

МАТЕМАТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ И АНАЛИЗ НА ЗАЗЕМТЕЛИ С ПРОВОДИМА БЕТОННА ОБМАЗКА

Георги Велев ¹, Петър Петров ²

¹ Технически университет – Габрово, 5300 Габрово, g_velev@tugab.bg; g.velev@gmail.com

² Технически университет – Габрово, 5300 Габрово, petrov_p_tu@abv.bg

РЕЗЮМЕ. През последните две години на базата на сътрудничеството между Технически университет – Габрово и МГУ „Св. Иван Рилски“ са разработени и изследвани физически заземители с проводима бетонна обмазка за приложение при откритите рудници в нашата страна, основно с цел защита на металния електрод от агресивна среда и интензивна електрокорозия както и за намаляване на съпротивлението на заземяване в зони с високи стойности на специфичното обемно съпротивление на почвата. Всичко това налага пълно математическо моделиране на този вид нетрадиционни за инженерната практика заземители. Изведените и публикувани в тази статия изчислителни зависимости за изчисляване съпротивлението на единични хоризонтални и вертикални заземителни електроди в слой проводящ бетон ще дадат възможност за бързото навлизане на този тип заземители в българската практика и до разработването на цялостни методики и програмни продукти за оразмеряване на заземителни уредби от този тип.

MATHEMATICAL MODELLING AND ANALYSIS OF CONDUCTIVE CONCRETE ENCASED GROUNDING ELECTRODES

Georgi Tsonev Velevev ¹, Petar Kolev Petrov ²

¹ Technical University of Gabrovo, 5300 Gabrovo, g_velev@tugab.bg; g.velev@gmail.com

² Technical University of Gabrovo, 5300 Gabrovo, petrov_p_tu@abv.bg

ABSTRACT. Over the last two years of co-operation between the Technical University of Gabrovo and the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", physical instances of conductive concrete encased grounding electrodes has been developed and investigated for application in the outdoor mines in our country, mainly aiming electrode protection from aggressive soils and electro corrosion. Other purpose is decreasing the grounding installation resistance for areas with high values of the soil resistivity. All above demands entire mathematical modeling of these untraditional for the engineering practice grounding electrodes. The mathematical expressions for calculating the grounding resistance of single horizontal and vertical grounding electrodes incased in concrete, worked out and published inhere will allow for their fast implementation in the Bulgarian grounding practice and for development of overall sets of methods and software products for such type grounding installations' design..

Въведение

Изкуствените заземители се изработват най-често от стомана. Правени са опити да се използват мед или други метали, но не са се получили задоволителни резултати. Стоманените заготовки, които се използват за изкуствени заземители (тръби, пръти, ъглова стомана, лента) се поцинковат с цел предпазване от корозия. При монтажа, а и с течение на времето се получават нарушения на корозоустойчивото покритие и започва интензивна корозия. Този процес е особено интензивен в химически агресивни почви или при наличие в близост на електрифициран релсов транспорт (Анев и Данев, 1996; Манойлов, 1986).

От всичко това се вижда, че е актуален въпросът за максимално удължаване на живота на заземителя. В МГУ "Св. Иван Рилски" и Технически университет Габрово се изследва възможността за създаване на проводими обмазки на циментена основа. С нея успешно могат да се правят заливки на поцинкованите заготовки за изкуствени заземители и по този начин те да бъдат предпазени от нежелани увреждания. Разработена е технология, позволяваща извършване на тази процедура от техническия персонал по места (Петров и Велев, 2007).

Прилагането на предложеното техническо решение поставя за решаване следния проблем, имащ отношение към оразмеряване на конкретен заземител или заземителна инсталация: необходимост от аналитична зависимост, позволяваща определяне стойността на съпротивлението за единичен заземител в слой проводящ бетон при условие, че са известни неговите основни размери и параметри.

