од 29,7  $\mu\text{T}$  до 30,8  $\mu\text{T}$ . У оваквим случајевима када је вредност  $B_{p_{max}}$  блиска вредности референтног граничног нивоа, обезбеђење валидности, као и смањење проширене несигурности веома су значајни ради доношења поузданог закључка о усаглашености са референтним нивоом.

## 12. Закључак

Анализа изложености људи електромагнетском пољу веома је актуелна тема, која је предмет интензивног истраживања. Као резултат наведених истраживања усвојене су међународне препоруке и стандарди, а у великом броју земаља донета је и национална законска регулатива, којом се, између осталог, утврђују и дозвољене границе излагања становништва електромагнетском пољу. Из наведеног разлога је развој метода за оцену изложености људи и проверу усаглашености нивоа електромагнетских поља које емитују поједини извори од изузетног значаја.

У дисертацији је развијена методологија за оцену изложености људи електричном и магнетском пољу у околини надземних електроенергетских водова, која се заснива на резултатима добијеним мерењем и прорачуном, као и коришћењем предности оба приступа, ради доношења поузданог и коначног закључка о усаглашености нивоа поља с прописаним границама излагања. За успешну примену развијене методологије неопходно је израчунавање проширене несигурности мерења и прорачуна. Због тога је спроведена детаљна анализа компонената несигурности и квантификација оних компонената које најзначајније доприносе проширеној несигурности. Приказан је начин одређивања несигурности које потичу од система за мерење јачине електричног поља и магнетске индукције и дат је допринос одређивању компоненте несигурности мерења електричног поља која потиче од присуства испитивача. Развијена је метода за израчунавање компонената мерне несигурности које потичу од грешке позиционирања мерне сонде дуж све три просторне координате. Такође су развијене методе за израчунавање компонената несигурности прорачуна које потичу од грешке мерења висине фазних и заштитних проводника и растојања између њих, грешке мерења напона и струја, као и грешке услед занемарења стварног облика проводника надземног вода, при чему су разматрана и одступања услед примене различитих модела и метода прорачуна. Како би се олакшао и убрзао поступак израчунавања проширене несигурности у пракси, наведене компоненте несигурности су израчунате за типичне конфигурације једносистемских надземних водова напонских нивоа 110 kV, 220 kV и 400 kV, и то за различите висине фазних проводника. С обзиром на чињеницу да код двосистемских надземних водова вредности електричног и магнетског поља зависе и од редоследа фаза, израчунавање наведених компонената несигурности и за двосистемске водове превазилази обим дисертације, али се може спровести на основу приказане методологије и биће предмет даљих истраживања. Пошто је за примену развијене методологије у пракси погодно да проширене несигурности мерења и прорачуна буду што мање, дате су и препоруке за смањење одређених компонената несигурности на које је могуће утицати.

Развијена методологија се може применити на дистрибутивне и преносне, једносистемске и вишесистемске водове различитих напонских нивоа, геометрија и других релевантних карактеристика. Применом развијене методологије, која се заснива на истовременом коришћењу резултата мерења и прорачуна, превазилазе се ограничења која би се јавила када би се за оцену изложености људи користили само резултати мерења или резултати прорачуна. Мерењем електричног и магнетског поља на терену добијају се резултати који су од суштинског значаја за оцену изложености људи, јер овако добијене вредности поља уважавају све услове који на терену реално постоје, као што је стварно оптерећење вода, присуство објеката, нераван терен и сл. Моделовање објеката који у реалности постоје у зонама повећане осетљивости, као што су куће, помоћни објекти, дрвеће, ограде и слично, као и моделовање терена који у реалности често одступа од равне површине, веома је захтевно и повезано с низом несигурности, при чему се такође поставља и питање оправданости оваквог приступа, имајући у виду велики број зона повећане осетљивости у околини надземних водова у којима је потребно спровести оцену изложености људи. Сви наведени утицајни фактори који доводе до пертурбације електричног поља и одступања од теоријских вредности, у описаној методологији уважени су мерењем. Из

