

## НОВ МЕТОД ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ СТЕПЕНТА НА КОРОЗИЯ НА СТОМАНЕНИ ЗАЗЕМИТЕЛИ ЧРЕЗ ИЗПОЛЗВАНЕ НА ИНДУКТИВНИ ДАТЧИЦИ

Петър Петров<sup>1</sup>, Георги Велев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Технически университет – Габрово, 5300 Габрово, petrov\_p\_tu@abv.bg

<sup>2</sup> Технически университет – Габрово, 5300 Габрово, g\_velev@tugab.bg; g.velev@gmail.com

**РЕЗЮМЕ.** При наличие на интензивна корозия, сечението на стоманените заземителни електроди намалява. Това води до несъответствие с изискванията на нормативните уредби за минимално сечение. Всичко това показва актуалността на проблема за следене на развитието на процеса на корозия в електродите на заземителните уредби. В тази статия е показан метод за следене степента на корозията, чрез използване на индуктивни датчици. Изведени са аналитични зависимости за определяне дълбочината на корозия, чрез следене индуктивността на предлагания датчик. Предлагания метод не изисква големи финансови разходи и е реализуем за всички заземителни устройства изпълнени със стоманени електроди.

### A NEW METHOD FOR DETERMINATION OF THE RATE OF CORROSION FOR STEEL GROUNDING ELECTRODES BY MEANS OF INDUCTIVE SENSORS

Petar Petrov<sup>1</sup>, Georgi Velev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Technical University of Gabrovo, 5300 Gabrovo, petrov\_p\_tu@abv.bg

<sup>2</sup> Technical University of Gabrovo, 5300 Gabrovo, g\_velev@tugab.bg; g.velev@gmail.com

**ABSTRACT.** In cases of intensive corrosion in soil the steel grounding electrodes' cross-section area decreases. This results in discrepancy with the grounding grid regulations for minimal cross-section area of the single electrodes. That makes topical the problem for the uninterrupted monitoring of grounding electrodes' corrosion rate in exploitation conditions. The paper presented in here describes a new method for corrosion rate monitoring by means of inductive sensors. Analytical expressions for calculation of the corrosion depth have been deduced. The method suggested in the present paper doesn't require high financial investments and it is applicable for all the types of grounding installations constructed with steel electrodes.

### Въведение

При изпълнение на заземителни уредби се използват изкуствени заземители. Те са изработени от стомана, покрити с цинково покритие, предпазващо от корозия. При монтаж на вертикални заземители, вероятността за нарушаване на покритието е голяма и това води до бързо развитие на корозия върху материала. Като резултат, параметрите на заземителната уредба се влошават, а експлоатационния период на заземителите рязко намалява.

В заземителни уредби с големи токове на земно съединение е възможно загряване на почвата, изпаряване на влагата в нея и като следствие, повишаване на съпротивлението на заземяване. Това налага заземителните уредби с големи токове на земно съединение да се проверяват на термична устойчивост, като общата повърхност на заземителите трябва да удовлетворява следното условие:

$$S \geq 12 \cdot 10^{-7} \cdot I_3 \cdot \sqrt{\rho_{II} \cdot t_{\phi}}, \text{ m}^2 \quad (1)$$

където:  $I_3$  - изчислителен ток на земно съединение, А;

$\rho_{II}$  - специфично съпротивление на почвата,  $\Omega \cdot \text{m}$ ;

$t_{\phi}$  - продължителност на земното съединение, s.

При големи токове на земно съединение на проверка подлежи и термичната устойчивост на съединителните проводници, свързващи вертикалните заземители (за напрежение над 1000 V). Сечението на стоманените шини трябва да удовлетворява условието:

$$S \geq I_3 \cdot \frac{\sqrt{t_{\phi}}}{K}, \text{ mm}^2 \quad (2)$$

където:  $K$  - коефициент на материала. За стомана  $K = 74$

От изрази (1) и (2) се вижда, че е необходимо сечението на заземителите и съединителните шини при уредби с големи токове на земно съединение да удовлетворяват определени изисквания. Корозирането на същите намалява тяхното сечение, което от своя страна води до нарушаване на условия (1) и (2).

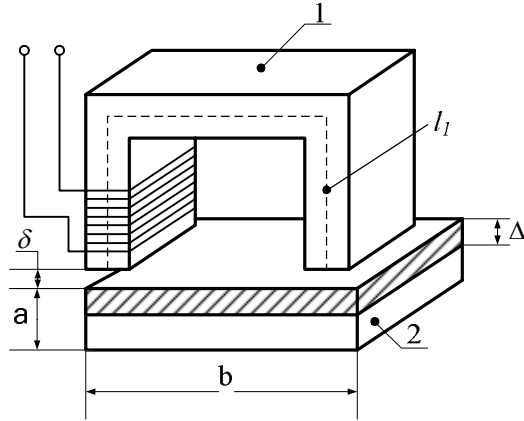
От всичко това се вижда, че е особено актуално периодично да се следи степента на корозия както на заземители така и на съединителни шини. Това налага разработването на датчици и метод, позволяващи отчитане на степента на корозия по време на експлоатационния период на заземителната уредба.

