

Х. РАБА

## К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЕМЛИТЕЛЕЙ В ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ВАННЕ

В статьях о методике искусственной обработки заземлителей, находящихся в грунтах с высоким удельным сопротивлением [1, 2], рекомендовалось пользоваться приведенными в них опытными данными. Ниже предлагается методика определения сопротивлений и коэффициентов использования заземлителей путем их физического моделирования в электролитической ванне и приводятся результаты ее применения при обработке заземлителей суспензиями глины.

### Моделирование заземлителей в электролитической ванне

Как известно, поля в заземляющих устройствах описываются уравнением Лапласа. Для моделирования задач такого типа целесообразно применить электролитические ванны. Сопротивление заземлителя образуется в бесконечном полупространстве вокруг него. С небольшой ошибкой в 2—3% можно считать, что данное полупространство ограничивается радиусом  $r = 20$  м от заземлителя [4]. Электрическое поле вокруг заземлителя на некотором расстоянии от него независимо от его конструкции можно считать радиально симметричным, что аналогично представлению любого заземлителя в виде точечного источника на поверхности земли.

Из теории поля известно, что силовые линии в данном случае представляют собой прямые, радиально исходящие от точечного источника, а эквипотенциальные поверхности имеют полусферическую форму. Поэтому полусферическую форму электролитической ванны следует считать самой подходящей для моделирования заземлителя.

В прямоугольном резервуаре, заполненном водопроводной водой, одновременно размещаются две полусферы различного диаметра. Модель заземлителя (рис. 1) устанавливается в центре полусферы и перемещается при помощи механизмов продольного и поперечного движения из одной ванны в другую. Вода в резервуаре служит стабилизатором температурных колебаний электролита, находящегося в полусферах, и

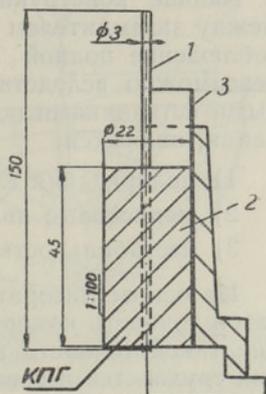


Рис. 1. Модель вертикального трубчатого заземлителя с искусственной обработкой грунта: 1 — заземлитель; 2 — обработанный грунт; 3 — оцинкованная прессформа; КГГГ — композиционный материал (карбид, парафин, графит).

для предотвращения их механической деформации. Как обе полусферы, так и модель изготавливаются из латуни и полируются [10]. Для устранения химического воздействия водопроводной воды полусферы покрываются снаружи водонепроницаемым лаком. Электролитом служит техническая дистиллированная вода с первоначальным удельным сопротивлением ( $\rho$ ) в пределах 2000—1000 ом·м [8, 9, 10]. Для моделирования заземлителя в грунтах со значительно различающимися значениями  $\rho$  применяются растворы медного купроса соответствующих концентраций. Пантографическое устройство позволяет определить потенциалы электрического поля вокруг модели и установить граничные условия. Для измерения сопротивлений используется схема, составленная из амперметра и вольтметра [3]. Величина  $\rho$  электролита определяется мостовым методом.

Для получения представления о необходимой точности измерения при моделировании заземляющих устройств следует прежде всего подчеркнуть, что все формулы аналитического расчета базируются на предположении об однородности грунта. Предварительный расчет заземлений производится на основе определения надежной интегральной величины  $\rho$ , естественным образом учитывающей строение грунта. Общее представление о строении грунта в месте расположения заземлений и величины  $\rho$  грунта в его пределах обычно получается при помощи метода вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) совместно с измерением сопротивления заземления ( $R^0$ ) экспериментальных заземлителей (труб), залсженных там же. Тщательное определение расчетной величины  $\rho$  на основе вышеназванных методов измерения все же не дает уверенности в высокой надежности результатов из-за возможных сезонных изменений  $\rho$ . Опыт показывает, что в лучшем случае можно достичь точности в пределах  $\pm 10 \div 15\%$  [4, 7]. Даже если упрощающие предпосылки внесут ошибку в пределах  $\pm 10\%$ , относительное влияние поляризации, мениска и ряда других факторов, дающих ошибку в пределах 1% [10], сильно уменьшается. Однако идти по пути преднамеренного уменьшения точности моделирования нецелесообразно, ибо электролитическая ванна в этом случае теряет свои достоинства как инструмент количественного анализа, позволяющий определить все параметры сложных заземляющих устройств, влияние искусственной обработки на параметры и т. д., когда теоретический подход к проблеме становится очень трудным или даже невозможным.

