

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Јован Трифуновић

**МЕТОДОЛОГИЈА ЗА УВАЖАВАЊЕ
НЕСАВРШЕНОГ КОНТАКТА ИЗМЕЂУ
ЕЛЕКТРОДА И ТЛА ПРИ ПРОРАЧУНУ
ОТПОРНОСТИ РАСПРОСТИРАЊА
КОНТУРНИХ УЗЕМЉИВАЧА**

докторска дисертација

Београд, 2015

UNIVERSITY OF BELGRADE
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Jovan Trifunović

**METHODOLOGY FOR TAKING INTO ACCOUNT
IMPERFECT CONTACT BETWEEN GROUNDING
ELECTRODES AND SOIL WHEN CALCULATING
THE LOOP GROUNDING RESISTANCE**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2015

Ментор:

др Миомир Костић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

Чланови комисије:

др Миомир Костић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

др Зоран Радаковић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

др Драгутин Саламон, ванредни професор у пензији,
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

др Златан Стојковић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

др Милан Илић, ванредни професор,
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

Датум одбране: _____

Наслов докторске дисертације:

Методологија за уважавање несавршеног контакта између електрода и тла при прорачуну отпорности распрострањања контурних уземљивача

РЕЗИМЕ

Отпорност распрострањања уземљивачког система је основни параметар за прорачуне свих осталих релевантних величина помоћу којих се проверава његов квалитет. Међутим, пошто постоје тла која формирају лош контакт са електродама уземљивача, у пракси се често појављује значајна несагласност између измерених вредности тих величина и њихових вредности израчунатих применом конвенционалних формула, које важе уз претпоставку о савршеном контакту између електрода и околног тла. У таквим случајевима, у пракси се понекад користе додатни материјали који се постављају између електрода и тла са циљем да се елиминише контактна отпорност, као и да укупна отпорност распрострањања уземљивача буде мања од жељене (стандардима захтеване) вредности.

Циљ ове дисертације је развој опште методологије за одређивање оптималног уземљивача, са уважавањем, како несавршеног контакта између електрода и околног тла, тако и опције употребе додатног материјала за смањење контактне отпорности. Развијен је и приказан општи алгоритам за пројектовање оптималног уземљивача у описаним условима, заснован на техно-економској анализи у оквиру које се пореде инсталациони трошкови уземљивача чија је иницијално планирана конструкција модификована на разне начине (употребом само додатних електрода, само додатног материјала или и једног и другог), под условом да су постигнуте приближно исте отпорности распрострањања, мање од захтеваних.

У доступним домаћим и страним стандардима и научно-стручној литератури нису постојале нити методе нити упрошћени аналитички изрази помоћу којих би наведени утицаји могли да се уваже при прорачуну отпорности распрострањања уземљивача. Зато су у овој дисертацији развијени неопходни алгоритми и упрошћени изрази за спровођење такве техно-економске анализе при пројектовању оптималног уземљивача састављеног од једне или више галвански

спојених квадратних контура (конструкције које одговарају типичном уземљивачу далеководног стуба). Алгоритми и методе за развијање упрошћених израза, који су приказани у овој дисертацији, општи су и базирани су на 3Д FEM (*finite element method* – метода коначних елемената) моделовању и нумеричкој анализи добијених резултата. Несавршен контакт је моделован „постављањем“ ваздушних цепова између електрода и околног тла.

Развијена је и детаљно представљена метода за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при прорачуну отпорности распрострања разматраног контурног уземљивача. Израђен је општи алгоритам за одређивање неопходних карактеристика додатног материјала за елиминацију контактне отпорности, као и општи алгоритам за процену оптималне количине изабраног додатног материјала намењеног потребном смањењу отпорности распрострања уземљивача. За разматрани случај изведени су сви упрошћени изрази неопходни за спровођење наведених алгоритама. На примеру уземљивача састављеног од једне или више галвански спојених квадратних контура представљена је метода за развијање упрошћених израза за израчунавање теоријске (базне) отпорности уземљивача, која се може применити на разне типове уземљивача. Изведене су нова формула за израчунавање теоријске отпорности распрострања усамљене контуре у хомогеном тлу и формуле за израчунавање теоријске отпорности распрострања уземљивача састављеног од више галвански спојених квадратних контура положених у хомогено тло (оне су базирани на коефицијентима којима се описује међусобни утицај појединачних елемената уземљивача). Затим је развијен и приказан општи алгоритам за израчунавање отпорности распрострања комплексних уземљивачких система, помоћу кога се уважава постојање контактне отпорности. Предложени алгоритам је базиран на додатном тест мерењу, скупу упрошћених израза за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при прорачуну отпорности распрострања сложеног уземљивача и скупу упрошћених израза за израчунавање његове теоријске отпорности распрострања. Провера тачности изведених формула и поузданости предложеног алгоритма извршена је поређењем добијених резултата са резултатима добијеним применом конвенционалних метода прорачуна датих у стандардима и приручницима,

рачунарским симулацијама спроведеним на 3Д FEM моделима и мерењима у оквиру експеримента са умањеним жичаним моделима и електролитичком кадом.

Коришћењем метода, алгоритама и упрошћених израза развијених у овој дисертацији број понављања процедуре преправке уземљивача положених у тло које формира несавршен контакт са електродама сигурно ће се смањити (у односу на број понављања карактеристичних за примену конвенционалних метода прорачуна), што ће утицати на редукцију повећања инвестиционих трошкова предвиђених иницијалним пројектом.

Кључне речи: пројектовање уземљивачких система, контурни уземљивачи, отпорност распрострањања уземљивача, несавршен контакт, контактна отпорност, додатни материјал за елиминацију контактне отпорности, расподела електричног потенцијала, FEM, алгоритам и упрошћене формуле

Научна област: Електротехника

Ужа научна област: Електроенергетика

УДК број: 621.3

The title of doctoral dissertation:

Methodology for taking into account imperfect contact between grounding electrodes and soil when calculating the loop grounding resistance

ABSTRACT

Grounding resistance is a basic parameter for calculation of all other relevant parameters influencing the quality of a grounding system. However, since the grounding system can be installed in soils forming a bad contact with the grounding electrodes, significant discrepancies between the measured values of those parameters and the values calculated using conventional formulas often appear in practice, because conventional formulas are derived assuming perfect contact between the electrodes and surrounding soil. In such cases, backfill materials placed between the electrodes and soil are sometimes used in practice, with the aim to eliminate contact resistance, as well as to reduce the overall grounding resistance below the desired value (required by standards).

The aim of the research work presented in this dissertation is the development of a general methodology for determining the optimal grounding system, taking into consideration the influence of imperfect contact between the electrodes and surrounding soil, as well as the influence of the use of backfill material, on the grounding system resistance. A general algorithm for the optimal design of a grounding system installed in the described conditions is developed and presented, based on a techno-economic analysis, where the installation costs of grounding system structures obtained after various modifications (using only the additional electrodes, only backfill material or both) are compared under an assumption that all grounding systems have approximately the same grounding system resistance (lower than the one required by standards).

The available national and international standards, as well as scientific and professional literature, do not offer any method or simplified analytical expressions for calculating the grounding resistance, which would take into account the described grounding system modifications. Hence, all algorithms and simplified formulas necessary for conducting such a techno-economic analysis related to the design of the optimal grounding system composed of one or more galvanically connected square

loops (structures that correspond to typical transmission tower grounding system) are developed in this dissertation. All of the algorithms and methods for the derivation of simplified formulas, which are presented in this dissertation, are general and based on 3D FEM (*Finite Element Method*) modelling and numerical analysis of the obtained results. Imperfect contact is modelled by air gaps placed between the grounding loop electrodes and surrounding soil.

A method for taking into account the influence of imperfect contact between the electrodes and surrounding soil when calculating considered grounding loop resistance is developed and presented in detail. A general algorithm for determination of necessary characteristics which backfill materials must possess in order to eliminate the contact resistance, as well as a general algorithm for assessing the optimal quantity of the selected backfill material intended for the necessary reduction of the grounding resistance, are also developed and presented. For the considered case, simplified formulas necessary to implement the above algorithms are derived. A new method for deriving simplified formulas for calculation of theoretical (base) value of the grounding system resistance, which can be applied to various types of grounding systems, is presented and then applied to an example of a grounding system composed of one or more galvanically connected square loops. A new formula for calculating the theoretical value of the square loop grounding resistance, as well as a set of approximate formulas for calculation of theoretical value of the grounding resistance of a grounding system composed of several galvanically connected square loops (based on the use of coefficients taking into account the proximity effects), are also derived. Afterwards, a general algorithm for calculating the grounding resistance of complex grounding systems, including the contact resistance, is developed and presented. The proposed algorithm is based on an additional test measurement, a set of simplified formulas for taking into account the influence of imperfect contact between the electrodes and surrounding soil when calculating the grounding resistance, and a set of simplified formulas for calculating the theoretical grounding resistance of complex grounding systems. Validation of accuracy of the derived formulas and reliability of the proposed algorithm is performed (i) by comparing the results obtained using the proposed formulas with those obtained by conventional calculation methods given in standards

and handbooks, (ii) by computer simulations conducted on 3D FEM models, and (iii) by measurements based on utilization of small scale wire models and the electrolytic tank.

Using the methods, algorithms and simplified formulas developed in this dissertation, the number of necessary modifications after the installation of the initial grounding system in a soil forming imperfect contact with the electrodes will certainly be smaller than the number of necessary modifications if only conventional calculation methods are used), which will reduce the increase of the investment costs envisaged in the initial project.

Keywords: grounding system design, grounding loop, grounding resistance, imperfect contact, contact resistance, backfill material, potential distribution, FEM, algorithm and approximate formulas

Scientific area: Electrical engineering

Specific scientific field: Electroenergetics (Power Engineering)

UDK number: 621.3

САДРЖАЈ

САДРЖАЈ.....	1
1 УВОД.....	5
1.1 Потреба за методама за прорачун отпорности распрострања уземљивачких система	5
1.2 Конвенционалне методе за прорачун отпорности распрострања уземљивачких система	6
1.3 Ограничене могућности употребе конвенционалних метода у случајевима несавршеног контакта између електрода и тла.....	7
1.4 Употреба додатног материјала за смањење отпорности распрострања уземљивачких система	9
1.5 Употреба FEM-а за прорачун отпорности распрострања уземљивачких система	13
1.6 Предмет истраживања и методологија	15
1.7 Структура докторске дисертације.....	18
2 3Д FEM МОДЕЛОВАЊЕ КВАДРАТНИХ КОНТУРНИХ УЗЕМЉИВАЧА ..	25
2.1 Улазни параметри за 3Д FEM моделовање разматраних квадратних контурних уземљивача	25
2.2 Израда 3Д FEM модела разматраних квадратних контурних уземљивача и опис методе прорачуна.....	28
2.3 Моделовање несавршеног контакта и додатног материјала за смањење отпорности распрострања	32
3 АНАЛИЗА УТИЦАЈА ЛОШЕГ КОНТАКТА ИЗМЕЂУ ЕЛЕКТРОДА И ОКОЛНОГ ТЛА НА ЕЛЕКТРИЧНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ РАЗМАТРАНОГ КЛАСИЧНОГ КВАДРАТНОГ КОНТУРНОГ УЗЕМЉИВАЧА.....	36
3.1 Резултати мерења отпорности распрострања разматраних квадратних контурних уземљивача	36
3.2 Утицај параметара помоћу којих се описује несавршен контакт на отпорност распрострања разматраног уземљивача.....	38
3.2.1 Отпорности распрострања добијене 3Д FEM симулацијама	38
3.2.2 Утицај параметра n	39
3.2.3 Утицај параметра d	40
3.2.4 Утицај параметра F	40

3.3	Утицај несавршеног контакта на расподелу потенцијала у околини уземљивача у случају квара	41
3.4	Метода за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при прорачуну отпорности распрострања разматраног контурног уземљивача	47
4	АНАЛИЗА УТИЦАЈА ДОДАТНОГ МАТЕРИЈАЛА НА ОТПОРНОСТ РАСПРОСТИРАЊА РАЗМАТРАНОГ КВАДРАТНОГ КОНТУРНОГ УЗЕМЉИВАЧА	52
4.1	Утицај карактеристика додатног материјала на елиминацију контактне отпорности	52
4.1.1	Анализа резултата добијених 3Д FEM симулацијама	52
4.1.2	Алгоритам за одређивање неопходних карактеристика додатног материјала за елиминацију контактне отпорности	58
4.2	Утицај количине додатног материјала на отпорност распрострања разматраног уземљивача	60
4.2.1	Математички концепт одређивања координата тачке колена криве. 61	
4.2.2	Одређивање континуалне функције $\delta R(V)$ и координата тачке колена криве за разматрани уземљивач	62
4.2.3	Одређивање оптималне запремине додатног материјала инжењерском анализом добијених резултата	67
4.2.4	Алгоритам за процену оптималне количине додатног материјала за смањење отпорности распрострања уземљивача	70
5	ИЗРАДА УПРОШЋЕНИХ ИЗРАЗА ЗА ИЗРАЧУНАВАЊЕ ТЕОРИЈСКЕ (БАЗНЕ) ОТПОРНОСТИ РАСПРОСТИРАЊА УЗЕМЉИВАЧА САСТАВЉЕНОГ ОД ЈЕДНЕ ИЛИ ВИШЕ ГАЛВАНСКИ СПОЈЕНИХ КВАДРАТНИХ КОНТУРА 73	
5.1	Распон вредности релевантних конструкционих параметара типичног 110 kV далеководног стуба	73
5.2	Конвенционалне формуле и методе за прорачун теоријске (базне) отпорности распрострања разматраног уземљивачког система	76
5.3	Формирање 3Д FEM модела разматраних уземљивача	77
5.4	Извођење формуле за израчунавање теоријске (базне) отпорности распрострања квадратног контурног уземљивача	78
5.5	Извођење формула за израчунавање теоријске (базне) отпорности распрострања уземљивача састављеног од више галвански спојених квадратних контура	81
5.6	Анализа добијених резултата и разних могућности примене и модификације развијених формула	86

5.6.1	Анализа добијених резултата	86
5.6.2	Могућност модификације развијених формула.....	88
5.6.3	Разне могућности и ограничења употребе изведених формула и препоруке за њихов даљи развој.....	89
6	АЛГОРИТАМ ЗА ИЗРАЧУНАВАЊЕ УКУПНЕ ОТПОРНОСТИ РАСПРОСТИРАЊА КОМПЛЕКСНИХ УЗЕМЉИВАЧКИХ СИСТЕМА УЗ УВАЖАВАЊЕ УТИЦАЈА НЕСАВРШЕНОГ КОНТАКТА ИЗМЕЂУ ЕЛЕКТРОДА И ОКОЛНОГ ТЛА.....	91
6.1	Примена израза (3.7) на квадратне контурне уземљиваче разних димензија положене у хомогено тло познатих параметара помоћу којих се описује квалитет контакта	92
6.2	Примена израза (3.7) на квадратне контурне уземљиваче разних димензија положене у хомогено тло непознатих параметара помоћу којих се описује квалитет контакта	93
6.3	Израчунавање укупне отпорности распростирања сложеног уземљивачког система приказаног на сл. 5.1 уз уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла	97
6.4	Кораци развијеног алгоритма за израчунавање укупне отпорности распростирања сложених уземљивачких система уз уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла	100
6.5	Анализа добијених резултата	103
7	ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ВЕРИФИКАЦИЈА	107
7.1	Опис експерименталне поставке	108
7.1.1	Конструкција и димензије умањених модела.....	108
7.1.2	Електролитичка када, опрема за симулирање квара у електроенергетском систему и мерна апаратура	111
7.2	Формирање 3Д FEM модела експерименталне поставке.....	114
7.3	Анализа резултата добијених експерименталним мерењима и 3Д FEM симулацијама.....	116
7.4	Провера поузданости алгоритма за израчунавање отпорности распростирања сложених уземљивачких система уз уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла	121
7.5	Анализа добијених резултата	126
8	МЕТОДОЛОГИЈА ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ ОПТИМАЛНОГ УЗЕМЉИВАЧА У УСЛОВИМА НЕСАВРШЕНОГ КОНТАКТА ИЗМЕЂУ ЕЛЕКТРОДА И ОКОЛНОГ ТЛА.....	129

9	ЗАКЉУЧЦИ.....	136
	ЛИТЕРАТУРА	143
	ПРИЛОГ А – Конструкциони параметри типичног 110 kV далеководног стуба	150
	ПРИЛОГ Б – Методе из референце [36] за израчунавање отпорности распрострањања сложених уземљивачких система.....	157
	Б.1 – Аналитичка метода	157
	Б.1.1 Примена Методе Б.1 за прорачун базне (теоријске) отпорности распрострањања уземљивачког система приказаног на слици 5.1	157
	Б.1.2 Модификоване формуле за прорачун укупне отпорности распрострањања, R_T , уземљивачког система приказаног на слици 5.1	158
	Б.2 – Полунумеричка метода.....	159
	ПРИЛОГ В – Графици расподеле потенцијала на површини воде у електролитичкој кади	161
	БИОГРАФИЈА АУТОРА	167

1 УВОД

1.1 Потреба за методама за прорачун отпорности распростирања уземљивачких система

Безбедност и поузданост електроенергетских мрежа и постројења у великој мери зависе од квалитета њихових уземљивачких система. При појави земљоспоја у електроенергетским мрежама и постројењима, или при атмосферским пражњењима, људи, животиње и опрема могу бити изложени опасном електричном напону (разлици електричних потенцијала). Добро пројектовани и изведени уземљивачки системи обезбеђују да у таквим случајевима, како електрични потенцијал уземљених металних делова постројења, тако и расподела електричног потенцијала на површини тла, буду такви да максимални напони додира и корака буду мањи од стандардима прописаних максималних дозвољених напона [1]. Основни улазни параметар за прорачуне свих релевантних електричних величина је отпорност распростирања уземљивачког система, који представља отпорност земље између површине електрода уземљивачког система и удаљене референтне земље која је на нултом потенцијалу. Тај параметар мора имати довољно малу вредност да би захтеви релевантних стандарда били задовољени, што је посебно тешко постићи на проблематичним теренима (када тло поседује велику специфичну отпорност и/или ако формира лош контакт са електродама уземљивача [2–4]). Препоручена или максимална дозвољена отпорност уземљења креће се од $0,1 \Omega$, на локалитетима на којима заштитне компоненте морају брзо да реагују [5], до 10Ω , за громобранску заштиту [6,7]. У случајевима када је те ниске вредности немогуће постићи, прибегава се додатним мерама заштите, за чије је пројектовање такође неопходно знати отпорности распростирања уземљивача. На пример, при пројектовању заштите далековода у случају квара потребно је проценити просечан број кварова који се на њему очекује у одређеном временском периоду, при чему отпорности распростирања уземљивача далеководних стубова представљају основне улазне податке за прорачун [8,9]. Осим тога, димензионисање изолатора на далеководним стубовима базирано је на прецизној (или што је могуће прецизнијој) процени типа

и амплитуда очекиваних пренапона, која се не може спровести без познатих отпорности распростирања уземљивача стубова далековода [10]. Оне су такође неопходне као улазни податак за спровођење техно-економских анализа којима треба да се дефинише оптимална стратегија за постављање одводника пренапона дуж далековода [11,12]. Чак је и у нисконапонским електричним инсталацијама за правилан избор заштитних компоненти потребно што прецизније познавати вредност отпорности распростирања, како уземљивача објекта, тако и уземљивача звездишта секундара трансформатора са кога се објекат напаја електричном енергијом [1].

1.2 Конвенционалне методе за прорачун отпорности распростирања уземљивачких система

Уземљивачи и уземљивачки системи могу се састојати од металних елемената (електрода) разних облика (хоризонтално положене дугачке жице или траке, кружне или правоугаоне контуре, металне плоче, мреже и вертикално постављене цеви), а могу бити и комплекснији системи који се састоје од више разних елемената. Они се полажу у тла различитог типа, која могу бити више или мање хомогеног састава. Нехомогена тла се обично представљају као двослојна или вишеслојна (сваки слој се сматра хомогеним и карактерише специфичном отпорношћу и дубинама хоризонталних равни које представљају раздвојне површи са суседним слојевима). При пројектовању уземљивачког система потребно је одредити довољан број и адекватан распоред електрода којима ће се обезбедити да након постављања уземљивачког система на жељену локацију његова измерена отпорност распростирања буде у оквиру стандардима дозвољених граница. Тако се избегава накнадно додавање елемената јер се тиме значајно повећавају инсталациони трошкови. Због тога, отпорност распростирања уземљивачког система мора бити што прецизније процењена још у раној фази пројектовања [13].

У прошлости је много научно-истраживачког рада било усмерено, како на развијање метода за прорачун отпорности распростирања уземљивачких система разних састава и конструкција (положених било у хомогено, било у нехомогено тло [14–16]), тако и на развијање релативно једноставних упрошћених

аналитичких или емпиријски добијених израза за прорачун отпорности распрострања најчешће коришћених уземљивачких система, погодних за свакодневну инжењерску употребу при пројектовању [17–19]. Методе и упрошћени изрази константно се, кроз даљи стручни и научно-истраживачки рад, проверавају, развијају, унапређују и прилагођавају за специфичне потребе, а сваки остварени напредак у овој области објављује се кроз стручне и научне радове у одговарајућим часописима. На пример, начин прорачуна отпорности уземљења правоугаоних мрежа положених у хомогено тло представљен је у [20]. Хоризонталне мреже и вертикалне цеви положене у двослојно тло анализирани су редом у [21–23] и [24]. Темељни уземљивачи, који представљају металне мреже у бетону, уз претпоставку о хомогеном околном тлу, разматрани су у [25–27]. Комплекснији проблеми од напред наведених су такође анализирани (нпр., темељни уземљивачи у двослојном тлу [28,29], окружени хоризонталним контурним уземљивачима са вертикалним цевима [30] и у комбинацији са додатном спољном мрежом [31]). Методе и упрошћени аналитички изрази који су се временом показали као најпогоднији за инжењерску употребу при пројектовању разних уземљивачких система сабрани су у стандардима [32,33] и приручницима [34–36]. Све ове методе и упрошћени аналитички изрази засновани су на решавању Лапласове једначине, уз претпоставку о идеалном и потпуном контакту између површине електрода уземљивача и околног тла.

1.3 Ограничене могућности употребе конвенционалних метода у случајевима несавршеног контакта између електрода и тла

Постоје научни радови у којима су приказани резултати експеримената који показују значајну несагласност између измерених вредности отпорности распрострања уземљивача положених у проблематична тла (нпр. код каменитих или песковитих терена) и њихових вредности израчунатих применом конвенционалних формула [37,38]. У таквим случајевима, измерене вредности отпорности распрострања уземљивача могу бити и неколико пута веће од израчунатих. Оваква одступања реалних од израчунатих (пројектом предвиђених) вредности могу проузроковати опасне ситуације приликом кварова у електроенергетском систему, зато што се компоненте система бирају на основу пројектом предвиђених улазних параметара.

У раду [37] представљени су резултати мерења отпорности распрострања квадратних контурних уземљивача (како класичних, тако и са слојевима додатних материјала постављених између околног тла и електрода уземљивача), положених у двослојно тло код кога је горњи слој, у коме су уземљивачи положени, карактерисала структура која је у великој мери онемогућавала добар контакт са електродама уземљивача. Измерене вредности отпорности распрострања класичних квадратних контурних уземљивача, прикупљане у периоду од 30 месеци колико је трајао експеримент приказан у [37], биле су далеко веће од вредности добијених стандардним прорачуном (од 238% до 1354%), иако су варијације специфичне отпорности тла биле практично занемарљиве у односу на варијације вредности измерених отпорности распрострања. Ови резултати су потврђивали претпоставку да је управо лош контакт између електрода и тла узрок велике разлике измерених и прорачунатих вредности отпорности распрострања уземљивача.

Очигледно је да су, у оваквим случајевима, конвенционалне методе за прорачун отпорности распрострања уземљивачких система наведене у поглављу 1.2 практично неупотребљиве. У доступним домаћим и страним стандардима и научно-стручној литератури нису постојале нити методе нити упрошћени аналитички изрази за прорачуне отпорности распрострања уземљивача помоћу којих би се уважио утицај несавршеног контакта између електрода и околног тла. Главни предмет истраживања у овој дисертацији представља развој методе за прорачун отпорности распрострања контурних уземљивача помоћу које би тај утицај могао да се уважи. Развијена метода је општа и лако је применљива и на друге типове уземљивача.

Као пример сложенијег уземљивачког система биће разматран типичан уземљивач далеководног стуба који представља комбинацију квадратних контурних уземљивача. Како се код таквих сложенијих уземљивачких система одвођење струје у околно тло са његових саставних елемената одвија отежано (у односу на ситуацију када је сваки од тих елемената самостално положен у тло), укупна отпорност распрострања уземљивачког система нешто је већа од отпорности еквивалентне паралелне везе отпорности распрострања појединачних елемената. У упрошћеним аналитичким изразима за израчунавање

укупне отпорности распрострања уземљивачког система овај ефекат се уважава коефицијентима међусобног утицаја између појединачних елемената [30,39]. У овој дисертацији посебна пажња биће посвећена утицају несавршеног контакта између електрода и околног тла на вредности коефицијената којима се приказује међусобни утицај појединачних контура, што такође није било разматрано у доступним домаћим и страним стандардима и научно-стручној литератури.

1.4 Употреба додатног материјала за смањење отпорности распрострања уземљивачких система

Раније је напоменуто да није увек лако постићи жељену (стандардима захтевану) вредност отпорности распрострања уземљивачког система, нарочито уколико је положен у тло велике специфичне отпорности и/или које формира лош контакт са његовим електродама.

У случајевима када се уземљивачки систем полаже у тло велике специфичне отпорности очигледно решење за постизање жељене отпорности распрострања је повећање његових спољних димензија и додавање нових елемената. Проблеме код оваквог решења могу да представљају, како немогућност извођења уземљивача жељених димензија (на пример, због ограничених димензија парцеле) и велико повећање инсталационих трошкова, тако и чињеница да није пожељно износити електрични потенцијал који се на површини тла појављује услед квара изван површине на којој је смештен штићени део електроенергетског система. Када терен то дозвољава, прибегава се техникама постављања додатних елемената (галвански повезаних са основним уземљивачким системом) у тло ниже електричне отпорности (уколико такво тло постоји у близини) [40] или њиховим дубоким полагањем до нивоа подземних вода (уколико постоје на предметној локацији) [41], чиме се избегава непотребно повећање димензија основног уземљивачког система у хоризонталној равни.

У случајевима када се уземљивачки систем полаже у тло које не формира савршен контакт са његовим електродама, проблем представља не само постизање жељене (стандардима захтеване) отпорности распрострања, него и непредвидљивост величине додатне контактне отпорности. У таквим случајевима може се појавити значајно повећање измерене (реалне) вредности његове

отпорности распростирања R у односу на теоријску вредност израчунату применом конвенционалних формула R_0 (коју ћемо у даљем тексту називати базном вредношћу). У таквим случајевима у пракси се користе разни додатни материјали који се постављају између електрода и тла са циљем елиминације контактне отпорности [5,37,38,42–53]. Последњих деценија, најбољи резултати су постигнути употребом бентонита као додатног материјала за смањење отпорности распростирања уземљивачких система [37,38,42–45]. Међутим, његова употреба може значајно повећати инсталационе трошкове, нарочито у државама у развоју које овај материјал морају да увозе, што додатно повећава његову цену [46]. У пракси је, у потрази за јефтиним и лако доступним материјалима који би могли да се употребе за смањење отпорности распростирања уземљивачких система, експериментисано са следећим материјалима:

- отпад од производње палиног уља и пепео од сагоревања дрвета и отпадних аутомобилских гума [5],
- отпадно блато из нафтних бушотина [37],
- прах од љуске кокоса [5,46,47]
- глина и прах од љуске пиринча [46,47],
- гранулирана шљака из високе пећи [48],
- пепео из термоелектрана [49], итд.

Постојала су два различита мишљења о томе која карактеристика додатног материјала је најбитнија, односно која његова карактеристика заправо обезбеђује елиминацију непожељне контактне отпорности из укупне отпорности распростирања уземљивача – неки истраживачи су сматрали да је то способност додатног материјала да побољша квалитет физичког контакта који се остварује између површине електрода уземљивача и околног тла [37,42], док су други сматрали да кључну улогу у елиминацији контактне отпорности има његова ниска специфична електрична отпорност [47–51]. Један од задатака ове дисертације био је спровођење анализе утицаја ове две карактеристике додатног материјала на отпорност распростирања контурног уземљивача. Циљ те анализе био је формирање јасних смерница о томе која карактеристика оваквог материјала је кључна за успешну елиминацију контактне отпорности, што може бити од помоћи инжењерима и истраживачима који трагају за новим погодним материјалима.

Резултатима експерименталних истраживања приказаним у [44] показано је да се потпуна елиминација контактне отпорности успешно постиже употребом релативно мале количине додатног материјала (нпр., довољно је поставити $0,02 \text{ m}^3$ бентонита по једном дужном метру уземљивачке траке). Међутим, иако се елиминацијом контактне отпорности постиже да се реална вредност отпорности распрострања уземљивачког система R сведе на теоријску базну вредност R_0 , уколико је тло, у које је уземљивачки систем стандардних конструкција и димензија постављен, карактерисано великом специфичном отпорношћу, дешава се да чак ни тада није могуће постићи жељену (стандардима захтевану) вредност његове отпорности распрострања. У таквим случајевима, може да се покуша да се вредност R додатно смањи у односу на вредност R_0 додавањем веће количине додатног материјала чија је специфична електрична отпорност ρ_{dm} мања од специфичне електричне отпорности околног тла. Међутим, процентуално смањење отпорности R у односу на базну вредност R_0 , које се може изразити формулом

$$\delta R(\%) = \frac{R_0 - R}{R_0} \cdot 100, \quad (1.1)$$

повећавањем запремине V додатног материјала достиже, при одређеној запремини, вредност која се веома мало повећава са даљим повећањем запремине додатног материјала, односно растућа функција $\delta R(V)$ повећањем запремине додатног материјала приближава се асимптотској вредности [50].

Пошто је при пројектовању, изградњи и употреби електроенергетског система неопходно у свакој ситуацији водити рачуна о томе да инвестициони [54] и оперативни [55] трошкови буду минимални, при употреби додатног материјала за смањење вредности R у односу на вредност R_0 , пројектант уземљивачког система и извођач радова морају да избегну употребу количина додатног материјала које се налазе у асимптотској области функције $\delta R(V)$. Међутим, у доступним домаћим и страним стандардима и научно-стручној литератури практично не постоје упрошћени аналитички изрази за прорачун отпорности распрострања уземљивача чије су електроде окружене различитим количинама додатних материјала, различитих специфичних електричних отпорности ρ_{dm} . Без

таквих аналитичких израза практично је немогуће извршити техно-економску анализу чији резултати би показали колика је оптимална количина додатног материјала која треба да буде употребљена на конкретном уземљивачу. Осим тога, недостатак поузданих улазних података такође може да буде проблем у спровођењу такве техно-економске анализе. Због тога су у претходних неколико година истраживачи који се баве овом проблематиком покушали да развију оптимизационе методе за одређивање теоријске оптималне количине (запремине V) додатног материјала, односно количине која обезбеђује теоријску максималну ефикасност употребе додатног материјала за смањење отпорности распростирања уземљивача.

За сада су понуђене само методе за одређивање теоријске максималне ефикасности употребе додатног материјала за смањење отпорности распростирања вертикалних цевних уземљивача [4,50,51]. Пошто су базиране на методама прорачуна отпорности распростирања уземљивача које су погодне само за решавање 2Д проблема, примена тих оптимизационих метода ограничена је само на ротационо симетричне уземљиваче (нпр., вертикални цевни уземљивач окружен цилиндром додатног материјала за смањење отпорности распростирања). Поменуте оптимизационе методе не могу се применити на комплексније уземљивачке системе положене у нехомогеном тлу, какав је, на пример, квадратни контурни уземљивач положен у двослојно тло и окружен додатним материјалом за смањење отпорности распростирања [37]. У таквим случајевима прорачун отпорности распростирања уземљивача не може да се спроведе свођењем на 2Д проблеме, нити методама базираним на теорији ликова [14,16,17,20,23,40,56]. Један од задатака ове дисертације био је спровођење анализе утицаја додатног материјала на отпорност распростирања квадратног контурног уземљивача положеног у двослојно тло [37] помоћу 3Д модела и формирање јасних смерница о томе како израчунати теоријску оптималну количину додатног материјала.

1.5 Употреба FEM-а за прорачун отпорности распрострања уземљивачких система

Иако је у [37] претпостављено да је узрок велике разлике између измерених и израчунатих вредности отпорности распрострања уземљивача несавршен контакт између електрода и тла, ова физичка појава није била теоријски истражена у поменутој референци, зато што је било немогуће моделовати несавршен контакт математичким техникама и софтверским алатима који су у то време били доступни. Из истог разлога, у доступним домаћим и страним стандардима и научно-стручној литератури нису постојале анализе и објашњења утицаја, како специфичне електричне отпорности додатног материјала и његове употребљене количине, тако и побољшања контакта услед постављања додатног материјала, на отпорност распрострања контурног уземљивача. У међувремену су, како развој методе коначних елемената (*finite element method* – FEM) и одговарајућих софтвера, тако и побољшање перформанси рачунара, омогућили 3Д моделовање малих запремина разних облика и физичких карактеристика у непосредној близини површине уземљивачких електрода, што је био предуслов за успешно спровођење анализе проблема несавршеног контакта између електрода и тла и употребе разних додатних материјала за смањење отпорности распрострања уземљивача.

FEM је нумеричка техника за израчунавање вредности физичких величина у оквиру ограничене запремине (домена) разматраног проблема. Базирана је на подели домена на мале под-домене (коначне елементе) помоћу којих се прецизно представљају, како сложена геометрија проблема, тако и различите карактеристике материјала појединих делова домена. Сваки коначни елемент представљен је карактеристикама материјала, стањима физичких величина у репрезентативним чворовима коначног елемента, граничним условима између суседних елемената, граничним условима на граници нумеричког домена и системом једначина које описују односе између физичких величина у оквиру разматраног проблема. То су једноставне алгебарске једначине којима се локално апроксимирају оригиналне сложеније (обично парцијалне диференцијалне) једначине. Системи једначина свих коначних елемената домена разматраног физичког проблема комбинују се у један свеобухватан систем који се решава

помоћу рачунара. Математичке основе FEM-а дате су у [57], док су објашњења о правилној употреби FEM-а у електромагнетици и електротехничкој инжењерској пракси дата редом у [58] и [59].

Примена FEM-а за анализу електричних карактеристика уземљивачких система положених у тлу нехомогене структуре детаљно је објашњена у [60]. Основна предност FEM-а у односу на стандардне методе је могућност прорачуна свих електричних карактеристика уземљивачког система било каквог геометријског облика и било којих димензија, положеног у тло било какве нехомогене структуре [61]. Поред тога, софтвери базирани на FEM-у поседују предност лаке презентације свих резултата прорачуна, и то како у оквиру целог модела, тако и у оквиру сваког његовог дела, што омогућава разматрање разних локалних ефеката.

Искуства су показала да при употреби FEM-а и других сродних прорачунских техника (као што су метода коначних разлика (*finite difference method* – FDM), метода коначних запремина (*finite volume method* – FVM) и метода граничних елемената (*boundary element method* – BEM) за прорачун електричних карактеристика уземљивачких система није неопходно делити домен посматраног проблема на превелик број коначних елемената да би се добили довољно прецизни резултати прорачуна [62,63], нарочито када су у питању стандардни практични инжењерски проблеми. Због тога су релативно скромни рачунарски ресурси довољни за спровођење анализа електричних појава код разних уземљивачких система, положених у тла разних структура, помоћу FEM симулација (уземљивачке контуре су анализиране у [22], мрежни уземљивачи у [61,64], вертикални цевни уземљивачи са додатним материјалом у [50], уземљивачи у вишеслојном тлу у [65], утицај локалних нехомогености тла на карактеристике уземљивача у [66], а међусобни утицај између галвански одвојених уземљивачких система у [67]). Њихова примена омогућава проверу, развој и унапређење упрошћених аналитичких израза који се користе у инжењерској пракси. У прошлости је за овакву намену коришћен скоро искључиво експериментални приступ. Међутим, добро поклапање резултата добијених експерименталним мерењима и FEM симулацијама [68–70] показало је да FEM симулације могу да се користе за исту намену равноправно са

експерименталним приступом. Због бројних потешкоћа које карактеришу експериментални приступ (цена, непоузданост улазних параметара, непрецизност мерних инструмената, грешке при мерењу, итд) последњих година многи истраживачи за овакву намену користе само FEM симулације [22,50,61,67].

1.6 Предмет истраживања и методологија

Предмет научне расправе у оквиру ове дисертације је развој методе за пројектовање оптималног уземљивача састављеног од једне или више галвански спојених квадратних контура (конструкције које одговарају типичном реалном уземљивачу далеководног стуба), са уважавањем, како несавршеног контакта између електрода и околног тла, тако и опције употребе додатног материјала за смањење контактне отпорности. При томе се тежило да развијена метода може да се употреби и за пројектовање оптималних уземљивача који се по типу разликују од разматраног. Још једном треба напоменути да у доступним домаћим и страним стандардима и научно-стручној литератури нису постојале нити методе нити упрошћени аналитички изрази за прорачуне отпорности распрострања уземљивача помоћу којих би наведени утицаји могли да се уваже.

Прво је показано да су, како FEM и одговарајући софтвери, тако и перформансе стандардних рачунара, довољно развијени да могу успешно да се користе као алат за 3Д моделовање експерименталне поставке из [37] (квадратног контурног уземљивача положеног у двослојно тло, са лошим контактом између електрода и тла или окруженог додатним материјалом за смањење отпорности распрострања). Несавршен контакт је моделован „постављањем“ ваздушних цепова између електрода и околног тла. Сви 3Д FEM прорачуни за потребе ове дисертације извршени су помоћу COMSOL Multiphysics 3.5a софтвера, инсталираног на персоналном рачунару опремљеном са 3,50 GB RAM-а и процесором са два језгра, сваки радне фреквенције 2,53 GHz.

Варирањем релевантних димензија елемената и карактеристика материјала у оквиру 3Д FEM модела и анализом резултата прорачуна добијених спровођењем великог броја рачунарских симулација, могуће је утврдити корелације између релевантних параметара. Те корелације се описују изразима који се најлакше

добиају обрадом резултата прорачуна применом методе најмањих квадрата (нпр., коришћењем софтвера Matlab и/или Excel).

Описаним поступком је анализиран утицај броја, величине и диспозиције ваздушних цепова, и то како на отпорност распрострања квадратног контурног уземљивача, тако и на расподелу потенцијала у околини уземљивача у случају квара. Кроз анализе резултата прорачуна утврђене су корелације између параметара помоћу којих се може описати квалитет оствареног контакта између електрода и околног тла и отпорности распрострања разматраних уземљивача.

На сличан начин је анализиран и објашњен утицај, како специфичне електричне отпорности додатног материјала, тако и побољшања контакта услед постављања додатног материјала, на отпорност распрострања контурног уземљивача, а затим и израђен алгоритам за утврђивање неопходних карактеристика додатног материјала.

Развијена је и општа метода за одређивање оптималне количине додатног материјала, базирана на 3Д FEM моделовању, нумеричкој анализи добијених резултата и концепту колена криве (математичке функције). Основ методе чини алгоритам за проналажење тачке колена криве, односно тачке која представља границу између асимптотске и преостале области криве релевантне за понашање система. У посматраном случају тачка колена криве $\delta R(V)$ представља тачку у којој се успоставља теоријски идеалан баланс између супротстављених циљева употребе минималне количине додатног материјала и постизања максималног смањења отпорности распрострања уземљивача. Овај концепт је усвојен пратећи позитивна инжењерска искуства при пројектовању система у другим техничких областима, у којима се у оптимизационим методологијама користи тачка колена криве (опште анализе пројектовања система помоћу концепта колена криве дате су у [71,72], употреба концепта колена криве у информационим технологијама објашњена је у [73,74], а његова употреба у хемијској технологији у [75]).

Пошто типичан класичан уземљивач далеководног стуба представља комбинацију квадратних контурних уземљивача, 3Д FEM моделовањем и нумеричком анализом добијених резултата, развијени су изрази за прорачун отпорности распрострања таквог уземљивача, као и изрази за прорачун

вредности коефицијената којима се описују међусобни утицаји појединачних контура. Тачност резултата добијених помоћу развијених израза поређена је са тачношћу резултата добијених конвенционалним методама датим у стандардима [32,33] и приручницима [34–36] (резултати добијени 3Д FEM моделовањем коришћени су као референтне вредности). Истим поступком разматран је и утицај несавршеног контакта између електрода и околног тла на вредности коефицијената којима се описују међусобни утицаји појединачних контура, а затим је израђен алгоритам за израчунавање отпорности распрострања (са уваженим ефектом несавршеног контакта) разматраног комплексног уземљивачког система.

Верификација развијене методе за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при израчунавању отпорности распрострања уземљивача типичног реалног далеководног стуба извршена је експериментом који је спроведен на умањеном моделу у лабораторији. Коришћена је електролитичка када напуњена водом и модели од бакарне жице са секвенцијално постављеним деловима изолационог материјала контролисане величине дуж жице (они су симулирали ваздушне џепове, односно несавршен контакт између електрода уземљивача и околног тла).

Одређивање оптималног уземљивача типичног реалног далеководног стуба, са уважавањем, како несавршеног контакта између електрода и околног тла, тако и опције употребе додатног материјала за смањење контактне отпорности, требало би да буде засновано на техно-економској анализи у оквиру које би се поредиле цене класичног уземљивача и оног код кога је употребљен додатни материјал, под условом да су им отпорности распрострања приближно исте, мање од захтеваних. У овој дисертацији развијени су сви алгоритми и упрошћени изрази неопходни за техно-економску анализу разматраног типа уземљивача. Сви поменути алгоритми и методе за развијање упрошћених израза, без којих оваква техно-економска анализа не може бити спроведена, општи су и базирани на 3Д FEM моделовању и нумеричкој анализи добијених резултата. Због тога се могу употребити и за пројектовање оптималних уземљивача који се по типу разликују од разматраног.

1.7 Структура докторске дисертације

У уводном поглављу је истакнута неопходност развоја метода и упрошћених аналитичких израза за прорачун отпорности распрострања уземљивачких система који се врши приликом њиховог пројектовања. Такође је истакнуто да није увек лако постићи жељену (стандардима захтевану) отпорност распрострања уземљивачког система, нарочито уколико је положен у тло велике специфичне отпорности и/или уколико оно формира лош контакт са електродама. Наглашено је да се у таквим случајевима у пракси користе разни додатни материјали који се постављају између електрода и тла са циљем елиминације контактне отпорности и смањења укупне отпорности распрострања уземљивачких система. На основу расположиве литературе и података, дат је кратак преглед конвенционалних метода за прорачун отпорности распрострања уземљивачких система и истакнута немогућност њихове употребе у условима, како несавршеног контакта између електрода и околног тла, тако и при употреби додатног материјала за смањење отпорности распрострања уземљивача. Наглашено је да су развој FEM-а, одговарајућих софтвера и перформанси рачунара, омогућили 3Д моделовање малих запремина разних облика и физичких карактеристика у непосредној близини површине уземљивачких електрода, што је представљало предуслов за успешно спровођење анализе проблема несавршеног контакта између електрода и тла и употребе разних додатних материјала. Објашњено је да су сви алгоритми и методе за развијање упрошћених израза који су представљени у овој дисертацији базирани на 3Д FEM моделовању и нумеричкој анализи добијених резултата. Они су неопходни за пројектовање оптималног уземљивача састављеног од једне или више галвански спојених квадратних контура (конструкције које одговарају типичном реалном уземљивачу далеководног стуба), са уважавањем, како несавршеног контакта између електрода и околног тла, тако и опције употребе додатног материјала за смањење контактне отпорности, а могу се употребити и за пројектовање оптималних уземљивача који се по типу разликују од разматраног.

Друго поглавље обрађује поступак формирања 3Д FEM модела разматраних квадратних контурних уземљивача из референце [37] и објашњава поступак прорачуна релевантних електричних карактеристика који се у оквиру рачунарске

симулације спроводи над формираним 3Д FEM моделом. У овом поглављу су дефинисане вредности свих улазних параметара неопходних за формирање 3Д FEM модела разматраних квадратних контурних уземљивача. Такође, описан је поступак моделовања, како несавршеног контакта, тако и додатног материјала за смањење отпорности распростирања, а дефинисани су и сви параметри којима се њихове карактеристике мењају у оквиру 3Д FEM модела.

Анализа утицаја лошег контакта између електрода и околног тла на електричне карактеристике разматраног класичног квадратног контурног уземљивача извршена је у трећем поглављу. Прво су представљени резултати мерења отпорности распростирања разматраних квадратних контурних уземљивача из референце [37], на основу којих је показано колики проблем може да представља контактна отпорност. Њиховим поређењем са резултатима добијеним 3Д FEM симулацијама потврђено је да је 3Д FEM моделовање проблема разматраних у овој дисертацији добро урађено и да су улазни параметри прорачуна добро одређени у [37]. Након тога, представљене су отпорности распростирања разматраног класичног квадратног контурног уземљивача добијене 3Д FEM симулацијама за разне вредности параметара којима се описује несавршен контакт између електрода уземљивача и околног тла. Анализом резултата је показано да је удео оног дела површине уземљивача који је покривен ваздушним џеповима (који не остварује контакт са околним тлом) параметар који најзначајније утиче на повећање контактне отпорности, а самим тим и на повећање укупне отпорности распростирања разматраног квадратног контурног уземљивача. У наставку поглавља, на основу резултата добијених 3Д FEM симулацијама (електричних потенцијала у свакој тачки запремине 3Д модела), разматран је утицај несавршеног контакта на расподелу потенцијала у околини уземљивача у случају квара. Утврђено је да структура материјала који је у непосредном додиру са површином електрода уземљивача може значајно да утиче на величину пада потенцијала на материјалу који се налази у непосредној близини електрода, а самим тим и на потенцијале у тлу и на површини тла у целој области на којој треба проверити напоне додира и корака. На основу спроведених анализа, развијена је метода за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла коју треба користити при прорачуну отпорности распростирања

разматраног контурног уземљивача, базирана на упрошћеном изразу који је добијен нумеричком анализом резултата рачунарских симулација спроведених на 3Д FEM моделима.

У четвртом поглављу извршена је анализа утицаја додатног материјала на отпорност распрострања разматраног квадратног контурног уземљивача. Прво је на основу резултата великог броја рачунарских симулација спроведених на 3Д FEM моделима разматраног контурног уземљивача (на којима су варирани специфична електрична отпорност додатног материјала и квалитет контакта који остварује са површином електрода уземљивача) анализиран утицај карактеристика додатног материјала на елиминацију контактне отпорности. На основу спроведених анализа израђен је и представљен општи алгоритам за одређивање неопходних карактеристика додатног материјала за елиминацију контактне отпорности.

У наставку четвртог поглавља, на основу резултата великог броја рачунарских симулација спроведених на 3Д FEM моделима разматраног контурног уземљивача (на којима су варирани специфична електрична отпорност додатног материјала и његова употребљена запремина), анализиран је утицај додатног материјала на смањење реалне вредности отпорности распрострања уземљивачког система R у односу на теоријску (базну) вредност R_0 . Приказани су резултати 3Д FEM симулација којима је показано да зависност процентуалног смањења отпорности R у односу на базну вредност R_0 од употребљене запремине додатног материјала, $\delta R(V)$, улази у асимптотску област за веће вредности V , чак и када је додатни материјал идеалан проводник. Представљен је математички концепт одређивања координата тачке колена криве, која представља границу између асимптотског и осталог дела функције $\delta R(V)$, након чега су нумеричком анализом резултата рачунарских симулација спроведених на 3Д FEM моделима одређене континуалне функције $\delta R(V)$ и координате тачака колена кривих за неколико различитих додатних материјала употребљених на разматраном уземљивачу. Инжењерском анализом, спроведеном над добијеним резултатима, извршено је одређивање оптималне употребљене запремине суспензије бентонита за разматрани уземљивач. На основу спроведених анализа израђен је и

представљен општи алгоритам за процену оптималне количине додатног материјала за смањење отпорности распрострања уземљивача.

У петом поглављу је на примеру уземљивача састављеног од једне или више галвански спојених квадратних контура (конструкције које одговарају типичном уземљивачу далеководног стуба) представљена метода за развијање упрошћених израза за израчунавање вредности R_0 , која се може применити на разне типове уземљивача. Метода је базирана на нумеричкој обради резултата добијених 3Д FEM симулацијама, а упрошћени изрази за израчунавање вредности R_0 базирани су на коефицијентима којима се описује међусобни утицај појединачних елемената уземљивача.

Прво је анализом података датих у Прилогу А, који се односе на 72 различите комбинације димензија 110 kV далеководног стуба, његовог темеља и уземљивачког система, утврђен распон вредности релевантних конструкционих параметара за које је развијен скуп упрошћених израза за израчунавање вредности R_0 . Затим је дат преглед постојећих метода и упрошћених аналитичких израза, датих у стандардима [32,33] и приручницима [34–36], који се могу употребити за израчунавање отпорности R_0 уземљивача састављеног од једне или више галвански спојених контура (методе из [36] прецизније су представљене у Прилогу Б). У наставку је укратко објашњено формирање 3Д FEM модела разматраног уземљивачког система, које се није битно разликовало од процедуре описане у поглављу 2.2. Варирањем вредности релевантних конструкционих параметара разматраног уземљивачког система (у оквиру утврђених распона) и анализом резултата прорачуна изведени су, како нова формула за израчунавање теоријске (базне) отпорности усамљене контуре у хомогеном тлу, тако и скуп израза за израчунавање теоријске (базне) отпорности уземљивача састављеног од више галвански спојених квадратних контура у хомогеном тлу. Тачност резултата добијених помоћу изведених формула поређена је са тачношћу резултата добијених конвенционалним методама датим у стандардима [32,33] и приручницима [34–36] (резултати добијени 3Д FEM моделовањем коришћени су као референтне вредности). На крају петог поглавља извршена је анализа добијених резултата, а разматране су и разне могућности и ограничења употребе изведених формула. Такође, дате су препоруке за њихово даље унапређење.

У шестом поглављу је приказан општи алгоритам за израчунавање укупне отпорности распрострањања комплексних уземљивачких система, R_T , уз уважавање контактне отпорности. Предложени алгоритам је базиран на додатном тест мерењу, скупу упрошћених израза за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при прорачуну отпорности распрострањања уземљивача (поглавље 3) и скупу упрошћених израза за израчунавање теоријске (базне) отпорности распрострањања, R_0 , сложених уземљивачких система (поглавље 5). Прво је показано да упрошћени изрази из поглавља 3 и 5 могу да се употребе за израчунавање вредности R_T квадратних контурних уземљивача разних димензија, уколико су положени у тло познатих карактеристика (којима се описује квалитет контакта који тло формира са електродама), као и да се при томе очекује веома висока тачност добијених резултата. Затим је показано како тло непознатих карактеристика у погледу остваривања контакта са електродама може да се представи параметрима који се процењује на основу резултата тест мерења. Потврђено је да је коришћењем тих параметара и употребом упрошћених израза из поглавља 3 и 5 могуће, са задовољавајућом тачношћу, одредити укупну отпорност распрострањања, квадратног контурног уземљивача, тако и сложеног уземљивачког система који представља комбинацију више квадратних контура (која одговара уземљивачком систему типичног 110 kV далеководног стуба). Провера тачности изведених формула и поузданости предложеног алгоритма извршена је поређењем добијених резултата са резултатима добијеним рачунарским симулацијама спроведеним на 3Д FEM моделима. Осим тога, показано је да и модификоване формуле за прорачун укупне отпорности распрострањања, R_T , разматраног уземљивачког система, изведене помоћу Методе Б.1 приказане у Прилогу Б, могу да се примене у оквиру развијеног алгоритма, а затим је и њихова тачност проверена поређењем добијених резултата са резултатима добијеним рачунарским симулацијама спроведеним на 3Д FEM моделима. Анализом добијених резултата констатована је висока поузданост предложеног алгоритма, уз задовољавајућу тачност израза изведених помоћу Методе Б.1 и изузетну тачност изведених упрошћених израза из поглавља 3 и 5.

Развијене методе за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при израчунавању отпорности распрострањања

уземљивача типичног далеководног стуба верификоване су и експериментом који је спроведен на умањеном моделу у лабораторији. У поглављу 7 је описана коришћена експериментална поставка са електролитичком кадом напуњеном водом и умањеним моделима уземљивача израђеним од бакарне жице. Несавршен контакт између електрода уземљивача и околног тла моделован је секвенцијално постављеним деловима изолационог материјала контролисане величине дуж бакарне жице. Прво су детаљно описани конструкција и димензије умањених модела, а затим и конструкција и димензије електролитичке каде. Опрема коришћена за симулирање квара у електроенергетском систему и мерна апаратура такође су детаљно описане.

У наставку седмог поглавља описан је поступак формирања 3Д FEM модела разматране лабораторијске експерименталне поставке, јер је један од циљева био да се изврши још једно поређење резултата добијених мерењима у оквиру експеримента и резултата добијених рачунарским симулацијама спроведеним на 3Д FEM моделима. Добијени резултати, који су упоредно представљени у поглављу 7 и Прилогу В, још једном су потврдили да је 3Д FEM моделовање у оквиру проблематике разматране у овој дисертацији добро урађено. Релативно мало одступање отпорности распрострања одређених експерименталним мерењима у односу на одговарајуће отпорности израчунате 3Д FEM симулацијама објашњено је анализом физичких појава примећених током експеримента.

Провера тачности изведених формула (приказаних у поглављима 3 и 5) и поузданости предложеног алгорита (приказаног у поглављу 6) извршена је поређењем резултата добијених њиховом употребом са резултатима мерења добијеним у оквиру описаног експеримента са умањеним жичаним моделима и електролитичком кадом. Иста провера је извршена и за примену предложеног алгорита у комбинацији са формулама које су за разматрани случај изведене коришћењем Методе Б.1 (Прилог Б). Анализом добијених резултата констатована је поузданост предложеног алгорита, било у комбинацији са формулама из поглавља 3 и 5, било коришћењем формула из Прилога Б.