наведених разлога су резултати добијени мерењем веома значајни, нарочито када је у питању електрично поље. Међутим, за давање коначног закључка о усаглашености нивоа поља са прописаним границама излагања неопходно је разматрати и случај који је најнеповољнији са аспекта изложености људи, тј. случај када су вредности поља највише. Због тога се спроводе прорачуни којима се моделује случај када су висине фазних проводника изнад тла на анализираној локацији најмање и када су вредности радних напона и струја оптерећења највише. Истовременом анализом резултата мерења и прорачуна, у већини случајева долази се до коначног закључка о усаглашености с прописаним границама излагања. У погледу магнетске индукције примењена методологија увек даје закључак који је коначан, тј. у свим случајевима се може са сигурношћу закључити да ли референтни гранични ниво може бити прекорачен или не може. У погледу јачине електричног поља примењена методологија у већини случајева даје закључак који је коначан, тј. закључак да ли референтни гранични ниво може бити прекорачен или не може. У случају када је измерена вредност електричног поља нижа од референтног граничног нивоа, а вредност добијена прорачуном прекорачује референтни ниво, по правилу би требало спроводити периодична испитивања. У изузетним случајевима када је промена висина фазних проводника на датом месту таква да не изазива велике промене јачине електричног поља, као и када постоји изражена екранизација електричног поља која потиче искључиво од перманентних објеката, може се дати коначан закључак о усаглашености с референтним граничним нивоом чак и ако је прорачуном добијена вредност која незнатно прекорачује референтни ниво. Под доношењем коначног закључка подразумева се закључак који се односи искључиво на техничке карактеристике вода и конфигурацију зоне повећане осетљивости у време испитивања. Реконструкција надземног вода, замена фазних проводника проводницима другог типа, као и додатно спуштање проводника испод израчунатих минималних висина захтева поновну процену изложености. Такође, промена конфигурације зоне повећане осетљивости која подразумева повећање спратности објеката, градњу нових или уклањање постојећих објеката, захтева поновну процену изложености. Пошто се овакве промене не могу унапред предвидети, постоје случајеви у којима је оправдано спровођење периодичних испитивања. Применом развијене методологије смањује се број зона повећане осетљивости у којима је потребно спровођење периодичних испитивања у односу на број зона повећане осетљивости у којима би се спроводила периодична испитивања према критеријумима из важећих националних правилника. У изузетним случајевима захтевало би се спровођење периодичних испитивања у одређеним зонама повећане осетљивости у којима се периодична испитивања не би спроводила према критеријумима из важећих националних правилника. У том смислу, дисертација има и практичан значај и може да послужи за додатно унапређење националне регулативе из области заштите становништва од електромагнетских поља.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP): “ICNIRP guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)”, Health Physics, Vol. 74, No. 4, pp. 494–522, 1998.
- [2] 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)”, Official Journal of the European Communities, 30 July 1999.
- [3] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP): “ICNIRP guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz – 100 kHz)”, Health Physics, Vol. 99, No. 6, pp. 818–836, 2010.
- [4] Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (18<sup>th</sup> individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC), Official Journal of the European Union, 24 May 2004.
- [5] Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (20<sup>th</sup> individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC) and repealing Directive 2004/40/EC, Official Journal of the European Union, 29 June 2013.
- [6] Rianne Stam: “Comparison of international policies on electromagnetic fields (power frequency and radiofrequency fields)”, January 2018, National Institute for Public Health and the Environment, Ministry of Health, Welfare and Sport, the Netherlands.
- [7] SRPS EN 50413:2010 „Основни стандард за процедуре мерења и израчунавања излагања људи електричним, магнетским и електромагнетским пољима (од 0 Hz до 300 GHz)” и измена SRPS EN 50413:2010/A1:2014.
- [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 IEC 62311:2020 „Оцењивање електронских и електричних уређаја у односу на ограничења изложености људи електромагнетским пољима (од 0 Hz до 300 GHz)”.
- [10] 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”.
- [11] 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”.
- [12] 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.
- [13] SRPS EN 50499:2010 „Процедура за оцењивање излагања радника електромагнетским пољима”.
- [14] SRPS EN 50499:2020 „Процедура за оцењивање изложености радника електромагнетским пољима”.

- [15] IEEE 644:1994 "IEEE standard procedures for measurement of power frequency electric and magnetic fields from AC power lines".
- [16] IEEE C95.3.1 "IEEE recommended practice for measurements and computations of electric, magnetic, and electromagnetic fields with respect to human exposure to such fields, 0 Hz to 100 kHz".
- [17] IEEE Std 1460-1996 "IEEE guide for the measurement of quasi-static magnetic and electric fields".
- [18] IEEE Std 1308-1994 "IEEE recommended practice for instrumentation: Specifications for magnetic flux density and electric field strength meters – 10 Hz to 3 kHz".
- [19] CIGRE Working Group C4.205 "Characterisation of ELF magnetic fields", April 2007.
- [20] CIGRE Working Group C4.203 "Technical guide for measurement of low frequency electric and magnetic fields near overhead power lines", April 2009.
- [21] CIGRE Working Group C3.19 "Responsible management of electric and magnetic fields", June 2020.
- [22] Закон о заштити од нејонизујућих зрачења, „Службени гласник Републике Србије”, број 36/09, од 15. 5. 2009.
- [23] Правилник о границама излагања нејонизујућим зрачењима, „Службени гласник Републике Србије”, број 104/09, од 16. 12. 2009.
- [24] Правилник о изворима нејонизујућих зрачења од посебног интереса, врстама извора, начину и периоду њиховог испитивања, „Службени гласник Републике Србије”, број 104/09, од 16. 12. 2009.
- [25] Правилник о садржини евиденције о изворима нејонизујућих зрачења од посебног интереса, „Службени гласник Републике Србије”, број 104/09, од 16. 12. 2009.
- [26] 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”, број 104/09 од 16. 12. 2009.
- [27] 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”, број 104/09, од 16. 12. 2009.
- [28] Правилник о садржини и изгледу обрасца извештаја о систематском испитивању нивоа нејонизујућих зрачења у животној средини, „Службени гласник Републике Србије”, број 104/09, од 16. 12. 2009.
- [29] Правилник о превентивним мерама за безбедан и здрав рад при излагању електромагнетском пољу, „Службени гласник Републике Србије”, број 117/12, од 12. 12. 2012.
- [30] Правилник о превентивним мерама за безбедан и здрав рад при излагању електромагнетском пољу, „Службени гласник Републике Србије”, број 111/15, од 29. 12. 2015.
- [31] Студија Електротехничког института „Никола Тесла” број 3409272: „Утицај електричног и магнетског поља индустријске учестаности објеката ЈП ЕПС на животну средину”, 2009. година, наручилац: ЈП „Електропривреда Србије”.
- [32] Студија Електротехничког института „Никола Тесла” број 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.



