

П.Ф.БУДАНОВ, канд. тех. наук, доц., УИПА, Харьков;
А.М.ЧЕРНЮК, ст. препод., УИПА, Харьков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ ЗАЕМЛИТЕЛЕЙ ПЕРЕДВИЖНЫХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

В статье представлен опыт экспериментального определения электрофизических параметров поверхностных электролитических заземлителей (ПЭЗ) на физической модели и в полевых испытаниях. Подтверждена теоретическая основа метода определения сопротивления ПЭЗ.

Ключевые слова: заземление передвижных электроустановок, поверхностных электролитических заземлителей, полевые испытания, электрофизические параметры грунта

Постановка проблемы. В районах, удалённых от развитой энергосети, а так же на объектах, постоянно меняющих своё место расположения нашли широкое применение передвижные электроустановки (ПЭУ). Особенности работы данных энергообъектов (воздействие атмосферных осадков, перепады температур, вибрация, запыление и загрязнение, наличие большого числа контактных соединений распределительной кабельной сети и возможности её повреждения другими механизмами) определяют данный объект, как объект повышенной опасности поражения человека электрическим током. Это накладывают серьёзные требования к обеспечению электробезопасности обслуживающего персонала и лиц работающих в непосредственной близости от ПЭУ [1].

Основной мерой обеспечения электробезопасности электроустановках является защитное заземление [2, 3]. В соответствии с [4] заземление ПЭУ должно выполняться так же как и для стационарных электроустановок. Однако, сооружение заземляющих устройств с нормируемым сопротивлением заземления для ПЭУ зачастую невозможно по причине их работы на грунтах с высоким удельным сопротивлением. В качестве решения проблемы заземления ПЭУ было предложено использовать поверхностные электролитические заземлители (ПЭЗ) различных конструкций сочетающие обширную поверхность контакта заземлителя с грунтом и минимальные трудовые и временные затраты на монтаж [5,6]. В [7] был предложен метод определения сопротивления ПЭЗ основанный на применении теории перколяции и фрактальной геометрии.

©П.Ф. Буданов, А.М. Чернюк, 2013

Подтверждение полученных научных результатов возможно путём экспериментального определения электрофизических параметров ПЭЗ.

Обзор базовых теоретических положений. Электролитический способ заземления принципиально отличается от традиционных тем, что удельное сопротивление грунта ρ не является исходными данными при расчёте системы заземления, а есть преднамеренно изменяемой величиной. Это и определяет особенности работы электролитических заземлителей. В процессе работы ПЭУ электролит просачиваясь в грунт образует некоторое объёмное тело электролита в грунте. Форма и размеры данного тела во многом определяют сопротивление всего заземляющего устройства.

Определение формы и свойств рассматриваемого тела уже проводилось авторами статьи экспериментально и частично освещено в [8, 9].

В результате исследований было определено, что при работе ПЭЗ в грунтах с однородной структурой форма электролитического кластера может быть с достаточной точностью описана параболической функцией. В неоднородных грунтах описание формы кластера параболической функцией нельзя считать достоверным ввиду значительного увеличения погрешности аппроксимации. При этом аналитическое описание параметров электролитического кластера представляет значительные трудности, и в реальных условиях эксплуатации ПЭЗ неприменимо. Это было подтверждено дальнейшими экспериментальными исследованиями авторов результаты которых отражены ниже.

Материалы исследования. С целью установления чётких корреляционных связей между фрактальными и электрофизическими свойствами электролитического кластера проведён ряд экспериментальных исследований

Суть метода исследования состоит в следующем: 1. Моделируется образец типичного грунта, обладающего определёнными свойствами (пористость, влажность, фракции частиц и т.д.). Образец помещается на проводящую подстилающую пластину. 2. В массив грунта помещаются датчики, фиксирующие преодоление электролитическим кластером порога перколяции в данной точке. 3. При помощи модели ПЭЗ постепенно формируем электролитический кластер и фиксируем изменение электрического сопротивления характерных путей перколяции (заземлитель – датчик, заземлитель – подстилающая пластина, датчик - датчик). 4. По окончании формирования кластера образец грунта разбирается послойно и фиксируется форма тела образованного электролитическим кластером

Для данных исследований была спроектирована и изготовлена испытательная лабораторная установка (рис. 2).

