

## ВЕРИФИКАЦИЯ НА ДВУСЛОЙНИ МОДЕЛИ НА ПОЧВАТА ПРИ ПРОЕКТИРАНЕ НА ЗАЗЕМИТЕЛНИ УРЕДБИ С ПОМОЩТА НА МЕТОДА НА КРАЙНИТЕ ЕЛЕМЕНТИ

Георги Велев<sup>1</sup>

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

**РЕЗЮМЕ.** В докладът е извършено изследване на достоверността на три двуслойни почвени модела, съставени чрез графоаналитичния метод на Sunde и два независими програмни продукта. Верификацията е осъществена чрез симулации на единични заземители чрез метода на крайните елементи, използвайки програмния продукт ANSYS и сравнявайки резултатите, получени за съпротивлението на заземяване с данни от физически измервания за заземители със същите размери. Направени са заключения относно целесъобразността от използването на двуслойни почвени модели при проектирането на заземителни уредби с конвенционални заземители и такива, положени в слой електропроводящ материал.

### VERIFICATION OF TWO LAYER SOIL MODELS IN THE DESIGN OF GROUNDING INSTALLATIONS BY MEANS OF FEM

Georgi Velev<sup>1</sup>

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

**ABSTRACT.** The paper presented in here describes investigations which verifies the reliability of three two-layer soil models, obtained using the Sunde's grapho-analytical method and two other software products. The verification is performed via FEM simulations of single grounding electrodes using ANSYS, and comparing the computed results for the resistance to ground with data obtained by physical measurements regarding grounding electrodes with the same dimensions. Conclusions are made regarding the advisability in utilization of two-layer soil models in the design of conventional grounding installations and grounding installations involving electrodes encased in resistance enhancing materials.

### Въведение

Приложението на двуслойни почвени модели при проектирането на заземителните уредби е често срещана практика в развитите страни. Причина за това е, че еквивалентното двуслойно почвено моделиране характеризира в много-по-пълна степен слоестата структура на почвата и изменението на специфичното и обемно съпротивление в дълбочина, причинени от нееднородността на почвените пластове, степента на насищане на почвата с влага и соли при различна дълбочина, влияние на атмосферните условия върху повърхностната почва и др.

В следствие на всичко казано, точността при проектирането се увеличава значително в сравнение със случаите при които се приема, че почвата е с константна специфична проводимост. Допълнително се увеличава и надеждността на заземителната уредба, което е изключително важно при отговорни енергийни обекти във връзка с тяхната електрическа и пожарна безопасност (Иванов и Калейчев, 2006; Калейчев и Иванов, 2008);

Параметрите на двуслойния почвен модел за даден терен се получават въз основа на данни от полеви измервания на специфичното обемно съпротивление на почвата, извършени по метода на Венер съгласно изискванията на стандартите (IEEE Std 81-1983 и IEEE Std 80-2000).

Прилагат се графо-аналитични методи или се използват специализирани програмни продукти за определяне на стойностите на специфичното обемно съпротивление

$\rho_1$  и  $\rho_2$  за двата еквивалентни почвени слоя и дебелината на първия от тях  $h$ . Вторият почвен слой се приема с безкрайна дебелина.

Остава отворен въпросът, в каква степен и точност различните методи и програмни продукти отразяват коректно характеристиките на почвата в дълбочина в зависимост от вида и геометрията на използваните единични заземители в състава на заземителната уредба.

В настоящия доклад, са моделирани единични конвенционални и положени в слой електропроводящ бетон вертикални и хоризонтални заземители в двуслойна почва използвайки методът на крайните елементи (МКЕ) чрез програмния продукт ANSYS.

Получените резултати за съпротивлението на заземяване са сравнени с данни от полеви измервания на съпротивлението на реални физически модели заземители със същите размери и параметри, като тези моделирани в ANSYS.

Направени са заключения относно, приложимостта и точността на получените двуслойни почвени модели при проектирането на заземителни уредби.

### Постановка на задача за изследване. Входни данни и параметри

## Дефиниране на двуслойните почвени модели за изследвания терен

Във (Велев и Петров, 2011), са получени три различни двуслойни почвени модела за реален изследван терен, където са инсталирани реални физически образци на моделите в ANSYS заземители:

1) Чрез графо-аналитичния метод на *SUNDE*:

$$\rho_1 = 105 \Omega \cdot m; \rho_2 = 52 \Omega \cdot m; h = 0,6 m;$$

2) Чрез програмния продукт *CYME CYMGrd*:

$$\rho_1 = 112,19 \Omega \cdot m; \rho_2 = 46,38 \Omega \cdot m; h = 0,5 m;$$

3) Чрез програмата *RHO32*:

$$\rho_1 = 109,35 \Omega \cdot m; \rho_2 = 30 \Omega \cdot m; h = 0,53 m;$$

4) Модел с еднородна почва:  $\rho_{II} = 52,6 \Omega \cdot m$ .