Все виды погрешностей физического моделирования, исключая погрешности электроизмерительной схемы, пантографного устройства и вообще конструкции, являются результатом нарушения аналогии между заземлителем в грунте и его моделью. Как уже отмечалось, соблюдение полной аналогии при моделировании поля заземлителя невозможно вследствие нарушения граничного условия. Дополнительными источниками погрешностей, связанными со спецификой моделирования, являются:

- 1) поляризация электролита;
- 2) менисковые явления у электродов и стенок ванны;
- 3) нестабильность параметров электролита.

На основе литературных сведений, для полного утверждения результатов точность измерения должна составлять менее  $\pm 5\%$  [8]. Обеспечение такой точности в электролитической ванне не представляет никаких трудностей и зависит только от материальных затрат на устройство и соблюдения некоторых правил по выбору и использованию системы

электролит—электроды. Учитывая результаты исследований П. Эйнштейна [10], — единственного исследователя, который не только теоретически, но и экспериментально исследовал относительное влияние мениска на результаты измерений, — целесообразно:

- 1) применять латунные электроды в сочетании с дистиллированной водой;
- 2) проводить измерения током ниже 0,5 а;
- 3) тщательно очищать поверхности электродов (лучше всего путем полировки);
- 4) проводить все измерения при одной и той же температуре электролита.

Относительная погрешность измерения сопротивления заземлителя (в процентах), обусловленная конечными размерами полусферических электролитических ванн, определяется формулой

$$\Delta = \frac{R_1 - R_m}{R_1} \cdot 100, \quad (1)$$

где  $R_1$  — сопротивление, соответствующее идеальному случаю, когда радиус внешнего электрода  $r = \infty$ ;  $R_m$  — измеренное сопротивление модели.

Для обеспечения достаточной точности измерения необходимо либо увеличивать размеры электролитической ванны, либо уменьшать масштаб модели, либо ставить эксперимент, в котором ограниченные размеры ванны заведомо искажают исследуемое поле. Поэтому особый интерес представляет определение зависимости погрешности от размеров области, где исследуется поле, т. е. вопрос о максимальных размерах ванны и модели. Решение задачи для полусферических ванн дает возможность определить масштабы моделирования ( $m$ )

$$m = \frac{d}{d_m} = \frac{l}{l_m}, \quad (2)$$

где  $d$  — диаметр заземлителя;  $l$  — длина заземлителя;  $d_m, l_m$  — соответствующие величины модели.

В общем случае возникающие погрешности окажутся различными в зависимости от форм модели и ванны, поэтому получение универсального точного математического решения задачи по оценке погрешностей неосуществимо и их можно оценить лишь приближенно, с той или иной степенью точности.

