

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

маг. инж. Росица Филчева Димитрова

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЪЛНОВИ ПРОЦЕСИ В
ЗАЗЕМИТЕЛНИ ИНСТАЛАЦИИ НА
ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНИ ОБЕКТИ**

АВТОРЕФЕРАТ

**на дисертация за получаване на образователна и
научна степен “доктор”**

**по докторска програма „Електроенергийни системи“ към
професионално направление 5.4. Енергетика**

Научни ръководители:

доц. д-р инж. Маргрета Парашкеванова Василева

доц. д-р инж. Маринела Йорданова Йорданова

Рецензенти:

1.
2.

Варна, 2019

Дисертационният труд е обсъден на в катедра “Електроенергетика” на катедрен съвет, съгласно заповед на Ректора на ТУ-Варна № и насочен за защита. Докторантът работи в катедра “Електроенергетика”.

Автор: маг. инж. Росица Филчева Димитрова

Заглавие: Изследване на вълнови процеси в заземителни инсталации на електроенергийни обекти

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

маг. инж. Росица Филчева Димитрова

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЪЛНОВИ ПРОЦЕСИ В
ЗАЗЕМИТЕЛНИ ИНСТАЛАЦИИ НА
ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНИ ОБЕКТИ**

АВТОРЕФЕРАТ

**на дисертация за получаване на образователна и
научна степен “доктор”**

Варна, 2019

Дисертационният труд съдържа 154 страници, включително 80 фигури, 34 таблици, и 4 приложения, оформени в 4 глави, общи изводи и списък на използваната литература от 109 заглавия, от които 74 на латиница.

Защитата на дисертационния труд ще се състои наГ. ОТ.....Ч. В.....на открито заседание на жури, сформирано със заповед на Ректора № / г.

Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение на интересувашите се в Докторантския център, стая 318 НУК.

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

АКТУАЛНОСТ НА ПРОБЛЕМА:

Изграждането на заземителни инсталации (ЗИ) в електроенергийните обекти (ЕЕО) е задължително с цел осигуряване на нормална работа на съоръженията и безопасна работа на персонала на територията им. Важно предназначение на заземителната инсталация, заедно с мълниезащитната, е да осигури надеждна защита при пряко попадение на мълния, както за хората, така и за съоръженията в ЕЕО.

При пряк удар на мълния (ПУМ), вследствие на протичане на импулсен ток, в почвата се развиват високочестотни процеси, които влияят върху нейното специфичното обемно съпротивление (ρ_v) и диелектричната проникваемост (ϵ_r). Прецизното им определяне за съответната честота би подобрило точността при проектиране, тъй като съпротивлението на заземителите зависи линейно от ρ_v на почвата. В литературата съществуват данни за специфично обемно съпротивление и диелектрична проникваемост при различни честоти на електромагнитното поле, но не се предлага зависимост, с която да се определят при произволна честота.

ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Целта на дисертационната работа е да се разработи методика за повишаване точността при оразмеряването на ЗИ за ЕЕО при въздействие на импулсни токове.

За постигане на тази цел е необходимо да се решат следните задачи:

1. Да се проведат експериментални изследвания за определяне на зависимостите на специфичното обемно съпротивление и диелектричната проникваемост на многослойна почва от честотата на електромагнитното поле.
2. Да се направи статистическа обработка на експерименталните резултати и да се намери математическо описание на зависимостите на специфичното обемно съпротивление и на относителната диелектрична проникваемост от честотата на електромагнитното поле и от стойността им при 50 Hz.
3. Да се създаде компютърен модел на ЗИ за изследване на вълнови процеси при отчитане на двуслойния характер на почвата.
4. Да се предложи методика за определяне на максимално допирно напрежение в заземителна мрежа при протичане на импулсния ток на мълния.
5. Да се изведе израз за определяне на еквивалентното специфично съпротивление при двуслойна почва.
6. Да се направят вариантни изследвания с използването на съставения симулационен модел.

7. Да се представи обобщена методика за повишаване точността при оразмеряването на ЗИ за ЕЕО при въздействие на импулсни токове.

ОБЕКТ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

Обект на изследването са заземителни инсталации на електроенергийни обекти при осъществяване на защита срещу попадения на мълнии.

ПРЕДМЕТ И МЯСТО НА ИЗСЛЕДВАНЕ

Предмет на изследването са електрическите параметри на почва при въздействие на импулсни токове на мълния с различна стръмност на фронта на импулсната вълна и амплитуда, при отчитане на различни почвени характеристики (многослойност, плътност, влажност, структура, териториална нееднообразност).

Експерименталните изследвания в дисертационния труд са проведени върху почвени проби от района на гр. Варна, а теоретичните и симулационни изследванията на ЗИ - в Технически университет – гр. Варна.

МЕТОДИ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

За решаване на поставените задачи и постигане на целта са използвани:

- теоретични изследвания, основани на математическо моделиране;
- експериментални изследвания в лабораторни условия и компютърни симулации;
- съпоставяне на теоретичните и експериментални изследвания за сравнителен анализ и количествена оценка на точността на моделирането по отношение на основните положения в дисертационния труд.

НАУЧНА И ПРАКТИЧЕСКА НОВОСТ

1. Създадена е методика и е изведена зависимост за определяне на максималното допирно напрежение в крайна ъглова клетка на заземителна мрежа за случай на протичане на импулсен мълниев ток в произволна нейна точка въз основа на компютърен симулационен модел на мрежата;

2. Изведени са зависимости за определяне на ρ_v и ε_r на почва при произволна честота и от стойностите на ρ_v и ε_r за 50 Hz;

3. Анализирано е влиянието на конфигурацията на заземителната мрежа и двуслойния характер на почвата върху допирните напрежения;

4. Предложен е опростен метод за отчитане на двуслойна структура на почвата при определяне на максималното допирно напрежение с изведен израз;

5. Анализирано е влиянието на мястото на удара на мълнията и стръмността на фронта на импулсния ток върху допирното напрежение;

6. Създаден симулационен модел за изследване на процесите в ЗИ при въздействие на мълниев ток, приложим за произволна конфигурация и място на мълниевия удар;

7. Проведени са експериментални изследвания за влиянието на честотата върху електрическите параметри на почвата - ρ_v и ε_r ;

8. Проведен е регресионен анализ на непланиран двуфакторен експеримент за получаване на зависимостите за определяне ρ_v и ε_r на почвата от честотата и стойността на ρ_v и ε_r при 50 Hz.

РЕАЛИЗАЦИЯ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

Към настоящия момент няма внеряване на резултатите, но се водят разговори със специалисти от практиката за по-нататъшни изследвания и разширяване на статистическите данни за почвени характеристики, които могат да се използват.

АПРОБАЦИЯ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

По темата на дисертационния труд основните резултати от изследванията са докладвани и публикувани в следните международни и национални форуми с международно участие и издания:

- **Рецензирани международни списания:**
 - International Journal of Reasoning-based Intelligent Systems, Inderscience 2017, Special Issue on: ICEST'2015 Information, Communication and Energy Systems and Technologies –реферирано в SCOPUS.
- **Рецензирани международни конференции:**
 - XLVIII International scientific conference on information, communication and energy systems and technologies ICEST, 2013, Ohrid, Macedonia;
 - 2nd Conference and Working Session, International Programme EUREKA. Brno University of Technology. Czech Republic, 2014;
 - 1st International Conference “Applied Computer Technologies” ACT 2018, Ohrid: Macedonia.
- **Рецензирани национални конференции с международно участие:**
 - XVIII International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies SIELA, 2014, Bourgas, Bulgaria - реферирана в SCOPUS.
 - XIV International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems ELMA, 2015, Varna, Bulgaria.
- **Рецензирани научни издания в страната:**
 - VIII научна конференция ЕФ 2016, Годишник на Технически университет София.
 - Годишник на Техническия университет във Варна, 2013.

СТРУКТУРА И ОБЕМ НА ДИСЕРТАЦИЯТА

Дисертационният труд съдържа 154 страници, включително 80 фигури, 34 таблици, списък на използваната литература от 109 заглавия, от които 74 на латиница и 4 приложения. Основният текст е изложен на 124 страници и се състои от съдържание, списък на използваните съкращения, увод, четири глави, заключение на получените резултати, библиография и списък на публикациите по темата на дисертационния труд.

В автореферата са приети означения на фигурите и формулите, съответстващи на тези от дисертацията.

КРАТКО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР. ПОЧВЕНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ. МЕТОДИ ЗА ОТЧИТАНЕ ВЛИЯНИЕТО ИМ ПРИ ПРОЕКТИРАНЕ НА ЗАЗЕМИТЕЛНИ ИНСТАЛАЦИИ

В първа глава са разгледани различни методи за изследване на електрическите характеристики на почвата. Показани са основните съставни елементи на почвата и как нейната структура влияе върху електропроводимостта, а оттам и върху специфично обемно съпротивление и диелектричната проникваемост на почвата. Разгледано е влиянието на различните фактори като влажност, температура, вид на почвата, степен на нейната уплътненост и сезона на годината, върху електрическите параметри на почвата. Направена е литературна справка на методите за изграждане на симулационни (компютърни) модели на заземителни инсталации. Избрани са заместващи схеми на единични (хоризонтални и вертикални) и групови заземители с разпределени параметри и математически изрази, с които се определят числените стойности на параметрите на заместващите схеми.

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ПЪРВА ГЛАВА

1. Специфичното обемно съпротивление и диелектричната проникваемост на почвата зависят от честотата на електромагнитното поле и, за да се състави коректен модел на заземителна инсталация за изследване на вълнови процеси, тези параметри трябва да бъдат определени за нея. В литературата съществуват данни за специфичното обемно съпротивление и диелектрична проникваемост при различни честоти на електромагнитното поле, но не се предлага зависимост, с която да се определят при произволна честота. Най-често се срещат данни за честоти от 50 Hz.

