

DOI: 10.18721/JEST.25202
УДК 621.316.99

С.Л. Шишигин, А.В. Черепанов, Д.С. Шишигин

Вологодский государственный университет, г. Вологда, Россия

ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ

Импульсный метод предназначен для измерения сопротивлений заземлителей опор воздушных линий (ВЛ) с тросом при воздействии импульсов тока, близких по форме к току молнии. Измерительные электроды располагаются по ортогональной схеме, что исключает индуктивные помехи, но приводит к погрешности, достигающей десятки процентов в грунте с высокоомным основанием. Электропроводность высокоомного грунта существенно зависит от частоты или времени при импульсных воздействиях. Удельная проводимость максимальна в начале переходного процесса, затем монотонно убывает в течение десятков микросекунд, что существенно превышает длительность эксперимента. По этой причине прямое измерение стационарного сопротивления заземлителя опоры ВЛ с тросом импульсным методом невозможно. Переходное сопротивление (реакция цепи на единичную ступеньку тока) рассматривается как основная характеристика заземлителя при импульсных воздействиях, определяющая его стационарное, импульсное и мгновенное сопротивление. Получено простое аналитическое выражение переходного сопротивления сосредоточенного заземлителя в высокоомном грунте, пригодное для инженерных расчетов. Предложен способ определения диэлектрической проницаемости грунта по данным импульсного эксперимента. Выполнено тестирование разработанной методики при обработке экспериментальных данных и численном моделировании измерений сопротивления заземлителя опоры ВЛ.

Ключевые слова: заземлитель, сопротивление, импульсный метод, удельная проводимость грунта, частотная зависимость, численное моделирование.

Ссылка при цитировании:

С.Л. Шишигин, А.В. Черепанов, Д.С. Шишигин. Импульсный метод измерения сопротивления заземлителей // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 2. С. 30–41. DOI: 10.18721/JEST.25202.

S.L. Shishigin, A.V. Cherepanov, D.S. Shishigin

Vologda state university, Vologda, Russia

IMPULSE METHOD OF MEASURING IMPEDANCE IN GROUNDING SYSTEMS

The impulse method is designed for measuring impedances of grounding systems of transmission line towers (TL) with overhead grounding wires exposed to current impulses that are similar in form to the lightning current. Measuring electrodes are arranged in the orthogonal pattern that eliminates inductive noise, but leads to an error of up to tens of percent in soil with high-resistance base. Electrical conductivity of high-resistance soil significantly depends on the frequency or time of impulse impacts. The specific conductivity is maximal at the beginning of the transient process, then decreases monotonically for tens of microseconds, which significantly exceeds the experiment duration. For this reason, direct measurement of steady-state impedance of the grounding system of the TL tower with the overhead grounding wire using the impulse method is impossible. The transient impedance (circuit reaction on the unit step current) is regarded as the grounding system's main characteristic that defines its stationary, impulse and instantaneous impedance

upon exposure to impulse impacts. A simple analytical expression of the transient impedance of a concentrated grounding conductor in high-resistance soil suitable for engineering calculations is obtained. A method for determining the dielectric permeability of soil according to the impulse experiment data is proposed. The developed method has been tested for processing experimental data and for numerical modeling of the TL tower grounding system measurements.

Keywords: grounding system, impedance, impulse method, soil specific conductivity, frequency dependence, numerical modeling.

Citation:

S.L. Shishigin, A.V. Cherepanov, D.S. Shishigin, Impulse method of measuring impedance in grounding systems, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25 (2) (2019) 30–41, DOI: 10.18721/JEST.25202.

Введение. Заземлители опор воздушных линий (ВЛ) с грозозащитным тросом обеспечивают растекание токов молнии и части токов короткого замыкания электрических подстанций. Наибольшие трудности вызывает проектирование заземлителей в высокоомном грунте (скальном, песчаном, мерзлом), характерном для многих регионов России, включая перспективные районы Арктики с вечномёрзлыми грунтами.

В настоящее время нормируется стационарное (низкочастотное) сопротивление заземлителей опор ВЛ, которое подлежит определению расчетным путем на этапе проектирования и контролируется измерениями [1,2]. Импульсное сопротивление (условный импеданс по терминологии ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010) – отношение максимума напряжения импульса к максимуму тока $R_i = \max u(t) / \max i(t)$. Мгновенное сопротивление – отношение мгновенного напряжения и тока $r(t) = u(t) / i(t)$. Оба этих параметра широко используются в инженерной практике, несмотря на отсутствие строгого теоретического обоснования.

Переходное сопротивление заземлителя, численно равное входному напряжению при воздействии единичного тока,

$$z(t) = L^{-1} [Z(s) / s], \quad Z(s) = U(s) / I(s), \quad (1)$$

где $U(s)$, $I(s)$ – операторные изображения напряжения и тока, используется в теоретической электротехнике (совместно с переходной проводимостью) для расчета импульсных про-

цессов. Реализация переходного сопротивления стандартными методами синтеза электрических цепей приводит к эквивалентным схемам замещения заземлителей [3]. Современные дискретные модели заземлителей, используемые в численных расчетах, базируются на переходном сопротивлении. И наконец, перечисленные ранее сопротивления являются производными от переходного сопротивления. Тем не менее, переходное сопротивление очень редко используется в научных исследованиях.

Измерения стационарного сопротивления заземлителей ВЛ без троса проводятся низкочастотными методами (на частотах в сотни Гц), которые характеризуются высокой точностью за счет теоретически обоснованной схемы расстановки измерительных электродов. Этот подход используется в США, Финляндии, Греции [2], а также рекомендуется современным стандартом ФСК ЕЭС (СТО 56947007-29.240.01.221-2016).

Измерения сопротивления опор ВЛ с тросом во многих европейских странах производятся высокочастотным методом (на частоте 150 кГц) [2]. Теоретическое исследование этого метода [3] показало, что на данной частоте индуктивность и емкость троса создают режим резонанса токов, что исключает влияние соседних опор. Результатом является сопротивление заземлителя на высокой частоте (аналог импульсного сопротивления), но в высокоомном грунте оно не совпадает со стационарным сопротивлением заземлителя, подлежащим нормировке.

