

УДК 621.313

П.Ф. Буданов, А.М. Чернюк

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

## РОЗРОБКА МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ОПОРУ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОГО ЗАЗЕМЛЕННЯ

Проведений аналіз існуючих методів заземлення електроустановок, при яких передбачено навмисна локальна зміна параметра питомого опору ґрунту (обробка ґрунту солями, електролітичне заземлення і т.п.), показав, що розрахункові моделі для визначення опору електролітичного заземлення базуються на класичних розрахункових моделях стаціонарних заземлювачів, і при цьому не враховуються особливості, характерні для електролітичного заземлення, де є навмисне формування певної структури і властивостей ґрунту в місці заземлення. У зв'язку з цим запропонований метод розрахунку опору розтіканню струму електролітичного заземлення з врахуванням перколяційних і фрактальних властивостей пористої структури неоднорідного середовища ґрунту.

**Ключові слова:** електроліт, електролітичне заземлення, опір розтіканню струму, розрахунок опору електролітичного заземлення, електролітичний контакт.

### Вступ

Спорудження заземлюючих пристроїв електроустановок з нормованим опором заземлення в ґрунтах з високим питомим опором розтікання струму частенько викликає великі складнощі і вимагає застосування додаткових заходів по зниженню опору ґрунту [1 – 3]. Існує ряд методів, заснованих не на збільшенні площі контакту заземлювача з ґрунтом, а на умисній локальній зміні структури і властивостей самого ґрунту, спрямованих на зниження його питомого опору [4, 5].

Застосовується просочення ґрунту солями натрію і калію, сульфату кальцію. Піщані ґрунти обробляють розчином бетониту. Для запобігання вимивання цих речовин з ґрунту створюється водонепроникний шар навколо відповідного об'єму ґрунту. Також використовуються речовини з високою провідністю, але стійкі до розчинення і вимивання. На цьому заснований метод Саніка, згідно з яким в ґрунт вносяться розчини, в яких після їх змішення утворюються водонерозчинні з'єднання (гель циаміда калію і заліза силикагель та ін.). Проте метод Санніка досить трудомісткий і дорогий.

Подібний принцип реалізується при використанні гіпс-ангідриду. Ангідрид щільністю близько  $2,3 \text{ г/см}^3$  зазвичай безбарвний, в присутності води поступово перетворюється на гіпс. При цьому розчинність у воді гіпсу і ангідриду незначна: концентрація ненасиченого розчину складає близько 0,2%.

Якщо в ґрунті присутня певна кількість сульфату кальцію, то ґрунтовий розчин є насиченим і його питомий опір відповідає опору болотистого ґрунту, що добре проводить.

Для кам'янистих і скельних порід характерні високий питомий опір ґрунту і наявність розвинутої мережі порожнеч, і якщо в нормальних ґрунтах ущільнення ґрунту навколо стержнів відбувається протягом місяця, в ракушняку – за 2 року, то в мергеле-

вих і скельних ґрунтах цього не відбувається взагалі. З метою ущільнення контакту заземлювача з таким видом ґрунту застосовується заливка струмопровідним наповнювачем.

Розроблений цілий ряд пристроїв захисного заземлення (як для стаціонарних, так і для мобільних енергооб'єктів), заснований на принципі електролітичного заземлення.

Окрему групу електроустановок складають пересувні електроустановки (ПЕУ), які характеризуються рядом особливостей.

В процесі роботи ПЕУ випробовують цілий ряд зовнішніх негативних дій: дія атмосферних опадів, перепади температур, вібрація, запилювання і забруднення. Також особливістю роботи ПЕУ є наявність великого числа контактних з'єднань розподільної кабельної мережі і можливості її ушкодження іншими механізмами.

Такий режим роботи ПЕУ дозволяє віднести цей тип електроустановок до об'єктів підвищеної небезпеки поразки обслуговуючого персоналу електричним струмом.