2. Стойността на специфичното съпротивление ρ_v варира в широки граници в зависимост от вида на почвата, съдържанието на влага в нея,

температурата ѝ, съдържанието на вещества със свойства на електролити (някои минерали и соли) и сезона от годината.

3. Използването на таблични данни за ρ_v е възможно, но те предоставят ориентировъчни стойности, които могат да се различават от истинските от десетки до стотици пъти. Преди изграждането на заземителна инсталация е необходимо да се направи пълно проучване на специфичното съпротивление на терена в района на защитавания обект.

4. При проектиране на ЗИ е важно да се отчитат процесите в заземителната инсталация при въздействие на ПУМ, защото само постигането на ниска стойност на заземителното съпротивление може да се окаже недостатъчно. За тази цел се избират симулационни модели на ЗИ при въздействие на мълнии.

Въз основа на направения литературен обзор се дефинира целта на дисертационната работа.

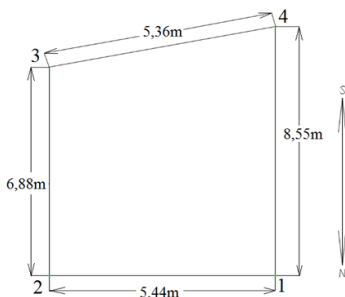
ГЛАВА 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ХАРАКТЕРИСТИКИ (СПЕЦИФИЧНО ОБЕМНО СЪПРОТИВЛЕНИЕ И ДИЕЛЕКТРИЧНА ПРОНИЦАЕМОСТ) НА МНОГОСЛОЙНА ПОЧВА.

В настоящата глава са решени задачи с номера 1 и 2, дефинирани в края на първа глава:

Описание на опитната постановка

Направени са измервания в четири точки на конкретна площадка от фиг. 2.1. за определяне на специфичното съпротивление ρ_v и диелектричната проницаемост ϵ_r в зависимост от честотата f за:

- влажна почва (рехава и пресована) и суха почва (рехава и пресована);
- дълбочини на вземане на пробите: $t_0 = 0$ m; $t_0 = 0,4$ m; $t_0 = 0,8$ m;
- честоти 0,05; 0,1; 1; 50; 100; 200; 300; 400; 500; 600; 700; 800; 900; 1000 kHz.



Фигура 2.1. Схема на участъка, върху който са проведени измерванията

Условията, при които са взети пробите, са дадени в приложение П.2.1., табл. П. 2.1. Част от резултатите са представени в графичен и табличен вид в

настоящата глава, а останалите резултати са дадени в приложение П2.

За експерименталните изследвания е използван уред Precision Impedance Analyzers 6500B Series, с който е измервано обемното съпротивление R на почвата, с помощта на което се изчислява специфичното обемно съпротивление:

$$\rho_v = \frac{R_v \cdot S}{h}, \Omega \cdot m \quad (2.1)$$

където R_v – обемното съпротивление на почвата; S – площта на електрода; h – дебелината на почвата в сензора, фиг.2.2.

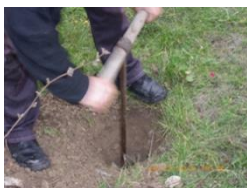
За измерване на диелектричната проницаемост на почвата се използва диелектричният метод на измерване, подходящ при гранулирани материали. При този метод се измерва капацитетът C на кондензатора с диелектрик между плочите (почвата образец) и капацитетът C_0 на въздушен кондензатор (без почва между плочите) и чрез тях се определя диелектричната проницаемост.

Пробите от почва се поставят в подходящ сензор, който представлява плосък кондензатор, с кръгли медни плочи с диаметър 37,78 mm и разстоянието между тях 49,2 mm (могат да се изработят сензори и с други размери). Околната повърхност е от плексиглас с голямо съпротивление. На горната част на сензора има пружина така, че образецът е при постоянно механично напрежение. Това осигурява и минимално наличие на въздух в изследваната почва.



Фигура 2.2. Общ изглед на измервателния сензор

Етапи от вземане на почвени проби



Фигура 2.3.



Фигура 2.4.



Фигура 2.5.

Измерването на електричните характеристики R , C , C_0 за всеки образец, имащ различно съдържание на влага, могат директно и бързо да се проведат с уреда Precision Impedance Analyzers 6500B Series. С този уред могат да се измерят директно стойностите на съпротивлението и капацитета и косвено, като

се използват подходящи уравнения, да се пресметне специфичното обемно съпротивление и относителната диелектрична проницаемост на изследваната почва.



Фигура 2.6. Уред Precision Impedance Analyzers 6500B Series

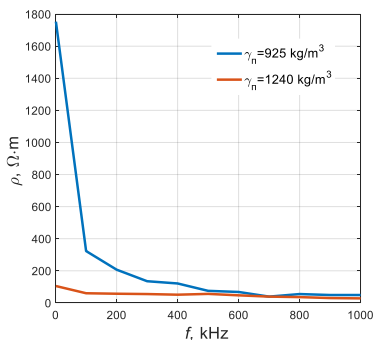
Уредът Precision Impedance Analyzers 6500B Series има широк честотен диапазон от 20 Hz до 5 MHz. Може да измерва следните параметри: капацитет C - от 1 fF до 1 F; индуктивност L - 0,1 nH до 2 kH; съпротивление R - от 0,01 m Ω до 2 G Ω ; реактивно съпротивление X - от 0,01 m Ω до 2 G Ω ; електропроводимост G - от 0,01 nS до 2 kS; тангенс на ъгъла на диелектрични загуби D ($\tan \delta$); качествен фактор Q - 0,00001 до 1000; импеданс Z - от 0,01 m Ω до 2 G Ω ; пълна комплексна проводимост Y - от 0,01 nS до 2 kS; фазов ъгъл θ .

Точността на измерване на уреда е $\pm 0,05\%$ при следните условия:

- начални параметри: 1V/20mA;
- скорост на измерване: Slow;
- вид на използваната сонда: 1J1011;
- работна температура: $23 \pm 5^\circ \text{C}$;
- време на загряване на уреда – 30 минути.

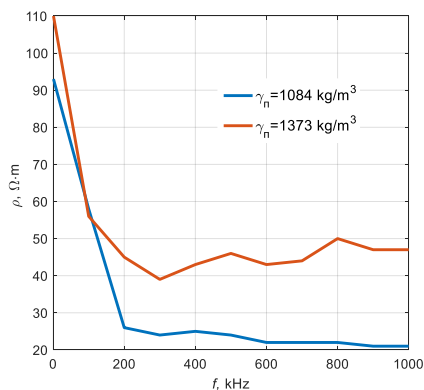
С уред Precision Impedance Analyzers 6500 Series са направени изследвания на зависимостите на специфичното обемно съпротивление ρ_v и диелектричната проницаемост ϵ_r при честоти от 50 Hz до 1 MHz:

- Зависимост на специфичното съпротивление на влажна рехава ($\gamma_n = 924,55 \text{ kg/m}^3$) и влажна пресована ($\gamma_n = 1239,8 \text{ kg/m}^3$) почва от честотата на електромагнитното поле: $\rho_v = f(f)$ при $t_0 = 0,4 \text{ m}$ - точка № 1



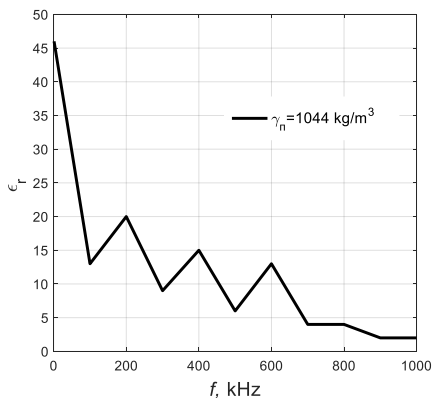
Фигура 2.7. Зависимост на специфичното съпротивление на влажна рехава и влажна пресована почва от честотата от точка № 1 на дълбочина 0,4м.

- Зависимост на специфичното съпротивление на влажна рехава ($\gamma_n = 1084,1 \text{ kg/m}^3$) и влажна пресована ($\gamma_n = 1372,9 \text{ kg/m}^3$) почва от честотата на електромагнитното поле: $\rho_V = f(f)$ при $t_0 = 0,4 \text{ m}$. - точка № 3.



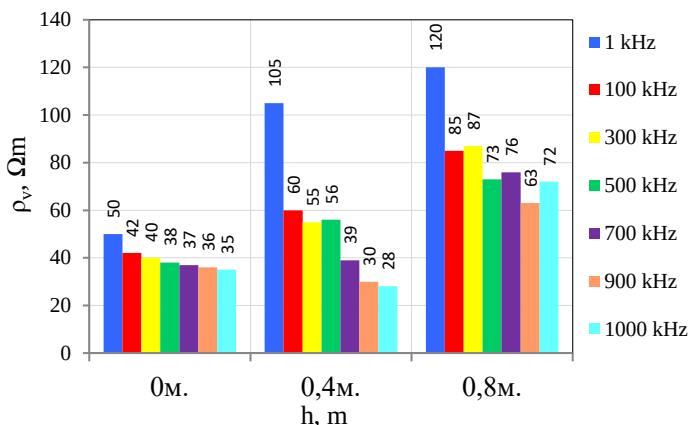
Фигура 2.8. Зависимост на специфичното съпротивление на влажна рехава и влажна пресована почва от честотата от точка № 3 на дълбочина 0,4 м.