Импульсный метод измерений на основе портативных устройств, использующих тестовые импульсы тока, близкие по форме к току молнии, получил широкое распространение в нашей стране [3–6] и за рубежом [7–12]. Он позволяет измерить переходное, мгновенное и импульсное сопротивление заземлителя опоры ВЛ с тросом, однако измерение стационарного сопротивления заземлителя в высокоомном грунте, где длительность переходного процесса превышает длительность эксперимента, вызывает трудности.

Для решения проблемы в работе [5] описано измерительное устройство, в котором по измеренному мгновенному сопротивлению заземлителя автоматически строится параллельная RC схема (далее $R||C$ схема), где R – стационарное сопротивление. Эта и более сложные схемы, полученные по данным импульсного метода, все чаще используются в качестве модели заземлителя опоры ВЛ задачах грозозащиты. Проблема в том, что для достижения математической точности приходится «жертвовать» физическим содержанием. Оптимальной емкости $R||C$ схемы соответствует диэлектрическая проницаемость грунта, в несколько раз превышающая типовые значения.

Развитие теории импульсного метода измерений (и теории заземлителей в целом) мы видим в переходе к новой модели грунта с частотно-зависимыми электрическими параметрами. По современным экспериментальным данным [13] удельная проводимость высокоомного грунта возрастает в несколько раз с увеличением частоты от 100 Гц до 1 МГц. Удельная проводимость максимальна в начале переходного процесса и далее уменьшается в течение десятков микросекунд [14], что объясняет длительное возрастание переходного сопротивления заземлителя иначе, чем процесс заряда большой емкости в $R||C$ схемах.

Целью настоящей работы является определение погрешностей импульсного метода измерений сопротивлений заземлителей ВЛ в высокоомном грунте, вызванных влиянием измери-

тельных электродов и частотными свойствами грунта; исследование переходного сопротивления сосредоточенного заземлителя в грунте с частотно-зависимыми параметрами и его связей со стационарным, импульсным и мгновенным сопротивлением, включая разработку инженерных формул; анализ экспериментальных данных на основе переходного сопротивления; численное моделирование импульсного метода измерений сопротивления опоры ВЛ с тросом.

Принцип измерений и погрешности, вызванные расстановкой измерительных электродов

Принципиальная схема измерений сопротивления заземлителей включает измерительное устройство со встроенным источником тока и два измерительных электрода (токовый и потенциальный) (рис. 1, *a*). 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 $R = U / I$ с некоторой погрешностью δ . Ставится задача расстановки измерительных электродов так, чтобы погрешность измерений δ была минимальна.

Вначале рассмотрим измерения на низкой частоте.

Потенциал заземлителя (рис. 1) равен

$$\varphi = RI - R_I I,$$

где R – сопротивление заземлителя; R_I – взаимное сопротивление между заземлителем и токовым электродом.

Если расположить потенциальный электрод в точке с потенциалом

$$\varphi_u = -R_I I, \quad (2)$$

тогда

$$U = \varphi - \varphi_u = RI, \quad \delta = 0,$$

т. е. измерительные электроды не создают погрешности.

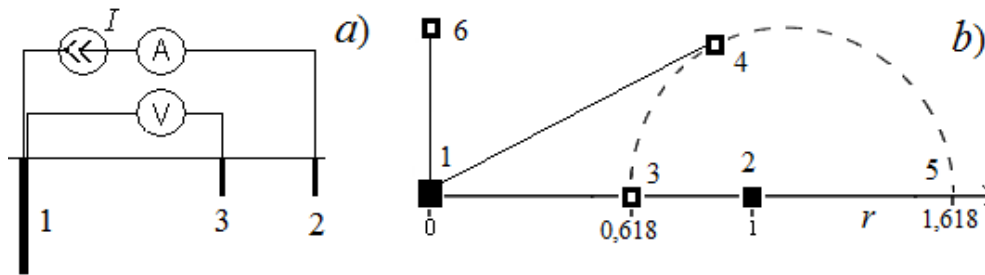


Рис. 1. Схема измерений сопротивления: 1 – заземлитель, 2 – токовый электрод; потенциальный электрод по: 3 – однолучевой схеме, 4 – двухлучевой классической схеме, 6 – ортогональной схеме; а) вид сбоку; б) вид сверху

Fig. 1. Impedance measurement scheme: 1 – grounding system, 2 – current electrode; potential electrode in: 3 – single-beam scheme, 4 – two-beam classical scheme, 6 – orthogonal scheme; a) side view; b) view from the top

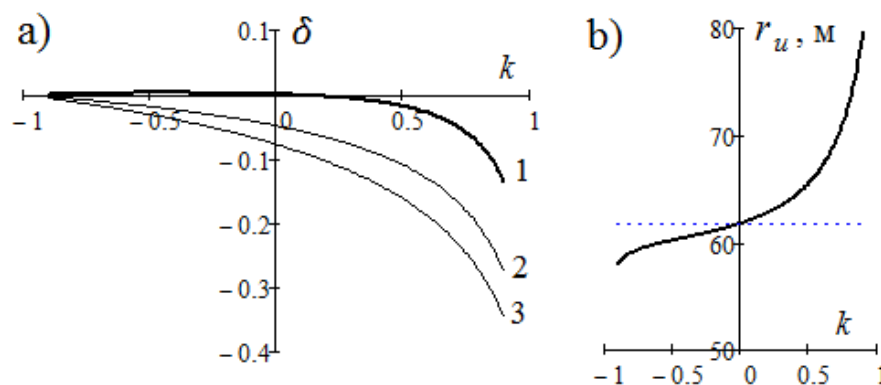


Рис. 2. Зависимости: а) относительной погрешности, вызванной измерительными электродами, для: 1 – однолучевой схемы ($r_i = 100$ м, $r_u = 61.8$ м), 2 – ортогональной схемы ($r_i = 80$ м, $r_u = 80$ м), 3 – ортогональной схемы ($r_i = 50$ м, $r_u = 50$ м); б) оптимального расстояния до потенциального электрода для однолучевой схемы ($r_i = 100$ м)

