

* * *

Электричество, 2015, № 8, с. 58–61.

Импульсное сопротивление сосредоточенных заземлителей с малыми активной и емкостными проводимостями

АННЕНКОВ В.З.

Рассмотрен метод расчета импульсных сопротивлений стержневых заземлителей для грунтов с высоким удельным сопротивлением. При расчетах учитывается емкостное сопротивление заземлителей с учетом искрообразования. Результаты расчетов показывают, что для грунтов с высоким удельным сопротивлением влияния сопротивления заземлителей на параметры молнии не происходит.

Ключевые слова: заземлители, емкостное сопротивление, проводимость, расчет

Существуют области земли, в которых заземление опор ВЛ связано с определенными проблемами. Это гористые области, области пустынь, а также мерзлые и вечно мерзлые грунты. В этом случае иногда применяют сплошные противовесы. В результате естественного высыхания или замерзания удельное сопротивление земли γ увеличивается (электрические свойства скальных грунтов не исследованы). При этом импульсное сопротивление заземлителя также растет, хотя гораздо в меньшей степени. Однако постепенно активная проводимость становится соизмеримой с емкостной и, наконец, проводимость обеспечивается только диэлектрической проницаемостью $\epsilon\epsilon_0$ заземлителя.

В связи с тем что ток молнии задан, зона искрообразования тем больше, чем больше удельное сопротивление грунта и меньше диэлектрическая проницаемость. Представляет интерес, насколько при этом увеличивается импульсное сопротивление

заземлителя и не ограничивает ли это сопротивление ток канала молнии.

При расчете зоны искрообразования вокруг заземлителей ранее учитывалось только удельное сопротивление грунта. Это справедливо, пока емкостный ток много меньше тока активной проводимости. Однако в общем случае плотность электрического тока J есть сумма плотности активного и емкостного токов:

$$J = E / r + \epsilon\epsilon_0 dE / dt, \quad (1)$$

где E — напряженность электрического поля; $\epsilon\epsilon_0$ — относительная и абсолютная диэлектрическая проницаемость соответственно.

Полушаровой заземлитель. Плотность тока, стекающего с полушарового заземлителя, при токе $I = at$ вследствие симметрии равна

$$J = at / (2\pi r^2). \quad (2)$$

Приравнивая (1) и (2), получаем уравнение для определения напряженности электрического поля при заданном токе:

$$J = at / (2\rho r^2) = E / r + \epsilon\epsilon_0 dE / dt. \quad (3)$$

После решения уравнения (3) имеем зависимость напряженности электрического поля:

$$E(t, r) = at f_t / (2\rho r^2), \quad (4)$$

где r – радиальное расстояние; t – время воздействия импульса;

$$f_t = (e^{-dt} + dt - 1) / dt \quad (5)$$

– функция времени и коэффициента затухания.

При этом переменные расстояния r и времени t разделены, что облегчает дальнейшие преобразования, аналогичные сделанным в [1], где рассмотрен частный случай. Из анализа (4) видно, что учет диэлектрической проницаемости привел к умножению удельного электрического сопротивления ρ на функцию f_t , зависящую от времени. Это произведение является кажущимся удельным сопротивлением с учетом диэлектрической проницаемости грунта.

Приравнивая падающую напряженность на границе зоны искрообразования распределению (5), получаем уравнение для определения фиктивного радиуса искрообразования:

$$E \sqrt{r_0 / r_\phi} = at f_t / (2\rho r_\phi^2), \quad (6)$$

откуда имеем фиктивный радиус зоны искрообразования:

$$r_\phi = r_T = \sqrt[3]{((1 / r_0)(at f_t / (2\rho E_{пр})))^2}. \quad (7)$$

Пренебрегая сопротивлением зоны искрообразования, получаем импульсное сопротивление полусферического заземлителя:

$$z_{и} = at f_t / (2\rho r_\phi), \quad (8)$$

где r_ϕ – фиктивный (эквивалентный по сопротивлению) радиус зоны искрообразования полусферического заземлителя (7).