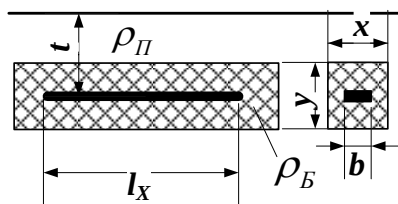
Аналитични зависимости за определяне съпротивлението на единични заземители с проводима бетонна обмазка

Хоризонтални заземители

При хоризонталните заземители с проводима бетонна обмазка е използван подход за извеждане на аналитичен израз за съпротивлението на заземяване съгласно предписанията на международния стандарт IEEE Std. 80 – 2000 - стандарт за безопасност при защитно заземяване на подстанции за променлив ток, в сила от 30 януари 2000 г., според който изведеното съпротивление представлява сума от две съставлящи: (1) съпротивление на заземяване на тялото образувано от проводимия бетон, приемайки

че специфичното му съпротивление е безкрайно малко;
(2) съпротивление на заземяване на електрода, поставен в среда проводящ бетон, с крайни размери.

Използвайки гореспоменатата методика са изведени крайни изрази за съпротивлението на заземяване на хоризонтален заземител от лентов тип съгласно фиг. 1:



Фиг. 1. Основни размери и параметри на хоризонтален заземител от лентов тип с еднослойна бетонова обмазка

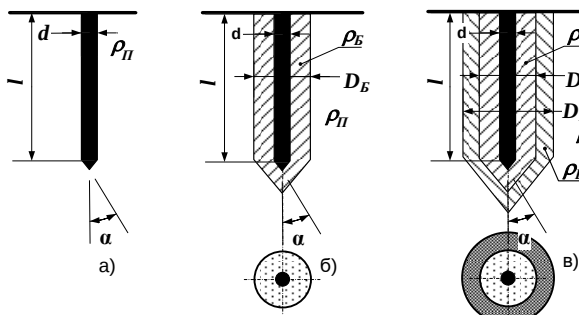
$$R_x = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot l} \left(\rho_{\Pi} \ln \frac{\pi l^2}{2(x+y)t} + \rho_{\text{Б}} \cdot \ln \frac{2l^2}{b \cdot t} - \rho_{\text{Б}} \ln \frac{\pi l^2}{2(x+y)t} \right), \Omega \quad (1)$$

Получена е и опростената зависимост (2), която е удобна за прилагане в практиката:

$$R_x = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot l} \left(\rho_{\Pi} \ln \frac{\pi l^2}{2(x+y)t} + \rho_{\text{Б}} \cdot \ln \frac{(x+y)}{b} \right), \Omega \quad (2)$$

Вертикални заземители

При вертикалните заземители е използван интегралният подход при цилиндрична симетрия за определяне на аналитичен израз за съпротивлението на вертикален заземител от конвенционален тип – зависимост (3). Цилиндричната симетрия позволява получаването на крайни изрази за изчисляване съпротивлението на вертикален заземител с един (4) и два концентрични слоя проводима бетонна обмазка (5) съгласно фиг. 2 отчитайки заострянето на металния електрод.



Фиг. 2. Графично представяне на вертикален заземител: а) от конвенционален тип; б) с еднослойна обмазка; в) с двуслойна обмазка

$$R_{\text{Б}} = \frac{\rho_{\Pi} \cdot \text{tg} \alpha}{\pi \cdot m} \ln \frac{d+2m}{d}, \Omega \quad (3)$$

$$R_{\text{Б1}} = \frac{\text{tg} \alpha}{\pi \cdot m} \left[\rho_{\text{Б}} \ln \frac{(d+2m)D_{\text{Б}}}{d(D_{\text{Б}}+2m)} + \rho_{\Pi} \ln \frac{D_{\text{Б}}+2m}{D_{\text{Б}}} \right], \Omega \quad (4)$$

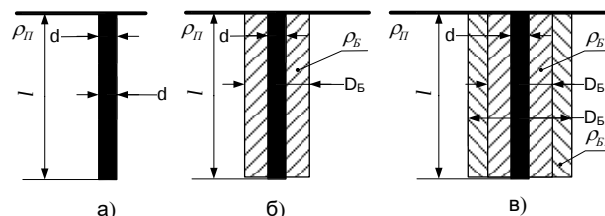
$$R_{\text{Б2}} = \frac{\text{tg} \alpha}{\pi \cdot m} \left[\rho_{\text{Б2}} \ln \frac{(D_{\text{Б1}}+2m)D_{\text{Б2}}}{D_{\text{Б1}}(D_{\text{Б2}}+2m)} + \rho_{\text{Б1}} \ln \frac{(d+2m)D_{\text{Б1}}}{d(D_{\text{Б1}}+2m)} + \rho_{\Pi} \ln \frac{D_{\text{Б2}}+2m}{D_{\text{Б2}}} \right], \Omega \quad (5)$$