У осмом поглављу је приказана методологија за одређивање оптималног уземљивача, са уважавањем, како несавршеног контакта између електрода и

околног тла, тако и опције употребе додатног материјала за смањење контактне отпорности. Објашњени су проблеми који могу да настану при инсталирању уземљивача услед недостатка адекватних метода прорачуна, а који за последицу имају непотребно повећање укупне суме инвестиционих трошкова предвиђене иницијалним пројектом (због предимензионисаног уземљивача или употребе превише додатног материјала, као и додатних радних сати ангажовања људи и опреме). Развијен је и приказан општи алгоритам за пројектовање оптималног уземљивача у описаним условима, заснован на техно-економској анализи у оквиру које се пореде инсталациони трошкови уземљивача чија је иницијална конструкција модификована на разне начине, под условом да се њима постигну приближно исте отпорности распростирања (наравно, мање од захтеваних). У дисертацији су развијени сви алгоритми и упрошћени изрази неопходни за спровођење такве техно-економске анализе при пројектовању оптималног уземљивача састављеног од једне или више галвански спојених квадратних контура. При томе треба истаћи да се, будући да су општи, могу употребити и за пројектовање оптималних уземљивача који се по типу разликују од разматраног.

На крају рада, у оквиру закључног поглавља, сажето су приказани сви важнији резултати истраживања у оквиру дисертације, као и доприноси дисертације на пољу пројектовања оптималног уземљивача састављеног од једне или више галвански спојених квадратних контура. Изведени су најважнији закључци и на основу њих дате смернице за даља истраживања у овој области.

2 3Д FEM МОДЕЛОВАЊЕ КВАДРАТНИХ КОНТУРНИХ УЗЕМЉИВАЧА

Раније је речено да су у референци [37] представљени резултати мерења отпорности распрострањања квадратних контурних уземљивача (како класичних, тако и оних са слојевима различитих додатних материјала постављених између околног тла и електрода уземљивача), положених у двослојно тло код кога је горњи слој, у коме су уземљивачи положени, карактерисала структура која је у великој мери онемогућавала добар контакт са електродама уземљивача. У циљу анализе поменутих резултата, иста експериментална поставка је моделована применом 3Д FEM-а. На основу резултата великог броја рачунарских симулација спроведених на 3Д моделу, анализиран је и објашњен утицај лошег контакта између електрода контурног уземљивача и околног тла, и то како на његову отпорност распрострањања, тако и на расподелу потенцијала у околини уземљивача у случају квара. Осим наведеног, на основу резултата великог броја рачунарских симулација спроведених на 3Д моделу, анализирани су и објашњени утицаји, како специфичне електричне отпорности додатног материјала и његове количине, тако и побољшања контакта услед постављања додатног материјала између околног тла и електрода контурног уземљивача, на његову отпорност распрострањања.

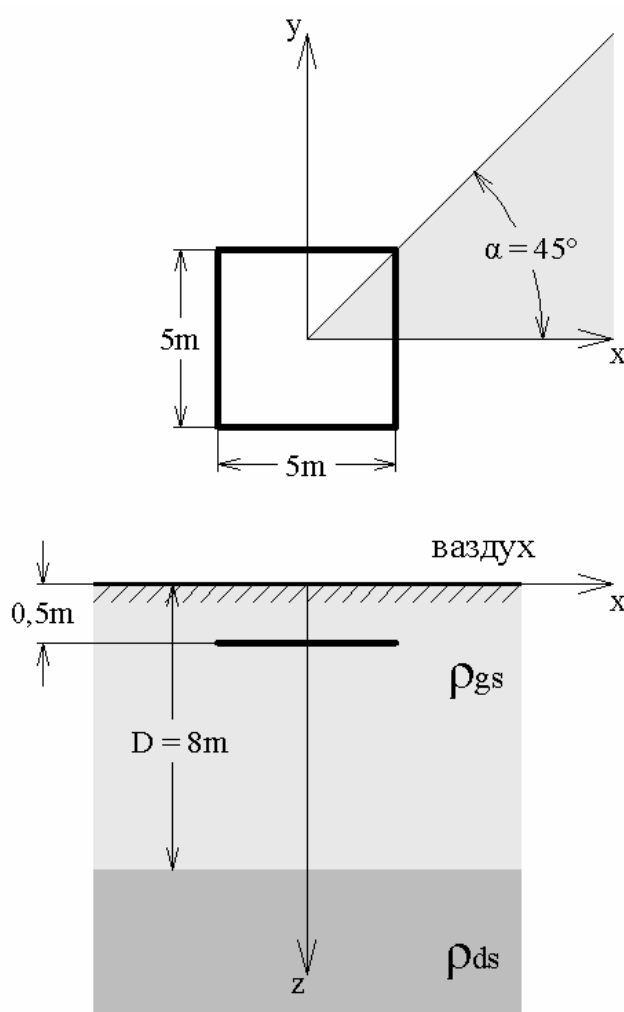
2.1 Улазни параметри за 3Д FEM моделовање разматраних квадратних контурних уземљивача

Сви улазни параметри неопходни за 3Д FEM моделовање разматраних квадратних контурних уземљивача преузети су из референце [37], у којој су експериментална поставка и процедура мерења детаљно објашњене.

Разматрани квадратни контурни уземљивачи били су постављени на локацији бившег каменолома, удаљеног 50 km од Београда. Она је изабрана зато што је довољно удаљена од најближих зграда и било каквих електричних инсталација, чиме је елиминисан утицај било каквих спољних (лутајућих) електричних струја које би негативно утицале на тачност мерења. Осим тога,

структура тла је у електричном смислу била практично идентична на целој локацији.

Мерењима спроведеним Венеровом методом [76], и тумачењем резултата мерења помоћу процедуре из референце [77], утврђено је да терен одликује двослојна структура тла, дубине горњег слоја $D = 8 \text{ m}$ и специфичних електричних отпорности $\rho_{gs} = 170 \Omega\text{m}$ и $\rho_{ds} = 75 \Omega\text{m}$. У горњи слој, који је био углавном од камените структуре, положени су разматрани квадратни контурни уземљивачи на дубину од $0,5 \text{ m}$ (сл. 2.1).

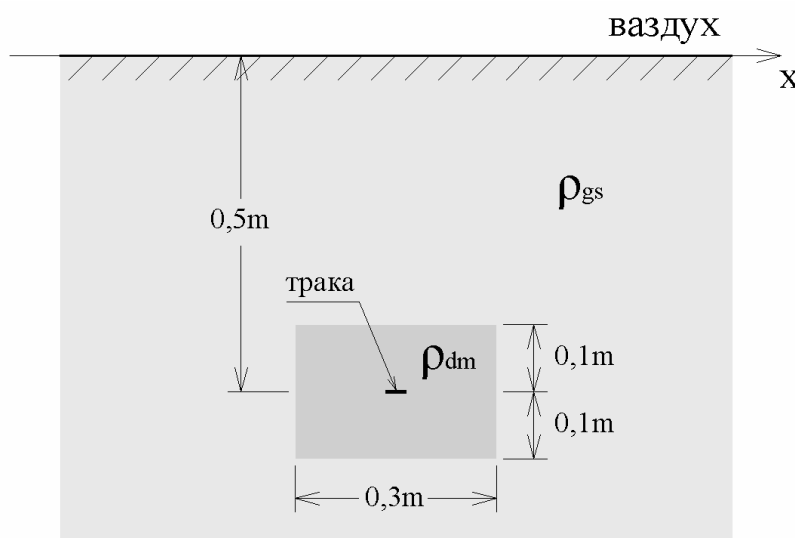


Сл. 2.1 – Разматрани квадратни контурни уземљивач положен у двослојно тло

Инсталиране квадратне контуре биле су димензија $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ и израђене од поцинковане челичне траке правоугаоног попречног пресека ($30 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$). Уземљивачи наведених димензија користе се као делови уземљивачких система

далеководних стубова 35 kV мреже или дистрибутивних трансформаторских станица 10/0,4 kV.

У случају класичног квадратног контурног уземљивача, канал у коме је уземљивач био положен једноставно је био затрпан ископаним материјалом, карактерисаним структуром која је у великој мери онемогућавала добар контакт са електродама уземљивача. На истој локацији, на међусобном растојању од око 50 m, постављен је још један идентичан квадратни контурни уземљивач, али је у циљу смањења контактне отпорности у канал у који је уземљивач био положен сипано $1,2 \text{ m}^3$ суспензије бентонита (специфичне електричне отпорности $\rho_{\text{dm}} = \rho_{\text{bent}} = 2,5 \Omega\text{m}$). Пошто је за стабилизацију суспензије бентонита потребан временски период од око 24 h, канал је сутрадан до врха допуњен ископаним материјалом. Попречни пресек на коме се види на који начин суспензија бентонита (додатни материјал за смањење контактне отпорности) окружује уземљивачку траку приказан је на сл. 2.2.



Сл. 2.2 – Уземљивачка трака разматраног квадратног контурног уземљивача окружена суспензијом бентонита

На истој локацији је инсталиран и трећи идентичан квадратни контурни уземљивач, у чији канал је, поново у циљу смањења контактне отпорности, сипано $1,4 \text{ m}^3$ отпадног блата из нафтних бушотина. Пошто су резултати мерења отпорности распрострања били практично идентични за уземљивач окружен суспензијом бентонита и уземљивач окружен отпадним блатом из нафтних

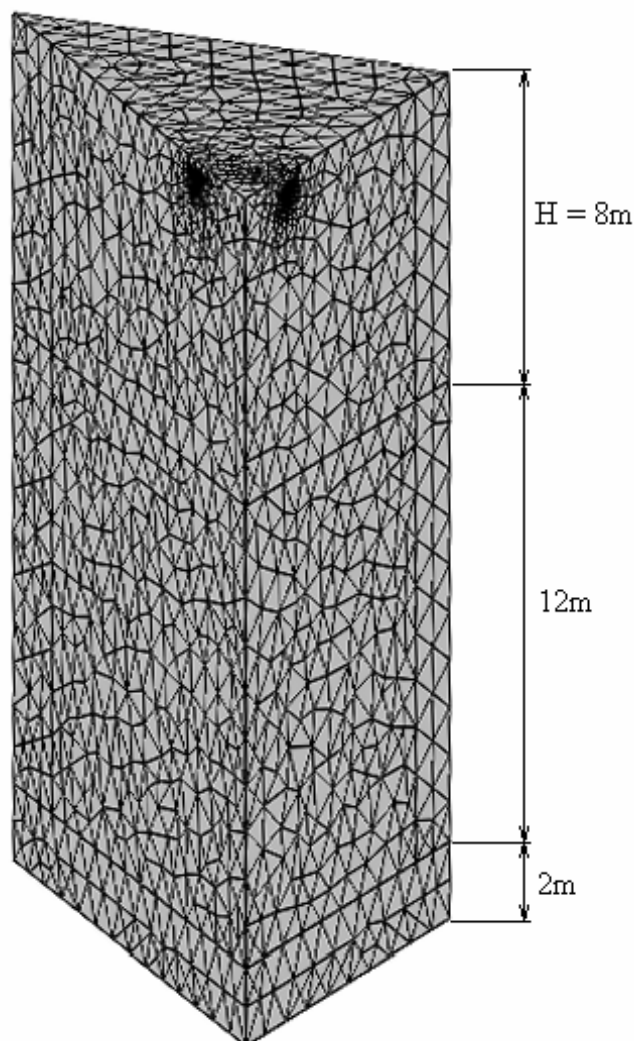
бушотина (које у свом саставу садржи активирани бентонит), трећи уземљивач није био посебно разматран у овој дисертацији.

2.2 Израда 3Д FEM модела разматраних квадратних контурних уземљивача и опис методе прорачуна

За потребе ове дисертације 3Д FEM моделовање вршено је на сличан начин као у референцама [60,64–66]. У разматраном случају, иницијални домен модела (ограничена запремина тла на посматраној локацији) била је коцка ($20\text{ m} \times 20\text{ m} \times 20\text{ m}$), са напред описаним квадратним контурним уземљивачем постављеним тако да се вертикалне осе симетрија уземљивача и домена међусобно поклапају. Уземљивач је постављен на дубину од 0,5 m (као на сл. 2.1), а моделован је као под-домен са својим реалним димензијама и електричним својствима (другачије него у референцама [60,64–66], у којима је уземљивач моделован нивозима блиских еквидистантних еквипотенцијалних репрезентативних чворова коначних елемената, уз потпуно занемарење његових димензија и електричних својстава). Карактеристике сваког слоја тла дефинисане су одговарајућом специфичном електричном проводношћу под-домена којим је представљен. Мрежа коначних елемената (*finite element mesh*) целог домена састављена је од тетраедара. Свакој страни коцке (осим горњој, која представља раздвојну површ између земље и ваздуха) додат је зид (под-домен) дебљине 2 m, састављен од посебних „бесконачних“ коначних елемената [78], такође тетраедара, којима се симулира распрострањање електричног поља ка бесконачно удаљеној референтној земљи на нултом потенцијалу. Због симетрије (постоје 4 осе симетрије које припадају равни квадрата) било је могуће као финални модел (сл. 2.3) за прорачун користити само једну осмину описаног модела, троугаоног попречног пресека (област означена са $\alpha = 45^\circ$ на сл. 2.1). Његова дубина је $20 + 2 = 22\text{ m}$. Коришћењем оваквог коначног модела направљене су значајне уштеде рачунарских ресурса и постигнута већа тачност прорачуна.

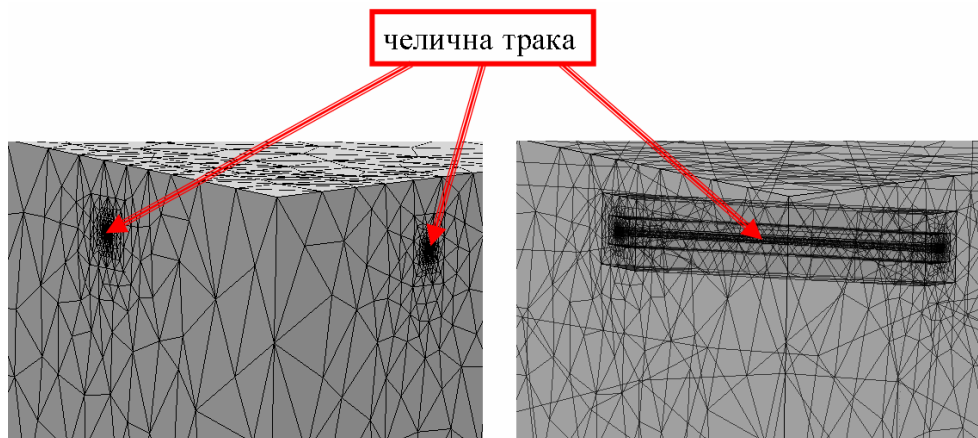
У свим 3Д FEM симулацијама разматраног контурног уземљивача, којима су анализирани утицаји лошег контакта и додатног материјала на његове електричне карактеристике, коришћен је модел приказан на сл. 2.3. У зависности од потреба,

модел је садржао од 100000 до 220000 тетраедарних коначних елемената, чиме је постигнута висока тачност израчунатих резултата.



Сл. 2.3 – Коначни 3Д FEM модел разматраног квадратног контурног уземљивача (осмина иницијалног модела)

На сл. 2.4 приказан је крупан план детаља коначног модела који садржи једну осмину разматраног квадратног контурног уземљивача (односно 2,5 m челичне траке). У близини челичне траке коришћени су коначни елементи веома малих димензија (дужине страница тетраедарних коначних елемената биле су у распону 2–10 mm, а у зависности од потреба симулације). Димензије коначних елемената су повећаване са повећањем њихове удаљености од траке.



Сл. 2.4 – Крупан план детаља коначног модела који садржи челичну траку (лево) и исти детаљ са повећаном транспарентношћу (десно)

За сваки коначни елемент важе следеће формуле:

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (2.1)$$

$$\vec{E} = -\nabla \varphi \quad (2.2)$$

$$\vec{J} = \vec{E} / \rho \quad (2.3)$$

$$\varphi = N \cdot \varphi_e \quad (2.4)$$

у којима су:

- φ електрични потенцијал било које тачке унутар коначног елемента, укључујући и тачке на бочним странама елемента,
- φ_e вектор електричних потенцијала у репрезентативним чворовима коначног елемента,
- N корелациона матрица коначног елемента (функција облика),
- \vec{E} вектор јачине електричног поља,
- \vec{J} вектор густине струје, и
- ρ специфична електрична отпорност материјала унутар коначног елемента.

За посматрани случај усвојени су следећи гранични услови:

$$\varphi_{e0} = 200 \text{ V} \quad (2.5)$$

$$\varphi_{e\text{inf}} = 0 \quad (2.6)$$

$$E_{1t} = E_{2t} \quad (2.7)$$

$$E_{1n}/\rho_1 = E_{2n}/\rho_2 \quad (2.8)$$

где су:

Φ_{e0} електрични потенцијал уземљивача,

Φ_{einf} електрични потенцијал спољних бочних страна зидова од „бесконачних“ коначних елемената (референтна земља),

E_{1t} , E_{2t} и E_{1n} , E_{2n} редом тангенцијалне и нормалне компоненте вектора електричног поља на раздвојној површини два суседна коначна елемента, и

ρ_1 и ρ_2 специфичне електричне отпорности материјала унутар два суседна коначна елемента.

На основу формула (2.1)–(2.8) рачунар израчунава електричне потенцијале, како репрезентативних чворова коначних елемената, тако и било које тачке у оквиру моделованог домена (сл. 2.5).

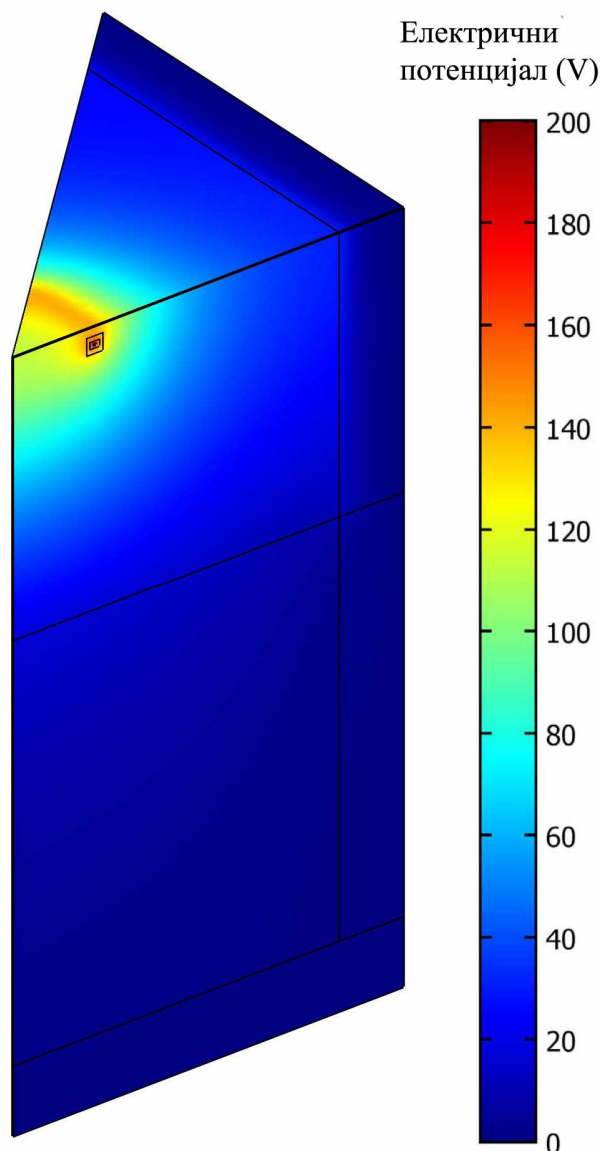
Такође, израчунавају се и све три компоненте вектора густине струје у свакој тачки домена модела, на основу чега може да се одреди укупна јачина струје, I , која се одводи са уземљивача у околно тло:

$$I = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad (2.9)$$

(у описаном моделовању S је било која затворена површ која обухвата цео уземљивач).

На основу израчунате јачине струје, лако је одредити отпорност распрострањања уземљивача, R , помоћу следеће формуле:

$$R = \frac{\Phi_{e0} - \Phi_{einf}}{I}. \quad (2.10)$$



Сл. 2.5 – Приказ израчунатих електричних потенцијала у свакој тачки домена модела (осмина иницијалног модела)

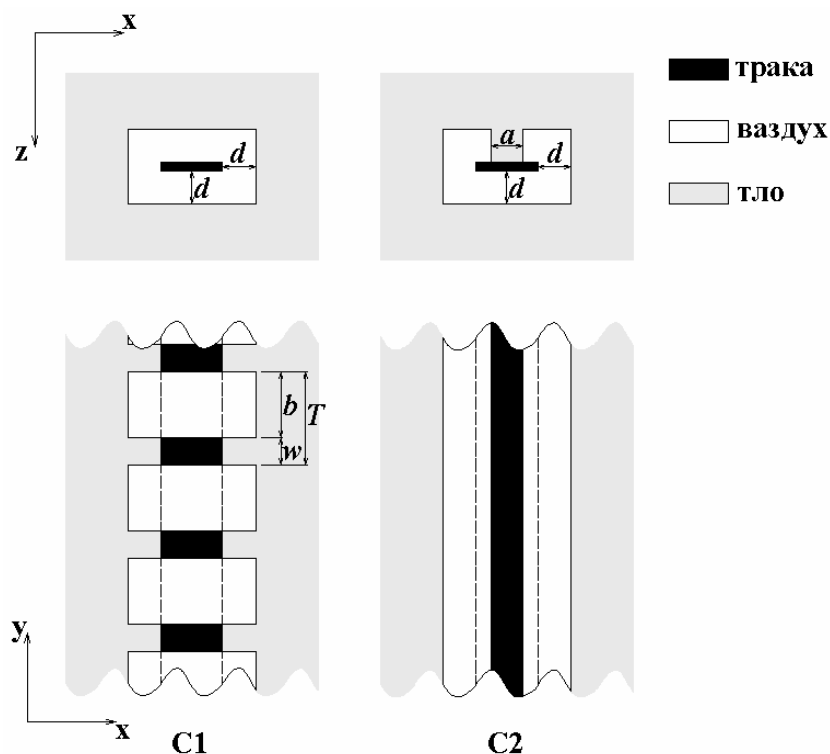
2.3 Моделовање несавршеног контакта и додатног материјала за смањење отпорности распрострањања

Несавршен контакт је моделован „постављањем“ ваздушних џепова (под-домена са електричним карактеристикама ваздуха) између електрода и околног тла. Коришћена су следећа два основна концепта постављања ваздушних џепова дуж уземљивачке траке (C1 и C2, приказана на сл. 2.6):

1. ваздушни џепови дебљине d и дужине b , који у потпуности спречавају контакт траке са околним тлом, постављени су

секвенцијално, са секвенцом дужине T , око уземљивачке траке дуж целог уземљивача, док је контакт траке и околног тла идеалан на дужини w у оквиру сваке секвенце (на сл. 2.6 – C1 приказан је попречни пресек, у xz равни, моделованог ваздушног цепа који окружује челичну траку, као и попречни пресек дела челичне траке у xy равни, на коме се види подужна расподела ваздушних цепова дуж траке),

2. ваздушни цеп дебљине d постављен је континуално дуж целе уземљивачке траке, али тако да трака на целој дужини остварује идеалан контакт са околним тлом само на ширини a , док ваздушни цеп у потпуности спречава контакт остатка површине траке са околним тлом (на сл. 2.6 – C2 приказани су попречни пресеци оваквог ваздушног цепа у xz и xy равнима).



Сл. 2.6 – Шематски приказ два основна концепта постављања ваздушних цепова дуж уземљивачке траке (C1 и C2)

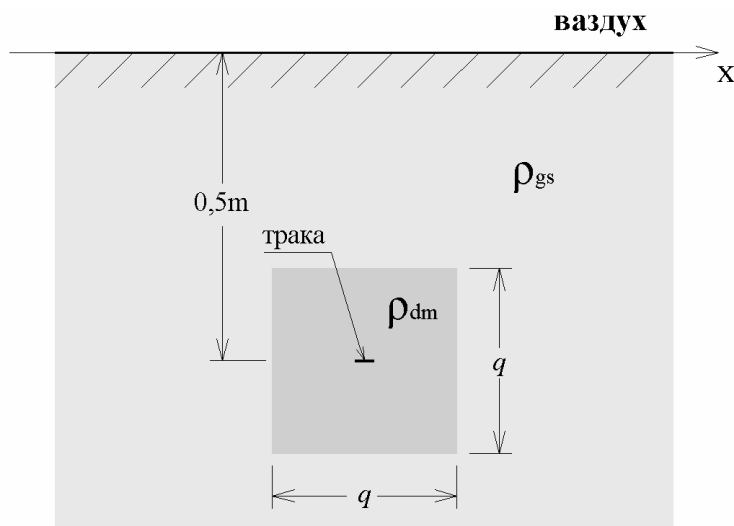
Први концепт симулира ситуацију у којој је материјал који окружује уземљивачку траку састављен од великих делова (нпр. камење) који због своје

величине и чврстине не могу да се спакују уз траку тако да испуне сав простор око ње и остваре потпун контакт са њеном површином. Услед тога се формирају велики ваздушни џепови у простору непосредно уз траку, који спречавају одвођење струје са делова траке који не остварују физички контакт са околним материјалом.

Други концепт симулира ситуацију у којој је материјал који окружује уземљивачку траку састављен од малих делова (нпр. песак) који захваљујући својим малим димензијама могу да се спакују уз траку тако да привидно испуне сав простор око ње и не формирају велике ваздушне џепове, али, због своје чврстине, на микроскопском нивоу ипак стварају ваздушне џепове који покривају велики део површине уземљивачке траке. Пошто је практично немогуће моделовати преостале микроскопске површине уземљивачке траке (које остварују идеалан контакт са околним тлом), оне су при моделовању интегрисане у правоугаони сегмент ширине a на површини сваке траке (сл. 2.6 – С2).

При анализи спроведеној са циљем да се утврди која је карактеристика додатног материјала кључна за успешно смањење контактне отпорности, додатни материјал је моделован под-доменом дефинисаним специфичном електричном отпорношћу ρ_{dm} , постављеним као на сл. 2.2. За анализу утицаја специфичне електричне отпорности додатног материјала и његове количине на смањење отпорности распрострања разматраног контурног уземљивача, додатни материјал је моделован под-доменом приказаним на сл. 2.7, са могућношћу варирања употребљене запремине додатног материјала варирањем димензије q .

Варирањем улазних параметара при моделовању несавршеног контакта и додатног материјала намењеног смањењу отпорности распрострања, створени су услови да се на основу резултата великог броја рачунарских симулација спроведених на 3Д моделима анализира и објасни њихов утицај на електричне карактеристике разматраног квадратног контурног уземљивача. Осим параметара a , b , d и w са сл. 2.6, q са сл. 2.7 и ρ_{dm} са сл. 2.2 и сл. 2.7, варирани су и број ваздушних џепова дуж обима разматраног квадратног контурног уземљивача, n , и удео дела површине уземљивача који је окружен ваздушним џеповима, F .



Сл. 2.7 – Уземљивачка трака разматраног квадратног контурног уземљивача окружена додатним материјалом

За концепт С1 параметар F се рачуна помоћу израза:

$$F(\%) = \frac{b}{T} \cdot 100 = \frac{b}{b+w} \cdot 100, \quad (2.11)$$

у коме је параметар T одређен изразом:

$$T = \frac{L_T}{n} \quad (2.12)$$

(L_T је обим разматраног квадратног контурног уземљивача (20 m)).

За концепт С2 параметар F се рачуна помоћу израза:

$$F(\%) = \frac{a}{p} \cdot 100 \quad (2.13)$$

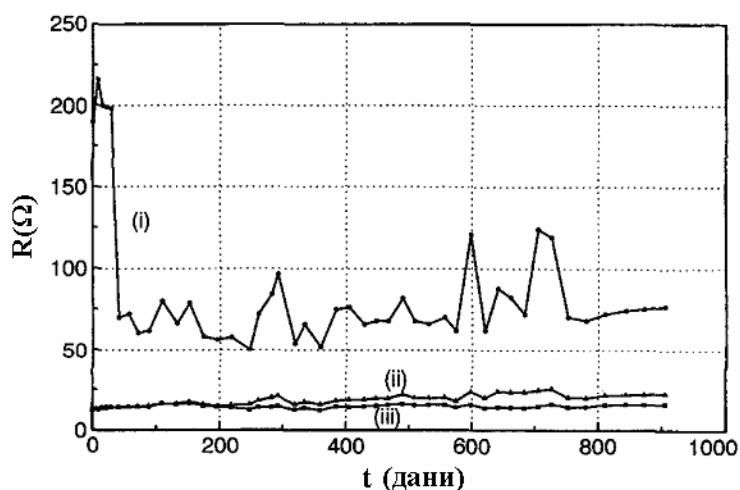
у коме је p обим попречног пресека челичне траке разматраног квадратног контурног уземљивача ($p = 2 \times (30 \text{ mm} + 4 \text{ mm}) = 68 \cdot 10^{-3} \text{ m}$).

Осим наведеног, при распоређивању ваздушних цепова код концепта С1 постојале су две могућности – да углови квадратне контуре буду покривени ваздушним цевовима или да остварују идеалан контакт са околним тлом. Утицај обе могућности на отпорност распростирања разматраног квадратног контурног уземљивача такође је размотрен.

3 АНАЛИЗА УТИЦАЈА ЛОШЕГ КОНТАКТА ИЗМЕЂУ ЕЛЕКТРОДА И ОКОЛНОГ ТЛА НА ЕЛЕКТРИЧНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ РАЗМАТРАНОГ КЛАСИЧНОГ КВАДРАТНОГ КОНТУРНОГ УЗЕМЉИВАЧА

3.1 Резултати мерења отпорности распрострања разматраних квадратних контурних уземљивача

У раду [37] представљени су резултати мерења отпорности распрострања квадратних контурних уземљивача описаних у поглављу 2.1 који су прикупљани у периоду од 30 месеци (сл. 3.1). За њихово мерење употребљена је метода пада потенцијала (*fall-of-potential method*) [79].



Сл. 3.1 – Измерене отпорности распрострања разматраних квадратних контурних уземљивача: (i) класичан уземљивач; (ii) уземљивач са отпадним блатом из нафтних бушотина; (iii) уземљивач са суспензијом бентонита (преузето из [37])

На сл. 3.1 могу се видети велике варијације измерених отпорности распрострања класичног уземљивача (од 50,2 Ω до 216 Ω), иако су у односу на њих варијације специфичне отпорности тла биле практично занемарљиве (што се види по релативно малим варијацијама отпорности распрострања уземљивача са додатним материјалима намењеним елиминацији контактне отпорности). Приказани резултати потврђују претпоставку да је лош контакт између електрода

и тла, односно структура материјала у простору око уземљивачке траке који на сл. 2.2 заузима додатни материјал, узрок велике разлике измерених и израчунатих вредности отпорности распростирања уземљивача у разматраном случају.

Користећи улазне параметре из поглавља 2.1 који су одговарали 247. дану мерења, рачунарским симулацијама спроведеним на 3Д FEM моделу израчунате су следеће вредности: $R_0 = 14,85 \Omega$ за класичан уземљивач са претпостављеним идеалним контактом између електрода и околног тла (што одговара теоријској вредности израчунатој применом конвенционалних формула – базној вредности) и $R = 11,5 \Omega$ за уземљивач са суспензијом бентонита. У раду [37] је наглашено да су одговарајуће вредности отпорности распростирања разматраних уземљивача, израчунате применом методе из [23], уз занемаривање специфичне електричне отпорности суспензије бентонита и претпостављајући њен кружни попречни пресек уместо правоугаоног (какав је на сл. 2.2), редом износиле $R_0 = 14,6 \Omega$ и $R = 11,2 \Omega$. Одговарајуће вредности отпорности распростирања разматраних уземљивача, измерене 247. дана, износиле су редом $R = 50,2 \Omega$ и $R = 12,5 \Omega$.

Разлика измерене вредности отпорности распростирања уземљивача са суспензијом бентонита од само 8,7% у односу на вредности добијене 3Д FEM симулацијама, као и веома добро поклапање резултата добијених 3Д FEM симулацијама са резултатима добијеним применом методе из [23], потврђују да је 3Д FEM моделовање проблема разматраних у овој дисертацији добро урађено. Осим тога, представљени подаци потврђују да су улазни параметри прорачуна добро одређени у [37] и да велика разлика између измерене и израчунате вредности отпорности распростирања класичног уземљивача не може бити приписана лоше одређеним улазним параметрима. Постојање ове мале разлике између измерених и израчунатих вредности отпорности распростирања уземљивача са суспензијом бентонита може се приписати следећим могућностима:

1. дистрибуција суспензије бентонита око уземљивачке траке није била униформна дуж целог обима уземљивача и одступала је од оне приказане на сл. 2.2,
2. реална структура тла је била сложенија од претпостављене двослојне структуре (сл. 2.1) која је коришћена при изради 3Д FEM модела, и

3. претпоставка о савршеном контакту између суспензије бентонита и околног тла, која је усвојена у свим прорачунима, није у потпуности тачна.

У сваком случају, наведене непрецизности, као и варијације специфичне отпорности тла, практично су занемарљиве у односу на варијације измерене вредности отпорности распростирања класичног уземљивача (које су веће од 238% до 1354% у односу на резултат добијен 3Д FEM симулацијом). Због тога су и биле занемарене у даљим разматрањима, којима је утврђено који параметар којим се описује лош контакт између електрода и околног тла има највећи утицај на повећање контактне отпорности.

3.2 Утицај параметара помоћу којих се описује несавршен контакт на отпорност распростирања разматраног уземљивача

3.2.1 Отпорности распростирања добијене 3Д FEM симулацијама

Различити примери несавршеног контакта у 3Д FEM моделима настали су коришћењем оба основна концепта постављања ваздушних цепова дуж уземљивачке траке (C1 и C2, приказаних на сл. 2.6), варирањем дебљине ваздушних цепова, d (сл. 2.6), њиховог броја дуж обима разматраног квадратног контурног уземљивача, n , и удела површине уземљивача који је покривен ваздушним цевовима, F (његово варирање постиже се варирањем димензија a , b и w са сл. 2.6). За сваку комбинацију улазних параметара, 3Д FEM симулацијом израчунавана је отпорност распростирања $R(\Omega)$ разматраног квадратног контурног уземљивача. Табела 3.1 садржи све релевантне комбинације улазних параметара за 20 различитих 3Д FEM модела, као и вредности израчунатих отпорности $R(\Omega)$. При постављању ваздушних цепова посебна пажња је посвећена поштовању симетрије (како би могао да се користи коначан 3Д FEM модел са сл. 2.3 који представља осмину иницијалног модела), као и положају ваздушних цепова у односу на углове квадратне контуре. Модел M0 представља базни случај без ваздушних цепова, односно случај са идеалним контактом између уземљивачке траке и околног тла. Модели M1–M19 служе за анализу утицаја улазних параметара на отпорност распростирања разматраног контурног уземљивача (M1–M7 за анализу утицаја параметра n , M7–M9 за анализу утицаја параметра d и M10–M19 за анализу утицаја параметра F).

Табела 3.1 – Отпорности распрострања разматраног квадратног контурног уземљивача израчунате 3Д FEM симулацијама за разне облике, бројеве, величине и диспозиције ваздушних џепова

Модел	Концепт постављања ваздушних џепова	Ваздушни џепои на угловима контуре	d (10^{-3} m)	a (10^{-3} m)	n	F (%)	R (Ω)
M0	C1	–	0	–	–	0	14,85
M1	C1	да	4	–	4	50	21,07
M2	C1	да	4	–	8	50	19,96
M3	C1	да	4	–	12	50	19,29
M4	C1	да	4	–	80	50	16,92
M5	C1	не	4	–	4	50	20,97
M6	C1	не	4	–	8	50	19,48
M7	C1	не	4	–	12	50	18,97
M8	C1	не	8	–	12	50	19,01
M9	C1	не	16	–	12	50	19,06
M10	C1	да	16	–	80	50	17,38
M11	C1	да	16	–	80	80	23,92
M12	C1	да	16	–	80	92	37,25
M13	C1	да	16	–	80	95	49,12
M14	C1	да	16	–	80	96	56,64
M15	C2	–	16	27,20	–	60	23,68
M16	C2	–	16	13,60	–	80	30,32
M17	C2	–	16	6,80	–	90	42,16
M18	C2	–	16	4,76	–	93	52,06
M19	C2	–	16	3,40	–	95	64,50

3.2.2 Утицај параметра n

Анализом вредности отпорности распрострања $R(\Omega)$ израчунатих за моделе M1–M4, може се закључити да број ваздушних џепова дуж обима разматраног квадратног контурног уземљивача нема значајан утицај на његову отпорност распрострања (за $n = 80$ вредност R је само 14% већа од базне вредности, R_0 , док за $n = 4$ повећање вредности износи 42% (у сва 4 случаја за $d = 4 \cdot 10^{-3}$ m и $F = 50\%$)). У ствари, повећањем броја ваздушних џепова (уз константне вредности

параметара d и F) израчуната вредност R се смањује и приближава базној (теоријској) вредности R_0 , а не вредности измереној у експерименту ($R = 50,2 \Omega$). Осим тога, поређењем вредности R израчунатих за моделе М1–М3 са вредностима израчунатим за моделе М5–М7, примећује се да је отпорност распрострања увек нешто већа када су углови квадратне контуре обавијени ваздушним џеповима. Међутим, ове разлике су практично занемарљиве. Може да се закључи да за $d = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ и $F = 50\%$ експериментално добијена вредност $R = 50,2 \Omega$ не може да се постигне варирањем броја ваздушних џепова дуж обима разматраног квадратног контурног уземљивача.

Претходни резултат указује да параметар n утиче на контактну отпорност, односно да усвајање његове мале вредности доводи до већих вредности контактне отпорности. С обзиром да је у реалном тлу дужина секвенце T мала, чему одговара велика вредност параметра n , у даљим симулацијама је усвајана што већа вредност параметра n , усклађена са расположивим рачунарским ресурсима.

3.2.3 Утицај параметра d

У моделима М7–М9, дебљина ваздушних џепова, d , варирана је уз константне вредности $n = 12$ и $F = 50\%$. Анализом израчунатих вредности R датих у табели 3.1 може се приметити да пораст димензије d за чак 300% (са $4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ на $16 \cdot 10^{-3} \text{ m}$) узрокује пораст вредности R за само 0,5% (са $18,97 \Omega$ на $19,06 \Omega$). Стога, може се закључити да ни овај параметар нема значајан утицај на повећање контактне отпорности, а самим тим ни на повећање укупне отпорности распрострања разматраног квадратног контурног уземљивача.

3.2.4 Утицај параметра F

У моделима М10–М14 (концепт С1), односно у моделима М15–М19 (концепт С2), удео површине уземљивача који је покривен ваздушним џеповима, F , вариран је уз константну вредност $d = 16 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ (и $n = 80$ за концепт С1), са циљем да се достигне експериментално добијена вредност $R = 50,2 \Omega$. Резултати приказани у табели 3.1 показују да је F параметар који најзначајније утиче на повећање контактне отпорности, а самим тим и на повећање укупне отпорности распрострања разматраног квадратног контурног уземљивача. За $F = 95\%$ израчуната вредност R је у односу на базну вредност R_0 достигла повећања од

230% (концепт C1), односно 334% (концепт C2). Због тога је метода за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при прорачуну отпорности распростирања разматраног контурног уземљивача базирана управо на утицају овог параметра на контактну отпорност, о чему ће бити више речи у поглављу 3.4.

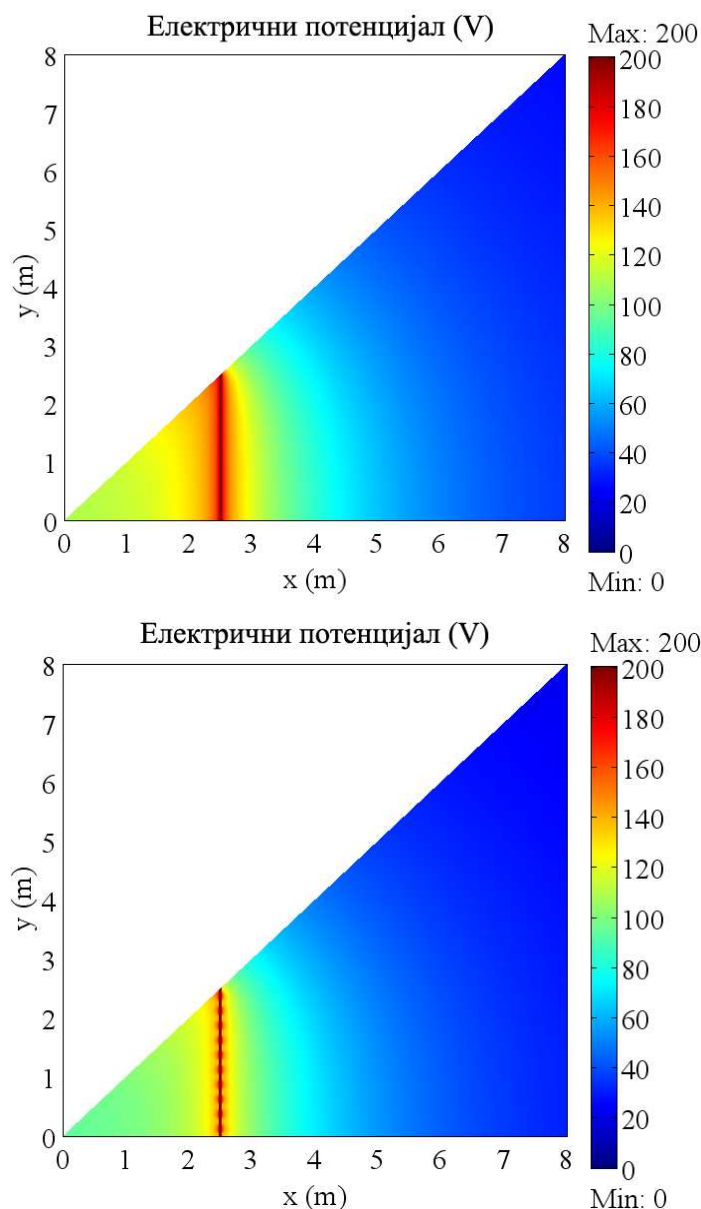
3.3 Утицај несавршеног контакта на расподелу потенцијала у околини уземљивача у случају квара

У поглављу 2.2 објашњено је и показано како се помоћу 3Д FEM симулација прорачунавају електрични потенцијали, и то не само репрезентативних чворова коначних елемената, него и било које тачке у оквиру моделованог домена (сл. 2.5). Коришћени софтвер поседује опцију да се, након завршеног прорачуна, из добијене базе података (електричних потенцијала) за целу запремину домена, издвоје само подаци (у табеларној или графичкој форми) за било који део равни или праве који се налази у области домена. Та опција пружа могућност дубље анализе утицаја лошег контакта између електрода уземљивача и околног тла на расподелу потенцијала у околини уземљивача у случају квара, кроз разматрање разних локалних ефеката. Као илустрација, послужиће резултати симулација 3Д FEM модела чији су улазни параметри дати у табели 3.1.

За анализирани случај класичног квадратног контурног уземљивача (сл. 2.1) најбољи увид у електричне последице лошег контакта између електрода и тла добија се разматрањем расподеле потенцијала у xy равни на дубини од 0,5 m (односно у равни $z = 0,5$ m; x , y и z координате одговарају координатном систему представљеном на сл. 2.1). На сл. 3.2 упоредно су приказане две расподеле потенцијала у посматраној xy равни – прва се односи на базни случај, коме одговара идеалан контакт између електрода уземљивача и околног тла (сл. 2.1 горе, модел M0), а друга на случају коме одговара несавршен контакта између електрода уземљивача и околног тла окарактерисан са $F = 50\%$ (сл. 2.1 доле, модел M10).

Посматрајући дијаграме представљене на сл. 3.2, намеће се закључак да несавршен контакт између електрода и тла не утиче значајно на униформност расподеле потенцијала у околном тлу. Заправо, расподела потенцијала у тлу

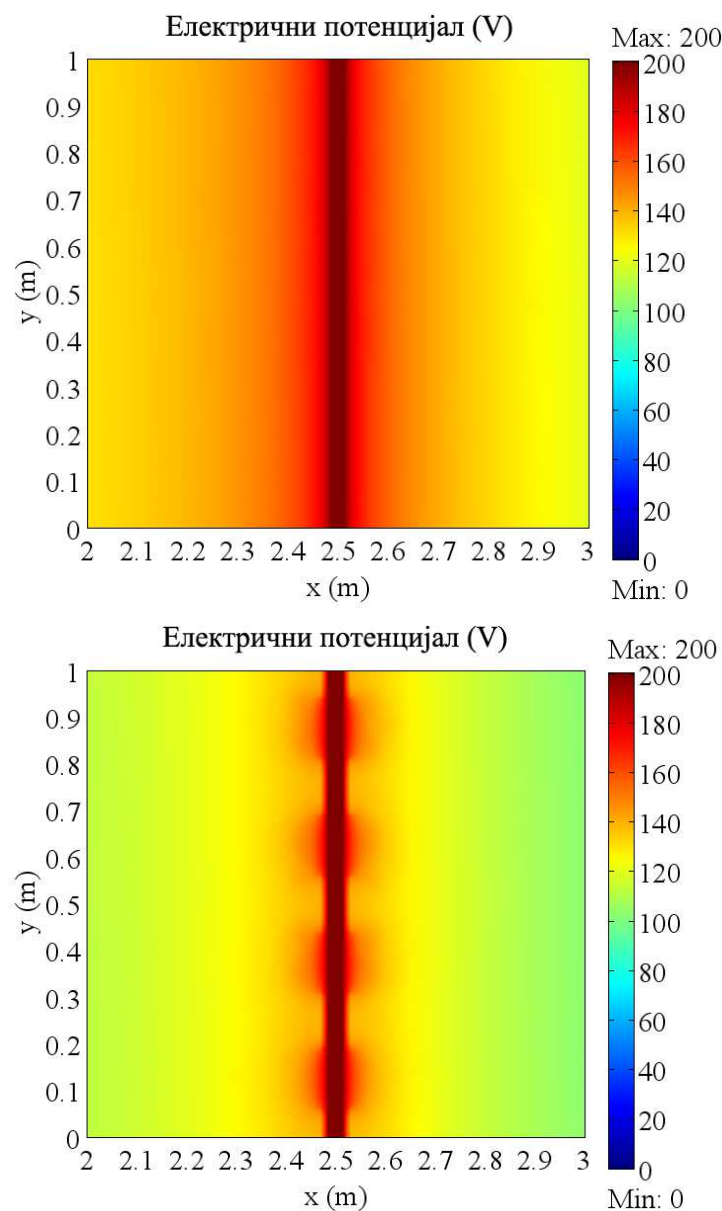
постаје униформна већ на малим растојањима од уземљивачких електрода (на растојању од око 0,1 m). Међутим, пад потенцијала у материјалу који се налази у близини уземљивачких електрода, односно у простору око уземљивачких електрода у коме је материјал околног тла помешан са ваздушним џеповима, значајно расте са порастом удела дела површине уземљивача који је покривен ваздушним џеповима и са кога се струја не одводи у околно тло.



Сл. 3.2 – Расподеле потенцијала у разматраној ху равни (осмина квадратне контуре, модели M0 (горе) и M10 (доле))

У циљу стицања прецизнијег увида у ефекте утицаја лошег контакта између електрода уземљивача и околног тла на расподелу потенцијала у околини

уземљивача, помоћу употребљеног софтвера су направљени графички прикази крупних планова расподеле потенцијала у разматраној ху равни у близини траке, који су представљени на сл. 3.3 (моделу М0 (горе) и М10 (доле)).

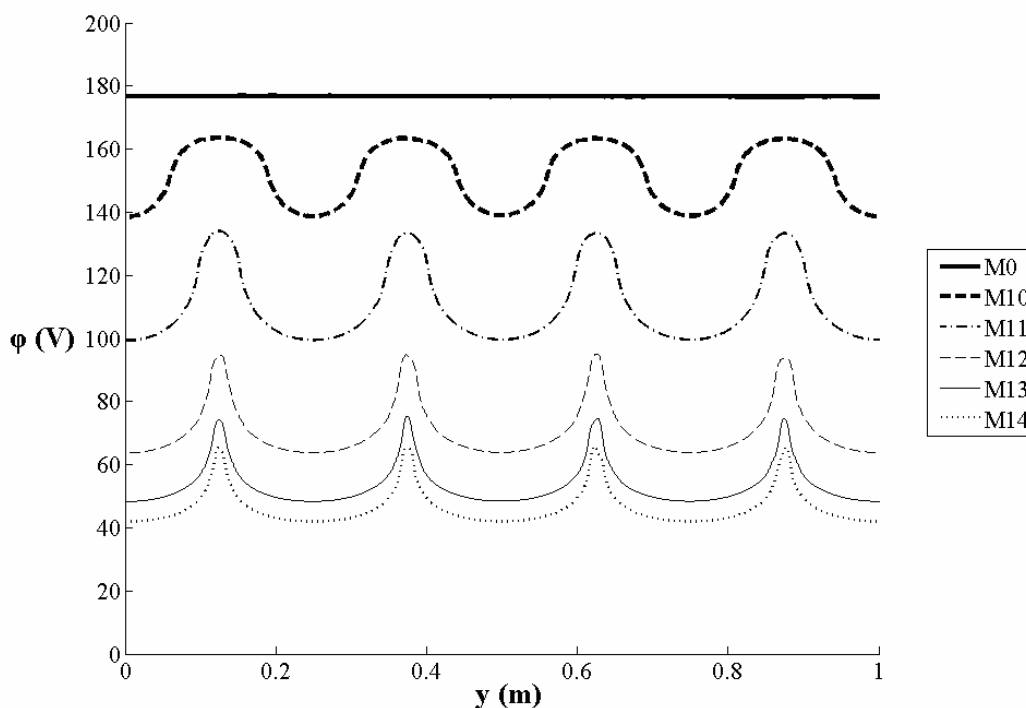


Сл. 3.3 – Расподеле потенцијала у разматраној ху равни у близини траке (моделу М0 (горе) и М10 (доле))

Дијаграми са сл. 3.3 потврђују да у случају лошег контакта између електрода и тла расподела потенцијала постаје униформна већ на растојању од око 0,1 m од површине електроде уземљивача. Такође, они указују на чињеницу да структура материјала који је у непосредном додиру са површином електрода уземљивача може значајно да утиче на величину пада потенцијала у материјалу који се налази

у непосредној близини електрода, а самим тим и на потенцијале у тлу и на површини тла у целој области на којој треба проверити напоне додира и корака.

Колики може да буде пад потенцијала у материјалу који се налази у непосредној близини електрода, као и како вредност параметра F утиче на величину тог пада потенцијала, најбоље се види из расподела потенцијала дуж праве постављене на само 20 mm од површине уземљивачке траке, које су приказане на сл. 3.4. Графици на сл. 3.4 представљају расподеле потенцијала дуж дужи која се налази између тачака $(x, y) = (2,535 \text{ m}, 0)$ и $(x, y) = (2,535 \text{ m}, 1 \text{ m})$, у разматраној равни ($z = 0,5 \text{ m}$; x , y и z координате одговарају координатном систему представљеном на сл. 2.1), за моделе M0 и M10–M14 (чији су улазни параметри дати у табели 3.1).



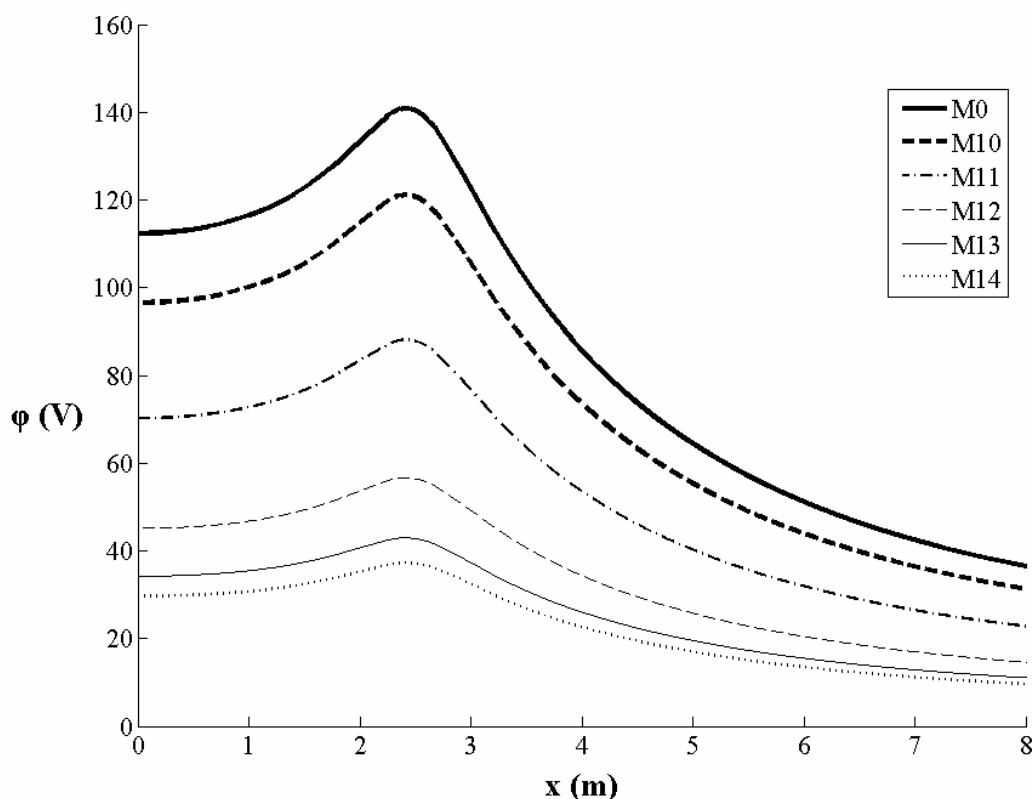
Сл. 3.4 – Расподеле потенцијала дуж дужи постављене у непосредној близини траке, које се односе на моделе M0 и M10–M14 (криве одозго надоле, тим редом)

Да подсетимо, у свим симулацијама са 3Д FEM моделима чији су улазни параметри дати у табели 3.1 потенцијал уземљивача је износио $\phi_{e0} = 200 \text{ V}$. Овај потенцијал зависи од електричних параметара напојне мреже, као и начина уземљења неутралне тачке напојног трансформатора, што је технички аспект чија анализа излази из оквира дисертације. Због тога је, да би се квалитативно

илустровао утицај несавршеног контакта између електрода и тла, за сваки од разматраних несавршених контаката, усвојен константан потенцијал уземљивача (у пракси, овај потенцијал расте са повећањем контактне отпорности).

