

## Сообщения

Электричество, 2015, № 9, с. 64–67.

### Импульсное сопротивление нескольких стержневых заземлителей опор воздушных линий

АННЕНКОВ В.З.

*Существующая практика проектирования опор ВЛ состоит в увеличении длины заземлителей с ростом удельного сопротивления грунта. Ориентировка на сопротивления промышленной частоты приводит к курьезной практике использования выносных заземлителей. Однако более точный расчет импульсного сопротивления стержневого заземлителя показал, что его импульсного сопротивления достаточно для молниезащиты. Импульсное сопротивление стержневого заземлителя слабо зависит от структуры грунта как горизонтальной, так и вертикальной, в отличие от сопротивлений при небольшом токе промышленной частоты. Для молниезащиты, по-видимому, достаточно одного стержневого заземлителя, но требования релейной защиты и техники безопасности могут потребовать увеличения числа заземлителей. Кроме того, это необходимо для сравнения и выбора оптимального заземлителя. Предлагается метод расчета импульсного сопротивления нескольких стержневых заземлителей на примере четырех заземлителей, расположенных по одной линии, опытные данные которых известны.*

Ключевые слова: воздушные линии, опоры, заземлители, расчет сопротивления

В настоящее время отсутствует практика определения электрических характеристик грунтов в однородном электрическом поле. По этим характеристикам можно было бы с достаточной точностью определять импульсное сопротивление заземлителей линий электропередачи. Проводить испытания заземлителей каждой опоры и невозможно, и нецелесообразно.

Для расчета импульсного сопротивления сосредоточенных заземлителей необходимы следующие параметры, кроме геометрических размеров.

При расположении заземлителей в п е с ч а н ы х г р у н т а х :

удельное сопротивление грунта (эквивалентное неоднородной структуре);

удельное сопротивление верхнего слоя грунта, в котором расположен заземлитель;

пробивная напряженность грунта в однородном электрическом поле (которую можно определить с помощью шаров диаметром около 50 мм).

При расположении заземлителей в других грунтах, отличных от песчаного, кроме указанных параметров необходимы:

1) коэффициент нелинейности вольт-амперной характеристики грунта;

2) начальная напряженность.

Методика подсчета импульсного сопротивления единичных заземлителей опубликована [1]. Задача состоит в учете взаимного влияния отдельных электродов сложного заземлителя. Способ определения импульсного сопротивления нескольких заземлителей рассмотрим на примере сопротивления четырех стержневых заземлителей, расположенных

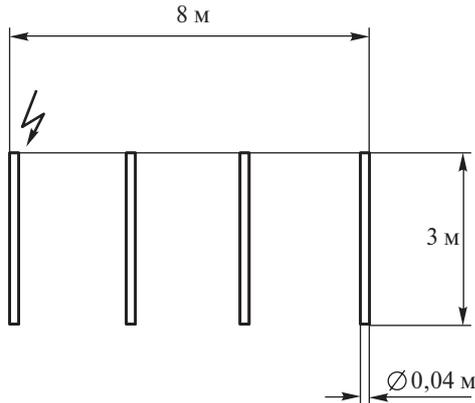


Рис. 1. Расположение стержневых заземлителей

по одной линии, в грунте с линейной вольт-амперной характеристикой (рис. 1).

**Стационарное сопротивление системы из нескольких стержней.** Сопротивление одного заземлителя в системе нескольких равно собственному сопротивлению этого заземлителя плюс взаимные сопротивления остальных. Соединительные проводники не учитываем. Введем обозначения:  $r$  – эквивалентное удельное сопротивление грунта неоднородной структуры;  $l$  – длина стержня;  $r_0$  – радиус;  $a$  – расстояние между стержнями.

Условно принимая токи стержней одинаковыми, квазистационарные сопротивления крайнего и одного из средних заземлителей равны:

$$R_1 = R_{01} + R_{0m} = (r / 2\rho l) [\ln(1 + \sqrt{1 + (r_0 / l)^2}) / (r_0 / l) + \ln(1 + \sqrt{1 + (a/l)^2}) / (a/l) + \ln(1 + \sqrt{1 + (2a/l)^2}) / (2a/l) + \ln(1 + \sqrt{1 + (3a/l)^2}) / (3a/l)]; \quad (1)$$

$$R_2 = R_{01} + R_{0n} = (r / 2\rho l) [\ln(1 + \sqrt{1 + (r_0 / l)^2}) / (r_0 / l) + 2 \ln(1 + \sqrt{1 + (a/l)^2}) / (a/l) + \ln(1 + \sqrt{1 + (2a/l)^2}) / (2a/l)]; \quad (2)$$

где  $R_{01}$  – собственное сопротивление единичного заземлителя;  $R_{0m}$  и  $R_{0n}$  – взаимные сопротивления крайних и центральных стержней соответственно.