У відповідності до [1 – 3] заземлення ПЕУ повинне виконуватися так само, як і для стаціонарних електроустановок. Проте, спорудження заземлюючих пристроїв з нормованим опором заземлення для ПЕУ часто неможливе унаслідок їх роботи на ґрунтах з високим питомим опором. Спорудження заземлюючих пристроїв класичної конструкції з вертикальними металевими електродами в таких ґрунтах представляє серйозну проблему і пов'язано зі значними матеріальними і часо-трудовими витратами, а режим роботи ПЕУ передбачає їх високу мобільність, що, з одного боку, вимагає розробки найбільш універсальної системи захисного заземлення, а з іншого – вносить в розрахунки чинник невизначеності параметрів ґрунту в місці можливого заземлення. До теперішнього часу не розроблено такої методики визначення опору заземлюючого пристрою, що вра-

ховує характерні зміни параметрів ґрунту в місці навмисно створеної локальної електролітичної неоднорідності. Розрахунок подібних заземлень ґрунтується на класичних методиках розрахунку заземлювачів стаціонарних енергооб'єктів. Виходячи з цього, можна стверджувати, що розрахунки опору заземлення ПЕУ носять дуже наближений характер.

**Метою статті** є розробка методу розрахунку опору електролітичного заземлення з використанням апарату теорії перколяції та фрактальної геометрії.

## Основний матеріал

Основними параметрами, що беруть участь в розрахунку опору пристроїв, що заземляють, є геометричні розміри конструктивних елементів заземлювача (виконані, як правило, з металу, що дозволяє нехтувати їх власним опором) і інтегральний показник властивостей ґрунту – питомий опір ґрунту  $\rho$ , який характеризує властивість різних ґрунтів різною мірою проводити електричний струм [6, 8].

Саме цей параметр і визначає значну погрішність при аналітичному розрахунку опору заземлюючого пристрою, оскільки є функцією досить великого числа випадкових чинників (структури ґрунту, наявності природного електроліту, температури, наявності включень, що високо проводять, і так далі). Накопичений багатий досвід визначення характеристик ґрунту експериментальним шляхом в лабораторних умовах і в польових випробуваннях [4].

Для визначення питомого опору ґрунту в лабораторних умовах у відповідності з схемою вимірювання (рис. 1) користуються відомою формулою

$$\rho = R \frac{S}{l}, \text{ Ом}\cdot\text{м}, \quad (1)$$

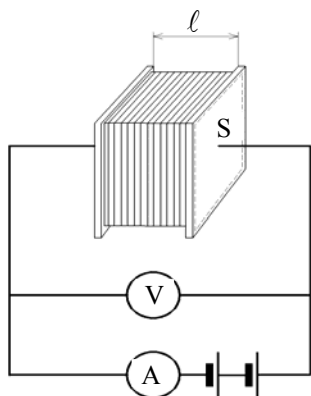


Рис. 1. Схема вимірювання питомого опору зразку ґрунту

де  $R$  – опір зразка ґрунту, Ом;  $S$  – площа поперечного перерізу зразка,  $\text{м}^2$ ;  $l$  – довжина зразка, м.

У польових умовах найбільш поширеним методом є метод вертикального електродного зондування (ВЕЗ), заснований на вивченні ділових опорів ґрунту шляхом створення в ньому штучного електричного поля у відповідності з схемою на рис. 2.

Існує цілий ряд методів ВЕЗ. Найбільш поширеним з них є двополюсний метод, триполюсний установки Гуммеля і Шлюмберже, чотириполюсний установки Венера і Шлюмберже (включаючи його симетричну чотириполюсну установку). У енергетиці для цілей ВЕЗ найбільше застосування знайшла чотириелектродна несиметрична установка Бурхдорфа і симетрична і несиметрична установки на базі вимірника опору заземлення типу МС-08.

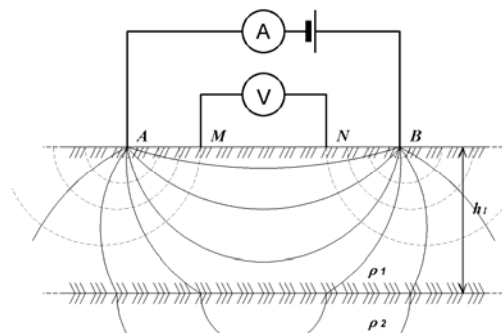


Рис. 2. Схема вертикального електродного зондування в землі

Ці дослідження показують, що  $\rho$  різних ґрунтів може мінятися в дуже широких межах, проте і в межах одного і того ж ґрунту  $\rho$  не залишається постійним, а змінюється залежно від конкретної фізико-геологічної обстановки в тисячі і десятки тисяч разів [4]. Це пояснюється тим, що опір ґрунту визначається цілим рядом чинників, найголовнішими з яких є: кількість струмопровідного компонента (природного електроліту); питомий опір природного розчину (ґрунтових вод) що заповнює пори і тріщини ґрунту; будова струмопровідних шляхів, тобто структура і текстура ґрунту; температура ґрунту.