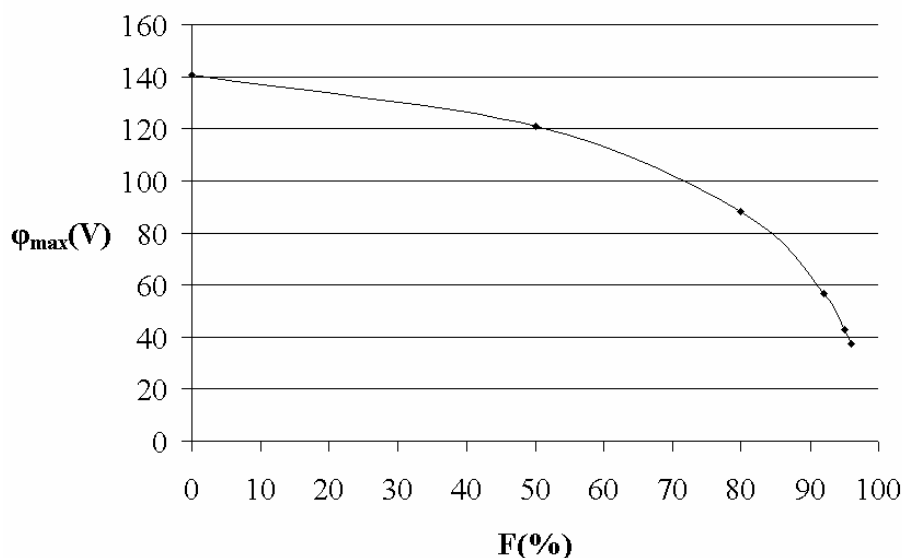
На графицима приказаним на сл. 3.4 може да се види да пад потенцијала на материјалу који се налази у простору дебљине само 20 mm износи око 1/9 укупне разлике потенцијала између уземљивача и референтне земље у случају идеалног контакта између уземљивача и околног тла ($F = 0$, модел M0), док за тло које остварује веома лош контакт са електродама уземљивача ($F = 96\%$, модел M14) овај пад потенцијала достиже 3/4 укупне разлике потенцијала између уземљивача и референтне земље.

Толики пад потенцијала у материјалу који се налази у непосредној близини електрода уземљивача може значајно да утиче на расподелу потенцијала на површини тла у случају квара, од које зависе напони додира и корака, што се види на графицима приказаним на сл. 3.5.



Сл. 3.5 – Расподеле потенцијала дуж дужи постављене на површини тла, приказане за моделе M0 и M10–M14 (криве одозго надолу, тим редом)

Графици на сл. 3.5 представљају расподеле потенцијала дуж дужи која се налази између тачака $(x, y) = (0, 0)$ и $(x, y) = (8 \text{ m}, 0)$, у равни површине тла ($z = 0,5 \text{ m}$; x , y и z координате одговарају координатном систему представљеном на сл. 2.1), за моделе М0 и М10–М14 (чији су улазни параметри дати у табели 3.1). На сл. 3.6 представљена је зависност максималног потенцијала на посматраној дужи на површини тла (ϕ_{\max}) од вредности параметра F . Она варира од $140,8 \text{ V}$ ($F = 0$, модел М0) до $37,2 \text{ V}$ ($F = 96\%$, модел М14).



Сл. 3.6 – Зависност максималног потенцијала на посматраној дужи на површини тла од вредности параметра F

Графици приказани на сликама 3.5 и 3.6 илуструју како несавршен контакт између електрода уземљивача и тла утиче на расподелу потенцијала на површини тла у случају квара. Очигледно је да напон додира, који се дефинише као највећа од свих разлика потенцијала које се успостављају између изложених електропроводних делова опреме галвански повезаних са уземљивачем и стајних тачака које су од њих удаљене 1 m [1], може у великој мери да зависи од ефективне контактне површине електрода уземљивача и тла. Исто се може рећи и за напон корака, који представља највећу разлику потенцијала која може да се премости кораком дужине 1 m [1]. На основу приказаних резултата, може се закључити да у земљиштима у којима контактна отпорност представља доминантну компоненту укупне отпорности распрострања уземљивача, напони додира и корака – параметри којима се проверава квалитет уземљивачког система

са аспекта безбедности људи и животиња – не могу бити добро процењени употребом конвенционалних метода и упрошћених аналитичких израза (развијених под претпоставком о идеалном контакту између електрода уземљивача и тла). Приказани резултати указују на потребу развоја метода за уважавање несавршеног контакта између електрода уземљивача и тла, и то како при прорачуну отпорности распростирања уземљивача, тако и при прорачуну напона додира и корака. Један од главних циљева ове дисертације је развијање методе за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при прорачуну отпорности распростирања разматраног контурног уземљивача. Уз то се захтева да се она може применити и на уземљиваче другачијих типова и димензија. Развој методе за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при прорачуну напона додира и корака превазилази оквире ове дисертације и представља простор за даље истраживање у овој области.

3.4 Метода за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при прорачуну отпорности распростирања разматраног контурног уземљивача

На основу анализа спроведених у поглављима 3.1–3.3, може да се закључи да укупна отпорност распростирања, $R(F)$, разматраног квадратног контурног уземљивача (обима контуре L_T , обима попречног пресека траке p , положеног у горњи слој тла специфичне електричне отпорности ρ_{gs} (сл. 2.1) и у 3Д FEM моделу окруженог ваздушним џеповима дебљине d (сл. 2.6)), као функција параметра F може да се представи изразом (који важи и за било који други уземљивач положен у тло које гради несавршен контакт са његовим електродама):

$$R(F) = R_0 + R_C(F) \quad (3.1)$$

у коме су:

R_0 базна (теоријска) отпорност распростирања разматраног уземљивача (израчуната под претпоставком о идеалном контакту између електрода и тла), и

$R_C(F)$ контактна отпорност.

Контактна отпорност, $R_C(F)$, може да се представи изразом:

$$R_C(F) = K_P(F) \cdot R_{bc} - R_{iv} \quad (3.2)$$

у коме су:

R_{iv} отпорност тла у непосредној близини електрода уземљивача (до растојања d од површине електрода), одређена под претпоставком о идеалном контакту између електрода и тла, која у разматраном случају може да се апроксимира изразом:

$$R_{iv} = \frac{\rho_{gs} \cdot d}{p \cdot L_T}, \quad (3.3)$$

R_{bc} отпорност тла у непосредној близини електрода уземљивача (до растојања d од површине електрода), одређена под претпоставком о лошем контакту између електрода и тла, која у разматраном случају може да се апроксимира изразом:

$$R_{bc} = \frac{\rho_{gs} \cdot d}{p \cdot L_T \cdot (100 - F)/100}, \text{ и} \quad (3.4)$$

$K_P(F)$ корекциони полином другог реда

$$K_P(F) = K_0 + K_1 \cdot F + K_2 \cdot F^2 \quad (3.5)$$

(K_0 , K_1 и K_2 су корекциони коефицијенти).

Корекциони полином је потребан да би се компензовале грешке које се праве апроксимирањем R_{iv} и R_{bc} редом изразима (3.3) и (3.4). Његов други ред је довољан за обезбеђивање високе тачности добијених резултата.

Уврштавањем једначина (3.3)–(3.5) у (3.2), она постаје:

$$R_C(F) = \frac{\rho_{gs} \cdot d}{p \cdot L_T} \left[(K_0 + K_1 \cdot F + K_2 \cdot F^2) \cdot \frac{100}{100 - F} - 1 \right], \quad (3.6)$$

а уврштавањем (3.6) у (3.1) добија се израз:

$$R(F) = R_0 + \frac{\rho_{gs} \cdot d}{p \cdot L_T} \left[(K_0 + K_1 \cdot F + K_2 \cdot F^2) \cdot \frac{100}{100 - F} - 1 \right]. \quad (3.7)$$

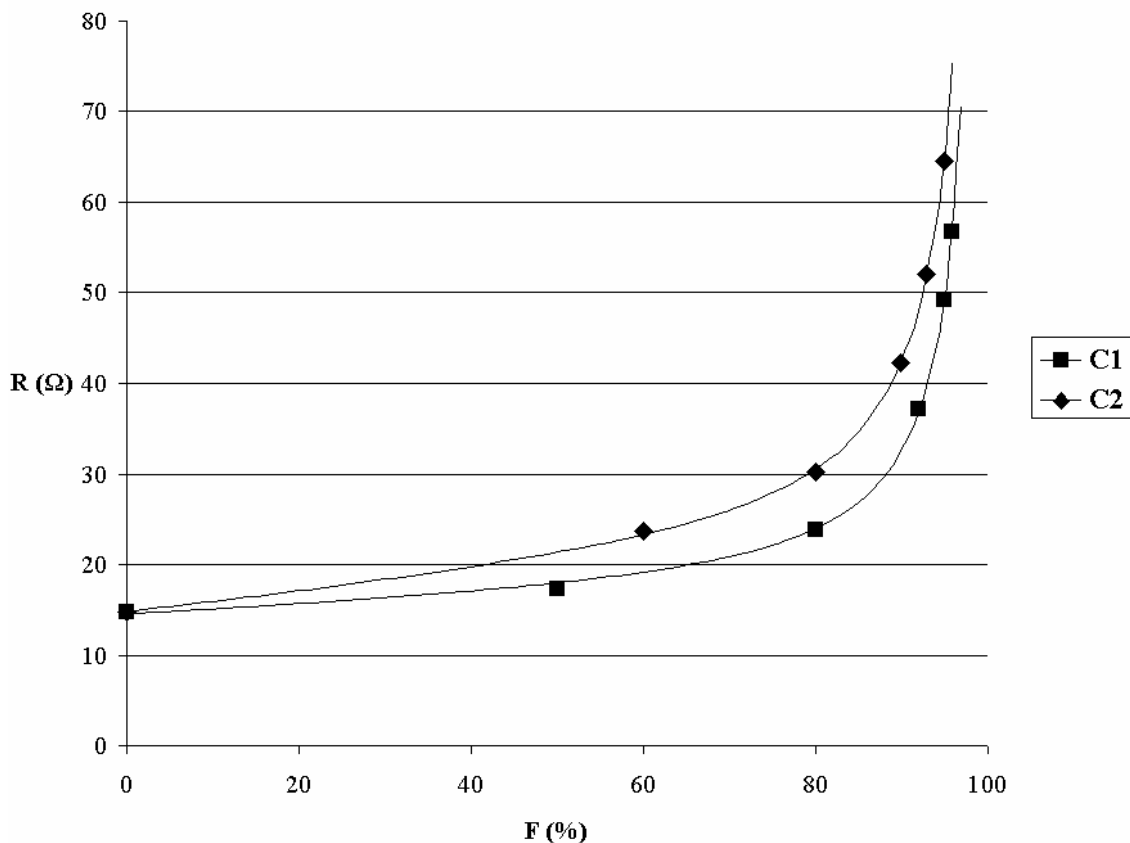
Корекциони коефицијенти K_0 , K_1 и K_2 за разматрани случај могу да се одреде обрадом резултата прорачуна $R(F)$ датих у табели 3.1 (добијених 3Д FEM симулацијама), коришћењем познатих вредности свих осталих улазних параметара и применом методе најмањих квадрата и итеративног поступка. Поступак одређивања корекционих коефицијената K_0 , K_1 и K_2 своди се на варирање њихових вредности помоћу Microsoft Excel Solver-a [80], полазећи од вредности $(K_0, K_1, K_2) = (1, 0, 0)$, и завршавајући када се постигне минимална сума квадрата разлика између резултата $R(F)$ добијених 3Д FEM симулацијама и вредности $R(F)$ добијених изразом (3.7). Описаним поступком за разматрани случај добијене су следеће вредности (за $d = 16 \cdot 10^{-3}$ m (и $T = 0,25$ m за концепт С1) – сл. 2.6):

$$(K_0, K_1, K_2) = (0,857573, 0,017936, -0,000184) \text{ за концепт С1, и} \quad (3.8)$$

$$(K_0, K_1, K_2) = (1,001041, 0,044629, -0,000438) \text{ за концепт С2.} \quad (3.9)$$

Графици $R(F)$ за разматрани случај, добијени коришћењем израза (3.7), приказани су на сл. 3.7. Они садрже и вредности из табеле 3.1, које су добијене 3Д FEM симулацијама.

Ако се узме у обзир да су вредности отпорности распрострања разматраног квадратног контурног уземљивача, које су добијене експерименталним мерењима у периоду од 30 месеци (сл. 3.1), варирале од $R = 50,2 \Omega$ до $R = 216 \Omega$, уврштавањем ових вредности у израз (3.7) добија се информација да су, уз занемарење варијација специфичних електричних отпорности слојева тла, у истом периоду вредности параметра F варирале од $F = 95,19\%$ до $F = 99,19\%$ за концепт С1, односно од $F = 92,60\%$ до $F = 98,88\%$ за концепт С2. На основу наведених резултата, намеће се закључак да се у случајевима када се уземљивач полаже у земљишта која формирају веома лош контакт са његовим електродама (нпр. каменита или песковита земљишта) струја одводи у околно тло са веома малог дела површине уземљивача, због чега контактна отпорност постаје доминантан део укупне отпорности распрострања уземљивача.



Сл. 3.7 – Графици функције $R(F)$ за разматрани случај и оба концепта ($C1$ и $C2$)

У посматраном случају, вредности параметра F којима се описује околно тло налазе се на делу криве $R(F)$ коју одликује висока вредност извода $\partial R/\partial F$ (сл. 3.1), због чега мале варијације ефективне површине контакта између електрода уземљивача и тла узрокују велике варијације контактне отпорности, а самим тим и укупне отпорности распростирања уземљивача. У оваквим екстремним случајевима свакако се препоручује употреба додатних материјала за елиминацију контактне отпорности, зато што није могуће предвидети опсег тако малих варијација на том делу $R(F)$ криве. Иначе, овакве варијације ефективне површине контакта између електрода уземљивача и тла очигледно могу да се припишу сезонским варијацијама количине влаге у земљишту, чији се утицај на отпорност распростирања уземљивача интензивно истражује последњих година [81,82].

Представљена метода за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при прорачуну отпорности распростирања разматраног

контурног уземљивача, која је базирана на изразу (3.7), познатим параметрима којима се описује несавршен контакт (d_0 и F_0 (и T_0 за концепт C1)) и израчунавању R_0 помоћу 3Д FEM симулација, може успешно да се употреби за анализу и објашњење резултата добијених мерењима на терену. Међутим, за њену успешну примену при предвиђању (прорачуну) отпорности распрострањања уземљивача разних облика и димензија, положених у тло непознатих карактеристика у погледу остваривања контакта са електродама уземљивача, а без помоћи 3Д FEM симулација, потребно је имати поуздане упрошћене изразе за израчунавање вредности R_0 посматраног уземљивача, као и методу за одређивање непознатих карактеристика тла додатним мерењима.

Метода за израду упрошћених израза за израчунавање вредности R_0 разних типова уземљивача, базирана на нумеричкој обради резултата добијених 3Д FEM симулацијама, представљена је у поглављу 5 на примеру уземљивача састављеног од једне или више галвански спојених квадратних контура (конструкције које одговарају типичном реалном уземљивачу далеководног стуба). У поглављу 6 је показано како тло непознатих карактеристика у погледу остваривања контакта са електродама уземљивача (непознатих параметара d_x , T_x и F_x) може да се еквивалентира тлом описаним помоћу познатих параметара d_0 и T_0 , као и параметра F_0 који се одређује на основу резултата тест мерења. Коришћењем тих параметара (d_0 , T_0 и F_0), изрази (3.7) и упрошћених изрази за израчунавање вредности R_0 , могуће је са задовољавајућом тачношћу проценити отпорности распрострањања разних уземљивача чак и када су положени у тло непознатих карактеристика у погледу остваривања контакта са електродама уземљивача.

4 АНАЛИЗА УТИЦАЈА ДОДАТНОГ МАТЕРИЈАЛА НА ОТПОРНОСТ РАСПРОСТИРАЊА РАЗМАТРАНОГ КВАДРАТНОГ КОНТУРНОГ УЗЕМЉИВАЧА

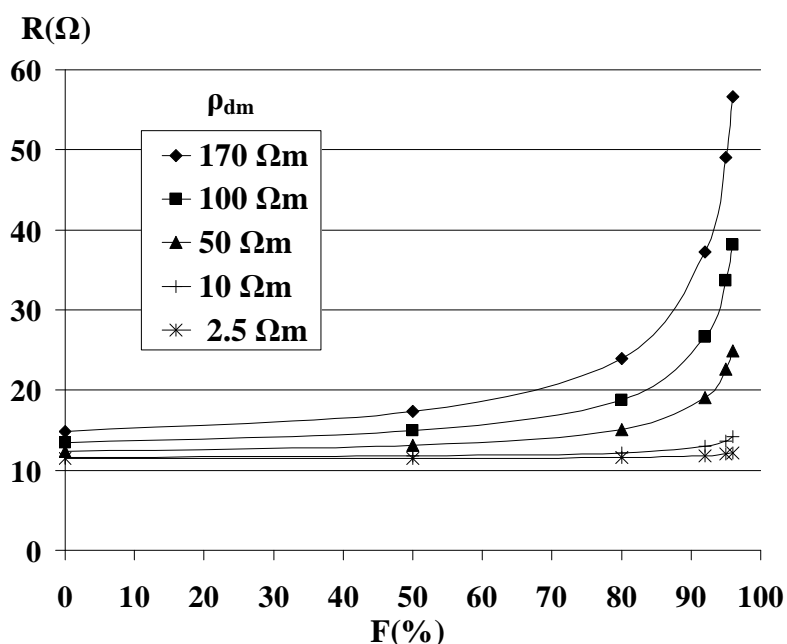
4.1 Утицај карактеристика додатног материјала на елиминацију контактне отпорности

У поглављу 1.4 истакнуто је да је у пракси, у потрази за јефтиним и лако доступним додатним материјалима који би могли да се употребе за смањење отпорности распростирања уземљивачких система, експериментисано са разним материјалима. Примарни циљ који треба да се оствари употребом додатног материјала је елиминација контактне отпорности. У овом поглављу је спроведена анализа карактеристика додатног материјала, који треба да омогући да измерена вредност отпорности распростирања, R , не одступа превише од базне (теоријске) вредности, R_0 , добијене стандардним инжењерским прорачуном. Две карактеристике додатног материјала које су кључне за постизање наведеног циља су његова специфична електрична отпорност, ρ_{dm} , и квалитет контакта који остварује са површином електрода уземљивача. На основу резултата великог броја рачунарских симулација спроведених на 3Д FEM моделима разматраног контурног уземљивача приказаног на сл. 2.1, са употребљених $1,2 \text{ m}^3$ додатног материјала (распоређеног као на сл. 2.2), анализиран утицај обе наведене карактеристике додатног материјала на отпорност распростирања контурног уземљивача. При формирању 3Д FEM модела варирани су како специфична електрична отпорност додатног материјала, ρ_{dm} , тако и вредност параметра F (за константне вредности $d = 16 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ и $n = 80$, концепт C1 (сл. 2.6)), којим се описује квалитет контакта између додатног материјала и електрода уземљивача.

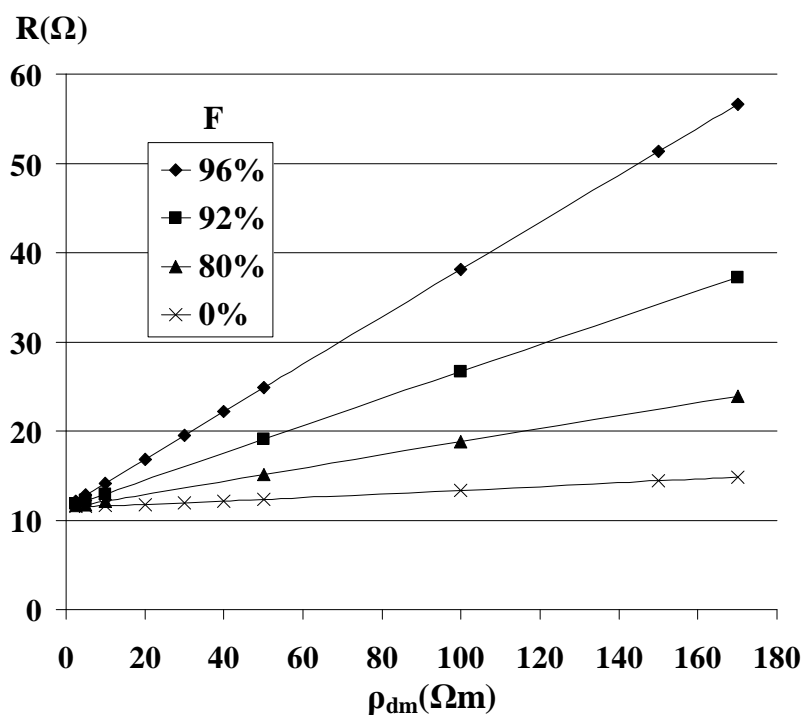
4.1.1 Анализа резултата добијених 3Д FEM симулацијама

Прво су при изради 3Д FEM модела вариране вредности параметра F (за неколико фиксираних вредности специфичне електричне отпорности додатног материјала, ρ_{dm}), након чега је отпорност распростирања, R , разматраног уземљивача израчунавана 3Д FEM симулацијама. Затим је исти поступак

поновљен варирањем ρ_{dm} за неколико фиксираних вредности параметра F . Неки од добијених резултата графички су представљени на сликама 4.1 и 4.2.



Сл. 4.1 – 3Д FEM резултати $R(F)$ за неколико фиксираних вредности ρ_{dm}



Сл. 4.2 – 3Д FEM резултати $R(\rho_{dm})$ за неколико фиксираних вредности параметра F

Да подсетимо, базна (теоријска) вредност отпорности распрострања разматраног класичног квадратног контурног уземљивача, уз претпоставку о идеалном контакту између електрода уземљивача и тла, износи $R_0 = 14,85 \Omega$, а са $1,2 \text{ m}^3$ суспензије бентонита ($\rho_{\text{dm}} = \rho_{\text{bent}} = 2,5 \Omega\text{m}$), постављене као на сл. 2.2, његова отпорност распрострања је $R = 11,5 \Omega$ (поглавље 3.1, вредности добијене 3Д FEM симулацијама).

Анализом резултата приказаних на сл. 4.1, може да се закључи да вредности R које су мање од базне вредности R_0 могу да буду постигнуте различитим додатним материјалима, односно да елиминација контактне отпорности може да се постигне додатним материјалима различитих специфичних електричних отпорности докле год је $\rho_{\text{dm}} < \rho_{\text{gs}}$ ($\rho_{\text{gs}} = 170 \Omega\text{m}$ у разматраном случају). Додатни услов је да се са повећањем вредности ρ_{dm} додатног материјала захтева већи квалитет његовог контакта са електродама уземљивача, односно довољно мала вредност параметра F .

Додатни материјали који могу успешно да буду примењени за елиминацију контактне отпорности морају да буду окарактерисани паром вредности (ρ_{dm}, F) којим се задовољава услов

$$R(\rho_{\text{dm}}, F) \leq R_0 \quad (4.1)$$

у коме је $R(\rho_{\text{dm}}, F)$ израз којим се описује зависност отпорности распрострања разматраног уземљивача од карактеристика додатног материјала. Он се може добити нумеричком анализом вредности добијених 3Д FEM симулацијама (за разматрани случај, вредности са сл. 4.1 и сл. 4.2).

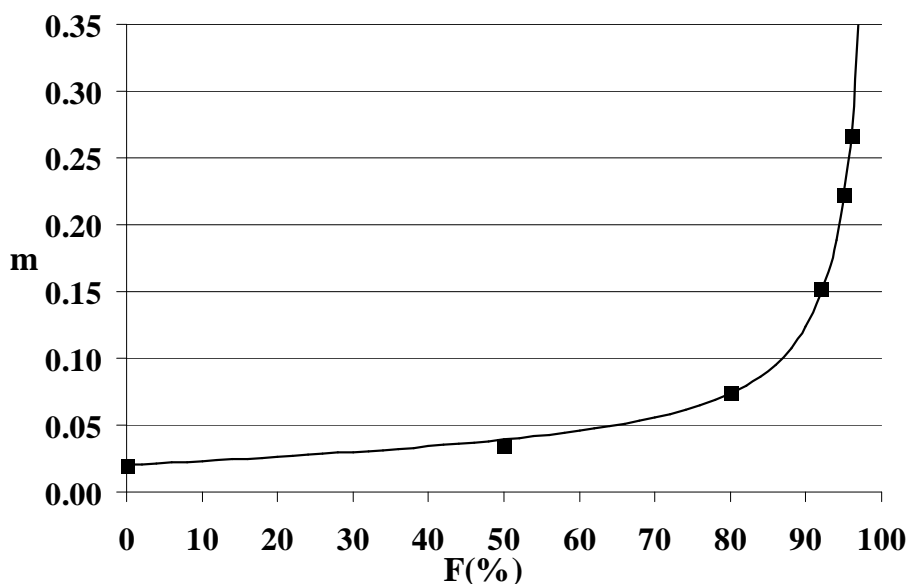
Разматрањем графика приказаних на сл. 4.2 лако се уочава да је отпорност распрострања, R , разматраног уземљивача, за фиксиране вредности параметра F , скоро идеално линеарно зависна од специфичне електричне отпорности додатног материјала, ρ_{dm} . Наведена зависност може да се апроксимира изразом:

$$R(\rho_{\text{dm}}) = m \cdot \rho_{\text{dm}} + c \quad (4.2)$$

у коме параметар m представља нагиб (градијент) праве, док је константа c одређена тачком у којој права $R(\rho_{\text{dm}})$ сече ординату (осу R). У посматраном случају, константа c физички представља отпорност распрострања разматраног

уземљивача у граничном случају, у коме је додатни материјал идеалан проводник, који би могао да се апроксимира случајем у коме је попречни пресек електроде уземљивача повећан до спољних граница додатног материјала приказаних на сл. 2.2. У разматраном случају њена вредност (израчуната 3Д FEM симулацијом) износи $c = 11,43 \Omega$. Разматрањем графика приказаних на сл. 4.2 такође се уочава да вредност параметра F не утиче на вредност константе c , али да веома значајно утиче на вредност параметра m .

За одређивање израза $R(\rho_{dm}, F)$ било је потребно одредити израз којим се описује зависност параметра m од параметра F . Прво је извршено фитовање (проналажење континуалне математичке функције која најмање одступа од функције задате скупом дискретних вредности) правих линија одређених изразом (4.2) кроз тачке (R, ρ_{dm}) добијене 3Д FEM симулацијама (применом методе најмањих квадрата и итеративног поступка помоћу Microsoft Excel Solver-а [80] – поступак описан у поглављу 3.4). Вредности параметра m , добијене описаним поступком за неколико вредности параметра F , приказане су на сл. 4.3 као тачке означене пуним црним квадратима.



Сл. 4.3 – Крива $m(F)$ фитована кроз неколико вредности нагиба линија које представљају зависности $R(\rho_{dm})$ за разматрани уземљивач

Прегледом распореда тачака (m, F) , процењено је да параметар m , као функција параметра F , може да се апроксимира изразом:

$$m(F) = \lambda_1 + \lambda_2 \cdot F + \frac{\lambda_3}{100 - F} \quad (4.3)$$

у коме су λ_1 , λ_2 и λ_3 константни коефицијенти који важе за разматрани случај (λ_3 зависи од геометрије додатног материјала у области са ваздушним цеповима (непосредно уз површину електрода уземљивача), λ_1 од геометрије области додатног материјала између области ваздушних цепова и спољних граница додатног материјала, а λ_2 од геометрије граница претходне две области).

Уврштавањем израза (4.3) у (4.2), он постаје:

$$R(\rho_{dm}, F) = \left(\lambda_1 + \lambda_2 \cdot F + \frac{\lambda_3}{100 - F} \right) \cdot \rho_{dm} + c. \quad (4.4)$$

Коефицијенти λ_1 , λ_2 и λ_3 који важе за разматрани случај одређују се нумеричком анализом вредности добијених 3Д FEM симулацијама. Применом методе најмањих квадрата и итеративног поступка помоћу Microsoft Excel Solver-a [80] (поступак описан у поглављу 3.4), уз стриктан услов задржавања вредности базне тачке (R_0, ρ_{dm}, F) , које се добијају применом формуле (4.4), на тачне иницијалне вредности $(14,85, 170, 0)$, за разматрани случај добијене су вредности параметара λ_1 , λ_2 и λ_3 :

$$(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (0,010491, 0,000187, 0,962692). \quad (4.5)$$

График (крива) $m(F)$ за разматрани случај, добијен коришћењем израза (4.4) са увршћеним вредностима коефицијената датим у (4.5), такође је приказан на сл. 4.3. Очигледно је да постоји одлично поклапање између једначине (4.3) са увршћеним коефицијентима из (4.5) и неколико вредности параметра m добијених претходном нумеричком анализом вредности добијених 3Д FEM симулацијама.

Парови вредности (ρ_{dm}, F) којима се задовољава услов (4.1) могу да се одреде увршћивањем формуле (4.4) у (4.1):

$$R_0 \geq \left(\lambda_1 + \lambda_2 \cdot F + \frac{\lambda_3}{100 - F} \right) \cdot \rho_{dm} + c, \quad (4.6)$$

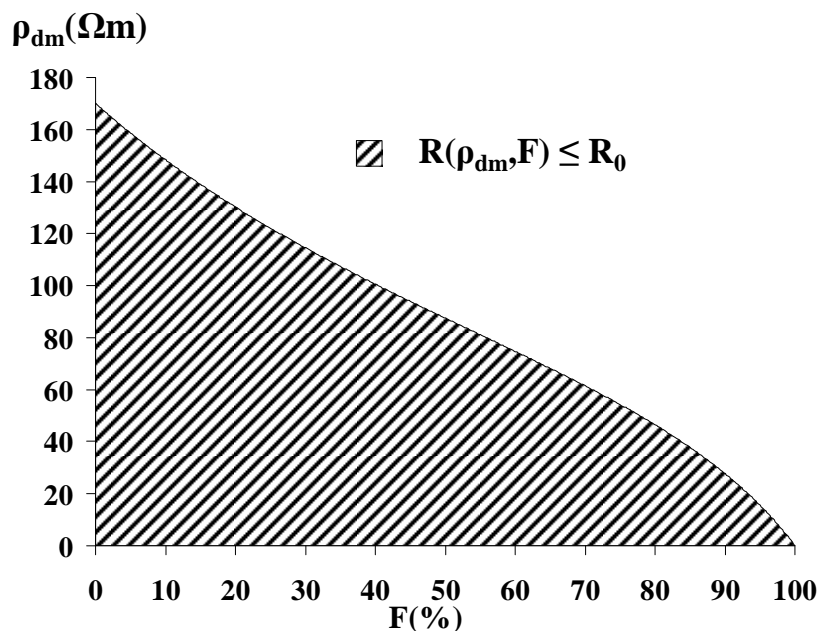
а затим преуређивањем неједначине (4.6), која постаје:

$$\rho_{dm} \leq \frac{R_0 - c}{\left(\lambda_1 + \lambda_2 \cdot F + \frac{\lambda_3}{100 - F} \right)} \quad (4.7)$$

Увршћивањем свих коефицијената одређених за разматрани случај, неједначина (4.7) постаје:

$$\rho_{dm} \leq \frac{14,85 - 11,43}{\left(0,010491 + 0,000187 \cdot F + \frac{0,962692}{100 - F} \right)} \quad (4.8)$$

Шрафирана област на дијаграму приказаном на сл. 4.4, одређена употребом неједначине (4.8), представља област у којој сваки пар вредности (ρ_{dm}, F) задовољава услов (4.1) за разматрани случај. То значи да се у разматраном случају, употребом било ког додатног материјала описаног паром вредности (ρ_{dm}, F) из шрафиране области на дијаграму приказаном на сл. 4.4, измерена (реална) вредност R може свести на базну (теоријску) вредност R_0 , односно да контактна отпорност може успешно да буде елиминисана из укупне отпорности распрострањања уземљивача.



Сл. 4.4 – Шрафирана област са паровима вредности (ρ_{dm}, F) које описују додатни материјал да би се успешно елиминисала контактна отпорност у разматраном случају

Анализом података приказаних на сл. 4.4, може да се закључи да за наведену намену равноправно могу да се користе материјали који су или описани ниском специфичном отпорношћу или способношћу да остваре одличан контакт са електродама уземљивача, али и материјали који не поседују ниједну од две наведене особине, али поседују њихову задовољавајућу комбинацију. Суспензија бентонита, која је коришћена у разматраном случају, поседује обе наведене особине – карактеришу је веома ниска специфична отпорност ($\sim 2,5 \Omega\text{m}$) и формира одличан контакт са електродама уземљивача (захваљујући својим особинама да може да апсорбује и задржи велике количине воде (њена запремина може да порасте и до 13 пута у односу на запремину у сувом стању) и да остварује адхезију са скоро свим материјалима које дотакне [37]), што је чини практично савршеним додатним материјалом за наведену намену. Међутим, резултати спроведене анализе показују да, уколико бентонит није доступан или је његова употреба прескупа на жељеној локацији, и други материјали лошијих, али задовољавајућих, карактеристика могу да се употребе као додатни материјали за елиминацију контактне отпорности. Управо је у референци [37] показано да су применом отпадног блата из нафтних бушотина и суспензије бентонита постигнути скоро исти резултати са аспекта елиминације контактне отпорности (сл. 3.1). Такође, резултати спроведене анализе потврђују исправност извођачке праксе у Србији да се, при постављању уземљивача далеководних стубова у каменитом или шљунковитом тлу, земљиште око електрода уземљивача замењује тресетом, кисело-смеђом земљом или смеђом подзоластом земљом (специфичне отпорности и до $100 \Omega\text{m}$, али који остварују далеко бољи контакт са електродама уземљивача него камење или шљунак), чиме се укупна отпорност распрострања уземљивачког система услед елиминације контактне отпорности смањује и до 50% [83].

4.1.2 Алгоритам за одређивање неопходних карактеристика додатног материјала за елиминацију контактне отпорности

Процедура за добијање израза (4.1)–(4.8) и одређивање неопходних коефицијената, као и анализа добијених резултата, који су, за разматрани уземљивач, приказани у поглављу 4.1.1, представљају алгоритам за одређивање неопходних карактеристика додатног материјала за елиминацију контактне

отпорности. Он се може применити и на друге типове и димензије уземљивача, положене у тло другачије структуре, са додатним материјалом другачијих димензија и карактеристика. Да резимирамо, алгоритам се састоји од следећа 4 корака:

1. 3Д FEM моделовање разматраног уземљивача, структуре тла, додатног материјала и несавршеног контакта (помоћу ваздушних џепова, коришћењем процедуре 3Д FEM моделовања описане у поглављу 2),
2. израчунавање отпорности распростирања, R , посматраног уземљивача применом 3Д FEM симулација на довољан број разних типова додатног материјала, односно довољан број пари вредности (ρ_{dm}, F) (сл. 4.1 и 4.2 у разматраном примеру),
3. спровођење нумеричке анализе вредности добијених 3Д FEM симулацијама са циљем одређивања израза $R(\rho_{dm}, F)$ ((4.4) у разматраном примеру), и
4. одређивање парова вредности (ρ_{dm}, F) који задовољавају услов (4.1) (сл. 4.4 у разматраном примеру).

Алгоритам може да се употреби и за одређивање парова вредности (ρ_{dm}, F) које описују додатни материјал уз услов да се његовом употребом измерена (реална) вредности отпорности распростирања разматраног уземљивача, R , своди на било коју другу жељену или захтевану вредност, R_S (наравно, то је теоријски изводљиво само уколико је $R_S \geq c$). У том случају, вредност R_0 која фигурише у услову (4.1) треба заменити са R_S , а затим поновити корак 4 предложеног алгоритма.

Резултати добијени употребом предложеног алгоритма могу да се користе као смернице за проналажење јефтиних и лако доступних додатних материјала који би могли да се употребе за смањење отпорности распростирања уземљивачких система. Међутим, за разлику од вредности специфичних електричних отпорности додатних материјала, које се могу пронаћи у литератури или измерити стандардним мерним методама, за вредности параметра F , којим се квантитативно описује квалитет контакта који додатни материјал остварује са електродама уземљивача, у доступној литератури не постоје нити подаци нити

мерне методе за њихово одређивање. Параметар F се може одредити експериментално, поређењем измерених резултата са резултатима 3Д FEM симулација (процедура приказана у поглављима 3.4 и 6.2).

Тренутни недостатак предложеног алгоритма за одређивање неопходних карактеристика додатног материјала за елиминацију контактне отпорности је неопходност спровођења 3Д FEM симулација, односно непостојање лако применљивих упрошћених израза. Изналажење оваквих израза превазилази оквире ове дисертације и представља простор за даље истраживање у овој области. Такође, треба обратити пажњу на утицај додатног материјала на расподелу потенцијала на површини тла у случају квара, односно на вредности напона додира и корака, јер ће се расподеле потенцијала на површини тла разликовати у случајевима идеалног контакта између електрода уземљивача и тла (вредности које се рачунају стандардним методама) и у случајевима употребе додатног материјала за елиминацију контактне отпорности (чак и ако у оба случаја отпорност распростирања има исту вредност – R_0).

4.2 Утицај количине додатног материјала на отпорност распростирања разматраног уземљивача

У поглављу 1.4 наглашено је да, осим остварења примарног циља употребе додатног материјала (елиминација контактне отпорности), његовом употребом може да се покуша да се реална вредност отпорности распростирања уземљивачког система R додатно смањи и буде мања од теоријске базне вредности R_0 (додавањем веће количине додатног материјала чија је специфична електрична отпорност ρ_{dm} мања од специфичне електричне отпорности околног тла), до постизања жељене или захтеване вредности R_S . Међутим, наведени (секундарни) циљ није увек могуће постићи употребом доступних додатних материјала, зато што повећањем запремине додатног материјала растућа функција $\delta R(V)$ улази у асимптотску област (да подсетимо, δR је процентуално смањење отпорности R у односу на базну вредност R_0 , дефинисано изразом (1.1)). Пројектант уземљивачког система и извођач радова морају да избегну употребу количина додатног материјала које се налазе у асимптотској области функције $\delta R(V)$, што је немогуће урадити без математички дефинисане зависности $\delta R(V)$ за

разматрани случај. У математичкој теорији, границу између асимптотске и преостале области функције оваквог типа представља тачка колена криве (у разматраном случају, тачка са координатама $(V_k, \delta R_k)$).

Вредности V_k и δR_k , одређене за разматрани додатни материјал и разматрани уземљивачки систем, дају јасну информацију пројектанту колико може да износи максимално практично смањење реалне вредности R употребом разматраног додатног материјала, јер је интуитивно јасно да ће ретко која техно-економска анализа показати оправданост употребе разматраног додатног материјала запремине веће од V_k . Уколико се употреби запремина додатног материјала већа од V_k (која се налази у асимптотској области функције $\delta R(V)$), велика је вероватноћа да ће се, без значајног позитивног ефекта и без икакве реалне потребе, повећати инсталациона цена уземљивачког система (услед непотребно утрошеног материјала и радних сати људства и механизације). С друге стране, уколико се употреби запремина додатног материјала мања од V_k (која се не налази у асимптотској области функције $\delta R(V)$), а не постигне жељена или захтевана вредност R_S која би могла да се постигне употребом нешто веће запремине $V_S \leq V_k$, прилика да се са релативно малим повећањем инвестиционих трошкова дође до оптималног пројекта разматраног уземљивачког система може бити пропуштена.

4.2.1 Математички концепт одређивања координата тачке колена криве

Стандардна грешка коју инжењер може да направи при одређивању координата тачке колена криве је њихово директно читавање са графика функције. На тај начин се обично читавају погрешне вредности, зато што визуелни доживљај позиције тачке колена криве на графику функције зависи од релативног односа расподела вредности на апсциси и ординати.

Једини поуздан начин одређивања координата тачке колена криве је коришћење строгог математичког приступа, базираног на диференцијалном рачуну и математичкој дефиницији кривине графика континуалне функције. Тачка колена графика континуалне функције формално се дефинише као тачка у којој он има максималну кривину [71], односно минимални полупречник кривине. Полупречник кривине, r , у тачки графика континуалне функције (криве)

представља дужину полупречника кружног лука који представља најбољу апроксимацију криве у тој тачки. За било коју континуалну функцију $y(x)$, која је дефинисана у Декартовом координатном систему и која је диференцијабилна најмање до другог извода, полупречник кривине, r , у произвољној тачки њеног графика може да се одреди помоћу израза [84]:

$$r = \frac{\left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}{\left|\frac{d^2y}{dx^2}\right|}. \quad (4.9)$$

Тачка колена криве, односно тачка минималног полупречника кривине криве, одређује се изразом

$$\frac{dr}{dx} = 0, \quad (4.10)$$

уз задовољење услова

$$\frac{d^2r}{dx^2} > 0. \quad (4.11)$$

Полупречник кривине је прецизно дефинисан за континуалне функције, али не и за скупове дискретних података. У таквом случају, полупречник кривине и тачка колена криве могу бити одређени фитовањем погодне континуалне функције кроз скуп дискретних података, а затим применом израза (4.9)–(4.11) на добијену функцију.

4.2.2 Одређивање континуалне функције $\delta R(V)$ и координата тачке колена криве за разматрани уземљивач

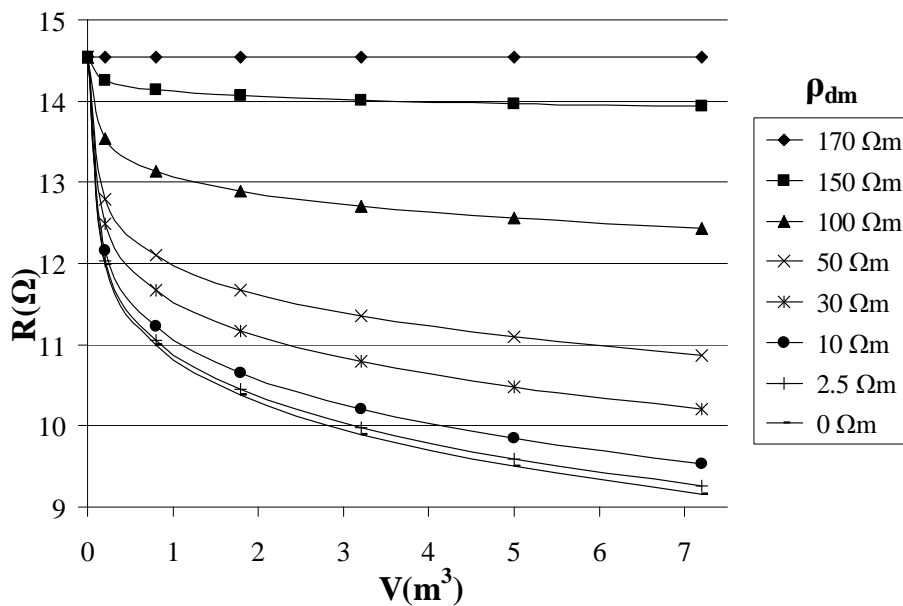
Континуална функција $\delta R(V)$ за разматрани квадратни контурни уземљивач може се одредити нумеричком анализом резултата добијених на основу симулација на 3Д FEM моделима. На основу резултата великог броја рачунарских симулација спроведених на 3Д FEM моделима разматраног контурног уземљивача приказаног на сл. 2.1, са употребљеним додатним материјалом (постављеним као на сл. 2.7), анализиран је утицај специфичне електричне отпорности додатног материјала и његове количине на смањење отпорности распрострања разматраног контурног уземљивача. При изради 3Д FEM модела варијациони су како

запремина V додатног материјала (варирањем димензије q , сл. 2.7), тако и његова специфична електрична отпорност, ρ_{dm} . Запремина V се рачуна као

$$V = q^2 \cdot L_T \quad (4.12)$$

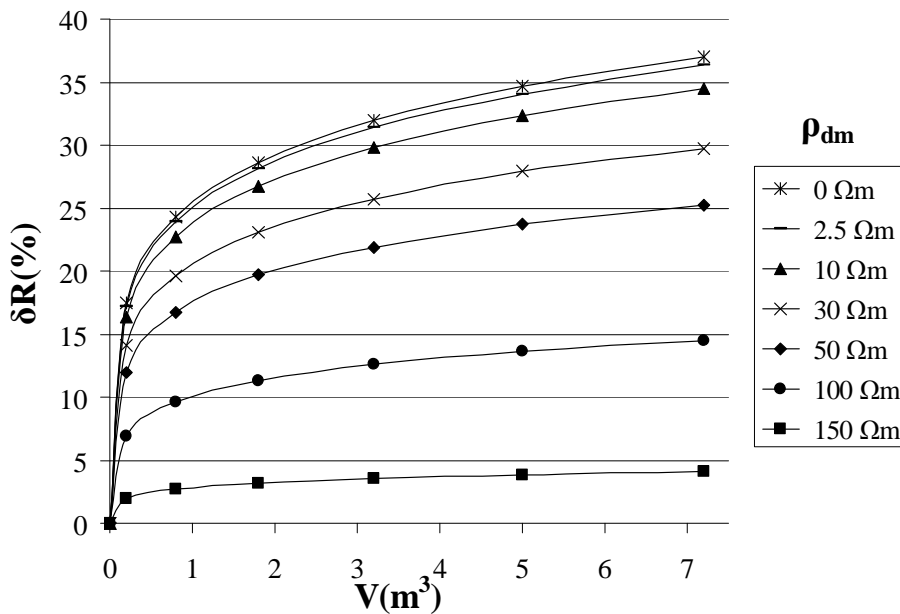
(L_T обим разматраног квадратног контурног уземљивача (20 m)).

У креираним 3Д FEM моделима вредности ρ_{dm} су вариране у распону од 0 (идеално провадан материјал) до $170 \Omega m$ (ρ_{gs}), док је димензија q варирана у распону од 0,1 m до 0,7 m, након чега је употребом рачунара израчунавана отпорност распрострања R за сваку комбинацију улазних параметара. Резултатима експерименталних истраживања приказаним у [44] показано је да потпуна елиминација контактне отпорности може успешно да се постигне употребом $0,02 \text{ m}^3$ бентонита по дужном метру уземљивачке траке, због чега је 3Д FEM моделима претпостављен идеалан контакт како између електрода и додатног материјала, тако и између додатног материјала и околног тла. Израчунате вредности R приказане су на сл. 4.5, коришћењем различитих ознака за сваку од разматраних вредности ρ_{dm} . Очигледно је да се вредности R мање од базне вредности ($R_0 = 14,53 \Omega$, израчунате за разматрани случај помоћу 3Д FEM-а) могу постићи употребом различитих додатних материјала, докле год је $\rho_{dm} < \rho_{gs}$ ($\rho_{gs} = 170 \Omega m$ у разматраном случају).



Сл. 4.5 – Функција $R(V)$ за различите вредности ρ_{dm}

Као што је и било очекивано, за ниже вредности специфичних отпорности додатног материјала добијене су ниже вредности отпорности распрострањања разматраног контурног уземљивача. Међутим, примећује се да смањење отпорности распрострањање улази у засићење за веће запремине V употребљеног додатног материјала, чак и у случају идеално проводног материјала ($\rho_{dm} = 0$). На основу графика приказаног на сл. 4.6 може се закључити да би било тешко постићи вредност од нпр. $\delta R = 40\%$ у разматраном случају, чак и кад би се употребила велика количина идеално проводног материјала. За додатне материјале са вишим вредностима специфичне отпорности, δR улази у засићење на својим мањим вредностима, при мањим употребљеним запреминама.



Сл. 4.6 – Функција $\delta R(V)$ за различите вредности ρ_{dm}

Парови вредности $(V, \delta R)$, прорачунати употребом 3Д FEM-а, приказани су на сл. 4.6 помоћу различитих ознака за сваку од разматраних вредности ρ_{dm} . Анализом тих вредности може да се закључи да проценат смањења отпорности распрострањања $\delta R(\%)$, као функција запремине употребљеног додатног материјала $V(m^3)$, може да се апроксимира изразом:

$$\delta R = \beta \cdot \ln(\gamma \cdot V + 1) \quad (4.13)$$

у коме су β и γ позитивни параметри којима се описује облик криве $\delta R(V)$ у посматраном случају. Њихове вредности се одређују нумеричком анализом вредности добијених 3Д FEM симулацијама (сл. 4.6). Вредности параметара β и γ

израчунате применом методе најмањих квадрата и итеративног поступка помоћу Microsoft Excel Solver-a [80] (поступак описан у поглављу 3.4) за неколико различитих вредности ρ_{dm} дате су у табели 4.1.

Између свих могућих облика функције $\delta R(V)$ изабран је облик приказан изразом (4.13) зато што је био најпогоднији за одређивање полупречника кривине криве. Израз (4.13) је диференцијабилан до другог извода, а његов први и други извод одређени су следећим изразима:

$$\frac{d\delta R}{dV} = \frac{\beta \cdot \gamma}{\gamma \cdot V + 1}, \text{ и} \quad (4.14)$$

$$\frac{d^2\delta R}{dV^2} = -\frac{\beta \cdot \gamma^2}{(\gamma \cdot V + 1)^2}. \quad (4.15)$$

Израз који описује полупречник кривине у произвољној тачки криве $\delta R(V)$ може се одредити применом општег израза (4.9) на (4.13), чиме се добија:

$$r = \frac{\left(1 + \left(\frac{d\delta R}{dV}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}{\left|\frac{d^2\delta R}{dV^2}\right|}. \quad (4.16)$$

Узимањем у обзир израза (4.14) и (4.15), даље се добија:

$$r = \frac{\left(\frac{\beta^2 \cdot \gamma^2}{(\gamma \cdot V + 1)^2} + 1\right)^{\frac{3}{2}} \cdot (\gamma \cdot V + 1)^2}{\beta \cdot \gamma^2}. \quad (4.17)$$

Први и други извод функције $r(V)$, редом, су:

$$\frac{dr}{dV} = \frac{\left(\frac{\beta^2 \cdot \gamma^2}{(\gamma \cdot V + 1)^2} + 1\right)^{\frac{1}{2}} \cdot (2 \cdot \gamma^2 \cdot V^2 - \beta^2 \cdot \gamma^2 + 4 \cdot \gamma \cdot V + 2)}{\beta \cdot \gamma \cdot (\gamma \cdot V + 1)}, \text{ и} \quad (4.18)$$

$$\frac{d^2r}{dV^2} = \frac{2 \cdot \beta^4 \cdot \gamma^4 + \beta^2 \cdot \gamma^4 \cdot V^2 + 2 \cdot \beta^2 \cdot \gamma^3 \cdot V + \beta^2 \cdot \gamma^2 + 2 \cdot \gamma^4 \cdot V^4 + 8 \cdot \gamma^3 \cdot V^3 + 12 \cdot \gamma^2 \cdot V^2 + 8 \cdot \gamma \cdot V + 2}{\beta \cdot \left(\frac{\beta^2 \cdot \gamma^2}{(\gamma \cdot V + 1)^2} + 1\right)^{\frac{1}{2}} \cdot (\gamma \cdot V + 1)^4}. \quad (4.19)$$

Тачка колена криве $\delta R(V)$ одређена је изразом:

$$\frac{dr}{dV} = 0, \quad (4.20)$$

уз задовољење услова

$$\frac{d^2r}{dV^2} > 0. \quad (4.21)$$

Решење једначине (4.20), које је реално и задовољава услов (4.21), је:

$$V_k = \frac{\sqrt{2} \cdot \beta \cdot \gamma - 2}{2 \cdot \gamma}. \quad (4.22)$$

Њиме је одређена V координата тачке колена криве $\delta R(V)$. Координата δR тачке колена криве $\delta R(V)$ одређује се увођењем решења израженог помоћу израза (4.22) у израз (4.13), који након сређивања постаје:

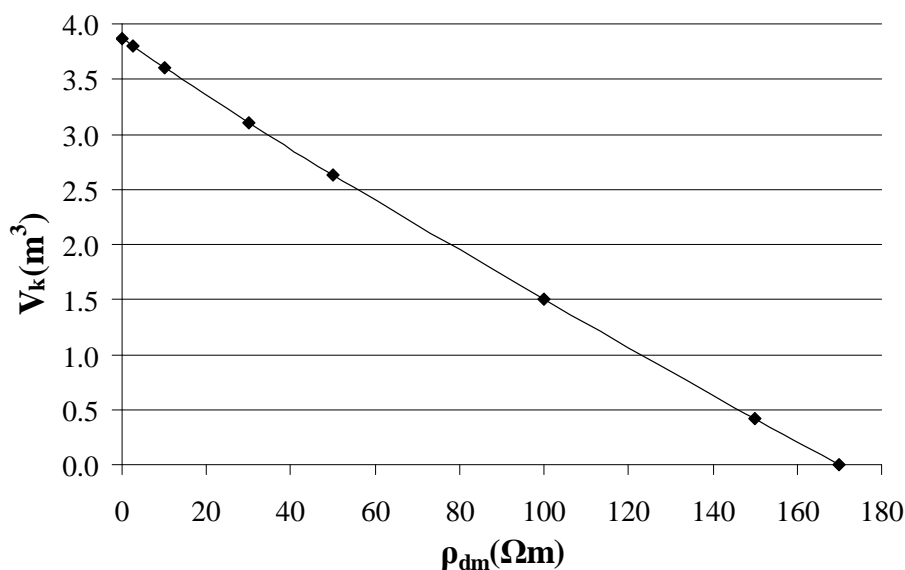
$$\delta R_k = \beta \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{2} \cdot \beta \cdot \gamma}{2} \right). \quad (4.23)$$

Израчунате вредности координата тачке колена криве $\delta R(V)$ ($V_k, \delta R_k$), за разматрани случај и различите вредности ρ_{dm} , дате су у табели 4.1.

