

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛИТЕЛЯ ОПОРЫ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ В ВЫСОКООМНОМ ГРУНТЕ

С.Л. Шишигин, И.Н. Смирнов, Д.С. Шишигин

Выполнено математическое моделирование высокочастотного метода измерения сопротивления заземлителя опоры воздушной линии с грозозащитным тросом. Показано, что не учитываемый ранее эффект зависимости электропроводности грунта от частоты приводит к существенному занижению измеряемого стационарного сопротивления заземлителя в высокоомном грунте. Предложена расчетная методика, позволяющая исключить эту погрешность.

Ключевые слова: воздушная линия, опора, заземлитель, сопротивление, измерение, высокоомный грунт, высокочастотный метод.

Стационарное сопротивление заземлителя – сопротивление на промышленной частоте – нормируется при проектировании воздушных линий (ВЛ) и контролируется измерениями [1,2]. В основу измерений положен метод амперметра-вольтметра. При заданном токе источника, вводимого в заземлитель, измеряется напряжение заземлителя, отношение напряжения к току дает сопротивление заземлителя.

До подключения грозозащитного троса измерения стационарного сопротивления проводятся на низкой частоте, где удастся добиться высокой точности измерений за счет теоретически обоснованной расстановки измерительных электродов. По этой причине в ряде стран измерения допускается проводить только на низкой частоте [2]. Действующий стандарт ФСК ЕЭС (СТО 56947007-29.240.01.221-2016) также рекомендует низкочастотные измерения.

Проблему вызывает измерение сопротивления заземлителей ВЛ с грозозащитным тросом, когда параллельно измеряемому сопротивлению подключены заземлители соседних опор, искажающие результаты измерений.

Существуют разные подходы к решению проблемы. Измерения на низкой частоте проводятся с помощью токовых клещей, которые позволяют измерить ток, протекающий только через измеряемое сопротивление, однако для сложных фундаментов их применение затруднительно. В методе СибНИИЭ проводится серия из трех измерений на низкой частоте с разной расстановкой измерительных электродов, что позволяет оценить ток, ответвляющийся в соседние опоры, однако погрешность метода слишком высока [3]. В последнее время все чаще используются высокочастотный и импульсный метод измерений [2, 4], позволяющие исключить влияние соседних опор на высокой частоте или при импульсном воздействии.

В импульсном методе в заземлитель вводится импульс тока с коротким фронтом и проводится измерение напряжения заземлителя до момента прихода отраженных волн от соседних опор, которые будут искажать результаты. При длине пролета 300 м предельное время измерений составляет 2 мкс.

Идея высокочастотного метода заключается в проведении измерений на высокой частоте – порядка 150 кГц [2], на которой индуктивность троса и включенная параллельно емкость опоры, троса и заземлителя создают режим резонанса тока. В результате, из-за большого (теоретически бесконечного) сопротивления троса соседние опоры отключены и не влияют на результаты измерений.

Эти методики, реализованные в промышленно выпускаемых измерительных приборах, хорошо зарекомендовали себя для заземлителей в низкоомных грунтах, однако в высокоомном грунте дают заниженные значения по сравнению с измерениями на низкой частоте [4].

Исследование причин занижения измеряемого сопротивления заземлителя в высокоомном грунте импульсным методом показало [5], что основной причиной является не учитываемая в настоящее время зависимость электропроводности грунта от частоты. Без корректировки результатов измерений невозможно определить стационарное сопротивление заземлителя опоры в высокоомном грунте (скальном, песчаном, мерзлом), характерном для многих регионов нашей страны, с требуемой точностью.

Целью работы является моделирование высокочастотного метода измерений сопротивления заземлителя опоры ВЛ с тросом в высокоомном грунте для анализа возникающей погрешности и способах ее исключения.