Fig. 2. Dependencies of: a) the relative error caused by measurement electrodes for 1 – single-beam scheme ($r_i = 100$ м, $r_u = 61.8$ м), 2 – orthogonal scheme ($r_i = 80$ м, $r_u = 80$ м), 3 – orthogonal scheme ($r_i = 50$ м, $r_u = 50$ м); б) the optimal distance to potential electrode for single-beam scheme ($r_i = 100$ м)

Условию (2) в однородном грунте соответствует кривая 3-4-5 (рис. 1, б), полученная в предположении малых размеров заземлителя и измерительных электродов (по сравнению с расстоянием между ними). Обычно потенциальный электрод располагают в точке 3 (однолучевая схема). Двухлучевая схема с потенциальным электродом в точке 4 используется значительно реже. Расположение потенциального электрода в точке 5 (и других точках кривой 3-4-5) рассматривается чисто теоретически.

При расположении потенциального электрода вне фигуры, ограниченной кривой 3-4-5,

измеренное сопротивление заземлителя будет заниженным, иначе завышенным.

Расчеты показывают [15], что измерения по однолучевой схеме с соотношением $r_u = 0.618 r_i$ остаются достаточно точными и в двухслойном грунте (рис. 2, а), за исключением грунта с коэффициентом отражения

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} > 0.6, \text{ или } \rho_2 / \rho_1 > 4, ,$$

где ρ_1 , ρ_2 – удельные сопротивления верхнего и нижнего слоя грунта. В этом случае расстояние до потенциального электрода должно быть

увеличено (рис. 2, *b*), чтобы выполнялось условие (1).

Рассмотрим измерения на высокой частоте.

При однолучевой и двухлучевой схеме расположения измерительных электродов возникают индуктивные помехи в потенциальном проводе от токового провода, что в сочетании с достаточно большой емкостью провода, расположенного на поверхности земли, приводит к сильным помехам [3, 5]. По этой причине от классических схем отказались в пользу ортогональной схемы, где провода от измерительных электродов 1-2 и 1-6 расположены ортогонально (рис. 1, *b*). Однако, из-за нарушения условия (2) результаты измерений всегда занижены. Например, при $k > 0.6$ ($\rho_2 / \rho_1 > 4$) погрешность измерений превышает 20 %, а в пределе, при $k = 1$ ($\rho_2 \gg \rho_1$) достигает 40–50 % при равной суммарной длине проводников по сравнению с однолучевой схемой (рис. 2, *b*). Увеличение расстояния до измерительных электродов в ортогональной схеме позволяет уменьшить погрешность, но устранить ее можно только теоретически, при бесконечном удалении измерительных электродов, что следует из (2).

Таким образом, в классических схемах всегда существует положение измерительных электродов, исключающих погрешность измерений на низкой частоте. Вынужденный переход к ортогональной схеме расположения измерительных электродов, исключающий индуктивные помехи между измерительными проводами при высокочастотных и импульсных воздействиях, занижает измеряемое сопротивление.

Импульсный метод измерения сопротивления заземлителей опор ВЛ с тросом

Результатом измерений импульсным методом являются осциллограммы напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$, обработка которых дает сопротивление заземлителя.

Для ВЛ с тросом предельное время наблюдения за переходным процессом T

ограничено моментом прихода отраженной волны ($T = 2$ мкс при длине пролета 300 м). Основываясь на классической модели грунта, следует считать, что к моменту времени T переходной процесс в заземлителе опоры, расположенном в высокоомном грунте, завершен, тогда стационарное сопротивление $R = r(T) = u(T) / i(T)$.

В действительности длительность переходного процесса заземлителя в высокоомном грунте существенно превышает время прихода отраженных волн T [14], поэтому результаты измерений подлежат корректировке. Поиск аналитических соотношений, связывающих переходное и стационарное сопротивление заземлителя, – наиболее эффективный подход к решению задачи.

Переходное сопротивление сосредоточенного заземлителя в грунте с частотно-зависимой проводимостью

Пусть сосредоточенный (точечный) заземлитель расположен в грунте с частотно-зависимой удельной проводимостью, которую зададим по Мессису в операторной форме [14]

$$\begin{aligned} \sigma(s) &= \sigma_0 + s\varepsilon + 2\sqrt{s\varepsilon\sigma_0} = \\ &= \sigma_0(1 + s\tau + 2\sqrt{s\tau}), \quad \tau = \varepsilon / \sigma_0, \end{aligned} \quad (3)$$

где σ_0 – удельная проводимость грунта на частоте 100 Гц, ε – абсолютная диэлектрическая проницаемость грунта, τ – постоянная времени.

Последнее слагаемое (3) учитывает инерционность процесса диффузии ионов электролита в грунте, что проявляется в увеличении удельной проводимости с увеличением частоты (подробнее [14]).

Операторное сопротивление заземлителя в грунте с удельной проводимостью (3)

$$Z(s) = R / (1 + s\tau + 2\sqrt{s\tau}) = R / (1 + \sqrt{s\tau})^2,$$

где R – стационарное сопротивление.

Переходное сопротивление заземлителя (1)

$$z(t) = L^{-1} \left[\frac{Z(s)}{s} \right] = L^{-1} \left[\frac{R}{s(1 + \sqrt{s\tau})^2} \right] = k(t)R,$$

$$k(t) = \frac{z(t)}{R} = L^{-1} \left[\frac{1}{s(1 + \sqrt{s\tau})^2} \right] \approx \frac{1}{1 + 2(\tau/t)^{0.61}}, \quad (4)$$

$$\tau = \varepsilon / \sigma_0, t > 0.$$

Приближенное выражение в (4), рекомендуемое для инженерных расчетов, найдено методом наименьших квадратов.