Предложените в тази статия принципи и методи за непрекъснат контрол на степента на корозия могат да

бъдат приложени и за диагностика корозирането на стоманени тръбопроводи пренасящи вода и други флуиди.

## Обосновка на възможността за използване на индуктивни датчици за отчитане на степента на корозия

На фиг. 1 е показана принципната схема на такъв датчик.



Фиг. 1. Принципна схема на индуктивен датчик за отчитане на степента на корозия: 1 – „П“ образен магнитопровод; 2 – стоманена плоска шина, използвана като свързващ проводник между вертикалните заземители;  $\Delta$  - дълбочина на корозията;  $\delta$  - въздушна междина между магнитопровода на датчика и стоманената шина.

Индуктивността на бобината  $L$  може да се определи от израза:

$$L = \frac{w \cdot \Phi}{I}, \text{ Н} \quad (3)$$

където:  $w$  - брой навивки;  $I$  - големина на тока, протичащ през бобината;  $\Phi$  - създаден магнитен поток.

Като се използва, че  $I = \frac{H \cdot l}{w}$  и се замести в (3) се получава:

$$L = \frac{w^2 \cdot \Phi}{H \cdot l} = \frac{w^2}{R_{\mu}}, \text{ Н} \quad (4)$$

$$R_{\mu} = \frac{H \cdot l}{\Phi} - \text{магнитно съпротивление}$$

Геометричните размери на „П“ образния магнитопровод са по-малки от размерите на шината или винкеловия заземител ( $a \times b$ ). Това ни дава основание да пренебрегнем разсеяния магнитен поток. В този случай магнитното съпротивление ще бъде сума от:

$$R_{\mu} = R_{\mu 1} + 2R_{\mu \delta} + R_{\mu 2} \quad (5)$$

където:  $R_{\mu 1}$  - магнитно съпротивление на „П“-образния магнитопровод ( $R_{\mu 1} = \frac{l_1}{\mu_1 \cdot S} = const$ );  $R_{\mu \delta}$  - магнитно съпротивление на въздушната междина

$$R_{\mu \delta} = \frac{\delta}{\mu_0 \cdot S} = const); R_{\mu 2} - \text{магнитно съпротивление на}$$

стоманената шина.

Магнитното съпротивление  $R_{\mu 2}$  на стоманената шина варира в зависимост от дебелината на образувалия се корозионен слой. За конкретизиране на задачата се допуска, че се е образувал корозионен слой с дебелина „ $\Delta$ “, а размерите на шината са съответно  $a \times b$ . В този случай магнитното съпротивление  $R_{\mu 2}$  ще се получи като еквивалентно на две паралелно свързани съпротивления:

$$R_{\mu 2} = \frac{R'_{\mu 2} \cdot R''_{\mu 2}}{R'_{\mu 2} + R''_{\mu 2}} \quad (6)$$

където:  $R'_{\mu 2} = \frac{b}{\mu_2(a - \Delta) \cdot b}$  - магнитно съпротивление на некорозиралата част;

$$R''_{\mu 2} = \frac{b}{\mu_3 \cdot \Delta \cdot b} - \text{магнитно съпротивление на}$$

корозиралата част от шината;

$\mu_3$  - магнитно съпротивление на корозирания материал.

Замествайки в израз (6) се получава:

$$R_{\mu 2} = \frac{b}{\mu_3 \cdot \Delta \cdot b + \mu_2(a - \Delta) \cdot b} \quad (7)$$

В зависимост (5) полагаме  $R_{\mu 1} + 2R_{\mu \delta} = A = const$ . За двата случая ще се получат изразите:

$$\text{- без корозия } R_{\mu} = A + \frac{b}{\mu_2 \cdot a \cdot b} = A + \frac{1}{\mu_2 \cdot a} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{- с корозия } R_{\mu K} &= A + \frac{b}{\mu_3 \cdot \Delta \cdot b + \mu_2(a - \Delta)b} = \\ &= A + \frac{1}{\mu_3 \cdot \Delta + \mu_2(a - \Delta)} \quad (9) \end{aligned}$$

Изхождайки от (4) могат да бъдат определени съответно:  $L_1$  - индуктивност без корозия и  $L_2$  - индуктивност с корозия.

$$L_1 = \frac{w_2}{R_{\mu}}; L_2 = \frac{w_2}{R_{\mu K}} \quad (10)$$

Ако се направи отношението на тези две индуктивности, от него може да се изрази  $R_{\mu K}$ .