## Моделиране в ANSYS на двуслойната структура на почвата и инсталираните единични заземители в нея

Картината на разпределение на електрическото поле в почвата при протичане на ел. ток през конвенционален метален заземител или електрод, положен в слой електропроводящ материал при двуслоен модел на почвата може лесно да се моделира чрез МКЕ. И докато при еднородна почва разпределението на потенциала в почвата може да се определи емпирично (Стефанов, Христова и Атанасов, 2009), то при двуслоен модел на почвата численото моделиране се явява по-добър и по-точен за приложение подход (Velev et al, 2011).

Съпротивлението на заземяване се определя чрез напрежението на електрода  $U$  и мощността, разсеяна в почвата  $P$ :

$$R = \frac{U^2}{P} \quad (1)$$

Разсеяната мощност в почвата се дефинира чрез следното интегрално уравнение:

$$P = \int_V E \cdot J dV = \int_V \sigma \cdot E^2 dV = \int_V \frac{E^2}{\rho_s} dV, \quad (2)$$

където:  $J$  - плътност на тока ( $A/m^2$ );

$\rho_s$  - специфично съпротивление на почвата ( $\Omega \cdot m$ );

$\sigma$  - специфична проводимост на почвата ( $S/m$ );

Използвайки аналогията за чисто електрическо поле и нейната имплементация в ANSYS е много лесно отчитането на характеристиките на почвата, нейната слоеста структура, а също така и специфичното обемно съпротивление на електропроводящия бетон, в който ще се полагат заземителите. По този начин могат да се моделират и изследват цели заземителни уредби с произволна геометрия и размери при еднородна почва или при предефиниран двуслоен модел на почвата. За нуждите на симулациите са направени следните допускания:

- Всички метални части на заземителната уредба имат един и същи потенциал. Обикновено приложеното напрежение се прилага, като гранично условие и неговата стойност се избира произволно, като това не влияе върху точността;
- Почвата, заобикаляща моделирания заземител се приема за полусфера с радиус с радиус 20 m. (Когато през почвата протича електрически ток, потенциала на повърхността на земята около заземителя се изменя по хиперболичен закон. Повърхностният потенциал има по-големи стойности в близост до електрода и намалява с увеличаване на разстоянието от него. При безкрайно разстояние, повърхностният потенциал става  $\varphi = 0 V$ . Практически това става при разстояние от

мястото на протичане на ел. ток в земята не повече от 15 - 20 m);

- Двата еквивалентни почвени слоя се приемат със еднородна и изотропна структура и стойности на специфичното обемно съпротивление съгласно предефинираните двуслойни почвени модели;

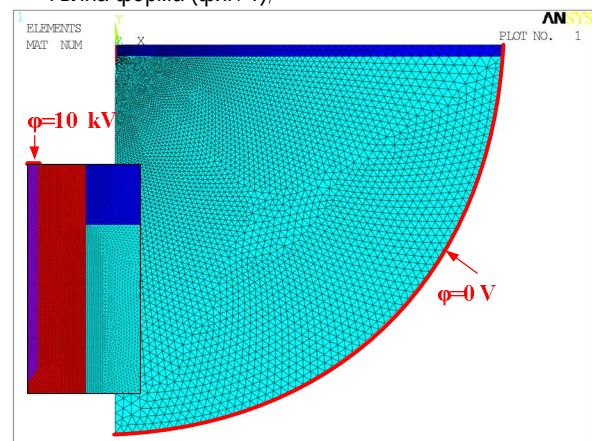
- Електрическото поле, създадено при протичането на ел. ток през електрода в почвата се представя в МКЕ чрез електрическия вектор-потенциал  $\varphi$  използвайки уравнението на Пуасон (3) и неговото гранично условие (4):

$$-\nabla(\sigma \cdot \nabla \varphi) = 0 \quad (3)$$

$$\varphi = 0 (x \rightarrow \infty), \text{ където } \frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