Принцип измерений по методу амперметр-вольтметр. Для проведения измерений, помимо измерительного устройства с источником тока, требуется два электрода (рис. 1а). Ток источника I вводится в заземлитель, растекается в земле, собирается токовым электродом и возвращается к источнику по токовому проводнику. Измеряется напряжение заземлителя U относительно потенциального электрода. Сопротивление заземлителя определяется как $R=U/I$. При измерениях на низкой частоте расположение электродов по однолучевой или двухлучевой схеме (рис. 1, б) исключает погрешность измерений (в однородном грунте) [5].

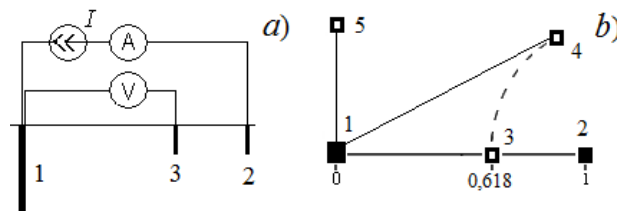


Рис. 1. Схема измерений: 1 – заземлитель; 2 – токовый электрод; потенциальный электрод, расположенный по схеме: 3 – однолучевой; 4 – двухлучевой; 5 – ортогональной; вид: а – сбоку; б – сверху

При измерениях на высокой частоте подобное расположение электродов недопустимо из-за сильных электромагнитных помех в потенциальном проводе, вызванных токовым проводником. По этой причине провода располагаются ортогонально (рис.1б), что исключает индуктивные помехи, однако занижает измеряемое сопротивление тем больше, чем ближе к заземлителю расположены электроды [5]. Расчетная оценка этих погрешностей в однородной и многослойной земле позволяет скорректировать результаты измерений.

Частотные характеристики электрических параметров грунта. Частотные характеристики удельной проводимости $\sigma(\omega)$ и диэлектрической проницаемости грунта $\epsilon(\omega)$ получены экспериментально многими исследователями (обзор в [6]).

Будем использовать модель Алипио-Висакро [7], рекомендуемую СИГРЭ [8].

В работе [5] оригинальная форма записи частотных функций $\sigma(\omega)$, $\epsilon(\omega)$ по данной модели преобразована к более удобной форме комплексной удельной проводимости

$$\sigma(j\omega) = \sigma_0 \left(1 + j\omega\epsilon / \sigma_0 + 2.37 \left(10^{-3} / \sigma_0 \right)^{0.73-n} \left(j\omega\epsilon / \sigma_0 \right)^n \right), n = 0.54, \epsilon = 12\epsilon_0, \quad (1)$$

где σ_0 удельная проводимость грунта на низкой частоте (100 Гц).

Расчетная модель ВЛ. Расчетная модель ВЛ состоит из пяти опор, соединенных тросом. Требуется «измерить» стационарное сопротивление заземлителя опоры, состоящего из железобетонного фундамента и стальных шин (рис.2), высокочастотным методом. Грунт высокоомный, удельное сопротивление $\rho=3000$ Ом·м (на низкой частоте).

Расчеты проводятся в компьютерной программе ЗУМ частотным методом. Погрешности, вызванные расстановкой измерительных электродов и изученные в [5], не являющиеся определяющими, поэтому далее не учитываются.

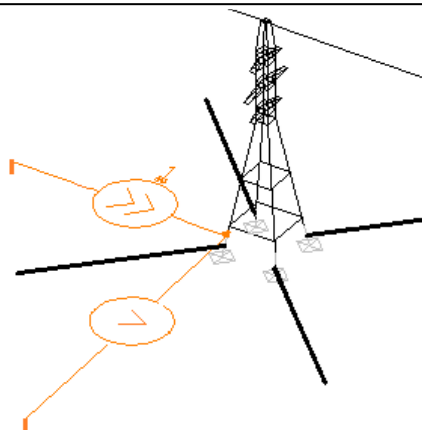


Рис. 2. Расчетная модель опоры ВЛ с тросом; горизонтальные шины 50x5 мм длиной 20 м, длина пролета 300 м (соседние опоры не показаны)

Результаты моделирования.