- [33] Студија Електротехничког института „Никола Тесла” број 311202: „Мере за ограничење и заштиту од електромагнетских поља индустријске учестаности”, 2011. година, наручилац: ЈП „Електропривреда Србије”.
- [34] “Management of protection from non-ionizing radiation in EMS”, 2011. година, наручилац: МВН, Белгија, крајњи корисник: ЈП „Електро mreжа Србије”.
- [35] Студија Електротехничког института „Никола Тесла” број 311206: „Студија значаја постојећих извора нејонизујућих зрачења од посебног интереса у Јавном предузећу Електропривреда Србије”, 2011–2012. година, наручилац: ЈП „Електропривреда Србије”.
- [36] Студија Електротехничког института „Никола Тесла” број 3413040: „Студија значаја постојећих (затечених) извора нејонизујућих зрачења у Јавном предузећу Електро mreжа Србије”, 2012–2013. година, наручилац: ЈП „Електро mreжа Србије”.
- [37] Студија Електротехничког института „Никола Тесла” број 3414017: „Мере за ограничење електричних и магнетских поља”, 2013–2014. година, наручилац: ЈП „Електро mreжа Србије”.
- [38] Студија Електротехничког института „Никола Тесла” број 318037: „Елаборат утицаја електромагнетског поља на монтере приликом рада у близини напона на двоструким далеководима напонског нивоа 110–400 kV”, 2016–2018. година, наручилац: АД „Електро mreжа Србије”.
- [39] Студија Електротехничког института „Никола Тесла” број 318038: „Анализа резултата испитивања нејонизујућег зрачења у близини далековода напонских нивоа 110 kV, 220 kV и 400 kV”, 2018–2019. година, наручилац: АД „Електро mreжа Србије”.
- [40] Студија Електротехничког института „Никола Тесла” број 319010: „Анализа изложености запослених нејонизујућим зрачењима у Лимским хидроелектранама и предлог мера заштите”, 2018–2019. година, наручилац: ЈП „Електропривреда Србије”, огранак „Дринско-Лимске хидроелектране”, организациона целина „Лимске хидроелектране”, Нова Варош.
- [41] Студија Електротехничког института „Никола Тесла” број 319642: „Изложеност запослених електромагнетском пољу током извођења радова на електроенергетским објектима”, 2019–2020. година, наручилац: ЈП „Електропривреда Србије”.
- [42] Electric Power Research Institute (EPRI), “Electric and magnetic fields”, in EPRI AC Transmission Line Reference Book – 200 kV and Above, Third Edition, Palo Alto, CA, USA, EPRI, 2005, pp. 7.1–7.118.
- [43] Маја Грбић: „Мерење и прорачун електричних и магнетских поља надземних водова у циљу процене изложености људи овим пољима”, мастер рад, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду, 2012. година.
- [44] Јован Сурутка: „Електромагнетика”, Београд, 2006. година.
- [45] Бранко Поповић: „Електромагнетика”, Београд, 1989. година.
- [46] Антоније Ђорђевић: „Основи електротехнике 1. део – Електростатика”, Београд, 2006. година.
- [47] Антоније Ђорђевић: „Електромагнетика”, Београд, 2008. година.
- [48] Dragan Poljak: „Izloženost ljudi neionizacijskom zračenju”, Zagreb, 2006. godina.
- [49] K. Hameyer, R. Meltens, R. Belmans: “Numerical methods to evaluate the electromagnetic fields below overhead transmission lines and their measurement”, Proceedings of First

International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems, Caracas, Venezuela, 1995, pp. 32–36, DOI: 10.1109/ICDCS.1995.499113.

- [50] J. C. Salari, A. Mpalantinos, J. I. Silva: “Comparative analysis of 2- and 3-D methods for computing electric and magnetic fields generated by overhead transmission lines”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 24, Iss.1, pp. 338–344, 2009, DOI: 10.1109/TPWRD.2008.923409.
- [51] S. Vujević, D. Lovrić, P. Sarajčev: “Comparison of 2D algorithms for the computation of power line electric and magnetic fields”, *European Transactions on Electrical Power*, Vol. 21, Iss. 1, pp. 505–521, 2011, DOI: 10.1002/etep.457.
- [52] C. P. Nicolaou, A. P. Papadakis, P. A. Razis, G. A. Kyriacou, J. N. Sahalos: “Measurements and predictions of electric and magnetic fields from power lines”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 81, Iss. 5, pp. 1107–1116, 2011, DOI: 10.1016/j.epsr.2010.12.014.
- [53] P. C. Thum, A. C. Liew, C. M. Wong: “Electrostatic field computation by an integral equation method”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 5, Iss. 4, pp. 259–275, 1982, DOI: 10.1016/0378-7796(82)90021-9.
- [54] A. E. Tzinevrakis, D. K. Tsanakas, E. I. Mimos: “Analytical calculation of the electric field produced by single-circuit power lines”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 23, Iss. 3, pp. 1495–1505, 2008, DOI: 10.1109/TPWRD.2008.916748.
- [55] A. Z. El Dein, M. A. A. Wahab, M. M. Hamada, T. H. Emmary: “The effects of the span configurations and conductor sag on the electric-field distribution under overhead transmission lines”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 25, Iss. 4, pp. 2891–2902, 2010, DOI: 10.1109/TPWRD.2010.2051340.
- [56] A. Z. El Dein: “Effect of the variation of the charge distribution along multi-overhead transmission lines’ conductors on the calculation method of ground surface electric field”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 51, pp. 255–264, 2013, DOI: 10.1016/j.ijepes.2013.03.011.
- [57] A. Z. El Dein: “Calculation of the electric field around the tower of the overhead transmission lines”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 29, Iss. 2, pp. 899–907, 2014, DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2273500.
- [58] I. N. Ztoupis, I. F. Gonos, I. A. Stathopoulos: “Measurement and calculation of power frequency electric fields generated by high voltage overhead power lines”, 2014 ICHVE International Conference on High Voltage Engineering and Application, Poznan, Poland, 2014, pp. 1–4, DOI: 10.1109/ICHVE.2014.7035516.
- [59] A. Z. El Dein: “Parameters affecting the charge distribution along overhead transmission lines’ conductors and their resulting electric field”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 108, pp. 198–210, 2014, DOI: 10.1016/j.epsr.2013.11.011.
- [60] A. V. Mamishev, R. D. Nevels, B. D. Russell: “Effects of conductor sag on spatial distribution of power line magnetic field”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 3, pp. 1571–1576, 1996, DOI: 10.1109/61.517518.
- [61] F. Muñoz, J. A. Aguado, F. Martín, J. J. López, A. Rodríguez, J. B. García, A. R. Treitero, R. Molina: “An intelligent computing technique to estimate the magnetic field generated by overhead transmission lines using a hybrid GA-Sx algorithm”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 53, pp. 43–53, 2013, DOI: 10.1016/j.ijepes.2013.03.023.
- [62] K. Budnik, W. Machczyński: “Contribution to studies on calculation of the magnetic field under power lines”, *European Transactions on Electrical Power*, Vol. 16, Iss. 4, pp. 345–364, 2006, DOI: 10.1002/etep.90.