Результаты расчета фиктивного радиуса зоны искрообразования, а также импульсного сопротивления полусферического заземлителя приведены на рис. 1 в виде зависимостей от удельного электрического сопротивления грунта при токе $I = at = 100$ кА.

Как видно, из рис. 1, фиктивный радиус зоны искрообразования, а также импульсное сопротивление полусферического заземлителя существенно зависят от радиуса r_0 . В отличие от сопротивления заземлителя при промышленной частоте импульсное сопротивление полусферического заземлителя уменьшается с уменьшением радиуса из-за увели-

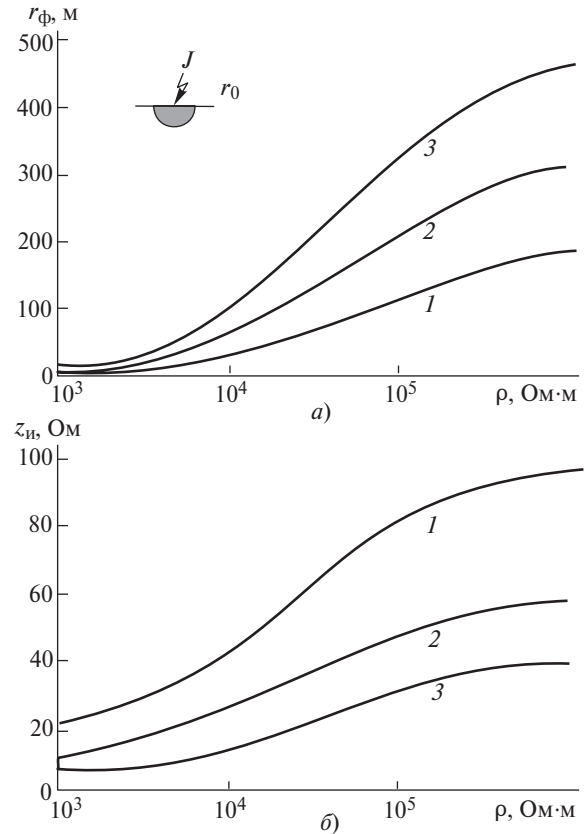


Рис. 1. Зависимости фиктивного радиуса зоны искрообразования (а) и импульсного сопротивления (б) от удельного сопротивления грунта ($I = 100$ кА; $E_{пр} = 10$ кВ/см; $t = 10$ мкс): 1 – $r_0 = 0,5$ м; 2 – $0,1$ м; 3 – $0,03$ м

чения напряженности электрического поля и как следствие – роста размеров зоны искрообразования. Это явление есть результат уменьшения критической напряженности с увеличением размеров зоны искрообразования.

На рис. 1,а видно, что с увеличением удельного электрического сопротивления грунта фиктивный радиус зоны искрообразования может достигать сотен метров. При этом активная проводимость постепенно заменяется емкостной.

Импульсное сопротивление $z_{и}$ достигает десятков ом (рис. 1,б). Чтобы уменьшить это сопротивление, необходимо включить параллельно несколько независимых сопротивлений. Однако в обычных грунтах (менее 1000 Ом·м) импульсное сопротивление менее 20 Ом.

Стержневой заземлитель. В связи с тем что функции расстояния и времени разделены, к решению, полученному в [2], необходимо добавить множители к удельному сопротивлению грунта в виде функции (5) в выражениях фиктивного радиуса зоны искрообразования, а также импульсного сопротивления стержневого заземлителя. Поэтому фиктивный радиус зоны искрообразования

$$r_\phi = r_T (\sqrt[3]{1/2 + M} + \sqrt[3]{1/2 - M}), \quad (9)$$

$$r_{\phi} = \sqrt[3]{((l/r_0)(atf_t / (2\rho E_{пр}))^2)}; \quad (10)$$

$$M = \sqrt{(1/4 + 1/27(l/r_T)^6)}. \quad (11)$$

В результате импульсное сопротивление стержневого заземлителя

$$z_{и} = (r If_t) / 2\rho l \ln((1 + \sqrt{1 + (l/r_{\phi})^2}) / (l/r_{\phi})). \quad (12)$$

Необходимо отметить, что формулы (10)–(12) являются более общими относительно полученных в [2].