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{R_{\mu K}}{R_{\mu}} \Rightarrow R_{\mu K} = \frac{L_1}{L_2} \cdot R_{\mu} \quad (11)$$

В израз (11) полагаме  $L_1 \cdot R_{\mu} = B = const$ .  $R_{\mu}$  може да се определи от геометрията на веригата, а  $L_1$  да се измери при монтажа на датчика върху стоманената шина.

$$B = L_1 \cdot R_\mu = L_1 \left( A + \frac{1}{\mu_2 \cdot a} \right) \quad (12)$$

При заместване в (11) се получава уравнението:

$$\Delta = \frac{\mu_2 \cdot a}{\mu_3 \cdot \Delta + \mu_2 (a - \Delta)} = \frac{B}{L_2} \quad (13)$$

Решавайки това уравнение относно дебелината на корозиралия слой  $\Delta$  се получава:

$$\Delta = \frac{\mu_2 \cdot a}{\mu_2 - \mu_3} - \frac{L_2}{(\mu_2 - \mu_3)(B - L_2 \cdot A)} \quad (14)$$

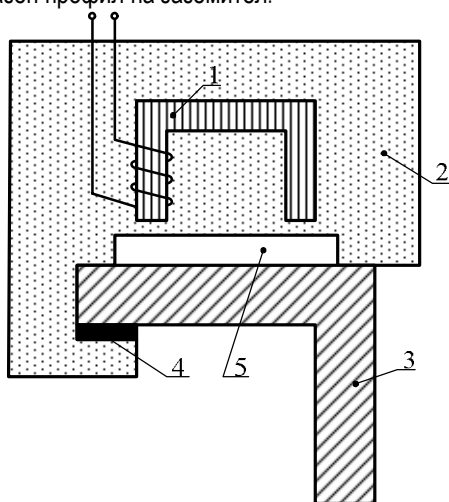
Полученият израз (14) дава възможност за определяне дебелината на корозията „ $\Delta$ “. При полагане в (14) -  $L_1 = L_2$  се получава  $\Delta = 0$  т.е. това съответства на случая, когато няма корозионен слой.

За конкретния вид датчик може да се построи зависимостта  $\Delta = f(L_2)$ , от която може без изчисления да се определи дебелината на корозиралия слой.

Отчитането на промяната на  $\Delta$  през определен интервал от време дава възможност за построяване на зависимостта  $\Delta = f(t)$ . От нея може да се направи извод за скоростта на корозията в конкретния почвен слой и използван заземител.

### Практическа реализация на индуктивен датчик за отчитане на степента на корозия

На фиг. 2. е показана универсална конструкция на индуктивен датчик с възможност за монтаж на шина или „Г“-образен профил на заземител.



Препоръчана за публикуване от катедра „Електрификация на минното производство“, МЕМФ

Фиг. 2. Конструкция и монтаж на индуктивен датчик върху „Г“-образен профил на заземител, където: 1 – магнитопровод с намотка; 2 – заливка с изолационен материал; 3 – стоманен заземител; 4 – диелектрична подложка за уплътняване и стабилно закрепване.

Въздушната междина 5 е предвидена за да не се ограничава процеса на корозия при пряк контакт на двете повърхности. По този начин се гарантира реалната ситуация на въздействие на агресивна почвена среда. За всеки изработен датчик могат да бъдат определени базовите константи:  $A$ ;  $L_1$ ;  $B$ . При известни параметри на материалите от (14) може да се построи зависимостта  $\Delta = f(L_2)$  при изходни стойности  $L_1 = L_2$ . Извършвайки периодични измервания на  $L_2$  от зависимостта  $\Delta = f(L_2)$  може да се съди за степента на корозия.

### Заклучения

Предложен е лесен за практическа реализация индуктивен датчик. На всеки заземител или по дължината на съединителната шина могат да бъдат монтирани такива датчици при изграждане на заземителната уредба.

Използването на такива датчици дава възможност за индиректно следене степента на корозия и вземане на своевременни мерки.

Чрез този метод може да бъде дадена оценка за степента на агресивност на почвата в даден район спрямо материала от който е изработен заземителя т.е. скорост на корозията. При силно агресивни почви или такива с наличие на интензивна електрокорозия от блуждаещи токове, още при проектирането на заземителната уредба могат да се вземат мерки за адекватна защита от корозия.