Установка включает:

1. Резервуар для моделирования структуры грунта, представляющий собой короб размером 500x500x300 мм с разметкой горизонтальных слоёв на внутренней поверхности. На дно короба уложен металлический лист.

2. Коммутатор на клеммы которого выводятся контактные проводники от заглублённых в грунт датчиков.

3. Прибор измерения сопротивления заземления (тип МЗ72).

4. Модель электролитического заземлителя в масштабе 1:10.

5. Датчики: послойные (в виде металлических сеток с ячейкой ромбовидной формы с диагоналями 50x30мм) и точечные (в виде металлических дисков диаметром 25мм)

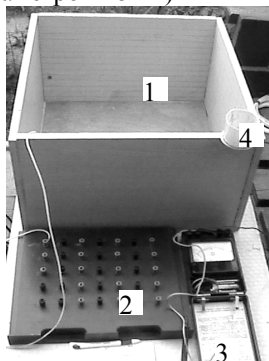


Рис. 1 – Испытательная лабораторная установка

В ходе эксперимента предварительно определялась пористость испытуемого грунта в следующей последовательности:

- отмеряем определённый объём сухого грунта (песок) - V_r , мл
- постепенно засыпаем сухой грунт в резервуар с заранее определённым объёмом воды - V_v , мл
- замеряем получившийся общий объём смеси «грунт – вода» $V_{общ}$, мл
- определяем коэффициент пористости грунта как

$$K_{пор} = \frac{V_r - (V_{общ} - V_v)}{V_r}, \quad (1)$$

где V_r - объём сухого грунта, мл; V_v - объёмом воды, мл; $V_{общ}$ - общий объём смеси «грунт – вода», мл.

В нашем случае для грунта «сухой песок»

$$K_{пор} = \frac{200 - (925 - 800)}{200} = 0,375.$$

Далее формировался испытуемый массив грунта послойной укладкой грунта и датчиков (сетки). Было уложено 10 сеток с шагом 20 мм. Контактные провода от сеток выведены на коммутатор. В центре получившегося образца грунта установлена модель электролитического

заземлителя. Контакт модели заземлителя с каждой сеткой и нижней металлической пластиной обеспечивается через измерительный прибор и коммутатор.

Формирование электролитического кластера производилось заливкой электролита (кислотный электролит плотностью $1,27 \text{ г/см}^3$) в модель электролитического заземлителя пошагово в объёме 50 мл. После каждого шага замерялось время пропитки электролита в грунт, после чего производились измерения значений сопротивления между моделью заземлителя и контактными клеммами сеток-датчиков (1-10) и подстилающей металлической пластины (общ). Суммарный объём электролита составил 1050 мл.

Таким образом были получены кривые изменения сопротивления «ПЭЗ – датчик (сетка)» для всех сеток и подстилающей проводящей пластины

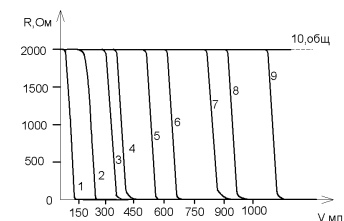


Рис. 2 – Зависимость изменения сопротивления «ПЭЗ – датчик (сетка)» от объёма влитого электролита: 1-10 общ - номера сеток

Как видно из рис. 2 значительное снижение сопротивления «заземлитель - сетка» происходит при образовании устойчивых путей перколяции т.е. при достижении кластером глубины слоя сетки. Падение сопротивления происходит резко до практически нулевых значений, что подтверждает положение о том, что для создания проводимости достаточно создания даже одного пути перколяции.

После всех измерений послойно снимаем грунт и фиксируем форму горизонтальных срезов образованного электролитического кластера. Подстилающей пластины (общ.) электролитический кластер не достиг.