- Зависимост на диелектричната проникваемост на суха почва ($\gamma_n = 1043,8 \text{ kg/m}^3$) от честотата на електромагнитното поле, $\epsilon_r = f(f)$, при $t_0 = 0,4 \text{ m}$. - точка № 3.



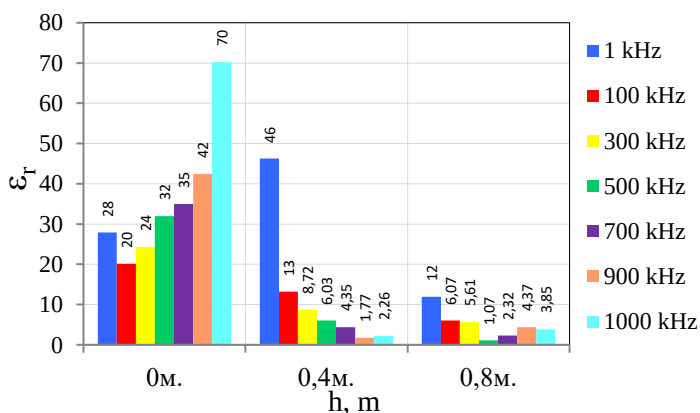
Фигура 2.11. Зависимост на диелектричната проникваемост на суха почва от честотата от точка № 3 на дълбочина 0,4 м.

- Зависимост на специфичното обемно съпротивление от дълбочината, на която е взета пробата при **влажна пресована почва**.



Фигура 2.13. Зависимост на специфичното съпротивление на влажна пресована почва от дълбочината на почвата

- Зависимост на диелектричната проникваемост от дълбочината, на която е взета пробата при **суха почва**.



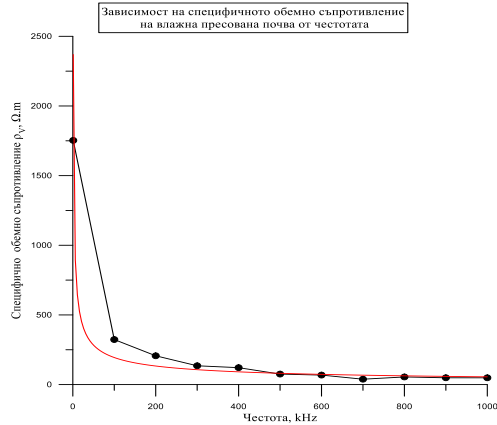
Фигура 2.16. Зависимост на диелектричната проникваемост на суха почва от дълбочината на почвата

Математическо описание на получените експериментални характеристики

На базата на експерименталните резултати са намерени математични изрази, описващи зависимостта на ρ_v и ϵ_r на многослойна почва от честотата на електромагнитното поле на импулсния ток, протичащ през земя. Използвана е компютърна програмата за обработка на експериментални резултати за получаване на теоретична крива и математическа функция, описваща експерименталната графика. Полученият математичен израз на зависимостите

ρ_v и ε_r от честотата f , за честоти от 50 Hz до 1MHz е използван при различна влажност и плътност на пробите.

- Изменение на $\rho_v = f(f)$, при $t_0 = 0,4$ m., точка № 1, **влажна рехава почва:**

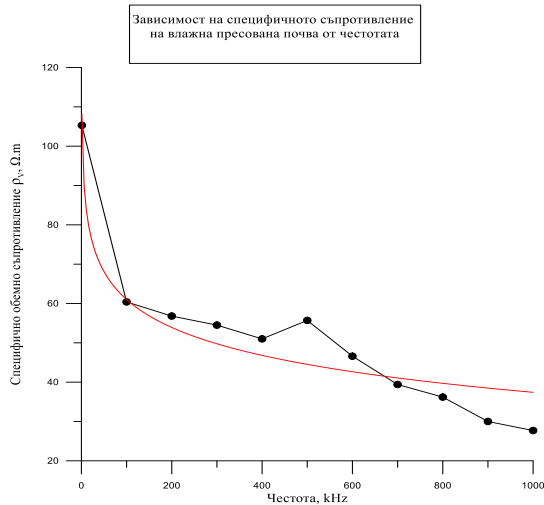


Фигура 2.17. Зависимост на специфичното съпротивление на влажна реха-ва почва от честотата от точка № 1 на дълбочина 0,4 м.

$$\ln(Y) = -0,5432699209 \cdot \ln(X) + 7,770446545 \quad (2.7)$$

с коефициент на определеност R-squared = 0.914481.

- Изменение на $\rho_v = f(f)$, при $t_0 = 0,4$ m., точка № 1., **влажна пресована почва:**



Фигура 2.18. Зависимост на специфичното съпротивление на влажна пресована почва от честотата от точка № 1 на дълбочина 0,4 м.

$$Y = -10,25159429 \cdot \ln(X) + 108,2316067 \quad (2.9)$$

Статистическа обработка на експерименталните резултати и намиране на математическо описание на зависимостите на специфичното обемно съпротивление и на относителната диелектрична проникваемост от честотата на електромагнитното поле и от стойността им при 50 Hz.

Направен е регресионен непланиран двуфакторен анализ на експерименталните изследвания от горните точки на електрическите характеристики на почви с различна влажност и плътност, определени при различни честоти. В резултат са получени уравнения за определяне ρ_v и ϵ_r в зависимост от стойността им при 50 Hz, различна влажност и уплътненост на почвата, както и за честоти от 100 kHz до 1 MHz. Направена е проверка за достоверността на резултатите и графично сравнение между експерименталните и изчислителни резултати.

Изследванията, проведени с уред Precision Impedance Analyzers 6500B Series, обобщено са представени в таблици.

Таблица 2.11. Специфично обемно съпротивление за влажна рехавя почва

$\rho_{v(50\text{ Hz})}, \Omega.m$ f, kHz	50	93	200	270	500
100	42	58	42	143	323
200	40,6	26,3	24,4	80	207
300	39,7	23,8	35	49	135
400	39	25	40	31	121
500	38,3	24	26	29	75,3
600	37,7	22,4	21	26,4	68
700	37,14	21,8	18,7	26,3	39
800	36,6	21,5	29	26,2	55
900	36	21,1	45,7	26,1	49
1000	35,5	20,7	42,7	26	48,6

Таблица 2.12. Специфично обемно съпротивление за влажна пресована почва

$\rho_{v(50\text{ Hz})}, \Omega.m$ f, kHz	50	100	110	120	160
100	28,13	56	60,4	87,2	122,9
200	13,54	44,5	56,8	85,2	100,3
300	13,38	39,2	54,5	75,8	114,1
400	13,34	43,4	51	74	110,5
500	13,26	43,3	50	74,18	95,1
600	13,14	43,2	46	72,68	89,1
700	13,01	43,2	39,4	71,54	86,3
800	12,98	50,3	36,2	71	84,5
900	12,79	46,6	30	62,56	80,7
1000	12,56	47,3	27,7	35,6	65,8

Таблица 2.13. Диелектрична прониксаемост за суха почва

$\epsilon_r(50\text{Hz})$ $f, \text{ kHz}$	10	45	60	135
100	6,07	13	13	102
200	2,6	20	19	147
300	5,6	9	4,3	147,6
400	0,75	15,4	22,6	15,47
500	1,07	6	10,7	16,41
600	1,9	12,7	9,17	16
700	2,3	4,35	11,5	16,33
800	2,5	4,0	20	24
900	4,4	1,77	11,1	9,5
1000	3,9	2,26	1	12,2

За обработване на резултатите е използвана програма, създадена в Технически университет – Варна, за статистическа обработка на експериментални резултати. Получените уравнения с две променливи x_1 – честотата f в kHz и x_2 – специфичното съпротивление на почвата при честота 50 Hz, са:

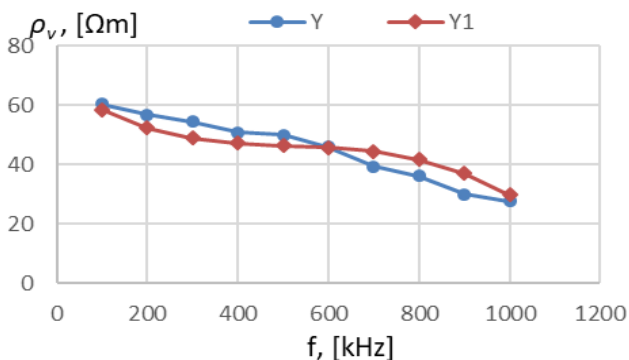
За специфично обемно съпротивление за влажна пресована почва:

$$y = 87,14 - 0,16x_1 - 0,72x_2 + 4,2 \cdot 10^{-4} x_1^2 + 0,007x_2^2 - 1,33 \cdot 10^{-5} x_2^3 - 0,0012x_1x_2 + 1,26 \cdot 10^{-6} x_1^2x_2 - 1,29 \cdot 10^{-6} x_1x_2^2 \quad (2.19)$$

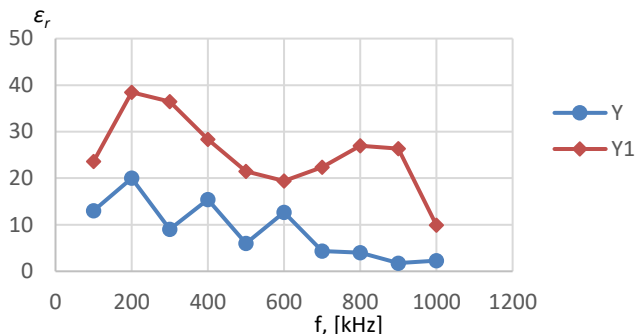
За диелектрична прониксаемост за суха почва:

$$y = -1635,35 - 0,448x_1 + 78,455x_2 + 2,6433 \cdot 10^{-4} x_1^2 - 1,285x_2^2 + 8,875 \cdot 10^{-3} x_2^3 - 2,177 \cdot 10^{-5} x_1^4 + 0,011x_1x_2 - 1,12 \cdot 10^{-4} x_1x_2^2 + 3,5 \cdot 10^{-7} x_1^2x_2^2 \quad (2.20)$$

Направен е сравнителен графичен анализ между експерименталните резултати и изчислителните от регресионните уравнения.