Вариант 1. Классическая модель грунта, $\rho = \text{const}$.

По частотной характеристике модуля сопротивления заземлителя опоры ВЛ без троса видим, что вплоть до частоты 100 кГц сопротивление заземлителя равно стационарному сопротивлению $R=56 \text{ Ом}$ (рис.3, график 1). В высокоомном грунте сопротивление заземлителя опоры носит емкостной характер, поскольку снижается с увеличением частоты.

Подключим трос и вновь рассчитаем частотную характеристику (рис.3, график 2). На низкой частоте измеряемое сопротивление многократно снижается пропорционально числу заземлителей соседних опор (в данном случае снижение почти в 5 раз, поскольку число опор в расчетной модели равно 5). Очевидно, что проведение измерений на низких частотах для ВЛ с тросом по рассмотренной методике недопустимо.

С увеличением частоты измеряемое сопротивление возрастает из-за увеличения индуктивного сопротивления троса, что приводит к уменьшению влияния соседних опор. На частоте 100 кГц имеет место режим резонанса токов параллельного участка “индуктивность троса – емкость троса, опоры и заземлителя”, поэтому соседние опоры отключены и практически не влияют на результаты измерений. Сопротивление заземлителя на частоте 100 кГц максимально по сравнению с другими частотами и равно $z=52.5 \text{ Ом}$, что лишь на 6% ниже стационарного сопротивления.

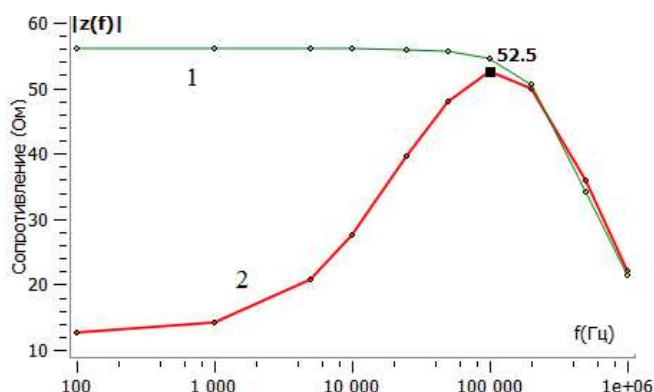


Рис.3. Частотная характеристика модуля сопротивления заземлителя опоры ВЛ в грунте с независимым от частоты удельным сопротивлением для: 1– ВЛ без троса; 2– ВЛ с тросом

Таким образом, выполненные расчеты дают теоретическое основание для применения высокочастотного метода измерений в классической модели грунта с электропроводностью, не зависящей от частоты (такими свойствами обладает низкоомный

грунт), – необходимо выполнить серию измерений на разных частотах и выбрать максимальное значение. Но в высокоомном грунте, электропроводность которого существенно зависит от частоты (1), данная методика неадекватна.

Вариант 2. Грунт с частотно-зависимыми параметрами (1).

По частотной характеристике модуля сопротивления заземлителя опоры ВЛ без троса видим (рис. 4, график 1), что сопротивление заземлителя существенно снижается с увеличением частоты из-за увеличения удельной проводимости грунта. Определить стационарное сопротивление по измерениям на высокой частоте без корректировки результатов невозможно. На частоте 100 кГц, например, измеренное сопротивление в 3 раза меньше стационарного сопротивления.