Определение стационарного, импульсного и мгновенного сопротивления заземлителя на основе его переходного сопротивления

Пусть переходное сопротивление измерено в момент времени T , тогда стационарное сопротивление равно

$$R = z(T) / k(T),$$

где $k(t)$ определено в (4).

Напряжение заземлителя для произвольного импульса тока определяется интегралом Дюамеля (при нулевых начальных условиях)

$$u(t) = R \int_0^t k(x) \cdot i'(t-x) dx.$$

Мгновенное сопротивление заземлителя на фронте импульса косоугольной формы равно

$$r(t) = \frac{u(t)}{i(t)} = \frac{R}{t} \int_0^t k(x) dx = R \cdot k_1(t),$$

$$k_1(t) = \frac{r(t)}{R} = \frac{1}{t} \int_0^t k(x) dx \approx \frac{1}{1 + 3,2(\tau/t)^{0.56}}, \quad (5)$$

$$\tau = \varepsilon / \sigma_0, 0 < t \leq T_1,$$

где $k(t)$ определено в (4); T_1 — длительность фронта импульса тока. Приближенное выражение в (5), рекомендуемое для инженерных расчетов, получено методом наименьших квадратов.

Пусть задан ток заземлителя косоугольной формы (рис. 3)

$$i(t) = \frac{At}{T_1} - 1(x) \cdot \frac{Ax}{T_1} \left(1 + \frac{0.5T_1}{T_2 - T_1} \right),$$

$$x = t - T_1, T_2 > T_1,$$

где A — амплитуда, T_1 — длительность фронта, T_2 — длительность до полуспада, $1(x)$ — единичная функция. Тогда напряжение заземлителя, полученное вычислением интеграла Дюамеля, равно (рис. 3)

$$u(t) = \frac{At}{T_1} Rk_1(t) - 1(x) \cdot \frac{Ax}{T_1} Rk_1(x) \left(1 + \frac{0.5T_1}{T_2 - T_1} \right), \quad (6)$$

$$x = t - T_1, T_2 > T_1.$$

Мгновенное сопротивление $r(t) = u(t) / i(t)$ зависит от формы импульса тока (рис. 3), поэтому не является универсальной характеристикой заземлителя, в отличие от переходного сопротивления. На спаде тока мгновенное сопротивление достаточно сильно возрастает и в установившемся режиме превышает стационарное сопротивление (рис. 3), поэтому подбор эквивалентных схем на основе мгновенного сопротивления сопряжен с погрешностями.

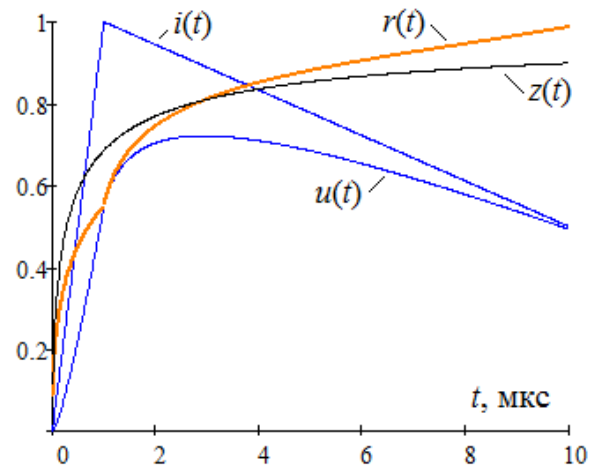


Рис. 3. Параметры заземлителя при воздействии импульса тока единичной амплитуды, $T_1 = 1$ мкс, $T_2 = 10$ мкс, $R = 1$ Ом; $\sigma_0 = 1$ мСм/м, $\varepsilon = 10\varepsilon_0$

Fig.3. Grounding system parameters when exposed to a unit current impulse, $T_1 = 1 \mu s$, $T_2 = 10 \mu s$, $R = 1$ Ohm; $\sigma_0 = 1$ mS/m, $\varepsilon = 10\varepsilon_0$

Импульсное сопротивление заземлителя равно $R_i = \max u(t) / \max i(t)$, где $u(t)$ определено в (6). В высокоомном грунте $R_i < R$.

Электрические параметры грунта по данным импульсного эксперимента

Использование формул (3)-(5) предполагает, что параметры грунта σ_0 и ϵ определены, например в ходе предпроектных испытаний по трассе ВЛ (согласно РД 153-34.3-35.125-99). Импульсный эксперимент дает такую возможность.

При измерениях импульсным методом серийно выпускаемыми приборами определяется сопротивление токовой петли [5], включая сопротивление токового электрода R_T (рис. 1, а), что при известной длине l и диаметре d токового электрода позволяет оценить удельную проводимость грунта [5]

$$R_T = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}, \sigma_0 = \frac{1}{\rho} = \frac{\ln 4l/d}{2\pi l \cdot R_T}. \quad (7)$$

Диэлектрическая проницаемость грунта может быть выбрана по справочным данным (например, РД 153-34.3-35.125-99, Таблица 15.2). На основе экспериментальных данных, в работах Мессира [16] $\epsilon = 8\epsilon_0$, в работе [13] $\epsilon = 12\epsilon_0$. Большинство исследователей в расчетах импульсных процессов принимают $\epsilon = (10-20)\epsilon_0$.

Приближенный характер задания ϵ допустим для классической модели грунта (поскольку обычно $\omega\epsilon < \sigma_0$). В грунте с частотно-зависимыми параметрами влияние ϵ возрастает (из-за множителя ϵ/σ_0), поэтому точность определения ϵ целесообразно повысить.

Предлагается следующая методика. Пусть величина σ_0 задана, например из (7). Тогда определение ϵ производится из условия минимизации среднеквадратичного отклонения переходного сопротивления $z(t)$, полученного экспериментально и расчетным путем (4). Аналогично, для заданного значения ϵ можно уточнить значение σ_0 .