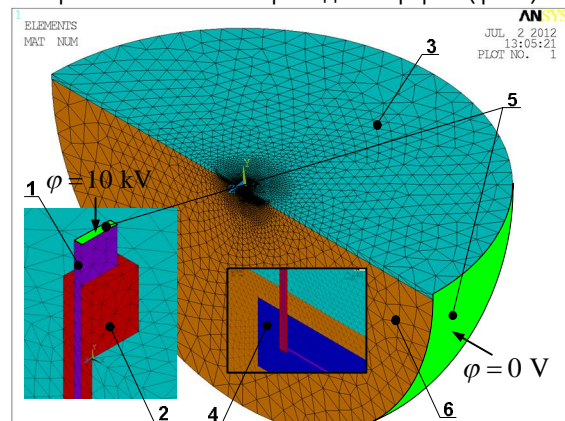
$\varphi$  - електрически вектор-потенциал (V)

- При вертикалните заземители заради осовата симетрия, е избрано двуизмерно моделиране, като дискретизацията е извършена чрез крайни елементи с триъгълна форма (фиг. 1);



Фиг 1: Вертикален заземител, положен в слой проводящ бетон, моделиран в ANSYS – дискретизация и зададени гранични условия

- При хоризонталните заземители, FEM моделът е триизмерен, поради липсата на осова симетрия. За опростяване на моделът е моделирана само половината геометрия. Относно дискретизацията, тук са избрани крайни елементи с пирамидална форма (фиг.2).



Фиг.2 - 3D модел на хоризонтален заземител в слой проводящ бетон, моделиран чрез ANSYS – дискретизация на геометрията и зададени гранични условия: 1-хоризонтален лентов заземител; 2 - изолация, 3 – I-ви еквивалентен повърхностен почвен слой с дебелина  $h$  и специфично съпротивление  $\rho_1 = 105 \Omega \cdot m$ , 4 - слой от електропроводящ материал около заземителя, 5 – повърхности, върху които са приложени гранични условия; 6 – II-ри еквивалентен почвен слой с безкрайна дебелина и специф. съпротивление  $\rho_2 = 52 \Omega \cdot m$

- Съпротивлението на заземяване при вертикалните (5) и хоризонталните(6) заземители се изчислява чрез интегриране в „Postprocessing“ модула на ANSYS, след като програмата е изчислила разпределението на

плътността на тока в почвата и през сечението на самия електрод:

$$I = \iint \vec{J}_N dP = 2\pi \cdot \int_0^r r \cdot \vec{J}_N dr \quad (5)$$

$$I = 2 \cdot \iint_S \vec{J}_N dS, \quad (6)$$

където:  $\vec{J}_N$  - нормална компонента на плътността на тока, спрямо повърхността на напречното сечение на електрода, където е приложено напрежение, като гранично условие, A/m<sup>2</sup>;

$P$  – площ на сечението на вертикалния електрод, m<sup>2</sup>;

$S$  – Половината от площта на сечението на хоризонталния заземител, m<sup>2</sup>;

### Геометрия и описание на моделираните в ANSYS единични вертикални и хоризонтални заземители

За нуждите на изследването, в ANSYS са моделирани 5 различни конфигурации единични заземители при двуслоен модел на почвата, отговарящи по геометрия и размери на реални физически образци представени подробно във (Велев и Петров, 2009), както следва:

1. Конвенционален вертикален тръбен заземител;
2. Вертикален тръбен заземител, положен в един концентричен слой електропроводящ бетон;
3. Вертикален тръбен заземител, положен в два различни концентрични слоя електропроводящ бетон с различна проводимост;
4. Конвенционален лентов хоризонтален заземител;
5. Лентов хоризонтален заземител в слой електропроводящ бетон с правоъгълно сечение;

### Верификация на представените двуслойни почвени модели

Верификацията на представените в доклада двуслойни почвени профили на почвата за конкретен терен е извършена чрез симулации в ANSYS и сравняване на полученото съпротивление на заземяване за 5 различни вида единични заземители с експериментални резултати от физически измервания.

