

# Опыт полевых измерений частотно-зависимых параметров грунта с применением установок вертикального электрического зондирования

Д.В. Куклин, Т.В. Аксенович, Е.Д. Бороздина

## Введение

Исследования показывают [1], что частотная зависимость электрических параметров грунта (удельное сопротивление и диэлектрическая проницаемость) существенно влияет на импульсные характеристики заземлителей (для грунтов с удельным сопротивлением выше первых сотен Ом·м). Однако данная частотная зависимость не изучена в достаточной степени: не существует общей модели, подходящей для разных типов грунта. Возможны два подхода: получение множества дополнительных экспериментальных данных с целью создания общей модели для разных грунтов, либо проведение измерений параметров грунта для каждого отдельного практического случая (без применения какой-либо модели). Оба подхода требуют удобного способа измерения частотно-зависимых параметров грунта. Однако существующие методы измерения данных параметров требуют значительных временных затрат, являются трудоемкими при использовании и могут быть неточны в определенных случаях.

Одной из основных модификаций метода сопротивлений является метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). Измерительная установка состоит, как правило, из четырех электродов: двух питающих (А и В) и двух приемных (М и N). Электроды представляют собой металлические штыри, которые забиваются в землю. Суть данного метода заключается в том, что через питающие электроды в исследуемом грунте создается электрическое поле, вызываемое током  $I_{AB}$ , стекающим с данных заземлений, и на приемных электродах возникает разность потенциалов  $U_{MN}$ . Измерив силу тока питающей линии и значение падения напряжения между измеряемыми точками М и N, можно вычислить кажущееся удельное сопротивление среды  $\rho_k$ . Получаемая величина  $\rho_k$  является условной, так как измеряемая среда в обычных условиях неоднородна. Она обобщенно характеризует электропроводность грунта, состоящего из различных пород со сходными электрическими свойствами.

Помимо удобства использования, данный метод позволяет избавиться от контактного сопротивления, которое может достигать значительных величин (внося существенную ошибку в результаты измерений).

В работе кратко описано измерительное устройство, основанное на описанном выше методе, представлены примеры результатов полевых измерений, а также даны рекомендации по их проведению.

### **Предварительные расчеты**

Перед проведением измерений вначале были проведены необходимые расчеты (при помощи ранее созданной компьютерной программы) и определены установки ВЭЗ, обладающие наименьшим электромагнитным влиянием между измерительными цепями [2].

Основной вывод по результатам расчетов заключается в том, что при измерениях следует применять установки с перпендикулярным расположением проводников, при условии, что длина проводников составляет единицы метров. Расчетами также определены прочие требования к измерительному устройству: частота аналого-цифрового преобразователя (АЦП) устройства должна составлять порядка нескольких десятков мегагерц или более; ошибка разности фаз между током и напряжением не должна превышать единицы наносекунд; паразитная емкость между измерительными цепями тока и напряжения не должна превышать первые единицы пикофарад; сопротивление не должно быть меньше единиц-десятков мегаом; должны быть исключены любые проводники, присоединенные к измерительным электродам, помимо тех, что непосредственно участвуют в вводе тока в грунт и измерении напряжения. Эти требования не позволяют применить осциллограф с изолированными каналами, вследствие паразитной емкости между ними.

### **Измерительное устройство**

Принимая во внимание результаты расчетов, были проведены предварительные полевые измерения частотно-зависимых параметров грунта и определены дополнительные требования к устройству, которые затруднительно определить расчетным методом. Вначале изоляция между измерительными цепями была обеспечена путем применения оптопар; ток и напряжение в данном случае измерялись при помощи двух отдельных устройств, обладающих своими АЦП. Данные измерения показали, что оптопары не обеспечивают достаточной степени изоляции между измерительными цепями. А также выяснилось, что в случае применения двух АЦП, которые тактируются отдельными генераторами, ошибка измерения чрезмерно велика на высоких частотах. Также было определено, что напряжение источника должно составлять первые десятки вольт и более.

После этого для измерений были применены дифференциальные пробники с высоким внутренним импедансом (рис. 1). Данный подход позволил существенно уменьшить ошибку, связанную с изоляцией между измерительными цепями. Было определено, однако, что для более точных измерений необходим больший импеданс между измерительными цепями, чем тот, что могут обеспечить дифференциальные пробники.