Фигура 2.26. Зависимост на специфичното съпротивление на влажна пресована почва от честотата. Сравнителен графичен анализ между експерименталните резултати – Y и изчислителните от регресионните уравнения – $Y1$



Фигура 2.27. Зависимост на диелектричната проникваемост на суха почва от честотата. Сравнителен графичен анализ между експерименталните резултати – Y и изчислителните от регресионните уравнения – Y1

Изводи

1. При честоти от 1 kHz до 700 kHz, (фиг.2.13.) с увеличаване на дълбочината специфичното съпротивление ρ_v нараства стъпално, докато при честоти над 700 kHz специфичното съпротивление ρ_v намалява при дълбочина 0,4 m, а при дълбочина 0,8 m са получени сходни с другите честоти стойности.

2. Наблюдавайки изменението на зависимостта $\rho_v = f(h)$ при суха почва, (фиг. 2.14.) се забелязва, че при ниски честоти (до 100 kHz) специфичното съпротивление ρ_v нараства при дълбочина 0,4 m. след което следва рязко намаляване на специфичното съпротивление ρ_v , докато при честоти над 300 kHz стойностите на специфичното съпротивление ρ_v са много по-ниски и изменението е доста по-плавно.

3. При дълбочина 0,8 m, (фиг. 2.15.) стойностите получени за диелектричната проникваемост ϵ_r са много по-ниски в целият честотен диапазон от 1 kHz до 1000 kHz, от получените такива в горните два почвени слоя. Това може да се обясни с понижената влажност (например изчислена е влажност при 0 m = 20,53%, при 0,4 m = 15,09% и при 0,8 m = 12,56%) на почвата изчислена по ур. 1.12.

4. Наблюдавайки изменението на зависимостта $\epsilon_r = f(h)$ при суха почва, (фиг. 2.16) се забелязва, че стойностите на повърхностния слой са най-високи при повечето изследвани честоти. С повишение на дълбочината стойностите на диелектричната проникваемост ϵ_r намаляват.

5. На избраната площадка, фиг. 2.1 специфичното обемно съпротивление ρ_v се оказва с различна стойност (в голям диапазон) в избраните четири точки и четири дълбочини.

6. Регресионния анализ е подход за получаване на данни за ρ_v и ϵ_r при необходимост от прецизен анализ на процесите в почвата при импулсните въздействия на мълниата.

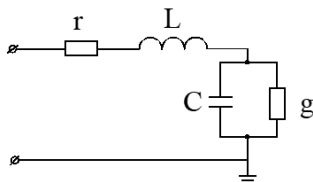
7. Получените регресионни уравнения са приложими за получаване на прогнозни стойности на ρ_v и ε_r само за района на гр. Варна, от където са взети почвените проби. Работата продължава върху съставяне на таблични данни за различни региони на България.

Постигнатите резултати показват необходимостта от определяне на специфичното обемно съпротивление и диелектрична проникваемост на почвата на площадка за изграждане на електроенергиен обект в повече точки от територията ѝ. Точното определяне на тези параметри ще допринесе за съставяне на точни симулационни модели за изследване на вълнови процеси, което е направено в трета глава.

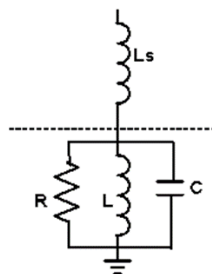
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТВАНЕ НА КОМПЮТЪРЕН МОДЕЛ НА ЗАЗЕМИТЕЛНА ИНСТАЛАЦИЯ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЕН ОБЕКТ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЪЛНОВИ ПРОЦЕСИ. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА МАКСИМАЛНОТО ДОПИРНО НАПРЕЖЕНИЕ С ОТЧИТАНЕ НА ДВУСЛОЙНИЯ ХАРАКТЕР НА ПОЧВАТА

В настоящата глава са решени задачи с номера от 3 до 5, дефинирани в края на първа глава.

Въз основа на литературния обзор е направен симулационен компютърен модел на заземителна инсталация за определяне на максималните възможни потенциали в зоната ѝ при пряк удар на мълния. При съставянето на моделната схема на заземителната инсталация са използвани заместващи схеми на хоризонтален и вертикален заземител и съответните изрази за намиране на параметрите на заместващите им схеми, приложение П.1.5.



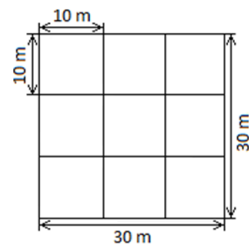
Фигура 3.1. Моделна схема за 1 m
хоризонтален заземител



Фигура 3.2. Моделна схема за 1 m
вертикален заземител

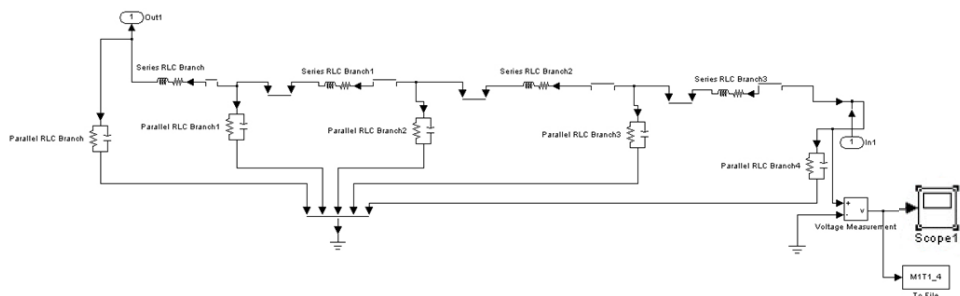
Изрази за изчисляване на параметрите на заместващата схема на хоризонтален заземител са представени в приложение П.1.5, а за вертикален заземител – П.1.7.

Моделираната заземителна инсталация е тип мрежа с размери 30 x 30 m, като всяка клетка е с размери 10 x 10 m.



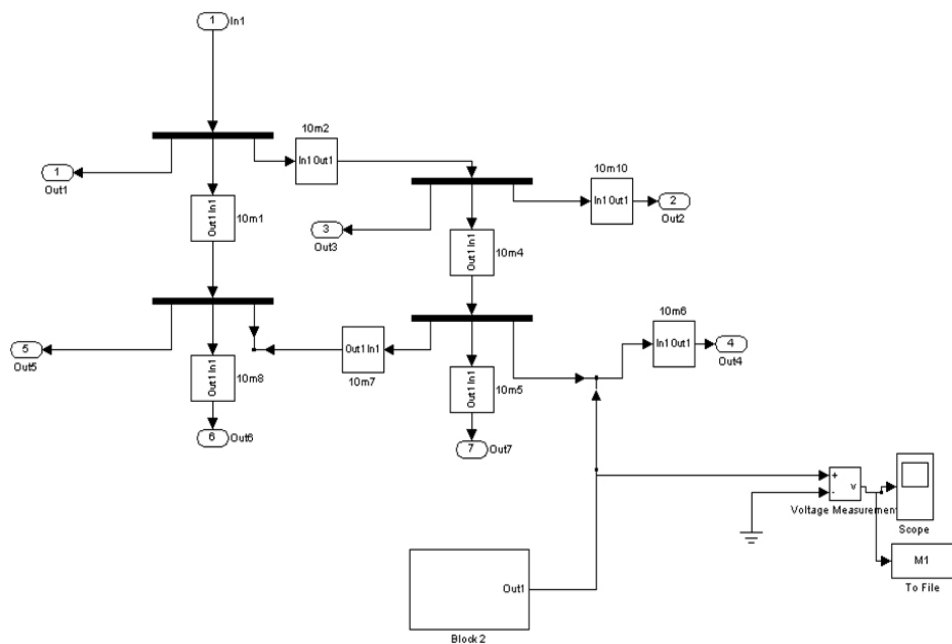
Фигура 3.3. Заземителна инсталация е тип мрежа с размери 30 x 30 m, като всяка клетка е с размери 10 x 10 m.

Моделът е съставен от подсистеми, като най-малката представлява 5 m от заземителната инсталация.

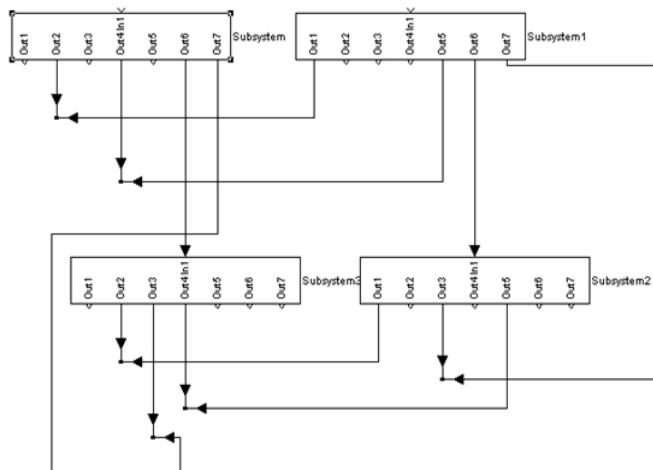


Фигура 3.4. Модел на 5 метра от заземителната инсталация

Последователно свързани отделните сегменти от по 5 метра образуват всяка една от клетките на мрежата, фиг. 3.5.