### Изчислени стойности на съпротивлението на заземяване при разглежданите двуслойни модели на почвата чрез ANSYS

Резултатите от симулациите в ANSYS при вертикалните заземители за всеки от предефинираните двуслойни почвени модели са систематизирани в табл. 1

Таблица 1

Двуслоен почвен модел	Спец. съпротивление на първи слой	Спец. съпротивление на втори слой	Дебелина на първия почвен слой	Резултати от ANSYS		
				Конвенционален тръбен заземител	Вертикален електрод в един слой проводящ бетон	Вертикален електрод в два различни слоя проводящ бетон
				$R$	$R$	$R$
Метод на SUNDE	$\rho_1$	$\rho_2$	$h$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$
CYME CYMGrd	$\Omega.m$	$\Omega.m$	m	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$
SUNDE	105	52	0,6	64,16	47,06	44,23
CYME CYMGrd	112,19	46,38	0,5	56,24	42,83	40,02
RHO32	109,35	29,98	0,53	42,08	35,33	32,37

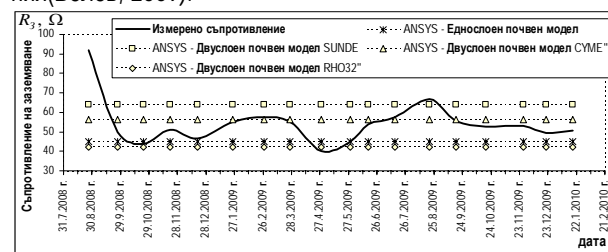
За хоризонталните електроди, резултатите са показани в табл. 2.

Таблица 2

Двуслоен почвен модел	Спец. съпротивление на първи слой	Спец. съпротивление на втори слой	Дебелина на първия почвен слой	Резултати от ANSYS	
				Конвенционален лентов хоризонтален заземител	Хоризонтален лентов заземител в слой проводящ бетон
				$R$	$R$
Метод на SUNDE	$\rho_1$	$\rho_2$	$h$	$\Omega$	$\Omega$
CYME CYMGrd	$\Omega.m$	$\Omega.m$	m	$\Omega$	$\Omega$
SUNDE	105	52	0,6	28,08	22,29
CYME CYMGrd	112,19	46,38	0,5	22,01	19,16
RHO32	109,35	29,98	0,53	15,14	14,49

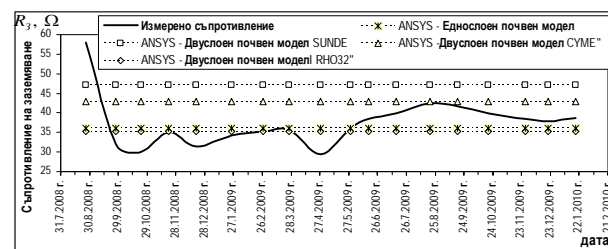
### Анализ и графична интерпретация на получените резултати

Получените резултати за съпротивлението на заземяване от симулациите с ANSYS на единични заземители при двуслоен модел на почвата са представени графично заедно с данни от физически измервания на реални заземители със същите размери от предходни изследвания (Велев, 2009):

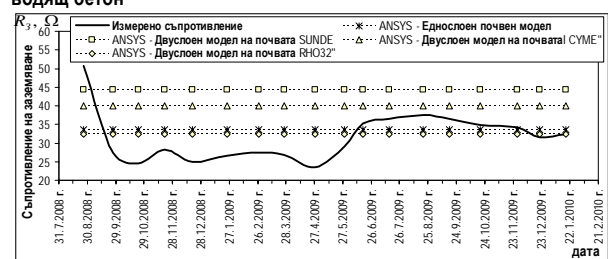


Фиг. 3. Резултати от изследванията за двуслойни почвени модели при единичен конвенционален вертикален заземител

При конвенционални вертикални заземители, използването на еднослойният почвен модел води до сериозни грешки в оразмеряването на ЗУ. Изчисленото съпротивление се явява винаги по-малко от действителното, а това е недопустимо. При двуслойният модел на почвата, получен от програмата RHO32 ситуацията е сходна. Добър подход в случая е използването на двуслойните почвени модели, получени чрез графо-аналитичния метод на SUNDE или посредством програмния продукт CYME CYMGrd.



Фиг. 4. Резултати от изследванията за двуслойни почвени модели при единичен вертикален заземител в един концентричен слой проводящ бетон

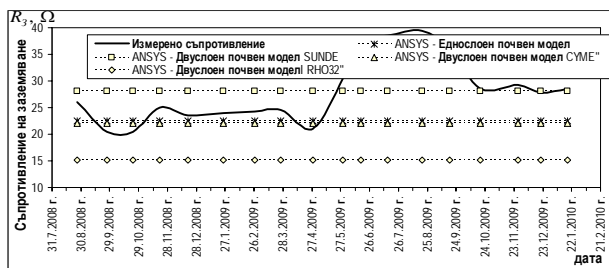


Фиг. 5. Резултати от изследванията за двуслойни почвени модели при единичен вертикален заземител положен в два различни концентрични слоя проводящ бетон

Когато вертикалният електрод е положен в един или два концентрични слоя проводящ бетон, използването на графо-аналитичният метод на SUNDE за създаване на двуслоен профил на почвата ще доведе до преоценка на вертикалните заземители и преразход на метал.