- [63] Maja Grbić, Aleksandar Pavlović: “Measurements and calculations of non-ionizing radiation levels in the vicinity of 35 kV overhead power lines”, The 23<sup>rd</sup> International Conference and Exhibition on Electricity Distribution – CIRED, Lyon, France, June 15–18, 2015, Paper No. 1540, ISSN: 2032-9644.
- [64] Maja Grbić, Aleksandar Pavlović: “Determining the zone of influence of transmission overhead power lines from the aspect of non-ionizing radiation”, The 6<sup>th</sup> International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research “RAD”, University of Niš, Faculty of Electronic Engineering, Ohrid, Republic of Macedonia, June 18–22, 2018, RAD Conference Proceedings, vol. 3, pp. 52–57, ISSN 2466-4626 (online), DOI: 10.21175/RadProc.2018.11.
- [65] Maja Grbić, Aleksandar Pavlović: “Zoning of areas in the vicinity of 110 kV, 220 kV and 400 kV single-circuit overhead power lines from an aspect of the non-ionizing radiation”, International Conference Energy and Ecology Industry, Academy of Engineering Sciences of Serbia (AESS), Belgrade, Republic of Serbia, October, 10–13, 2018, Conference Proceedings, vol. 1, pp. 227–234, ISBN: 978-86-7466-751-4.
- [66] Power lines: Demonstrating compliance with EMF public exposure guidelines: A voluntary code of practice. Government of the United Kingdom, Department of Energy & Climate Change, March 2012.
- [67] Маја Грбић, Александар Павловић, Милица Таушановић, Владимир Шилјут: „Нивои нејонизујућих зрачења надземних и кабловских водова напонског нивоа 35 kV”, VIII саветовање о електродистрибутивним мрежама Србије са регионалним учешћем, Национални комитет CIRED Србија, Врњачка Бања, Република Србија, 23–28. 9. 2012. године, Зборник радова, Р-1.13, ISBN: 978-86-83171-17-0.
- [68] Маја Грбић, Драгутин Саламон, Јован Микуловић: „Анализа утицаја геометрије надземног вода на расподелу јачине електричног поља”, 31. саветовање CIGRE Србија, Српски национални комитет Међународног савета за велике електричне мреже, Златибор, Република Србија, 26–30. 5. 2013. године, Зборник радова, Р Ц4 08, ISBN: 978-86-82317-72-2.
- [69] Маја Грбић: „Нејонизујуће зрачење у околини надземних електроенергетских водова: прописи, начини испитивања, нивои и мере заштите”, „Заштита животне средине и одрживи развој – енергетика и рударство 2015”, 3. саветовање са међународним учешћем, Привредна комора Србије, Златибор, Република Србија, 2–5. 3. 2015. године, Зборник радова, стр. 86–94, ISBN: 978-86-80809-96-0.
- [70] Маја Грбић, Бранислав Јелкић: „Анализа нивоа нејонизујућих зрачења у околини надземних водова на различитим висинама изнад тла”, 32. саветовање CIGRE Србија, Српски национални комитет Међународног савета за велике електричне мреже, Златибор, Република Србија, 17–21. 5. 2015. године, Зборник радова, Р Ц4 10, ISBN: 978-86-82317-77-7.
- [71] Маја Грбић, Драгутин Саламон: „Упоредна анализа нивоа нејонизујућих зрачења у околини два једнострука и једног двоструког 400 kV надземног вода и избор оптималног решења”, 32. саветовање CIGRE Србија, Српски национални комитет Међународног савета за велике електричне мреже, Златибор, Република Србија, 17–21. 5. 2015. године, Зборник радова, Р Ц4 11, ISBN: 978-86-82317-77-7.
- [72] Александар Павловић, Маја Грбић, Дејан Хрвић, Момчило Петровић, Милица Јовановић, Бранислав Вулевић: „Одређивање зоне утицаја нејонизујућих зрачења у околини надземних електроенергетских водова”, „Заштита животне средине и одрживи развој – енергетика и рударство 2016”, 4. саветовање са међународним

учешћем, Привредна комора Србије, Дрвенград, Република Србија, 1–3. 3. 2016. године, Зборник радова, стр. 136–140.