Чем больше фиктивный радиус искрообразования, тем меньше импульсное сопротивление. Импульсное сопротивление определяется удельным сопротивлением, диэлектрической проницаемостью, а также пробивной напряженностью грунта. Как следует из рассмотрения кривых рис. 2, импульсное сопротивление стержневого заземлителя, а также фиктивный радиус зоны искрообразования в плохо проводящих грунтах слабо зависят от длины заземлителя, но существенно зависят от его радиуса. Зависимость искрообразования от радиуса провода хорошо известна из искрообразования в воздухе.

Зависимости фиктивного радиуса искрообразования, а также импульсного сопротивления стержневого заземлителя от пробивной напряженности грунта изображены на рис. 3. Предельные значения импульсных сопротивлений зависят от пробивной

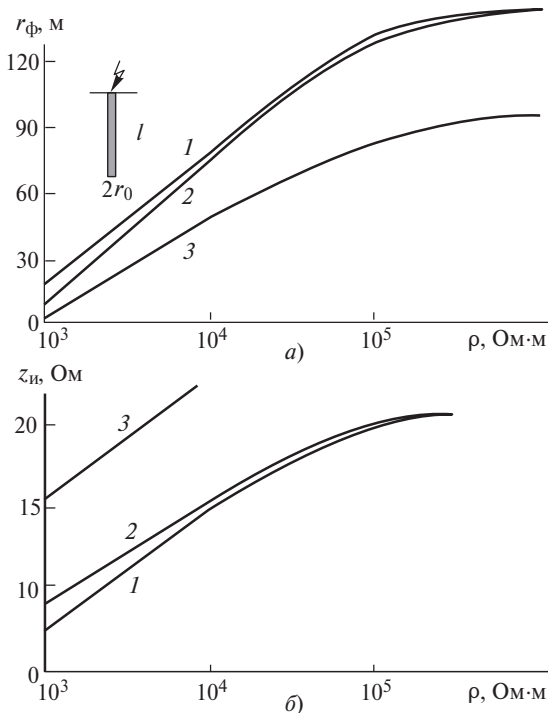


Рис. 2. Рост импульсного сопротивления стержневого заземлителя при увеличении удельного сопротивления грунта (ток $I=100$ кА; $E_{пр}=10$ кВ/см; $t=10$ мкс; $r_0=3$ см): 1 – $l=3$ м; 2 – 20 м; 3 – 0,1 м; $l=20$ м

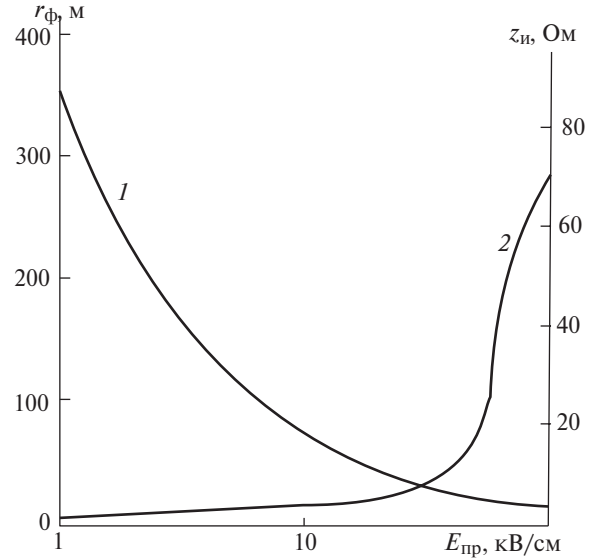


Рис. 3. Зависимость размеров зоны искрообразования, а также импульсного сопротивления от пробивной напряженности грунта ($I=100$ кА; $r_0=3$ см; $l=3$ м; $t=10$ мкс): 1 – фиктивный радиус зоны искрообразования; 2 – импульсное сопротивление

напряженности грунта, а также от его диэлектрической проницаемости.