То обстоятельство, что основное сопротивление растеканию тока сосредоточено вблизи заземлителя, где плотность тока в земле имеет наибольшие значения, позволяет использовать электролитические ванны сравнительно небольшого диаметра. Исследование электрического поля вокруг широко используемого в эксплуатации трубчатого заземлителя (рис. 2) показывает, что степень искажения поля зависит от длины заземлителя, причем с увеличением расстояния от электрода

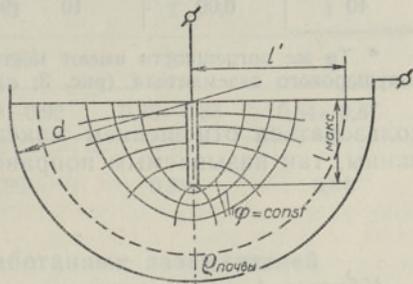
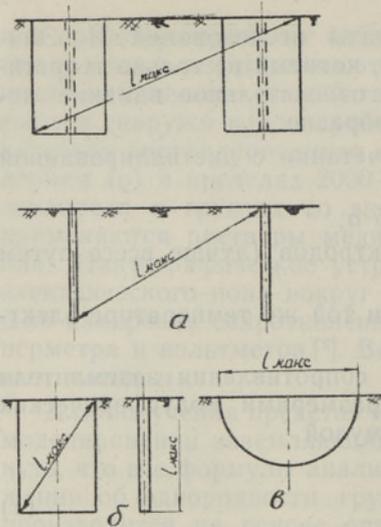


Рис. 2. Картина электрического поля вертикального трубчатого заземлителя в полусферической электролитической ванне.



форма эквипотенциальных поверхностей все более приближается к полусферической. Можно установить, что выполнение граничного условия в отношении минимального диаметра ванны достигается уже при

$$\frac{d}{2} \geq l' = 4 \div 5 l_{\text{max}}. \quad (3)$$

Исследование электрического поля вокруг заземлителей различной формы (рис. 3) показывает при том же максимальном размере заземлителя, определен-

Рис. 3. Определение  $l_{\text{max}}$  различных конфигураций заземляющего устройства: а — два трубчатых электрода с обработкой и без обработки грунта; б — то же в случае единичного электрода; в — полусферовой электрод.

ном по рис. 2, что выполнение условия (3) обеспечивает хорошее совпадение величин их относительной погрешности при условии, что диаметр электролитической ванны  $d \geq 34$  см.

При моделировании используются электролитические ванны трех диаметров, а именно 25, 34 и 40 см. Ниже показываются рассчитанные по формуле (1) величины относительной погрешности в функции от диаметра ванны  $\Delta = f(d)$ , полученные моделированием трубчатого заземлителя  $l = 2,6$  м,  $d = 2''$  при выбранном в соответствии с условием (3) масштабе  $m = 67$ .

Следовательно, в этом случае длина модели по формуле (2) равняется  $l_m = \frac{l}{m} = \frac{260}{67} = 3,9$  см. Результаты помещены в табл. 1.

Таблица 1

Диаметр ванны $d$ , см	$k = \frac{l_m}{d}$	Относительная погрешность измерения $\Delta$ , %
25	0,16	33,5 (15,6)*
34	0,11	13,3 (11)
40	0,09	10 (9,5)

\* Те же погрешности имеют место и для полусферового заземлителя (рис. 3, в).

пользоваться отношением максимального размера модели к диаметру ванны, так называемым поправочным коэффициентом

$$k = \frac{l_{\text{max}}}{d}. \quad (4)$$

Кривые  $\Delta = f(k)$  ванн различных диаметров показаны на рис. 4. Отсюда видно, что в средней части кривых величина  $\Delta$  имеет наименьшее значение и изменяется сравнительно мало. Следовательно, для обеспечения наименьшей погрешности измерения размеры применяемых

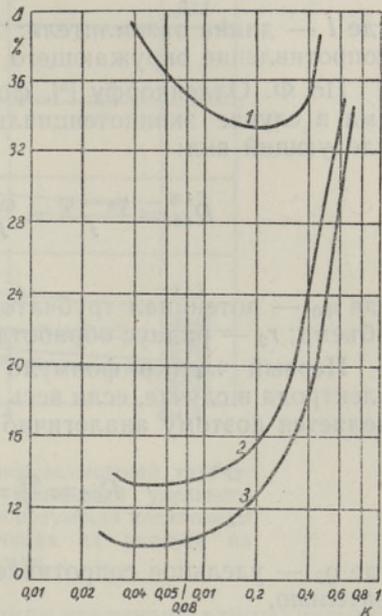
моделей должны находиться в определенной области кривых  $\Delta = f(k)$ . Вне этой области при уменьшении размеров модели начинают сказываться менисксовые явления, при увеличении же размеров модели — поляризационные и влияние стенок ванны.