**Перший чинник** визначає залежність питомого опору ґрунту від його пористості (порожнестості), тріщинуватості і від міри заповнення цього порожнього простору підземними водами. Чим вище пористість ґрунту, заповнена природним електролітом, тим менше питомий опір ґрунту. Цим зокрема пояснюється широко відоме явище різкого зменшення питомого опору ґрунту нижче за рівень ґрунтових вод. Особливо чітко це проявляється для ґрунтів з піщаною основою, гальці і особливо в тріщинуватих скельних породах.

**Другий чинник** залежить від складу природного електроліту, що заповнює пористий простір. Загальновідомо, що хімічно чиста вода, до якої по своєму складу найбільш близька вода дощова, є діелектриком. Проте через велику дисоціюючу здатність води, вона розкладає молекули розчинених в ній речовин (присутніх в ґрунті) на іони, утворюючи електролітичний розчин відповідної концентрації. Залежність питомого електричного опору від концентрації розчину дуже велика (табл. 1). Як бачимо, найбільш різке зниження опору спостерігається при найменшому змісті розчи-

неної речовини. Подальше збільшення концентрації несуттєво впливає на провідність розчину.

Таблиця 1

Питомий опір розчинів солей з різною концентрацією

№ з/п	Концентрація розчинених речовин, г/л	Питомий опір Ом·м
1	Чиста вода	$25 \cdot 10^4$
2	0,01	400...600
3	0,1	45...55
4	1	5...6
5	10	0,6...0,7
6	100	0,07...0,1

Питомий електричний опір водних розчинів різних солей дуже близькі один до одного, що говорить про те, що хімічний склад солей, що беруть участь в розчині, значення не має. Саме тому в розрахункових моделях складні багатосольові розчини замінюють розчином якої-небудь однієї солі, що має основну роль в гідрохімічному районі.

*Третім чинником*, що визначає питомий електричний опір, являється будова струмопровідних шляхів, яка залежить від структури і текстури ґрунту. Ця особливість відбивається так званим структурним коефіцієнтом, або параметром пористості  $P_p$ .

Пористі порожнечі заповнюються розчином води, яка знаходиться в двох станах: в зв'язаному (гігроскопічному) стані і гравітаційної води, здатної пересуватися по порах, порожнечах і тріщинах ґрунту під силою тяжіння.

Вважається, що струм в ґрунтах поширюється в основному по пов'язаній воді, біля поверхні порових каналів. При цьому на величині і характері питомого опору сильно позначаються особливості цих каналів.

Діапазон зміни питомого електричного опору ґрунтів, що володіють як електронною, так і іонною провідністю, величезний – від одиниць до десятків тисяч омметрів.

Електропровідність ґрунту, якщо він не містить високих концентрацій мінералів, що проводять, при звичайних температурах визначається кількістю природного електроліту, що складається з ґрунтової води і розчинених в ній мінералів, а також характером розподілу його в ґрунті.

Питомий опір  $\rho$  ґрунту можна зіставити з вмістом води, використовуючи емпіричну формулу (2):

$$\rho = a \rho_w \Phi^{-m} S^{-n}, \quad (2)$$

де  $\rho_w$  – питомий електричний опір води, що міститься в ґрунті;  $\Phi$  – пористість;  $S$  – доля порового об'єму, заповненого водою;  $a$ ,  $m$ ,  $n$  – емпіричні параметри.

Параметр  $a$ ,  $m$ ,  $\Phi$  емпіричні і коливаються для одного і того ж ґрунту від 2...3 разів, а значення  $n$  дуже близько до 20 при заповненні більше 30% порового простору, а для порід, у яких вода не змочує зерна мінералів, параметр  $n \approx 10$ .

Складені таблиці рекомендованих значень питомого електричного опору верхнього шару землі та гірських порід, межі питомого електричного опору порід, значень пористості водонасичених порід.

Усі значення  $\rho$  отримані емпіричним шляхом справедливі тільки для конкретної точки заземлення в конкретний момент часу, а усереднені показники  $\rho$  для характерних ґрунтів визначаються в межах з розбіжністю верхньої і нижньої межі на порядок, а іноді і більш ніж на два порядки.

Значний вплив на опір розтіканню струму в ґрунті робить температура, при якій протікає процес.