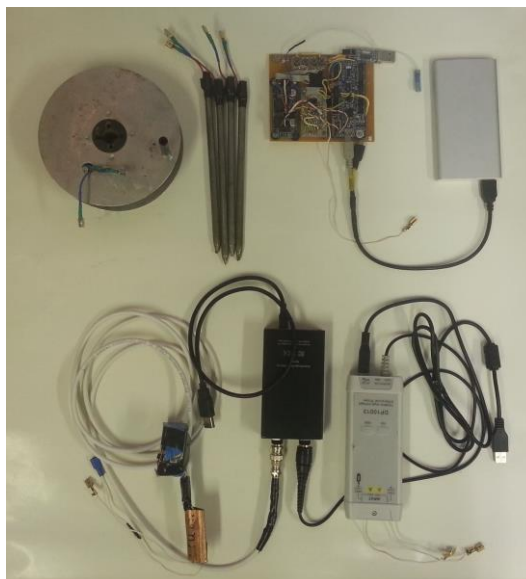


Рис. 1. Дифференциальные пробники, генератор и портативный осциллограф

Для обеспечения лучшей изоляции между цепями измерения тока и напряжения была выбрана оптоволоконная развязка, после чего был создан и протестирован прототип измерительного устройства (рис. 2, слева). Затем с целью сокращения времени измерений была проведена модификация устройства (рис. 2, справа) и в процессе дальнейшей эксплуатации выявлены прочие недостатки.

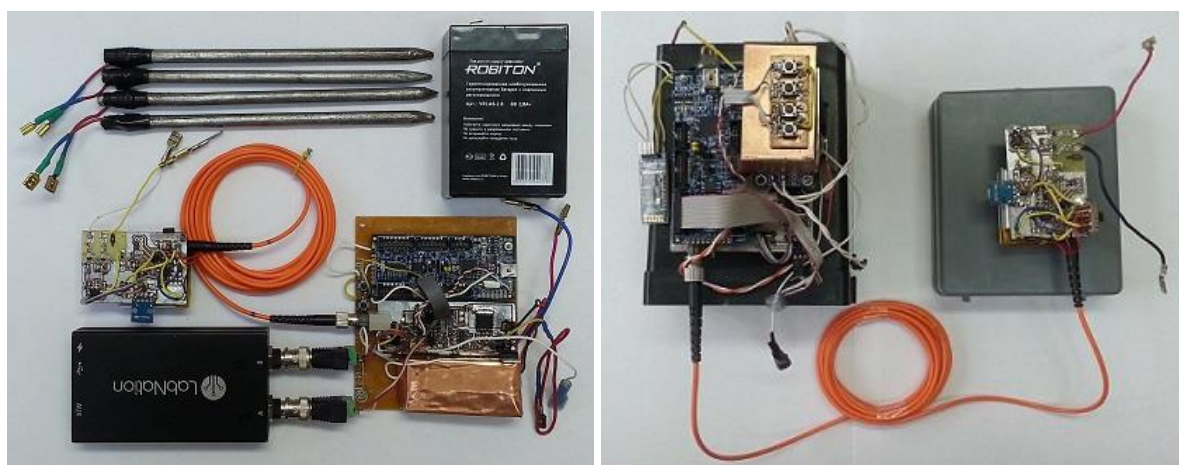


Рис. 2. Измерительное устройство и его модификация

Во время отладки измерительного устройства было экспериментально подтверждено существенное электромагнитное влияние при параллельном расположении измерительных проводников и при большой длине проводников в целом (что ранее было показано при помощи расчетного метода).

После этого было создано измерительное устройство (рис. 3), в котором были учтены все предыдущие недочеты: сокращено время измерения и значительно увеличена точность измерений; уменьшено влияние температуры на результаты измерения; расширен частотный диапазон пробника напряжения; создано приложение для смартфона для удобного управления устройством, а также сохранения и просмотра результатов измерений; уменьшены размеры устройства.