- [73] Александар Павловић, Маја Грбић, Милиша Јовановић, Сандра Петровић, Дејан Хрвић, Бранислав Вулевић: „Испитивања електричних и магнетских поља у околини надземних електроенергетских водова”, „Заштита животне средине и одрживи развој – енергетика и рударство 2017”, 5. саветовање са међународним учешћем, Привредна комора Србије, Тара, Република Србија, 15–17. 3. 2017. године, Зборник радова, стр. 81–87, ISBN: 978-86-80420-12-7.
- [74] Александар Павловић, Маја Грбић, Милиша Јовановић, Сандра Петровић: „Поступак доказивања усаглашености са прописаним границама излагања становништва нејонизујућим зрачењима у околини преносних надземних електроенергетских водова”, „Заштита животне средине и одрживи развој – енергетика и рударство 2018”, 6. саветовање са међународним учешћем, Привредна комора Србије, Сремски Карловци, Република Србија, 28–30. 3. 2018. године, Зборник радова, стр. 64–67, ISBN: 978-86-80420-16-5.
- [75] Маја Грбић, Александар Павловић: „Утицај граница излагања становништва електричном и магнетском пољу на пројектовање и изградњу преносних надземних водова”, 6. саветовање Црногорског комитета CIGRE, Црногорски национални комитет Међународног савета за велике електричне мреже, Бечићи, Црна Гора, 14–17. 5. 2019. године, Зборник радова, Р Ц4 14.
- [76] SRPS ISO/IEC 17025:2017 „Општи захтеви за компетентност лабораторија за испитивање и лабораторија за еталонирање”.
- [77] Правилник о техничким нормативима за изградњу надземних електроенергетских водова називног напона од 1 kV до 400 kV, „Службени лист СФРЈ”, број 65/88 и „Службени лист СРЈ”, број 18/92.
- [78] ТУ-ДВ-04: „Дозвољене струје фазних проводника на далеководима ЈП ЕМС”, Техничко упутство, верзија 2 од 19. 4. 2011.
- [79] Маја Grbić, Jovan Mikulović, Dragutin Salamon: “Influence of measurement uncertainty of overhead power line conductor heights on electric and magnetic field calculation results”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2017, Vol. 98 (2018), pp. 167–175, DOI: 10.1016/j.ijepes.2017.11.038.
- [80] Маја Grbić, Dragutin Salamon, Jovan Mikulović: “Analysis of influence of measuring voltage transformer ratio error on single-circuit overhead power line electric field calculation results”, *Electric Power Systems Research*, 2019, Vol. 166, pp. 232–240, DOI: 10.1016/j.epsr.2018.10.001.
- [81] EFA-300 electromagnetic field analyzer, EFA-300 data sheet, Narda Safety Test Solutions ([www.narda-sts.com](http://www.narda-sts.com)).
- [82] EFA-300 electromagnetic field analyzer, EFA-300 operating manual, Narda Safety Test Solutions ([www.narda-sts.com](http://www.narda-sts.com)).
- [83] NBM-550 broadband field meter, NBM-550 data sheet, Narda Safety Test Solutions ([www.narda-sts.com](http://www.narda-sts.com)).
- [84] NBM-550 broadband field meter, NBM-550 operating manual, Narda Safety Test Solutions ([www.narda-sts.com](http://www.narda-sts.com)).
- [85] EHP-50F electric and magnetic field probe, EHP-50F data sheet, Narda Safety Test Solutions ([www.narda-sts.com](http://www.narda-sts.com)).

- [86] EHP-50F electric and magnetic field probe, EHP-50F user's manual, Narda Safety Test Solutions ([www.narda-sts.com](http://www.narda-sts.com)).
- [87] XGSLab User's Guide, Release 9.4.1 – 03/20, SINT Ingegneria Srl, March 2020.
- [88] XGSLab Tutorial XGSA\_FD, Release 9.4.1 – 03/20, SINT Ingegneria Srl, March 2020.
- [89] Оператор дистрибутивног система „ЕПС Дистрибуција” д.о.о. Београд: „Правила о раду дистрибутивног система”, 13. 7. 2017.
- [90] ЈП „Електроурежа Србије”: „Правила о раду преносног система”, верзија 1, 15. 4. 2008.
- [91] Ковиљка Станковић, Милош Вујисић, Предраг Осмокровић: „Мерна несигурност”, Београд, 2009. година.
- [92] Драган Станковић, Предраг Осмокровић: „Практикум лабораторијских вежби из физике”, Београд, 2004. година.
- [93] Драган Станковић: „О мерној несигурности”, XLVI конференција „ETRAN”, Бања Врућица – Теслић, 4–7. 6. 2002. године, Зборник радова, том III, стр. 243–254.
- [94] Joint Committee for Guides in Metrology: “Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement”, JCGM 100:2008, September 2008.
- [95] Надица Миљковић: „Методе и инструментација за електрична мерења”, Београд, 2016. година.
- [96] United Kingdom Accreditation Service: “The expression of uncertainty and confidence in measurement”, M3003, Edition 2, January 2007.
- [97] Singapore Accreditation Council: “Guidelines on the evaluation and expression of measurement uncertainty for electrical testing field”, Guidance Notes EL 001, Accreditation Scheme for Laboratories, March 2019.
- [98] European co-operation for accreditation: “Expression of the uncertainty of measurement in calibration”, December 1999.
- [99] European accreditation: “EA guidelines on the expression of uncertainty in quantitative testing”, EA-4/16 G:2003, December 2003.
- [100] European accreditation: “Evaluation of the uncertainty of measurement in calibration”, EA-4/02 M:2013, September 2013.
- [101] ISO/IEC Guide 98-1:2009 “Uncertainty of measurement – Part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement”.
- [102] Stephanie Bell: “Measurement good practice guide No. 11 – A beginner's guide to uncertainty in measurement”, issue 2, Centre for Basic, Thermal and Length Metrology, National Physical Laboratory, August 1999, ISSN: 1368-6550.
- [103] Ignacio Lira: “Evaluating the measurement uncertainty – fundamentals and practical guidance”, Institute of Physics, 2002, ISBN: 0 7503 0840 0.
- [104] L. Kirkup, R. B. Frenkel: “An introduction to uncertainty in measurement using the GUM (Guide to the expression of uncertainty in measurement)”, Cambridge university press, 2006, ISBN: 978-0-521-60579-3.
- [105] Alan S. Morris: “Measurement and instrumentation principles”, third edition, 2001, ISBN: 0 7506 5081 8.
- [106] Semyon G. Rabinovich: “Measurement errors and uncertainties – theory and practice”, third edition, 2005, ISBN: 978-0387-25368-9.