Използването на програмния продукт CYME CYMGrd води също до преоценка, но в рамките на допустимия запас.

Поради хигроскопичната природа на проводящия бетон, в който са положени заземителите, еднослойният почвен модел и двуслойният модел получен от програмата RHO32 също се явяват добър подход за използване при оразмеряването, въпреки че през сухите летни периоди от годината е възможно изчисленото съпротивление да превиши действителното.

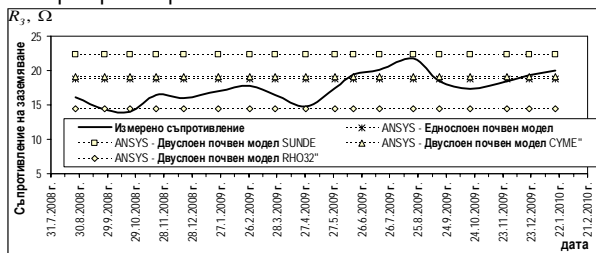


Фиг. 6. Резултати от изследванията за двуслойни почвени модели при единичен лентов хоризонтален заземител

Използването на двуслойният почвен модел получен от програмата RHO32 в този случай е недопустимо.

Еднослойният почвен модел и двуслойният модел получен от програмния продукт CYME CYMGrd дават почти еднакви и сравнително задоволителни резултати.

Най-добра сходимост в случая има двуслойният модел получен чрез метода на SUNDE, осигуряващ известен запас при проектирането.



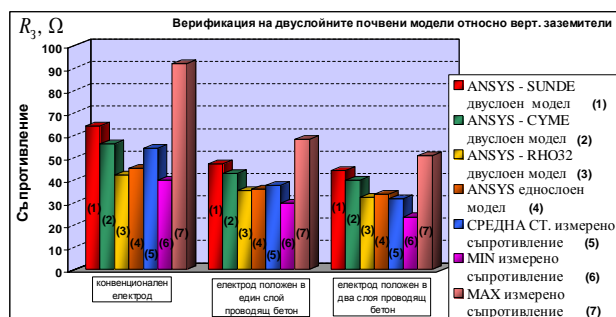
Фиг. 7. Резултати от изследванията за двуслойни почвени модели при единичен лентов хоризонтален заземител, положен в слой проводящ бетон

Когато хоризонталната заземителна шина се положи в проводящ бетон, еднослойното моделиране на почвата и двуслойният почвен модел получен чрез CYME CYMGrd дават отлична сходимост на резултатите със данните от физическите измервания.

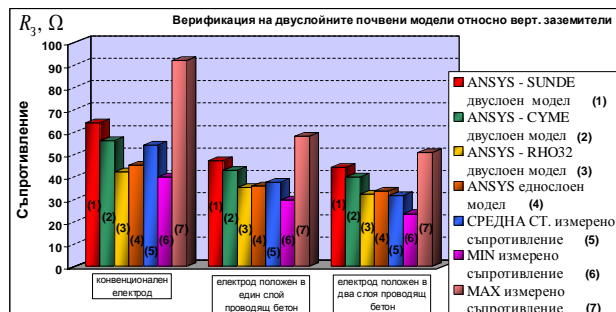
Ползването на двуслойния модел на почвата от продукта RHO32 води до значителни грешки.

Прилагането на метода на SUNDE отново води до преоценка на заземителя.

За по-добра прегледност и обективност при оценка на използваемостта на получените двуслойни почвени модели са построени и диаграмите от фиг. 8 и фиг. 9.



Фиг. 8. Приложение на двуслойни почвени модели за определяне на съпротивлението на вертикални заземители



Фиг. 9. Приложение на двуслойни почвени модели за определяне на съпротивлението на хоризонтални заземители

## Изводи

### А) Конвенционални заземители

- Използването на почвен модел с еднородна структура при оразмеряването на конвенционални заземителни уредби в много случаи води до грешки при проектирането. През сухите периоди от годината, заземителната уредба ще има по-високо съпротивление на заземяване от изчисленото, поради изсъхването и намаляването на проводимостта на горните пластове почва. Прилагането на корекционен сезонен коефициент, отразяващ влиянието на сезоните в голяма степен води до увеличаването на точността;
- Двуслойните модели на почвата получени чрез графо-аналитичния метод на SUNDE и от специализирани програмни продукти като CYME CYMGrd могат да се използват успешно и с голяма точност при проектирането, тъй като те отразяват в много добра степен слоестата структура на почвата и влиянието на сезоните.
- Програмният продукт RHO32 генерира двуслойни почвени модели чието използване е недопустимо, тъй като във всеки случай изчисленото съпротивление на заземяване ще бъде значително по-малко от действителното.