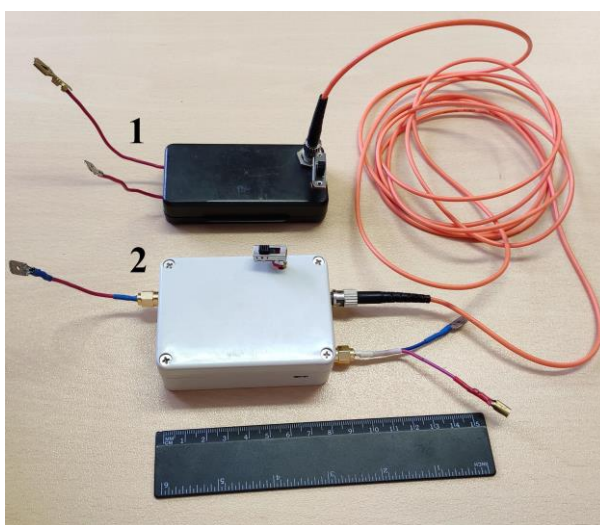


Рис. 3. Устройство для измерения частотно-зависимых параметров грунта; 1-генераторно-измерительный модуль, 2-пробник измерения напряжения

Устройство содержит генераторно-измерительный модуль, а также пробник измерения напряжения, соединенные оптоволоконным кабелем (см. рис. 3). Перед началом измерений необходимо выполнить калибровку устройства, что позволяет избавиться от ошибок измерения амплитуды и фазы. Генераторно-измерительный модуль 1 (на рис. 3) служит для ввода в грунт (и измерения) тока через токовые электроды. Пробник 2 (на рис. 3) служит для измерения напряжения между потенциальными электродами. Полученные при измерениях значения сигналов оцифровываются. Далее к ним применяется преобразование Фурье и находятся напряжение и ток для нужной частоты в комплексном виде (при этом учитывается разность фаз между током и напряжением, измеренная при калибровке).

Коэффициент установки ВЭЗ, с помощью которого вычисляются электрические параметры грунта, рассчитывается по следующей формуле:

$$k = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

где  $r_1$  и  $r_2$  — расстояния от первого потенциального электрода до первого и второго токового электрода, соответственно;  $R_1$  и  $R_2$  — расстояния от второго потенциального электрода до первого и второго токового электрода, соответственно.

Искомые значения удельного сопротивления  $\rho$  и диэлектрической проницаемости  $\varepsilon'$ , с учетом коэффициента установки  $k$ , рассчитываются по формуле:

$$\frac{\hat{I}(\omega)}{\hat{U}(\omega)} = k \cdot \left( \frac{1}{\rho} + j\omega\varepsilon' \right)$$

Рассчитанные значения частотно-зависимых параметров грунта сохраняются во внутренней памяти измерительного устройства и после чего могут быть переданы через устройство Bluetooth, встроенное в генераторно-измерительный модуль.

### Измерения

Порядок проведения измерений электрических параметров грунта определен следующим образом. Для начала выбирается глубинность исследования (определяющая глубину участка грунта, который вносит наибольший вклад в результат измерения [3,4]). Как правило, глубина, на которой располагаются горизонтальные проводники заземлителей, составляет 0.5-1 м. Исходя из глубинности исследования выбирается тип установки ВЭЗ и расстояние между электродами. Затем в грунт вводятся два токовых и два потенциальных электрода. Далее проводится калибровка устройства и сами измерения. В последующем, результаты измерения передаются на смартфон.

На рис. 4 представлены примеры результатов измерений для высокоомных грунтов. Установка ВЭЗ в рассматриваемом случае дипольная. Причем диполи расположены перпендикулярно друг относительно друга.