При этом общее сопротивление системы из четырех стержней (без учета соединительной трубы)

$$R = 1 / (2(1 / R_1 + 1 / R_2)). \quad (3)$$

**Импульсное сопротивление системы из четырех стержней в грунтах с линейной вольт-амперной характеристикой.** Аналогично формулам для квазистационарного режима (1)–(3), сначала определяем

фиктивный радиус и импульсное сопротивление уединенного стержневого заземлителя.

*Фиктивный (эквивалентный по сопротивлению) радиус зоны искрообразования.* Условно считаем, что ток равномерно распределяется между заземлителями, входящими в систему.

Фиктивный радиус искрообразования находим для одного стержня без учета влияния других стержней:

$$r_\Phi = r_T (\sqrt[3]{1 + M} + \sqrt[3]{1 - M}), \quad (4)$$

где  $r_T$  – сопротивление полушарового заземлителя малого (точечного) радиуса):

$$r_T = \sqrt[3]{((1 / r_0)(r I_p / \rho E_{пр}))^2}; \quad (5)$$

$$M = \sqrt{(1 / 4) + (l / r_T)^6} / 27;$$

$I_p$  – расчетный ток, равный 1/4 полного тока ( $I_p = I / 4$ ).

*Импульсное сопротивление стержневого заземлителя.* Импульсное сопротивление находим по общей известной формуле:

$$R_{0i} = (r / 2\rho l) \ln(1 + \sqrt{1 + (r_\Phi / l)^2}) / (r_\Phi / l).$$

При большом импульсном токе сопротивление каждого стержня без учета других стержней уменьшается в отношении:  $l = R_{0i} / R_{01}$ , поэтому и наведенные напряжения уменьшаются в этом же отношении.

Импульсное сопротивление системы из четырех стержневых заземлителей определяем по (1)–(3), заменяя радиус  $r_0$  фиктивным радиусом зоны искрообразования  $r_\Phi$  и вводя коэффициент  $l$ :

$$R_{и1} = R_{0i} + l R_{0m} = (r / 2\rho l) \{ \ln(1 + \sqrt{1 + (r_\Phi / l)^2}) / (r_\Phi / l) + l [ \ln(1 + \sqrt{1 + (a/l)^2}) / (a/l) + \ln(1 + \sqrt{1 + (2a/l)^2}) / (2a/l) + \ln(1 + \sqrt{1 + (3a/l)^2}) / (3a/l) ] \};$$

$$R_{и2} = R_{0i} + l R_{0n} = (r / 2\rho l) \{ \ln(1 + \sqrt{1 + (r_\Phi / l)^2}) / (r_\Phi / l) + l [ 2 \ln(1 + \sqrt{1 + (a/l)^2}) / (a/l) + \ln(1 + \sqrt{1 + (2a/l)^2}) / (2a/l) ] \};$$

$$R_{и} = 1 / (2(1 / R_{и1} + 1 / R_{и2})).$$

**Результаты расчетов и анализ.** Импульсные испытания четырех заземлителей проведены в грун-

тах с удельным сопротивлением соответственно 910 и 40 Омж [2]. Наибольший ток системы составил примерно 72 кА, а ток через каждый стержень – около 18 кА, что примерно соответствует плотности токов, при которых проводились испытания А.Л. Вайнером.

Результаты расчетов представлены на рис. 2 в виде зависимостей импульсного сопротивления системы заземлителей от тока всей системы. Расчеты проведены при коэффициенте нелинейности, равном единице, так как вольт-амперные характеристики грунта отсутствуют. Кроме того, при увеличении тока зона нелинейности имеет тенденцию исчезать.

Импульсные коэффициенты системы при наибольшем токе испытаний составили соответственно 0,08 и 0,6. Сопротивления системы при промышленной частоте, к сожалению, не приводятся. Расхождения между расчетными и опытными результатами составили в среднем 23 и 10%. Поэтому проблему создания методики расчета нескольких заземлителей можно считать в основном решенной.

При токах, когда искрообразование мало, расчетные значения больше опытных вследствие неучета нелинейности вольт-амперной характеристики грунта. Нелинейность грунта начинает проявляться при относительно малом токе, и поэтому по опытными импульсным сопротивлениям (рис. 2) невозможно определить стационарное сопротивление.