Фигура 3.5. Клетка от мрежата със съответните връзки с другите клетки



Фигура 3.6. Изглед на цялата заземителна решетка със съответните връзки

Методика за определяне на максималното допирно напрежение в заземителна мрежа при отчитане на импулсното съпротивление

С помощта на създадения симулационен модел за изследване на вълновите процеси в почвата при протичане на импулсен ток на мълния е създадена методика за определяне на максимално възможно допирно напрежение $U_{д, \max.}$ в зоната на заземителната мрежа. Съгласно стандарта IEEE Std 80- 2000, то се получава в центъра на крайна ъглова клетка.

Максималното допирно напрежение се намира като потенциална разлика между: максималния потенциал на страните на крайна ъглова клетка φ_3 и потенциала в центъра на клетката $\varphi_{3Ц}$.

$$U_{д, \max.} = \varphi_3 - \varphi_{3Ц} \quad (3.1)$$

φ_3 - потенциал, който се отчита директно от създадения симулационен модел за изследване на импулсни процеси в почвата; kV;

$\varphi_{3Ц}$ - потенциал в центъра на ъгловата клетката, kV, който се изчислява според цитиран в дисертацията източник.

За да се определи $U_{д, \max}$ ъгловата клетка на заземителната мрежа се замества с пръстен и се използва зависимостта за определяне на изменението на потенциала $\varphi_{3Ц}$ около пръстена.

$$\varphi_{3Ц} = \frac{I_3 \cdot \rho_3 \cdot k_t}{4 \cdot \pi \cdot R_{екв.}} \quad (3.5)$$

I_3 - еквивалентен ток през крайна ъглова клетка.

$$I_3 = I_{3, екв.} = \frac{\varphi_3}{\frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \ln \frac{4 \cdot l^2}{\pi \cdot d \cdot t}}, \quad (3.6)$$

където:

l – периметър на клетката $l = 2 \cdot \pi \cdot R_{екв.}$

$R_{екв.}$ - радиус на еквивалентния пръстен, m;

$$2R_{екв.} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_k}{\pi}} \quad (3.4)$$

S_k - площ на клетката, m²;

k_t – коефициент, отчитащ намаляването на потенциала на повърхността на земята – определя се от съпротивлението на заземителен пръстен на повърхността на земята спрямо този на определена дълбочина на полагане, според цитиран в дисертацията източник.

Тогава след заместване и опростяване:

$$U_{\text{д max}} = \varphi_3 \cdot \left(1 - k_t \cdot \frac{l}{2 \cdot R_{\text{екв}} \cdot \ln \frac{4 \cdot l^2}{\pi \cdot d \cdot t}} \right) \quad (3.9)$$

Тази методиката, позволява намиране на максималното допирно напрежение в заземителна мрежа при въздействие на импулсния ток на мълнията, което е важен параметър за оценка на ефективността на проектираната заземителна инсталация.

Отчитане на двуслойната почва при определяне на допирното напрежение E_m

Отчитането на влиянието на почвената структура става с определяне на еквивалентното специфично съпротивление ρ_e . Приблизителното изчисляване на хоризонтално стратифицирана среда при однородна почва се осъществява с често използвана формула:

$$\rho_e = \frac{D}{\frac{1}{\rho_n} \left(D - \sum_{i=1}^{n-1} h_i \right) + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i}{\rho_i}}, \quad (3.10)$$

където h_i е дебелината на i -тия слой и D е дълбочината на проникване, което зависи от размерите на заземителната уредба и ρ_i е специфичното съпротивление на i -тия слой. Препоръчителните стойности на D са между 30 и 50 m.

Уравнението за многослойна почва може да се представи за двуслойна почва в следния вид:

$$\rho_{e1,2} = \frac{D}{\frac{1}{\rho_2} (D - h_1) + \frac{h_1}{\rho_1}} \quad (3.11)$$

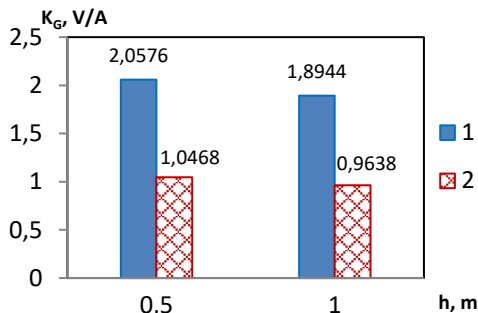
Стандартът на IEEE80-2000 предлага следния израз за максимално допирно напрежение на заземителните решетки за однородна почва:

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_m} = K_G \cdot I_G \quad (1.24)$$

За да се направи сравнение между ситуациите, когато E_m се изчислява само с един слой на почвата (ρ_1), и предложения опростен метод, използвайки еквивалентно специфично съпротивление $\rho_{e1,2}$, стандарта IEEE80-2000 въвежда коефициента K (1.16), който зависи от съотношението между ρ_1 и ρ_2 :

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (1.16)$$

Изследвани са случай за определяне на коефициента K_G , които обхващат 720 ситуации на заземителни мрежи с различни конфигурации, без вертикални заземители и различни съотношения между ρ_1 и ρ_2 (различни стойности на коефициента K).



Фигура 3.12. K_G съпоставено с h за S64 100x100; $K=+0,33$

1 - K_G , получено с еквивалентно $\rho_{e1,2}$ (3.14);

2 - K_G , получено с $\rho_{ekv} = \rho_1$;

Таблица 3.5. K_G за мрежа в първия слой (ρ_1), $\rho_1 < \rho_2$

$\rho_{ekv}, \Omega.m$	K	ρ_1/ρ_2	S64	R64
ρ_{ekv1}	+ 0,33	1/2	2,0576	0,1584
ρ_{ekv2}	+ 0,67	1/5	4,8918	0,3768
ρ_{ekv3}	+ 0,82	1/10	9,044	0,6964
$\rho_1 = \rho_2 = 100$	0	1	1,0468	0,0806

Изводи

1. Създадената моделна схема на заземителна инсталация е подходяща за изследване на вълнови процеси в нея и в почвата при пряк удар на мълния в мълниеприемниците на обекта. Може да бъде използвана при изследване на надеждната и безопасна работа на съоръженията в електроенергийните обекти.

2. Предложената методика за определяне на максималното допирно напрежение е приложима:

- при наличие на данни за разпределение на потенциала по страните на клетките на заземителната мрежа;
- за произволно изпълнение на заземителната мрежа - с или без допълнителни вертикални заземители;
- за произволна точка на попадение на мълнията.

3. Определянето на $U_{\partial.max}$ може да се извършва по (3.9).

4. Резултатите за стойностите на съпротивлението на мрежата за положителни и отрицателни K показват:

- при отрицателно K стойностите на K_G , за случай с използване на ρ_{ekv} могат да бъдат до 20 пъти по-ниски от случая с изчисляване на ρ_1 . Това води до преоразмеряване и по-високи разходи.

- при положително K , стойността K_G може да бъде до два пъти по-голяма от случая на изчисляване с ρ_1 . Това означава, че стойностите, получени за E_m ще бъдат по-ниски от колкото са реалните, което ще се отрази на електрическата безопасност.

- ако решетката е или в първия или във втория слой при отрицателно K обхвата на промяна K_G , изчислен без ρ_{ekv} (с ρ_1) е по-малък от този при

положително K .

- За двуслойна почва е удобно да се използва предложени опростен метод за изчисляване на еквивалентно специфично съпротивление и E_m , изложен в 3.3.

ГЛАВА 4. ВАРИАНТНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ С ИЗПОЛЗВАНЕТО НА СЪСТАВЕНИЯ СИМУЛАЦИОНЕН МОДЕЛ

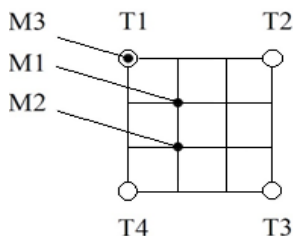
В настоящата глава са решени задачи с номера 6 и 7, дефинирани в края на първа глава.

В настоящата глава са решени задачи, свързани с определяне на потенциалите в крайните ъглови точки и местата на попадение на мълнията на заземителна инсталация в случаите с и без вертикални заземители.

Разгледани са три случая на попадение на мълнията в зависимост от мястото на поразяване – в мълниеприемник M1, M2 или в M3, фиг.4.1.

Определени са потенциалите в крайните ъглови точки от заземителната инсталация в трите случая на попадение на мълния, при:

- хоризонтална мрежа без вертикални заземители;
- хоризонтална мрежа с добавени четири вертикални заземителя в ъглите;
- хоризонтална мрежа с добавени 12 заземителя по целия периметър на мрежата.



Фигура 4.1. Местоположение на мълниеприемници M1, M2 и M3 в заземителната мрежа и на точките на мерене на потенциала – M1, M2, M3, T1, T2, T3, T4

Таблица 4.1. Обобщени резултати на потенциалите при попадение на мълнията в т. M1

Потенциалът в точка M1 е 140 kV.

	T1	T2	T3	T4
хоризонт. мрежа	70 kV	50 kV	48 kV	50 kV
хоризонт. мрежа + 4 верт. зазем	28 kV	15 kV	10 kV	15 kV
хоризонт. мрежа + 12 верт. зазем.	15 kV	5,8 kV	3 kV	5,5 kV

Таблица 4.2. Обобщени резултати на потенциалите при попадение на мъл-
нията в т. М2

Потенциалът в точка М2 е 148 kV.