Обработка данных импульсного эксперимента на основе переходного сопротивления

В работе [5] приведены результаты импульсного эксперимента для опоры ВЛ без троса, включая параметры эквивалентной R||C схемы (рис. 4). Сопротивление токового контура (заземлителя опоры и токового электрода) составляло 3000 Ом. По рекомендации авторов [5] на основе формулы (7), примем удельное сопротивление грунта $\rho = 3000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\sigma_0 = 1/\rho$.

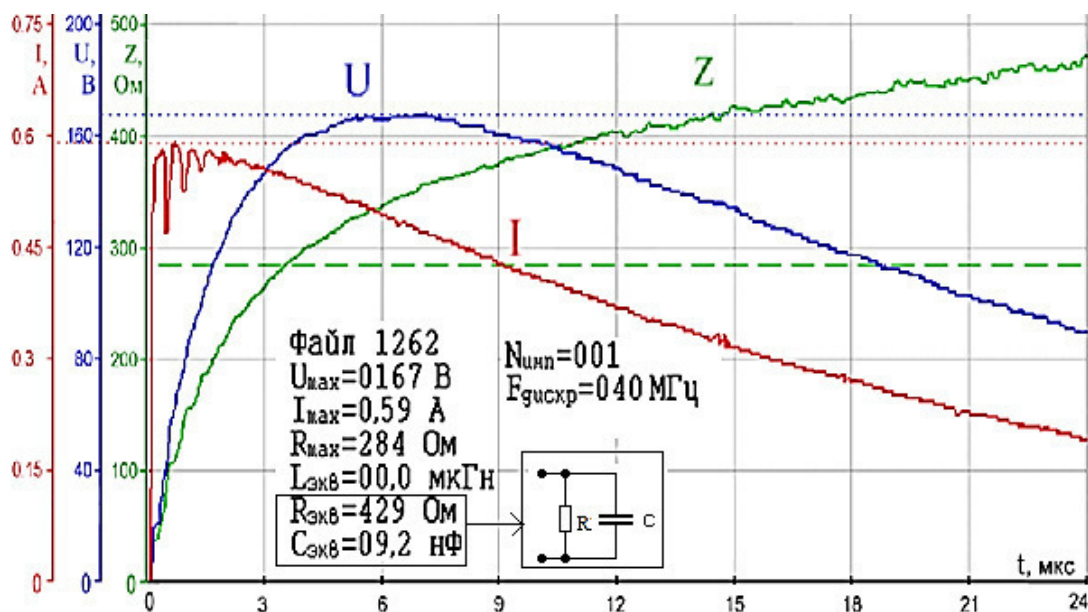


Рис. 4. Результаты импульсного эксперимента для заземлителя опоры ВЛ без троса в высокоомном грунте [5]

Fig. 4. Results of the impulse experiment for the grounding system of the transmission line tower without the overhead grounding wire in high-resistance soil [5]

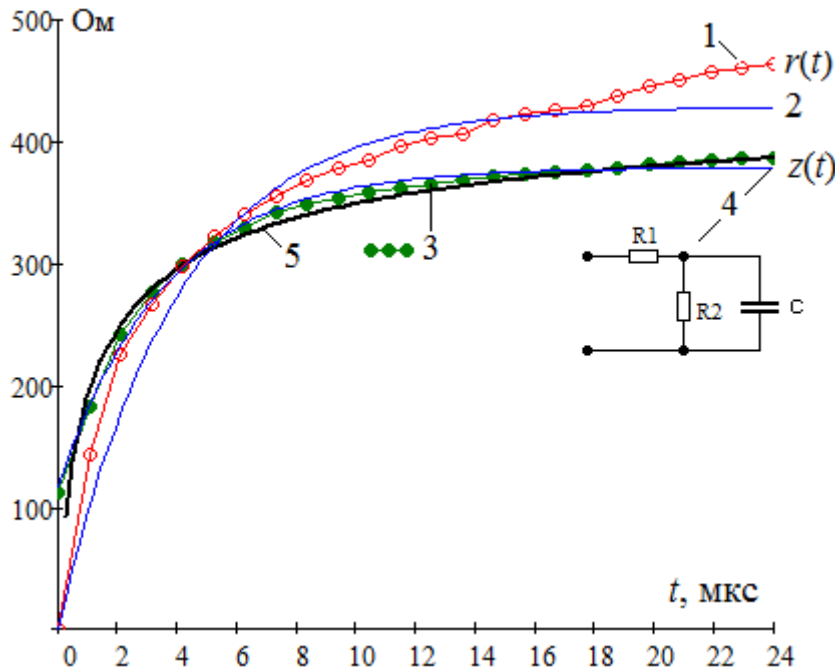


Рис. 5. Мгновенное сопротивление заземлителя: 1 – эксперимент [5]; переходное сопротивление: 2 – R||C схемы по данным [5]; 3 – при обработке экспериментальных данных, 4 – R-R||C схема замещения, 5 – расчет (4)

Fig. 5. Instantaneous grounding system impedance: 1 – experiment [5]; transient impedance: 2 – R||C circuits according to [5] data; 3 – when processing experimental data, 4 – R-R||C equivalent circuit, 5 – calculation (4)

Напряжение $u(t)$ и ток $i(t)$ (рис. 4) оцифрованы (без учета высокочастотных колебаний в начале эксперимента). Качество оцифровки оценивалось визуальным совпадением мгновенного сопротивления $r(t) = u(t)/i(t)$ (рис. 5, кривая 1) с оригиналом (рис. 4).

По данным авторов [5] мгновенному сопротивлению заземлителя соответствует R||C схема ($R = 429$ Ом, $C = 9.2$ нФ) с переходным сопротивлением (рис. 5, кривая 2).