- [107] Simona Salicone: “Measurement uncertainty – an approach via the mathematical theory of evidence”, 2007, ISBN: 978-0-387-30655-1.
- [108] Joint Committee for Guides in Metrology: “Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the Guide to the expression of uncertainty in measurement – Propagation of distributions using a Monte Carlo method”, JCGM 101:2008, 2008.
- [109] Dirk P. Kroese, Thomas Taimre, Zdravko I. Botev, Reuven Y. Rubinstein: “Simulation and the Monte Carlo method”, second edition, 2008, ISBN: 978-0-470-25879-8.
- [110] Пиа М. Sobol: “A primer for the Monte Carlo method”, 1994, ISBN: 0-8493-8673-X.
- [111] Reuven Y. Rubinstein, Dirk P. Kroese: “Simulation and the Monte Carlo method”, third edition, 2017, ISBN: 9781118632208.
- [112] Sona Sediva, Marie Havlikova: “Comparison of GUM and Monte Carlo method for evaluation measurement uncertainty of indirect measurements”, The 14<sup>th</sup> International Carpathian Control Conference (ICCC), Rytro, Poland, May 26–29, 2013, DOI: 10.1109/CarpathianCC.2013.6560563.
- [113] M. Azpúrua, C. Tremola, E. Páez: “Comparison of the GUM and Monte Carlo methods for the uncertainty estimation in electromagnetic compatibility testing”, Progress in Electromagnetics Research B, Vol. 34, pp. 125–144, 2011.
- [114] Урош Ковачевић: „Изражавање мерне несигурности капацитивних разделника напона са концентрисаним параметрима у области високих фреквенција”, докторска дисертација, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, 2017. година.
- [115] ILAC: “Guidelines on decision rules and statements of conformity”, ILAC-G8:09/2019, 2019.
- [116] M. Borsero, G. Crotti, L. Anglesio, G. d’ Amore: “Calibration and evaluation of uncertainty in the measurement of environmental electromagnetic fields”, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 97, No. 4, pp. 363–368, 2001.
- [117] I. N. Ztoupis, I. F. Gonos, I. A. Stathopoulos: “Uncertainty evaluation in the measurement of power frequency electric and magnetic fields from AC overhead power lines”, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 157, No. 1, pp. 11–21, 2013.
- [118] Маја Грбић, Александар Павловић: „Мерна несигурност при мерењу електричног и магнетног поља индустријске учестаности”, 30. саветовање CIGRE Србија, Српски национални комитет Међународног савета за велике електричне мреже, Златибор, Република Србија, 29. 5. – 3. 6. 2011. године, Зборник радова, Р Ц4 07, ISBN: 978-86-82317-69-2.
- [119] J. Di Placido, C. H. Shih, B. J. Ware: “Analysis of the proximity effects in electric field measurements”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems., Vol. PAS–97, Iss. 6, pp. 2167–2177, 1978, DOI: 10.1109/TPAS.1978.354720.
- [120] Maja Grbić, Aleksandar Pavlović: “Quantification of the operator proximity effect on the measurement results of electric field strength in the vicinity of overhead power lines”, The 6<sup>th</sup> International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research “RAD”, University of Niš, Faculty of Electronic Engineering, Ohrid, Republic of Macedonia, June 18–22, 2018, ISSN 2466-4626 (online).
- [121] Maja Grbić, Dragana Naumović-Vuković, Aleksandar Pavlović: “Calibration of magnetic field analyzer”, The 21<sup>st</sup> IMEKO World Congress “Measurement in Research and Industry”, IMEKO, Prague, Czech Republic, August 30 – September 4, 2015, pp. 663–666, ISBN: 978-80-01-05793-3.

- [122] Celso Fabricio de Melo, Ricardo Luiz Araújo, Leonardo Morozowski Ardjomand, Nilton S. Ramos Quoirin, Minoru Ikeda, Alexandre Albarello Costa, “Calibration of low frequency magnetic field meters using a Helmholtz coil”, *Measurement*, vol. 42, pp. 1330–1334, 2009.
- [123] Драгомир Д. Јеловац: „Добијање и компензација хомогеног једносмерног магнетног поља”, *Зборник радова V ЈУКЕМ-а, Загреб*, 1971, стр. 246–253.
- [124] Срђан Спиридоновић: „Прорачун и конструкција еталона једносмерног магнетског поља”, *Зборник радова XIII ЈУКЕМ-а, Сплит*, 1988.
- [125] Срђан Спиридоновић: „Реализација еталона магнетског поља”, *Зборник радова XIII ЈУКЕМ-а, Сплит*, 1988.
- [126] SRPS EN 61869-1:2010 „Мерни трансформатори – Део 1: Општи захтеви”.
- [127] SRPS EN 61869-3:2012 „Мерни трансформатори – Део 3: Додатни захтеви за индуктивне напонске трансформаторе”.
- [128] SRPS EN 61869-5:2012 „Мерни трансформатори – Део 5: Додатни захтеви за капацитивне напонске трансформаторе”.
- [129] SRPS EN 61869-2:2014 „Мерни трансформатори – Део 2: Додатни захтеви за струјне трансформаторе”.
- [130] Zhenguang Liang, Yuze Jiang, Jinge Hong: “Influence of complex terrains on electric field under overhead lines”, *5<sup>th</sup> International Conference on Information Science and Control Engineering*, Henan, China, 2018, pp. 275–279, DOI: 10.1109/ICISCE.2018.00065.
- [131] Chenguang Gao, Yuanqing Liu, Jiangtao Zhao, Xirun Zhang, Wenyu Li, Hui Han, Jingchen Zhang: “Study on surface electric field and ground nominal electric field of HVDC transmission line on slope terrain”, *The 14<sup>th</sup> IET International Conference on AC and DC Power Transmission, The Journal of Engineering*, doi: 10.1049/joe.2018.8402.
- [132] Yu Jihui, Zhou Chao: “Power-frequency electric field of EHV transmission lines under condition of complex landscape”, *High Voltage Engineering*, Vol. 32, No. 1, pp. 18–20, 2006.
- [133] Zhou Hongwei, Zuo Peng, Zou Jun, Yuan Jiansheng: “Analysis on electromagnetic environment characteristics of high-voltage AC transmission lines passing through complex terrains”, *Power System Technology*, Vol. 35, No. 9, pp. 164–169, 2011.
- [134] M. Trlep, A. Hamler, M. Jesenik, B. Stumberger: “Electric field distribution under transmission lines dependent on ground surface”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 45, No. 3, pp. 1748–1751, 2009.
- [135] Yuze Jiang, Gang Li, Zhenguang Liang, Fei Guo: “Calculation of power frequency electric field under overhead lines with sloping ground by conformal mapping”, *Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference on Information Science and Control Engineering*, pp. 645–648, Shanghai, China, April 24–26, 2015.
- [136] Zhenguang Liang, Yuze Jiang, Diwen Jiang, Zongjie Liu: “Calculation of power frequency electric field under overhead lines with complex ground”, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 441, pp. 212–216, 2014.
- [137] Fei Guo, Zhenguang Liang, Yuze Jiang: “Power-frequency electric field calculation of extra high voltage transmission lines under condition of complex landscape”, *Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Conference on Computer Science and Network Technology*, pp. 37–41, Dalian, China, October 12–13, 2013.