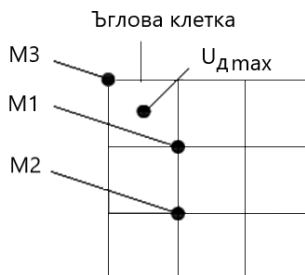
	T1	T2	T3	T4
хоризонт. мрежа	50 kV	48 kV	48 kV	69 kV
хоризонт. мрежа + 4 верт. зазем	15 kV	10 kV	14 kV	27 kV
хоризонт. мрежа + 12 верт. зазем.	5,5 kV	3 kV	5,8 kV	15 kV

Таблица 4.3. Обобщени резултати на потенциалите при попадение на мъл-
нията в т. М3

	M3 = T1	T2	T3	T4
хоризонт. мрежа	275 kV	48,3 kV	46 kV	48 kV
хоризонт. мрежа + 4 верт. зазем	130 kV	6 kV	3,5 kV	6 kV
хоризонт. мрежа + 12 верт. зазем.	130 kV	1,5 kV	0,5 kV	1,5 kV

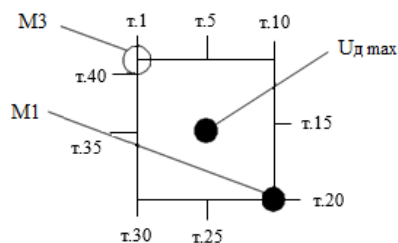
Определяне на максималното допирно напрежение в центъра на ъглова клетка на база на потенциалите от създадената моделна схема.

С разработения симулационен модел за изследване на вълнови процеси в почвата при протичане на импулсен ток на мълния са направени изследвания за големината на максималното допирно напрежение, $U_{d,max}$, в центъра на крайна ъглова клетка. Разгледани са отново трите случая на попадение на мълнията в зависимост от мястото на поразяване – в точки М1 или в М2 или в М3.



Фигура 4.3. Изследвана заземителна мрежа с точките на пряко попадения на
мълния

Измерването на потенциалите в симулационния модел се извършва чрез поставяне на волтметри на всеки метър, от ъгловата клетка.



Фигура 4.4. Точки на измерване на потенциала със симулационни волтметри – 1÷40

Амплитудата на тока във всеки клон от ъгловата клетка е измерена със симулационен амперметър.

Максималното допирно напрежение в ъгловата клетка е изчислено с изведената в трета глава (3.9). Директното попадение на мълния в първия случай е в т. M1, във втория – в т. M2, а в третия – в т. M3.

- ток на мълния 40 kA и форма на вълната $\tau_\phi / \tau_u = 1/10 \mu s$;
- мрежата с размери 30x30m; площ на ъгловата клетка $S_{\text{ъгл.кл}} = 100 \text{ m}^2$; диаметър на заземителни проводник – $d = 0,02 \text{ m}$; $t = 0,5 \text{ m}$;
- $\rho_v = 100$ и $500 \Omega \cdot \text{m}$; $Декв. = 11,28 \text{ m}$; $Реков. = 5,64 \text{ m}$; $l = 40 \text{ m}$.

За да се отчете намаляването на потенциала на повърхността на земята се определя съотношението k_t на съпротивлението на заземителен пръстен на определена дълбочина спрямо това на повърхността на земята.

Тогава $k_t = 0,699$, (3.7).

Измерените потенциали според фиг.4.4 за $\rho_v = 500 \Omega \cdot \text{m}$ са показани в Табл.4.4. Големината на мълниевия ток е 40 kA, като $\tau_\phi / \tau_u = 1/10 \mu s$.

Таблица 4.4. Измерени потенциали в крайна ъглова клетка според фиг. 4.4 за $\rho_v = 500 \Omega \cdot \text{m}$

Точка на измерване Точка на пряко попадение на мълния	Ф _{зи} , kV				
	р. 1	р. 10	р. 20	р. 30	р. 40
р. M1= р.20	67	67	140	67	67
р. M2	48	47	50	51,8	50
р. M3= р.1	275	108	67	108	250

Таблица 4.5. Измерени потенциали в крайна ъглова клетка според фиг. 4.4. за $\rho_v=100 \Omega.m$

Точка на измерване Точка на пряко попадение	ϕ_{zi}, kV				
	р. 1	р. 10	р. 20	р. 30	р. 40
р. M1= р.20	20	20	65	20,5	20
р. M2	18,2	18,5	22,4	20	18,2
р. M3 = р.1	130	33	16,4	33	130

В табл. 4.6 са представени резултатите за $U_{d,max}$, получени от данните в табл. 4.4 и табл. 4.5. и средната стойност на тока I_z при използване на (3.12).

Таблица 4.6. Резултати за $U_{d,max}$, получени от данните в табл. 4.4 и табл. 4.5. и средната стойност на тока I_z при използване на (3.12).

$U_{d,max}, V$		
	$\rho_v = 500 \Omega.m$	$\rho_v = 100 \Omega.m$
M1	80087	37998
M2	29229	13445
M3	161050	75995

Сравнение на получените максимални допирни напрежения в ценнтъра на ъгловата клетка с максимално допустимите допирни напрежения според стандарт IEEE 80-2000, в зависимост от големината и стръмността на тока на мълния

Стандартът IEEE 80-2000 и други литературни източници предлагат следния израз за изчисляване на максимално допустимо допирно напрежение E_{touch} :

$$E_{touch} = (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot I_h, \quad (4.1)$$

където I_h - допустим ток през човек, за който не се очаква да настъпи фибриляция, A

Ако е предвиден допълнителен повърхностен слой от чакъл с $\rho_s = 2500 \Omega.m$ и с дебелина на покритието $h_s = 0,2 m$, тогава:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 \cdot h_s + 0,09} \quad (4.2)$$

Ако не е предвиден допълнителен повърхностен слой $C_s = 1$ и $\rho_s = \rho$.

Съгласно литературни източници стойностите на I_h при въздействие на ток с честота 50÷60 Hz за времена от 0,03 до 3 s зависят от теглото на човек и са:

$$I_{h50kg} = \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (4.3)$$

$$I_{h70kg} = \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (4.4)$$

Понастоящем има много ограничени познания за безопасните стойности за импулсен ток върху човешкото тяло. Базиран на експерименти с електрически ток върху животни Чарлз Далзиел е стигнал до заключението, че импулсен ток с енергия от 50 J е безопасната граница. Други автори предлагат тази безопасна енергия да се счита от 10 J до 50 J.

Като цяло безопасната граница на енергията E , която може да се поеме от човешкото тяло от импулсни токове все още не е определена, поради липса на изследвания и много други ограничения в експериментирането.

За определяне на допустимите допирни напрежения за настоящото изследване е приета граница от 10 J. За сравнение зависимости (4.3) и (4.4) са получени при енергии от 13,6 до 17,1 J.

Допустимият ток е определен като:

$$I_h = \sqrt{\frac{E}{R_h \cdot t_s}}, \quad (4.5)$$

където R_h - съпротивление на човешкото тяло, което за изчисления се приема 1000 Ω .

При големите потенциали на ЗИ при въздействие на мълния и очакваните големи стойности на допирни напрежения този ток, според литературни източници, може да се определи и за $R_h = 500 \Omega$.

Съгласно (4.5) $I_{h(1000\Omega)} = 31,62A$ при време на въздействие $t_s = 10 \mu s$, $R_h = 1000\Omega$, $E=10J$. Съгласно (4.1) можем да изчислим максималното допустимо допирно напрежение E_{touch} в отделните случаи разгледани по долу, фиг. 4.3.

За по-голяма точност може да се отчете коефициентът α_2 , който отчита преходното контактно съпротивление човек – земя:

$$\alpha_2 = \frac{0,64 \cdot R_h}{\rho + 0,64 \cdot R_h}, \quad (4.6)$$

където $R_h = 1000 \Omega$ - съпротивлението на човек.

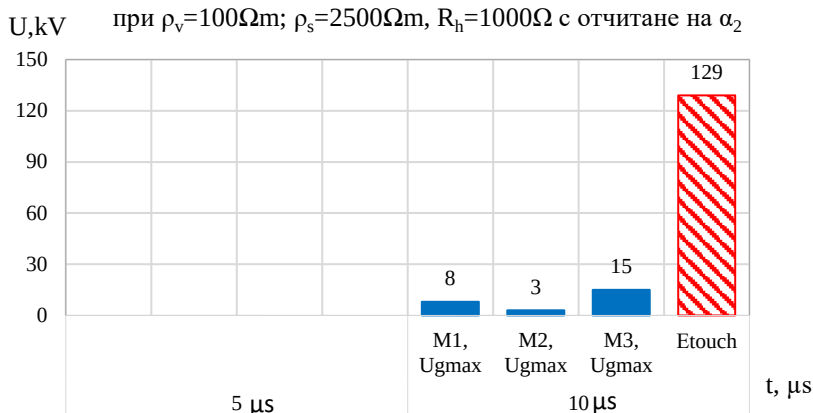
Тогава при специфично съпротивление на почвата:

- $\rho = 100 \Omega.m$, $\alpha_2 = 0,86$;
- $\rho = 500 \Omega.m$, $\alpha_2 = 0,56$;

- $\rho = 2500 \Omega.m$, $\alpha_2 = 0,2$.