Проанализируем решение. Синтез схемы выполнен по мгновенному, а не переходному сопротивлению, что, как было показано ранее, сопряжено с погрешностями. Емкость в R||C схеме сильно завышена, поскольку соответствующая ей относительная диэлектрическая проницаемость грунта, полученная на основе известной аналогии статических полей $RC = \rho\epsilon$, равна $\epsilon_r = 149$, что на порядок превышает типо-

вые значения. Объяснение дает модель грунта с частотно-зависимыми параметрами, где эквивалентная диэлектрическая проницаемость может достигать значительных величин (подробнее [14]). Но и с этой позиции, наблюдается подмена процесса растекания импульсного тока в грунте с уменьшающейся проводимостью процессом заряда конденсатора большой емкости.

Проведем обработку результатов на основе переходного сопротивления (рис. 5, кривая 3). Его реализация R-R||C схемой производится с высокой точностью (рис. 5, кривая 4), но $\epsilon_r = 136$ вновь завышено.

Минимизация среднеквадратичного отклонения экспериментальных и расчетных значений переходного сопротивления (рис. 5, кривая 5) дает более реалистичное значение $\epsilon_r = 18$ и стационарное сопротивление $R = 457$ Ом. Последнее значение не противо-

речит экспериментальным данным (рис. 4), где максимальное значение мгновенного сопротивления равно 464 Ом (рис. 5).

Численное моделирование импульсного эксперимента

Выполним численное моделирование измерений сопротивления заземлителя опоры ВЛ без троса и с тросом (рис. 6) в высокоомном грунте импульсным методом и попытаемся минимизировать ошибку в определении стационарного сопротивления за счет найденных ранее поправочных коэффициентов. Покажем различия при использовании классической и частотно-зависимой модели грунта.

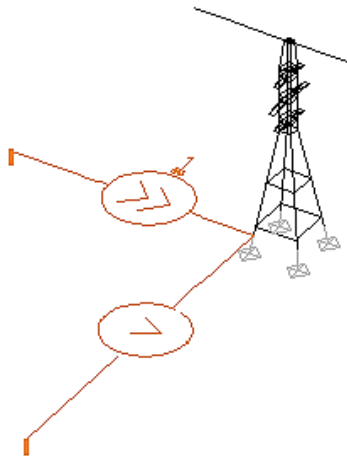


Рис. 6. Расчетная модель опоры ВЛ с тросом (а): длина пролета 300 м (соседние опоры не показаны); длина измерительных проводов 50 м

Fig. 6. Calculation model of the transmission line tower with the overhead grounding wire (a): span length 300 m (neighboring towers are not shown); measuring wires length 50 m

Вариант 1. ВЛ без троса. Будем проводить измерения в момент времени $T = 4$ мкс. Переходное сопротивление заземлителя опоры в классической модели грунта, без измерительных электродов (рис. 7, а, график 1) достигает установившегося значения задолго до момента T , тогда стационарное сопротивление $r(T) = R = 32.9$ Ом.

В грунте с частотно-зависимыми параметрами (рис. 7, а, график 2) сопротивление заземлителя равно $r(T) = 27.5$ Ом, что в 1.2 раза меньше, чем в классической модели грунта

(измерительные электроды не учитываются). Теоретические расчеты (4) дают аналогичную поправку $1/k(T) = 1.2$.

Влияние измерительных электродов в грунте с частотно-зависимыми параметрами (рис. 7, график 3) проявляется в снижении сопротивления до $r(T) = 24.7$ Ом или в 1.11 раза. Аналогичный коэффициент, полученный теоретически для точечных электродов, равен 1.08 (рис. 2, график 3).

Таким образом, стационарное сопротивление заземлителя опоры ВЛ с учетом поправок на частотные свойства грунта и влияние измерительных электродов может быть получено с высокой точностью.

Вариант 2. ВЛ с тросом. График переходного сопротивления заземлителя опоры в классической модели грунта без измерительных электродов (рис. 7, б, график 1) имеет характерную ступенчатую форму, вызванную отраженными волнами от соседних опор. «Измерения» проводим в момент времени $T = 2$ мкс (до прихода отраженных волн). Переходное сопротивление заземлителя в момент наблюдения равно $r(T) = 30,1$ Ом. Сделаем поправку на ответвление тока в трос с волновым сопротивлением $z = 300$ Ом (в двух направлениях)

$$k_1 = \frac{z}{z - r(T)} = 1,11,$$

и получим $r'(T) = k_1 r(T) = 33,4$ Ом, что практически совпадает со стационарным сопротивлением.

В грунте с частотно-зависимыми параметрами (рис. 7, б, график 2) сопротивление заземлителя равно $r(T) = 23.8$ Ом, что в 1.27 раза меньше, чем в классической модели грунта (измерительные электроды не учитываются). Поправка, полученная теоретически (4), дает $k_2 = 1/k(T) = 1.29$.

С учетом измерительных электродов (рис. 7, б, график 3) сопротивление снижается до $r(T) = 21.4$ Ом или в 1,11 раза. Аналогичный коэффициент, полученный теоретически для точечных электродов, составляет $k_3 = 1,08$ (рис. 2, график 3).