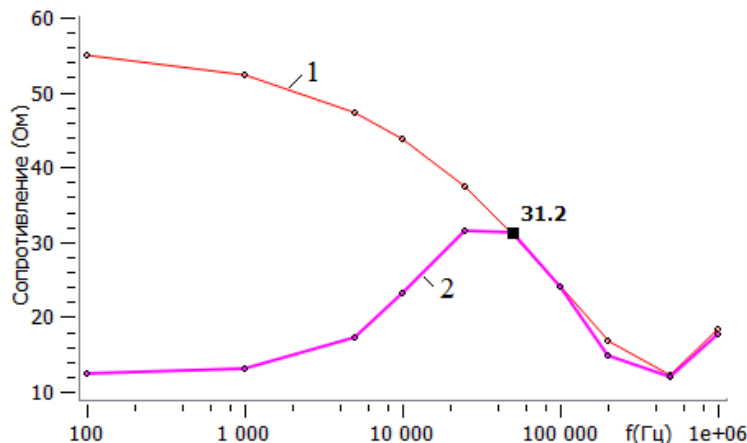


Рис. 4. Частотная характеристика модуля сопротивления заземлителя опоры ВЛ в грунте с частотно-зависимой электропроводностью (1) для:
1 – ВЛ без троса; 2 – ВЛ с тросом

Добавим трос. По частотной характеристике модуля сопротивления заземлителя видим (рис.4, график 2), что резонансная частота уменьшается до 50 кГц (из-за увеличения емкостной проводимости заземлителя с увеличением частоты), на которой и следует проводить измерения. Заметим, что сопротивление заземлителя опоры ВЛ с тросом и без троса совпадают и на более высоких частотах, что объясняется возрастающим индуктивным сопротивлением троса, которое фактически отключает заземлители соседних опор.

Измеренное значение вновь нельзя отождествлять со стационарным сопротивлением. Оно (31.2 Ом) почти вдвое меньше точного значения (56 Ом). Причина в том, что на высоких частотах проводимость грунта существенно больше, чем на низкой частоте, что следует из (1). Результаты измерений на высокой частоте следует корректировать.

Для определения стационарного сопротивления результаты измерений следует увеличить пропорционально увеличению проводимости грунта на высокой частоте согласно (1)

$$R = z(\omega) \frac{|\sigma(j\omega)|}{\sigma_0},$$

что дает $R=51.2$ Ом при $z(\omega)=31.2$ Ом, $\omega=2\pi f$, $f=50$ кГц, $\sigma_0=1/\rho$, $\rho=3000$ Ом·м.

Полученное значение меньше стационарного сопротивления заземлителя лишь на 9%.

Выводы. Стационарное сопротивление заземлителей опор ВЛ является нормируемым параметром, величина которого контролируется измерениями. Трудности вызывает измерение сопротивления заземлителей опор ВЛ с грозозащитным тросом, связанные с необходимостью исключения влияния соседних опор. Идея высокочастотного

метода заключается в подборе частоты измерений, на которой индуктивность троса и емкость системы “трос-опора-заземлитель” попадают в режим близкий к резонансу тока так, что сопротивление троса велико. Тогда соседние опоры не влияют на результаты измерений. Подобная методика дает точные результаты в низкоомном грунте, однако ее нельзя применять для измерений в высокоомном грунте, который обладает резко выраженными частотными свойствами. На высоких частотах электропроводность грунта существенно возрастает, поэтому измеряемое сопротивление существенно ниже стационарного сопротивления заземлителя опоры. Результаты измерений следует скорректировать (в большую сторону) пропорционально изменениям удельной проводимости грунта, что позволяет получить стационарное сопротивление заземлителя опоры с требуемой точностью.