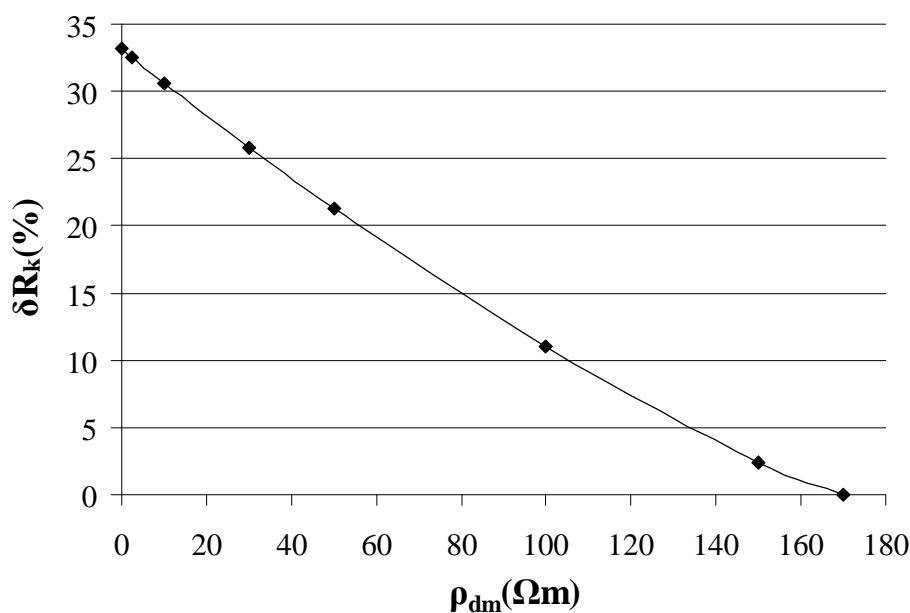
Табела 4.1 – Параметри β и γ којима се описује крива $\delta R(V)$ и координате тачке колена криве $\delta R(V)$, одређени за разматрани случај и различите вредности ρ_{dm}

$\rho_{dm}(\Omega m)$	β	γ	$V_k(m^3)$	$\delta R_k(\%)$
0	5,48	109,43	3,87	33,17
2,5	5,39	109,43	3,80	32,51
10	5,11	109,69	3,61	30,58
30	4,41	110,96	3,11	25,77
50	3,74	112,39	2,63	21,28
100	2,14	115,67	1,51	11,06
150	0,60	118,42	0,42	2,37

Зависности $V_k(\rho_{dm})$ и $\delta R_k(\rho_{dm})$ за разматрани случај приказане су и графички, редом на сл. 4.7 и сл. 4.8, да би се истакао њихов изненађујући, скоро идеално линеаран облик.



Сл. 4.7 – Зависност $V_k(\rho_{dm})$ за разматрани квадратни контурни уземљивач



Сл. 4.8 – Зависност $\delta R_k(\rho_{dm})$ за разматрани квадратни контурни уземљивач

4.2.3 Одређивање оптималне запремине додатног материјала инжењерском анализом добијених резултата

Анализом резултата приказаних у табели 4.1 може се приметити да за додатне материјале карактерисане великим вредностима ρ_{dm} (односно вредностима ρ_{dm} блиским вредности $\rho_{gs} = 170 \Omega m$ у разматраном случају), крива $\delta R(V)$ улази у асимптотску област за веома мале вредности V . Израчунате

вредности V_k , у теоријском смислу, представљају оптималне количине разматраног додатног материјала које треба употребити при инсталацији разматраног уземљивача. Међутим, у пракси постоје и други фактори који утичу на оптималну количину додатног материјала (цена материјала и додатних радова, могућност да се додатни радови изведу, могућност да се структура тла прецизно моделује, поузданост измерених улазних података, жељена или захтевана вредност R_S , намерна употреба нешто веће количине додатног материјала да би се компензовале потенцијалне грешке услед непрецизно одређених улазних параметара и њихових сезонских варијација итд.). Због тога, у практичном смислу, V_k би пре требало посматрати као максималну технички оправдану количину разматраног додатног материјала.

За анализу утицаја произвољне запремине употребљеног додатног материјала, V , на отпорност R разматраног уземљивача, може се, уз познавање базне вредности R_0 и вредности δR добијених помоћу израза (4.13), користити израз:

$$R = R_0 \cdot \left(1 - \frac{\delta R}{100}\right), \quad (4.24)$$

који је добијен прерадом израза (1.1). Може се и директно користити израз (4.25), добијен увођењем израза (4.13) у формулу (4.24) и њеним сређивањем:

$$R = R_0 \cdot \ln \left(\frac{e}{(\gamma \cdot V + 1)^{\frac{\beta}{100}}} \right) \quad (4.25)$$

(e је основа природног логаритма). Наравно, формуле (4.13) и (4.25), изведене на основу разматрања поставке приказане на сл. 2.7, имају ограничење важења по V , јер q са сл. 2.7 не може бити веће 1 m, односно V не може бити веће од 20 m^3 (1 m^3 додатног материјала по дужном метру уземљивачке траке) у разматраном случају.

У разматраној експерименталној поставци из [37] употребљено је $V = 1,2 \text{ m}^3$ суспензије бентонита ($0,06 \text{ m}^3$ по дужном метру уземљивачке траке), специфичне отпорности $\rho_{dm} = 2,5 \Omega\text{m}$. Резултатима експерименталних истраживања приказаним у [44] показано је да потпуна елиминација контактне отпорности може успешно да се постигне употребом $0,02 \text{ m}^3$ бентонита по дужном метру

уземљивачке траке, односно $V_{\min} = 0,4 \text{ m}^3$ у разматраном случају. Резултати приказани у табели 4.1 показују да би максимална технички оправдана употребљена запремина суспензије бентонита била $V_k = 3,8 \text{ m}^3$ ($0,19 \text{ m}^3$ по дужном метру уземљивачке траке), чиме би се постигло смањење отпорности распрострањања уземљивача од $\delta R_k = 32,5\%$ у односу на базну вредност $R_0 = 14,53 \Omega$ (израчунату за разматрани случај помоћу 3Д FEM-а). Уколико би жељена или захтевана вредност отпорности распрострањања разматраног уземљивача била стандардних $R_S = 10 \Omega$, употребом израза (4.25) може се израчунати да је неопходно употребити $V_S = 2,97 \text{ m}^3$ суспензије бентонита (приближно $0,15 \text{ m}^3$ по дужном метру уземљивачке траке). Употребом истог израза, за употребљене запремине $V_{\min} = 0,4 \text{ m}^3$, $V = 1,2 \text{ m}^3$ и $V_k = 3,8 \text{ m}^3$ суспензије бентонита (редом $0,02 \text{ m}^3$, $0,06 \text{ m}^3$ и $0,19 \text{ m}^3$ по дужном метру уземљивачке траке) добијају се редом вредности $R = 11,55 \Omega$, $R = 10,71 \Omega$ и $R = 9,81 \Omega$. Да подсетимо, измерена вредност отпорности распрострањања класичног уземљивача, без додатног материјала, била је $R = 50,2 \Omega$ (велика контактна отпорност), док је за $V = 1,2 \text{ m}^3$ измерено $R = 12,5 \Omega$.

На основу података наведених у претходном пасусу може да се закључи да није лако установити критеријум о томе која би запремина V суспензије бентонита реално представљала оптималан избор у разматраном случају. Очигледно је да је са $V = 1,2 \text{ m}^3$ контактна отпорност успешно елиминисана, али ако је само то био циљ, то је могло бити урађено и употребом три пута мање запремине ($V = 0,4 \text{ m}^3$). Ако је циљ био да се постигне вредност $R_S = 10 \Omega$, требало је употребити приближно два и по пута већу запремину ($V_S = 2,97 \text{ m}^3$). Међутим, ако се упореде измерена вредност ($R = 12,5 \Omega$) и вредност израчуната помоћу израза (4.25) ($R = 10,71 \Omega$) за $V = 1,2 \text{ m}^3$ суспензије бентонита, види се да је структура тла релативно добро моделована и да су улазни параметри релативно добро одређени, али свакако не идеално. При пројектовању би свакако требало предвидети нешто веће количине додатног материјала од прорачунатих да би се компензовале потенцијалне грешке услед непрецизно одређених улазних параметара и њихових сезонских варијација, али свакако не веће од $V_k = 3,8 \text{ m}^3$, јер повећање запремине преко ове вредности не би дало значајног ефекта, а непотребно би повећало инсталационе трошкове. На крају, опет је на пројектанту да процени оптималну

количину додатног материјала на основу затечене ситуације на терену, утицаја конкретног уземљивача на безбедност људи и опреме, расположивог буџета, личног искуства и инжењерског осећаја. У разматраном случају, уколико би позиција уземљивача захтевала да се $R_S = 10 \Omega$ стриктно поштује, логичан избор би био усвојити, нпр., $V_{opt} = 3,3 \text{ m}^3 (\approx 1,1 \cdot V_S < V_k = 3,8 \text{ m}^3)$. Уколико би на позицији уземљивача било прихватљиво $R_S = 15 \Omega$ (што је чест случај у електроенергетском систему у Србији [83]), логичан избор би био усвојити, нпр., $V_{opt} = 0,6 \text{ m}^3 (= 1,5 \cdot V_{min})$, довољно да елиминише целу контактну отпорност и да донекле компензује потенцијалне грешке услед непрецизно одређених улазних параметара и њихових сезонских варијација).

4.2.4 Алгоритам за процену оптималне количине додатног материјала за смањење отпорности распрострањања уземљивача

Процедура за добијање израза (4.13), (4.17), (4.22), (4.23) и (4.25) и одређивање неопходних коефицијената, као и анализа добијених резултата, које су приказане у поглављима 4.2.2 и 4.2.3 за разматрани уземљивач, представљају алгоритам за процену оптималне количине додатног материјала за смањење отпорности распрострањања и за друге типове и димензије уземљивача, положене у тло другачије структуре, са додатним материјалом другачијих количина и карактеристика. Да резимирамо, алгоритам се састоји од следећих 6 корака:

1. 3Д FEM моделовање разматраног уземљивача, структуре тла и сваког од додатних материјала за смањење отпорности распрострањања уземљивача који су доступни на локацији на којој ће се поставити разматрани уземљивачки систем (процедура 3Д FEM моделовања описана је у поглављу 2),
2. израчунавање отпорности распрострањања, R , разматраног уземљивача 3Д FEM симулацијама, за довољан број различитих употребљених запремина V сваког од разматраних додатних материјала (описаног са ρ_{dm}), а у циљу добијања довољног броја парова $(V, \delta R)$ за сваки разматрани додатни материјал (сл. 4.5 и сл. 4.6 у разматраном примеру),
3. проналажење погодне континуалне функције $\delta R(V)$ и њено фитовање кроз тачке $(V, \delta R)$ добијене за сваки додатни материјал у другом кораку

- алгоритма, чиме се практично добија и израз $R(V)$ (редом изрази (4.13) и (4.25) у разматраном примеру),
4. одређивање тачке колена криве $(V_k, \delta R_k)$ за сваки од разматраних додатних материјала, применом математичког приступа базираног на математичкој дефиницији полупречника кривине добијене континуалне функције $\delta R(V)$ (табела 4.1, сл. 4.7 и сл. 4.8 у разматраном примеру),
 5. употреба изрази $R(V)$ за одређивање вредности карактеристичних запремина додатног материјала и њима одговарајућих вредности отпорности распростирања (карактеристична запремина може да буде минимална неопходна запремина за елиминисање контактне отпорности V_{\min} , запремина којом се постиже жељена или захтевана отпорност распростирања уземљивача V_S или максимална технички оправдана запремина V_k), неопходних за одабир оптималне запремине V_{opt} инжењерском анализом (поглавље 4.2.3), и
 6. спровођење инжењерске анализе на основу затечене ситуације на терену, утицаја конкретног уземљивача на безбедност људи и опреме, расположивог буџета, личног искуства и инжењерског осећаја са циљем одабирања оптималне запремине V_{opt} разматраног додатног материјала (поглавље 4.2.3).

Предложени алгоритам може бити од помоћи пројектантима уземљивачких система да избегну асимптотске области при употреби додатног материјала за смањење отпорности распростирања и постизању максималне ефикасност његове употребе. Иако се њиме не израчунава тачна оптимална количина додатног материјала (што је и неизводљиво у практичном смислу), он представља нови алат (каквог није било у доступним домаћим и страним стандардима и научно-стручној литератури) за спровођење техничких и техно-економских анализа чији резултати могу да помогну у процени оптималне количине додатног материјала која треба да буде употребљена на разматраном уземљивачу. У досадашњој пракси, пројектанти и извођачи су при процени потребне количине додатног материјала за постављање уземљивача на некој конкретној локацији на располагању имали само своје искуство и осећај, као и наду да ће том процењеном количином успети да постигну жељени резултат и да ће накнадни радови бити избегнути.

Тренутни недостатак предложеног алгоритма за процену оптималне количине додатног материјала за смањење отпорности распрострањања уземљивача је његова базираност на 3Д FEM симулацијама, а не на лако применљивим упрошћеним изразима. Простор за упрошћавање алгоритма можда постоји у линеарној зависности $V_k(\rho_{dm})$ добијеној за разматрани случај (сл. 4.7). Могуће је да је довољно спровести прва 4 корака алгоритма само за идеалан проводни материјал $\rho_{dm} = 0$ и одредити вредност ($V_k(\rho_{dm} = 0)$), а затим повући праву линију између тачака $(V_k, \rho_{dm}) = (V_k(\rho_{dm} = 0), 0)$ и $(V_k, \rho_{dm}) = (0, \rho_{gs})$ и очитати са ње вредност V_k која одговара вредности ρ_{dm} . Могуће је и да ће изрази (4.13), (4.17), (4.22), (4.23) и (4.25) имати исти облик за највећи број стандардних конструкција уземљивача који се користе у пракси. Можда је могуће и одредити изразе који описују зависност коефицијената β и γ од релевантних димензија конструкције уземљивача и односа специфичних отпорности додатних материјала и околног тла. Међутим, развијање оваквих израза и провера наведених хипотеза превазилази оквире ове дисертације и представља простор за даље истраживање у овој области. Такође, треба обратити пажњу на утицај количине употребљеног додатног материјала на расподелу потенцијала на површини тла у случају квара, односно на вредности напона додира и корака.

5 ИЗРАДА УПРОШЋЕНИХ ИЗРАЗА ЗА ИЗРАЧУНАВАЊЕ ТЕОРИЈСКЕ (БАЗНЕ) ОТПОРНОСТИ РАСПРОСТИРАЊА УЗЕМЉИВАЧА САСТАВЉЕНОГ ОД ЈЕДНЕ ИЛИ ВИШЕ ГАЛВАНСКИ СПОЈЕНИХ КВАДРАТНИХ КОНТУРА

Основни циљ ове дисертацији је развој опште методе за израду упрошћених, али довољно тачних, израза за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при израчунавању укупне отпорности распрострања, R_T , било ког комплексног уземљивача. Пошто је у поглављу 3.3 утврђено да несавршен контакт између електрода и тла не утиче значајно на униформност расподеле потенцијала у околном тлу, односно да расподела потенцијала постаје униформа већ на растојању од око 0,1 m од површине електрода (сл. 3.2 и сл. 3.3), дошло се на идеју да упрошћени изрази за израчунавање укупне отпорности распрострања комплексних уземљивачких система треба да буду базирани на коефицијентима међусобног утицаја појединачних елемената, уз процену да контактна отпорност неће имати значајан утицај на те коефицијенте.

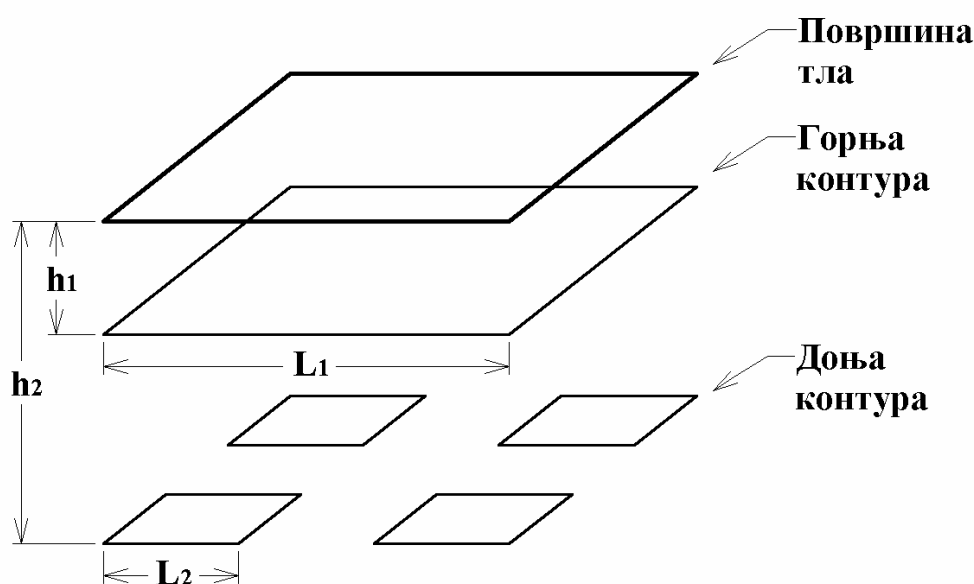
Да би се добио скуп упрошћених израза неопходних за прорачун укупне отпорности распрострања, R_T , било ког комплексног уземљивача, прво је потребно извести упрошћене изразе за израчунавање теоријске (базне) отпорности распрострања, R_0 , тог уземљивача. У овом поглављу је на примеру уземљивача састављеног од једне или више галвански спојених квадратних контура (конструкције које одговарају типичном уземљивачу далеководног стуба) представљена метода за извођење упрошћених израза за израчунавање вредности R_0 , која може да се примени на разне уземљиваче. Метода је базирана на нумеричкој обради резултата добијених 3Д FEM симулацијама.

5.1 Распон вредности релевантних конструкционих параметара типичног 110 kV далеководног стуба

Први корак при извођењу упрошћених израза за израчунавање вредности R_0 неког комплексног уземљивача је анализа његових конструкционих карактеристика у циљу утврђивања како релевантних конструкционих параметара

који могу утицати на вредност R_0 , тако и распона њихових вредности. Овим кораком се сагледава на који једноставнији геометријски облик уземљивач може да буде сведен и шта се од делова конструкције уземљивача при прорачуну вредности R_0 може занемарити. Осим тога, битно је препознати, како параметре чије се вредности могу сматрати фиксним, тако и параметре чије могуће промене вредности утичу на промену вредности R_0 . Пошто променљиви параметри фигуришу као променљиве у упрошћеном изразу за израчунавање вредности R_0 , свођење њиховог броја на минималан потребан, као и ограничавање распона њихових могућих вредности, смањује број неопходних 3Д FEM симулација и олакшава проналажење не само погодног облика израза, него и процес нумеричког одређивања константи које описују разматрани случај.

У овој дисертацији, као пример, разматран је уземљивачки систем типичног 110 kV далеководног стуба који се стандардно користи у електроенергетском систему Србије. На основу анализе пројектне документације дате у Прилогу А, одлучено је да се наведени уземљивачки систем посматра као 5 галвански спојених квадратних контура израђених од поцинковане челичне траке (сл. 5.1), уз занемарење постојања темељних уземљивача и челичних трака које спајају контуре (занемарењем њиховог позитивног ефекта на отпорност распрострања уземљивачког система остаје се на страни сигурности).



Сл. 5.1 – Уземљивачки систем типичног 110 kV далеководног стуба

Горња контура (димензија $L_1 \times L_1$) постављена је на дубини h_1 , док су 4 идентичне доње контуре (димензија $L_2 \times L_2$) постављене око сваке бетонске стопе темеља стуба, на дубини h_2 . Димензије уземљивачког система приказаног на сл. 5.1, које представљају релевантне параметре за прорачун његове отпорности распрострања, условљене су димензијама одређеним у грађевинском пројекту далеководног стуба, а нарочито димензијама и положајем бетонских стопа темеља (димензија L_2 доње контуре зависи од димензија основе бетонске стопе, док димензија L_1 горње контуре зависи од димензија распона између стопа). Димензије бетонских стопа темеља, као и димензије распона између њих, условљене су висином далеководног стуба (H) и капацитетом носивости тла (σ). Прегледом података датих у Прилогу А, који се односе на 72 могуће различите комбинације димензија 110 kV далеководног стуба, његовог темеља и уземљивачког система, утврђен је распон вредности релевантних конструкционих параметара за који је одређен скуп упрошћених израза за израчунавање вредности R_0 . Оне су дате у табели 5.1 ($s = L_2/L_1$, а p је обим попречног пресека траке).

Табела 5.1 – Распон вредности релевантних конструкционих параметара типичног 110 kV далеководног стуба

Параметар	Распон вредности
H	12 – 30 m
σ	100 – 300 kPa
L_1	5 – 10 m
s	0,20 – 0,44
h_1	0,7 m (фиксирана вредност)
h_2	2 m (фиксирана вредност)
p	0,044 – 0,088 m

Треба напоменути да постоје опције да разматрани уземљивачки систем типичног 110 kV далеководног стуба садржи само 4 доње контуре (без горње), или само горњу контуру (без 4 доње).

5.2 Конвенционалне формуле и методе за прорачун теоријске (базне) отпорности распростирања разматраног уземљивачког система

У стандардима [32,33] и приручницима [34–36] представљене су разне методе и упрошћени аналитички изрази који се могу употребити за израчунавање теоријске (базне) отпорности распростирања уземљивача, R_0 , састављеног од једне или више галвански спојених контура.

У референцама [32,33] препоручене су следеће 3 формуле за израчунавање вредности R_0 обичног контурног уземљивача положеног у униформно (хомогено) тло:

$$R_0 = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad (5.1)$$

(ρ је специфична отпорност тла, а A је површина коју обухвата контура),

$$R_0 = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A} + \frac{\rho}{L_T}} \quad (5.2)$$

(L_T је укупна дужина трака, односно обим контуре), и

$$R_0 = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (5.3)$$

(h је дубина полагања контуре).

Формула (5.1) односи се на отпорност распростирања уземљивача у облику металне плоче кружног облика положене хоризонтално на површини тла ($h = 0$). Другим чланом у формули (5.2) уважава се чињеница да ће отпорност распростирања уземљивача састављеног од било какве мреже проводника (трака), који заузима исту површину тла као метална плоча, бити већа у случају мреже проводника него ако се употреби метална плоча. У референци [32] је наглашено да се формуле (5.1) и (5.2) сматрају довољно тачним за дубине полагања уземљивача $h < 0,25$ m, док се за дубине $0,25$ m $\leq h \leq 2,5$ m препоручује формула (5.3), која узима у обзир и дубину полагања h .

У референцама [34] и [35] предложене су формуле којима се уважава утицај попречног пресека електрода уземљивача при израчунавању његове отпорности распрострањања (редом формуле (5.4) и (5.5)):

$$R_0 = \frac{\rho}{2\pi L_T} \ln \frac{8L_T^2}{\pi g h} \quad (5.4)$$

(g је већа димензија попречног пресека електрода), и

$$R_0 = \frac{\rho}{2\pi L_T} \ln \frac{BL_T^2}{d_e h} \quad (5.5)$$

(d_e је еквивалентни пречник попречног пресека електрода, који се рачуна као $d_e = 2g/\pi$ (предлаже се и $d_e = g/2$), док је B параметар који зависи од структуре и облика уземљивачког система (за квадратну контуру $B = 5,53$).

У Прилогу Б су приказане две методе за израчунавање отпорности распрострањања сложених уземљивачких система, дате у референци [36]. Једна од њих је аналитичка (Метода Б.1), а друга полунумеричка (Метода Б.2). Обе методе се могу употребити за прорачун отпорности распрострањања сложеног уземљивача приказаног на сл. 5.1. У њима се отпорност распрострањања квадратног контурног уземљивача рачуна помоћу формуле (Б.1), која је по облику слична формули (5.2), али је далеко сложенија и тачнија. Унапређење формуле (Б.1) у односу на формуле (5.1)–(5.5) је уважавање утицаја површине контакта оствареног између електрода и околног тла.

5.3 Формирање 3Д FEM модела разматраних уземљивача

Формирање 3Д FEM модела уземљивачког система са сл. 5.1 није се битно разликовало од процедуре описане у поглављу 2.2. У разматраном случају, иницијални домен модела (ограничена запремина тла на посматраној локацији) била је коцка ($40 \text{ m} \times 40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$), са уземљивачким системом са сл. 5.1 постављеним тако да се вертикалне осе симетрије уземљивача и домена међусобно поклапају. Свакој страни коцке (осим горњој, која представља раздвојну површ између земље и ваздуха) додат је зид (под-домен) дебљине 4 m, састављен од „бесконачних“ коначних елемената. Као и у поглављу 2.2, искоришћена је симетрија, тако да је финални модел представљао осмину

иницијалног модела (као на сл 2.3). У зависности од потреба, модел је садржао од 180000 до 230000 тетраедарних коначних елемената, чиме је постигнута висока тачност вредности релевантних параметара. За разлику од модела у поглављу 2.2, којим је моделовано двослојно тло, овим моделима је разматрано само униформно (хомогено) тло. Потенцијал уземљивача је у свим симулацијама износио $\varphi_{e0} = 200 \text{ V}$ (као и у поглављу 2.2).

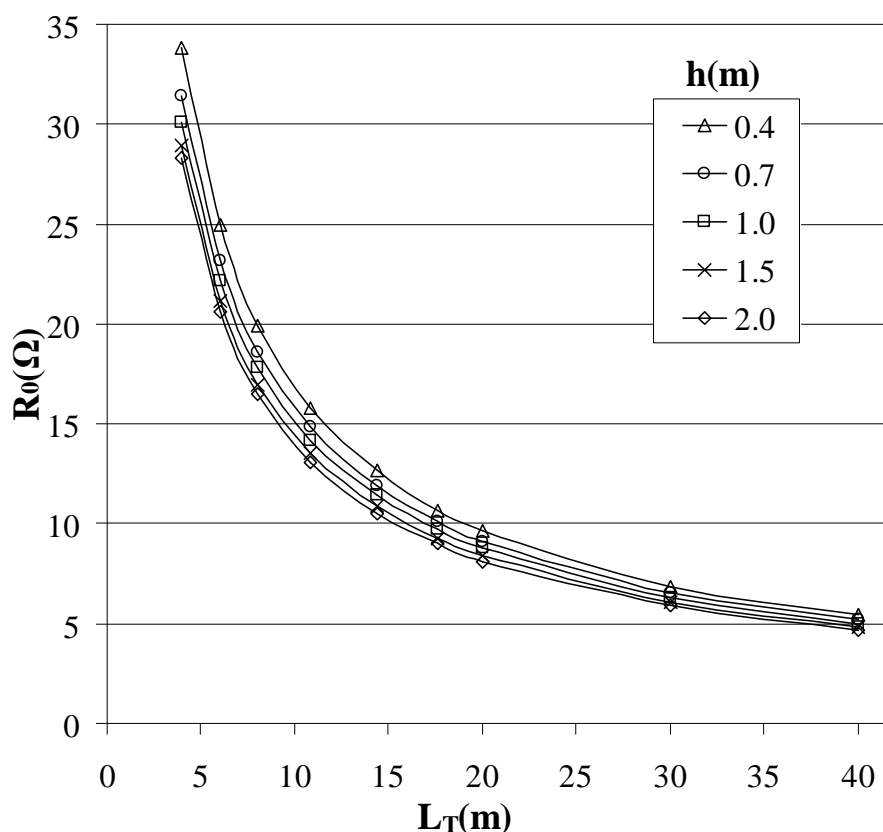
Варирањем вредности релевантних конструкционих параметара сложеног уземљивачког система са сл. 5.1 (у распонима датим у табели 5.1) у оквиру 3Д FEM модела и анализом резултата прорачуна могуће је утврдити корелације између отпорности распрострања разматраног уземљивача и његових релевантних конструкционих параметара. Нумеричком анализом резултата добијених симулацијама на 3Д FEM моделима изведене су нове формуле за израчунавање теоријске (базне) отпорности распрострања уземљивача састављеног од једне или више галвански спојених квадратних контура, приказаних на сл. 5.1 (оне важе за распоне конструкционих параметара који су дати у табели 5.1). Тачност резултата добијених помоћу изведених формула поређена је са тачношћу резултата добијених конвенционалним методама датим у стандардима [32,33] и приручницима [34–36] (резултати добијени 3Д FEM моделовањем коришћени су као референтни).

5.4 Извођење формуле за израчунавање теоријске (базне) отпорности распрострања квадратног контурног уземљивача

Прво је било неопходно спровести рачунарске симулације на 3Д FEM моделима, описаним у поглављу 5.3, за велики број квадратних контурних уземљивача представљених разним комбинацијама релевантних конструкционих параметара (наравно, у оквиру распона датих у табели 5.1). Као илустрација добијених резултата, неколико вредности отпорности распрострања квадратних контурних уземљивача добијених тим поступком приказано је на сл. 5.2.

Фитовањем неколико различитих функција $R_0(\rho, L_T, h, p)$ кроз добијене резултате, применом методе најмањих квадрата и итеративног поступка, тражен је најпогоднији облик функције који би обезбеђивао да се нова формула за израчунавање теоријске (базне) отпорности распрострања квадратног контурног

уземљивача одликује и једноставношћу и задовољавајућом тачношћу. Анализом добијених резултата закључено је да функција $R_0(\rho, L_T, h, p)$ треба да буде базирана на логаритамској зависности (слично као у формулама (5.4), (5.5) и (Б.1)).



Сл. 5.2 – Отпорности распрострања израчунате помоћу 3Д FEM симулација за неколико квадратних контурних уземљивача, разних обима и дубина полагања ($\rho = 100 \Omega m$, $p = 0,068 m$)

Идеја је била да се при извођењу нове формуле сачува једноставност употребе коју поседују формуле (5.4) и (5.5), тако што би се додавањем само једне константе у бројиоцу разломка под логаритмом њена тачност повећала уважавањем утицаја површине контакта оствареног између електрода и околног тла (што представља предност формуле (Б.1) у односу на формуле (5.1)–(5.5)). Константа под логаритмом одређена је поступком описаним у поглављу 3.4 (варирањем њене вредности помоћу Microsoft Excel Solver-а [80] док се није постигла минимална сума квадрата разлика између резултата $R_0(\rho, L_T, h, p)$ добијених 3Д FEM симулацијама и вредности $R_0(\rho, L_T, h, p)$ добијених предложеним

изразом базираним на логаритамској зависности). На крају, добијена је следећа формула за израчунавање теоријске (базне) отпорности распрострањања квадратног контурног уземљивача:

$$R_0 = \frac{\rho}{2\pi L_T} \ln \frac{8,85L_T^2}{ph} \quad (5.6)$$

Може се приметити да је предложена формула (5.6) по облику веома слична формулама (5.4) и (5.5), уз главну разлику да у имениоцу разломка под логаритмом фигурише обим попречног пресека електроде, p , уместо веће димензије или еквивалентног пречника њеног попречног пресека. Анализом резултата добијених спроведеним симулацијама на великом броју 3Д FEM модела, утврђено је да, за константну вредност параметра p , промена односа дужина страница правоугаоног попречног пресека електрода практично не утиче на вредност отпорности распрострањања квадратног контурног уземљивача. Могуће објашњење добијених резултата је да отпорност распрострањања квадратног контурног уземљивача доминантно зависи од укупне површине контакта оствареног између електрода уземљивача и околног тла, која зависи од обима попречног пресека електрода, а не и од односа дужина његових страница.

Вредности R_0 за велики број квадратних контурних уземљивача представљених разним комбинацијама релевантних конструкционих параметара (у распонима датим у табели 5.1) израчунате су употребом формула (5.1)–(5.5), (Б.1) и (5.6), а затим упоређене са 3Д FEM резултатима као референтним. Распони релативних грешака резултата добијених применом наведених формула ($\epsilon R_0(\%)$), као и просеци апсолутних вредности тих релативних грешака ($|\epsilon R_0|_{pr}(\%)$), дати су у табели 5.2. Анализом вредности датих у табели 5.2, може се закључити да је тачност резултата добијених употребом формула (5.1)–(5.3) значајно мања од тачности резултата добијених употребом формула (5.4), (5.5) и (Б.1), као и да формулу (5.6) карактерише највећа тачност. Употребом нове формуле (5.6) добијају се резултати који мање од 4% одступају од резултата добијених 3Д FEM симулацијама, што је препоручује за употребу при брзим анализама или пројектовању квадратних контурних уземљивача (са вредностима конструкционих параметара унутар распона датих у табели 5.1).

Табела 5.2 – Релативне грешке добијене употребом формула (5.1)–(5.6) и (Б.1) у поређењу са резултатима 3Д FEM симулација

Формула	$\varepsilon R_0(\%)$	$ \varepsilon R_{0/pr}(\%)$
(5.1)	[-18,36, 56,44]	17,35
(5.2)	[27,71, 144,71]	75,88
(5.3)	[-10,56, 75,15]	26,84
(5.4)	[-8,40, -3,83]	5,21
(5.5)	[2,36, 11,56]	7,18
(Б.1)	[-3,90, 8,30]	3,97
(5.6)	[-3,50, 1,39]	1,35

5.5 Извођење формула за израчунавање теоријске (базне) отпорности распрострања уземљивача састављеног од више галвански спојених квадратних контура

Код сложенијих уземљивачких система, какав је систем састављен од више галвански спојених квадратних контура представљен на сл. 5.1, одвођење струје са појединих његових елемената у околно тло одвија се отежано у односу на ситуацију када је сваки од тих елемената самостално положен у тло. Због тога је укупна отпорност распрострања таквог уземљивачког система нешто већа од отпорности еквивалентне паралелне везе отпорности распрострања појединачних елемената. У референцама [30] и [39] приказана је метода за развијање упрошћених аналитичких израза за израчунавање укупне отпорности распрострања сложених уземљивачких система код којих се описани ефекат уважава коефицијентима међусобног утицаја појединачних елемената. Применом те методе на уземљивачки систем који је приказан на сл. 5.1, уз третирање горње контуре као једног дела уземљивачког система, а све 4 галвански спојене доње контуре као другог, добијају се изрази

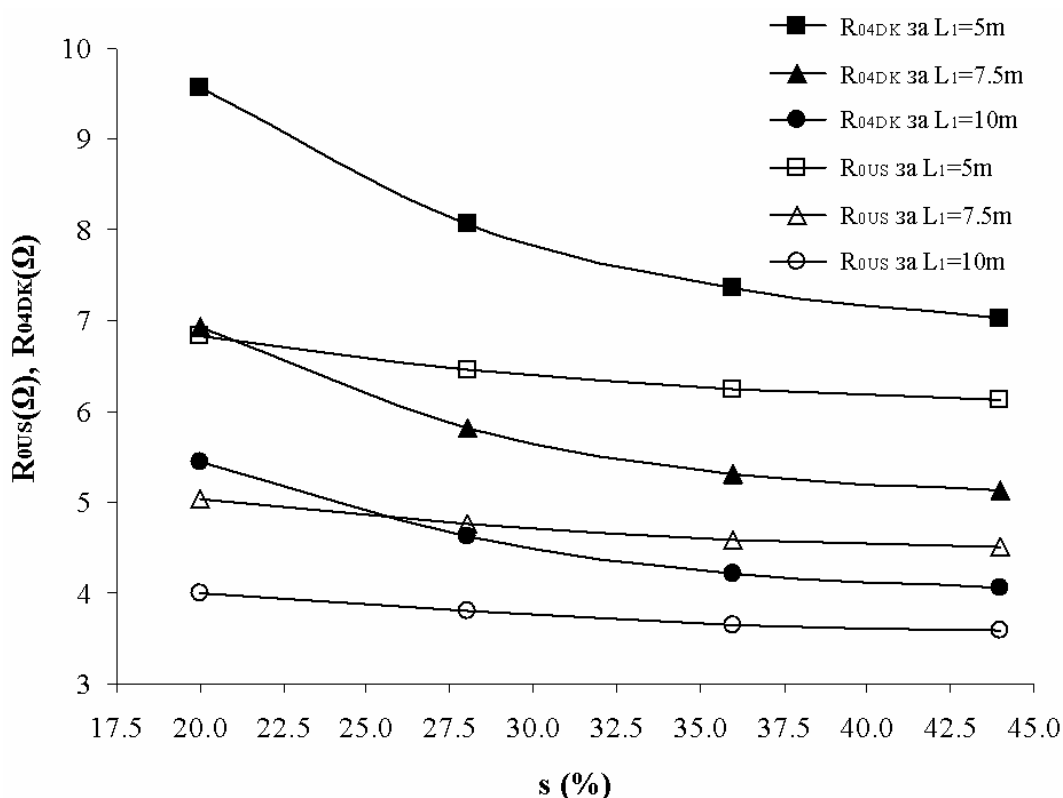
$$\frac{1}{R_{0US}} = \eta_{GK-4DK} \cdot \left(\frac{1}{R_{0GK}} + \frac{1}{R_{04DK}} \right), \text{ и} \quad (5.7)$$

$$\frac{1}{R_{04DK}} = \eta_{4DK} \cdot \left(\frac{1}{R_{0DK}} + \frac{1}{R_{0DK}} + \frac{1}{R_{0DK}} + \frac{1}{R_{0DK}} \right) = \eta_{4DK} \cdot \frac{4}{R_{0DK}}, \quad (5.8)$$

у којима су:

- R_{0US} теоријска отпорност распрострања целог уземљивачког система,
 R_{0GK} теоријска отпорност распрострања горње контуре,
 R_{04DK} теоријска отпорност распрострања 4 галвански спојене доње контуре,
 η_{GK-4DK} коефицијент којим се уважава међусобни утицај горње контуре и целе групе од 4 галвански спојене доње контуре,
 R_{0DK} теоријска отпорност распрострања доње контуре, и
 η_{4DK} коефицијент којим се уважава међусобни утицај 4 доње контуре.

Вредности R_{0US} , R_{0GK} , R_{04DK} и R_{0DK} за велики број уземљивачких система са сл. 5.1 (карактерисаних разним комбинацијама релевантних конструкционих параметара који су припадали распонима датим у табели 5.1) израчунате су помоћу рачунарских симулација спроведених на 3Д FEM моделима. Као илустрација добијених података, неколико вредности отпорности распрострања R_{0US} и R_{04DK} добијених тим поступком приказано је на сл. 5.3.



Сл. 5.3 – Отпорности распрострања R_{0US} и R_{04DK} израчунате 3Д FEM симулацијама за уземљивачки систем са сл. 5.1, за разне вредности параметара L_1 и s ($\rho = 100 \Omega m$, $p = 0,068 m$)

Увршћивањем добијених вредности R_{0US} , R_{0GK} , R_{04DK} и R_{0DK} у изразе (5.7) и (5.8) израчунати су η (η_{GK-4DK} и η_{4DK}) коефицијенти за сваки од моделованих уземљивачких система. Анализом добијених резултата примећено је да η коефицијенти доминантно зависе од параметара L_1 и s . Применом методе најмањих квадрата и итеративног поступка помоћу Microsoft Excel Solver-a [80] (поступак описан у поглављу 3.4), одређена је зависност $\eta(L_1, s)$. Изабран је једноставан облик функције $\eta(L_1, s)$ са 4 сабирка (првим и другим сабирком редом се уважава утицај дужина ивица доње и горње контуре, трећим сабирком утицај релативне међусобне удаљености доњих контура и четвртим сабирком утицаји фиксних параметара h_1 и h_2 , као и параметра p који не утиче значајно на вредности η коефицијената). Најпрецизнија апроксимација постигнута је помоћу изрази:

$$\eta(L_1, s) = C_1 \cdot L_1 \cdot s + C_2 \cdot L_1 + C_3 \cdot s + C_4, \quad (5.9)$$

у коме су C_1 , C_2 , C_3 и C_4 константе чије вредности су вариране док није постигнута минимална сума квадрата разлика између резултата добијених 3Д FEM-ом и изразом (5.9). Применом описаног поступка на разматрани случај, за вредности релевантних конструкционих параметара које су у оквиру распона датих у табели 5.1, добијене су следеће вредности:

$$(C_1, C_2, C_3, C_4) = (0,005185, -0,005094, -0,1656, 0,7299) \text{ за } \eta_{GK-4DK}, \text{ и} \quad (5.10)$$

$$(C_1, C_2, C_3, C_4) = (-0,005264, 0,004609, -0,7925, 0,8793) \text{ за } \eta_{4DK} \quad (5.11)$$

(треба нагласити да вредности коефицијената C_1 – C_4 не зависе од специфичне отпорности разматраног хомогеног тла).

За било коју комбинацију улазних параметара чије вредности припадају распонима датим у табели 5.1, као и за било коју вредност специфичне отпорности хомогеног тла, отпорност распрострања уземљивачког система приказаног на сл. 5.1 може се израчунати помоћу изрази (5.6)–(5.11). Отпорности R_{0GK} и R_{0DK} рачунају се помоћу формуле (5.6), η (η_{GK-4DK} и η_{4DK}) коефицијенти увођењем одговарајућих вредности константи (C_1 , C_2 , C_3 , C_4) из (5.10) и (5.11) у израз (5.9), вредност R_{04DK} помоћу формуле (5.8), и, коначно, вредност R_{0US} помоћу формуле (5.7).

Отпорности R_{0US} и R_{04DK} за велики број уземљивачких система са сл. 5.1 (карактерисаних разним комбинацијама релевантних конструкционих параметара који су припадали распонима датим у табели 5.1) израчунате су како помоћу израза (5.6)–(5.11), тако и употребом метода из Прилога Б – аналитичке Метода Б.1 (вредности R_{0US} и R_{04DK} рачунају се редом помоћу израза (Б.3) и (Б.2)) и полунумеричке Метода Б.2. Вредности R_{0US} и R_{04DK} добијене на такав начин поређене су са резултатима 3Д FEM симулација као референтним вредностима. Распони релативних грешака резултата добијених методама из Прилога Б и изразима (5.6)–(5.11), $\varepsilon R_0(\%)$, као и просеци апсолутних вредности тих релативних грешака, $|\varepsilon R_{0/pr}(\%)$, дати су у табели 5.3. Као илустрација, неколико вредности отпорности распростирања добијених 3Д FEM-ом, употребом метода из Прилога Б и израза (5.6)–(5.11) за неколико уземљивачких система са сл. 5.1, као и вредности одговарајућих релативних грешака у односу на референтне 3Д FEM резултате, дате су у табели 5.4.

Табела 5.3 – Релативне грешке добијене употребом метода из Прилога Б и израза (5.6)–(5.11) у поређењу са резултатима 3Д FEM симулација

	$\varepsilon R_{0US}(\%)$	$ \varepsilon R_{0US/pr}(\%)$	$\varepsilon R_{04DK}(\%)$	$ \varepsilon R_{04DK/pr}(\%)$
Метода Б.1, изрази (Б.3) и (Б.2)	[0,55, 8,19]	4,81	[-4,85, 4,23]	2,39
Метода Б.2	[3,56, 23,09]	13,67	[-0,78, 8,83]	3,10
Изрази (5.6)–(5.11)	[-2,24, 0,38]	1,22	[-2,25, 1,08]	0,71

Анализом вредности датих у табели 5.3 може се закључити да се све три методе (метода развијена и представљена у овој дисертацији, која се базира на изразима (5.6)–(5.11), и обе методе из Прилога Б) генерално одликују веома добром тачношћу. Употребом методе која се базира на изразима (5.6)–(5.11) добијају се резултати који мање од 3% одступају од резултата добијених 3Д FEM симулацијама, што је препоручује за употребу при брзим анализама или пројектовању уземљивачких система са сл. 5.1. Недостатак предложене методе је што на њену изузетну тачност може да се рачуна само при анализама или пројектовању уземљивачких система са сл. 5.1, чији конструкциони параметри имају вредности које припадају распонима датим у табели 5.1 (ниједна метода из

Прилога Б нема тај недостатак). Срећом, већину уземљивачких система 110 kV далеководних стубова карактеришу управо такви конструкциони параметри. Осим тога, предложена метода је, у односу на обе методе из Прилога Б, далеко једноставнија за употребу.

Табела 5.4 – Поређење резултата добијених 3Д FEM симулацијама, употребом метода из Прилога Б и израза (5.6)–(5.11) за неколико уземљивачких система са сл. 5.1 ($h_1 = 0,7 \text{ m}$, $h_2 = 2 \text{ m}$ и $p = 0,068 \text{ m}$)

$\rho(\Omega\text{m})$	50	50	100	100	200	200
$L_1(\text{m})$	5	7,5	10	5	7,5	10
s	0,20	0,28	0,36	0,44	0,36	0,44
$R_{0US}(\Omega)$ (3Д FEM)	3,42	2,38	3,65	6,13	9,17	7,19
$R_{0US}(\Omega)$ (изрази (5.6)–(5.11))	3,38	2,33	3,60	6,16	9,02	7,12
$\varepsilon R_{0US}(\%)$ (изрази (5.6)–(5.11))	–1,19	–2,24	–1,59	0,38	–1,65	–0,86
$R_{0US}(\Omega)$ (Метода Б.1, израз (Б.3))	3,44	2,50	3,95	6,35	9,76	7,77
$\varepsilon R_{0US}(\%)$ (Метода Б.1, израз (Б.3))	0,55	4,83	8,18	3,57	6,44	8,19
$R_{0US}(\Omega)$ (Метода Б.2)	3,81	2,63	4,086	7,55	10,59	8,35
$\varepsilon R_{0US}(\%)$ (Метода Б.2)	11,63	10,48	11,79	23,09	15,52	16,14
$R_{04DK}(\Omega)$ (3Д FEM)	4,79	2,90	4,22	7,04	10,63	8,12
$R_{04DK}(\Omega)$ (израз (5.6)–(5.11))	4,68	2,93	4,23	7,11	10,72	8,10
$\varepsilon R_{04DK}(\%)$ (израз (5.6)–(5.11))	–2,25	0,99	0,33	1,08	0,79	–0,25
$R_{04DK}(\Omega)$ (Метода Б.1, израз (Б.2))	4,55	2,94	4,39	6,91	10,89	8,38
$\varepsilon R_{04DK}(\%)$ (Метода Б.1, израз (Б.2))	–4,85	1,19	4,23	–1,80	2,41	3,29
$R_{04DK}(\Omega)$ (Метода Б.2)	4,75	2,97	4,31	7,66	11,01	8,38
$\varepsilon R_{04DK}(\%)$ (Метода Б.2)	–0,78	2,28	2,25	8,83	3,56	3,24

Пошто уземљивачки систем типичног 110 kV далеководног стуба, осим 5 галвански спојених квадратних контура израђених од поцинковане челичне траке (сл. 5.1), садржи и темељне уземљиваче и траке које спајају контуре, истражено је колика је максимална грешка која се прави њиховим занемаривањем (подсетимо да су темељни уземљивачи и траке које спајају контуре били занемарени и у 3Д FEM моделима, а самим тим и у изразима (5.6)–(5.11), као и при употреби метода из Прилога Б). Вредност R_{0ME} , која може да се израчуна употребом израза (Б.4),

представља минималну теоријску вредност коју R_{0US} може да постигне услед позитивног ефекта који темељни уземљивачи и повезујуће траке имају на укупну отпорност распрострања уземљивачког система (R_{0ME} представља отпорност распрострања масивне „електроде“ која обухвата све компоненте сложеног уземљивачког система са сл. 5.1 (заједно са темељним уземљивачима и повезујућим тракама) и цео простор изнад уземљивачког система, све до површине тла). Вредности R_{0ME} израчунате су употребом израза (Б.4), а затим су поређене са вредностима R_{0US} добијеним 3Д FEM симулацијама (као референтним). Релативне грешке резултата добијених помоћу израза (Б.4), $\epsilon R_{0US}(\%)$, биле су у распону $[-16,18, -1,78]$, док је просек апсолутних вредности тих релативних грешака износио $|\epsilon R_{0US}/pr(\%) = 8,15\%$. Наведени резултати потврђују да је занемарење постојања темељних уземљивача и повезујућих трака било оправдано у свим разматрањима у овој дисертацији (напомињемо да је веома тешко прикупити поуздане улазне податке за њихово моделовање, а и сама израда 3Д FEM модела непотребно би се искомпликовала уколико се наведено занемарење не би применило).

5.6 Анализа добијених резултата и разних могућности примене и модификације развијених формула

5.6.1 Анализа добијених резултата

У стандарду IEC 62305-3 [6] препоручена или максимална дозвољена отпорност уземљења далеководних стубова (мерена на ниским фреквенцијама), којом се обезбеђује жељена ефикасност громобранске заштите, износи $R_S = 10 \Omega$. У домаћој Техничкој препоруци број 9 [85] наглашено је да повратни прескок са стуба на проводнике није вероватан уколико вредност ударне отпорности уземљења стуба испуњава услов:

$$R_u \leq \frac{U_i}{I_u}, \quad (5.12)$$

где су:

R_u ударна отпорност уземљења стуба без галванске везе са заштитним проводником [Ω],

U_i подносиви ударни напон изолатора вода на сувом [kV], и

I_u темена вредност ударне струје грома [kA].

Препоручена или максимална дозвољена вредност ударне отпорности уземљења стуба $R_{u\max}$ разликује се од отпорности уземљења R_S која се добија мерењем помоћу уређаја чија је радна фреквенција до 150 Hz. Међутим, за уобичајене димензије уземљивача који се користе у далеководној мрежи, искључујући утицај заштитног проводника вода на импедансу уземљења, вредности ове две физичке величине практично се не разликују, тј. важи однос: $R_{u\max} \approx R_S$ [85].

На основу дугогодишње праксе у експлоатацији далеководне мреже сматра се да је, за просечне услове на територији Србије, постигнут задовољавајући ниво заштите од повратних прескока ако ударна отпорност уземљења стуба R_u износи [85]:

- $R_u \leq R_{u\max} = 15 \Omega$ за водове називног напона 10 kV, 20 kV и 35 kV, и
- $R_u \leq R_{u\max} = 10 \Omega$ за вод називног напона 110 kV, као и за поједине стубове водова називног напона до 35 kV који треба да имају виши ниво заштите од атмосферских пражњења, као што су: прва два-три стуба до трансформаторске станице X/10(20) kV на коју је прикључен вод, стуб са одводницима пренапона итд.

Ако код појединих стубова наведене ниске вредности $R_{u\max}$ (односно R_S) не могу да буду постигнуте на економичан начин, толерише се вредност отпорности уземљења стуба до 25 Ω за вод 20 kV и до 34 Ω за вод 35 kV. Долази у обзир и примена појачане изолације на стубу (на пример: примена штапних изолатора од порцелана типа А, додавање нових јединица изолаторског низа (чланака) у изолаторском ланцу итд.), или на том воду треба очекивати повећан број кварова. Ако се у току рада вода утврди да су поједини стубови посебно изложени кваровима услед атмосферских пражњења, треба побољшати уземљиваче таквих стубова или појачати изолацију на њима, или применити обе мере. Међутим, наведене мере нису квантитативно специфициране у [85].

Да подсетимо, у целом поглављу 5 анализиран је уземљивачки систем типичног 110 kV далеководног стуба за који се захтева да његова отпорност распрострања буде мања од $R_S = 10 \Omega$. Применом израза (5.6)–(5.11) на уземљивачки систем приказан на сл. 5.1 утврђено је да се захтевана вредност

$R_{0US} \leq 10 \Omega$ постиже за све комбинације конструкционих параметара чије вредности припадају распонима из табеле 5.1 само уколико је уземљивачки систем положен у тло чија је специфична отпорност $\rho \leq 140 \Omega\text{m}$. За тла чија је специфична отпорност $\rho > 140 \Omega\text{m}$ захтев $R_{0US} \leq 10 \Omega$ не може се постићи за све комбинације конструкционих параметара чије вредности припадају распонима из табеле 5.1 (за веће вредности ρ потребне су веће вредности параметра L_1 да би се постигло $R_{0US} \leq 10 \Omega$). Ако је уземљивачки систем положен у тло чија је специфична отпорност $\rho \geq 270 \Omega\text{m}$, захтев $R_{0US} \leq 10 \Omega$ не може се постићи ни за једну комбинацију конструкционих параметара чије вредности припадају распонима из табеле 5.1.

5.6.2 Могућност модификације развијених формула

Уколико је вредност R_{0US} већа (али не превише) од вредности R_S (што у разматраном случају може да се деси у тлу чија је специфична отпорност $\rho \geq 140 \Omega\text{m}$), пројектант може да покуша да вредност R_S постигне повећањем димензија горње контуре (величина и позиције доњих контура остају исте, зато што се оне постављају при постављању темеља стуба, а није пожељно копати у ширину на тој дубини (како због стабилности темеља стуба, тако и због већих инвестиционих трошкова)). Због ограничења њихове примене на распоне из табеле 5.1, помоћу израза (5.6)–(5.11) не може да се израчуна колико треба повећати горњу контуру да би се постигла вредност R_S , али може уз њихову малу модификацију. Помоћу 3Д FEM-а анализиран је следећи уземљивачки систем: $\rho = 200 \Omega\text{m}$, $p = 0,068 \text{ m}$, $h_1 = 0,7 \text{ m}$, $h_2 = 2 \text{ m}$, $L_1 = 5 \text{ m}$ и $L_2 = 1 \text{ m}$ (сл. 5.1). Израчуната је вредност његове отпорности распрострања $R_{0US} = 13,67 \Omega$. Повећањем димензија горње контуре у 3Д FEM моделу 3 и 5 пута, добијене су следеће вредности: $R'_{0US} = 6,53 \Omega$ за $L_1' = 3L_1$ и $R''_{0US} = 4,31 \Omega$ за $L_1'' = 5L_1$ (обе су ниже од захтеваних 10Ω). Анализом ових резултата добијених 3Д FEM-ом и резултата добијених изразима (5.6)–(5.11), утврђено је да и за дужине L_1 изван распона из табеле 5.1 формула (5.6) и даље даје резултате који мање од 4% одступају од резултата добијених 3Д FEM-ом. Међутим, вредност коефицијента $\eta_{\text{ГК-4ДК}}$ више не може довољно тачно да се одреди формулом (5.9), уз употребу вредности константи (C_1 , C_2 , C_3 , C_4) из (5.10) које важе за конструкционе параметре чије вредности припадају распонима из табеле 5.1. У односу на

вредност одређену помоћу (5.9) и (5.10) за иницијалну дужину L_1 , вредност коефицијента $\eta_{\text{GK-4DK}}$ одређена на основу резултата 3Д FEM прорачуна била је већа 1,194 и 1,275 пута када је дужина L_1 редом повећана 3 и 5 пута.

Имајући у виду наведене резултате, у случају примене израза (5.6)–(5.11) за прорачун отпорности распростирања уземљивачког система са сл. 5.1 коме се димензија горње контуре не припада распону из табеле 5.1 (све остале димензије остају исте, само се дужина L_1 повећава k пута), потребно је прво израчунати вредност коефицијента $\eta_{\text{GK-4DK}}$ за основни случај (без повећања дужине L_1). Затим, помоћу линеарне интерполације, треба одредити тачнију вредност коефицијента $\eta_{\text{GK-4DK}}$ за даље прорачуне, множењем вредности коефицијента $\eta_{\text{GK-4DK}}$ одређене за основни случај са $(0,097k + 0,903)$ за $1 \leq k \leq 3$, односно $(0,0405k + 1,0725)$ за $k > 3$. Пошто ова процедура није веома прецизна, могуће је да се њеном употребом добију нереалне вредности коефицијента $\eta_{\text{GK-4DK}}$ (веће од јединице). У таквим случајевима треба усвојити вредност $\eta_{\text{GK-4DK}} = 1$.

Наравно, при пројектовању таквог нестандардног уземљивачког система, за добијање тачнијих вредности његове отпорности распростирања увек је могуће употребити неки од професионалних софтвера базираних на FEM-у, којим могу да се провере и напони додира и корака у штићеној области на површини тла.