### Литература

- Глазов, М. П., И. В. Сторожевский. 1978. *Методы контроля и измерения при защите подземных сооружений от коррозии*, Москва
- Галимов, Р.К., А. В. Изосимов et. al. 2003. *Методологические аспекты, стохастической динамики корозионных процессов*, Защита металов, Том 39, №2, С.200-206
- Евтихийев Н. Н., Я. А. Кунергимид et.al. 1990. *Измерение электрических и неэлектрических величин*. Энергоатомиздат, Москва
- Манойлов, В.Е. 1986. *Основы электробезопасности*, Энергия, Ленинград.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОПРЕДЕЛЯНЕ СПЕЦИФИЧНОТО ОБЕМНО СЪПРОТИВЛЕНИЕ НА ПОЧВЕНИТЕ СЛОЕВЕ В ДЪЛБОЧИНА ЧРЕЗ ИЗПОЛЗВАНЕ НА ЕТАЛОНЕН ЕЛЕКТРОД

Георги Велев <sup>1</sup>, Петър Петров <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Технически университет – Габрово, 5300 Габрово, g\_velev@tugab.bg; g\_velev@gmail.com

<sup>2</sup> Технически университет – Габрово, 5300 Габрово, petrov\_p\_tu@abv.bg

**РЕЗЮМЕ.** Двуслойното моделиране на почвата е стандартна практика при проектирането на заземителни уредби в развитите страни. Съставянето на достоверни многослойни почвени модели води до увеличаване на точността и прецизността при оразмеряване на заземителните уредби, а също така и до намаляване на преразхода на метал при тяхното реализиране, тъй като се отчита слоестата структура и изменението на специфичното обемно съпротивление на почвата в дълбочина. В настоящата статия са представени резултати от експериментално определяне на двуслойния профил на почвата в дълбочина посредством използването на еталонен електрод, прилагайки метода на контролния заземител за конкретен терен. Точността на получения двуслойен почвен модел е верифицирана чрез сравнителен анализ с резултати получени от утвърдени методики и програмни продукти.

### EXPERIMENTAL DETERMINATION OF SOIL LAYERS' RESISTIVITY IN DEPTH BY MEANS OF A STANDARD MASTER ELECTRODE

Georgi Tsonev Velev <sup>1</sup>, Petar Kolev Petrov <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Technical University of Gabrovo, 5300 Gabrovo, g\_velev@tugab.bg; g\_velev@gmail.com

<sup>2</sup> Technical University of Gabrovo, 5300 Gabrovo, petrov\_p\_tu@abv.bg

**ABSTRACT.** Two-layer soil modeling is a standard practice during the grounding installations design in the developed countries. When a multi-layers soil model is engaged the accuracy and precision of grounding design are increased and the overall grounding installation metal demand is decreased because the layered soil structure and the variation of soil resistivity in depth are taken into account. The paper presented in here discusses results from experimental determination of the two-layer soil model obtained by means of a standard master electrode for a real terrain applying the "fall of potentials" method. The achieved accuracy is verified via a comparative analysis with results obtained by approved software products and sets of methods.

### Въведение

Прилагането на двуслойни почвени модели на ниво проектиране увеличава прецизността и точността при оразмеряването на заземителните уредби. Като резултат, при тяхната реализация се намалява преразхода на метал и се поддържат оптимални стойности на съпротивлението на заземяване, тъй като се отчита слоестата структура и изменението на специфичното обемно съпротивление на почвата в дълбочина.

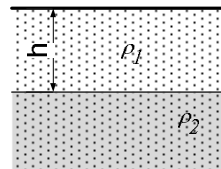
В общия случай двуслойният почвен модел се определя основно от три параметъра:

$h$  - дебелина на първия повърхностен почвен слой, m;

$\rho_1$  - специфично обемно съпротивление на първия почвен слой,  $\Omega \cdot m$ ;

$\rho_2$  - специфично обемно съпротивление на втория почвен слой с безкрайна дебелина,  $\Omega \cdot m$ .

Изследванията са направени използвайки разработената в (Велев и Петров, 2009) методиката за практическо определяне на двуслойния модел на почвата чрез специализиран еталонен електрод, прилагайки метода на контролния заземител. Резултатите от експерименталното двуслойното почвено моделиране за конкретен терен са верифицирани чрез два програмни продукта и посредством графо-аналитичния метод на SUNDE (IEEE Std. 80-2000).



Фиг. 1. Графично представяне условното разделяне на почвата в дълбочина на два слоя.