**Выводы.** 1. Зависимости импульсных сопротивлений системы из нескольких заземлителей в грунтах с линейными вольт-амперными характеристиками, рассчитанные по предложенной методике, удовлетворительно согласуются с данными натурных испытаний.

2. В Правилах устройства электроустановок должны быть указаны импульсные сопротивления заземлителей опор, рассчитанные по разработанной методике.

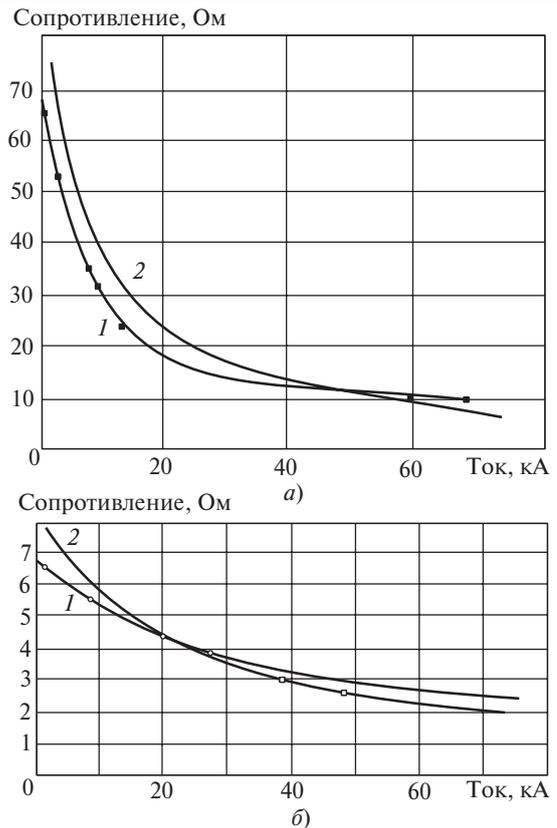
3. Необходимо провести импульсные испытания единичных заземлителей в различных регионах при токах порядка 100 кА вместе с определением электрических параметров грунтов.

*Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 9, pp. 64–67.*

## The impulse impedance of several grounding rods of overhead power line supports

ANNENKOV Victor Zakharovich (Moscow, Russia) – Pensioner, Cand Sci. (Eng.)

*According to the existing practice of designing overhead power line supports, the length of used grounding rods is increased with a growth of soil resistivity. The approach according to which*



**Рис. 2.** Сравнение результатов расчётов с данными натурных испытаний: а —  $\rho_1 = \rho = 910$  Омж; б —  $\rho_1 = 2\rho = 80$  Омж; 1 — натурные испытания; 2 — расчет

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анненков В.З. Метод расчета импульсного сопротивления стержневого заземлителя в песчаном грунте. — Электричество, 1995, № 6, с 14–21.
2. Борисов Р.К., Коломиец Е.В., Колюшко Г.М. Исследование импульсных характеристик заземляющих устройств. — Сборник докладов 3-й Российской конференции по заземляющим устройствам. — Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, 2008, с. 10–15.

[25.02.15]

*Автор: Анненков Виктор Захарович окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1959 г. В 1975 г. в МЭИ защитил кандидатскую диссертацию «Исследование протяженных заземлителей грозозащиты линий электропередачи в плохо проводящих грунтах». В настоящее время пенсионер.*

*power-frequency impedances are mainly taken into consideration results in the use of strange-looking external grounding rods. However, a more accurate calculation of the grounding rod impulse impedance has shown that its value is sufficient for ensuring the required lightning protection. A grounding rod's impulse impedance depends only slightly on both the horizontal and vertical soil structure unlike the impedances at a moderate level of power frequency current. Apparently, only one grounding rod is insufficient to ensure lightning protection. On the other hand, in order to comply with the relay protection and safety engineering requirements, it may be necessary to use a larger number of grounding rods. A method for calculating the impulse impedance of several grounding rods is proposed taking as an example an in-line arrangement of four grounding rods the experimental data for which are known.*

**Key words:** *overhead lines, supports, grounding rods, impedance calculation*

---

REFERENCES

1. **Annenkov V.Z.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1995, No. 6, pp. 14–21.
2. **Borisov R.K., Kolomiyets Ye.V., Koliushkov G.M.** *Sbornik dokladov 3-I Rossiiskoi konferentsii po zazemlyayushchim ustroistvam* – in Russ. (Collection of reports of the 3rd Russian Conference on grounding devices) Novosibirsk: Siberian Energy Academy, 2008, pp. 10–15.