### Б) Заземители положени в проводящ бетон

- Прилагането на еквивалентен еднослоен модел на почвата при проектирането на заземителни уредби със заземители положени в слой проводящ бетон е добър подход. Без значение от вида и геометрията на заземителите, измерените стойности на съпротивлението на заземяване показват отлична сходимост със резултатите получени чрез симулации в ANSYS. Това се обяснява най-вече със хигроскопичната природа на проводящия бетон, който абсорбира и задържа в близост до електрода заобикалящата го влага от почвата и през сухите периоди от годината. В резултат на това колебанието на съпротивлението на заземяване през годината е много по-слабо изразено, в сравнение с конвенционалните заземителни уредби.
- Използването на продукта RHO32 и в този случай е рисково и не препоръчително;
- Използването на двуслойни почвени модели, като цяло при заземители, положени в слой проводяща среда

при проектирането водят до известно преоразмеряване на заземителната уредба и увеличаване на разхода на метал.

## Литература

IEEE Std 81-1983, *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a ground system*, American National Standards Institute, September 1984

IEEE Std 80-2000, *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, IEEE-SA Standards Board, January 2000

Thapar, B., V. Gerez, *Equivalent resistivity of non-uniform soil for grounding design*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, no. 2, pp. 759-769, Apr. 1995;

Velev, G. Ts., A. Weinläder, S. Tenbohlen, P. K. Petrov, *A new approach for analysis of nonconventional grounding installations by means of FEM*, 17<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering ISH 2011, 2011, Hannover, Germany, Book of abstracts / ISH 2011 : August, 22 – 26, 2011, ISBN 978-3-8007-3364-4

Иванов И., П. Калейчев, *Подход за вероятностна оценка на надеждността на електрозахранване на система за пожарна безопасност в АЕЦ*. Доклади Том 2, Енергиен Форум, Варна, 14 – 17 юни, 2006, с. 140 – 145;

Калейчев П., И. Иванов, *Симулация на пожари и пожарен риск в помещения на системите за безопасност в 5 и 6 ЕБ на "АЕЦ Козлодуй" ЕАД*, Списание "Енергетика", брой 6 – 7, септември – октомври 2008, с. 55 – 59

Стефанов, С, Т. Христова, Л. Атанасов, *Относителна плътност на електрическия ток създаден от два разполярни източника на ток (заземители) във*

*функция от разстоянието между тях и от дълбочината на разпространението на тока в земята*, Годишник на Минно-геоложкия Университет „Св. Иван Рилски“ – София, Свитьк III: Механизация, електрификация и автоматизация на мините, 2009, ISSN 1312-1820;

Стефанов, С, Т. Христова, Л. Атанасов, *Потенциал на електрическото поле в произволна точка в земята, създаден от разполярни линейни и линейен и токовиден източници на ток*, Годишник на Минно-геоложкия Университет „Св. Иван Рилски“ – София, Свитьк III: Механизация, електрификация и автоматизация на мините, 2009, ISSN 1312-1820;

Велев, Г. Ц., - *Физическо моделиране и статистически анализ на експлоатационните параметри на заземители с проводима бетонна обмазка за приложение в минната индустрия* – Годишник на Минно-геоложкия Университет „Св. Иван Рилски“ – София, Свитьк III: Механизация, електрификация и автоматизация на мините, 2009, ISSN 1312-1820;

Велев, Г. Ц., П. К. Петров, *Експериментално определяне специфичното обемно съпротивление на почвените слоеве в дълбочина чрез използване на еталонен електрод*, Годишник на Минно-геоложкия Университет „Св. Иван Рилски“ – София, Свитьк III: Механизация, електрификация и автоматизация на мините, 2011, ISSN 1312-1820.

Джустров К., *Контрол на изолационното съпротивление на акумулаторни батерии за руднични акумулаторни локомотиви*, 2007, София, Годишник на МГУ "Св. Ив. Рилски", том 50, 141-145