Производим приведение полученных изображений к одному масштабу, графическую обработку и обрисовку горизонтальных срезов электролитического кластера. После чего восстанавливаем форму кластера (рис. 3)

Присутствие горизонтальных сеток в массиве образца грунта обуславливает явно выраженную горизонтальную неоднородность грунта. Подобные неоднородности свойственны слоистым грунтам в частности. Такое строение грунта определяет неправильную форму электролитического кластера. Описание подобной формы кластера

аналитическими выражениями практически невозможно. Поэтому традиционные методы расчёта заземлителей, в которых неотъемлемой составной частью расчёта есть определение площади контакта «заземлитель грунт», неприменимы для расчёта электролитического заземления.

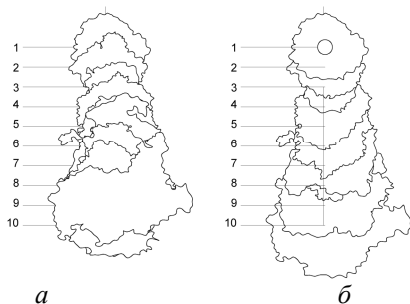


Рис. 3 – Воссоздание формы электролитического кластера:
а - вид снизу; б – вид сверху

Дальнейшие исследования проводились с использованием точечных датчиков, что позволили формировать кластер более правильной (параболической) формы и фиксировать динамику развития кластера не только по вертикальной оси, но и в горизонтальной плоскости.

Датчики укладываются в ряды послойно. Каждый ряд имеет 7 датчиков, всего слоёв 5. Контактные провода от датчиков выведены на коммутатор. В центре получившегося образца грунта установлена модель электролитического заземлителя. Контакт модели заземлителя с каждым датчиком и нижней металлической пластиной обеспечивается через измерительный прибор и коммутатор. Схема раскладки датчиков и схема измерительной цепи представлены на рис. 4.

Заливается электролит (раствор медного купороса определённой плотности) в модель электролитического заземлителя пошагово в объёме 50 мл. После каждого шага замеряется время пропитки электролита в грунт, после чего измеряется значения сопротивления цепей: "заземлитель - датчик" (для каждого датчика) R_i ; "заземлитель - подстилающая пластина" $R_{общ}$; - "датчик - датчик" - R_{i-j} .

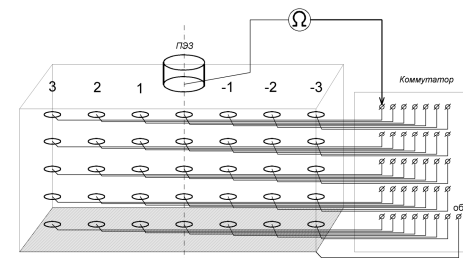


Рис. 4 –Схема раскладки датчиков и измерительной цепи

Исследования проводились для грунтов различной структуры и для электролитов различной плотности и состава. На основании полученных данных были построены информационные поля значений сопротивления для каждого шага измерений, что даёт представление о динамике формирования электролитического кластера и изменения электрофизических параметров ПЭЗ. Построены кривые изменения сопротивления характерных цепочек кластера

Кривые изменения сопротивления цепи «заземлитель – подстилающая пластина» представлены на рис. 5.

Целью полевых испытаний ПЭЗ является: подтверждение теоретических положений работы; подтверждение экспериментальных результатов полученных на лабораторной установке; разработка практических рекомендаций по монтажу и эксплуатации ПЭЗ.

Полевые испытания проводились на песчаном грунте с фракцией соответствующей фракции грунта "сухой песок" лабораторных испытаний, описанных выше. Испытания проводились на краю песчаного крьера, что позволило иметь представление о реальной структуре грунта в месте заземления. Данная структура представлена на рис. 6. Грунт в месте заземления имеет незначительный верхний слой (2-3 см) наста из сухой хвои, далее залегает слой практически чистого песка (0,7 - 0,8 м), третий слой толщиной до 1м - песок с включениями органического грунта, нижний слой - песок аналогичный второму слою. Существенное увлажнение грунта наблюдается на глубине около 40см.