Нижче за точку замерзання природного електроліту чинник температури набуває вирішального значення. Так, із збільшенням температури підвищується рухливість іонів, а отже падає опір (в середньому на 2% на кожен градус підвищення температури). Ця залежність визначається формулою (3).

$$\rho_t = \frac{\rho_{18}}{1 + \alpha(t - 18^\circ)}, \quad (3)$$

де  $\rho_t$  – питомий електричний опір породи при цій температурі  $t$ ;  $\rho_{18}$  – питомий опір породи при температурі  $18^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  – температурний коефіцієнт електропровідності. Як і інші речовини, ґрунти розділяються на електронні провідники (провідники першого роду), в яких електричні заряди переносяться вільними електронами, і на іонні провідники (провідники другого роду), в яких електричні заряди переносяться іонами розчинів, що знаходяться в порах ґрунту. Проте слід зауважити, що практично в будь-якому ґрунті присутній обидва види провідності.

У роботах [6 – 8] авторами був запропонований і досліджений метод електролітичного заземлення, який дозволяє штучно понизити  $\rho$ . В роботі [7] була визначена форма об'ємного тіла та досліджені перколяційні властивості елементів пористої структури неоднорідного середовища різних ґрунтів [8].

Крім того, в роботі [8] було проведено дослідження кластера перколяції і показано, що він утворюється за випадковим законом і виглядає як нерегульована система, проте має внутрішній порядок, який характеризується і проявляється поблизу порогу протікання [8, 9] на певному обмеженому масштабі, який для завдання протікання електроліту через пористу структуру ґрунту обмежується мінімальними розмірами пори  $r_{0\text{пор}}$  і розмірами кластера  $R_{\text{кл}}$ , тобто масштаб виміру  $r_{0\text{пор}} < r < R_{\text{кл}}$ .

Отже можна зробити висновок про те, що кластер перколяції [8, 9] по суті є прикладом випадкового статистичного фрактала [10, 11], а отже має фрактальні властивості, тобто характеризується і визначається фрактальною розмірністю  $d_f$ .

У роботі [8] авторами був змодельований процес електролітичного заземлення в пористій структурі неоднорідного середовища ґрунту.

При розгляді структури нескінченного кластера перколяції в об'ємі електролітичного тіла було отримано, що його розмір  $R_{кл}$  фактично являється розміром об'ємного електролітичного тіла  $R_{об.т}$ .

Звідси витікає, що для забезпечення каналів провідності від діелектричних шарів до шарів ґрунту, що проводять, як глибина  $H$  протікання електроліту через пористу структуру об'ємного електролітичного тіла і досягнення стабільно стійких шарів провідності в неоднорідному середовищі ґрунту, запропоновано прийняти розмір кластера перколяції  $R_{кл}$ , тобто  $R_{кл} = H$ .

Також необхідно звернути увагу на те, що згідно теорії протікання (перколяції) для забезпечення провідності вистачає організації навіть одного каналу протікання електроліту, тобто досить розглянути розрахунок опору розтіканню струму в одному каналі протікання  $R_3^{1кан}$  (у одному  $г$  – ланцюжку), як показано на рис. 3.

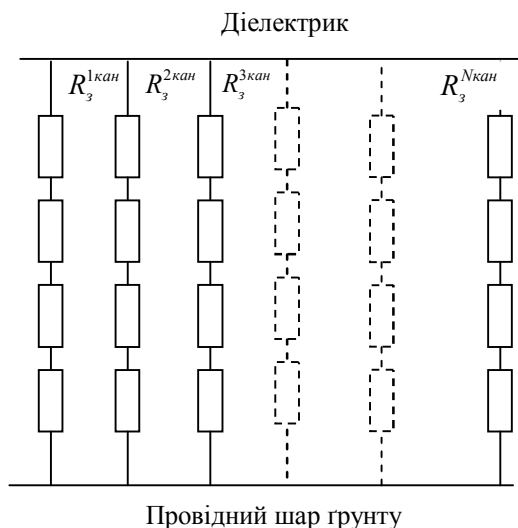


Рис. 3. Схема розрахунку опору розтіканню струму в одному каналі протікання

Як відомо, в основі відомих методів розрахунку опору заземлення входять наступні величини: питомий опір ґрунту  $\rho$ ; величина лінійного розміру заземлювача  $L$ , а також безрозмірні коефіцієнти, залежні від форми заземлювача і умов його заглиблення, тобто від неоднорідності ґрунту.

Для розрахунку опору заземлення  $R_3$  поодинокого заземлювача, як правило застосовується вираз (4):

$$R_3 = \frac{\rho}{\pi L} C, \quad (4)$$

де  $L$  – головний найбільший лінійний розмір заземлювача, м;  $C$  – безрозмірний коефіцієнт, залежний від форми заземлювача і умов його заглиблення.