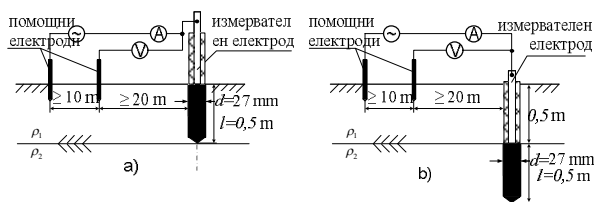
### Създаване на достоверен двуслойен профил на почвата за реален терен

#### Експериментално определяне на двуслойен модел на почвата посредством еталонен електрод

Реализираният специален еталонен измервателен електрод е изработен съгласно фиг. 2. Размерите на активната метална част и общата дължина на електрода са съобразени с терена, където са извършени измерванията – двора на старата библиотека при ТУ - Габрово.

Понеже се оказа, че почвеният слой на въпросното място е с малка дебелина от порядъка на (1 – 1,2 m), и след него в дълбочина преобладава глинесто-скален слой, за активна дължина на експерименталния електрод е прието  $l = 0,5$  m при обща дължина на електрода 1,2 m и диаметър 27 mm. Според тази постановка е възможно да се измерва

специфичното обемно съпротивление на два хоризонтални почвени слоя, повърхностен с дебелина 0,5 m, и втори слой също с дебелина 0,5 m на дълбочина 0,5 m.



Фиг. 2. Опитна постановка за измерване на специфичното обемно съпротивление на почвата в дълбочина за съответния реален терен: а) за първи почвен слой с дебелина 0,5 m; б) за втория почвен слой с дебелина 0,5 m на дълбочина 0,5 m.

Измерванията са осъществени посредством три еднакви експериментални еталонни електрода, които след набиването им на различни места в почвата и извършване на съответните измервания са оставени забити в земята с цел допълнително изследване. Измерванията са осъществени посредством метода на контролния заземител, като на базата на измерените стойности за съпротивлението на заземяване  $R_3$  и геометричните параметри на експерименталния електрод използвайки (1) са получени стойностите за специфичното съпротивление на почвата  $\rho_{II}$  (Велев и Петров, 2009).

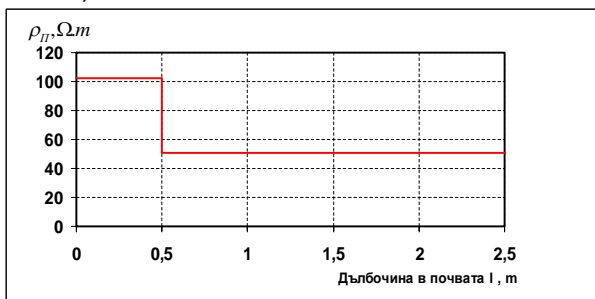
$$\rho_{II} = R_3 \cdot \frac{2,73 \cdot l}{1g \frac{4 \cdot l}{d}}, \Omega \cdot m \quad (1)$$

Резултатите от измерванията и изчисленията са представени в табл. 1.

Таблица 1

Електрод №	$R_3, \Omega$ за първи слой	$R_3, \Omega$ за втори слой	$\rho_{II}, \Omega \cdot m$ за първи слой	$\rho_{II}, \Omega \cdot m$ за втори слой
1	142,2	65,5	103,9	47,9
2	139,2	70,2	101,7	51,3
3	138,1	72,6	100,9	53,04
ср. аритм. стойност	139,83	69,43	102,3	50,7

Картината на изменение на специфичното съпротивление на почвата за съответния терен в дълбочина е представена на фиг. 3. (двуслоен модел на почвата):

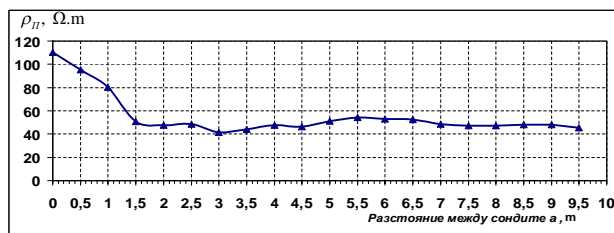


Фиг. 3. Двуслоен модел на почвата, съставен съгласно предлаганата методика

### Двуслоен модел на почвата съгласно графо-аналитичния метод на SUNDE

За да се приложи графо-аналитичния метод на SUNDE са използвани входни данни от измервания на специфичното обемно съпротивление на почвата, извършени по метода на Венер за разглеждания терен. На

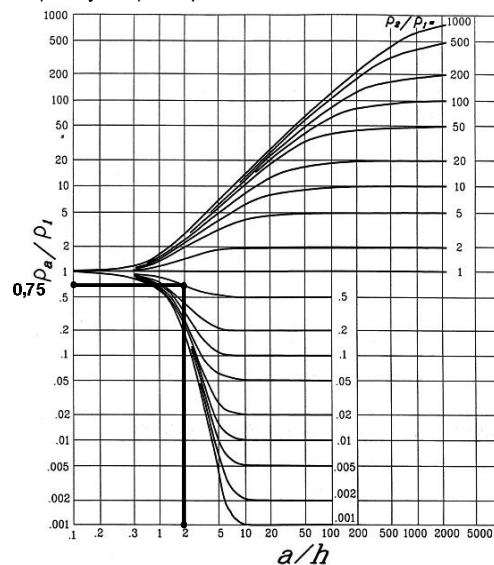
базата на тях е построена експерименталната характеристика  $\rho_{II} = f(a)$  (Специфично съпротивление във функция от разстоянието между измервателните сонди) съгласно фиг. 4.