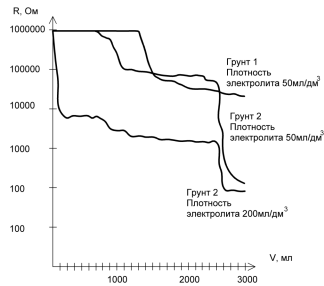


Рис. 5.– Совмещённый график изменения сопротивления для цепи "заземлитель – подстилающая пластина" при различном типе грунта и концентрации электролита

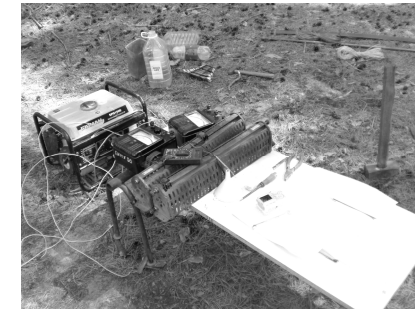


Рис. 7 – Общий вид испытательной установки

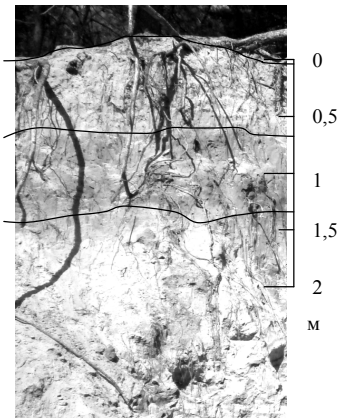


Рис. 6 – Структура грунта в месте полевых испытаний

Заземляемой электроустановкой являлся бензиновый генератор марки Fireman SPG1500. В качестве измерительных электродов использовались металлические толстостенные трубы диаметром 25 мм длиной 2м. Используемый электролит - раствор медного купороса концентрацией 50мг на 1000 мл. Определения сопротивления заземления производилось методом вольтметра-амперметра. Класс точности измерительных приборов 0,5. Общий вид установки представлен на рис. 7. Результаты испытаний представлены в таблице 1

Таблица – Результаты полевых испытаний ПЭЗ

№пп	Объём электролита, мл	Показания вольтметра, В	Показания амеремтра, А	Rзз, Ом
1	1000	186	0,025	6200
	2000	180	0,03	6000
	3000	175	0,03	5833,3
	4000	170	0,035	4857
	5000	170	0,035	4857
	6000	165	0,4	412,5
1,5	20000	164	0,6	273
	25000	163	0,85	191,7
2	30000	159	2,5	63,6
	40000	157	2,9	54,14
	50000	157	3,7	42,43

График зависимости сопротивления заземлителя от объёма влитого электролита представлен на рис. 8

Из графика 8 видно, что порог перколяции преодолевается при объёме электролита равном около 10 л. По результатам предыдущих исследований известно, что объём сформированного электролитического кластера для песчаного грунта с неоднородными включениями превышает объём влитого электролита в 5-11 раз. Учитывая, что полевые испытания проводятся на грунтах под открытым небом и в таком грунте уже присутствует определённое количество влаги к дальнейшим расчётам примем верхнюю границу этого диапазона и объём кластера составит 110 л.

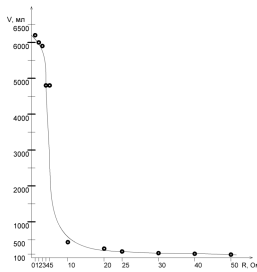


Рис. 8 – Зависимость сопротивления заземлителя от объёма влитого электролита

Для песчаных грунтов форма электролитического кластера может быть принята параболической приближённой к полусферической. Объём полусферы может быть найден как

$$V = \frac{2}{3} \pi R^3 . \quad (2)$$

Решая задачу относительно R получим $R = \sqrt[3]{\frac{110 \cdot 3}{2 \cdot 3 \cdot 14}} = 3,74 \text{ дм} = 37,4 \text{ см}$.

Отсюда можно сделать вывод о том, что значительное падение сопротивления заземлителя наблюдается в момент достижения электролитическим кластером хорошо увлажнённых слоёв грунта в малым удельными сопротивлением.

При 50 литрах влитого электролита было достигнуто сопротивление менее 43 Ом, что в песчаных грунтах, при условии использования нескольких ПЭЗ может обеспечить приемлемое напряжение прикосновения. Установка одного такого заземлителя позволит обеспечить сопротивление растеканию заземляющего устройства эквивалентного 116 инвентарным буравам или 335 стержневым заземлителям длиной 0,8 м или 59 стержневым заземлителям длиной 2 м.