Удельное сопротивление и взято примерно наибольшим для песчаного грунта (по опыту автора), а диэлектрическая проницаемость, наоборот, наименьшей. Для зарегистрированных значений удельного сопротивления грунта импульсное сопротивление стержневого заземлителя менее 20 Ом, а фиктивный радиус зоны искрообразования – более 100 м. Фиктивным радиус зоны искрообразования назван потому, что – это радиус, эквивалентный по сопротивлению, а отдельные стримеры зоны могут быть как больше, так и меньше средних значений.

Сосредоточенные заземлители (особенно стержневые), учитывая их относительно низкое импульсное сопротивление, могут конкурировать со сплошными противовесами.

Необходимо отметить, что пробивные напряженности грунта, а также другие электрические его характеристики в настоящее время не определяются как при импульсных испытаниях, так и перед проектированием ВЛ, хотя они необходимы для определения импульсных сопротивлений.

Упомянутая функция f_t одна и та же для всех сосредоточенных заземлителей. При малых временах она весьма мала, но с течением времени, когда емкость перестает оказывать влияние на импульсное сопротивление, стремится к единице (см. рис. 4). Расчеты в статье проведены при времени $t=10$ мкс, что соответствует главному разряду молнии. Однако при повторных разрядах длительность фронта на порядок меньше и, соответственно, на порядок меньше эта функция, что свидетельствует о большей роли емкости.

Все подсчитанные значения импульсных сопротивлений гораздо меньше сопротивления канала молнии, и поэтому импульсное сопротивление заземлителей не может ограничивать ток молнии.

В других известных публикациях, например [3], сопротивление заземлителя представляется волновым сопротивлением. При этом не учитывается па-

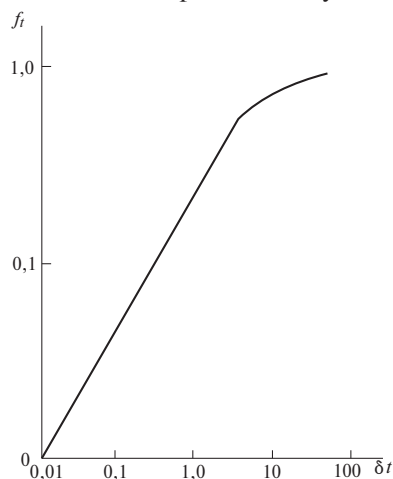


Рис. 4. Функция f_i в зависимости от критерия подобия

дение критической напряженности на границе зоны искрообразования.

Выводы. 1. Импульсное сопротивление сосредоточенных заземлителей много меньше сопротивления канала молнии, и поэтому ток молнии не ограничивается этим сопротивлением.

2. При высоком удельном сопротивлении грунта стержневые заземлители могут конкурировать со сплошными противовесами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Анненков В.З.** Искрообразование в земле вокруг заземлителей молниезащиты. — *Электричество*, 1993, № 12, с. 15–20.
2. **Анненков В.З.** Метод расчета импульсного сопротивления в песчаном грунте. — *Электричество*, 1995, № 6, с. 14–21.
3. **Карелин Р.Н., Лосев В.Г.** Удар молнии в высокую башню. — *Электричество*, 2011, № 7, с. 25–31.

[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.

Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 8, pp. 58–61.

Impulse Impedance of Lumped Grounding Rods with Low Conductance and Capacitive Susceptance

V.Z. ANNENKOV

A method for calculating the impulse impedances of grounding rods for soils with high resistivity is considered. In the calculations, the capacitive reactance of grounding rods is considered taking spark formation into account. The calculation results show that for soils with high resistivity, the grounding rod resistance does not have an effect on the lightning parameters.

Key words: *grounding rods, capacitive reactance, admittance, calculation*

REFERENCES

1. **Annenkov V.Z.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1993, No. 12, pp. 15–20.
2. **Annenkov V.Z.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1995, No. 6, pp. 14–21.
3. **Karyakin R.N., Losev V.G.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 25–31.

Author: Annenkov Viktor Zakharovich (Moscow, Russia) – Cand. Sci. (Eng.), pensioner.