Фиг. 4. Експериментална характеристика  $\rho_{II} = f(a)$ , показваща изменението на специфичното съпротивление на почвата в дълбочина при различно разстояние между сондите.

Използвайки фиг. 4. и предписанията в международния стандарт (IEEE Std 80-2000) се определят визуално стойности за  $\rho_1$  и  $\rho_2$ . Следва се описаната методика:

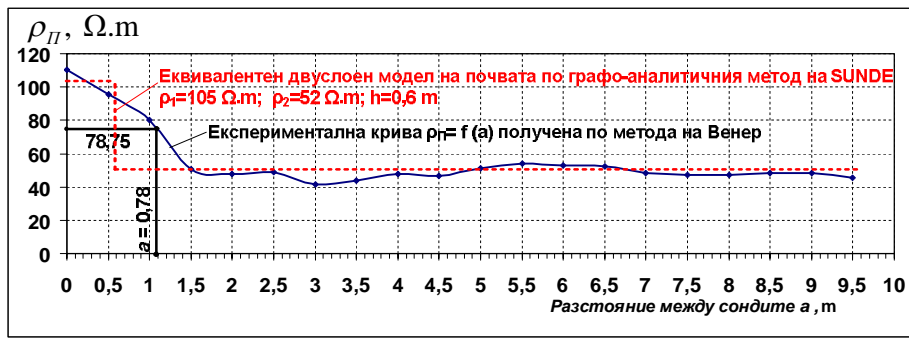
А) Стойността за специфичното съпротивление на първия почвен слой се отчита от началото на стръмната част на експерименталната характеристика  $\rho_{II} = f(a)$  от фиг. 4., т.е. приемаме  $\rho_1 = 105 \Omega \cdot m$ . Специфичното съпротивление на втория почвен слой се приема  $\rho_2 = 52 \Omega \cdot m$ ; Б) Определя се  $\rho_2/\rho_1 = 52/105 = 0,46 \approx 0,5$  Понеже на графиката на Sunde (фиг. 5) за стойност  $\rho_2/\rho_1 = 0,5$  има стандартно построена крива, не се извършва интерполация, а се използва съществуващата крива;



Фиг. 5. Използване на кривата на Sunde в конкретния случай

В) Избира се  $\rho_a/\rho_1 = 0,75$  по оста  $y$ , така че да пресича избраната крива в средата на стръмната и част; Г) За  $\rho_a/\rho_1 = 0,75$  от фиг.5 се отчита  $a/h = 2$ ; Г) Изчислява се  $\rho_a$ . В случая  $\rho_a = 0,75 \cdot (105) = 78,8 \Omega \cdot m$ ; Ж) От експерименталната крива  $\rho_{II} = f(a)$  за  $\rho_a = 78,8 \Omega \cdot m$  се определя разстояние между електродите  $a = 1,1$  m (фиг. 4.); З) Изчислява се дебелината на първия почвен слой  $h = \frac{a}{a/h} = \frac{1,1}{2} = 0,55 \approx 0,6$  m.

Недостатък на приложението метод се явява предварителният избор на специфичните съпротивления  $\rho_1$  и  $\rho_2$  на двата почвени слоя, което в голяма степен е



Фиг. 6. Двуслоен модел на почвата чрез графо-аналитичния метод на SUNDE. Определяне на разстоянието между електродите  $a$ , нужно за пресмятане дебелината на първия почвен слой;

субективно и при неопитност на проектанта би довело до сериозни неточности. Резултатите от двуслойното моделиране на почвата чрез графо-аналитичния метод на SUNDE са представени графично на фиг. 6.

### Съставяне на двуслоен модел на почвата чрез софтуерния продукт CYME CYMGrd.

Програмният продукт CYME CYMGrd е предназначен за анализ и проектиране на заземителни уредби съгласно изискванията на международния стандарт IEEE Std. 80-2000. Предимството на продукта в случая е, че въз основа на данни от измервания по метода на Венер, програмата идентифицира потенциално грешно отчетени стойности на специфичното съпротивление на почвата и не ги взима под внимание при дефиниране параметрите на двуслойния почвен модел и при построяване на експерименталната крива  $\rho_{II} = f(a)$ .