По кривым рис. 4 оказывается целесообразным ограничиваться следующими показателями (табл. 2):

Таблица 2

Диаметр ванны $d$ , см	Поправочный коэффициент $k$	Размер модели $l_m$ , см	Масштаб моделирования $m$
25	0,06—0,3	1,5—7,5	170 -- 35
34	0,04—0,35	1,4—12	185 -- 22
40	0,03—0,40	1,2—16	210 -- 16

Рис. 4. Зависимость  $\Delta = f(k)$  для электролитической ванны разного диаметра: 1 — 25 см, 2 — 34 см; 3 — 40 см. Температура электролита 20°С.



Приведенная выше методика измерения сопротивления заземлителей в электролитической ванне дает хорошо совпадающие с аналитическими расчетами результаты, обеспечивая точность измерения в пределах  $\pm 2 \div 3\%$  [3, 8] и применима как в случае необработанной, так и обработанной почвы, если предварительно известны закономерности распределения в почве материалов, использованных для ее искусственной обработки.

При расчете заземлений, состоящих из ряда соединенных между собой заземлителей, вводятся, как известно, коэффициенты использования ( $\eta$ ). Изложенная методика измерения применима и для определения  $\eta$  заземлителей. При условии однородного грунта сравнение полученных моделированием величин  $\eta$  с литературными данными [6] показывает незначительное расхождение между ними (табл. 3):

Таблица 3

Отношение расстояния между соседними заземлителями к их длине $a/l$	2	2	1
Количество заземлителей $n$	2	3	2
Коэффициенты использования по данным [6]	0,90—0,92	0,85—0,88	0,84—0,87
Коэффициенты использования, полученные в модели	0,89	0,85	0,84

### Моделирование искусственно обработанных заземлителей

В эксплуатации в качестве заземлителей в большинстве случаев применяются стержни или трубы, соединенные горизонтальными связями. Вначале предположим, что обработка почвы вокруг таких заземлителей

приводится по эквипотенциальной поверхности. Эквипотенциальные поверхности поля заземлителя подобной конфигурации имеют форму эллипсоидов вращения с осью, совпадающей с осью трубы. Сопротивление заземлителя до обработки определяется формулой

$$R_3 = \frac{\rho_1}{2\pi l} \ln \frac{2l}{r_1}, \quad (5)$$

где  $l$  — длина заземлителя;  $r_1$  — радиус заземлителя;  $\rho_1$  — удельное сопротивление окружающего грунта.

По Ф. Оллендорфу [5], формула сопротивления обработанного объема в случае эквипотенциальной ограничивающей поверхности имеет следующий вид:

$$R'_{06} = \frac{\varphi_0 - \varphi}{J} = \frac{\varphi_0}{J} - \frac{1}{2 \ln \frac{2l}{r_1}} \ln \frac{\sqrt{l^2 + r_2^2} + l}{\sqrt{l^2 + r_2^2} - l}, \quad (6)$$

где  $\varphi_0$  — потенциал трубчатого электрода;  $\varphi$  — потенциал поверхности объема;  $r_2$  — радиус обработанного объема на поверхности земли.

Первый член в формуле (6) представляет собой сопротивление электрода в случае, если весь объем вокруг электрода обработан, и определяется поэтому аналогично формуле (5):

$$R_{06} = \frac{\varphi_0}{J} = \frac{\rho_2}{2\pi l} \ln \frac{2l}{r_1}, \quad (7)$$

где  $\rho_2$  — удельное сопротивление обработанного объема грунта. Следовательно,

$$R'_{06} = \frac{\rho_2}{2\pi l} \left( \ln \frac{2l}{r_1} - \frac{1}{2} \ln \frac{\sqrt{l^2 + r_2^2} + l}{\sqrt{l^2 + r_2^2} - l} \right). \quad (8)$$

Таким образом определяется сопротивление остальной части грунта.