5.6.3 Разне могућности и ограничења употребе изведених формула и препоруке за њихов даљи развој

Иако скуп израза (5.6)–(5.11) може углавном да се користи за израчунавање вредности R_0 уземљивачког система типичног 110 kV далеководног стуба (приказаног на сл. 5.1, карактерисаног конструкционим параметрима чије вредности припадају распонима из табеле 5.1), представљена метода за развијање оваквих упрошћених израза за израчунавање вредности R_0 може да се примени на било који тип уземљивача. Такви упрошћени изрази су потребни и веома употребљиви, чак и у случајевима када није могуће постићи захтеване вредности R_S , јер тада мора да се прибегава додатним мерама заштите за чије је пројектовање такође неопходно знати вредности отпорности распростирања уземљивача. Већ је речено у поглављу 1.1 да је при пројектовању заштите далековода у случају квара потребно проценити просечан број кварова који се на њему очекују у одређеном временском периоду, при чему отпорности

распростирања уземљивача далеководних стубова представљају основне улазне податке за прорачун [8,9]. Осим тога, димензионисање изолатора на далеководним стубовима базирано је на што је могуће прецизнијој процени типа и величине очекиваних пренапона, која се не може спровести без познавања отпорности распростирања уземљивача далеководних стубова [10]. Оне су такође неопходне као улазни податак за спровођење техно-економских анализа којима треба да се дефинише оптимална стратегија за постављање одводника пренапона дуж далековода [11,12].

Један од недостатака примене скупа израза (5.6)–(5.11) састоји се у томе што су они добијени разматрањем физичких процеса који се одигравају при ниским фреквенцијама и релативно ниским вредностима јачине струје. Уколико је потребно вршити анализе прелазних појава које се одигравају приликом одвођења струје атмосферских пражњења у земљу са разматраног уземљивача, неопходно је познавати транзијентну импедансу распростирања уземљивача која се може значајно разликовати од вредности израчунате применом израза (5.6)–(5.11) (због јонизације и фреквентно зависних параметара тла [86–89]). Ипак, у таквим случајевима је могуће користити инжењерску процедуру из референце [36], којом се, коришћењем вредности распростирања уземљивача при ниским фреквенцијама и ниским вредностима јачине струје као улазног параметра, лако израчунава транзијентна импедансе распростирања уземљивача. Иста процедура се може применити и на отпорности распростирања уземљивача које се добијају применом израза (5.6)–(5.11).

Утицај просторних варијација специфичне отпорности тла (нарочито у случају примене модела двослојног тла, који се често користи у пракси) на вредности отпорности распростирања уземљивача такође заслужује пажњу. Помоћу 3Д FEM моделовања и нумеричке анализе добијених резултата могуће је развити изразе сличне изразима (5.6)–(5.11) којима би се тај утицај уважио. Међутим, развијање таквих израза превазилази оквире ове дисертације и представља простор за даље истраживање у овој области.

6 АЛГОРИТАМ ЗА ИЗРАЧУНАВАЊЕ УКУПНЕ ОТПОРНОСТИ РАСПРОСТИРАЊА КОМПЛЕКСНИХ УЗЕМЉИВАЧКИХ СИСТЕМА УЗ УВАЖАВАЊЕ УТИЦАЈА НЕСАВРШЕНОГ КОНТАКТА ИЗМЕЂУ ЕЛЕКТРОДА И ОКОЛНОГ ТЛА

У овом поглављу је приказан развијени општи алгоритам за израчунавање укупне отпорности распрострања комплексних уземљивачких система, R_T , уз уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла. Он се базира на додатном тест мерењу и скупу упрошћених израза који се добијају помоћу развијене опште методе за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при прорачуну отпорности распрострања уземљивача, приказане у поглављу 3, и опште методе за извођење упрошћених израза за израчунавање теоријске (базне) отпорности распрострања, R_0 , комплексних уземљивачких система, приказане у поглављу 5. Пошто је у поглављима 3 и 5 развијен скуп упрошћених израза који су довољни за израчунавање укупне отпорности распрострања разматране конструкције уземљивача састављеног од једне или више галвански спојених квадратних контура, алгоритам је тестиран за неколико различитих типова тла на уземљивачком систему типичног 110 kV далеководног стуба приказаном на сл. 5.1 (и то како на целом систему, тако и на његовим деловима). Провера тачности изведених формула и поузданости предложеног алгоритма извршена је поређењем добијених резултата са резултатима добијеним рачунарским симулацијама спроведеним на 3Д FEM моделима. Осим тога, показано је да и модификоване формуле за прорачун укупне отпорности распрострања, R_T , уземљивачког система приказаног на слици 5.1, изведене помоћу Методе Б.1 приказане у Прилогу Б, могу да се примене у оквиру развијеног алгоритма, а затим је и њихова тачност проверена поређењем добијених резултата са резултатима добијеним рачунарским симулацијама спроведеним на 3Д FEM моделима.

6.1 Примена израза (3.7) на квадратне контурне уземљиваче разних димензија положене у хомогено тло познатих параметара помоћу којих се описује квалитет контакта

Израз (3.7) развијен је за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при прорачуну отпорности распрострања разматраног квадратног контурног уземљивача (сл. 2.1), димензија $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ ($L_T = 20 \text{ m}$), положеног у двослојно тло. Међутим, претпостављено је да ће овај израз, у комбинацији са изразом (5.6) за израчунавање вредности R_0 , моћи да се примени за израчунавање вредности R_T квадратних контурних уземљивача (R_{TKK}) разних димензија положених у хомогено тло чији је контакт са електродама описан познатим параметрима d_0 , T_0 и F_0 ($d_0 = 16 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ и $T_0 = 0,25 \text{ m}$ за концепт С1 (сл. 2.6), уз вредности корекционих коефицијената K_0 , K_1 и K_2 из (3.8)).

Ова претпоставка је проверена поређењем вредности R_{TKK} израчунатих помоћу израза (3.7), (3.8) и (5.6) за квадратне контурне уземљиваче са најмањим ($L_T = 4 \text{ m}$) и највећим ($L_T = 40 \text{ m}$) обимом из опсега вредности датих у табели 5.1 са вредностима добијеним рачунарским симулацијама спроведеним на 3Д FEM моделима (поглавље 5.3). Разматране су квадратне контуре обима попречног пресека траке $p = 0,068 \text{ m}$, положене на дубину $h = 0,5 \text{ m}$ у шест различитих типова хомогеног тла (описаних са шест различитих вредности F_0), специфичне отпорности $\rho = 100 \Omega\text{m}$. Вредности R_{TKK} израчунате помоћу израза (3.7), (3.8) и (5.6) и рачунарским симулацијама спроведеним на 3Д FEM моделима, као и вредности њихових релативних одступања, $\epsilon R_{TKK}(\%)$, дате су у табели 6.1.

Анализом вредности приказаних у табели 6.1 види се да вредност $\epsilon R_{TKK}(\%)$ не прелази 5,45%, чиме је доказана претпоставка да изрази (3.7), (3.8) и (5.6) могу да се употребе за израчунавање вредности R_T квадратних контурних уземљивача разних димензија (које припадају опсегу вредности из табеле 5.1), као и да се при томе очекује веома висока тачност добијених резултата.

Табела 6.1 – Поређење резултата добијених употребом израза (3.7), (3.8) и (5.6) и резултата добијених 3Д FEM симулацијама (као референтних) за разматране квадратне контурне уземљиваче ($h = 0,5 \text{ m}$, $p = 0,068 \text{ m}$, $\rho = 100 \text{ }\Omega\text{m}$, $d_0 = 16 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ и $T_0 = 0,25 \text{ m}$)

$L_T(\text{m})$	$F_0(\%)$	$R_{\text{ТКК}}(\Omega)$ (3.7), (3.8) и (5.6)	$R_{\text{ТКК}}(\Omega)$ FEM	$\epsilon R_{\text{ТКК}}(\%)$
4	0	32,32	32,84	-1,57
4	50	42,51	40,31	5,45
4	80	60,08	59,63	0,76
4	92	97,20	98,56	-1,38
4	96	157,33	155,78	1,00
4	98	276,94	262,93	5,33
40	0	5,06	5,26	-3,74
40	50	6,08	6,04	0,70
40	80	7,84	8,04	-2,42
40	92	11,55	12,02	-3,88
40	96	17,57	18,21	-3,53
40	98	29,53	29,43	0,34

6.2 Примена израза (3.7) на квадратне контурне уземљиваче разних димензија положене у хомогено тло непознатих параметара помоћу којих се описује квалитет контакта

У овом поглављу је показано како тло непознатих карактеристика у погледу остваривања контакта са електродама уземљивача (непознатих параметара d_x , T_x и F_x) може, у смислу једнакости отпорности распростирања уземљивача, да се еквивалентира тлом описаним помоћу познатих параметара d_0 и T_0 , као и параметра F_0 који се процењује на основу резултата тест мерења. Коришћењем тих параметара (d_0 , T_0 и F_0) и употребом израза (3.7), (3.8) и (5.6), могуће је са задовољавајућом тачношћу одредити укупну отпорност распростирања, R_T , разматраних квадратних контурних уземљивача (окарактерисаних вредностима конструкционих параметара из опсега датих у табели 5.1) чак и када су положени у тло непознатих карактеристика у погледу остваривања контакта са електродама уземљивача.

Предложени приступ је спроведен на квадратним контурама два уземљивачка система (US) приказана на сл. 5.1, који се одликују најмањим (US1), односно највећим (US2), вредностима параметара L_1 и s из распона вредности датих у табели 5.1. Улазни параметри за разматране уземљивачке системе US1 и US2, као и одговарајући коефицијенти међусобних утицаја контура (израчунати употребом израза (5.9)–(5.11)) дати су у табели 6.1. Претпостављено је да су ти уземљивачки системи положени у тло које се описује параметрима ρ , d_x и T_x , који су такође дати у табели 6.1, као и помоћу шест различитих вредности параметра $F_x(\%)$, које су дате у табели 6.2.

Табела 6.1 – Улазни параметри за разматране уземљивачке системе и моделовано тло, као и одговарајући коефицијенти међусобних утицаја контура (израчунати употребом израза (5.9)–(5.11))

US	L_1 (m)	s	p (10^{-3}m)	h_1 (m)	h_2 (m)	$\eta_{\text{ГК-4ДК}}$ (5.9) и (5.10)	$\eta_{\text{4ДК}}$ (5.9) и (5.11)	ρ (Ωm)	d_x (10^{-3}m)	T_x (10^{-2}m)
US1	5	0,2	68	0,7	2	0,677	0,739	100	20	5
US2	10	0,44	68	0,7	2	0,629	0,554	100	25	40

За додатна тест „мерења“, на основу чијих резултата се процењује параметар F_0 који одговара параметрима d_0 и T_0 познатог тла (за које су изведени неопходни изрази) којим се тло непознатих параметара d_x , T_x и F_x еквивалентира, коришћена је мала тест квадратна контура ($1\text{ m} \times 1\text{ m}$) израђена од поцинковане челичне траке правоугаоног попречног пресека ($30\text{ mm} \times 4\text{ mm}$), положена на дубину $h = 0,5\text{ m}$. Пошто је у свим разматраним случајевима специфична отпорност тла $\rho = 100\ \Omega\text{m}$, теоријска (базна) вредност отпорности распрострањања те тест контуре, израчуната употребом израза (5.6), износи $R_{0\text{test}} = 33,16\ \Omega$.

Међутим, уколико се тест контура полаже у другачија тла (у смислу квалитета контакта који она формирају са тракама (што се може описати разним комбинацијама параметара d_x , T_x и F_x)), измерене вредности укупне отпорности распрострањања тест контуре, R_{Ttest} , разликоваће се мање или више од израчунате вредности $R_{0\text{test}}$ (у зависности од квалитета контакта, односно величине контактне отпорности). Управо та разлика пружа могућност да се процени параметар F_0 којим, уз d_0 и T_0 , може да се еквивалентира тло непознатих параметара d_x , T_x и F_x .

Табела 6.2 – Поређење резултата добијених предложеном процедуром, базираном на развијеним изразима (3.7), (3.8), (5.6)–(5.11) и (6.1)–(6.3), и резултата добијених рачунарским симулацијама спроведеним на 3Д FEM моделима за разматране уземљивачке системе чији су конструкциони параметри дати у табели 6.1

<i>US</i>	F_x (%)	R_{Ttest} (Ω) FEM	ϵR_{Ttest} (%)	F_0 (%)	R_{TDK} (Ω) (3.7)	R_{TDK} (Ω) FEM	ϵR_{TDK} (%)	R_{TGK} (Ω) (3.7)	R_{TGK} (Ω) FEM	ϵR_{TGK} (%)	R_{T4DK} (Ω) (6.2)	R_{T4DK} (Ω) FEM	ϵR_{T4DK} (%)	R_{TUS} (Ω) (6.3)	R_{TUS} (Ω) FEM	ϵR_{TUS} (%)
US1	0	32,84	-0,97	3,28	27,32	28,32	-3,53	8,86	9,12	-2,88	9,27	9,57	-3,21	6,71	6,83	-1,80
US1	50	38,46	15,99	34,00	32,95	33,99	-3,06	9,99	10,28	-2,82	10,68	10,95	-2,45	7,35	7,41	-0,92
US1	80	54,08	63,07	74,19	48,56	49,51	-1,92	13,11	13,42	-2,31	14,59	14,95	-2,42	9,09	9,23	-1,50
US1	92	90,28	172,24	90,97	84,76	85,71	-1,10	20,35	20,59	-1,18	23,64	24,06	-1,76	13,12	13,37	-1,81
US1	96	149,23	350,00	95,71	143,71	144,72	-0,70	32,14	32,59	-1,37	38,37	39,12	-1,91	19,68	20,05	-1,82
US1	98	270,87	716,83	97,95	265,36	266,59	-0,46	56,47	58,60	-3,64	68,79	69,91	-1,61	33,21	33,68	-1,41
US2	0	32,84	-0,97	3,28	8,89	8,99	-1,07	4,98	5,12	-2,63	4,03	4,06	-0,71	3,55	3,59	-1,20
US2	50	42,76	28,94	50,83	11,14	11,06	0,72	5,97	6,09	-1,92	4,59	4,63	-0,86	3,92	3,81	2,90
US2	80	68,22	105,73	84,84	16,93	16,49	2,68	8,52	8,54	-0,22	6,04	6,00	0,70	4,86	4,71	3,23
US2	92	120,08	262,09	94,20	28,72	28,13	2,08	13,71	13,72	-0,09	8,99	9,00	-0,19	6,76	6,64	1,83
US2	96	197,21	494,69	97,00	46,25	45,04	2,68	21,42	20,77	3,11	13,37	13,20	1,28	9,57	9,26	3,39
US2	98	339,53	923,87	98,42	78,59	75,91	3,53	35,65	35,60	0,15	21,46	21,48	-0,11	14,74	14,22	3,69

Уместо реалних мерења, коришћено је 3Д FEM моделовање разматраних контура и 12 различитих типова тла (описаних различитим комбинацијама параметара d_x , T_x и F_x). Вредности R_{Test} , добијене рачунарским симулацијама спроведеним на 3Д FEM моделима, као и њихове релативне грешке, $\varepsilon R_{\text{Test}}$, у односу на базну вредност, дате су у табели 6.2 за свих 12 различитих типова тла. Ти резултати су још једном потврдили да у случајевима када се уземљивач положи у тло које формира лош контакт са његовим електродама контактна отпорност постаје доминантна компонента укупне отпорности распрострања уземљивача, услед чега употреба конвенционалних формула које не уважавају утицај лошег контакта нема смисла (види се да релативне грешке иду и до 924%).

Ако се претпостави да тло непознатих параметара d_x , T_x и F_x може да се еквивалентира тлом познатих параметара $d_0 = 16 \cdot 10^{-3}$ m, $T_0 = 25 \cdot 10^{-2}$ m и одговарајућом вредношћу параметра F_0 , у посматраном случају израз (3.7) постаје:

$$R_{\text{Test}} = R_{0\text{test}} + \frac{\rho \cdot d_0}{p \cdot L_T} \left[(K_0 + K_1 \cdot F_0 + K_2 \cdot F_0^2) \cdot \frac{100}{100 - F_0} - 1 \right], \quad (6.1)$$

уз напомену да коефицијенти K_0 , K_1 и K_2 имају вредности дате у (3.8). Након мерења отпорности R_{Test} , једина непозната величина у изразу (6.1) је F_0 , која може лако да се одреди (нпр. итеративним поступком у коме његова иницијална вредност може да буде $F_0 = 50$).

Вредности F_0 добијене на описани начин за 12 разматраних типова тла такође су дате у табели 6.2. Може се приметити да се вредности F_0 и F_x разликују (зато што параметри d , T , K_0 , K_1 и K_2 имају различите вредности за „познато“ и „непознато“ тло). У свим даљим прорачунима, који су се базирали на развијеним формулама, отпорности распрострања уземљивача у „непознатом“ тлу рачунате су коришћењем вредности K_0 , K_1 и K_2 из (3.8), d_0 и T_0 , као и израчунатих вредности F_0 које су дате у табели 6.2.

Теоријске (базне) вредности отпорности распрострања квадратних контурних уземљивача (R_{OGK} и R_{ODK}) који припадају US1 и US2 (табела 6.1) израчунате су употребом израза (5.6). Њихове контактне отпорности (R_{CGK} и R_{CDK}) израчунате су употребом израза (3.6), коришћењем вредности K_0 , K_1 и K_2 из (3.8),

$d_0 = 16 \cdot 10^{-3}$ m, $\rho = 100 \Omega\text{m}$, као и вредности F_0 из табеле 6.2. Сабирањем базних и контактних отпорности израчунате су и дате у табели 6.2 укупне отпорности распрострања разматраних квадратних контурних уземљивача ($R_{\text{TГК}}$ и $R_{\text{TДК}}$), за свих 12 типова тла. Вредности $R_{\text{TГК}}$ и $R_{\text{TДК}}$ су такође добијене рачунарским симулацијама спроведеним на 3Д FEM моделима у којима је контакт између електрода и тла моделован на основу вредности параметара d_x и T_x датих у табели 6.1 и F_x датих у табели 6.2. Оне су такође дате у табели 6.2, заједно са релативним грешкама ($\epsilon R_{\text{TГК}}$ и $\epsilon R_{\text{TДК}}$) резултата добијених применом израза (3.7) у односу на референтне резултате добијене помоћу 3Д FEM симулација.

Анализом вредности приказаних у табели 6.2 види се да вредности $\epsilon R_{\text{TГК}}$ и $\epsilon R_{\text{TДК}}$ не прелазе 4%. Приказани резултати потврђују исправност претпоставке да тло непознатих карактеристика у погледу остваривања контакта са електродама уземљивача (непознатих параметара d_x , T_x и F_x) може да се еквивалентира тлом које описују познати параметри d_0 и T_0 , као и параметар F_0 који се процењује на основу резултата тест мерења. Такође потврђују да уз параметре d_0 , T_0 и F_0 , изрази (3.7), (3.8) и (5.6) могу да се употребе за израчунавање вредности R_{T} квадратних контурних уземљивача разних димензија (које припадају опсегу вредности из табеле 5.1) положених у тло непознатих карактеристика, као и да се при томе очекује веома висока тачност добијених резултата.

6.3 Израчунавање укупне отпорности распрострања сложеног уземљивачког система приказаног на сл. 5.1 уз уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла

Након одређивања теоријске (базне) вредности отпорности распрострања квадратних контурних уземљивача ($R_{0\text{ГК}}$ и $R_{0\text{ДК}}$) који припадају US1 и US2, као и одређивања њихових контактних отпорности ($R_{\text{CGК}}$ и $R_{\text{CDК}}$) процедуром описаном у поглављу 6.2, приступило се израчунавању укупне отпорности распрострања сложеног уземљивачког система приказаног на сл. 5.1. У ту сврху коришћени су упрошћени изрази за израчунавање теоријске (базне) вредности отпорности распрострања сложеног уземљивачког система приказаног на сл. 5.1, базирани на коефицијентима међусобног утицаја појединачних елемената, који су развијени и представљени у поглављу 5.5 (изрази (5.7)–(5.11)). Одговарајући

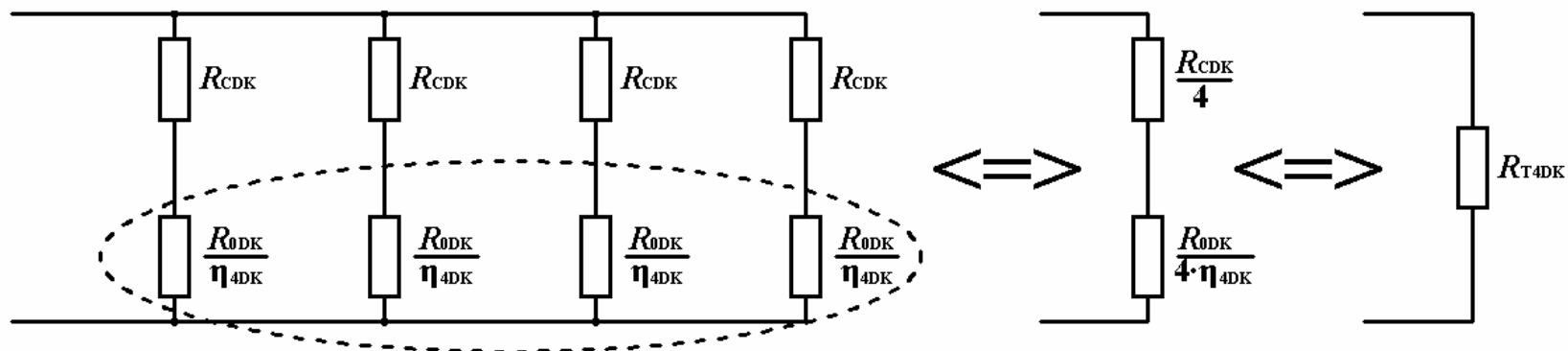
η коефицијенти ($\eta_{\text{GK-4DK}}$ и η_{4DK}) за разматране уземљивачке системе US1 и US2, израчунати помоћу наведених израза, дати су у табели 6.1. Међутим, наведени изрази су морали да буду модификовани да би се уважио утицај контактне отпорности.

Пошто је у поглављу 3.3 утврђено да несавршен контакт између електрода и тла не утиче значајно на униформност расподеле потенцијала у околном тлу, односно да расподела потенцијала постаје униформа већ на растојању од око 0,1 m од површине електроде уземљивача (сл. 3.2 и 3.3), претпостављено је да контактна отпорност неће имати значајног утицаја на вредности η коефицијената који се односе на базне отпорности распрострањања. На основу наведеног, претпостављено је да се укупне отпорности распрострањања све четири доње контуре (R_{T4DK}) и целог уземљивачког система (R_{TUS}) могу израчунати применом еквивалентних шема приказаних редом на сл. 6.1 и сл. 6.2. Употребом тих еквивалентних шема развијене су следеће формуле:

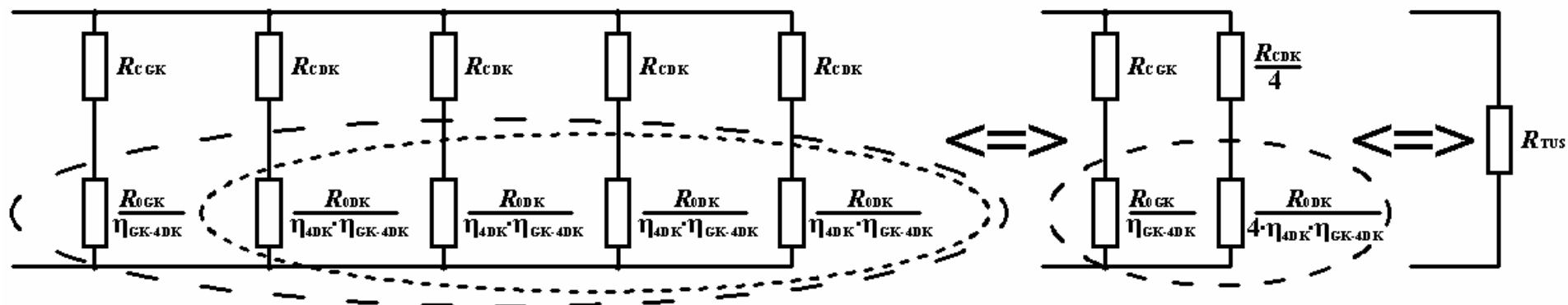
$$\frac{1}{R_{\text{T4DK}}} = 4 \cdot \left(\frac{1}{R_{\text{CDK}}} + \frac{\eta_{\text{4DK}}}{R_{\text{0DK}}} \right), \text{ и} \quad (6.2)$$

$$\frac{1}{R_{\text{TUS}}} = \frac{1}{R_{\text{CGK}} + \frac{R_{\text{0GK}}}{\eta_{\text{GK-4DK}}}} + \frac{4}{R_{\text{CDK}} + \frac{R_{\text{0DK}}}{\eta_{\text{4DK}} \cdot \eta_{\text{GK-4DK}}}}. \quad (6.3)$$

Вредности укупне отпорности распрострањања R_{T4DK} и R_{TUS} за разматране уземљивачке системе US1 и US2 израчунате су за свих 12 разматраних типова тла употребом предложене процедуре и израза (6.1) и (6.2), и дате у табели 6.2. Вредности R_{T4DK} и R_{TUS} су такође добијене рачунарским симулацијама спроведеним на 3Д FEM моделима у којима је контакт између електрода и тла моделован на основу вредности параметара d_x и T_x датих у табели 6.1 и F_x датих у табели 6.2. Оне су такође дате у табели 6.2, заједно са релативним грешкама (ϵR_{T4DK} и ϵR_{TUS}) резултата добијених применом израза (6.1) и (6.2) у односу на референтне резултате добијене 3Д FEM симулацијама.



Сл. 6.1 – Еквивалентна шема за израчунавање укупне отпорности распрострања све четири доње контуре (R_{T4DK})



Сл. 6.2 – Еквивалентна шема за израчунавање укупне отпорности распрострања целог уземљивачког система (R_{TUS})

Анализом вредности приказаних у табели 6.2 види се да вредности ϵR_{T4DK} и ϵR_{TUS} не прелазе 4%, чиме је потврђена исправност претпоставке да контактна отпорност неће имати значајног утицаја на вредности коефицијената η . Процедура спроведена у поглављима 6.2 и 6.3 заправо представља општи алгоритам за израчунавање укупне отпорности распрострања комплексних уземљивачких система, R_T , разних типова и димензија, уз уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла. Приказаним резултатима је доказана поузданост тог алгоритма, базираног на изразима који се добијају помоћу опште методе за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при прорачуну отпорности распрострања уземљивача, приказане у поглављу 3, као и опште методе за извођење упрошћених израза за израчунавање теоријске (базне) отпорности распрострања, R_0 , сложених уземљивачких система, приказане у поглављу 5.

6.4 Кораци развијеног алгоритма за израчунавање укупне отпорности распрострања сложених уземљивачких система уз уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла

Алгоритам се састоји од следећих 8 корака:

1. у току мерења неопходних за одређивање специфичне отпорности тла на локацији на којој ће се инсталирати уземљивачки систем, потребно је извршити додатно мерење отпорности распрострања, R_{Ttest} , тест уземљивача (у разматраном примеру, квадратне контуре $(1\text{ m} \times 1\text{ m})$ израђене од поцинковане челичне траке правоугаоног попречног пресека $(30\text{ mm} \times 4\text{ mm})$, положене на дубину $h = 0,5\text{ m}$),
2. коришћењем вредности специфичне отпорности тла добијене мерењима ($\rho = 100\ \Omega\text{m}$ у разматраном примеру) и упрошћеног израза за израчунавање теоријске (базне) отпорности распрострања тест уземљивача (израз (5.6) у разматраном примеру), одређује се R_{0test} ,
3. коришћењем израчунате вредности R_{0test} , измерене вредности R_{Ttest} и упрошћеног израза за уважавање утицаја лошег контакта између електрода и тла на укупну отпорност распрострања уземљивача ((6.1) у разматраном примеру), треба квантитативно описати непознате карактеристике тла (које

- се тичу квалитета контакта тла са електродама) параметрима d_0 , T_0 и израчунао вредношћу F_0 ,
4. помоћу вредности F_0 добијене у кораку 3 алгоритма и упрошћеног израза за рачунање контактне отпорности између електрода и тла ((3.6) у разматраном примеру) одређују се контактне отпорности сваког елемента сложеног уземљивачког система (R_{CGK} и R_{CDK} у разматраном примеру),
 5. применом упрошћених израза (израза (5.6) у разматраном примеру) израчунавају се теоријске (базне) отпорности распрострања сваког елемента сложеног уземљивача (R_{0GK} и R_{0DK} у разматраном примеру),
 6. применом упрошћених израза (израза (5.9)–(5.11) у разматраном примеру) одређују се коефицијенти којима се описује међусобни утицај елемената сложеног уземљивачког система (η_{GK-4DK} и η_{4DK} у разматраном примеру),
 7. на основу разматрања структуре сложеног уземљивачког система формирају се еквивалентне шеме за прорачун укупне отпорности распрострања целог система или неке од његових потцелина (редом сл. 6.2 и 6.1 у разматраном примеру), и
 8. на основу еквивалентних шема добијених у кораку 7 алгоритма, изводе се изрази за прорачун укупне отпорности распрострања целог система или неке од његових потцелина (изрази (6.3) и (6.2) у разматраном случају), а затим, уношењем вредности теоријске (базне) отпорности распрострања сваког елемента сложеног уземљивача (добијених у кораку 5 алгоритма), вредности њихових контактних отпорности (добијених у кораку 4 алгоритма) и вредности коефицијената којима се описује међусобни утицај елемената сложеног уземљивачког система (добијених у кораку 6 алгоритма) у изведене изразе, израчунавају се жељене отпорности R_T (R_{TUS} и R_{T4DK} у разматраном примеру).

Осим са изразима који се добијају помоћу развијене опште методе за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла, приказане у поглављу 3, као и помоћу опште методе за извођење упрошћених израза за израчунавање теоријске (базне) отпорности распрострања, R_0 , сложених уземљивачких система, приказане у поглављу 5, предложени алгоритам може да се користи и у комбинацији са другим формулама које могу да се

употребе за исту намену, какве су, на пример, формуле изведене за разматрани случај Методом Б.1 (Прилог Б). Иако су формуле (Б.1)–(Б.3) иницијално биле намењене за израчунавање теоријске (базне) отпорности распрострања, R_0 , уземљивачког система приказаног на слици 5.1, други њихов члан може се модификовати тако да могу да послуже за израчунавање укупне отпорности распрострања, R_T , разматраног уземљивачког система положеног у тло које формира несавршен контакт са електродама уземљивача. Једноставним увођењем параметра F , формуле (Б.1)–(Б.3) постају редом формуле (Б.5)–(Б.7) (дате у Прилогу Б у поглављу Б.1.2), које могу да се користе у оквиру предложеног алгорита. У том случају, алгоритам се своди на следећа 3 корака:

1. у току мерења неопходних за одређивање специфичне отпорности тла на локацији на којој ће се инсталирати уземљивачки систем, потребно је извршити додатно мерење отпорности распрострања, $R_{T_{test}}$, тест уземљивача (у разматраном примеру, квадратне контуре $(1\text{ m} \times 1\text{ m})$ израђене од поцинковане челичне траке правоугаоног попречног пресека $(30\text{ mm} \times 4\text{ mm})$, положене на дубину $h = 0,5\text{ m}$),
2. коришћењем измерене вредности $R_{T_{test}}$ и модификованог израза за уважавање утицаја лошег контакта између електрода и тла на укупну отпорност распрострања тест уземљивача ((Б.5) у разматраном примеру), треба израчунати вредност параметра F , којим се квантитативно описује непозната карактеристика тла,
3. употребом вредности F добијене у кораку 2 алгорита и модификованих израза за уважавање утицаја лошег контакта између електрода и тла на укупну отпорност распрострања (изрази (Б.5)–(Б.7) у разматраном примеру) израчунавају се жељене отпорности R_T (R_{TDK} , R_{TGK} , R_{T4DK} и R_{TUS} у разматраном примеру).

Вредности укупне отпорности распрострања R_{TDK} , R_{TGK} , R_{T4DK} и R_{TUS} за разматране уземљивачке системе US1 и US2 израчунате су за свих 12 разматраних типова тла употребом предложеног алгорита и израза (Б.5)–(Б.7), и дате у табели 6.3. Вредности R_{TDK} , R_{TGK} , R_{T4DK} и R_{TUS} су такође добијене рачунарским симулацијама спроведеним на 3Д FEM моделима у којима је контакт између електрода и тла моделован на основу вредности параметара d_x и T_x датих у табели

6.1 и F_x датих у табели 6.3. Оне су такође дате у табели 6.3, заједно са релативним грешкама ($\varepsilon R_{\text{TДК}}$, $\varepsilon R_{\text{TГК}}$, $\varepsilon R_{\text{T4ДК}}$ и $\varepsilon R_{\text{TUS}}$) резултата добијених применом израза (Б.5)–(Б.7) у односу на референтне резултате добијене 3Д FEM симулацијама. Треба нагласити да теоријска (базна) отпорност распростирања тест уземљивача, израчуната употребом формуле (Б.1) претпостављајући $\rho = 100 \Omega\text{m}$, износи $R_{0\text{test}} = 33,38 \Omega$.

6.5 Анализа добијених резултата

При пројектовању уземљивачког система, пројектант који није упознат са предложеним алгоритмом и изразима за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла може да се ослони само на конвенционалне изразе за израчунавање његове теоријске (базне) отпорности распростирања, R_0 , какви су изрази (5.6)–(5.11) за разматрани случај. Применом таквих формула, пројектант, уместо на основу реалних укупних отпорности распростирања ($R_{\text{TДК}}$, $R_{\text{TГК}}$, $R_{\text{T4ДК}}$, R_{TUS}), пројектује уземљивачки систем на основу теоријских (базних) вредности ($R_{0\text{ДК}}$, $R_{0\text{ГК}}$, $R_{04\text{ДК}}$, $R_{0\text{US}}$), чије вредности, израчунате употребом израза (5.6)–(5.11) за разматрани случај, износе (27,65, 8,93, 9,36, 6,75) Ω за US1, односно (8,96, 5,01, 4,05, 3,56) Ω за US2. Међутим, ако се US1 и US2 положи у тло које формира лош контакт са електродама уземљивача, реалне вредности ($R_{\text{TДК}}$, $R_{\text{TГК}}$, $R_{\text{T4ДК}}$, R_{TUS}) биће далеко веће, што ће се утврдити обавезним мерењима након инсталирања уземљивачког система. У таквим случајевима, једно од решења је да се накнадно поставе додатне електроде, како би се постигла жељена или захтевана отпорност R_S . Међутим, без употребе предложеног алгоритма и израза за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла, пројектант не би могао да одреди колико додатних електрода треба да употреби како би се постигла жељена или захтевана отпорност R_S . Уз то, укупна сума инвестиционих трошкова могла би значајно да премаши суму предвиђену иницијалним пројектом због употребе додатних електрода, као и додатних радних сати ангажовања људи и опреме.

Табела 6.3 – Поређење резултата добијених предложеним алгоритмом, у комбинацији са изразима (Б.5)–(Б.7), и резултата добијених рачунарским симулацијама спроведеним на 3Д FEM моделима за разматране уземљивачке системе чији су конструкциони параметри дати у табели 6.1

<i>US</i>	F_x (%)	R_{Ttest} (Ω) FEM	ϵR_{Ttest} (%)	F (%)	R_{TDK} (Ω) (Б.5)	R_{TDK} (Ω) FEM	ϵR_{TDK} (%)	R_{TGK} (Ω) (Б.5)	R_{TGK} (Ω) FEM	ϵR_{TGK} (%)	R_{T4DK} (Ω) (Б.6)	R_{T4DK} (Ω) FEM	ϵR_{T4DK} (%)	R_{TUS} (Ω) (Б.7)	R_{TUS} (Ω) FEM	ϵR_{TUS} (%)
US1	0	32,84	-1,63	-5,37	26,45	28,32	-6,60	9,63	9,12	5,52	8,89	9,57	-7,17	6,79	6,83	-0,62
US1	50	38,46	15,21	30,55	34,22	33,99	0,70	11,13	10,28	8,27	11,12	10,95	1,51	7,61	7,41	2,60
US1	80	54,08	61,99	61,48	54,89	49,51	10,86	15,13	13,42	12,73	16,96	14,95	13,48	9,79	9,23	6,10
US1	92	90,28	170,42	79,45	101,01	85,71	17,86	24,09	20,59	17,00	29,83	24,06	23,97	14,70	13,37	9,94
US1	96	149,23	346,99	87,67	174,14	144,72	20,33	38,35	32,59	17,68	50,02	39,12	27,85	22,50	20,05	12,26
US1	98	270,87	711,37	92,91	321,98	266,59	20,78	67,24	58,60	14,74	90,50	69,91	29,45	38,35	33,68	13,86
US2	0	32,84	-1,63	-5,37	8,88	8,99	-1,21	5,44	5,12	6,21	4,15	4,06	2,18	3,86	3,59	7,48
US2	50	42,76	28,08	43,80	12,20	11,06	10,24	6,91	6,09	13,37	4,94	4,63	6,64	4,31	3,81	13,27
US2	80	68,22	104,36	71,64	20,23	16,49	22,66	10,46	8,54	22,50	6,87	6,00	14,57	5,43	4,71	15,38
US2	92	120,08	259,67	84,73	35,89	28,13	27,59	17,39	13,72	26,78	10,66	9,00	18,36	7,65	6,64	15,22
US2	96	197,21	490,72	90,52	58,56	45,04	30,02	27,42	20,77	31,97	16,15	13,20	22,34	10,89	9,26	17,66
US2	98	339,53	917,03	94,21	99,51	75,91	31,10	45,52	35,60	27,88	26,10	21,48	21,49	16,80	14,22	18,18

Поређењем вредности ($R_{ТДК}$, $R_{ТГК}$, $R_{Т4ДК}$, $R_{ТUS}$) датих у табели 6.2, које су за свих 12 разматраних типова тла добијене рачунарским симулацијама спроведеним на 3Д FEM моделима у којима је контакт између електрода и тла моделован на основу вредности параметара d_x и T_x датих у табели 6.1 и F_x датих у табели 6.2 (којима се симулирају вредности добијене мерењима на терену), са теоријским (базним) вредностима ($R_{0ДК}$, $R_{0ГК}$, $R_{04ДК}$, R_{0US}) израчунатим употребом израза (5.6)–(5.11), добијено је да релативне грешке „мерења“ могу бити и до (864,3, 556,5, 647,1, 398,8)% за US1, односно до (746,9, 609,9, 430,7, 299,2)% за US2. Узимајући у обзир чињеницу да су измерене вредности отпорности распрострања класичних квадратних контурних уземљивача, прикупљане у периоду од 30 месеци колико је трајао експеримент приказан у [37], биле далеко веће од вредности добијених стандардним прорачуном (од 238% до 1354%), може се закључити да су сви разматрани случајеви у овом поглављу (свих 12 типова разматраних врста тла) веома реални.

Применом формула (Б.1)–(Б.3), изведених Методом Б.1, за ($R_{0ДК}$, $R_{0ГК}$, $R_{04ДК}$, R_{0US}) добијају се вредности (27,22, 9,78, 9,11, 6,87) Ω за US1, односно (9,07, 5,52, 4,19, 3,89) Ω за US2, које се не разликују значајно од одговарајућих вредности израчунатих употребом израза (5.6)–(5.11). Поређењем вредности ($R_{ТДК}$, $R_{ТГК}$, $R_{Т4ДК}$, $R_{ТUS}$) датих у табели 6.3, које су за свих 12 разматраних типова тла добијене рачунарским симулацијама спроведеним на 3Д FEM моделима у којима је контакт између електрода и тла моделован на основу вредности параметара d_x и T_x датих у табели 6.1 и F_x датих у табели 6.3 (којима се симулирају вредности добијене мерењима на терену), са теоријским (базним) вредностима ($R_{0ДК}$, $R_{0ГК}$, $R_{04ДК}$, R_{0US}) израчунатим употребом израза (Б.1)–(Б.3), добијено је да релативне грешке „мерења“ могу бити и до (879,3, 499,5, 667,6, 390,1)% за US1, односно до (737,3, 545,0, 412,4, 265,7)% за US2 (дакле, нема веће разлике у односу на резултате добијене употребом израза (5.6)–(5.11)).

Поређењем вредности ($R_{ТДК}$, $R_{ТГК}$, $R_{Т4ДК}$, $R_{ТUS}$) израчунатих применом предложеног алгоритма у комбинацији са изразима (Б.5)–(Б.7), са одговарајућим вредностима добијеним 3Д FEM симулацијама као референтним (табела 6.3), добија се да релативне грешке у разматраним случајевима могу да буду до (20,78, 17,68, 29,45, 13,86)% за US1, односно до (31,10, 31,97, 22,34, 18,18)% за US2.

Наведени резултати потврђују да се применом предложеног алгоритма грешка при одређивању укупне отпорности распрострања разматраног сложеног уземљивача значајно смањује чак и када се употребе модификоване формуле из Прилога Б, иако Метода Б.1 иницијално није била намењена за израчунавање укупне отпорности распрострања уземљивача (са урачунатом контактном отпорношћу), већ само за израчунавање теоријске (базне) отпорности распрострања уземљивача. Треба нагласити да помоћу Методе Б.1 могу да се изведу формуле за израчунавање теоријске (базне) отпорности распрострања уземљивача практично свих структура и облика који се користе у пракси. Самим тим, могуће је једноставном модификацијом тих формула и њиховом употребом у оквиру предложеног алгоритма са прихватљивом тачношћу одредити укупну отпорност распрострања уземљивача практично свих структура и облика, положених у тла која формирају лош контакт са њиховим електродама.

Ипак, у случајевима у којима се захтева већа тачност прорачуна, пожељно је користити формуле изведене применом метода које су развијене у оквиру ове дисертације (да подсетимо, при примени предложеног алгоритма у комбинацији са изведеним изразима (3.7), (3.8), (5.6)–(5.11) и (6.1)–(6.3), вредности ($\epsilon R_{\text{ТДК}}$, $\epsilon R_{\text{ТГК}}$, $\epsilon R_{\text{Т4ДК}}$, $\epsilon R_{\text{ТУС}}$) не прелазе 4%). Извођење таквих формула за уземљиваче који се по структури, облику и димензијама разликују од разматраних уземљивача (састављених од једне или више галвански спојених квадратних контура) превазилази оквире ове дисертације и представља простор за даље истраживање у овој области.

7 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ВЕРИФИКАЦИЈА

Верификација развијеног алгоритма за израчунавање отпорности распрострања сложених уземљивачких система уз уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла, као и изведених формула на којима је алгоритам базиран, извршена је помоћу експеримената спроведених на умањеним моделима у лабораторији Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Коришћени су електролитичка када напуњена водом и модели од бакарне жице, дуж које су секвенцијално били постављени делови изолационог материјала контролисане величине (они су симулирали ваздушне цепове, односно несавршен контакт између електрода уземљивача и околног тла). На основу резултата спроведених експеримената, извршене су следеће 4 провере:

1. провера тврђења да је лош контакт између електроде и тла, односно структура материјала у простору непосредно око електроде, узрок великих разлика између измерених и израчунатих вредности отпорности распрострања уземљивача које се јављају у пракси,
2. поређење резултата добијених мерењима у оквиру експеримената који су на умањеним моделима били спроведени у лабораторији и резултата добијених рачунарским симулацијама спроведеним на 3Д FEM моделима разматране лабораторијске експерименталне поставке,
3. провера поузданости употребе алгоритма за израчунавање отпорности распрострања сложених уземљивачких система уз уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла, у комбинацији са изразима који се добијају помоћу развијене опште методе за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла приказане у поглављу 3, као и за изразима за израчунавање теоријске (базне) отпорности распрострања сложених уземљивачких система, изведених помоћу опште методе приказане у поглављу 5, и
4. провера поузданости употребе алгоритма за израчунавање отпорности распрострања сложених уземљивачких система уз уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла, у комбинацији са

формулама изведеним за разматрани случај применом Методе Б.1 (Прилог Б, поглавље Б.1.2).

7.1 Опис експерименталне поставке

7.1.1 Конструкција и димензије умањених модела

Умањени модели, усвојене размере 1:25, израђени су од бакарне жице кружног попречног пресека пречника 0,6 mm за један од уземљивачких система приказаних на сл. 5.1. Релевантне димензије разматраног реалног уземљивачког система и одговарајућих умањених жичаних модела дате су у табели 7.1 (ознаке p , L_1 , L_2 , h_1 и h_2 односе се на одговарајуће димензије са сл. 5.1 и из табеле 5.1, L_{test} представља дужину странице квадратне тест контуре, а h_{test} дубину њеног полагања).

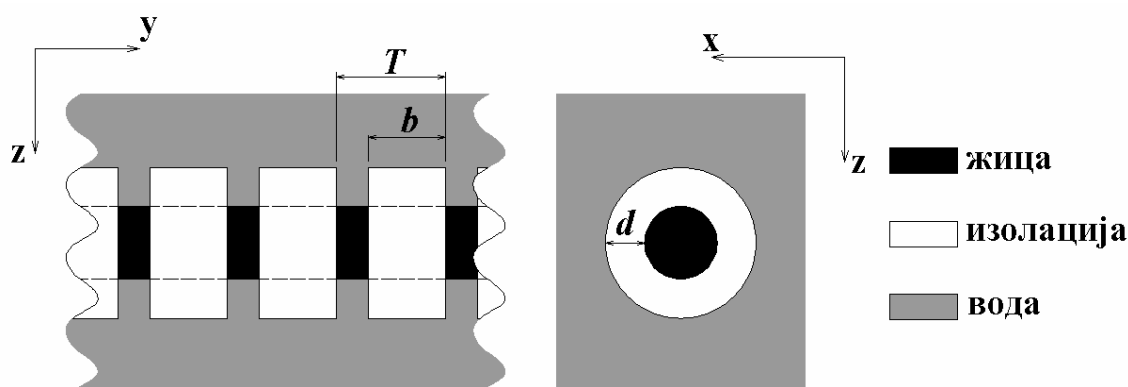
Табела 7.1 – Релевантне димензије разматраног реалног уземљивачког система и одговарајућих умањених жичаних модела

Димензија	Реалан уземљивачки систем (m)	Умањени жичани модели (mm)
p	0,068	3,768
L_1	5	200
L_2	1	40
L_{test}	1	40
h_1	0,7	28
h_2	2	80
h_{test}	0,5	20

Анализом података датих у табели 7.1 види се да је код свих димензија поштован однос 1:25, осим код димензије p , где је однос 1:18. Било је веома тешко обликовати моделе чак и са танком бакарном жицом кружног попречног пресека пречника 0,6 mm, због чега се одустало од покушаја израде модела са још тањом жицом (у референци [15] је констатовано да се оваквим одступањем од усвојеног односа (само за димензију p) при изради умањених модела не прави значајна грешка). Осим тога, при вршењу напред наведених провера, приликом израчунавања отпорности распрострања помоћу изведених формула, као и коришћењем 3Д FEM моделовања разматране лабораторијске експерименталне

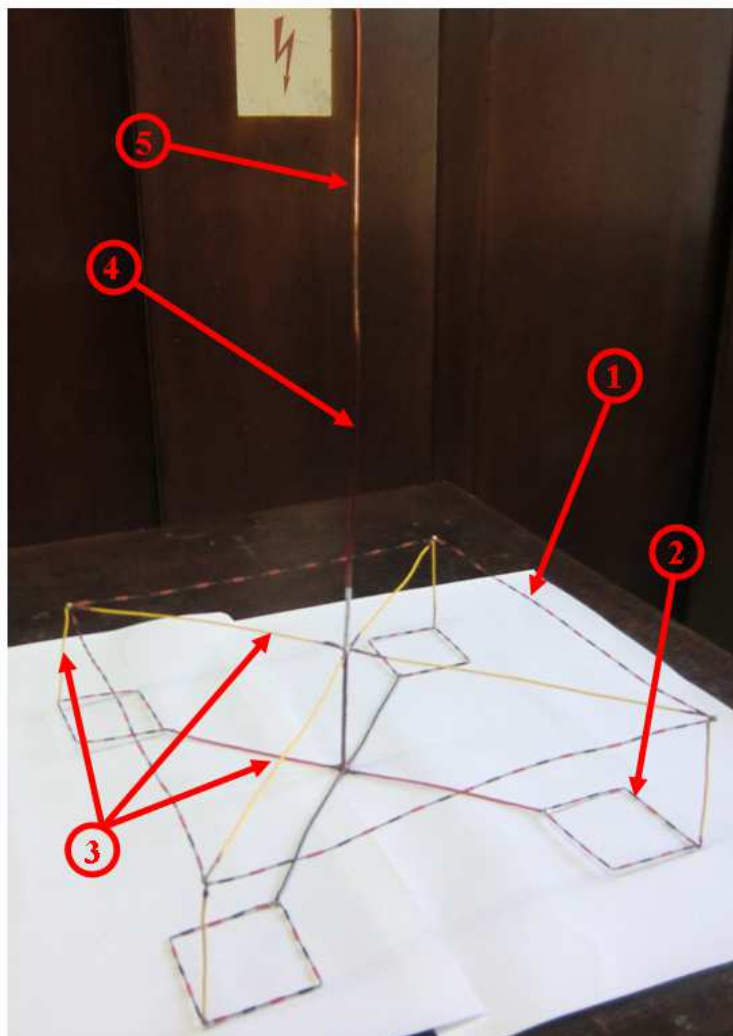
поставке, коришћена је управо вредност димензије p која је за умањени жичани модел дата у табели 7.1, због чега може да се сматра да грешка услед наведеног одступања у поштовању односа димензија реалног уземљивачког система и његовог умањеног модела није утицала на резултате провера.

Несавршен контакт између бакарне жице (од које су модели били израђени) и воде у електролитичкој кади симулиран је помоћу делова изолационог материјала контролисане величине секвенцијално постављених дуж жице. Њихово постављање извршено је на начин приказан на сл. 7.1 (аналогно концепту С1 постављања ваздушних цепова између електрода уземљивача и околног тла, приказаном на сл. 2.6).



Сл. 7.1 – Шематски приказ концепта постављања делова изолационог материјала контролисане величине дуж жице

Концепт приказан на сл. 7.1 омогућавао је да се, на исти начин како је то објашњено у поглављу 2.3 и примењено на 3Д FEM моделе у поглављима 6.2 и 6.3, у оквиру спроведених експеримената контакт између електрода и разних типова „непознатог“ тла моделује на основу вредности параметара d_x , T_x и F_x . У свим израђеним моделима коришћени су делови изолационог материјала дебљине $d_x = 0,2 \text{ mm}$ и дужине секвенце $T_x = 10 \text{ mm}$. Модели су израђени за три типа „непознатог“ тла – тла које са електродама формира идеалан ($F_x = 0$), умерено лош ($F_x = 50\%$) и веома лош ($F_x = 90\%$) контакт. Као илустрација, на слици 7.2 приказан је један од израђених модела са којима су вршени експерименти.



Сл. 7.2 – Умањени модел целог уземљивачког система приказаног на сл. 5.1, израђен од бакарне жице за тип „непознатог“ тла које формира умерено лош ($F_x = 50\%$) контакт са електродама

1 – горња контура

2 – доња контура

3 – изоловани проводници за галванско спајање контура и учвршћивање конструкције модела

4 – лакирана бакарна жица преко које се

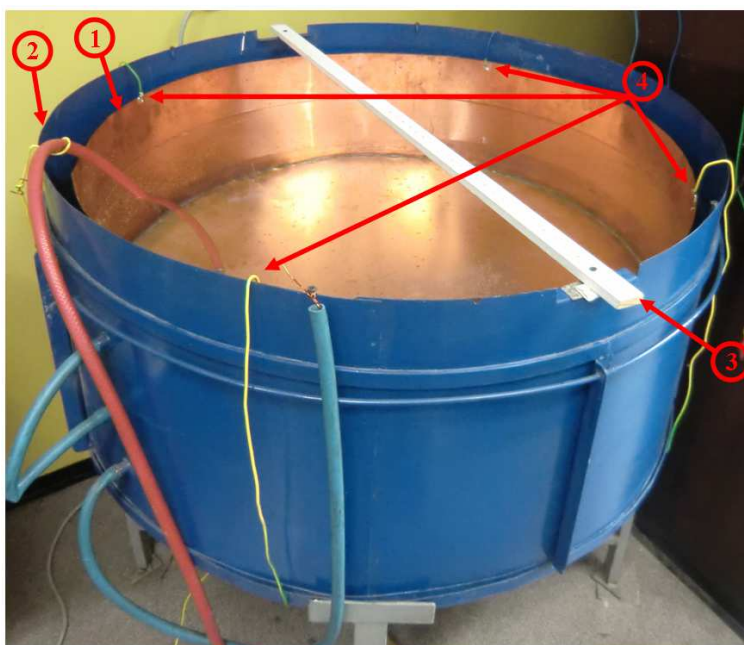
уземљивач доводи на електрични потенцијал

5 – место на жици са огуњеним лаком, преко кога се модел прикључује на напонски извор

Осим модела целог уземљивача приказаног на сл. 5.1, за сваки од три разматрана типа „непознатог“ тла израђена су 4 жичана модела – тест контура, доња контура, горња контура и галвански спојене 4 доње контуре (дакле, експерименти су вршени са укупно 15 жичаних модела).

7.1.2 Електролитичка када, опрема за симулирање квара у електроенергетском систему и мерна апаратура

Квар у електроенергетском систему симулира се тако што се формира струјно коло које образују: контролисан напонски извор, модел уземљивача, електролит у кади у који је уруњен уземљивач и повратна електрода. Као повратна електрода коришћена је бакарна електролитичка када у облику цилиндра, пречника 90 cm и висине 40 cm, израђена од лима дебљине 0,55 mm и постављена у стару челичну каду цилиндричног облика (пречника 96 cm и висине 50 cm, израђену од лима дебљине 1 mm), која је служила само као носач бакарне каде (сл. 7.3). Као електролит је коришћена вода из градског водовода. Бакарна када је пуњена водом до висине 30 cm.