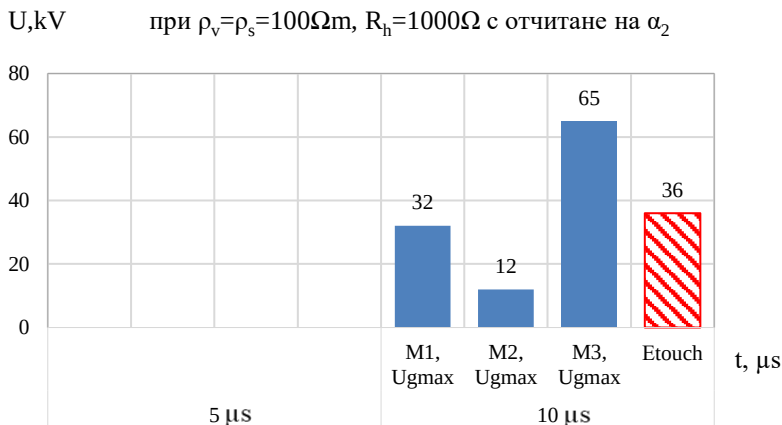
За изследваната заземителна мрежа, фиг. 4.3 са изчислени следните максимално допустими стойности за отделните случаи:

- В случая когато е предвидена настилка от 20 cm чакъл:



Фигура 4.5. Сравнение на получените допирни напрежения, в центъра на крайна ъглова клетка, в зависимост от различното място на попадение на мълнията: т. M1, M2, M3 с максимално допустимото допирно напрежение по стандарт IEEE80-2000.

- В случая когато не е предвидена настилка от чакъл:



Фигура 4.7. Сравнение на получените допирни напрежения, в центъра на крайна ъглова клетка, в зависимост от различното място на попадение на мълнията: т. M1, M2, M3 с максимално допустимото допирно напрежение по стандарт IEEE80-2000.

Изследване на влиянието на фронта на импулсната вълна и на специфичното съпротивление на почвата върху големината на максималното допирно напрежение в заземителна мрежа на ЕЕО.

На базата на разработения симулационен модел за изследване на вълнови процеси в почвата при протичане на импулсен ток на мълния, и методиката за изчисляване на максимално допирно напрежение, е направено изследване за импулсни вълни със следната стандартна форма:

- $\tau_{\phi}/\tau_u = 1/10 \mu s$;
- $\tau_{\phi}/\tau_u = 8/20 \mu s$;
- $\tau_{\phi}/\tau_u = 30/60 \mu s$

Експериментът е направен за два типа почви със специфичното съпротивление на почвата – $\rho_v = 100$ и $500 \Omega m$.

Изменение на максималното допирно напрежение $U_{d,max}$ в зависимост от формата на тока на мълнията и специфичното съпротивление на почвата.

Таблица 4.7. Изменение на максималното допирно напрежение $U_{d,max}$ в зависимост от формата на тока на мълнията и специфичното съпротивление на почвата.

	$U_{d,max}, V$					
	$\tau_{\phi} = 1\mu s; \tau_u = 10 \mu s$		$\tau_{\phi} = 8\mu s; \tau_u = 20 \mu s$		$\tau_{\phi} = 30\mu s; \tau_u = 60 \mu s$	
	$\rho_v = 100 \Omega m$	$\rho_v = 500 \Omega m$	$\rho_v = 100 \Omega m$	$\rho_v = 500 \Omega m$	$\rho_v = 100 \Omega m$	$\rho_v = 500 \Omega m$
M1	37998	80087	11399	24552	9938	22214
M2	13445	29229	9938	23383	8769	20460
M3	75995	161050	21045	35075	9061	24552

Стойността на максималното допирно напрежение зависи от:

- стръмността на импулсната вълна: колкото е по-стръмна, толкова стойността на $U_{d,max}$ е по-голяма;
- специфичното обемно съпротивление на почвата, и най-вече от стойността на ρ_v в областта около прякото попадение на мълнията;
- мястото на директно попадение на мълнията.

Най-голяма стойност за $U_{d,max}$ се получава при попадане на мълнията в т. М3.

Обобщена методика за повишаване точността при оразмеряването на ЗИ за ЕЕО при въздействие на импулсни токове

На основа на проведените експериментални изследвания и обработка на получените резултати, на моделните изследвания, теоретично изведените изрази за определяне на допустими допирни напрежения се предлага следната

обобщена методика за повишаване на точността при проектиране на заземителни инсталации при въздействие на мълниевии токове.

На фиг. 4.14. е представена блокова схема на методиката. Блок-схемата проследява процеса на проектиране, започвайки от въвеждане на необходимите входни данни, измервания, обработка на експерименталните резултати, съставяне на симулационния модел и проверка за ефективност на предлаганата заземителна мрежа. Блок-схемата обхваща като цяло резултатите от глави от втора до четвърта и съдържа следните основни части:

Първа част – „Входни данни“

В тази част трябва да се въведат необходимите за определяне на геометрията на заземителната мрежа данни, данни за определяне на допустими допирни и крачни напрежения, нормирани стойности, статистически данни за параметрите на мълниевия ток, както и ориентировъчни стойности за електрическите параметри за почвата (при наличност).

Втора част – „Определяне на специфичното съпротивление на почвата“

В тази част се предлагат две възможности:

- Чрез измерване във възможно повече точки на реалната площадка на обекта да се определи не само стойността на специфичното съпротивление на почвата, но и необходимост от работа с двуслоен характер на почвата. Дават се препоръки за вида на заземителната мрежа.

- Чрез отчитане на данни, включени в приложение на дисертацията, които са съобразени с нашата климатична зона.

Тази част завършва с отчитане и на сезона на измерванията.

Препоръчително е да се направят предварителните измервания.

Трета част – „Определяне на диелектричната проникваемост на почвата“

В тази част се предлагат две възможности:

- Чрез измерване във възможно повече точки на реалната площадка на обекта по описания в глава втора метод, използвайки същите материали от пробовземанията от втората част.

- Чрез отчитане на данни, включени в приложение на дисертацията, които са съобразени с нашата климатична зона.

Тази част завършва с определяне на честота на моделирания импулс на мълнията.

Четвърта част – „Определяне на специфичното съпротивление и диелектричната проникваемост на почвата за честотата на моделирания импулс на мълнията“ – използват се регресионните уравнения, изведени във втора глава.

Пета част – „Моделна схема на заземителната инсталация“

В тази част с предложениия модел в трета глава се моделира заземи-телната инсталация (най-често заземителна мрежа), импулсния ток на мъл-нията и се получават потенциалите в зоните на мрежата, за които се прави проверка за определяне на допустими допирни напрежения. Получава се и съпротивлението

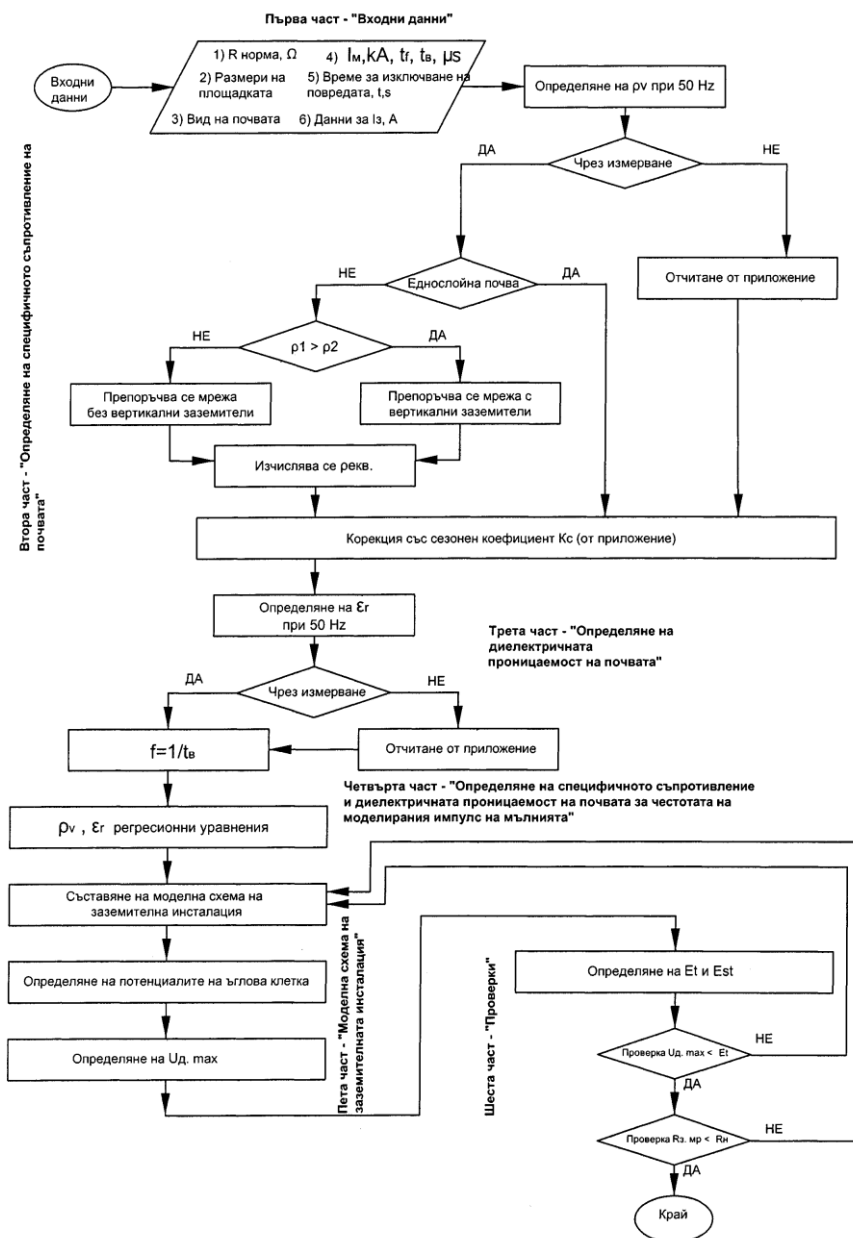
на заземителната мрежа.

По изведената зависимост от глава трета се определя максималното допирно напрежение в крайна ъглова клетка.

Шеста част – „Проверки“

- Максималното допирно напрежение се сравнява с полученото допустимо допирно напрежение, определено по известните зависимости от стандарта IEEE 80-2000.