Если обозначить  $\frac{\rho_1}{\rho_2} = \alpha$ , то формула (7) примет следующий вид:

$$R_{06} = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left[ \frac{1}{\alpha} \ln \frac{2l}{r_1} + \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{1}{\alpha} \right) \ln \frac{\sqrt{l^2 + r_2^2} + l}{\sqrt{l^2 + r_2^2} - l} \right]. \quad (9)$$

Подставив в последнее выражение вместо  $\rho_2$   $\rho_2 = \rho_1$ , получим уже известную формулу (5) для сопротивления электрода в необработанном грунте.

На основе приведенных рассуждений можно заключить, что уменьшение сопротивления заземлителя посредством обработки определенного объема грунта имеет предельную величину.

Как видно из рис. 5, уменьшение удельного сопротивления  $\rho_2$  определенного объема грунта вокруг заземлителя целесообразно осуществлять в некоторых пределах — примерно до  $\alpha = 20 \div 50$ . Поскольку в практике эксплуатации для каждого конкретного заземлителя задаются определенными величинами сопротивления заземлителя в зависимости от условий его работы, следует первоначально решить вопрос, целесообразно ли тратить большое количество химикатов и других веществ на

один заземлитель, если в предельном случае величина коэффициента эффективности обработки  $\beta = \frac{R_{0\beta}}{R_1}$  не обеспечивает требуемой величины сопротивления.

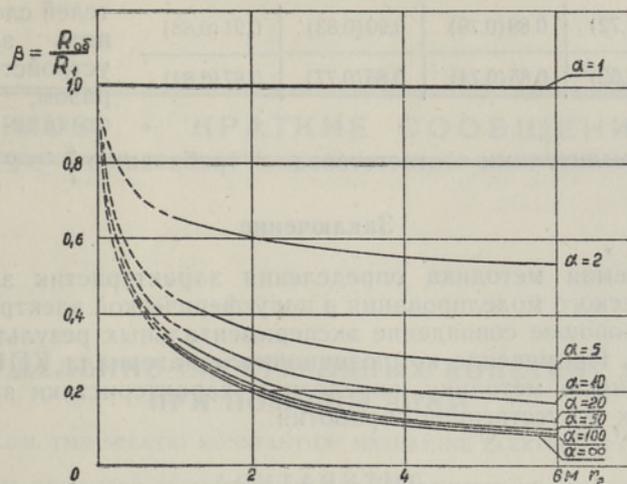


Рис. 5. Зависимость сопротивления заземления трубчатого заземлителя от степени уменьшения удельного сопротивления в объемах почвы, образующих эллипсоиды вращения при различных величинах их радиуса на поверхности земли.

Лабораторные исследования распределения суспензий глины, результаты непосредственных измерений электропроводности почвы в разных местах вокруг обработанных опытных заземлителей и лабораторный анализ проб почвы на содержание примесей глины дают основание предпологать, что с достаточной для расчетов точностью можно считать обработанный объем грунта вокруг электрода цилиндрическим. Следует отметить, что аналогичное допущение делается в технике высоких напряжений при предварительных расчетах искровой зоны вокруг стержневого заземлителя.

При помощи композиционного материала (КПГ), который содержит карбид, парафин и графит, представляется возможным получить модели обработанной почвы с необходимой величиной удельного сопротивления. Модели, изготовленные из КПГ, нерастворимы в воде. Они имеют постоянные электрические и механические свойства при длительном пребывании в электролите и отличаются несложной и дешевой технологией изготовления (см. рис. 1, 2). Исследования показывают, что применение для искусственной обработки заземлителя 300 л суспензии глины с концентрацией 100 г/л воды [1, 2] обеспечивает в цилиндрическом объеме с размерами  $l = 2,6$  м,  $D = 1,5$  м снижение удельного сопротивления до  $\rho_2 = 17$  ом·м.