, където $m = 2 \cdot l \cdot \text{tg} \alpha$

Аналогични крайни зависимости за съпротивлението на вертикален заземител в един (7) и два (8) концентрични слоя проводим бетон са изведени и на базата на зависимост (6), получена по метода на огледалните образи и електростатичната аналогия.

$$R_{\text{Б}} = \frac{\rho_{\Pi}}{2\pi l} \left\{ \ln \frac{4l}{d} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{d}{4l} \right)^2} \right) + \frac{d}{4l} - \sqrt{1 + \left(\frac{d}{4l} \right)^2} \right\}, \Omega \quad (6)$$

Въз основа на (6) и предписанията в международният стандарт IEEE Std. 80-2000 са изведени зависимости (7) и (8).



Фиг. 3. Графично представяне на вертикален заземител, математически моделиран с помощта на метода на огледалните образи: а) конвенционален заземител; б) с еднослойна обмазка; в) с двуслойна обмазка

$$R_{\text{Б1}} = \frac{\rho_{\text{Б}}}{2\pi l} \left\{ \ln \frac{4l}{d} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{d}{4l} \right)^2} \right) + \frac{d}{4l} - \sqrt{1 + \left(\frac{d}{4l} \right)^2} \right\} + \frac{\rho_{\Pi} - \rho_{\text{Б}}}{2\pi l} \left\{ \ln \frac{4l}{D_{\text{Б}}} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{D_{\text{Б}}}{4l} \right)^2} \right) + \frac{D_{\text{Б}}}{4l} - \sqrt{1 + \left(\frac{D_{\text{Б}}}{4l} \right)^2} \right\}, \Omega \quad (7)$$

$$R_{\text{Б2}} = \frac{\rho_{\text{Б1}}}{2\pi l} \left\{ \ln \frac{4l}{d} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{d}{4l} \right)^2} \right) + \frac{d}{4l} - \sqrt{1 + \left(\frac{d}{4l} \right)^2} \right\} + \frac{\rho_{\text{Б2}} - \rho_{\text{Б1}}}{2\pi l} \left\{ \ln \frac{4l}{D_{\text{Б1}}} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{D_{\text{Б1}}}{4l} \right)^2} \right) + \frac{D_{\text{Б1}}}{4l} - \sqrt{1 + \left(\frac{D_{\text{Б1}}}{4l} \right)^2} \right\} + \frac{\rho_{\Pi} - \rho_{\text{Б2}}}{2\pi l} \left\{ \ln \frac{4l}{D_{\text{Б2}}} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{D_{\text{Б2}}}{4l} \right)^2} \right) + \frac{D_{\text{Б2}}}{4l} - \sqrt{1 + \left(\frac{D_{\text{Б2}}}{4l} \right)^2} \right\}, \Omega \quad (8)$$

Използваните означения в горните математически зависимости са както следва:

$\rho_{\text{Б}}$ – специфично съпротивление на проводимия бетон

при еднослойно обмазани заземители, $\Omega \cdot \text{m}$;

ρ_{Π} – специфично съпротивление на почвата, $\Omega \cdot \text{m}$;

l – дължина на вертикалния заземителя, m ;

d – диаметър на вертикалния електрод, m ;

$D_{\text{Б}}$ – външен диаметър на проводимата бетонова обмазка при еднослойно обмазан вертикален заземител, m ;

α – половината от ъгъла на заостряне при върха на вертикалния електрод, deg;

$\rho_{Б1}$ – специфично съпротивление на вътрешния слой проводящ бетон контактуващ непосредствено с металния електрод при вертикален заземител в два концентрични слоя проводящ бетон, $\Omega \cdot m$;

$\rho_{Б2}$ – специфично съпротивление на външния слой проводящ бетон контактуващ непосредствено с почвата при вертикален заземител в два концентрични слоя проводящ бетон, $\Omega \cdot m$;

$D_{Б1}$ – външен диаметър на вътрешния слой проводящ бетон контактуващ непосредствено с металния електрод при вертикален заземител в два концентрични слоя проводящ бетон, m;

$D_{Б2}$ – външен диаметър на външния слой проводящ бетон контактуващ непосредствено с почвата при вертикален заземител в два концентрични слоя проводящ бетон, m;

l_x – дължина на хоризонталния лентов заземител, m;

x – ширина на слоя проводим бетон (ширина на канала, в който е положен хоризонталния електрод), m;

y – дебелина на слоя проводящ бетон, в който е положен хоризонталния електрод, m;

t – дълбочина на полагане на лентовия заземител, под нивото на земята, m.