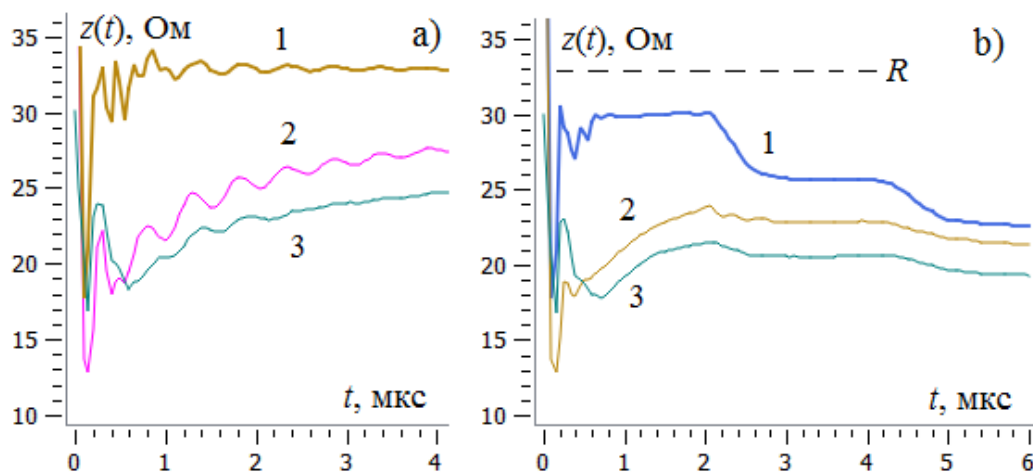


Рис. 7. Переходное сопротивление заземлителя опоры ВЛ (рис. 6) без троса (а) и с тросом (б) в грунте: 1 – $\sigma = \sigma_0 = \text{const}$ без измерительных электродов; 2 – $\sigma(f) = \text{var}$ без измерительных электродов; 3 – $\sigma(f) = \text{var}$ с измерительными электродами; $\sigma_0 = 1/1000$ См/м, $\epsilon = 10\epsilon_0$

Fig. 7. Transient grounding impedance of the transmission line tower (Fig. 6) without (a) and with (b) the overhead grounding wire in soil: 1 – $\sigma = \sigma_0 = \text{const}$ without measuring electrodes; 2 – $\sigma(f) = \text{var}$ without measuring electrodes; 3 – $\sigma(f) = \text{var}$ with measuring electrodes; $\sigma_0 = 1/1000$ S/m, $\epsilon = 10\epsilon_0$

В результате измерений импульсным методом на практике будет получена осциллограмма 3 (рис. 7, б) с переходным сопротивлением $r(T) = 21,4$ Ом. Стационарное сопротивление получаем с учетом поправок на влияние троса, частотные свойства грунта и измерительные электроды $R' = k_1 k_2 k_3 \cdot r(T) = 1,11 \cdot 1,29 \cdot 1,08 \cdot 21,4 = 33,1$ Ом, что согласуется с точным значением (32,9 Ом).

При сравнении переходного сопротивления ВЛ без троса и с тросом (рис. 7), видим, что для ВЛ без троса колебательные процессы значительно интенсивнее. Причина – волновые процессы в опоре ВЛ.

Обсуждение результатов и выводы

1. Переходное сопротивление – теоретически обоснованный и наиболее информативный параметр заземлителя при импульсных воздействиях. Стационарное, импульсное и мгновенное сопротивление заземлителя являются производными от переходного сопротивления.

2. Переходное сопротивление может быть получено в ходе измерений импульсным методом с помощью серийно выпускаемых портативных устройств, генерирующих импульсы тока, близкие по форме к току молнии. Необходимость расположения измерительных электродов по ортогональной схеме (для исключения индуктивных помех) приводит к неустраняемой погрешности измеряемого сопротивления, составляющей десятки процентов в неоднородном грунте с высокоомным основанием. Корректировка результатов измерений на основе расчетных методик здесь неизбежна.

3. Высокоомный грунт обладает ярко выраженными частотными свойствами, что проявляется в значительном снижении удельной проводимости грунта за время растекания тока молнии. Переходное сопротивление монотонно возрастает в течение десятков микросекунд, что существенно превышает длительность измерений. По этой причине прямое измерение стационарного сопротивления заземлителя опоры ВЛ с тросом невозможно, а результаты измерений подлежат корректировке. Решение задачи путем подбора эквивалентных $R||C$ схем сталкивается с трудностями физической интерпретации результатов (из-за завышенной емкости). Аналитические формулы переходного сопротивления сосредоточенного заземлителя в грунте с частотно-зависимыми параметрами, полученные в данной работе, позволяют определить не только стационарное сопротивление, но и оценить диэлектрическую проницаемость грунта.

4. Тестирование предложенной методики при обработке экспериментальных данных других исследователей показало ее эффективность. При численном моделировании импульсного метода измерений сопротивления

заземлителя опоры ВЛ без троса и с тросом показано, что внесение поправочных коэффициентов, найденных теоретически, позволяет определить стационарное сопротивление заземлителя с достаточной 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. No. 220.
- [3] **Боронин В.Н., Коровкин Н.В., Кривошеев С.И., Шишигин С.Л., Миневич Т.Г., Нетреба К.И.** Математическое моделирование заземляющих устройств при действии импульсных токов // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2013. № 6. С. 80–89.
- [4] **Борисов Р.К., Виноградов Д.Н., Морозов Ю.А.** Обследование и реконструкция заземляющих устройств ВЛ 330 кВ // Вторая Российская конф. по заземляющим устройствам: сб. матер. конф. Новосибирск, 2005. С. 151–156.
- [5] **Колобов В.В., Баранник М.Б., Селиванов В.Н., Прокопчук П.И.** Результаты полевых испытаний нового прибора для измерения сопротивления заземляющих устройств опор воздушных линий электропередачи импульсным методом // Труды Кольского научного центра РАН. 2017. Т. 8, № 1-14. С. 12–30.
- [6] **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.
- [7] **Rodrigues B.D., Visacro S.** Portable Grounding Impedance Meter Based on DSP. IEEE Trans // Instrumentation and Measurement. 2014. Vol. 63, no. 8. P. 1916–1925.
- [8] **Chisholm W.A., Jamali B., Mathew M., Driscoll J., Bologna F.F.** Transient resistivity measurements on 345-kV transmission towers // 2013 International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA), 2013, P. 171–176
- [9] **Yang S., Zhou W., Huang J., Yu J.** Investigation on Impulse Characteristic of Full-Scale Grounding Grid in Substation // IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility. 2018. Vol. 60. No. 6. P. 1993–2001.
- [10] **Zhou W., Liu Y., Li G., Yan G., Yang S., Li H., Su C.Q.** Power Frequency Interference and Suppression in Measurement of Power Transmission Tower Grounding Resistance // IEEE Trans. Power Delivery. 2015. Vol. 30, no. 2. P. 1016–1023.
- [11] **Visacro S., Rosado G.** Response of Grounding Electrodes to Impulsive Currents: An Experimental Evaluation // IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility. 2009. Vol. 51, no. 1. P. 161–164.
- [12] **Harid N., Griffiths H., Mousa S., Clark D., Robson S., Haddad A.** On the Analysis of Impulse Test Results on Grounding Systems // IEEE Trans. Industry Applications. 2015. Vol. 51, no. 6. P. 5324–5334.
- [13] **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.
- [14] **Шишигин С.Л., Черепанов А.В., Шишигин Д.С.** Моделирование заземлителя в грунте с частотно-зависимой удельной проводимостью // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24, № 3. С. 91–101.
- [15] **Шишигин С.Л.** Векторная форма записи потенциала стержневого заземлителя в однородной и двухслойной земле // Электричество. 2007. № 7. С. 22–27.
- [16] **Cavka D., Mora N., Rachidi F.** A comparison of frequency-dependent soil models: application to the analysis of grounding systems // IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility. 2014. Vol. 56, no. 2. P. 177–187.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ШИШИГИН Сергей Леонидович — доктор технических наук профессор Вологодского государственного университета