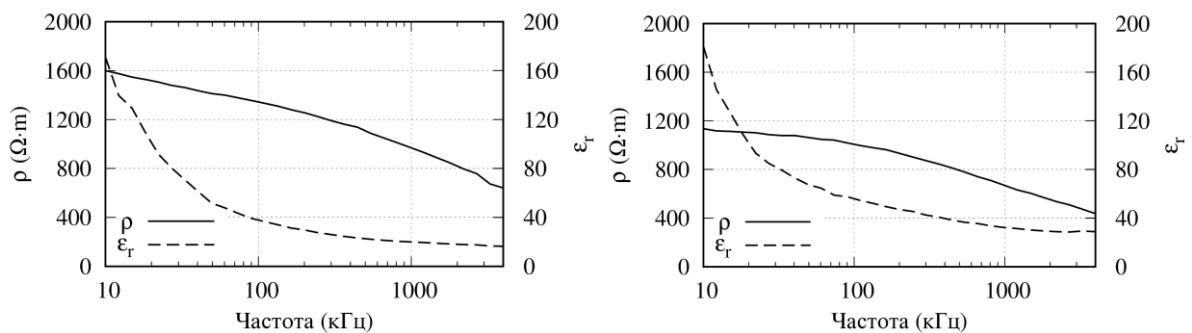


Рис. 4. Примеры результатов измерений

Более показательной (по сравнению с глубиной исследования) величиной является значение функции, отражающей чувствительность результатов измерений к неоднородности грунта в точке с определенными координатами (т.н. производной Фреше) [5]. Такой способ позволяет выделить отдельные участки грунта, влияющие на измеренные параметры (в том случае, если грунт в этих участках неоднороден). На рис. 5 показаны значения данной функции для установки ВЭЗ, используемой при измерениях (соответствующих результату на рис. 4, справа).

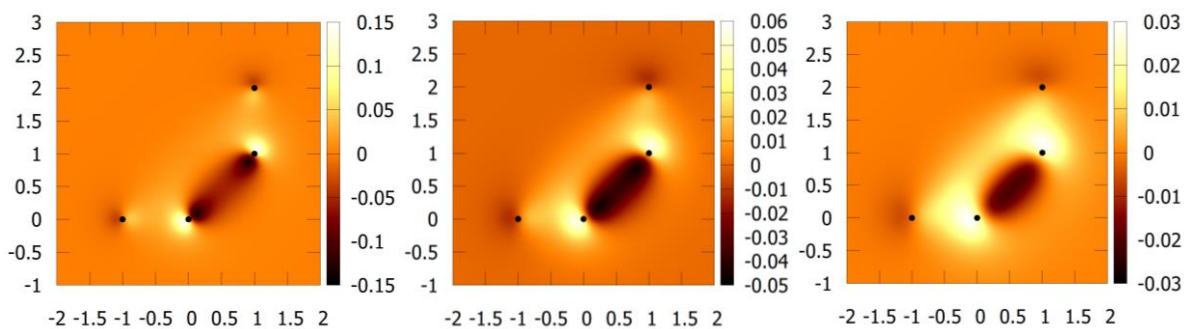


Рис. 5. Значения функции чувствительности для глубин (слева направо) 0.15 м, 0.25 м и 0.35 м; точками показаны расположения электродов (два нижних электрода - токовые); по вертикальной и горизонтальной осям показаны размеры в метрах

Из рисунка можно видеть, что влияние неоднородностей грунта резко падает с глубиной. Также можно отметить, что наиболее чувствительными к неоднородностям являются области, непосредственно прилегающие к электродам.

## Выводы

Разработана методика полевых измерений частотно-зависимых параметров грунта в частотном диапазоне токов молнии (от килогерц до нескольких мегагерц). Установлено, что для избежания электромагнитного влияния измерительные проводники следует располагать перпендикулярно (причем длина проводников должна составлять единицы метров).

После рассмотрения нескольких различных вариантов измерительных устройств, было установлено, что использование оптоволоконной развязки между измерительными цепями приводит к наибольшей точности измерений. Разработано портативное измерительное устройство. На данный момент время одного измерения составляет несколько минут, и устройство может успешно применяться для полевых измерений частотно-зависимых параметров грунта как в исследовательских, так и в инженерных целях. Также применение данного устройства не требует земляных работ и прочих трудоемких процедур (что характерно для других существующих на данный момент способов полевых измерений частотно-зависимых параметров грунта).

Результаты измерений указывают на заметное отличие частотно-зависимых параметров от тех, что были получены другими авторами. Это подтверждает необходимость получения более обширных экспериментальных данных для различных грунтов (в противном случае невозможно провести точный расчет грозоупорности линий электропередачи для высокоомных грунтов).

### Литература

1. Visacro S., Silveira F.H. The Impact of the Frequency Dependence of Soil Parameters on the Lightning Performance of Transmission Lines // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2015. № 3 (57). С. 434–441.
2. Kuklin D. Numerical Analysis of Electromagnetic Coupling Effects in Measurements of Frequency Dependent Soil Electrical Properties // Progress In Electromagnetics Research. 2019. Т. 79. С. 101–111.
3. Roy A. Depth of Investigation in Wenner, Three-Electrode and Dipole-Dipole DC Resistivity Methods // Geophysical Prospecting. 1972. Т. 20. № 2. С. 329–340.
4. Barker R. Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays // GEOPHYSICS. 1989. Т. 54. № 8. С. 1031–1037.
5. Loke M.H. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. 2015.