Оценка, точността на получените зависимости

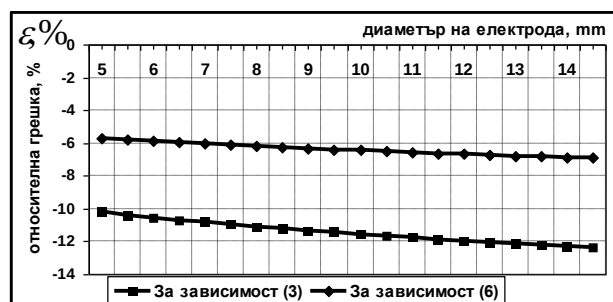
Оценката точността на изведените зависимости за изчисляване съпротивлението на заземители с проводима бетонна обматка е направена само за вертикалните заземители, тъй като при хоризонталните електроди няма утвърдени от практиката и теорията математически изрази като база за сравнение.

1 случай – конвенционален вертикален заземител

За оценка грешката, която се допуска при определяне съпротивлението на вертикален заземител по (3) и (6) ще се позовем на конкретен пример и няколко случая, при които се изменя един от геометричните параметри на заземителя, а останалите са фиксирани. Като базова зависимост за сравняване на резултатите е използвана утвърдената от практиката зависимост (9):

$$R_B = \frac{\rho_{\Pi}}{2 \cdot \pi \cdot l} \ln \frac{4l}{d}, \Omega \quad (9)$$

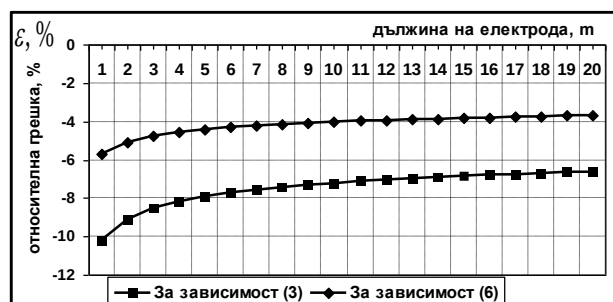
Тъй като специфичното съпротивление на почвата в трите зависимости представлява коефициент на пропорционалност, този параметър ще бъде фиксиран със стойност $\rho_{\Pi} = 100 \Omega \cdot m$, тъй като неговото изменение не води до промяна на отчетената относителна грешка. Примерните размери на електрода са: дължина $l = 1 m$, диаметър $d = 20 \cdot 10^{-3} m$, половината от ъгъла на заостряне при върха на заземителя $\alpha = 30^\circ$. Изследванията са извършени с помощта на програмния продукт Mathcad. Резултатите за относителната грешка в проценти която се получава използвайки (3) и (6) са систематизирани графично на фиг. 4 и фиг. 5



Фиг. 4. Относителна грешка в проценти на изведените зависимости за определяне съпротивлението на конвенционален вертикален заземител при изменение на диаметъра на електрода d

От фиг. 4 и фиг. 5 могат да бъдат направени следните изводи:

- средните грешки при използване на зависимости (3) и (6) са 9,46 % и съответно 5,28 %, които са напълно допустими при проектантската дейност;
- грешките са отрицателни, което ще доведе до по-малък разход на метал при проектирането на заземителните уредби използвайки (3) и (6);



Фиг. 5. Относителна грешка в проценти на изведените зависимости за определяне съпротивлението на конвенционален вертикален заземител при изменение на дължината на електрода l

- точността на зависимостите се гарантира в следствие на използвания точен математически апарат, прилагане директно законите на теоретичната електротехника и липса на приближения и опростяване на изразите;
- При използване на (3) се отчита и заострянето на електрода, което води до допълнително намаляване на изчисленото съпротивление, в следствие на което се обяснява и по-голямата отрицателна грешка в сравнение с (6), където заострянето на заземителя се пренебрегва;