- [138] Yuze Jiang, Zhenguang Liang, Diwen Jiang: "Calculation of electric field under overhead lines with complex ground by two dimension surface charge method", *Advanced Materials Research*, Vol. 1070–1072, pp. 1563–1566, 2015.
- [139] Маја Грбић, Александар Павловић: „Међулабораторијско поређење резултата мерења магнетске индукције надземног вода напонског нивоа 400 kV”, *Зборник радова, Електротехнички институт „Никола Тесла”, Београд, 2012. година, књига 22, стр. 209–221, ISSN 0350-8528, УДК: 621.317.42, DOI: 10.5937/zeint22-2336.*
- [140] Маја Грбић, Александар Павловић, Бранислав Вулевић, Чедомир Белић: „Међулабораторијско поређење резултата мерења магнетске индукције дистрибутивног надземног вода”, *VIII саветовање о електродистрибутивним мрежама Србије са регионалним учешћем, Национални комитет CIREД Србија, Врњачка Бања, Република Србија, 23–28. 9. 2012. године, Зборник радова, Р-1.14, ISBN: 978-86-83171-17-0.*
- [141] Маја Grbić, Aleksandar Pavlović, Branislav Vulević: "Interlaboratory Comparison of Measuring and Calculation Results of Electric Field Strength near 35 kV Overhead Power Line", *The 2<sup>nd</sup> International Conference on Radiation and Dosimetry in Various Fields of Research "RAD", University of Niš, Faculty of Electronic Engineering, Niš, Republic of Serbia, May 27–30, 2014, pp. 255–258, ISBN 978-86-6125-101-6.*
- [142] Извештај Електротехничког института „Никола Тесла” број 318363: „Међулабораторијско поређење резултата мерења и прорачуна електричног поља и магнетске индукције индустријске учестаности”, организатор: Електротехнички институт „Никола Тесла” а.д. Београд, 2018. година.
- [143] SRPS ISO/IEC 17043:2011 „Оцењивање усаглашености - Општи захтеви за испитивање оспособљености”.
- [144] АТС-ПА02: „Правила о учешћу у међулабораторијским поређењима и програмима за испитивање оспособљености”, Акредитационо тело Србије, 28. 12. 2018.
- [145] Маја Грбић, Александар Павловић, Небојша Петровић: „Практична примена мера за смањење нивоа нејонизујућих зрачења надземног вода”, *31. саветовање CIGRE Србија, Српски национални комитет Међународног савета за велике електричне мреже, Златибор, Република Србија, 26–30. 5. 2013. године, Зборник радова, Р Ц4 09, ISBN: 978-86-82317-72-2.*
- [146] Маја Grbić, Aleksandar Pavlović: "Practical Implementation and Analysis of Measures for Reducing Electric Field Strength in the Vicinity of 400 kV Overhead Power Line", *The 5<sup>th</sup> International Conference on Electromagnetic Fields, Health and Environment, A.P.D.E.E., Porto, Portugal, April 24–26, 2014, Paper 133, ISBN: 978-972-8822-28-6.*
- [147] Маја Грбић, Александар Павловић: „Мере за смањење јачине електричног и магнетског поља у околини преносних надземних водова”, *34. саветовање CIGRE Србија, Српски национални комитет Међународног савета за велике електричне мреже, Врњачка Бања, Република Србија, 2–6. 6. 2019. године, Зборник радова, Р Ц3 04, ISBN: 978-86-82317-85-2.*
- [148] Маја Грбић: „Упутство за израчунавање несигурности метода које се користе за испитивање изложености људи нискофреквентном електричном и магнетском пољу”, УП-075-Л, интерно упутство Електротехничког института „Никола Тесла”, издање 2, 6. 12. 2017.