Выводы.

1. Разработка расчётной модели электролитического заземления возможна с применением теорий перколяции и геометрических фракталов. В общем случае рассматриваемое тело можно представить как электролитический кластер, обладающий как перколяционными так и фрактальными свойствами. В объёме кластера образованы пути перколяции, которые и обеспечивают проводимость электрического тока сквозь массив верхнего слоя грунта (который характеризуется высоким удельным сопротивлением) в водоносные слои обладающие высокой проводимостью. 2. Расчётные методики определения сопротивления электролитического заземления базируются на классических расчётных

моделях стационарных заземлителей и не учитывают особенностей характерных для электролитического заземления. 3. Электролитический кластер ПЭЗ в неоднородных грунтах имеет сложную форму и не может быть описан аналитически. 4. Резкое снижение сопротивления заземления происходит в момент преодоления кластером порога перколяции. Для создания проводимости достаточно даже одного пути перколяции. 5. Модель расчёта сопротивления ПЭЗ может быть разработана на основе перколяционной теории и теории геометрических фракталов.

Список литературы: 1. Равикович И.Д. Техника безопасности в передвижных электроустановках/ И.Д.Равикович.- М.: Энергия, 1976г., 2. ПУЭ 2009 Правила улаштування електроустановок, 3. ДСТУ Б В.2.5-38:2008 Національний стандарт України. Інженерне обладнання будинків і споруд. Улаштування блискавкозахисту будівель і споруд, 4. ГОСТ 16556-81 Заземление для передвижных электроустановок. Общие технические условия, 5. Иванов В.Г., Электролитические заземлители. Преимущества и перспективы использования/ В.Г.Иванов, А.М.Чернюк // Энергетика та електрифікація.- 2007.- №5, 6 Пат №46648 МПК Н 01 F 27/42. Переносний електролітичний заземлювач/ Артюх С.Ф., Иванов В.Г., Мезеря А.Ю., Чернюк А.М., Колобродов С.О.// Заявник та патентовласник УПА. опубл. 25.12.2009 7. Буданов П.Ф. Модель перколяції проводимості процесу електролітичного заземлення /П.Ф.Буданов, А.М.Чернюк // Озброєння і військова техніка.- 2012.-Вип 2(30) 8. Буданов П.Ф. Определение формы объёмного тела электролита в грунте при работе переносных электролитических заземлителей /П.Ф.Буданов, О.П.Нечуйвітер, А.Ю.Мезеря А.М. Чернюк Ю.А.Пархоменко // Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил.- 2012.- Випуск 1(30) 9. Чернюк А.М. Постановка експериментальних досліджень по определению характеристик работы электролитического заземлителя/ А.М.Чернюк//; П-я міжнародна науково-практична конференція «Якість технологій – якість життя» г.Судак 2010.

Поступила в редколлегию 14.02.2013

УДК 621.316.953:621.04.8

Експериментальне визначення електрофізичних параметрів поверхневих електролітичних заземлювачів передвижних електроустановок / Буданов П.Ф., Чернюк А.М. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – №.17 (990). – С.8-17. Бібліогр.: 9 назв. Іл.: 8. Табл.: 1.

У статті представлений досвід експериментального визначення електрофізичних параметрів поверхневих електролітичних заземлювачів (ПЕЗ) на фізичній моделі і в польових випробуваннях. Підтверджена теоретична основа методу визначення опору ПЕЗ, заснованого на теорії перколяції і фрактальної геометрії

Ключові слова: заземлення пересувних електроустановок, поверхневі електролітичний заземлювач, польові випробування, електрофізичні параметри ґрунту

In the article experience of experimental determination of electric parameters is presented superficial electrolytic grounding (SEG) on a physical model and in the field tests. Theoretical basis of method of determination of resistance of SEG, based on the theory of fractal geometry is confirmed. Fig.: 8. Tabl.: 1. Bibliogr.: 9 title.

Keywords: superficial electrolytic grounding, of electric parameters,