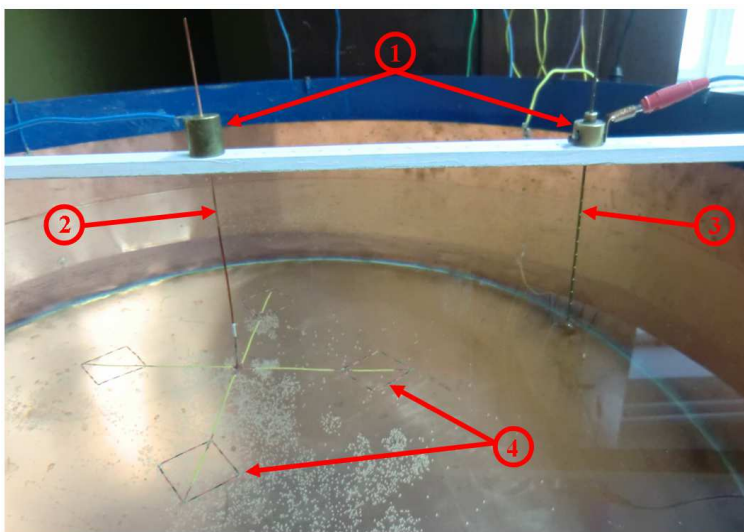


Сл. 7.3 – Електролитичка када коришћена у експериментима

- | | |
|------------------|--|
| 1 – бакарна када | 3 – дрвени носач |
| 2 – челична када | 4 – галванске везе бакарне каде са повратним проводником |

Над пречником горње кружне основе челичне каде постављен је носач од дрвета са месинганим држачима две вертикално постављене електроде: централне лакиране бакарне жице модела и мерне електроде (сл. 7.4). Вертикалне електроде су се могле померати лево – десно по дрвеном носачу (у корацима од по 1 cm), односно горе – доле кроз месингане држаче, а жичани модел је могао и да се закрене око своје вертикалне осе симетрије за било који угао. Жичани модели су

тако постављани да су се њихове вертикалне осе симетрије поклапале са вертикалном осом симетрије електролитичке каде.



Сл. 7.4 – Дрвени носач са два месингана држача вертикалних електрода

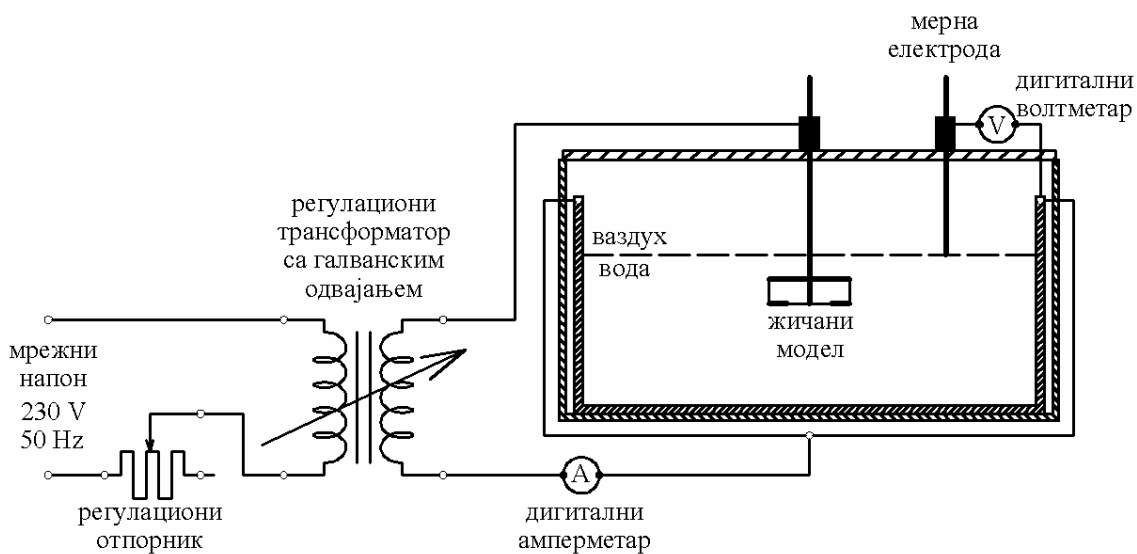
1 – месингани држачи

2 – централна лакирана бакарна жица
модела

3 – мерна електрода

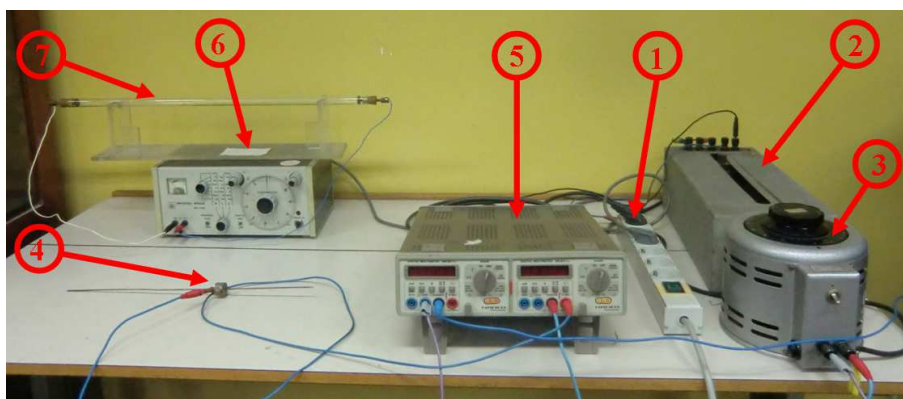
4 – модел галвански спојене 4 доње контуре,
израђен од бакарне жице за тип
„непознатог“ тла које формира умерено
лош ($F_x = 50\%$) контакт са електродама

На сл. 7.5 дата је скица према којој су изведене галванске везе свих елемената експерименталне поставке (опреме за симулирање квара у електроенергетском систему и мерних инструмената).



Сл. 7.5 – Скица галванских веза елемената експерименталне поставке

Са сл. 7.5 види се да је као основни напонски извор коришћен мрежни напон са стандардне утичнице (230 V, 50 Hz). Између утичнице и електролитичке каде са жичаним моделом постављени су регулациони отпорник и регулациони трансформатор са галванским одвајањем (због безбедности), помоћу којих су контролисане и подешаване величине јачине струје и напона коришћених у експерименту. На сл. 7.3 виде се 4 приближно еквидистантно прикључена проводника преко којих се одводи струја са бакарне каде. Испод челичне каде, они се помоћу клеме спајају са повратним проводником чији је други крај (преко дигиталног амперметра) спојен са једним прикључком контролисаног напонског извора (регулационог трансформатора). Мерења отпорности електролита (воде) између жичаних модела уземљивача и зидова бакарне каде вршена су $U - I$ методом, уз коришћење стандардне лабораторијске опреме (сл. 7.6). Да би се елиминисао утицај загревања електролита, струје су биле реда 100 mA. Након сваког мерења искључивано је напајање, а при поновном укључењу увек се чекало да се струја стабилизује.



Сл. 7.6 – Лабораторијска опрема коришћена при спровођењу експеримента

1 – продужни кабл (мрежни напон 230 V, 50 Hz)

2 – регулациони отпорник

3 – регулациони трансформатор са галванским одвајањем

4 – месингани држач са мерном електродом

5 – дигитални волтметар и амперметар (Hameg digital multimeter HM 8011 – 3)

6 – универзални RLC мост са учестаностима 1 kHz и 10 kHz (Iskra universal bridge MA 4302)

7 – кондуктометар (стаклена цев унутрашњег пречника $d_c = 13 \text{ mm}$ и дужине $l_c = 0,6 \text{ m}$)

Осим мерења отпорности воде између жичаног модела уземљивача и зидова бакарне каде, описана експериментална поставка пружала је могућност

одређивања расподеле потенцијала на површини воде (односно на површини тла изнад уземљивача у случају квара), што је такође било вршено за сваки од 15 израђених жичаних модела.

Специфична отпорност електролита (воде) из бакарне каде, ρ_v , одређивана је мерењем отпорности и висине стуба електролита у мерачу специфичне отпорности (кондуктометру, приказаном на сл. 7.6). Висина стуба електролита, l_v , мерена је метром, а његова отпорност, R_v , помоћу универзалног RLC моста (сл. 7.6). На основу измерених вредности $l_v = 0,56$ m и $R_v = 100000$ Ω , применом једноставне формуле:

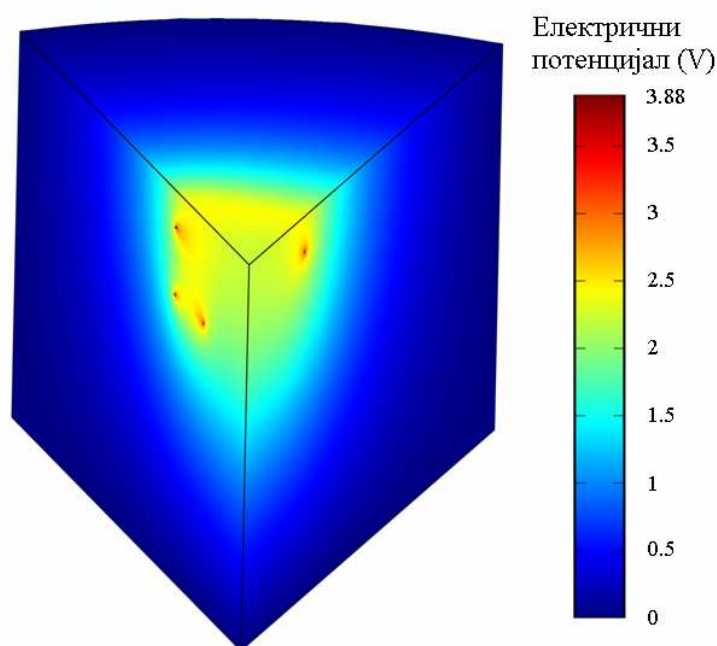
$$\rho_v = \frac{R_v \cdot d_c^2 \cdot \pi}{4 \cdot l_v}, \quad (7.1)$$

добијено је да је специфична отпорност воде којом је бакарна када била напуњена приликом вршења експеримената износила $\rho_v = 23,7$ Ω m.

7.2 Формирање 3Д FEM модела експерименталне поставке

Процедура формирања 3Д FEM модела експерименталне поставке није се битно разликовала од процедуре описане у поглављу 2.2. Бакарне жице и изолациони материјал умањених модела уземљивача, као и вода у бакарној кади, моделовани су као под-домени са својим реалним димензијама и електричним својствима (сви неопходни улазни параметри дати су у поглављу 7.1). У разматраном случају, иницијални домен модела (ограничена запремина воде) био је цилиндар пречника 90 cm (пречник основе бакарне каде) и висине 30 cm (висина пуњења бакарне каде водом). Модел је садржао од 120000 до 160000 тетраедарних коначних елемената, чиме је постизана висока тачност вредности релевантних параметара. За разлику од модела представљеног у поглављу 2.2, није било потребе за постављањем зидова (под-домена) састављених од посебних „бесконачних“ коначних елемената (разматрана је ограничена запремина воде у бакарној кади, зато што је њена отпорност мерена у оквиру спроведених експеримената). У моделима је целој површини цилиндра (осим горњој бази, која је представљала раздвојну површ између воде и ваздуха) додељен електрични потенцијал $\phi_{ek} = 0$ (нулти потенцијал бакарне каде). Као и у поглављу 2.2, искоришћена је симетрија, тако да је финални модел представљао осмину

иницијалног модела. Потенцијал жичаних модела уземљивача, φ_{e0} , у свим 3Д FEM моделима дефинисан је реалним вредностима које су измерене током извођења експеримента (на сваки од 15 разматраних жичаних модела током експеримента је довођен електрични потенцијал φ_{e0} који је обезбеђивао да струја буде реда 100 mA, због чега је за сваки од разматраних модела вредност φ_{e0} била јединствена). Као и у случају модела описаних у поглављу 2.2, рачунар је израчунавао електричне потенцијале релевантних тачака у оквиру моделованог домена (сл. 7.7).



Сл. 7.7 – Приказ израчунатих електричних потенцијала у тачкама домена модела (осмина иницијалног модела) за жичани модел са сл. 7.2 урођен у воду у бакарној електролитичкој кади ($\varphi_{e0} = 3,88 V$)

Након спроведених симулација, на основу израчунатих компоненти вектора густине струје у свакој тачки домена модела, помоћу израза (2.9) израчунавана је укупна јачина струје која је са жичаног модела уземљивача одвођена у воду, а затим и отпорност воде између жичаног модела и зидова бакарне каде помоћу израза (2.10), у коме је уместо φ_{einf} коришћен потенцијал φ_{ek} (тачке нултог потенцијала нису биле у бесконачности, већ на бакарној кади). Осим могућности израчунавања отпорности воде између жичаног модела уземљивача и зидова бакарне каде, описани 3Д FEM модели пружали су могућност приказа расподеле

потенцијала на површини воде (односно на површини тла изнад уземљивача у случају квара).

7.3 Анализа резултата добијених експерименталним мерењима и 3Д FEM симулацијама

Отпорност електролита (воде) између жичаног модела и зидова бакарне каде, R_E , одређена је експерименталним мерењима и 3Д FEM симулацијама за сваки од 15 разматраних жичаних модела. Њихове вредности, као и вредности одговарајућих релативних грешака резултата мерења у односу на референтне 3Д FEM резултате ($\epsilon R_E(\%)$), дате су у табели 7.2. У истој табели су приказане и вредности процентуалног повећања ($\delta R_E(\%)$) отпорности R_E у случајевима у којима је симулиран умерено лош ($F_x = 50\%$) и веома лош ($F_x = 90\%$) контакт који електролит формира са жицама модела (у односу на случај са идеалним контактом ($F_x = 0$)).

Табела 7.2 – Отпорности електролита (воде) између жичаних модела и зидова бакарне каде, одређене експерименталним мерењима и 3Д FEM симулацијама за сваки од 15 разматраних жичаних модела

Модел	Опис модела	F_x (%)	R_E (Ω) мерено	R_E (Ω) FEM	ϵR_E (%)	δR_E (%)
ME1	тест контура	0	199,62	189,45	5,37	–
ME2	доња контура	0	176,50	162,93	8,33	–
ME3	горња контура	0	48,82	45,02	8,44	–
ME4	4 доње контуре	0	51,50	47,58	8,25	–
ME5	цео уземљивач	0	34,23	31,40	9,02	–
ME6	тест контура	50	236,15	230,82	2,31	18,3
ME7	доња контура	50	211,07	203,48	3,73	19,6
ME8	горња контура	50	57,96	53,37	8,60	18,7
ME9	4 доње контуре	50	63,00	57,99	8,65	22,3
ME10	цео уземљивач	50	38,38	36,03	6,51	12,1
ME11	тест контура	90	404,60	460,32	–12,10	102,7
ME12	доња контура	90	370,28	372,55	–0,61	109,8
ME13	горња контура	90	111,76	101,19	10,44	128,9
ME14	4 доње контуре	90	119,00	116,56	2,09	131,1
ME15	цео уземљивач	90	66,38	62,39	6,40	93,9

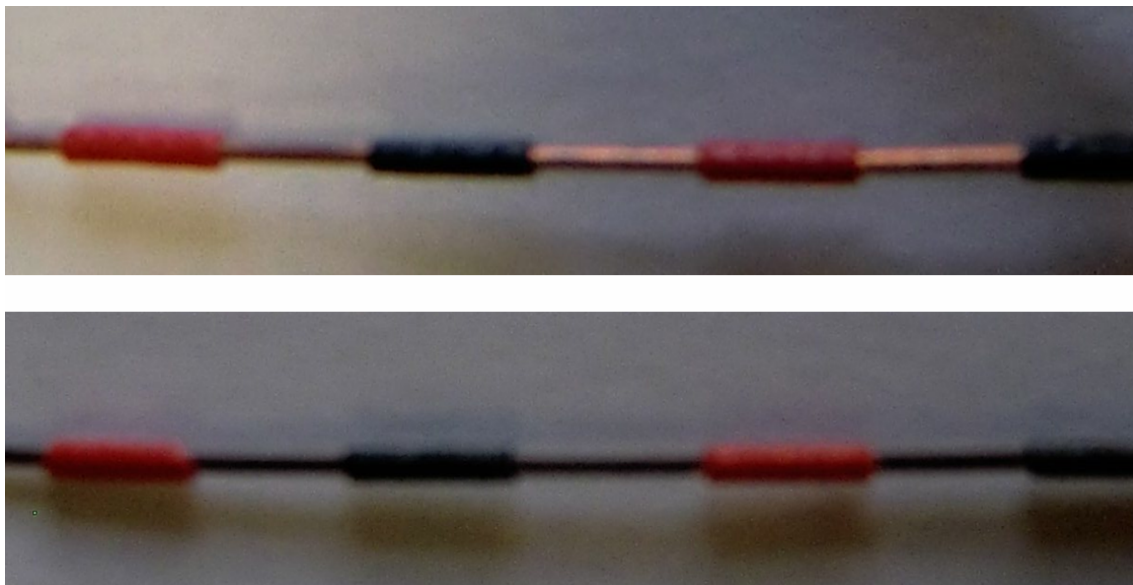
Осим вредности R_E , за сваки од 15 разматраних жичаних модела, експерименталним мерењима и 3Д FEM симулацијама добијени су графици расподеле потенцијала на површини воде у електролитичкој кади, који су упоредно приказани у Прилогу В.

Анализом резултата приказаних у табели 7.2 може се приметити да су вредности δR_E за 4 од 5 модела којима одговара $F_x = 90\%$ веће од 100%, односно да контактна отпорност, као компонента укупне отпорности електролита (воде) између жичаних модела и зидова бакарне каде, по вредности премашује компоненту базне (теоријске) отпорности. Тим резултатима је још једном доказано тврђење да је лош контакт између електроде и тла, односно структура материјала у простору непосредно око уземљивачке електроде, узрок великих разлика између измерених и израчунатих вредности отпорности распростирања уземљивача које се јављају у пракси.

Вредности εR_E приказане у табели 7.2, које су за разматране моделе вариране у релативно уском опсегу (од $-12,1\%$ до $10,44\%$), као и упоредно приказани графици расподеле потенцијала на површини воде у електролитичкој кади (Прилог В) на којима се види релативно добро поклапање резултата добијених експерименталним мерењима и 3Д FEM симулацијама, још једном су потврдили да је 3Д FEM моделовање проблема разматраних у овој дисертацији добро урађено.

Чињеница да су отпорности R_E одређене експерименталним мерењима биле веће од одговарајућих отпорности израчунатих 3Д FEM симулацијама (моделу ME1–ME10 и ME13–ME15) може се приписати појавама приказаним на сл. 7.8 и 7.9, које су примећене приликом спровођења експеримената. На сл. 7.8 приказана је бакарна жица модела ME8 пре (сл. 7.8, горе) и након (сл. 7.8, доле) спроведеног експеримента током кога је, 5–10 минута колико је трајало мерење на сваком од модела, са површине жице у воду одвођена струја реда 100 mA. Види се да је површина бакарне жице пре спровођења експеримента имала светло браон боју високог сјаја (чист бакар), док је након спроведеног експеримента површина бакарне жице добила тамно браон боју без сјаја (на површини је створен слој

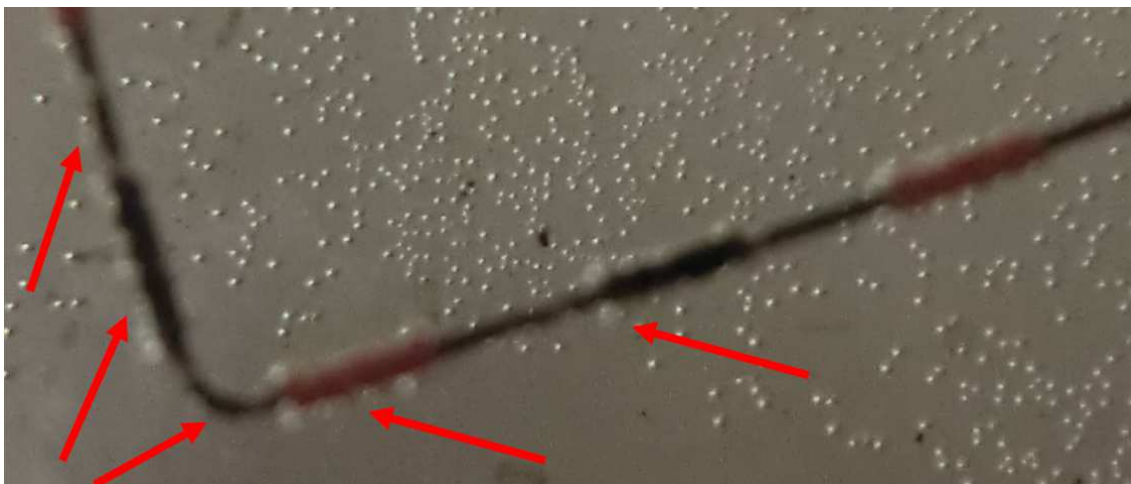
бакар-оксида). Описана појава је уочена на свим моделима МЕ1–МЕ15, а модел МЕ8 је изабран као репрезентативан.



Сл. 7.8 – Бакарна жица модела МЕ8 пре (горе) и након (доле) спроведеног експеримента

На основу ефекта приказаног на сл. 7.8, може се закључити да се на додирној површини бакарне жице и воде све време у току трајања експеримента одигравао електрохемијски процес стварања бакар-оксида, односно да претпоставка о идеалном контакту између бакарне жице и воде на местима на жици која нису била обавијена деловима изолационог материјала није била у потпуности валидна. Поред тога, очигледно је да се при таквим појавама не може сматрати да вода која се налази непосредно око бакарних жица има исту специфичну отпорност као у остатку бакарне каде.

Осим описане појаве стварања бакар-оксида, током експеримента спровођених са моделима МЕ1–МЕ10 и МЕ13–МЕ15 примећено је стварање ваздушних мехурића који су све време били прилепљени за бакарне жице. Као илустрација, на сл. 7.9 приказан је ћошак квадратне контуре модела МЕ9 уроњеног у воду, а црвене стрелице указују на поменуте мехуриће који се назиру на бакарној жици и деловима изолационог материјала (не треба их мешати са осталим мехурићима који се јасније виде на целој слици, јер су то заправо већи мехурови који се виде у даљини, а који су стварали на дну бакарне каде).



Сл. 7.9 – Ћошак квадратне контуре модела ME9 уроњеног у воду (црвене стрелице указују на мехуриће који се током експеримента стварају и задржавају на бакарној жици и деловима изолационог материјала)

Због појаве мехурића приказаних на сл. 7.9 не може се сматрати да је у 3Д FEM моделима вода у области око бакарних жица била верно представљена хомогеним електролитом који има исту специфичну отпорност као у остатку бакарне каде. Описани мехурићи смањују ефективну додирну површину између бакарних жица и воде, што значи да претпоставка о идеалном контакту између бакра и воде на местима на жици која нису обавијена деловима изолационог материјала није била валидна ни због тог ефекта. Осим тога, појава описаних мехурића на деловима изолационог материјала практично повећава дебљину изолационог слоја. Међутим, пошто је стварање поменутих мехурића (њихов број, положај и величина) стохастичка појава, било је немогуће уважити њихов утицај у 3Д FEM моделима, због чега су за моделе ME1–ME10 и ME13–ME15 добијене позитивне вредности ϵR_E .

Потпуно другачија појава примећена је током експеримената спроведених са моделима ME11 и ME12, у којима су добијене негативне вредности ϵR_E . Уочено је да се током експеримента формирају стубови од мехурића који се великом брзином крећу од ћошкова тих жичаних модела до површине воде. На сл. 7.10, на доњем десном ћошку квадратне контуре модела ME11, може се видети описани стуб покретних мехурића (беличаст вертикалан стуб уоквирен црвеном елипсом). Скоро идентични стубови мехурића формирану су на сва 4 ћошка контуре, али се

због светлости и сенки на сл. 7.10 донекле јасно уочава само стуб на означеном месту.



Сл. 7.10 – Модел ME11 урођен у воду током експеримента (беличаст вертикалан стуб уоквирен црвеном елипсом садржи покретне мехуриће)

Очигледно је да се због појаве стубова покретних мехурића не може сматрати да је у 3Д FEM моделима вода у области око бакарних жица и изнад модела била верно представљена хомогеним електролитом који има исту специфичну отпорност као у остатку бакарне каде. Појава стубова покретних мехурића у експериментима са моделима ME11 и ME12 може се објаснити чињеницом да су густине струја и електрична поља на површини бакарних жица били далеко већи него у осталим моделима (разлог је што је, због конструкције модела ME11 и ME12, додирна површина бакра и воде била далеко мања него у случају осталих модела (4 пута мања него у случају модела ME14 који од свих осталих модела има најмању додирну површину бакра и воде), док је укупна

струја која је са површине жица одвођена у воду била приближно исте јачине као и у експериментима са осталим моделима – реда 100 mA). Услед описане појаве очигледно је долазило до повећане јонизације воде и смањења њене специфичне отпорности у области око жичаних модела.

Приказана анализа резултата добијених експерименталним мерењима и 3Д FEM симулацијама, као и описаних појава које су се јављале током експеримената, потврђује поузданост употребе 3Д FEM симулација при провери, развоју и унапређењу упрошћених израза за израчунавање отпорности распрострања уземљивача који се користе у инжењерској пракси. Подсетимо да је примена алтернативног (експерименталног) приступа суочена са бројним потешкоћама (непоузданост улазних параметара, непрецизност мерних инструмената, грешке при мерењу, цена, итд).

Даљим унапређењем експерименталне поставке (заснованим на резултатима спроведених анализа) и понављањем експеримената (нпр. са другачијим вредностима јачине струје коришћене у експериментима), могло је да се покуша постизање веће сагласности резултата. Међутим, задатак предметне дисертације није био проучавање понашања електричног контакта између бакра и воде, због чега се није наставило са експерименталним радом. Осим тога, за потребе провере алгорита предложеног у поглављу 6, који ће бити примењиван у реалним (а не у контролисаним, лабораторијским) условима, било је боље користити управо овакве (реалније) вредности измерених величина (зато што ће се и при мерењима на реалном терену добијати вредности које ће у бројним случајевима значајно одступати од теоријских).

7.4 Провера поузданости алгорита за израчунавање отпорности распрострања сложених уземљивачких система уз уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла

Провера тачности изведених формула (приказаних у поглављима 3 и 5) и поузданости предложеног алгорита (приказаног у поглављу 6) извршена је поређењем резултата добијених њиховом употребом са резултатима добијеним мерењима у оквиру описаног експеримента са умањеним жичаним моделима и електролитичком кадом. На исти начин извршена је и провера тачности алгорита

примењеног у комбинацији са формулама које су за разматрани случај изведене помоћу Методе Б.1 (Прилог Б).

Разматрани жичани модели заправо представљају уземљивачки систем US1 (у деловима и у целини) разматран у поглављу 6 (табела 6.1), умањен преносним односом 1:25, положен у три различита типа „непознатог“ тла – тла које са електродама формира идеалан ($F_x = 0$), умерено лош ($F_x = 50\%$) и веома лош ($F_x = 90\%$) контакт (за све случајеве важи: $d_x = 0,2 \text{ mm}$ и $T_x = 10 \text{ mm}$ – сл. 7.1). Провера поузданости предложеног алгоритма извршена је на исти начин као у поглављу 6 (видети табеле 6.2 и 6.3), са том разликом што су као референтне коришћене укупне отпорности распростирања R_{TDK} , R_{TGK} , R_{T4DK} и R_{TUS} измерене у оквиру описаног експеримента (уместо вредности добијених рачунарским симулацијама спроведеним на 3Д FEM моделима у којима је контакт између електрода и тла моделован на основу вредности параметара d_x , T_x и F_x).

Треба имати у виду да изведене формуле приказане у поглављима 3 и 5, као и формуле изведене применом Методе Б.1 (Прилог Б), важе за случајеве у којима се референтна земља (односно тачке нултог потенцијала) налази у бесконачности. Због тога су, за наведену намену, вредности укупне отпорности распростирања R_{Ttest} , R_{TDK} , R_{TGK} , R_{T4DK} и R_{TUS} добијане тако што је одговарајућа измерена отпорност електролита (воде) између жичаних модела и зидова бакарне каде (вредности R_E приказане у табели 7.2) увећавана за отпорност распростирања R_{KB} , коју би спољна површина бакарне каде (омотач и доња база цилиндра пречника 90 cm и висине 30 cm) имала ка бесконачности, ако би била уроњена у воду исте специфичне отпорности (тако да се равна горње базе цилиндра и равна површине воде поклапају). Коришћењем 3Д FEM модела описаног у поглављу 5.3, уз постављање описане бакарне каде уместо уземљивачког система са сл. 5.1 у средиште домена модела (тако да се вертикалне осе симетрије каде и домена модела међусобно поклапају), добијена је вредност $R_{\text{KB}} = 8,01 \Omega$. Измерене вредности укупне отпорности распростирања R_{Ttest} , R_{TDK} , R_{TGK} , R_{T4DK} и R_{TUS} добијене на описани начин, као и вредности R_{TDK} , R_{TGK} , R_{T4DK} и R_{TUS} добијене употребом формула из поглавља 3, 5 и 6, као и формула из Прилога Б, приказане су у табелама 7.3 и 7.4.

Табела 7.3 – Поређење резултата добијених предложеним алгоритмом, у комбинацији са развијеним изразима (3.7), (3.8), (5.6)–(5.11) и (6.1)–(6.3), и резултата добијених мерењима у оквиру експеримента са умањеним жичаним моделима и електролитичком кадом

Модели	F_x (%)	R_{Ttest} (Ω) мерење	F_0 (%)	R_{TDK} (Ω) (3.7)	R_{TDK} (Ω) мерење	ϵR_{TDK} (%)	R_{TGK} (Ω) (3.7)	R_{TGK} (Ω) мерење	ϵR_{TGK} (%)	R_{T4DK} (Ω) (6.2)	R_{T4DK} (Ω) мерење	ϵR_{T4DK} (%)	R_{TUS} (Ω) (6.3)	R_{TUS} (Ω) мерење	ϵR_{TUS} (%)
ME1–ME5	0	207,63	29,75	174,95	184,51	-5,18	55,12	56,83	-3,02	57,55	59,51	-3,30	40,61	42,24	-3,87
ME6–ME10	50	244,16	60,31	211,48	219,08	-3,47	62,42	65,97	-5,38	66,68	71,01	-6,09	44,70	46,39	-3,65
ME11–ME15	90	412,61	90,09	379,93	378,29	0,43	96,11	119,77	-19,75	108,80	127,01	-14,34	63,51	74,39	-14,63

Табела 7.4 – Поређење резултата добијених предложеним алгоритмом, у комбинацији са изразима (Б.5)–(Б.7), и резултата добијених мерењима у оквиру експеримента са умањеним жичаним моделима и електролитичком кадом

Модели	F_x (%)	R_{Ttest} (Ω) мерење	F_0 (%)	R_{TDK} (Ω) (Б.5)	R_{TDK} (Ω) мерење	ϵR_{TDK} (%)	R_{TGK} (Ω) (Б.5)	R_{TGK} (Ω) мерење	ϵR_{TGK} (%)	R_{T4DK} (Ω) (Б.6)	R_{T4DK} (Ω) мерење	ϵR_{T4DK} (%)	R_{TUS} (Ω) (Б.7)	R_{TUS} (Ω) мерење	ϵR_{TUS} (%)
ME1–ME5	0	207,63	22,79	178,76	184,51	-3,12	61,22	56,83	7,71	59,36	59,51	-0,26	42,49	42,24	0,58
ME6–ME10	50	244,16	45,75	229,48	219,08	4,75	70,99	65,97	7,60	73,95	71,01	4,14	47,81	46,39	3,06
ME11–ME15	90	412,61	74,57	452,06	378,29	19,50	114,10	119,77	-4,74	136,87	127,01	7,76	71,34	74,39	-4,11

Одговарајући η коефицијенти ($\eta_{\text{GK-4DK}}$ и η_{4DK}) за разматране жичане моделе израчунати су помоћу израза (5.9), уз употребу вредности коефицијената C_1 – C_4 из (5.10) и (5.11), с тим што су вредности коефицијената C_1 и C_2 повећане 25 пута (због усвојеног преносног односа реалних уземљивача и жичаних модела). Добијене су вредности $\eta_{\text{GK-4DK}} = 0,677$ и $\eta_{\text{4DK}} = 0,739$, идентичне са вредностима приказаним у табели 6.1 које се односе на уземљивачки систем US1. Вредност параметра $d_0 = 16 \cdot 10^{-3}$ m морала је да буде умањена 25 пута пре употребе у изразима (3.7) и (6.1) (такође због усвојеног преносног односа реалних уземљивача и жичаних модела – коришћена је вредност $d_0 = 6,4 \cdot 10^{-4}$ m).

У табелама 7.3 и 7.4 дате су и релативне грешке резултата добијених употребом предложеног алгоритма у односу на референтне резултате добијене мерењима (ϵR_{TDK} , ϵR_{TGK} , ϵR_{T4DK} и ϵR_{TUS}). Анализом њихових вредности приказаних у табели 7.3 види се да се употребом предложеног алгоритма у комбинацији са формулама из поглавља 3 и 5 добијају резултати чије су релативне грешке, у односу на референтне резултате добијене мерењем, у распону $[-19,75, 0,43]$. Употребом предложеног алгоритма у комбинацији са формулама из Прилога Б добијају се резултати чије су релативне грешке, опет у односу на референтне резултате добијене мерењем, у распону $[-4,74, 19,50]$ (табела 7.4).

Да бисмо боље разумели шта добијени распони релативних грешака говоре о тачности формула и поузданости алгоритма, поново ћемо, као у поглављу 6.5, разматрати позицију пројектанта који није упознат са предложеним алгоритмом и изразима за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла. При пројектовању уземљивачког система такав пројектант може да се ослони само на конвенционалне изразе за израчунавање теоријске (базне) отпорности распростирања, R_0 , какви су, за разматрани случај, изрази (5.6)–(5.11), односно (Б.1)–(Б.3). Њиховом применом, пројектант, уместо на основу реалних укупних отпорности распростирања (R_{TDK} , R_{TGK} , R_{T4DK} , R_{TUS}), пројектује уземљивачки систем на основу теоријских (базних) вредности ($R_{0\text{DK}}$, $R_{0\text{GK}}$, $R_{0\text{4DK}}$, $R_{0\text{US}}$), чије вредности за разматрани жичани модел износе (156,12, 51,35, 52,84, 38,50) Ω ако се израчунавају употребом израза (5.6)–(5.11), односно (153,60, 56,38, 52,04, 39,86) Ω ако се израчунавају употребом израза (Б.1)–(Б.3). Међутим, ако се разматрани уземљивачки систем положи у тло које формира лош контакт са

електродама уземљивача, реалне вредности (R_{TDK} , R_{TGK} , R_{T4DK} , R_{TUS}) биће далеко веће, што ће се утврдити обавезним мерењима након инсталирања уземљивачког система (до истог закључка се долази анализом резултата мерења добијених у оквиру спроведеног експеримента са жичаним моделима и електролитичком кадом – видети одговарајуће вредности у табелама 7.3 и 7.4).

Поређењем вредности (R_{TDK} , R_{TGK} , R_{T4DK} , R_{TUS}) датих у табели 7.3 и 7.4 које су за сва 3 разматрана типа моделованог тла добијене експерименталним мерењима са теоријским (базним) вредностима (R_{0DK} , R_{0GK} , R_{04DK} , R_{0US}), израчунатим употребом израза (5.6)–(5.11), односно израза (Б.1)–(Б.3), одређене су релативне грешке измерених вредности у односу на базне вредности ($\delta_0 R_{TDK}$, $\delta_0 R_{TGK}$, $\delta_0 R_{T4DK}$, $\delta_0 R_{TUS}$). Анализом њихових вредности приказаних у табели 7.5, односно 7.6, види се да релативне грешке износе и до (142,31, 133,24, 140,36, 93,25)% за изразе (5.6)–(5.11), односно до (146,28, 112,42, 144,05, 86,6)% за изразе (Б.1)–(Б.3).

Међутим, уколико пројектант употреби предложени алгоритам, он пројектује уземљивачки систем на основу вредности укупних отпорности распрострањања (R_{TDK} , R_{TGK} , R_{T4DK} , R_{TUS}) датих у табели 7.3 и 7.4, израчунатих употребом формула из поглавља 3 и 5 или модификованих формула из Прилога Б. Поређењем вредности (R_{TDK} , R_{TGK} , R_{T4DK} , R_{TUS}) датих у табели 7.3 и 7.4 које су за сва 3 разматрана типа моделованог тла добијене експерименталним мерењима са вредностима укупних отпорности распрострањања израчунатих употребом формула из поглавља 3 и 5, односно модификованих формула из Прилога Б, одређене су релативне грешке измерених вредности у односу на оне које су израчунате употребом предложеног алгоритма ($\delta_A R_{TDK}$, $\delta_A R_{TGK}$, $\delta_A R_{T4DK}$, $\delta_A R_{TUS}$). Анализом њихових вредности приказаних у табелама 7.5 и 7.6, види се да се грешке у процени отпорности распрострањања уземљивача драстично смањују уколико се употреби предложени алгоритам, било у комбинацији са формулама из поглавља 3 и 5, било са модификованим формулама из Прилога Б. Апсолутне вредности релативних грешака у том случају износе до (5,46, 24,61, 16,74, 17,14)% уколико се примене формуле из поглавља 3 и 5, односно до (16,32, 7,16, 7,20, 4,28)% уколико се примене модификоване формуле из Прилога Б.

Табела 7.5 – Релативне грешке процене отпорности распростирања уземљивача са и без употребе предложеног алгоритма (у комбинацији са развијеним изразима (3.7), (3.8), (5.6)–(5.11) и (6.1)–(6.3))

Модел	F_x (%)	$\delta_0 R_{TDK}$ (%)	$\delta_0 R_{TGK}$ (%)	$\delta_0 R_{T4DK}$ (%)	$\delta_0 R_{TUS}$ (%)	$\delta_A R_{TDK}$ (%)	$\delta_A R_{TGK}$ (%)	$\delta_A R_{T4DK}$ (%)	$\delta_A R_{TUS}$ (%)
ME1–ME5	0	18,19	10,68	12,62	9,73	5,46	3,11	3,41	4,03
ME6–ME10	50	40,33	28,48	34,38	20,50	3,59	5,69	6,49	3,78
ME11–ME15	90	142,31	133,24	140,36	93,25	-0,43	24,61	16,74	17,14

Табела 7.6 – Релативне грешке процене отпорности распростирања уземљивача са и без употребе предложеног алгоритма (у комбинацији са развијеним изразима (Б.5)–(Б.7))

Модел	F_x (%)	$\delta_0 R_{TDK}$ (%)	$\delta_0 R_{TGK}$ (%)	$\delta_0 R_{T4DK}$ (%)	$\delta_0 R_{TUS}$ (%)	$\delta_A R_{TDK}$ (%)	$\delta_A R_{TGK}$ (%)	$\delta_A R_{T4DK}$ (%)	$\delta_A R_{TUS}$ (%)
ME1–ME5	0	20,12	0,80	14,35	5,97	3,22	-7,16	0,26	-0,58
ME6–ME10	50	42,63	17,01	36,44	16,36	-4,53	-7,06	-3,98	-2,97
ME11–ME15	90	146,28	112,42	144,05	86,61	-16,32	4,97	-7,20	4,28

7.5 Анализа добијених резултата

Анализа резултата добијених у оквиру спроведених експеримената показује да, у реалним ситуацијама које карактерише недовољна тачност било резултата добијених мерењима отпорности распростирања уземљивача, било улазних параметара прорачуна, употреба предложеног алгоритма не даје лошије резултате при његовој примени у комбинацији са формулама из Прилога Б него при његовој примени у комбинацији са формулама из поглавља 3 и 5 (иако је у поглављима 5 и 6 показано да се ове друге, у теоријском смислу, одликују значајно већом тачношћу). Чак би се анализом вредности ϵR_{TDK} , ϵR_{TGK} , ϵR_{T4DK} и ϵR_{TUS} приказаних у табелама 7.3 и 7.4 могло закључити да се формуле из поглавља 3 и 5 и формуле из Прилога Б одликују приближно истом тачношћу, што наравно није тачно. То се најбоље види анализом узрока максималне релативне грешке из табеле 7.3, $\epsilon R_{TGK} = -19,75\%$ за $F_x = 90\%$. Она је последица максималне негативне и

максималне позитивне грешке резултата добијених мерењима у оквиру спроведених експеримената (табела 7.2, редом $\epsilon R_E(\%) = -12,10\%$ и $\epsilon R_E(\%) = 10,44\%$, обе за $F_x = 90\%$). Максимална негативна грешка, која је последица појаве чији је ефекат приказан на сл. 7.10, добијена је са моделом ME11 (тест контуром), на основу чије измерене вредности R_E је одређена вредност F_0 , која представља улазни параметар за израчунавање отпорности R_{TGK} . Максимална позитивна грешка, која је последица појава чији су ефекти приказани на сл. 7.8 и 7.9, добијена је са моделом ME13 (горњом контуром) на основу чије измерене вредности R_E је добијена вредност R_{TGK} која се пореди са крајњим резултатима прорачуна спроведених у оквиру предложеног алгоритма. Грешка од $\epsilon R_{TGK} = -19,75\%$, добијена употребом формула из поглавља 3 и 5, које се, у теоријском смислу, одликују великом тачношћу, сасвим је очекивана. Неочекивано ниска вредност одговарајуће грешке која је приказана у табели 7.4 ($\epsilon R_{TGK} = -4,74\%$ за $F_x = 90\%$) заправо потврђује да се формуле из Прилога Б одликују мањом тачношћу од формула из поглавља 3 и 5.

Ипак, како је раније наглашено, предложени алгоритам ће бити примењиван у реалним (а не контролисаним, лабораторијским) условима, па провера његове поузданости са вредностима величина измерених у оквиру експеримента, које донекле одступају од очекиваних идеалних теоријских вредности (што ће се дешавати и при мерењима у реалним условима), показује да се формуле из Прилога Б, иако се одликују мањом тачношћу од формула из поглавља 3 и 5, могу скоро равноправно користити у реалним случајевима. Њихова додатна предност је што применом Методе Б.1 могу да се изведу формуле за израчунавање теоријске (базне) отпорности распрострањања уземљивача практично свих структура и облика који се користе у пракси. Самим тим, могуће је једноставном модификацијом тих формула и њиховом употребом у оквиру предложеног алгоритма са прихватљивом тачношћу одредити укупну отпорност распрострањања уземљивача практично свих структура и облика, положених у тла која формирају лош контакт са њиховим електродама.

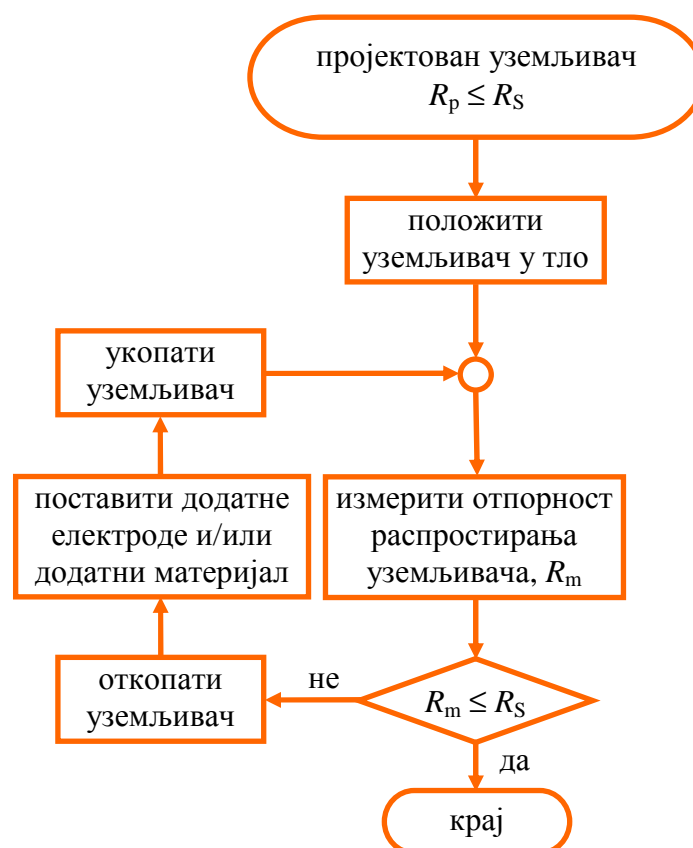
У даљем експерименталном раду, било би занимљиво проверити поузданост предложеног алгоритма и тачност изведених формула понављањем експеримента

са електролитичком кадом у којој би, уместо воде, био коришћен сув песак разних гранулација. Променом гранулације остваривали би се разни типови несавршеног контакта између бакарних жица и околног материјала (тима би се елиминисала потреба за вештачким прављењем несавршеног контакта помоћу делова изолационог материјала).

Наравно, најбољу проверу поузданости предложеног алгоритма и тачности изведених формула могуће је извршити експериментом на једном од реалних уземљивачких система типичног 110 kV далеководног стуба, чији конструкциони параметри имају вредности које припадају распонима датим у табели 5.1. Међутим, даљи експериментални рад превазилази оквире ове дисертације и представља простор за даље истраживање у овој области.

8 МЕТОДОЛОГИЈА ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ ОПТИМАЛНОГ УЗЕМЉИВАЧА У УСЛОВИМА НЕСАВРШЕНОГ КОНТАКТА ИЗМЕЂУ ЕЛЕКТРОДА И ОКОЛНОГ ТЛА

На сл. 8.1 приказан је алгоритам стандардне процедуре инсталирања уземљивача. Извођач радова добија пројекат у којем су облик и димензије уземљивача одређени тако да његова отпорност распрострања израчуната конвенционалним методама прорачуна, R_p (односно отпорност R_0), не буде већа од стандардима захтеване отпорности R_S . Он уз помоћ радника и механизације инсталира уземљивач према добијеном пројекту, након чега обавезним мерењима одређује реалну отпорност распрострања инсталираног уземљивача, R_m (тачније, измерену отпорност R_T), коју упоређује са стандардима захтеваном вредношћу R_S .



Сл. 8.1 – Алгоритам стандардне процедуре инсталирања уземљивача

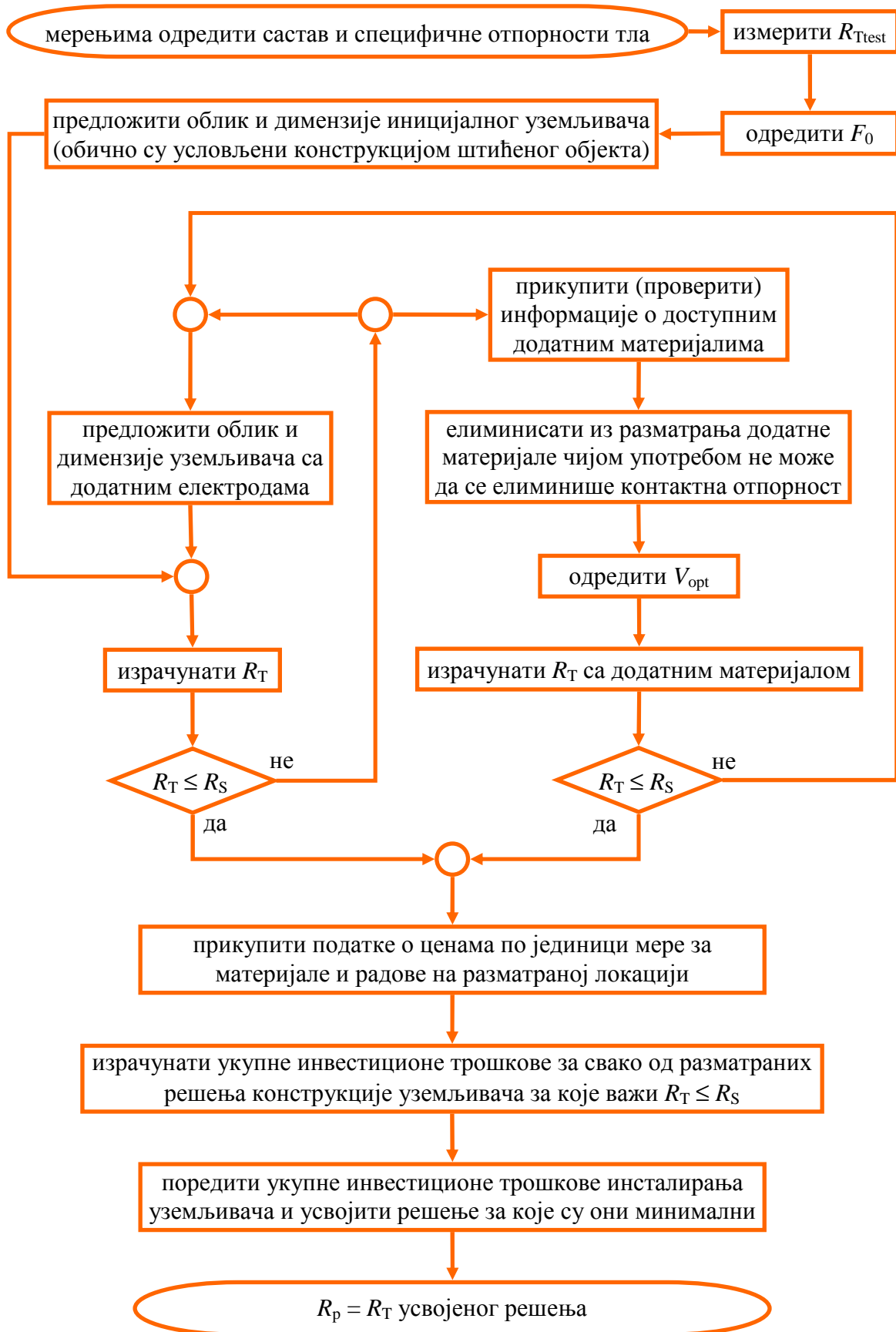
Уколико важи однос $R_m \leq R_s$, може се констатовати да је уземљивач добро пројектован и изведен, те да стога никакви додатни радови нису неопходни. Уколико је $R_m > R_s$ (обично због несавршеног контакта између електрода и тла или недовољно тачно одређене специфичне отпорности тла), стандардима захтевана отпорност R_s постиже се тако што се уземљивач (или неки његов део) откопа, инсталирају се додатне електроде и/или додатни материјал за смањење отпорности распрострања око електрода, а затим се поново укопа. Међутим, коришћењем конвенционалних метода прорачуна, пројектант (или извођач радова) не може да одреди колико додатних електрода и/или који додатни материјал (и колику његову количину) треба употребити како би се постигла стандардима захтевана отпорност R_s . Поставља се онолико додатних електрода и/или додатног материјала колико се процени на основу искуства и инжењерског осећаја. Уколико се након овакве преправке уземљивача обавезним мерењима поново добије отпорност $R_m > R_s$, цела процедура се понавља (онолико пута колико је потребно). Као последица, укупна сума инвестиционих трошкова могла би значајно да премаши суму предвиђену иницијалним пројектом (због употребе додатних електрода и/или додатног материјала, као и због додатних радних сати ангажовања људи и опреме). Чак и када се употребом додатних електрода и/или додатног материјала постигне стандардима захтевана отпорност R_s , не мора да значи да такав уземљивач представља оптимално решење, односно да су при остваривању тог циља инвестициони трошкови били минимални могући.

Одређивање оптималног уземљивача, са уважавањем, како несавршеног контакта између електрода и околног тла, тако и опције употребе додатног материјала за смањење контактне отпорности, требало би да буде засновано на техно-економској анализи у оквиру које би се поредили инсталациони трошкови уземљивача чија је иницијално планирана конструкција модификована на различите начине (употребом само додатних електрода, само додатног материјала или додавањем и једног и другог), под условом да се њима постигну приближно исте отпорности распрострања, мање од захтеваних. При томе треба истаћи да је много боље да се поменуте модификације уземљивача, пројектованог употребом конвенционалних метода прорачуна, врше већ у фази пројектовања, а не након инсталирања уземљивача.

У овој дисертацији су развијени сви алгоритми и упрошћени изрази неопходни за спровођење такве техно-економске анализе при пројектовању оптималног уземљивача састављеног од једне или више галвански спојених квадратних контура (конструкције које одговарају типичном реалном уземљивачу далеководног стуба), са уважавањем, како несавршеног контакта између електрода и околног тла, тако и опције употребе додатног материјала за смањење контактне отпорности.

На сл. 8.2 предложен је општи алгоритам за пројектовање оптималног уземљивача у описаним условима. Пошто је веома битно да пројектант располаже поузданим улазним подацима, неопходно је да од инвеститора (или извођача радова) добије валидне, мерењима утврђене податке о саставу и специфичним отпорностима тла на локацији на којој ће уземљивач бити постављен. Такође, потребно је да од њих добије и резултате тест мерења на основу којих одређује параметар F_0 , којим се (уз познате параметре d_0 и T_0) еквивалентира тло непознатих карактеристика у погледу остваривања контакта са електродама (видети поглавље 6.2).

На основу добијених података, и на основу конструкције штићеног објекта (која условљава изглед уземљивача, што је на разматраном примеру уземљивачког система показано у поглављу 5.1), као и на основу ранијег искуства и инжењерског осећаја, пројектант усваја иницијални облик уземљивача и одређује његове димензије, које треба да обезбеде да његова отпорност распрострањања, R_T (која се рачуна помоћу алгоритма предложеног у поглављу б), не буде већа од стандардима захтеване отпорности, R_S . Уколико је у томе успео из првог покушаја, предложено решење конструкције уземљивача може се усвојити као коначно, након чега је потребно прикупити релевантне податке за израчунавање инвестиционих трошкова његовог инсталирања. Извођач радова добија пројекат са тим решењем конструкције уземљивача и инсталира га према алгоритму приказаном на сл. 8.1 ($R_p = R_T$ усвојеног решења). Међутим, уколико за предложено иницијално решење конструкције уземљивача важи $R_T > R_S$, оно се, у пројектној фази, мења додавањем електрода и/или додатног материјала за смањење контактне отпорности, док се не оствари услов $R_T \leq R_S$.



Сл. 8.2 – Предложени алгоритам пројектовања оптималног уземљивача

Да би пројектант могао да предложи решења уземљивача са употребом додатног материјала за смањење контактне (односно укупне) отпорности распрострања, неопходно је да од инвеститора (или извођача радова) добије податке о релевантним карактеристикама доступних додатних материјала на локацији на којој ће уземљивач бити инсталиран (вредности њихових специфичних отпорности ρ_{dm} и параметра F који квантитативно описује квалитет њиховог контакта са електродама – видети поглавља 3 и 4). Уз помоћ алгоритма из поглавља 4.1.2, пројектант може из даљег разматрања да изостави додатне материјале чијом употребом не може да се елиминише контактна отпорност распрострања пројектованог уземљивача. Затим, уз помоћ алгоритма из поглавља 4.2.4, пројектант одређује оптималну запремину V_{opt} за сваки од преосталих додатних материјала и проверава да ли за неки од њих може да се постигне услов $R_T \leq R_S$. За оне материјале за које тај услов не може да се постигне са разматраном конструкцијом уземљивача, постоји и опција додавања електрода, након чега се понављају анализе које се спроводе употребом алгоритама из поглавља 4.1.2 и 4.2.4.