# ПРИЛОГ

## Карактеристике мерног инструмента EFA-300

		Magnetic (B-) Field (EFA-200 and EFA-300)			Electric (E-) Field (EFA-300 only)
		100 cm <sup>2</sup> Probe	Internal Probe	3 cm Probe	
Sensor System		Coil (internal or external)			Plate Electrode
Measurement Axis, selectable		Tri- Axial (Isotropic) or Single Axis			
<b>FIELD STRENGTH MODE</b>					
Frequency Range	Broadband (+0/-3 dB), selectable	5 Hz to 2 kHz, 30 Hz to 2 kHz, 5 Hz to 32 kHz or 30 Hz to 32 kHz			
	Band Pass / Band Reject Filter, adjustable	15 Hz to 2 kHz (resolution 0.1 Hz)			
Detection, selectable		RMS (averaging time 1 sec.) Peak Value (proper phase)			
Measurement Range	Nominal	100 nT to 32 mT	100 nT to 32 mT	100 nT to 32 mT	10 V/m to 100 kV/m
	Damage Level (Peak)	91 mT <sup>a</sup> @ ≤125 Hz	91 mT <sup>a</sup> @ ≤625 Hz	91 mT <sup>a</sup> @ ≤625 Hz	280 kV/m
Damage Level (Peak)	Damage Level (Peak) <sup>a</sup> For magnetic field probes depending on frequency				
Noise level (RSM), typical	Broadband, 30 Hz to 2 kHz	4 nT	100 nT	20 nT	0.7 V/m
	Broadband, 5 Hz to 32 kHz	10 nT	200 nT	50 nT	4.5 V/m
	Band Pass Filter, 50 Hz to 400 Hz	0.8 nT	25 nT	5 nT	0.14 V/m
Uncertainty, typical <sup>b</sup>	Broadband, 5 Hz to 2 kHz	±3% @ ≥40 nT	±5% @ ≥1 μT	±4% @ ≥200 nT	±3% @ ≥5 V/m
	Broadband, 5 Hz to 32 kHz	±3% @ ≥80 nT	±8% @ ≥2 μT	±5% @ ≥400 nT	±3% @ ≥40 V/m
	Band Pass Filter, 50 Hz to 400 Hz	±3% @ ≥10 nT	±5% @ ≥250 nT	±4% @ ≥50 nT	±3% @ ≥1 V/m

<sup>a</sup> The upper limit decreases linearly with increasing frequency above the mentioned frequency.

$$\text{Overload limit for } 100 \text{ cm}^2 \text{ Probe} = \left( \frac{9000 \text{ mT} \cdot \text{Hz}}{\text{Frequency}} \right) \sqrt{2}$$

$$\text{Overload limit for } 3 \text{ cm and internal Probe } 100 \text{ cm}^2 \text{ Probe} = \left( \frac{40000 \text{ mT} \cdot \text{Hz}}{\text{Frequency}} \right) \sqrt{2}$$

<sup>b</sup> Uncertainty includes all partial uncertainties (absolute, linearity, frequency response, and isotropy) as well as temperature and humidity related deviations. Signal sinusoidal, level >10% of selected measurement range; additional uncertainties apply with the steep frequency band limits.

## БИОГРАФСКИ ПОДАЦИ О АУТОРКИ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Маја Грбић је рођена 7. маја 1985. године у Београду, где је са одличним успехом завршила основну школу и Електротехничку школу „Никола Тесла”. Добитница је Дипломе „Вук Караџић”.

Дипломске академске студије на Електротехничком факултету у Београду завршила је 2010. године, с просечном оценом 9,28. Током студија била је стипендисткиња Електротехничког института „Никола Тесла”, ПД Термоелектране „Никола Тесла” и Фонда за младе таленте Републике Србије. Мастер академске студије на Електротехничком факултету у Београду завршила је 2012. године, с просечном оценом 9,83. За мастер рад под називом „Мерење и прорачун електричних и магнетских поља надземних водова у циљу процене изложености људи овим пољима” добила је награду Привредне коморе Београда. Током докторских академских студија остварила је просечну оцену 10,00.

Од 2010. године запослена је у Електротехничком институту „Никола Тесла”, у Центру за електроенергетске објекте, где се примарно бави истраживањима у области електромагнетских поља. Учествовала је у изради 17 студија, 16 елабората и 27 стручних оцена оптерећења животне средине, најчешће у функцији руководиоца, као и у изради преко 900 извештаја о испитивањима, од којих се више од 870 односи на испитивања електромагнетских поља. Од 2018. године обавља функцију руководиоца Специјализоване лабораторије за испитивања електромагнетских поља.

Почетком 2016. године боравила је на Политехничком универзитету у Торину, где се бавила истраживањима у области електромагнетских поља.

Објавила је 56 радова, од којих 41 као први аутор, при чему се 50 радова односи на област електромагнетских поља. Као први аутор публиковала је два рада у врхунским међународним часописима категорије M21 и 13 радова у зборницима међународних конференција. Такође је публиковала 14 радова у националним часописима и 27 радова у зборницима скупова националног значаја. Добитница је признања за најбоље радове представљене на 8. саветовању CIREД Србија и 34. саветовању CIGRE Србија.

Чланица је међународних удружења CIGRE и IEEE, српских националних комитета CIGRE (СТК Ц3 и Ц4) и CIREД (СТК 1), као и Организационог одбора саветовања „Заштита животне средине и одрживи развој”.

Течно говори енглески и шпански језик, има средњи ниво знања француског и почетни ниво знања немачког језика.

## Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Маја Грбић

Број индекса 5034/2012

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Методологија за оцену изложености људи електричном и магнетском пољу надземних електроенергетских водова заснована на резултатима мерења и прорачуна

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

У Београду, 22. 03. 2021.

**Потпис аутора**

Маја Грбић

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Маја Грбић

Број индекса 5034/2012

Студијски програм Електроенергетске мреже и системи

Наслов рада Методологија за оцену изложености људи електричном и магнетском пољу надземних електроенергетских водова заснована на резултатима мерења и прорачуна

Ментор Проф. др Јован Микуловић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

У Београду, 22. 03. 2021.

**Потпис аутора**

Маја Грбић

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић” да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Методологија за оцену изложености људи електричном и магнетском пољу надземних електроенергетских водова заснована на резултатима мерења и прорачуна

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.  
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

У Београду, 22. 03. 2021.

**Потпис аутора**

Мaja Трдџић

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.