Виходячи з вищесказаного, для завдання протікання електроліту по одному каналу провідності, визначимо  $R_3$ , припускаємо, що питомий опір в

каналі протікання дорівнює питомому опору масового електроліту, тобто  $\rho_{кл} = \rho_{эл}$ . Тоді отримуємо вираз (5) для визначення опору розтіканню струму  $R_3^{1кан}$  для одного каналу протікання:

$$R_3^{1кан} \sim \rho_{эл} \frac{\ell_{кан}}{S_0}, \quad (5)$$

де  $\ell_{кан}$  – кореляційна (звивиста) довжина каналу протікання;  $S_0$  – площа поверхневого контакту.

Звідки з виразу (3) отримуємо для  $\ell_{кан} \sim (R_{кл})^{d_{ск}}$  або  $\ell_{кан} \sim (H)^{d_{ск}}$ , а для  $S_0 = \pi a_0^2$  (де  $a_0$  – радіус пори), тоді, підставляючи значення  $\ell_{кан}$  та  $S_0$  в (5), отримаємо:

$$R_3^{1кан} \sim \rho_{эл} \frac{(R_{кл})^{d_{ск}}}{\pi a_0^2} \sim \rho_{эл} \frac{(H)^{d_{ск}}}{\pi a_0^2} \text{ (ом)}. \quad (6)$$

З урахуванням (6) і схеми розрахунку опору розтіканню струму в одному каналі протікання (рис. 1) витікає, що загальний опір електролітичного заземлення  $R_{\Sigma 3}$  для усіх каналів протікання визначається з виразу (7):

$$\frac{1}{R_{\Sigma 3}} = \frac{1}{R_3^{1кан}} + \frac{1}{R_3^{2кан}} + \frac{1}{R_3^{3кан}} + \dots + \frac{1}{R_3^{Nкан}}. \quad (7)$$

З (6) і (7) виходить, що отриманий метод розрахунку величини опору електролітичного заземлення  $R_{\Sigma 3}$  показує, що величина  $R_{\Sigma 3}$  залежить від питомого опору масового електроліту  $\rho_{эл}$ , фрактальної розмірності кластера перколяції  $(R_{кл})^{d_{ск}}$  та розміру пор, заповнених електролітом в пористій структурі неоднорідного середовища ґрунту.

Таким чином, запропонований новий метод розрахунку опору електролітичного заземлення, що зв'язує електрофізичну величину опору розтіканню струму з геометричними структурними елементами пористого середовища неоднорідного ґрунту, що володіють фрактальними та перколяційними властивостями.

## Висновки

1. Розрахунок систем заземлення є складним інженерним і науковим завданням, оскільки базується на початкових даних тих, що носять імовірнісний або дуже наближений характер, а також має на увазі облік великого числа чинників, що впливають на результат. При цьому погрішність розрахунків складає 20 – 50%, а в деяких випадках розрахункові значення відрізняються від реальних в рази.

2. Одним з базових параметрів, що визначають опір заземлюючого пристрою, є інтегральний показник властивостей ґрунту  $\rho$  (питомий опір ґрунту). Цей показник більш за інших носить імовірнісний характер і може бути визначений з достатньою точністю тільки для конкретного місця заземлення за

результатами багатократних вимірів, що охоплюють в часі усі характерні кліматичні і погодні сезони. Для пересувних електроустановок такий спосіб визначення  $\rho$  непридатний.

3. Існує ряд методів заземлення електроустановок, при яких передбачена умисна локальна зміна параметра  $\rho$ . Проте розрахункові моделі для визначення опору електролітичного заземлення базуються на класичних розрахункових моделях стаціонарних заземлювачів і не враховують особливостей, характерних для електролітичного заземлення.

4. Існуючі методики розрахунку опору заземлюючих пристроїв розглядають ґрунт як псевдогомогенну структуру з пошаровими неоднорідностями великих масштабів, або як середовище з параметрами, що плавно змінюються в заданому напрямі. Усі властивості ґрунту, обумовлені його неоднорідністю, відбиваються в розрахункових формулах характерними емпіричними коефіцієнтами, величини значень яких можуть знаходитися в межах декількох порядків.

5. При роботі систем електролітичного заземлення має місце умисне формування певної структури і властивостей ґрунту в місці заземлення, що визначає необхідність рішення зворотної задачі, тобто не визначення фактичного питомого опору ґрунту, а визначення умов, необхідних для формування структури і властивостей ґрунту, що забезпечують його прийнятний питомий опір.