Список литературы

1. РД 153-34.0-20.525-00. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок. М.: СПО ОРГРЭС, 2000. 24 с.
2. Methods for measuring the earth resistance of transmission towers equipped with earth wires: Technical Brochure № 275. WG C4.2.O2. Electra, 2005. № 220. С. 30 – 41.
3. Нестеров С.В. Ошибки при измерениях сопротивлений заземления опор ВЛ по методу СибНИИЭ // Вторая Российская конф. по заземляющим устройствам. Сб. докл., Новосибирск: Сибир.энергет.академия, 2005. С. 125-133.
4. Колобов В.В., Баранник М.Б., Селиванов В.Н., Ефимов Б.В. Измерения сопротивления опор воздушных линий электропередачи с грозотросом импульсным методом // Энергетик. 2017. № 11. С. 19-24.
5. Шишигин С.Л., Черепанов А.В., Шишигин Д.С. Импульсный метод измерения сопротивления заземлителей // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25, № 2. С. 30–41.
6. Шишигин С.Л., Черепанов А.В., Шишигин Д.С. Расчет заземлителей в грунте с частотно-зависимыми параметрами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 6. С. 49-58.
7. Alipio R., Visacro S. Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil // IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, 2014. Vol. 56. No. 5. P. 1163–1171.
8. CIGRE WG C4.33. Impact of soil-parameter frequency dependence on the response of grounding electrodes and on the lightning performance of electrical systems // CIGRE Technical Brochure, 2019. No. 781. [Электронный ресурс] URL: <https://slideplayer.com/slide/13693062> (дата обращения: 10.02.2020).

Шишигин Сергей Леонидович, д-р техн. наук, профессор, ctod28@yandex.ru, Россия, Вологда, Вологодский государственный университет,

Смирнов Иван Николаевич, аспирант, ivan.smirnov18@mail.ru, Россия, Вологда, Вологодский государственный университет,

Шишигин Дмитрий Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, shishigind@yandex.ru, Россия, Вологда, Вологодский государственный университет

HIGH-FREQUENCY METHOD FOR MEASURING THE RESISTANCE OF THE GROUNDING SYSTEM OF THE TRANSMISSION LINE TOWER IN HIGH-RESISTANCE SOIL

S.L. Shishigin, I.N. Smirnov, D.S. Shishigin

Mathematical modeling of the high-frequency method of measuring the resistance of the grounding system of a transmission line tower with an overhead ground wire is carried out. It is shown that the previously ignored effect of the soil electrical conductivity dependence on the frequency leads to a significant underestimation of the measured stationary resistance of the grounding system in high-resistance soil. A calculation method is proposed to eliminate this error.

Key words: transmission line, transmission line tower, grounding system, resistance, measurement, high-resistance soil, high-frequency method.

Shishigin Sergey Leonidovich, doctor of technical sciences, professor, ctod28@yandex.ru, Russia, Vologda, Vologda State University,

Smirnov Ivan Nikolaevich, postgraduate, ivan.smirnov18@mail.ru, Russia, Vologda, Vologda State University,

Shishigin Dmitry Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, shishigind@yandex.ru, Russia, Vologda, Vologda State University

УДК 621.316

ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ УЧЕБНО-ТРЕНИРОВОЧНЫХ СРЕДСТВ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ПЕРСОНАЛА ЭНЕРГОМЕХАНИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ

Д.Н. Прищепа, А.В. Зубарев

В работе представлен подход к выбору варианта формирования множества учебно-тренировочных средств (УТС), применение которых для подготовки специалистов человеко-машинных систем целесообразно с точки зрения критерия «эффективность-стоимость».

Ключевые слова: учебно-тренировочные средства, эффективность применения электроустановок, экономическое обоснование, целесообразность применения.

Результаты проведенных исследований показывают [1, 2], что в основу обоснования целесообразности создания и применения любых средств подготовки специалистов должны быть положены критерии «эффективность-стоимость», а также следующие гипотезы и аксиомы:

Гипотеза 1. Достижение требуемой эффективности применения электроустановок можно обеспечивать за счет:

ввода в ее состав дополнительных технических средств;
обеспечения требуемого уровня подготовки специалистов.

Гипотеза 2. Повышение уровня подготовки специалистов до максимального значения должно обеспечивать необходимый прирост эффективности работы электроустановок в требуемом диапазоне условий применения.

Гипотеза 3. Достижение требуемого уровня подготовки специалистов может обеспечиваться путем проведения различных видов тренировок при создании ситуаций требуемой категории сложности с использованием:

технических средств (ТС) из состава электроустановок;
дополнительных специалистов;