- Проверява се полученото съпротивление на заземителната мрежа с необходимото съгласно Наредба № 3 за устройството на електрическите уредби и електропроводните линии.



Фигура 4.14. Блок-схема на обобщена методика за повишаване точността при оразмеряване на ЗИ за ЕЕО при въздействие на импулсни токове

Изводи

1. Моделната схема на заземителната инсталация е подходяща за изследване на процесите в нея и в почвата при пряк удар на мълния в мълниеприемниците на обекта. Може да бъде използвана при изследване на надеждната и безопасна работа на съоръженията в електроенергийните обекти и при изследване на електробезопасността на персонала.

2. Използването на вертикални заземители във възли на заземителна мрежа намалява значително потенциалите – намаляването е до десетки пъти

3. Предложената методика за определяне на максималното допирно напрежение е приложима:

- при наличие на данни за разпределение на потенциала по страните на клетките на заземителната мрежа;
- за произволно изпълнение на заземителната мрежа - с или без допълнителни вертикални заземители;
- за произволна точка на попадение на мълнията.

4. Определянето на $U_{d,max}$ може да се извършва по (3.12) и получените резултати съответстват на тези, получени по (3.9).

5. Стойността на максималното допирно напрежение зависи от:

- стръмността на импулсната вълна: колкото е по-стръмна, толкова стойността на $U_{d,max}$ е по-голяма;
- специфичното обемно съпротивление на почвата, и най-вече от стойността на ρ_v в областта около прякото попадение на мълнията;
- мястото на директно попадение на мълнията. Най-голяма стойност за $U_{d,max}$ се получава при попадане на мълнията в т. МЗ – фиг.4.1.

Заклучение

Специфичното обемно съпротивление, пряко оказващо влияние върху съпротивлението на заземителите, е определено в зависимост от честотата на протичащия през заземителя и почвата ток.

Получените математични изрази на зависимостите на специфичното обемно съпротивление от честотата могат да бъдат използвани при изчисляване на съпротивлението на заземител при конкретна стойност на честотата.

Математическите изрази, получени от зависимостта на диелектричната проницаемост от честотата, могат да се използват при пресмятане на капацитета на заземителна инсталация, необходим при съставяне на моделна схема на инсталацията за изследване на вълнови процеси в нея.

Получените резултати от експерименталните изследвания могат да се използват за изчисляване на параметрите на почвата при конкретна честота (без да е необходимо измерване). Получените експериментални данни могат да послужат за съставяне на един по-прецизен модел на заземителна инсталация при нейното оразмеряване.

Предложената моделна схема на заземителна инсталация е подходяща за

изследване на вълновите процеси в нея при пряко попадение на мълния в произволна нейна точка.

Предложената методика за определяне на максималното допирно напрежение е приложима:

- при наличие на данни за разпределение на потенциала по страните на клетките на заземителната мрежа;
- за произволно изпълнение на заземителната мрежа - с или без допълнителни вертикални заземители;
- за произволна точка на попадение на мълнията.

За двуслойна почва е удобно да се използва предложения опростен метод за изчисляване на еквивалентно специфично съпротивление и E_m , изложен в 3.3.

За определяне на $U_{d, max}$ при ПУМ в ЗИ на ЕЕО е изведена зависимост (3.12).

Благодарности

Извазвам благодарност към своите научени ръководители доц. д-р инж. Маргрета Василева и доц. д-р инж. Маринела Йорднова за оказаната помощ, внимание, ползотворните идеи и насоки, а така също и на колегите от катедрата за препоръките и съдействието при разработването на настоящия дисертационен труд.

Научно-приложни и приложни приноси

- **Научен принос:** Изведена е зависимост за определяне на максималното допирно напрежение в крайна ъглова клетка на заземителна мрежа за случай на протичане на импулсния мълниев ток в произволна нейна точка.

- **Научно - приложни приноси:**

- Изведени са зависимости за определяне на ρ_v и ε_r на почва при произволна честота и ρ_{v50} .
- Създадена е методика за определяне на максималното допирно напрежение в крайна ъглова клетка на заземителна мрежа за случай на протичане на импулсния мълниев ток в произволна нейна точка въз основа на симулационен модел на мрежата в програмна среда Matlab Simulink;
- Предложен е опростен метод за отчитане на двуслойна структура на почвата при определяне на максималното допирно напрежение с изведен израз.

- **Приложни приноси:**

- Създаден е симулационен модел в среда Matlab Simulink за изследване на процесите в ЗИ при въздействие на мълниев ток, приложим за произволна конфигурация и място на мълниевия удар.
- Проведени са експериментални изследвания за влиянието на честотата върху електрическите параметри на почвата - ρ_v и ε_r .
- Проведен регресионен анализ на непланиран двуфакторен експеримент за получаване на зависимостите за определяне ρ_v и ε_r на почвата от честотата и стойността на ρ_v при 50 Hz.

Списък на публикациите по темата на дисертационния труд

1. Yordanova, M., M. Vasileva, **R. Dimitrova**. Analysis of the Mesh Voltage Calculation Method in the Presence of a Two-Layer Soil. XLVIII International scientific conference on information, communication and energy systems and technologies ICEST, 26-29 June 2013, Ohrid, Macedonia, vol. 2, pp. 723÷726, ISBN 978-9989-786-89-1.

2. **Димитрова, Р.**, М. Василева, М. Йорданова. Влияние на структурата на почвата при проектиране на заземителни мрежи в двуслойна почвена среда. Юбилейна научна международна конференция 50 години катедра ЕТЕТ, Годишник на Технически университет – Варна, 2013, стр. 85÷88, ISSN: 1311-896X.

3. **Dimitrova, R.**, M. Vasileva, K. Kardjilova. Influence of frequency on resistivity and dielectric permittivity of multilayer soil. Conference Proceedings of SIELA 2014, XVIIIth International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA 2014, Bulgaria, pp 37÷40, ISBN 978-1-4799-5817-7, available:<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84906751501&partnerID=MN8TOARS>

4. Vasileva, M., **R. Dimitrova**. Using a measuring instrument Z-meter III for determining of the soil resistivity for dimensioning of the grounding system of an electricity object. 2nd Conference and Working Session, International Programme EUREKA, Brno University of Technology, Czech Republic, 2014, pp. 82÷86, ISBN 978-80-214-4883-4.

5. Vasileva, M., **R. Dimitrova**, M. Yordanova, M. Ivanova. Model Scheme of the Earthing System of Electrical Power Substations for Wave Processes Study. ELMA, Proceedings, 1-3 October 2015, Varna, pp. 114÷117, ISSN 1313-4965.

6. **Димитрова, Р.**, Изследване влиянието на фронта на импулсната вълна и специфичното съпротивление на почвата върху големината на максималното допирно напрежение в заземителна мрежа на електроенергиен обект, VIII научна конференция ЕФ 2016, Годишник на Технически университет София, Варна, стр. 32÷37, ISSN 1311-0829, Available: http://ef-conference.tu-sofia.bg/pluginfile.php/31/mod_page/content/33/EF2016_proceedings.pdf

7. **Dimitrova, R.**, M. Yordanova, M. Vasileva, M. Ivanova. Experimental Determination of Soil Electrical Parameters for Creation of a Mathematical Model of a Grounding System for Lightning Protection, Int. Journal of Reasoning-based Intelligent Systems, Inderscience 2017, Special Issue on: ICEST'2015 Information, Communication and Energy Systems and Technologies, pp. 101÷113, ISSN (Online): 1755-0564. **Available:**<http://www.inderscience.com/info/inarticle.php?artid=88652>, <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85038840594&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&nlo=&nlr=&nls=&sid=b9ccb10e5cc316d6d8b638f48db00390&sot=a&sdt=cl&cluster=scopubyr%2c%222017%22%2ct&sl=23&s=SOURCE-ID+%2821100198223%29&relpos=16&citeCnt=0&searchTerm>

8. Yordanova, M., **R. Dimitrova**, M. Vasileva, M. Ivanova. Regression Analysis of Experimental Data for the Soil Electrical Characteristics Considering Humidity and Frequency. 1st International Conference “Applied Computer Technologies” ACT, 2018, Proceedings, Ohrid, Macedonia, pp.79÷82, ISBN 978-608-66225-0-3.

Investigation of wave processes in grounding installations of electrical power objects

by

Rositsa F. Dimitrova

ABSTRACT

The dissertation work is dedicated to the development of a methodology for increasing the accuracy in the sizing of grounding installations for electrical power objects under the impact of impulse currents.

The soil resistivity, which directly affects the resistance of the ground rods, is determined by the frequency of the current flowing through the ground rod and the earth.

The obtained mathematical expressions for the frequency dependency of the soil resistivity have been used for calculation of the ground rod resistance at a particular frequency value.

The experimentally determined frequency dependency of the dielectric permittivity has been used to calculate the capacitance of the grounding installation, which is necessary for creation of the replacement scheme of the model for investigation of wave processes in it.

The received results from the experimental studies can be used for calculation of the soil parameters at a certain frequency (without the need for measurement). The obtained experimental data can be used to create a more precise model of the grounding installation in its sizing.

The proposed model scheme of grounding installation is suitable for study of wave processes in it at direct lightning strike at any point of its structure.

The proposed methodology for determining the maximum touch voltage is applicable:

- at the presence of data for the distribution of the potential on the sides of the cells of the grounding grid;
- for a random configuration of the ground grid - with or without additional vertical ground rods;
- for a random point of lightning strike.

The proposed simplified method for calculation of the equivalent soil resistivity is convenient to be used for a two-layered soil

A dependency for determining the maximum touch voltage at direct lightning strike in the grounding installation of electrical power object has been derived.