6. Розроблений і запропонований метод розрахунку опору електролітичного заземлення, що зв'язує електрофізичну величину опору розтіканню струму з геометричними структурними елементами пористого середовища неоднорідного ґрунту, що володіють фрактальними властивостями і властивостями перколяції.

## Список літератури

1. Бургсдорф В.В. *Заземляющие устройства электроустановок* / В.В. Бургсдорф, А.И. Яковс. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
2. Манойлов В.Е. *Основы электробезопасности* / В.Е. Манойлов. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 480 с.
3. Корякин Р.Н. *Справочник по молниезащите* / Р.Н. Корякин. – М.: Энергосервис, 2005. – 879 с.
4. Иванов В.Г. *Электролитичні заземлювачі. Переваги і перспективи використання* / В.Г. Иванов, А.М. Чернюк // *Енергетика і електрифікація*. – 2007. – №6. – С. 23-29.
5. Артюх С.Ф., Иванов В.Г., Мезеря А.Ю., Чернюк А.М., Колобродов С.О. *Патент на корисну модель №46648 Переносний електролітичний заземлювач 25.12.2009р.*
6. А.М. Чернюк. *Обґрунтування початкових положень для дослідження характеристик багатошарової структури електролітичний заземлювач-ґрунт* / А.М. Чернюк // *Наукові праці ДонНТУ*. – 2010. – Вип. 169. – С. 166-171.
7. Буданов П.Ф. *Визначення форми об'ємного тіла електроліту в ґрунті при роботі переносних електролітичних заземлювачів* / П.Ф. Буданов, О.П. Нечуйвітер, А.Ю. Мезеря, А.М. Чернюк, Ю.А. Пархоменко // *Збірник наукових праць ХУПС*. – Х.: ХУПС, 2012. – Вип. 1(30). – С. 131-134.
8. Буданов П.Ф. *Модель перколяції провідності процесу електролітичного заземлення* / П.Ф. Буданов, А.М. Чернюк // *Системи озброєння і військова техніка*. – 2012. – № 2(30). – С. 123-128.
9. Тарасевич Ю.Ю. *Перколяція: теорія, додатки, алгоритми* / Ю.Ю. Тарасевич. – М.: Едиторіал УРСС, 2002. – 112 с.
10. Мандельброт Б. *Фрактальная геометрия природы* / Б. Мандельброт. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
11. Федер Е. *Фракталы* / Е. Федер. – М.: Мир, 1991. – 254 с.

Надійшла до редколегії 12.07.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук Г.І. Канюк, Українська інженерна-педагогічна академія, Харків.

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ

П.Ф. Буданов, А.М. Чернюк

*Проведенный анализ существующих методов заземления электроустановок при которых предусмотрено преднамеренное локальное изменение параметра удельного сопротивления грунта (обработка грунта солями, электролитическое заземление и т.д) показал, что расчетные модели для определения сопротивления электролитического заземления базируются на классических расчетных моделях стационарных заземлителей и при этом не учитываются особенности характерные для электролитического заземления, где имеется преднамеренное формирование определенной структуры и свойств грунта в месте заземления, в связи с этим предложен метод расчета сопротивления растеканию тока электролитического заземления с учетом перколяционных и фрактальных свойств пористой структуры неоднородной среды грунта.*

**Ключевые слова:** электролит, электролитическое заземление, сопротивление растеканию тока, расчёт сопротивления электролитического заземления, электролитический контакт.

## DEVELOPMENT OF METHOD OF CALCULATION OF RESISTANCE ELECTROLYTIC GROUNDING

P.F. Budanov, A.M. Chernyuk

*Conducted analysis of existent methods of grounding of electrostanovok at which rotined the foreseen intentional local change of parameter of specific resistance of soil (treatment of soil salts, electrolytic grounding etc), that calculation models for determination of resistance of the electrolytic grounding were based on the classic calculation models of stationary zazezmliteley and here features are not taken into account characteristic for the electrolytic grounding, where the intentional forming of certain structure and properties of soil is in the place of grounding, the method of calculation of resistance spreading of current of the electrolytic grounding is in this connection offered taking into account perkoляcionnykh and fractal properties of porous structure of heterogeneous environment of soil.*

**Keywords:** electrolyte, electrolytic grounding, resistance spreading of current, calculation of resistance of the electrolytic grounding, electrolytic contact.