За свако од разматраних решења конструкције уземљивача за које важи $R_T \leq R_S$ израчунавају се укупни инвестициони трошкови, а усваја се оно решење за које су они минимални. Извођач радова добија пројекат са тим решењем конструкције уземљивача и инсталира га према алгоритму приказаном на сл. 8.1 ($R_p = R_T$ усвојеног решења). Чак и ако након инсталирања уземљивача обавезно мерење покаже да је $R_m > R_S$, разлика ће бити далеко мања него у случају да је уземљивач пројектован само употребом конвенционалних метода прорачуна (што је показано у дисертацији). Осим тога, коришћењем метода, алгоритама и упрошћених израза развијених у дисертацији, пројектант (или извођач радова) може да анализира резултате добијене мерењима, утврди узроке одступања измерене отпорности R_m од њене пројектом одређене вредности R_p , а затим, у складу са алгоритмом приказаним на сл. 8.2, одреди колико додатних електрода и/или које додатне материјале (и колику њихову количину) треба употребити како би се постигла стандардима захтевана отпорност R_S .

Уколико у наведену сврху пројектант (или извођач радова) користи само конвенционалне методе прорачуна, он одступање између измерене отпорности R_m

и пројектом одређене отпорности R_p (које је обично у великој мери последица контактне отпорности) може погрешно да припише само недовољно тачно одређеној вредности специфичне отпорности тла. У таквом случају, а на основу добијених резултата мерења, он коригује (повећава) њену вредност, а затим у пројекту модификује иницијални уземљивач додавањем електрода док резултати добијени употребом класичних метода прорачуна не покажу да је постигнута стандардима захтевана отпорност R_S (са коригованом (повећаном) вредношћу специфичне отпорности тла као улазним параметром). На такав начин, пошто није сагледао стварни узрок разлике између измерене отпорности R_m и пројектом одређене отпорности R_p , пројектант (или извођач радова) може да предимензионише уземљивач.

Пројектант (или извођач радова) може да покуша да стандардима захтевану отпорност R_S постигне иницијалним уземљивачем уз употребу додатног материјала за елиминацију контактне отпорности, а да се при одабиру типа и количине додатног материјала ослони на аналогију са већ изведеним уземљивачима истог (сличног) типа. Међутим, пошто се за различите додатне материјале разликују вредности специфичне отпорности ρ_{dm} и параметра F који квантитативно описује квалитет контакта који остварују са електродама, и пошто се специфичне отпорности тла на разматраној локацији и на локацији претходно изведеног уземљивача такође разликују, може да се деси да пројектант (или извођач радова) употреби превише додатног материјала, а самим тим и превише додатних радних сати ангажовања људи и опреме.

Наравно, у оба напред описана случаја постоји могућност да се након преправке уземљивача обавезним мерењима поново добије отпорност $R_m > R_S$, због чега би цела процедура морала да се понови (онолико пута колико је потребно). Коришћењем метода, алгоритама и упрошћених израза развијених у дисертацији, као и њиховом употребом у складу са алгоритмом приказаним на сл. 8.2, сигурно ће се смањити број понављања процедуре преправке уземљивача (у односу на број понављања уколико се користе само конвенционалне методе прорачуна и инжењерско искуство). Тиме ће се избећи употреба превише додатних електрода и/или додатног материјала, као и превише додатних радних

сати ангажовања људи и опреме, што може спречити непотребно повећање укупних инвестиционих трошкова.

Сви поменути алгоритми и методе за развијање упрошћених израза, без којих описана техно-економска анализа не може бити спроведена, општи су и базирани на 3Д FEM моделовању и нумеричкој анализи добијених резултата. Због тога се могу употребити и за пројектовање оптималних уземљивача који се по типу разликују од разматраног. Спровођење техно-економске анализе, описане у овом поглављу, за неколико реалних уземљивачких система разматраних далеководних стубова, представља простор за даље истраживање у овој области.

9 ЗАКЉУЧЦИ

Циљ ове дисертације је био развој опште методологије за одређивање оптималног уземљивача, са уважавањем, како несавршеног контакта између електрода и околног тла, тако и опције употребе додатног материјала за смањење контактне отпорности. Развијен је и приказан општи алгоритам за пројектовање оптималног уземљивача у описаним условима, заснован на техно-економској анализи у оквиру које се пореде инсталациони трошкови свих уземљивача чија је иницијално пројектована конструкција модификована на разне начине (употребом само додатних електрода, само додатног материјала или и једног и другог), под условом да су постигнуте приближно исте отпорности распрострања, мање од захтеваних.

Прегледом литературе је утврђено да у доступним домаћим и страним стандардима, као и у научно-стручној литератури, не постоје нити методе нити упрошћени аналитички изрази за прорачуне отпорности распрострања уземљивача помоћу којих би наведени утицаји могли да се уваже. У овој дисертацији су развијени алгоритми и упрошћени изрази неопходни за спровођење такве техно-економске анализе при пројектовању оптималног уземљивача састављеног од једне или више галвански спојених квадратних контура (конструкције које одговарају типичном уземљивачу далеководног стуба). Сви алгоритми и методе за развијање упрошћених изрази, који су приказани у овој дисертацији, општи су и базирани на 3Д FEM моделовању и нумеричкој анализи добијених резултата. Због тога се могу употребити и за пројектовање оптималних уземљивача који се по типу разликују од разматраног.

Очекује се да ће се развијена методологија за одређивање оптималног уземљивача примењивати у случајевима који су слични квадратним контурним уземљивачима разматраним у [37], положеним у тло које формира несавршен контакт са електродама (измерене вредности њихових отпорности распрострања биле су далеко веће од оних које су добијене стандардним прорачуном (од 238% до чак 1354%). Иако је у [37] претпостављено да је узрок великих разлика између

измерених и израчунатих вредности отпорности распрострања уземљивача представљао несавршен контакт између електрода и тла, ова физичка појава није била теоријски истражена у [37], зато што је било немогуће моделовати несавршен контакт математичким техникама и софтверским алатима који су у то време били доступни.

У дисертацији је показано да су у данашње време, како FEM и одговарајући софтвери, тако и перформансе стандардних рачунара, довољно развијени да могу успешно да се користе као алат за 3Д моделовање експерименталне поставке из [37] (квадратног контурног уземљивача положеног у двослојно тло, било са лошим контактом између електрода и тла било окруженог додатним материјалом за смањење отпорности распрострања). Несавршен контакт је моделован „постављањем“ ваздушних џепова између електрода и околног тла.

На основу резултата добијених 3Д FEM симулацијама анализиран је утицај лошег контакта између електрода и околног тла на електричне карактеристике разматраног квадратног контурног уземљивача. Показано је да удео дела површине уземљивача који је покривен ваздушним џеповима (који не остварује контакт са околним тлом) представља параметар који најзначајније утиче на повећање контактне отпорности, а самим тим и на повећање укупне отпорности распрострања разматраног квадратног контурног уземљивача. Разматран је и утицај несавршеног контакта на расподелу потенцијала у околини уземљивача у случају квара. Утврђено је да структура материјала који је у непосредном додиру са површином електрода уземљивача може значајно да утиче на величину пада потенцијала на материјалу који се налази у непосредној близини електрода, а самим тим и на потенцијале у тлу и на површини тла у целој области на којој треба проверити напоне додира и корака. На основу спроведених анализа, развијена је метода за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при прорачуну отпорности распрострања разматраног контурног уземљивача.

Анализиран је и утицај додатног материјала на отпорност распрострања разматраног уземљивача. На основу спроведених анализа израђена су два општа алгоритма:

- за одређивање карактеристика додатног материјала потребних за елиминацију контактне отпорности, и
- за процену оптималне количине додатног материјала за смањење отпорности распростирања уземљивача.

Нумеричком анализом резултата добијених 3Д FEM моделовањем, за разматрани случај су изведени сви упрошћени изрази неопходни за спровођење наведених алгоритама.

Један од задатака ове дисертацији био је развој опште методе за извођење упрошћених, али довољно тачних, израза за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при израчунавању укупне отпорности распростирања, R_T , било ког комплексног уземљивача. Да би се добио скуп таквих израза, прво је требало извести упрошћене изразе за израчунавање теоријске (базне) отпорности распростирања, R_0 , тог уземљивача.

На примеру уземљивача састављеног од једне или више галвански спојених квадратних контура представљена је метода за развијање упрошћених израза за израчунавање отпорности R_0 , која се може применити на разне типове уземљивача. Метода је базирана на нумеричкој обради резултата добијених 3Д FEM симулацијама, а упрошћени изрази за израчунавање отпорности R_0 базирани су на коефицијентима којима се описује међусобни утицај појединачних елемената уземљивача. Варирањем вредности релевантних конструкционих параметара разматраног уземљивачког система (у оквиру утврђених распона) и анализом резултата прорачуна изведене су, како нова формула за израчунавање теоријске (базне) отпорности распростирања усамљене квадратне контуре положене у хомогено тло, тако и формуле за израчунавање теоријске (базне) отпорности распростирања уземљивача састављеног од више галвански спојених квадратних контура, такође положених у хомогено тло. Утврђена је изузетна тачност резултата добијених помоћу изведених формула (поређени су са резултатима добијеним применом конвенционалних метода датих у стандардима [32,33] и приручницима [34–36], при чему су резултати добијени 3Д FEM моделовањем коришћени као референтне вредности).

Затим је развијен општи алгоритам за израчунавање укупне отпорности распрострања комплексног уземљивачког система, R_T , уз уважавање контактне отпорности. Предложени алгоритам је базиран на додатном тест мерењу, скупу упрошћених израза за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при прорачуну отпорности распрострања сложених уземљивача (поглавље 3) и скупу упрошћених израза за израчунавање теоријске (базне) отпорности распрострања, R_0 (поглавље 5). Потврђено је да је коришћењем параметара одређених на основу тест мерења и употребом упрошћених израза из поглавља 3 и 5 могуће, са задовољавајућом тачношћу, одредити укупну отпорност распрострања, како квадратног контурног уземљивача, тако и сложеног уземљивачког система састављеног од више квадратних контура (он одговара уземљивачком систему типичног 110 kV далеководног стуба). Провера тачности изведених формула и поузданости предложеног алгоритма извршена је поређењем добијених резултата са резултатима добијеним рачунарским симулацијама спроведеним на 3Д FEM моделима. Осим тога, показано је да и модификоване формуле за прорачун укупне отпорности распрострања разматраног уземљивачког система, изведене помоћу Методе Б.1 приказане у Прилогу Б, могу да се примене у оквиру развијеног алгоритма, а затим је и њихова тачност проверена поређењем добијених резултата са резултатима добијеним рачунарским симулацијама спроведеним на 3Д FEM моделима. Анализом добијених резултата констатована је висока поузданост предложеног алгоритма, уз задовољавајућу тачност израза изведених помоћу Методе Б.1 и изузетну тачност израза изведених у поглављима 3 и 5.

Тачност изведених формула (приказаних у поглављима 3 и 5, односно изведених помоћу Методе Б.1), као и поузданости предложеног алгоритма за израчунавање укупне отпорности распрострања комплексних уземљивачких система уз уважавање контактне отпорности, потврђене су поређењем резултата добијених њиховом употребом са резултатима добијеним мерењима у оквиру експеримента са умањеним жичаним моделима и електролитичком кадом.

Значај развијене методологије за одређивање оптималног уземљивача у условима несавршеног контакта између електрода и тла огледа се у чињеници да, у таквим условима, коришћењем конвенционалних метода прорачуна пројектант

(или извођач радова) не може да одреди колико додатних електрода и/или који додатни материјал (и колику његову количину) треба употребити како би се постигла стандардима захтевана отпорност R_S . Коришћењем метода, алгоритама и упрошћених израза развијених у овој дисертацији, пројектант (или извођач радова) може да анализира резултате добијене мерењима, утврди узроке одступања измерене од пројектом дефинисане отпорности распрострања уземљивача, а затим пронађе оптимално решење. Применом наведеног поступка сигурно ће се смањити број понављања процедуре преправке уземљивача (у односу на ситуацију када се користе само конвенционалне методе прорачуна), што ће редуковати повећање инвестиционих трошкова предвиђених иницијалним пројектом.

Већина метода, алгоритама и упрошћених израза развијених у овој дисертацији, који представљају њен главни научни допринос, већ је објављена (или прихваћена за објављивање) у научно-стручним часописима са *JCR* листе [90–93] и представљена на домаћој научној конференцији [94,95]. Поменути радови не садрже све резултате истраживачког рада приказане у дисертацији, а ни дисертација не обухвата све што у предметној области треба да буде истражено и усавршено.

Резултати приказани у дисертацији указују на потребу за развојем методе помоћу које би се уважаио несавршени контакт између електрода уземљивача и тла и при прорачуну напона додира и корака. Осим тога, потребно је испитати утицај врсте и количине додатног материјала употребљеног за смањење отпорности распрострања уземљивача на расподелу потенцијала на површини тла у случају квара, односно на вредности напона додира и корака.

Недостатак предложених алгоритама за одређивање неопходних карактеристика додатног материјала за елиминацију контактне отпорности, као и за процену оптималне количине додатног материјала за смањење отпорности распрострања уземљивача, представља њихова базираност на 3Д FEM симулацијама, а не на лако применљивим упрошћеним изразима. Изналажење оваквих израза и упрошћавање поменутих алгоритама представља простор за даље истраживање у овој области.

Један од недостатака скупа упрошћених израза за израчунавање теоријске (базне) отпорности распрострања сложених уземљивачких система, изведених у поглављу 5 за разматрани уземљивачки систем, састоји се у томе што су они добијени разматрањем физичких процеса који се одигравају при ниским фреквенцијама и релативно ниским вредностима јачине струје. Да би могле да се врше анализе прелазних појава које се одигравају приликом одвођења струје атмосферских пражњења у земљу са разматраног уземљивача, неопходно је познавати његову транзијентну импедансу распрострања, која се може значајно разликовати од отпорности израчунате применом израза из поглавља 5 (због јонизације и фреквентно зависних параметара тла [86–89]). Можда би упрошћени изрази за такве анализе могли да се добију употребом методе коначних разлика у временском домену (*finite-difference time-domain (FDTD) method*) уместо коришћеног FEM-а.

Изрази изведени у поглављу 5 важе само за разматрани уземљивачки систем. Слични изрази могу да се изведу за уземљиваче који се по структури, облику и димензијама разликују од разматраног типа уземљивача (састављеног од једне или више галвански спојених квадратних контура), што представља простор за даље истраживање у овој области.

Утицај просторних варијација специфичне отпорности тла на вредност отпорности распрострања уземљивача такође заслужује пажњу. Помоћу 3Д FEM моделовања и нумеричке анализе добијених резултата могуће је развити изразе сличне онима из поглавља 5 помоћу којих би тај утицај могао да се уважи (ово је посебно важно за модел двослојног тла, који се често користи у пракси).

У даљем експерименталном раду могла би да се провери поузданост предложеног алгоритма понављањем експеримента са електролитичком кадом, у којој би, уместо воде, био коришћен сув песак разних гранулација. Променом гранулације остваривали би се разни типови несавршеног контакта између бакарних жица и околног материјала (тима би се елиминисала потреба за вештачким прављењем несавршеног контакта помоћу делова изолационог материјала). Наравно, крајњи циљ је провера поузданости предложеног алгоритма и тачности изведених формула на реалном уземљивачком систему типичног

110 kV далеководног стуба, чији конструкциони параметри имају вредности које припадају распонима датим у табели 5.1.

Спровођење техно-економске анализе, описане у осмом поглављу, за неколико реалних уземљивачких система разматраних далеководних стубова, такође представља простор за даље истраживање у области коју обрађује дисертација.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] М. Костић, Теорија и пракса пројектовања електричних инсталација – треће, проширено издање, Академска мисао, Београд, 2014.
- [2] N. Mohamad Nor, S. Abdullah, R. Rajab, Z. Othman, Comparison between utility substation and imitative earthing systems when subjected under lightning response, *Int. J. Elec. Power* 43 (2012) 156–161.
- [3] S.C. Lim, C. Gomes, M.Z.A. Ab Kadir, Electrical earthing in troubled environment, *Int. J. Elec. Power* 47 (2013) 117–128.
- [4] Y. Khan, F.R. Pazheri, N.H. Malik, A.A. Al-Arainy, M.I. Qureshi, Novel approach of estimating grounding pit optimum dimensions in high resistivity soils, *Electr. Pow. Syst. Res.* 92 (2012) 145–154.
- [5] G. Eduful, J.E. Cole, P.Y. Okyere, Optimum mix of ground electrodes and conductive backfills to achieve a low ground resistance, *Proceedings of the 2nd International Conference on Adaptive Science & Technology* (2009) 140–145.
- [6] Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard, *Std. IEC 62305-3*, 2006.
- [7] A. Piantini, J.M. Janiszewski, The use of shield wires for reducing induced voltages from lightning electromagnetic fields, *Electr. Pow. Syst. Res.* 94 (2013) 46–53.
- [8] M.S. Savic, Sensitivity analysis of lightning performance calculations for transmission lines and substations, *IEE Proc.-C* 132 (1985) 217–223.
- [9] I.F. Gonos, L. Ekonomou, F.V. Topalis, I.A. Stathopoulos, Probability of backflashover in transmission lines due to lightning strokes using Monte-Carlo simulation, *Int. J. Elec. Power* 25 (2003) 107–111.
- [10] M.Z.A. Ab Kadir, I. Cotton, Application of the insulator coordination gap models and effect of line design to backflashover studies, *Int. J. Elec. Power* 32 (2010) 443–449.
- [11] A.H.A. Bakar, D.N.A. Talib, H. Mokhlis, H.A. Illias, Lightning back flashover double circuit tripping pattern of 132 kV lines in Malaysia, *Int. J. Elec. Power* 45 (2013) 235–241.
- [12] M.S. Savic, Estimation of the surge arrester outage rate caused by lightning overvoltages, *IEEE T. Power Deliver.* 20 (2005) 116–122.
- [13] N. Mohamad Nor, R. Rajab, Z. Othman, Validation of the earth resistance formulae using computational and experimental methods for gas insulated sub-station (GIS), *Int. J. Elec. Power* 43 (2012) 290–294.

- [14] М. Костић, Један приступ одређивању отпора распрострањања једне класе сложених симетричних уземљивача, магистарски рад, Електротехнички факултет Београд, 1981.
- [15] М. Костић, Једна нова метода за одређивање електричних карактеристика уземљивача и њена примена на темељне уземљиваче, докторски рад, Електротехнички факултет Београд, 1988.
- [16] Y.L. Chow, M.M. Elsherbiny, M.M.A. Salama, Surface voltages and resistance of grounding systems of grid and rods in two-layer earth by the rapid Galerkin's moment method, IEEE T. Power Deliver. 12 (1997) 179–185.
- [17] Д. Саламон, Упрошћени поступци за анализу сложених уземљивача, докторски рад, Електротехнички факултет Београд, 1992.
- [18] S.J. Schwarz, Analytical Expressions for the Resistance of Grounding Systems, AIEE Transactions, 73 (1954) 1011–1016.
- [19] H.B. Dwight, Calculation of Resistances to Ground, AIEE Transactions, 55 (1936) 1319–1328.
- [20] J. Nahman, S. Skuletic, Resistances to ground and mesh voltages of ground grids, Proc. IEE 126 (1979) 57–61.
- [21] M.M.A. Salama, M.M. Elsherbiny, Y.L. Chow, K.C. Kim, Calculation and interpretation of a grounding grid in two-layer earth with the synthetic-asymptote approach, Electr. Pow. Syst. Res. 35 (1995) 157–165.
- [22] E. Mombello, O. Trad, J. Rivera, A. Andreoni, Two-layer soil model for power station grounding system calculation considering multilayer soil stratification, Electr. Pow. Syst. Res. 37 (1996) 67–78.
- [23] J. Nahman, D. Salamon, Analytical expressions for the resistance of grounding grids in nonuniform soil, IEEE T. Power Ap. Syst. 103 (1984) 880–885.
- [24] M.M. Elsherbiny, Y.L. Chow, M.M.A. Salama, A fast and accurate analysis of grounding resistance of a driven rodbed in a two-layer soil, IEEE T. Power Deliver. 11 (1996) 808–814.
- [25] V. Brandenbursky, A. Farber, V. Korj, A. Braunshtein, Ground resistance calculation for small concrete foundations, Electr. Pow. Syst. Res. 81 (2011) 408–413.
- [26] M.B. Kostic, B.D. Popovic, M.S. Jovanovic, Numerical analysis of a class of foundation grounding systems, IEE Proc.–C 137 (1990) 123–128.
- [27] B. Thapar, O. Ferrer, D.A. Blank, Ground resistance of concrete foundations in substations yards, IEEE T. Power Deliver. 5 (1990) 130–136.
- [28] M.B. Kostic, G.H. Shirkoohi, Numerical analysis of a class of foundation grounding systems surrounded by two-layer soil, IEEE T. Power Deliver. 8 (1993) 1080–1087.
- [29] M.B. Kostic, Parametric analysis of foundation grounding systems surrounded by two-layer soil, IEEE T. Power Deliver. 9 (1994) 1406–1411.

- [30] M.B. Kostic, Analysis of foundation grounding systems with external loops and rods, IEE Proc.–C 140 (1993) 73–76.
- [31] M.B. Kostic, Analysis of complex grounding systems consisting of foundation grounding systems with external grids, IEEE T. Power Deliver. 13 (1998) 752–756.
- [32] Guide for Safety in AC Substation Grounding, ANSI/IEEE Std. 80, 1986.
- [33] Guide for Safety in AC Substation Grounding, ANSI/IEEE Std. 80, 2000.
- [34] А.Т. Голован, П.Г. Грудински, Г.Н. Петров, А.М. Федосеев, М.Г. Чиликин, И.В. Антик. Электротехнический справочник. Энергия, Москва-Ленинград, 1964.
- [35] Power Quality Application Guide, Earthing & EMC, Earthing Systems – Basic Constructional Aspects, European Copper Institute and Copper Development Association, Brussels-London, 2001.
- [36] W.A. Chisholm. Transmission System Transients: Grounding. in: L.L. Grigsby (Ed.), The Electric Power Engineering Handbook: Power Systems, third ed., CRC Press, Boca Raton, 2012, pp. 11-1–11-19.
- [37] M.B. Kostic, Z.R. Radakovic, N.S. Radovanovic, M.R. Tomasevic-Canovic, Improvement of electrical properties of grounding loops by using bentonite and waste drilling mud, IEE Proc.–C 146 (1999) 1–6.
- [38] Z.R. Radakovic, M.V. Jovanovic, V.M. Milosevic, N.M. Ilic, Application of earthing backfill materials in desert soil conditions, accepted for publication in IEEE T. Ind. Appl., 2015, DOI: 10.1109/TIA.2015.2429644
- [39] M. Kostic, M. Jovanovic, A new approach of determining grounding resistance of one class of complex grounding systems, Publications of Faculty of Electrical Engineering, University of Belgrade, Series: Power Engineering 120 (1987) 1–11.
- [40] A. Kumar, H.R. Seedhar, Grounding system analysis with satellite electrode for high-resistivity limited-area substations and impact of vertical fault, Elect. Power Compon. Syst. 39 (2011) 879–899.
- [41] C.N. Chang, C.H. Lee, Y.J. Wang, Improvement of grounding resistances using a deep-ground-well method for indoor-type substations located in complex soils, Eur. T. Electr. Power 19 (2009) 274–290.
- [42] W.R. Jones, Bentonite rods assure ground rod installation in problem soils, IEEE T. Power Ap. Syst. PAS-99 (1980) 1343–1346.
- [43] Z.R. Radakovic, M.B. Kostic, Behaviour of grounding loop with bentonite during a ground fault at an overhead line tower, IEE P. Gener. Transm. D. 148 (2001) 275–278.
- [44] H. Kutter, W. Lange, Grounding improvement by using bentonite, Elektr. 21 (1967) 421–424.

- [45] M. Veledar, Z. Timic, S. Skok, Z. First, Improvement of grounding properties by using bentonite, International Conference on Large High Voltage Electric Systems, 1982 Session, Paris, France, 22-06.
- [46] J. Jasni, L.K. Siow, M.Z.A. Ab Kadir, W.F. Wan Ahmad, Natural materials as grounding filler for lightning protection system, 30th International Conference on Lightning Protection, Cagliari, Italy, 2010, Paper PA-1101.
- [47] N. Kumarasinghe, A low cost lightning protection system and its effectiveness, 20th International Lightning Detection Conference, Tucson, Arizona, 2008.
- [48] L.H. Chen, J.F. Chen, T.J. Liang, W.I. Wang, A study of grounding resistance reduction agent using granulated blast furnace slag, IEEE T. Power Deliver. 19 (2004) 973–978.
- [49] S.D. Chen, L.H. Chen, C.K. Cheng, J.F. Chen, An experimental study on the electrical properties of fly ash in the grounding system, International Journal of Emerging Electric Power Systems, (2006) Vol. 7: Iss. 2, Article 7.
- [50] L.H. Chen, J.F. Chen, T.J. Liang, W.I. Wang, A research on used quantity of ground resistance reduction agent for ground systems, Eur. T. Electr. Power 20 (2010) 408–421.
- [51] A.A. Al-Arainy, N.H. Malik, M.I. Qureshi, Y. Khan, Grounding pit optimization using low resistivity materials for applications in high resistivity soils, International Journal of Emerging Electric Power Systems, (2011) Vol. 12: Iss.1, Article 3.
- [52] Q. Meng, J. He, F.P. Dawalibi, J. Ma, A new method to decrease ground resistances of substation grounding systems in high resistivity regions, IEEE T. Power Deliver. 14 (1999) 911–916.
- [53] H.E. Martínez, E.L. Fuentealba, L.A. Cisternas, H.R. Galleguillos, J.F. Kasaneva, O.A. De La Fuente, A new artificial treatment for the reduction of resistance in ground electrode, IEEE T. Power Deliver. 19 (2004) 601–608.
- [54] H.M. Khodr, Optimal methodology for the grounding systems design in transmission line using mixed-integer linear programming, Elect. Power Compon. Syst. 38 (2009) 115–136.
- [55] P. Doganis, H. Sarimveis, Optimization of power production through coordinated use of hydroelectric and conventional power units, Appl. Math. Model. 38 (2014) 2051–2062.
- [56] M. Nayel, Study apparent grounding resistivity in vertical-layer soil, Elect. Power Compon. Syst. 42 (2014) 845–851.
- [57] J. Jin, The finite element method in electromagnetics, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 2002.
- [58] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, J.Z. Zhu, The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, 6th ed., Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 2005.
- [59] P.P. Silvester, R.L. Ferrari, Finite elements for electrical engineers, 3rd ed., Cambridge University Press, New York, 1996.



- [60] И. Пауновић, *Анализа утицаја нехомогености средине на карактеристике уземљивачких система електроенергетских постројења и услове безбедности*, докторски рад, Електротехнички факултет Београд, 2003.
- [61] F. Freschi, M. Mitolo, M. Tartaglia, An effective semi-analytical method for simulating grounding grids, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 49 (2013) 256–263.
- [62] I. Colominas, F. Navarrina, M. Casteleiro, A boundary element numerical approach for grounding grid computation, *Comput. Method. Appl. M.* 174 (1999) 73–90.
- [63] I. Colominas, J. Gomez-Calvino, F. Navarrina, M. Casteleiro, A general numerical model for grounding analysis in layered soils, *Adv. Eng. Softw.* 33 (2002) 641–649.
- [64] J. Nahman, I. Paunovic, Mesh voltages at earthing grids buried in multi-layer soil, *Electr. Pow. Syst. Res.* 80 (2010) 556–561.
- [65] J. Nahman, I. Paunovic, Resistance to earth of earthing grids buried in multi-layer soil, *Electr. Eng.* 88 (2006) 281–287.
- [66] J. Nahman, I. Paunovic, Effects of the local soil nonuniformity upon performances of ground grids, *IEEE T. Power Deliver.* 22 (2007) 2180–2184.
- [67] F. Freschi, M. Mitolo, M. Tartaglia, Interferences phenomena between separate grounding systems, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 50 (2014) 2853–2860.
- [68] N. Mohamad Nor, M. Trlep, S. Abdullah, R. Rajab, Investigations of earthing systems under steady-state and transients with FEM and experimental work, *Int. J. Elec. Power* 44 (2013) 758–763.
- [69] J.A. Güemes, F.E. Hernando, Method for calculating the ground resistance of grounding grids using FEM, *IEEE T. Power Deliver.* 19 (2004) 595–600.
- [70] J.A. Güemes-Alonso, F.E. Hernando-Fernández, F. Rodríguez-Bona, J.M. Ruiz-Moll, A practical approach for determining the ground resistance of grounding grids, *IEEE T. Power Deliver.* 21 (2006) 1261–1266.
- [71] V. Satopaa, J. Albrecht, D. Irwin, B. Raghavan, Finding a “Kneedle” in a haystack: Detecting knee points in system behavior, *IEEE 31st International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW)*, Minneapolis, MN, USA, 2011.
- [72] I. Das, On characterizing the “knee” of the Pareto curve based on Normal-Boundary Intersection, *Struct. Optimization* 18 (1999) 107–115.
- [73] F.A. Gonzalez-Horta, R.A. Enriquez-Caldera, J.M. Ramirez-Cortes, J. Martínez-Carballido, E. Buenfil-Alpuche, Mathematical model for the optimal utilization percentile in M/M/1 systems: A contribution about knees in performance curves, *3rd International Conference on Adaptive and Self-Adaptive Systems and Applications*, Rome, Italy, 2011.

- [74] S. Salvador, P. Chan, Determining the number of clusters/segments in hierarchical clustering/segmentation algorithms, 16th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI), Boca Raton, FL, USA, 2004, 576–584.
- [75] Z. Jia, M.G. Ierapetritou, Generate Pareto optimal solutions of scheduling problems using normal boundary intersection technique, *Comput. Chem. Eng.* 31 (2007) 268–280.
- [76] F. Wenner, A method of measuring earth resistances, *Bulletin of National Bureau of Standards*, 12 (1916) 469–482 (Report no. 258).
- [77] F. Dawalibi, C.J. Blattner, Earth resistivity measurement interpretation techniques, *IEEE T. Power Ap. Syst.* 103 (1984) 374–382.
- [78] O.C. Zienkiewicz, C. Emson, P. Bettess, A novel boundary infinite element, *Int. J. Numer. Meth. Eng.* 19 (1983) 393–404.
- [79] Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System, ANSI/IEEE Std 81, 1983.
- [80] D. Fylstra, L. Lasdon, J. Watson, A. Waren, Design and use of the Microsoft Excel Solver, *Interfaces*, 28 (1998) 29–55.
- [81] V.L. Coelho, A. Piantini, H.A.D. Almaguer, R.A. Coelho, W.C. Boaventura, J.O.S. Paulino, The influence of seasonal soil moisture on the behavior of soil resistivity and power distribution grounding systems, *Electr. Pow. Syst. Res.* 118 (2015) 76–82.
- [82] F.E. Asimakopoulou, G.J. Tsekouras, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, Estimation of seasonal variation of ground resistance using Artificial Neural Networks, *Electr. Pow. Syst. Res.* 94 (2013) 113–121.
- [83] В. Илић, М. Петровић, З. Марјановић, Побољшање отпора уземљења далеководних стубова изведених од прстенастих уземљивача у слабопроводном тлу, 30. саветовање CIGRE Србија, Златибор, Србија, 2011, Р Б2 07.
- [84] I. Newton, *The method of fluxions and infinite series: with its application to the geometry of curve-lines*, printed by Henry Woodfall and sold by John Nourse, London, 1736.
- [85] Извођење уземљења стубова електродистрибутивних надземних водова 1 kV, 10 kV, 20 kV, 35 kV и 110 kV, Техничка препорука број 9, ЈП Електропривреда Србије, Београд, 2010.
- [86] A.B. Lima, J.O.S. Paulino, W.C. Boaventura, I.J.S. Lopes, M.F. Guimarães, W.A. Chisholm, B. Jamali, F. Bologna, Transient grounding impedance and transient resistivity measurements using a very short current lead, *Electr. Pow. Syst. Res.* 118 (2015) 69–75.
- [87] Mousa, N. Harid, H. Griffiths, A. Haddad, Experimental investigation of high frequency and transient performance of earth rod systems, *Electr. Pow. Syst. Res.* 113 (2014) 196–203.

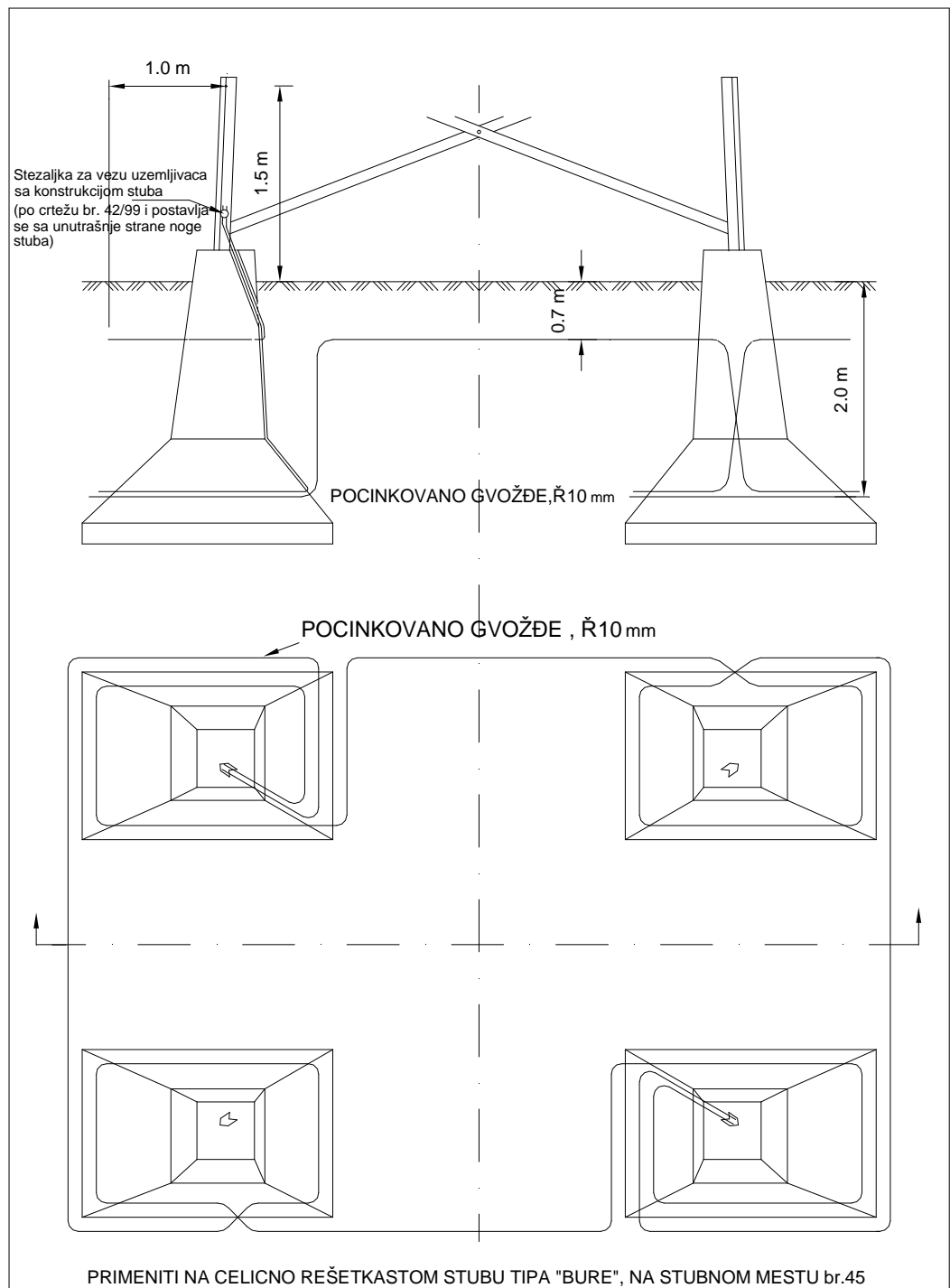
- [88] J.H. Choi, B.H. Lee, An analysis of conventional grounding impedance based on the impulsive current distribution of a horizontal electrode, *Electr. Pow. Syst. Res.* 85 (2012) 30–37.
- [89] A. Ametani, T. Chikaraa, H. Morii, T. Kubo, Impedance characteristics of grounding electrodes on earth surface, *Electr. Pow. Syst. Res.* 85 (2012) 38–43.
- [90] J. Trifunović, The algorithm for determination of necessary characteristics of backfill materials used for grounding resistances of grounding loops reduction, *J. Electr. Eng.* 63 (2012) 373–379.
- [91] J. Trifunovic, M. Kostic, Analysis of influence of imperfect contact between grounding electrodes and surrounding soil on electrical properties of grounding loops, *Electr. Eng.* 96 (2014) 255–265.
- [92] J. Trifunovic, M. Kostic, Quick calculation of the grounding resistance of a typical 110 kV transmission line tower grounding system, *Electr. Pow. Syst. Res.* 131 (2016) 178–186.
- [93] J. Trifunovic, M. Kostic, An algorithm for estimating the grounding resistance of complex grounding systems including contact resistance, *IEEE T. Ind. Appl.* 51 (2015) 5167–5174.
- [94] J. Трифуновић, Примена методе коначних елемената за развој алгоритама и формула неопходних за пројектовање уземљивача у условима несавршеног контакта између електрода и тла и употребе додатног материјала за смањење контактне отпорности, SYM-OP-IS 2015: XLII Симпозијум о операционим истраживањима, Сребрно језеро, Србија, 2015, сс. 64–67.
- [95] J. Трифуновић, Метода за процену оптималне количине додатног материјала за смањење отпорности распростирања контурног уземљивача, SYM-OP-IS 2015: XLII Симпозијум о операционим истраживањима, Сребрно језеро, Србија, 2015, сс. 72–75.


ПРИЛОГ А – Конструкциони параметри типичног 110 kV далеководног стуба

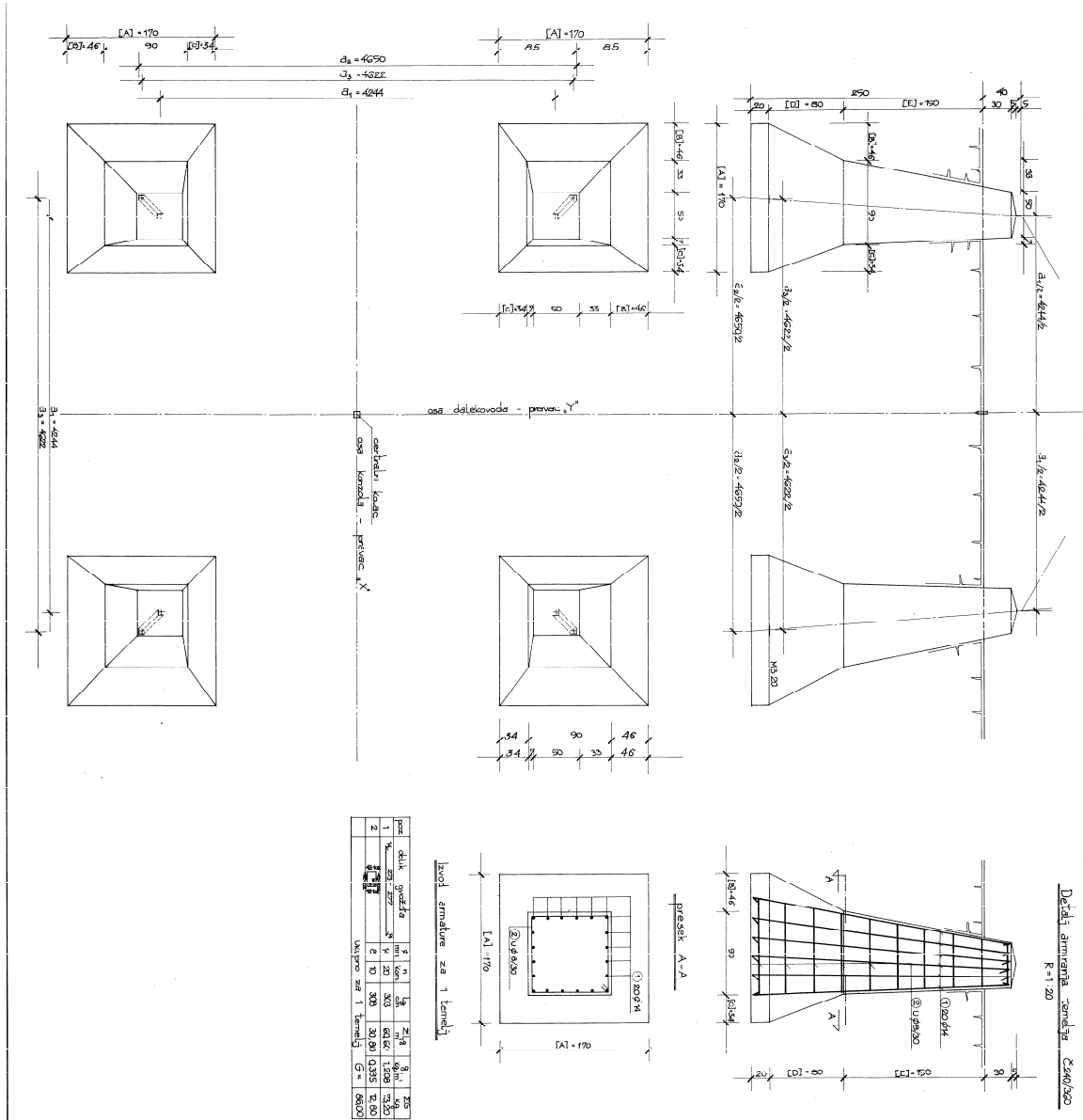
Уземљивачки систем типичног 110 kV далеководног стуба обично се изводи помоћу поцинковане челичне траке повезане са металном конструкцијом, која се поставља у земљу око темеља стуба. Димензије и облик уземљивачког система условљени су димензијама одређеним у грађевинском пројекту далеководног стуба, а нарочито димензијама и положајем бетонских стопа темеља, који су условљени висином далеководног стуба (H) и капацитетом носивости тла (σ). У овом Прилогу су приказани прикупљени подаци неопходни за утврђивање распона вредности релевантних конструкционих параметара за које је у дисертацији изведен скуп упрошћених израза за израчунавање вредности R_0 . Испод је приказан табела у којој се види понуда различитих попречних пресека поцинковане челичне траке једног произвођача. На наредним странама редом су приказани: фотографија 110 kV далеководног стуба, цртеж из стандардног пројекта система уземљења 110 kV далеководног стуба и резултати прорачуна и цртежи из грађевинских пројеката 4 различита типа 110 kV далеководног стуба (на којима се виде укупно 72 могуће комбинације димензија 110 kV далеководног стуба, његовог темеља и уземљивачког система).

 	Дебљина траке				
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
	2	2,5	3	3,5	4
Ѕирина траке	Маса				
(mm)	kg/m	kg/m	kg/m	kg/m	kg/m
20	0,314	0,393	0,471	0,550	0,628
25	0,393	0,491	0,589	0,697	0,785
30	0,471	0,589	0,707	0,824	0,942
35	0,550	0,687	0,824	0,962	1,10
40	0,628	0,785	0,942	1,10	1,26



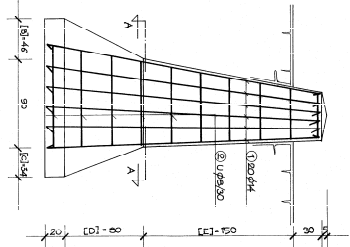
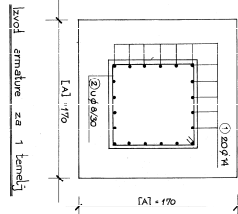


 ELEKTROISTOK PROJEKтни BИRO d.o.o. BEOGRAD, ROVINJSKA 14		Naziv projekta	DV 110 kV			
Faza	GLAVNI PROJEKAT		Naziv crteža	CRTEŽ UZEMLJENJA CELICNO REŠETKASTOG STUBA SA CETIRI TEMELJA		
Datum	12.2010 g.	Ime i prezime				
Odgovorni projektant	I.Milanov dipl.el.inž.		Razmera	Broj projekta	Reg. broj crteža	Prilog / list
Obradio	M.Majstorovic el.tehn.					
Unutrašnja kontrola	D.Lelic dipl.el.inž.					



Детаљ анимација, сеница R-1.20

пож. дим.	градња	з. н.	н. н.	н. н.	н. н.	н. н.	н. н.
1	100	15.20	100	15.20	100	15.20	100
2	100	15.20	100	15.20	100	15.20	100



Напомена:
 Напомену преглед 1 може бити узи за димензије
 41,4; 46, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332, 333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 380, 381, 382, 383, 384, 385, 386, 387, 388, 389, 390, 391, 392, 393, 394, 395, 396, 397, 398, 399, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 429, 430, 431, 432, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 439, 440, 441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452, 453, 454, 455, 456, 457, 458, 459, 460, 461, 462, 463, 464, 465, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 472, 473, 474, 475, 476, 477, 478, 479, 480, 481, 482, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 492, 493, 494, 495, 496, 497, 498, 499, 500, 501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516, 517, 518, 519, 520, 521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530, 531, 532, 533, 534, 535, 536, 537, 538, 539, 540, 541, 542, 543, 544, 545, 546, 547, 548, 549, 550, 551, 552, 553, 554, 555, 556, 557, 558, 559, 560, 561, 562, 563, 564, 565, 566, 567, 568, 569, 570, 571, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 579, 580, 581, 582, 583, 584, 585, 586, 587, 588, 589, 590, 591, 592, 593, 594, 595, 596, 597, 598, 599, 600, 601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610, 611, 612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619, 620, 621, 622, 623, 624, 625, 626, 627, 628, 629, 630, 631, 632, 633, 634, 635, 636, 637, 638, 639, 640, 641, 642, 643, 644, 645, 646, 647, 648, 649, 650, 651, 652, 653, 654, 655, 656, 657, 658, 659, 660, 661, 662, 663, 664, 665, 666, 667, 668, 669, 670, 671, 672, 673, 674, 675, 676, 677, 678, 679, 680, 681, 682, 683, 684, 685, 686, 687, 688, 689, 690, 691, 692, 693, 694, 695, 696, 697, 698, 699, 700, 701, 702, 703, 704, 705, 706, 707, 708, 709, 710, 711, 712, 713, 714, 715, 716, 717, 718, 719, 720, 721, 722, 723, 724, 725, 726, 727, 728, 729, 730, 731, 732, 733, 734, 735, 736, 737, 738, 739, 740, 741, 742, 743, 744, 745, 746, 747, 748, 749, 750, 751, 752, 753, 754, 755, 756, 757, 758, 759, 760, 761, 762, 763, 764, 765, 766, 767, 768, 769, 770, 771, 772, 773, 774, 775, 776, 777, 778, 779, 780, 781, 782, 783, 784, 785, 786, 787, 788, 789, 790, 791, 792, 793, 794, 795, 796, 797, 798, 799, 800, 801, 802, 803, 804, 805, 806, 807, 808, 809, 810, 811, 812, 813, 814, 815, 816, 817, 818, 819, 820, 821, 822, 823, 824, 825, 826, 827, 828, 829, 830, 831, 832, 833, 834, 835, 836, 837, 838, 839, 840, 841, 842, 843, 844, 845, 846, 847, 848, 849, 850, 851, 852, 853, 854, 855, 856, 857, 858, 859, 860, 861, 862, 863, 864, 865, 866, 867, 868, 869, 870, 871, 872, 873, 874, 875, 876, 877, 878, 879, 880, 881, 882, 883, 884, 885, 886, 887, 888, 889, 890, 891, 892, 893, 894, 895, 896, 897, 898, 899, 900, 901, 902, 903, 904, 905, 906, 907, 908, 909, 910, 911, 912, 913, 914, 915, 916, 917, 918, 919, 920, 921, 922, 923, 924, 925, 926, 927, 928, 929, 930, 931, 932, 933, 934, 935, 936, 937, 938, 939, 940, 941, 942, 943, 944, 945, 946, 947, 948, 949, 950, 951, 952, 953, 954, 955, 956, 957, 958, 959, 960, 961, 962, 963, 964, 965, 966, 967, 968, 969, 970, 971, 972, 973, 974, 975, 976, 977, 978, 979, 980, 981, 982, 983, 984, 985, 986, 987, 988, 989, 990, 991, 992, 993, 994, 995, 996, 997, 998, 999, 1000.

Н	д	д	д	д	д	д	д
1	100	15.20	100	15.20	100	15.20	100
2	100	15.20	100	15.20	100	15.20	100

Табела 1: преглед одступања темеља

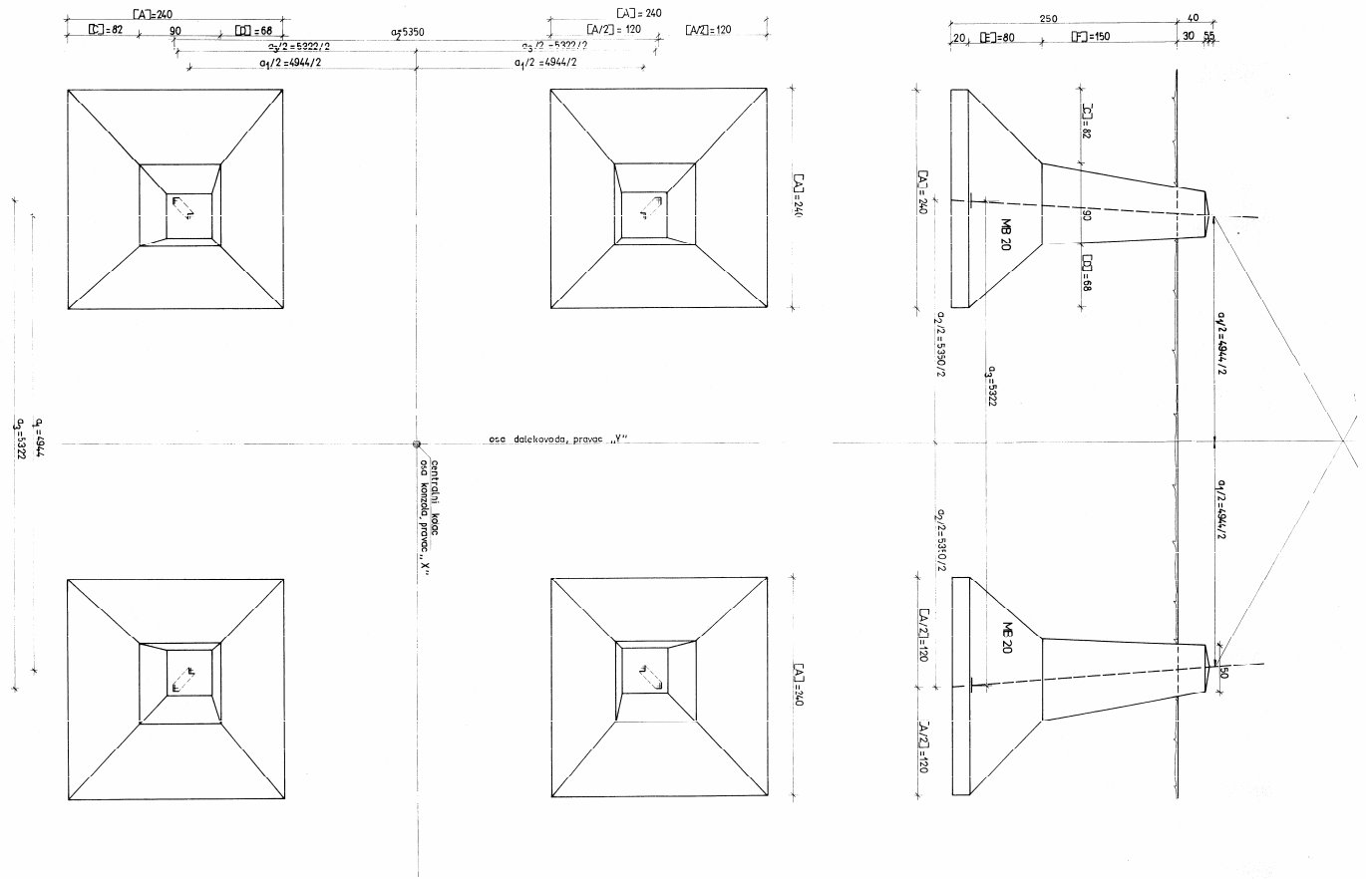
Н	д	д	д	д	д	д	д
1	100	15.20	100	15.20	100	15.20	100
2	100	15.20	100	15.20	100	15.20	100

Табела 2: преглед симерне темеља

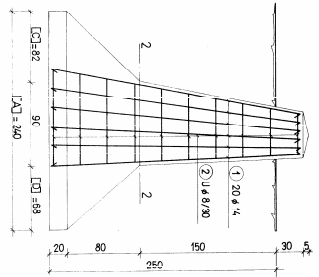
Увела	напомена	Н-1	Н-2	Н-3	Н-4	Н-5	Н-6
1	Број земље (м ²)	4.172	4.282	4.392	4.502	4.612	4.722
2	Напомена земље (м ²)	4.172	4.282	4.392	4.502	4.612	4.722
3	Однос земље (м ²)	4.172	4.282	4.392	4.502	4.612	4.722
4	Време чекања (с)	4.172	4.282	4.392	4.502	4.612	4.722
5	Амплитуда сигнала (В)	4.172	4.282	4.392	4.502	4.612	4.722

Преглед напомена за 1. слику

IN FORTIOR
 СИСТЕМИ ЗА ЗАШТИТУ ОД ПОЖАРА
 У ПУНОМ СЕРВИСУ
 Контакт: 011 261 1111
 Веб: www.infortior.rs
 Адреса: Београд, Београдска 1111



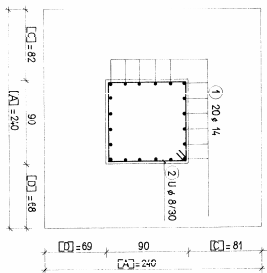
ДЕТАЉ ДИЈЕЛОВА ТЕМЕЦА



ТАБЕЛАРНИ ПРЕГЛЕД ДИМЕНЗИЈЕ ТЕМЕЦА

R[Ω]	H=12,0 - 20,0 m		H=22,5 - 30,0 m	
	G=100	G=150	G=100	G=150
A	230	160	240	190
B	230	160	240	190
C	77	57	82	57
D	63	43	65	43
E	80	80	80	80
F	150	150	150	150

ПРЕГЛЕД 2-2



НАПОМЕНА:

Испитни примерци одговарајуће температуре израђени су од бетона класе B20, G=100kN/m².