С помощта на използвания продукт са получени следните параметри характеризиращи двуслойната структура на почвата (Фиг. 7):

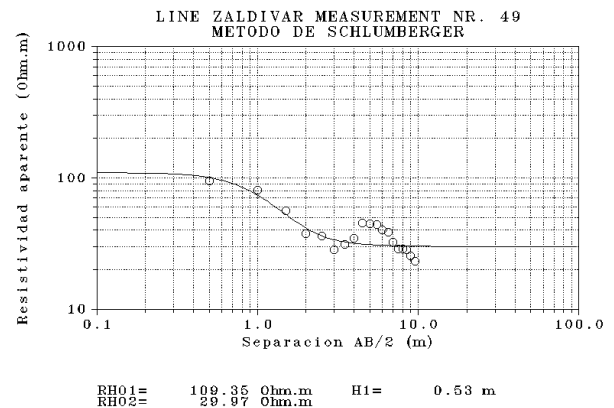
- дебелина на първия повърхностен почвен слой  $h = 0,5 \text{ m}$ ;
- специфично обемно съпротивление на първия почвен слой  $\rho_1 = 112,19 \text{ }\Omega\cdot\text{m}$
- специфично обемно съпротивление на втория почвен слой с безкрайна дебелина  $\rho_2 = 46,38 \text{ }\Omega\cdot\text{m}$ .

### Съставяне на двуслоен модел на почвата чрез продукта RHO32

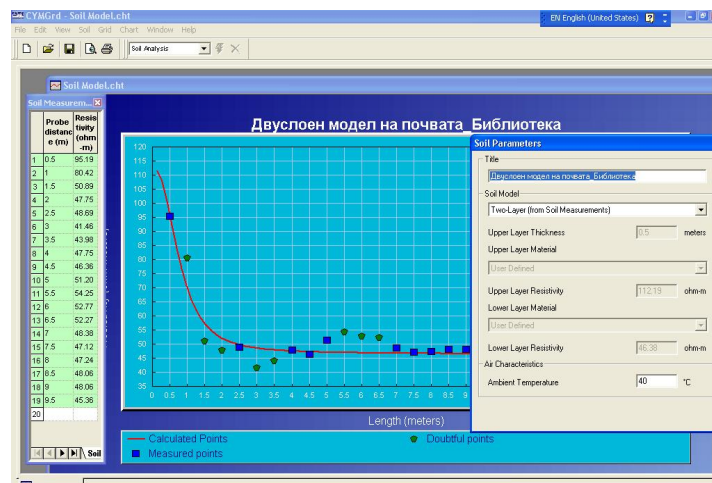
Алтернативният авторски програмен продукт работещ под команден ред RHO32 също е използван за определяне параметрите на двуслойния почвен модел. За целта

предварително, данните от полевите измервания се въвеждат чрез редактора Notepad (или подобен) в конфигурационен файл с разширение \*.DAT. В команден прозорец се стартира програмата и се указва пътя до създадения конфигурационен файл. Програмата създава няколко еквивалентни почвени модел с различен брой на еквивалентните слоеве, а потребителя избира сам, кой от тях ще използва при проектирането. В конкретния случай, полученият двуслоен почвен модел е представен графично на фиг. 8. Неговите параметри са както следва:

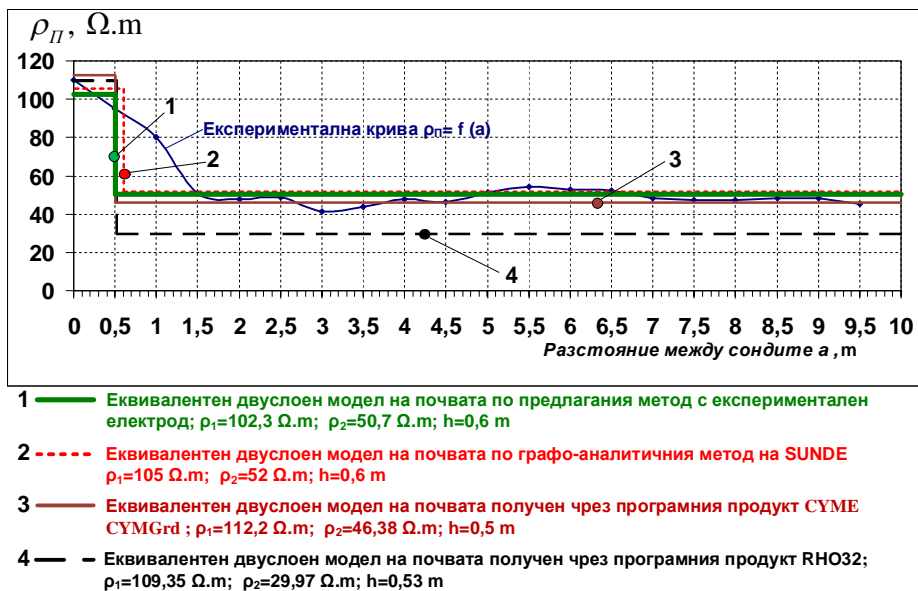
- дебелина на първия повърхностен почвен слой  $h = 0,53 \text{ m}$ ;
- специфично обемно съпротивление на първия почвен слой  $\rho_1 = 109.35 \text{ }\Omega\cdot\text{m}$ ;
- - специфично обемно съпротивление на втория почвен слой с безкрайна дебелина,  $\rho_2 = 29.97 \approx 30 \text{ }\Omega\cdot\text{m}$ .