E-mail: ctod28@yandex.ru

ЧЕРЕПАНОВ Алексей Викторович — аспирант Вологодского государственного университета

E-mail: alex1234_91@mail.ru

ШИШИГИН Дмитрий Сергеевич — кандидат технических наук преподаватель Вологодского государственного университета

E-mail: shishigind@yandex.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 28.01.2019



REFERENCES

- [1] RD 153-34.0-20.525-00. Metodicheskiye ukazaniya po kontrolyu sostoyaniya zzemlyayushchikh ustroystv elektroustanovok. M.: SPO ORGRES, 2000. 24 c.
- [2] Methods for measuring the earth resistance of transmission towers equipped with earth wires: Technical Brochure № 275, WG C4.2.O2, Electra, 220 (2005).
- [3] V.N. Boronin, N.V. Korovkin, S.I. Krivosheyev, S.L. Shishigin, T.G. Minevich, K.I. Netreba, Matematicheskoye modelirovaniye zzemlyayushchikh ustroystv pri deystvii impulsnykh tokov, Izvestiia Rossiiskoi akademii nauk, Energetika, 6 (2013) 80–89.
- [4] R.K. Borisov, D.N. Vinogradov, Yu.A. Morozov, Obsledovaniye i rekonstruktsiya zzemlyayushchikh ustroystv VL 330 kV, Vtoraya Rossiyskaya konf. po zzemlyayushchim ustroystvam: sb. mater. konf. Novosibirsk, (2005) 151–156.
- [5] V.V. Kolobov, M.B. Barannik, V.N. Selivanov, P.I. Prokopchuk, Rezultaty polevykh ispytaniy novogo pribora dlya izmereniya soprotivleniya zzemlyayushchikh ustroystv opor vozduzhnykh liniy elektroperedachi impulsnym metodom, Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN, 8 (1–14) (2017) 12–30.
- [6] V.V. Kolobov, M.B. Barannik, V.N. Selivanov, B.V. Yefimov, Izmereniya soprotivleniya opor vozduzhnykh liniy elektroperedachi s grozotrosom impulsnym metodom, Energetik, 11 (2017) 19–24.
- [7] B.D. Rodrigues, S. Visacro, Portable Grounding Impedance Meter Based on DSP, IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, 63 (8) (2014) 1916–1925.
- [8] W.A. Chisholm, B. Jamali, M. Mathew, J. Driscoll, F.F. Bologna, Transient resistivity measurements on 345-kV transmission towers, 2013 International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA), (2013) 171–176.
- [9] S. Yang, W. Zhou, J. Huang, J. Yu, Investigation on Impulse Characteristic of Full-Scale Grounding Grid in Substation, IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, 60 (6) (2018) 1993–2001.
- [10] W. Zhou, Y. Liu, G. Li, G. Yan, S. Yang, H. Li, C.Q. Su, Power Frequency Interference and Suppression in Measurement of Power Transmission Tower Grounding Resistance, IEEE Trans. Power Delivery, 30 (2) (2015) 1016–1023.
- [11] S. Visacro, G. Rosado, Response of Grounding Electrodes to Impulsive Currents: An Experimental Evaluation, IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, 51 (1) (2009) 161–164.
- [12] N. Harid, H. Griffiths, S. Mousa, D. Clark, S. Robson, A. Haddad, On the Analysis of Impulse Test Results on Grounding Systems, IEEE Trans. Industry Applications, 51 (6) (2015) 5324–5334.
- [13] R. Alipio, S. Visacro, Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil, IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, 56 (5) (2014) 1163–1171.
- [14] S.L. Shishigin, A.V. Cherepanov, D.S. Shishigin, Modelirovaniye zzemlitya v grunte s chastotno-zavisimoy udelnoy provodimostyu, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 24 (3) (2018) 91–101.
- [15] S.L. Shishigin, Vektornaya forma zapisi potentsiala sterzhnevoogo zzemlitya v odnorodnoy i dvukhsloynoy zemle, Elektrichestvo, 7 (2007) 22–27.
- [16] D. Cavka, N. Mora, F. Rachidi, A comparison of frequency-dependent soil models: application to the analysis of grounding systems, IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, 56 (2) (2014) 177–187.

THE AUTHORS

SHISHIGIN Sergeii L. – *Vologda state university*

E-mail: ctod28@yandex.ru

CHEREPANOV Aleksei V. – *Vologda state university*

E-mail: alex1234_91@mail.ru

SHISHIGIN Dmirtii S. – *Vologda state university*

E-mail: shishigind@yandex.ru

Received: 28.01.2019