H	G=100kN/m²		G=150-200kN/m²	
	Q ₁	Q ₂	Q ₁	Q ₂
12,0	3124	3930	3124	3930
15,0	3424	3980	3424	3980
18,0	3684	4080	3684	4080
20,0	3944	4180	3944	4180
22,5	4244	4280	4244	4280
25,0	4544	4380	4544	4380
27,5	4844	4480	4844	4480
30,0	5144	4580	5144	4580

ИЗВОД АРМУАТУРЕ ЗА 1 ТЕМЕЦА 6240/390

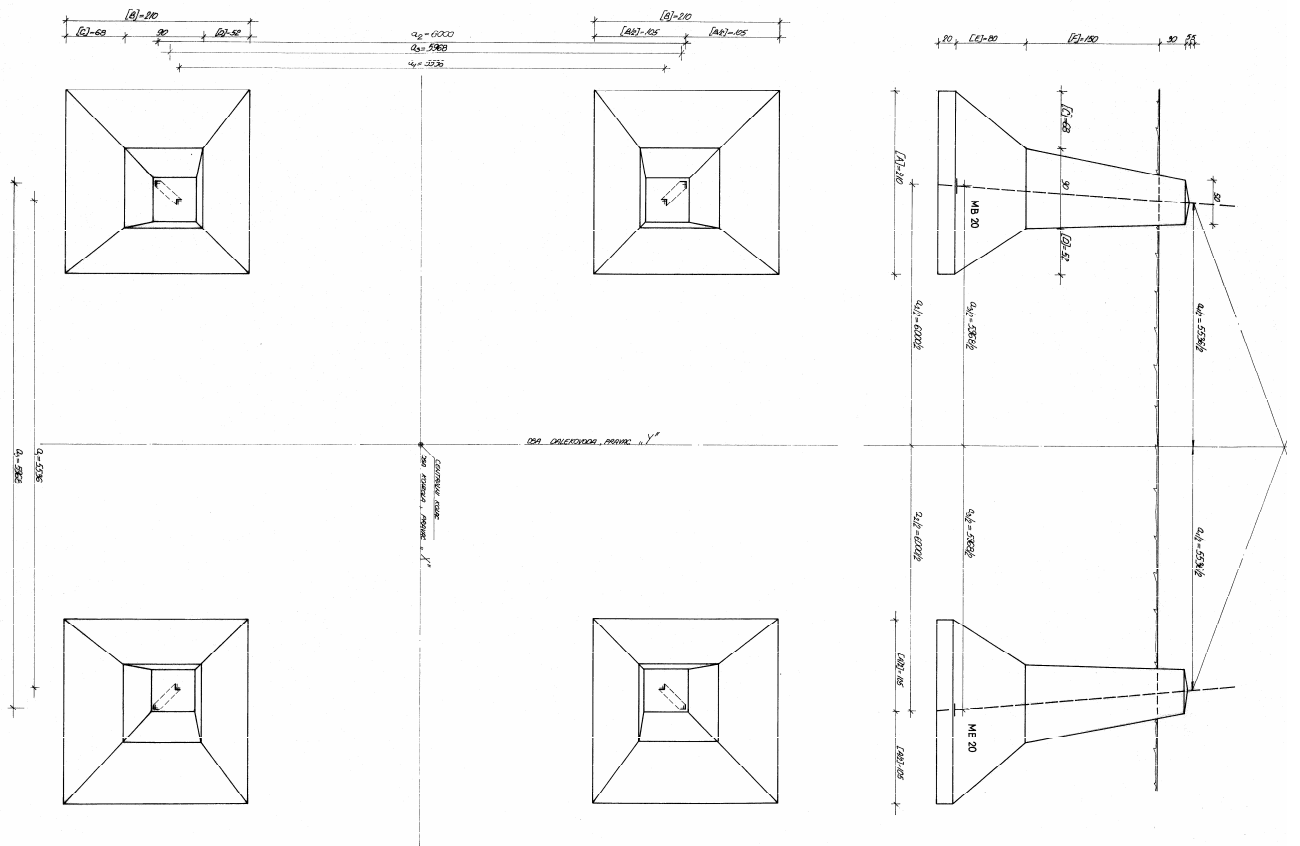
POZ.	ОБЈЕКАТ	φ	n	g	l	g	Eg
		mm	kom	cm	m	kg/m	kg
1	15-273-277	5	14	20	395	610	1208
2	10-10	8	10	312	312	0,395	1232
		Укупно до 1 темца				6100	

ПРЕДМЕР РАДОВА ЗА 1 СТЕБ

WSTZ RAČUNA	H=12,0 - 20,0 m		H=22,5 - 30,0 m	
	G=100kN/m²	G=150-200kN/m²	G=100kN/m²	G=150kN/m²
1	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,00	1,00	1,00	1,00
3	1,00	1,00	1,00	1,00
4	1,00	1,00	1,00	1,00
5	1,00	1,00	1,00	1,00

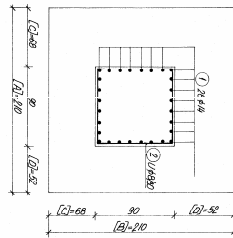
NO ELEKTROSTIK
 ОДЛУКА О РАДОВИМА НА ПОСРЕДСТВУ
 ОДЛУКА О РАДОВИМА НА ПОСРЕДСТВУ

Клијент:	Служба за пројекат	Датум:	01.10.14
Извршилац:	ИПЗ ЗЕМЉИШТИЦА	Место:	Београд
Пројекат:	Пројекат уземљивача	Својина:	Град Београд
Датум:	01.10.14	Место:	Београд
Извршилац:	ИПЗ ЗЕМЉИШТИЦА	Својина:	Град Београд
Пројекат:	Пројекат уземљивача	Својина:	Град Београд
Датум:	01.10.14	Место:	Београд
Извршилац:	ИПЗ ЗЕМЉИШТИЦА	Својина:	Град Београд

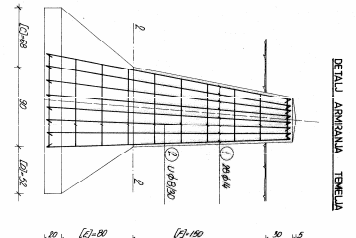


IZNOD ARMATURE ZA 1 TEMELJ

POZ.	OLJK	d	n	lg	lg	g	lg	
1	173-177	4	20	305	854	1708	724,68	
2		8	10 <td>3/2</td> <td>5/12</td> <td>0,115</td> <td>0,18</td>	3/2	5/12	0,115	0,18	
ukupno za 1 temelj								0,1670



PRESEK 2-2



ИЗНОМЕНА:
 првобитни пресеци 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332, 333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 380, 381, 382, 383, 384, 385, 386, 387, 388, 389, 390, 391, 392, 393, 394, 395, 396, 397, 398, 399, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 429, 430, 431, 432, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 439, 440, 441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452, 453, 454, 455, 456, 457, 458, 459, 460, 461, 462, 463, 464, 465, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 472, 473, 474, 475, 476, 477, 478, 479, 480, 481, 482, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 492, 493, 494, 495, 496, 497, 498, 499, 500, 501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516, 517, 518, 519, 520, 521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530, 531, 532, 533, 534, 535, 536, 537, 538, 539, 540, 541, 542, 543, 544, 545, 546, 547, 548, 549, 550, 551, 552, 553, 554, 555, 556, 557, 558, 559, 560, 561, 562, 563, 564, 565, 566, 567, 568, 569, 570, 571, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 579, 580, 581, 582, 583, 584, 585, 586, 587, 588, 589, 590, 591, 592, 593, 594, 595, 596, 597, 598, 599, 600, 601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610, 611, 612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619, 620, 621, 622, 623, 624, 625, 626, 627, 628, 629, 630, 631, 632, 633, 634, 635, 636, 637, 638, 639, 640, 641, 642, 643, 644, 645, 646, 647, 648, 649, 650, 651, 652, 653, 654, 655, 656, 657, 658, 659, 660, 661, 662, 663, 664, 665, 666, 667, 668, 669, 670, 671, 672, 673, 674, 675, 676, 677, 678, 679, 680, 681, 682, 683, 684, 685, 686, 687, 688, 689, 690, 691, 692, 693, 694, 695, 696, 697, 698, 699, 700, 701, 702, 703, 704, 705, 706, 707, 708, 709, 710, 711, 712, 713, 714, 715, 716, 717, 718, 719, 720, 721, 722, 723, 724, 725, 726, 727, 728, 729, 730, 731, 732, 733, 734, 735, 736, 737, 738, 739, 740, 741, 742, 743, 744, 745, 746, 747, 748, 749, 750, 751, 752, 753, 754, 755, 756, 757, 758, 759, 760, 761, 762, 763, 764, 765, 766, 767, 768, 769, 770, 771, 772, 773, 774, 775, 776, 777, 778, 779, 780, 781, 782, 783, 784, 785, 786, 787, 788, 789, 790, 791, 792, 793, 794, 795, 796, 797, 798, 799, 800, 801, 802, 803, 804, 805, 806, 807, 808, 809, 810, 811, 812, 813, 814, 815, 816, 817, 818, 819, 820, 821, 822, 823, 824, 825, 826, 827, 828, 829, 830, 831, 832, 833, 834, 835, 836, 837, 838, 839, 840, 841, 842, 843, 844, 845, 846, 847, 848, 849, 850, 851, 852, 853, 854, 855, 856, 857, 858, 859, 860, 861, 862, 863, 864, 865, 866, 867, 868, 869, 870, 871, 872, 873, 874, 875, 876, 877, 878, 879, 880, 881, 882, 883, 884, 885, 886, 887, 888, 889, 890, 891, 892, 893, 894, 895, 896, 897, 898, 899, 900, 901, 902, 903, 904, 905, 906, 907, 908, 909, 910, 911, 912, 913, 914, 915, 916, 917, 918, 919, 920, 921, 922, 923, 924, 925, 926, 927, 928, 929, 930, 931, 932, 933, 934, 935, 936, 937, 938, 939, 940, 941, 942, 943, 944, 945, 946, 947, 948, 949, 950, 951, 952, 953, 954, 955, 956, 957, 958, 959, 960, 961, 962, 963, 964, 965, 966, 967, 968, 969, 970, 971, 972, 973, 974, 975, 976, 977, 978, 979, 980, 981, 982, 983, 984, 985, 986, 987, 988, 989, 990, 991, 992, 993, 994, 995, 996, 997, 998, 999, 1000.

TABELARNI PREGLED ODSJETAJAMA TEMELJA

H	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50
n	5	5	5	5	5	5	5	5	5
h	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₁	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₂	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₃	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₄	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₅	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₆	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₇	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₈	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₉	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₁₀	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₁₁	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₁₂	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₁₃	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₁₄	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₁₅	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₁₆	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₁₇	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₁₈	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₁₉	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₂₀	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₂₁	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₂₂	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₂₃	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₂₄	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₂₅	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₂₆	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₂₇	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₂₈	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₂₉	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₃₀	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₃₁	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₃₂	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₃₃	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₃₄	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₃₅	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₃₆	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₃₇	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₃₈	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₃₉	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₄₀	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₄₁	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₄₂	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₄₃	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₄₄	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₄₅	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₄₆	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₄₇	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₄₈	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₄₉	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₅₀	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₅₁	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₅₂	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₅₃	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₅₄	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₅₅	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₅₆	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₅₇	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₅₈	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₅₉	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₆₀	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₆₁	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₆₂	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₆₃	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₆₄	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₆₅	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₆₆	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₆₇	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₆₈	5	10	15	20	25	30	35	40	45
h ₆₉	5	10	15	20</					

ПРИЛОГ Б – Методе из референце [36] за израчунавање отпорности распростирања сложених уземљивачких система

У референци [36] дате су две методе за израчунавање отпорности распростирања сложених уземљивачких система, које се могу употребити за израчунавање теоријске (базне) вредности отпорности распростирања, R_0 , сложеног уземљивачког система приказаног на сл. 5.1. Једна од њих је аналитичка (Метода Б.1), а друга полунумеричка (Метода Б.2). Модификацијом формула добијених Методом Б.1 за израчунавање вредности R_0 , добијају се формуле које се могу применити за израчунавање укупне отпорности распростирања разматраног уземљивача, R_T .

Б.1 – Аналитичка метода

Б.1.1 Примена Методе Б.1 за прорачун базне (теоријске) отпорности распростирања уземљивачког система приказаног на слици 5.1

Према Методи Б.1 предложеној у референци [36], било који сложени уземљивачки систем може да се апроксимира помоћу масивне „електроде“ која обавија све компоненте уземљивачког система и обухвата цео простор изнад њега, све до површине тла (први члан у изразима (Б.1)–(Б.3) у разматраном случају). Чињеница да ће отпорност распростирања уземљивача састављеног од било какве мреже проводника (трака), који заузима исту запремину тла као еквивалентна масивна „електрода“, бити већи у случају мреже проводника него ако се употреби масивна „електрода“ уважена је помоћу другог члана у изразима (Б.1)–(Б.3). Употребом полазног система једначина 11.8–11.13 и табеле 11.1 из референце [36], могу се извести формуле за израчунавање отпорности распростирања уземљивача практично свих структура и облика који се користе у пракси.

За квадратну контуру чија је страница дужине L , а обим попречног пресека трака p , положену на дубини h у униформно тло специфичне отпорности ρ ,

теоријска (базна) вредност отпорности распрострањања, R_{0KK} , може се израчунати помоћу следеће формуле (која је изведена описаним поступком):

$$R_{0KK} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\sqrt{\frac{2}{L^2 + 2h^2}} \ln \left(\frac{17(L^2 + 2h^2)}{2L(L+4h)} \right) + \frac{1}{4L} \ln \left(\frac{L+4h}{8p} \right) \right). \quad (\text{Б.1})$$

Ако се уземљивачки систем састоји од само 4 галвански спојене доње контуре са сл. 5.1, његова теоријска отпорност распрострањања, R_{04DK} , може се израчунати помоћу следеће формуле:

$$R_{04DK} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\sqrt{\frac{2}{L_1^2 + 2h_2^2}} \ln \left(\frac{17(L_1^2 + 2h_2^2)}{2L_1(L_1 + 4h_2)} \right) + \frac{1}{16sL_1} \ln \left(\frac{L_1 + 4h_2}{32ps} \right) \right). \quad (\text{Б.2})$$

Теоријска отпорност распрострањања целог уземљивачког система са сл. 5.1, R_{0US} , може се израчунати помоћу следеће формуле:

$$R_{0US} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\sqrt{\frac{2}{L_1^2 + 2h_2^2}} \ln \left(\frac{17(L_1^2 + 2h_2^2)}{2L_1(L_1 + 4h_2)} \right) + \frac{1}{4L_1(1+4s)} \ln \left(\frac{L_1 + 4h_2}{8p(1+4s)} \right) \right). \quad (\text{Б.3})$$

Уколико се цео сложени уземљивачки систем са сл. 5.1 апроксимира масивном „електродом“ која обавија све компоненте уземљивачког система (заједно са темељним уземљивачима и челичним тракама које спајају контуре) и обухвата цео простор изнад њега, све до површине тла, његова теоријска отпорност распрострањања, R_{0ME} , може се израчунати помоћу следеће формуле:

$$R_{0ME} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\sqrt{\frac{2}{L_1^2 + 2h_2^2}} \ln \left(\frac{17(L_1^2 + 2h_2^2)}{2L_1(L_1 + 4h_2)} \right) \right). \quad (\text{Б.4})$$

Б.1.2 Модификоване формуле за прорачун укупне отпорности распрострањања, R_T , уземљивачког система приказаног на слици 5.1

Иако формуле (Б.1)–(Б.3) нису иницијално биле намењене израчунавању укупне отпорности распрострањања, R_T , уземљивачког система приказаног на слици 5.1, положеног у тло које формира несавршен контакт са електродама уземљивача, њихов други члан може се модификовати тако да оне послуже и овој

сврси. Једноставним увођењем параметра F , формуле (Б.1)–(Б.3) постају редом (Б.5)–(Б.7):

$$R_{\text{ТКК}} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\sqrt{\frac{2}{L^2 + 2h^2}} \ln \left(\frac{17(L^2 + 2h^2)}{2L(L+4h)} \right) + \frac{1}{4L} \cdot \frac{100}{100-F} \ln \left(\frac{L+4h}{8\rho} \cdot \frac{100}{100-F} \right) \right), \quad (\text{Б.5})$$

$$R_{\text{Т4ДК}} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\sqrt{\frac{2}{L_1^2 + 2h_2^2}} \ln \left(\frac{17(L_1^2 + 2h_2^2)}{2L_1(L_1 + 4h_2)} \right) + \frac{1}{16sL_1} \cdot \frac{100}{100-F} \ln \left(\frac{L_1 + 4h_2}{32ps} \cdot \frac{100}{100-F} \right) \right), \text{ и} \quad (\text{Б.6})$$

$$R_{\text{ТUS}} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\sqrt{\frac{2}{L_1^2 + 2h_2^2}} \ln \left(\frac{17(L_1^2 + 2h_2^2)}{2L_1(L_1 + 4h_2)} \right) + \frac{1}{4L_1(1+4s)} \cdot \frac{100}{100-F} \ln \left(\frac{L_1 + 4h_2}{8\rho(1+4s)} \cdot \frac{100}{100-F} \right) \right). \quad (\text{Б.7})$$

Б.2 – Полунумеричка метода

Друга метода из референце [36] базирана је на формирању $[R]_{n \times n}$ матрице (n је број елемената сложеног уземљивачког система), која садржи вредности сопствених и међусобних отпорности елемената уземљивача (R_{ij} , $i, j = \overline{1, n}$).

Треба нагласити да је матрица $[R]$ симетрична ($R_{ij} = R_{ji}$, $i, j = \overline{1, n}$).

Примењује се следећа матрична једначина:

$$[R]^{-1} \cdot [\varphi] = [I] \quad (\text{Б.8})$$

у којој су:

$[\varphi]_{n \times 1}$ вектор вредности електричног потенцијала елемената уземљивача, $\varphi_i = \varphi$ ($i = \overline{1, n}$), и

$[I]_{n \times 1}$ вектор вредности јачина струја, I_j ($j = \overline{1, n}$), које елементи уземљивача одводе у околно тло.

Укупна јачина струје I (која се успоставља између комплетног уземљивача и околног тла) рачуна се као

$$I = \sum_{j=1}^n I_j . \quad (\text{Б.9})$$

Теоријска отпорност распростирања уземљивача, R_0 , може се једноставно израчунати као однос задатог електричног потенцијала електрода уземљивача ($\varphi = 200 \text{ V}$ у разматраном случају) и укупне јачине струје, I .

Уколико се уземљивачки систем састоји од само 4 галвански спојене доње контуре са сл. 5.1, може се формирати матрица $[R]_{4 \times 4}$, означавајући сваку од доњих контура бројевима од 1 до 4 у смеру казаљке на сату, и спровести процедура за одређивање вредности $R_{04\text{DK}}$. Применом процедуре из референце [36], вредности свих сопствених отпорности R_{ii} ($i = \overline{1, 4}$), које у разматраном случају имају исту вредност, рачунају се убацивањем познатих улазних параметара (ρ , $L_2 = s \cdot L_1$, h_2 и p) у (Б.1). Вредности међусобних отпорности рачунају се помоћу следеће две формуле:

$$R_{12} = R_{14} = R_{23} = R_{34} = \frac{\rho}{2(L_1 - L_2)\pi} = \frac{\rho}{2L_1(1-s)\pi}, \text{ и} \quad (\text{Б.10})$$

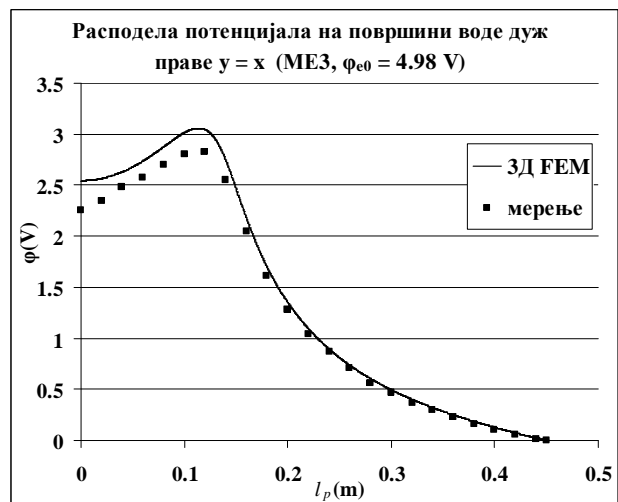
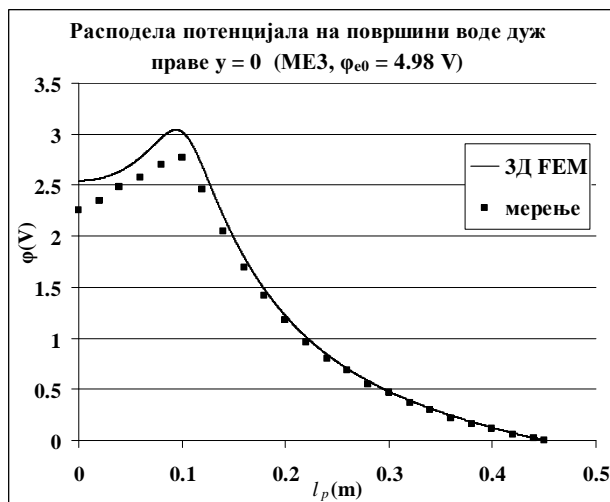
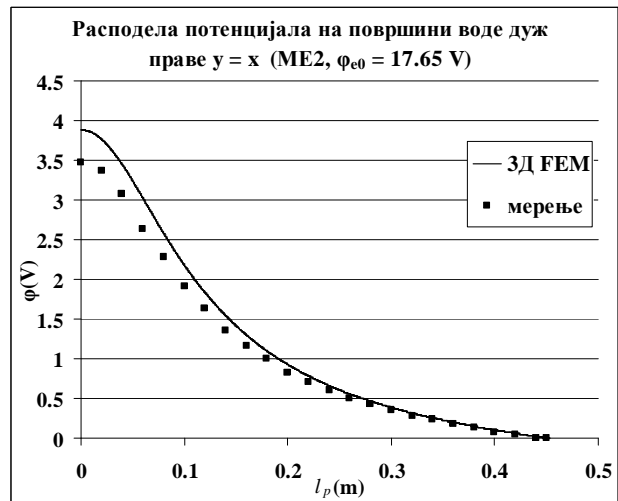
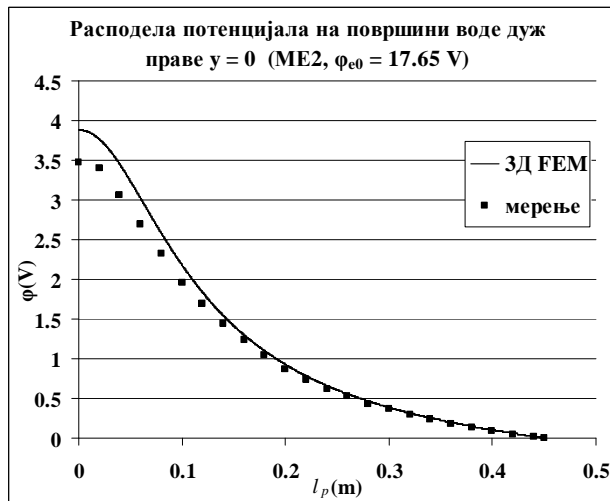
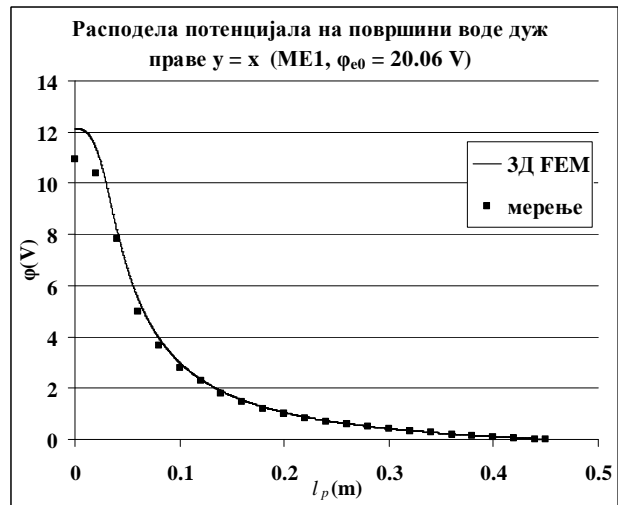
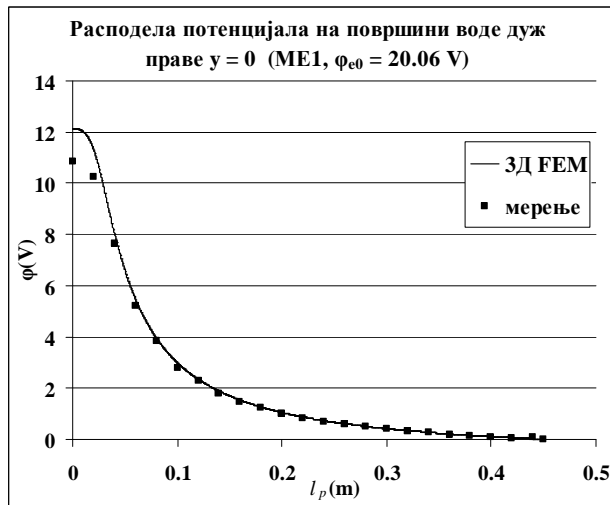
$$R_{13} = R_{24} = \frac{\sqrt{2}\rho}{4(L_1 - L_2)\pi} = \frac{\sqrt{2}\rho}{4L_1(1-s)\pi}. \quad (\text{Б.11})$$

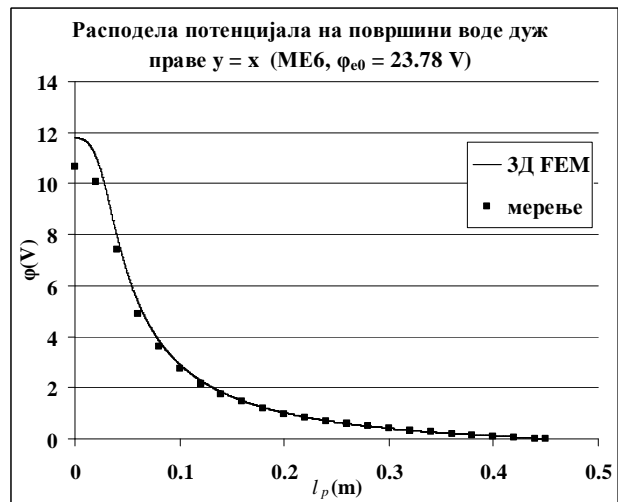
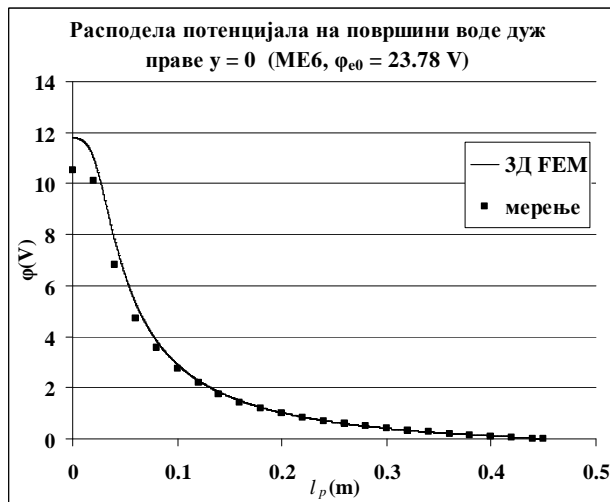
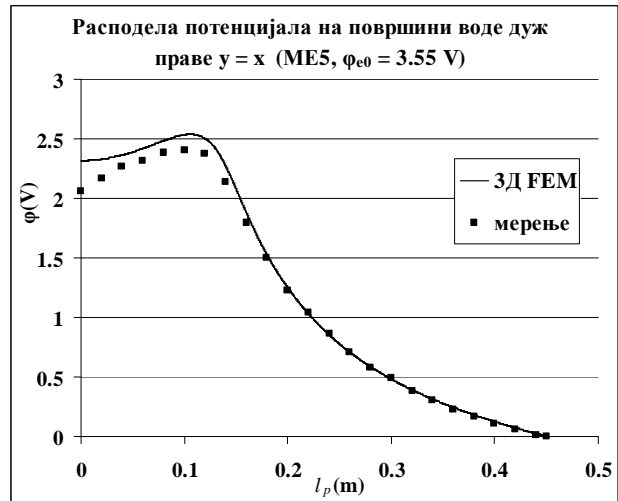
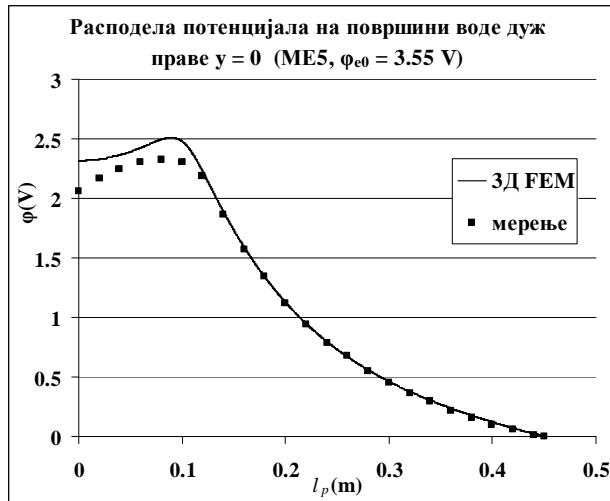
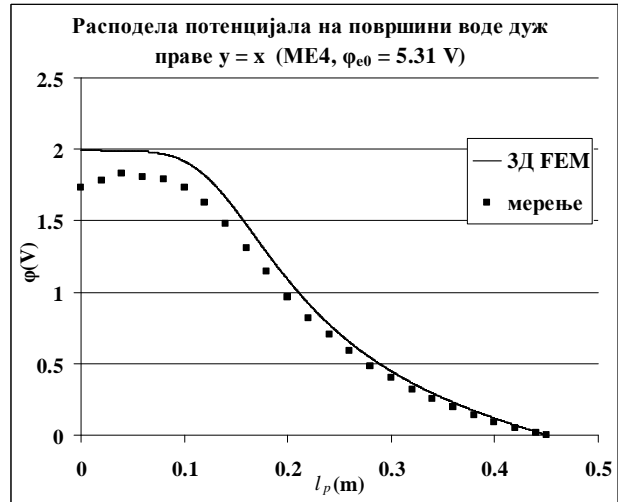
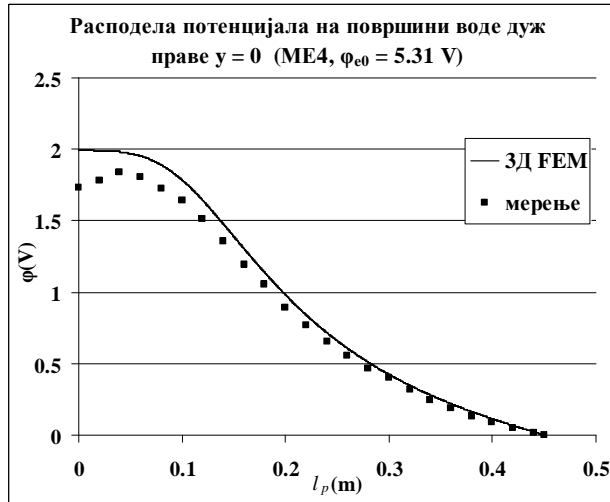
Теоријска отпорност распростирања целог уземљивачког система са сл. 5.1, $R_{0\text{US}}$, може се израчунати применом исте процедуре, формирањем матрице $[R]_{5 \times 5}$ (горња контура је означена бројем 5). За $i, j = \overline{1, 4}$ све вредности R_{ij} исте су као у претходном случају. Сопствена отпорност R_{55} рачуна се убацивањем познатих улазних параметара (ρ , L_1 , h_1 и p) у (Б.1). Вредности свих међусобних отпорности R_{i5} ($i = \overline{1, 4}$) исте су и рачунају се помоћу формуле:

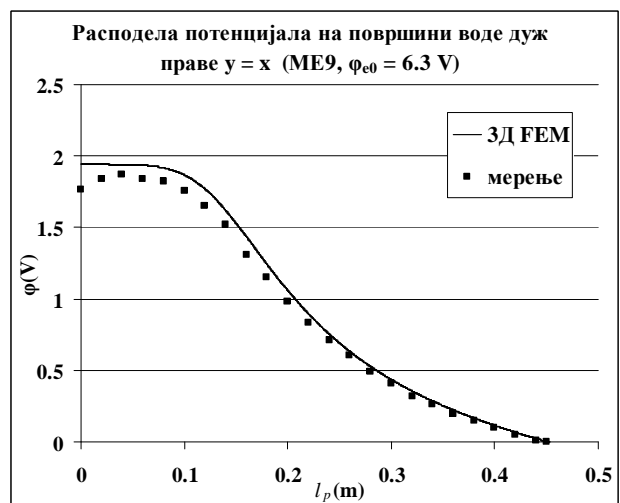
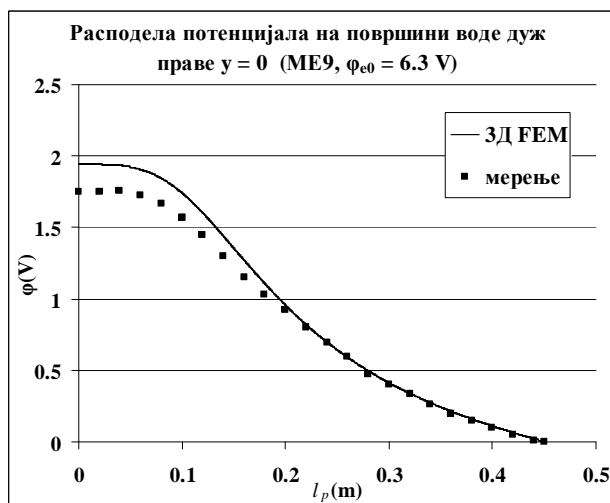
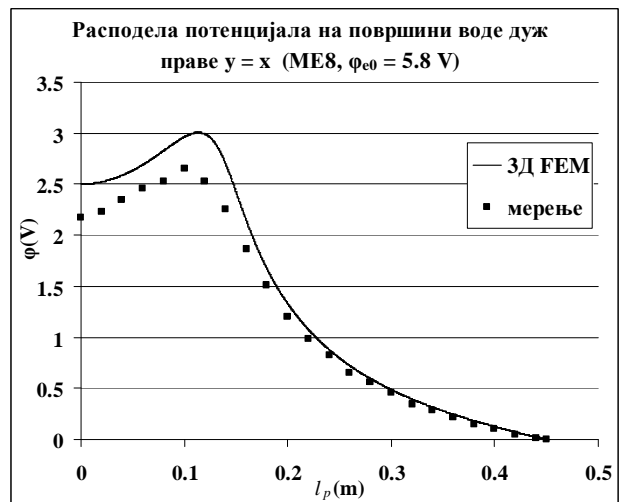
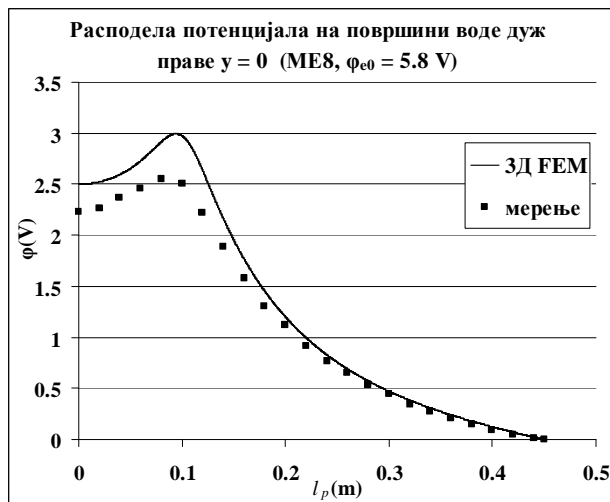
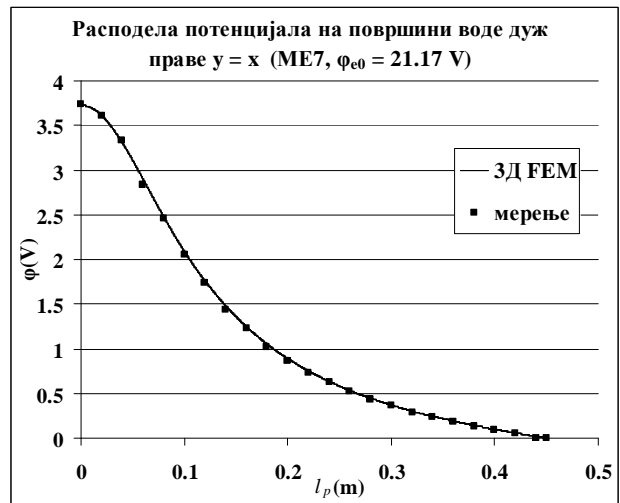
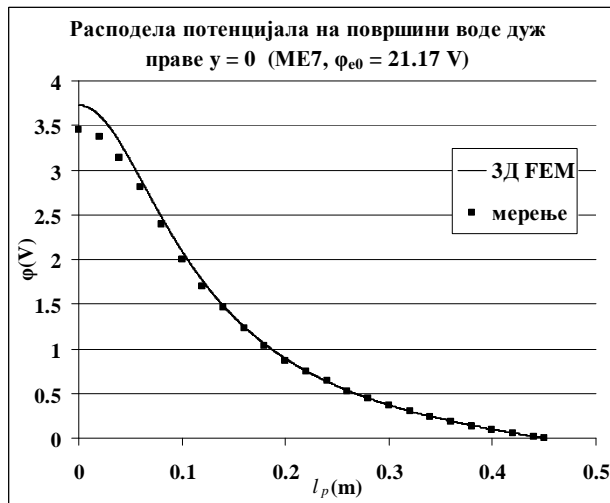
$$R_{i5} = \frac{\sqrt{2}\rho}{2(L_1 - L_2)\pi} = \frac{\sqrt{2}\rho}{2L_1(1-s)\pi}. \quad (\text{Б.12})$$

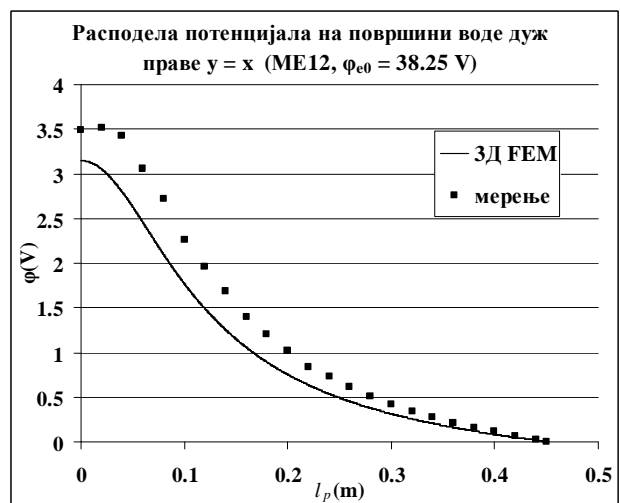
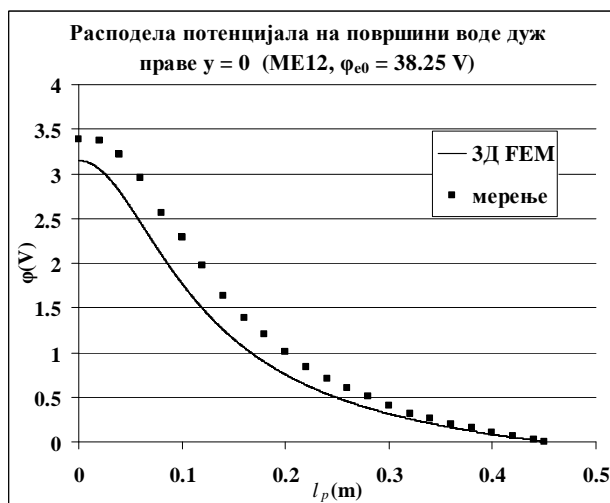
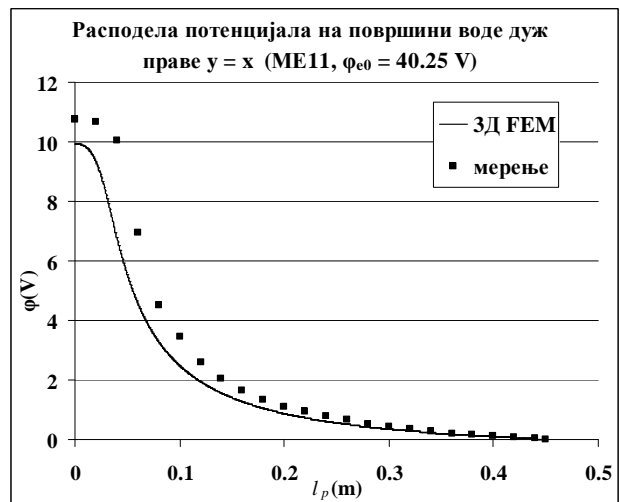
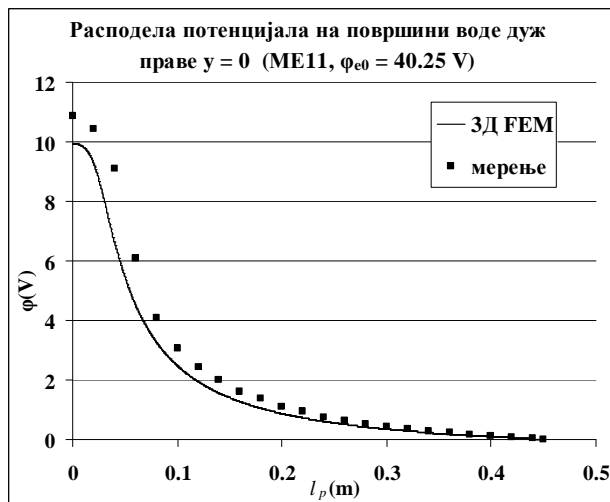
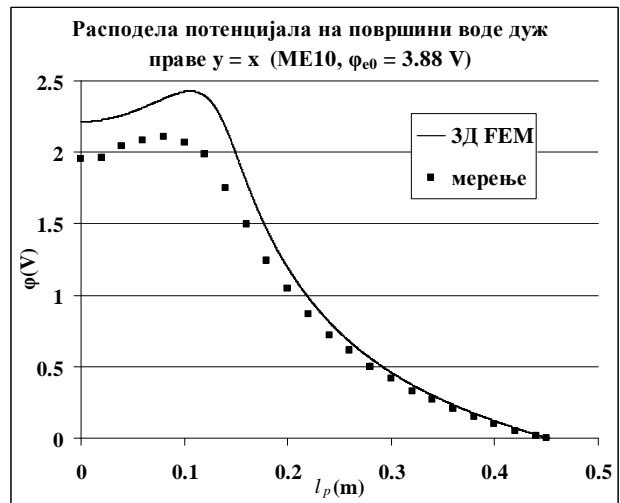
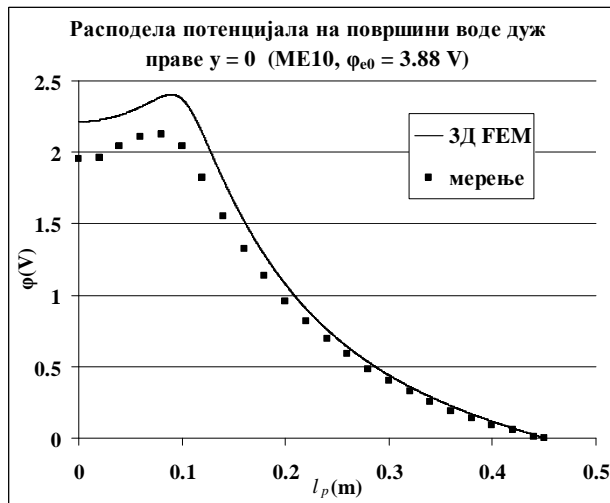
ПРИЛОГ В – Графици расподеле потенцијала на површини воде у електролитичкој кади

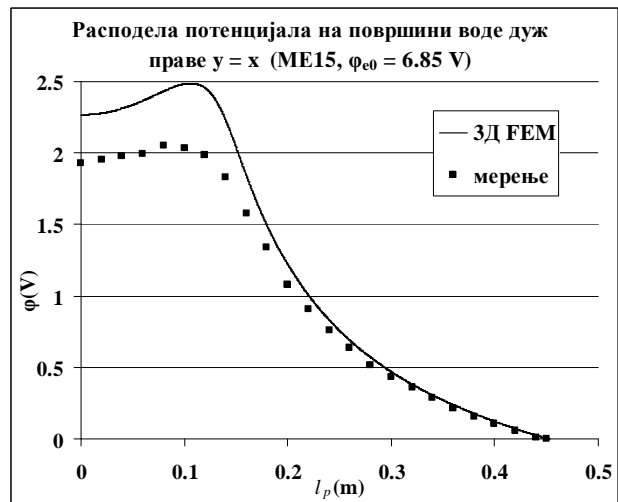
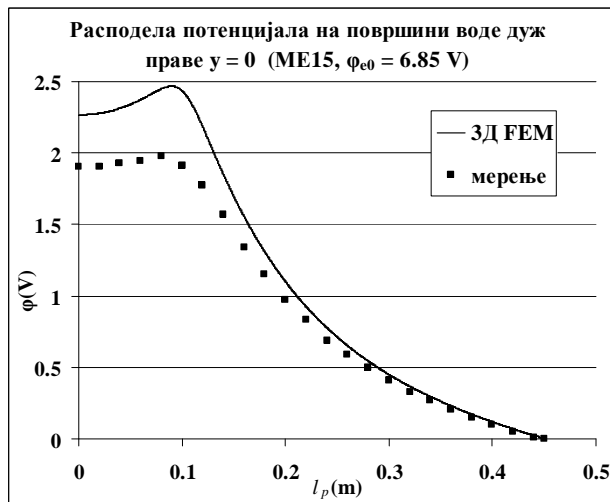
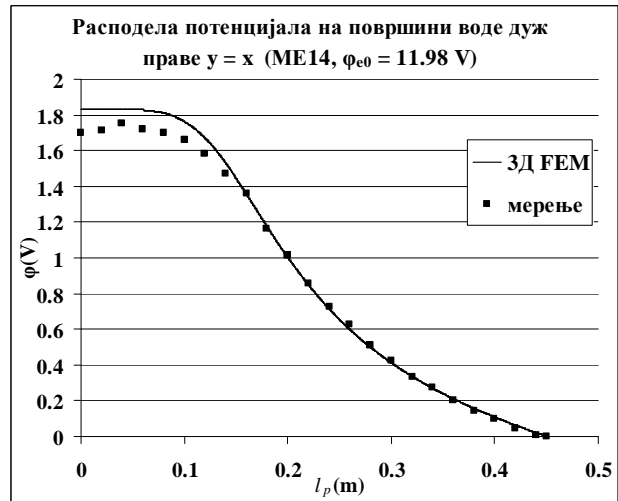
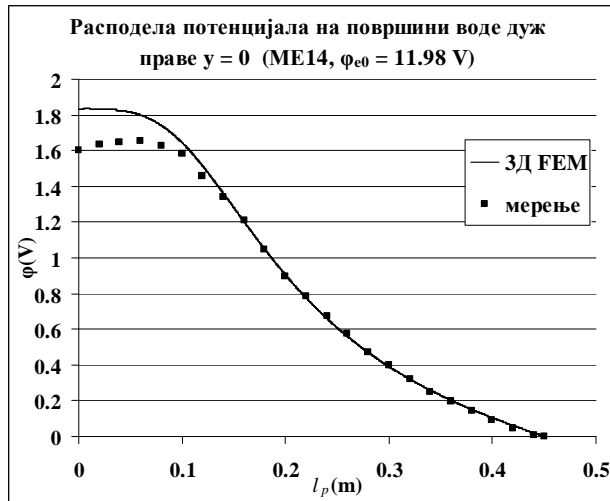
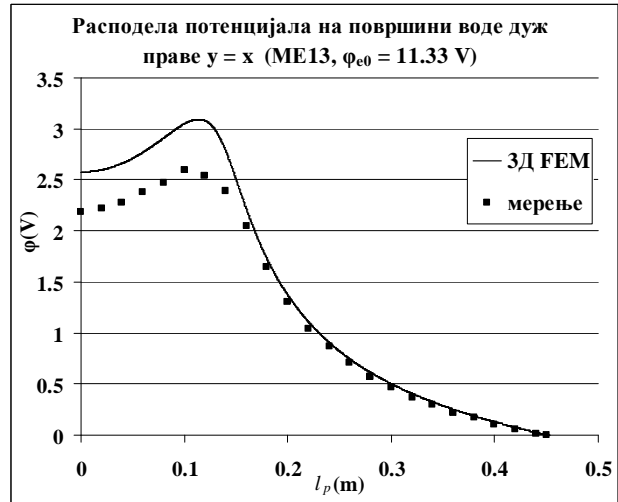
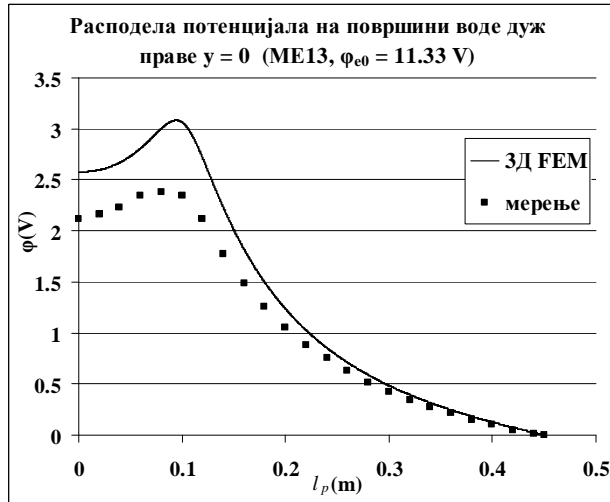
У овом Прилогу упоредно су приказани графици расподеле потенцијала, $\varphi(V)$, на површини воде у електролитичкој кади, добијени експерименталним мерењима и 3Д FEM симулацијама, за сваки од 15 разматраних жичаних модела (модели ME1–ME15, табела 7.2). За сваки од разматраних модела, расподела потенцијала је одређивана за два правца који припадају равни површине воде ($y = 0$ и $y = x$, где је координатни почетак у тачки пресека вертикалне осе каде и површине воде, односно у тачки кроз коју пролази централна лакирана бакарна жица модела, док x и y представљају осе координатног система дефинисане тако да буду паралелне страницама квадратних контура жичаних модела). Са l_p је означено растојање тачке од координатног почетка дуж полупречника горње базе воденог цилиндра формираног бакарном кадом ($l_p = 0 - 0,45$ m). У наслову сваког дијаграма, поред ознаке која показује на који модел се односе графички приказане расподеле електричних потенцијала на површини воде, за сваки од разматраних жичаних модела дата је и вредност електричног потенцијала φ_{e0} , на који је током експеримента довођен разматрани жичани модел. Вредности електричних потенцијала добијене мерењима на дијаграмима су означене црним квадратима, док су оне добијене 3Д FEM симулацијама представљене континуалним линијама.











БИОГРАФИЈА АУТОРА

Јован Трифуновић је рођен 15.02.1979. године у Београду. Основну школу и гимназију завршио је у Смедереву. Електротехнички факултет у Београду (Енергетски одсек) уписао је 1997. године. Дипломирао је 2003. године на смеру Електроенергетски системи, са просечном оценом 8,68 (од стране Електротехничког факултета школске 2002/03. године награђен је као студент који је дипломирао са највећом просечном оценом на Енергетском одсеку). Постдипломске студије на Електротехничком факултету у Београду, смер Алтернативни извори енергије, уписао је 2003. године, положио све испите са просечном оценом 10, и 2009. године одбранио магистарску тезу под насловом „Технички, економски и еколошки фактори који утичу на дефинисање оптималне стратегије за масовно увођење компактних флуоресцентних извора светлости у Србији“. Рад на докторској дисертацији на Електротехничком факултету у Београду започео је 2010. године, а 2012. године прихваћена му је тема докторске дисертације под насловом „Методологија за уважавање несавршеног контакта између електрода и тла при прорачуну отпорности распрострања контурних уземљивача“. Стручни испит за област Енергетска ефикасност зграда положио је 2014. године.

Од 2003. године био је ангажован на Електротехничком факултету у Београду, најпре као истраживач-стипендиста, на пројектима Министарства науке и заштите животне средине „Импулсна плазма – технолошки и еколошки напредак у производњи“ и „Систем за контролу и управљање јавном расветом“. Од 01.09.2005. године ради као асистент-приправник (од 08.09.2009. године као асистент, а од 25.09.2015. године као виши лабораторијски инжењер) на катедри за Енергетске претвараче и погоне. Учествоје у извођењу рачунских и лабораторијских вежби из предмета: Електроенергетске инсталације ниског напона, Електричне инсталације ниског напона 2, Електротермија и Термички процеси у електроенергетици. У претходним годинама учествовао је у реализацији великог броја научноистраживачких и стручних пројеката и аутор/коаутор је двадесет три објављена научна рада и два техничка решења.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани Јован Трифуновић

број индекса (по старом програму је)

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

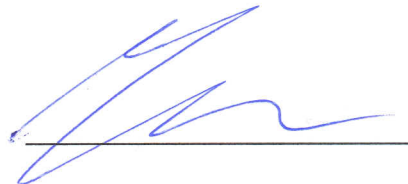
Методологија за уважавање несавршеног контакта између електрода и тла

при прорачуну отпорности распрострања контурних уземљивача

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 28.12.2015.



Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Јован Трифуновић

Број индекса _____ (по старом програму је)

Студијски програм Електротехника и рачунарство

Наслов рада Методологија за уважавање несавршеног контакта између
електрода и тла при прорачуну отпорности распростирања контурних
уземљивача

Ментор проф. др. Миомир Костић

Потписани Јован Трифуновић

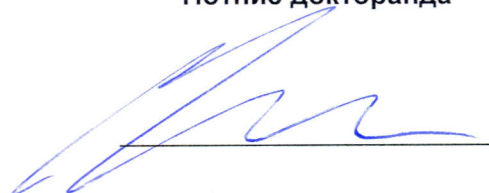
Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања 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.

Потпис докторанда

У Београду, 28.12.2015.



Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Методологија за уважавање несавршеног контакта између електрода и тла

при прорачуну отпорности распрострањања контурних уземљивача

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 28.12.2015.



1. Ауторство - Дозвољавање 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. Дозвољавање 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 прераде. Дозвољавање 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. Дозвољавање 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 прераде. Дозвољавање 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. Дозвољавање 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.