Аналогично рассмотренному выше примеру расчета вертикального трубчатого заземлителя определяется и сопротивление заземлителя после обработки грунта.

В случае однородного грунта намечается некоторое уменьшение величин коэффициента использования вследствие обработки. Значения  $\eta$  при  $\rho = 500$  ом·м без обработки и после обработки почвы (величина в скобках) приведены в табл. 4.

Таблица 4

n	Отношение $a/l$			
	1	2	3	4
2	0,84 (0,72)	0,89 (0,79)	0,90 (0,83)	0,91 (0,88)
3	0,77 (0,62)	0,85 (0,74)	0,85 (0,77)	0,87 (0,81)

Для уменьшения экранирующего действия отдельных обработанных заземлителей следует выполнять заземляющие устройства таким образом, чтобы расстояния между со-

седними заземлителями соответствовали требованию  $\frac{a}{l} > 2$ .

### Заключение

Предлагаемая методика определения характеристик заземлителей путем физического моделирования в полусферической электролитической ванне дает хорошее совпадение экспериментальных результатов с аналитическими. Применение композиционного материала КПП позволяет, применяя данную методику, определить характеристики заземлителей и в случае их искусственной обработки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Раба Х., Изв. АН ЭССР. Сер. физ.-матем. и техн. наук, **13**, № 4, 414 (1964).
2. Раба Х. Х., Промышленная энергетика, № 2, 11 (1964).
3. Раба Х. Х., Промышленная энергетика, № 6, 27 (1966).
4. Лурье А. И., Испытание заземляющих устройств электрических установок, М., 1950.
5. Оллендорф Ф., Точки в земле, М., 1939.
6. Найфельд М. Р., Заземления и защитные меры безопасности, М., 1965.
7. Вайнер А. Л., Основы рационального проектирования заземлений мощных подстанций, Сб. докл. Всесоюз. конф. по заземлениям, Харьков, 1966.
8. Chetty T. N., Power eng. (India), No. 3, 171—175 (1961).
9. Boothroyd A. R., P.I.E.E., **96**, pt. I, 163—177 (1949).
10. Einstein P. A., Factors limiting the accuracy of electrolytic plotting tanks, Brit. J. Phys., **2**, 49—55 (1951).

Институт термодинамики и электрофизики  
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию  
29/XII 1966

H. RABA

### MEETOD MAANDUSTE UURIMISEKS ELEKTROLÜÜTILISES VANNIS JA MAANDAJATE KARAKTERISTIKUTE MÄÄRAMISEL SAADUD TULEMUSI

Autori poolt esitatud arvutusmetoodika alusel käsitletakse poolkerakujuliste elektrolüütide vannis kasutamise võimalusi erineva konfiguratsiooniga maanduste takistuse ja kasutusteguri suuruste määramiseks nii töötlemata (homogeenses) kui ka töödeldud pinnases. Antud meetod võimaldab ühtlasi uurida maanduste töötlemisel saadava efekti lõstmise küsimusi.

H. RABA

### EINE METHODE ZUR BENUTZUNG DES ELEKTROLYTISCHEN TROGS ZUR ERMITTLUNG DES ERDUNGSWIDERSTANDES

Es wird die Möglichkeit erforscht, den elektrolytischen Trog zur Ermittlung des Erdungswiderstandes und anderer spezifischer Größen von Erden verschiedener Konfiguration zu benutzen. Dazu eignen sich am besten halbsphärische elektrolytische Tröge von geringem Diameter. An Hand von Beispielen wird darauf hingewiesen, daß halbsphärische elektrolytische Tröge nicht nur zum Modellieren von Erden im homogenen Erdreich, sondern auch von Erden, deren Erdungswiderstand künstlich verringert wird, verwendbar sind.