2 случай – вертикален заземител с еднослойна проводима бетонна обматка

За оценка акуратността на изведените зависимости (4) и (7) като база за сравнение ще бъде използвана зависимост (10), която е посочена в международния стандарт IEEE Std. 80-2000:

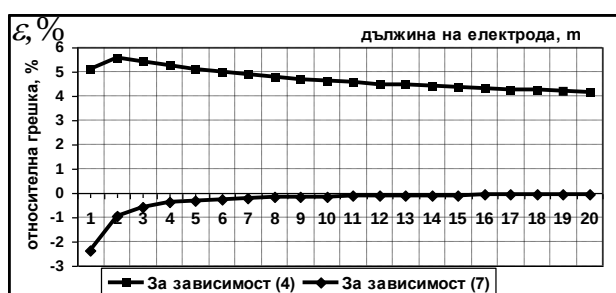
$$R_3 = \frac{1}{2\pi l} \left(\rho_B \left[\ln \left(\frac{D_B}{d} \right) \right] + \rho_{\Pi} \left[\ln \left(\frac{8l}{D_B} \right) - 1 \right] \right), \Omega \quad (9)$$

Математическите пресмятания са извършени отново в средата Mathcad, като за диаметър на обматката е прието

$D_5 = 0,3 \text{ m}$, а за специфичното ѝ съпротивление $\rho_5 = 15 \Omega \cdot \text{m}$, като резултатите са представени графично на фиг. 6 и фиг. 7.



Фиг. 6. Относителна грешка в проценти на изведените зависимости за определяне съпротивлението на вертикален заземител с един концентричен слой проводящ бетон при изменение на диаметъра на електрода d



Фиг. 7. Относителна грешка в проценти на изведените зависимости за определяне съпротивлението на вертикален заземител с един концентричен слой проводящ бетон при изменение на дължината на електрода l

От фиг. 6 и фиг. 7 може да се направят следните изводи:

- грешката, която се допуска използвайки изведената зависимост (4) при изменение на диаметъра на заземителя средно е 5,25 % спрямо (10) и почти не се изменя с увеличаване на диаметъра на заземителя, и съответно е 4,7 % при фиксиран диаметър и изменение на дължината на вертикалния заземител. Тоталната осреднена грешка за двата опита при използване на (4) ще бъде $\frac{5,27 + 4,7}{2} = 4,99\%$, която е напълно приемлива при проектирането;
- грешката, която се допуска използвайки изведената зависимост (7) при изменение на диаметъра на заземителя средно е 2,47 % спрямо зависимост (10), и съответно 0,31 % при фиксиран диаметър и изменение

на дължината на вертикалния заземител. Тоталната осреднена грешка при използване на (7) ще бъде $\frac{2,47 + 0,31}{2} = 1,39\%$;

- изчислената грешка от 4,99% при използване на зависимост (4) е напълно допустима и въпросната зависимост може да се използва в проектантската практиката.

Закljučения

- Средната относителна грешка при прилагането на всички получени математически изрази за пресмятане съпротивлението на единични заземители с проводима бетонна обмазка не превишава 10 % във сравнение с широко използвани в практиката зависимости;
- Въз основа на постигнатата точност, може да се твърди със сигурност, че представените в този вид математически зависимости могат да се използват при оразмеряването на заземителни уредби с нетрадиционни заземители от посочения тип, а също така и да се имплементират в специализирани програмни продукти за проектиране на заземителни уредби;
- Така разработеният пълен математически модел на заземители с проводима бетонна обмазка би могъл да допринесе за по-бързото популяризиране и въвеждане в експлоатация на заземителите в проводящ бетон.

Литература

- Анев, Г., Ив. Данев. 1996. *Електробезопасност в откритите рудници и в индустрията*, ЕТ Накра, гр.Раднево
- Манойлов, В.Е. 1986. *Основы электробезопасности*, Энергия, Ленинград.
- Петров, П. К., Г. Ц. Велев. 2007. Подобряване съпротивлението на заземители чрез използване на проводима обмазка - *Списание „Безопасност на труда и трудова медицина“*, ЕСКАРГО – София, брой 4.
- IEEE Std. 80-2000. January 2000. *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, IEEE-SA Standards Board
- Chow, Y. L., M. Elsherbiny, M. Salama. July 1996. *Resistance formulas of grounding Systems in Two-Layer Earth*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, no. 3,

Препоръчана за публикуване
от Редакционен съвет