Фиг. 8. Приложение на продукта RHO32 за определяне еквивалентния двуслоен почвен модел за разглеждания терен



Фиг. 7. Приложение на продукта CYME CYMGrd за определяне еквивалентния двуслоен почвен модел за разглеждания терен



Фиг. 9. Графична интерпретация на резултатите от двуслойното моделиране на почвата за изследвания терен.

## Сравнителен анализ на резултатите получени по различните методи и различните програмни продукти

Резултатите от измерванията и изчисленията съгласно разглежданите методи и тези получени чрез програмни продукти са представени за по-голяма яснота графично на фиг. 9.

Резултатите от приложението експериментален метод със специализиран измервателен електрод са с много добра сходимост със тези от графо-аналитичния метод на SUNDE и тези получени чрез професионалния програмен продукт CYME CYMGrd. Това е ясна индикация, че предложения в (Велев и Петров, 2009) и приложен на практика в настоящата статия експериментален метод за определяне на специфичното обемно съпротивление на почвата в дълбочина има нужната точност за използване в практиката.

Двуслойният почвен модел съставен чрез продукта RHO32 се различава значително от останалите три резултата. Впечатление прави и това, че получената стойност за специфичното съпротивление на втория еквивалентен почвен слой -  $\rho_2 = 29,97 \Omega.m$  е значително по-ниска от тази получена по другите методи и от другите продукти. Освен това, тази стойност се намира значително под експерименталната характеристика получена на базата на полеви измервания по метода на Венер. В резултат на това, приложението на този почвен модел би довело до сериозно грешки при проектирането и завишени стойности на измереното съпротивление на заземяване след реализацията на заземителната уредба.

## Заклучения

- Посоченият метод за изследване на специфичното обемно съпротивление в дълбочина дава реални резултати. Потвърждение на казаното е добрата сходимост на получените резултати с тези реализирани по класическите методи и от програмни продукти;
- Методиката дава възможност за съставяне на двуслойни модели на почвата, който да се използват при проектирането на заземителни уредби. Това е

изключително важен момент за проектанта относно избора на вид заземители и техния монтаж;

- При измервания в планински райони, където почвения слой е с малка дебелина се препоръчва използването на специален електрод с активна дължина 0,5 m. Това ще позволи по-голяма прецизност при измерванията и определяне наличието на втори почвен слой с по-добра или по-лоша проводимост;
- Посоченият метод може да се използва и за изследване промяната на специфичното обемно съпротивление вследствие влиянието на климатичните промени (валежи или замръзване на почвения слой) върху отделните почвени слоеве;
- Използването на двуслоен модел позволява точни изчисления на съпротивлението на заземителите без да се налага използването на сезонни корекционни коефициенти (до този момент такава е практиката, използвана от проектантите в развитите страни);
- Предлаганият метод дава възможност за бързото му реализиране в практиката. Необходимо е изработването само на специализиран измервателен електрод, измерванията се реализират по позната методика и с широко използваните в практиката измервателни уреди;
- Като недостатък може да се изтъкне, че използваните експериментални електроди са за еднократна употреба и остават в земята след опита.

## Литература

- Велев, Г. Ц., П. К. Петров. 2009. *A new method for in depth resistivity determination of multilayer soils* - Известия на ТУ-Габрово, Том 37, Габрово, ISSN 1310-6686
- IEEE Std. 80-2000. January 2000. *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, IEEE-SA Standards Board
- IEEE Std 81-1983. September 1984. *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a ground system*, American National Standards Institute,
- Wener, F. A. 1916. *Method of Measuring Resistivity*, National Bureau of Standards, no S- 258, pp469
- Thapar, B., V. Gerez. Apr. 1995. *Equivalent resistivity of non-uniform soil for grounding design*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, no. 2, pp. 759-769