

Уравнения для определения импульсного сопротивления сосредоточенных заземлителей

АННЕНКОВ В.З.

Каждому физическому процессу при растекании тока молнии в земле соответствуют отдельные критериальные уравнения, которыми определяется вся совокупность множеств заземлителей. Невозможно составить одно критериальное уравнение для всего процесса стекания тока молнии с заземлителя молниезащиты. Каждому коэффициенту нелинейности соответствует отдельная критериальная кривая. Статья посвящена выводу критериальных уравнений и построению критериальных кривых, использование которых упрощает определение импульсного сопротивления заземлителей молниезащиты, а также помогает при анализе происходящих процессов.

Ключевые слова: токи молнии, заземлители, напряженность в земле, критериальные уравнения, импульсное сопротивление

В статье рассматриваются критериальные уравнения и кривые для расчёта импульсного сопротивления сосредоточенных заземлителей.

При относительно малой плотности тока напряжённость в земле E прямо пропорциональна плотности тока J в связи с тем, что число носителей тока неизменно [1]:

$$E = \rho J, \quad (1)$$

где $\rho = \text{const}$ – удельное электрическое сопротивление.

В логарифмических координатах эта функция также линейна и её угол наклона к оси абсцисс составляет 45° .

Во время протекания токов молнии связь между плотностью тока в земле и напряжённостью электрического поля является степенной функцией:

$$E = AJ^\beta, \quad (2)$$

где A – коэффициент пропорциональности; β – коэффициент нелинейности.

С увеличением напряжённости в земле носители тока, являющиеся ионно-электронными структурами, скачкообразно изменяются, в результате указанный наклон также скачкообразно уменьшается при сохранении линейности в указанных координатах. Теоретически он может приближаться к нулю, когда увеличение тока не приводит к увеличению напряжённости. Возможно несколько этих скачкообразных изменений. При пересечении характеристик (1) и (2), где начинаются нелинейные процессы, напряжённость равна E_H [2]. Начальная напряжённость E_H , в общем, чисто расчётная вели-

чина, определяется как точка пересечения прямой линейной зависимости (1) и нелинейной (2).

В (1) коэффициент пропорциональности A имеет переменную размерность. Однако введением E_H формула (2) изменяется:

$$E = (E_H)^{1-\beta} (\rho J)^\beta. \quad (2a)$$

Все грунты можно разделить на две группы: имеющие примерно линейные характеристики и грунты с нелинейными характеристиками. К первой группе относится, в основном, песчаный грунт, а ко второй – глинистые и перегнойные грунты.

Песчаный грунт характеризуется удельным электрическим сопротивлением и пробивной напряжённостью в однородном электрическом поле $E_{\text{пр}}$. Удельное сопротивление меняется от влажности и температуры, а пробивная напряжённость зависит от времени начала действия импульса. Однако во время конкретного опыта указанные величины можно считать постоянными, что подтверждается совпадением опытных и расчётных результатов. Песчаный грунт имеет коэффициент нелинейности, примерно равный 0,85, поэтому его можно рассматривать как линейный.

Опытным путём установлено, что пробой грунта начинается при критической напряжённости E_K на поверхности заземлителя, равной примерно пробивной напряжённости земли в однородном поле, порядка 10 кВ/см. С увеличением тока стримеры увеличиваются. Кроме того, при этом критическая напряжённость уменьшается по экспериментальному закону [3]:

$$E_k = E_{\text{пр}} \sqrt{\frac{r_0}{r_{\text{ф}}}}, \quad (3)$$

где r_0 — радиус заземлителя; $r_{\text{ф}}$ — эквивалентный радиус зоны искрообразования (фиктивный).

Таким образом, при увеличении заданного тока вокруг заземлителя образуются три зоны:

- зона, где соблюдается закон Ома;
- зона земли с нелинейной характеристикой;
- зона искрообразования, сопротивлением которой можно пренебречь.

По закону (3) граница зоны искрообразования может смыкаться с границей зоны нелинейности, в результате зона нелинейности исчезает и образуется четвёртая зона вокруг заземлителя, в которой коэффициент нелинейности равен 1 и в которой также соблюдается закон Ома. Её можно рассчитывать так же, как в песчаном грунте, где коэффициент нелинейности принимается равным 1.

Грунты с подобными вольт-амперными характеристиками имеют одинаковые безразмерные сочетания параметров, называемые критериями подобия. Критериальными уравнениями определяется вся совокупность множеств заземлителей [3].

Критерии подобия определяются в основном тремя способами. В данном случае используется первый способ, который заключается в приведении уравнений физического процесса к безразмерному виду. В частном случае такими уравнениями могут являться формулы импульсного сопротивления. Подобные заземлители образуют класс, в котором испытания достаточно провести, например, только для одного из представителей этого класса.

Один из критериев — искомый — содержит параметр, который необходимо определить, например импульсное сопротивление $R_{\text{и}}$. Из исходных критериев можно составить обобщённый, такой что можно построить зависимость искомого критерия от одного обобщённого. Впервые такая критериальная характеристика была построена опытным путём [4]. Однако этот обобщённый критерий не содержал геометрический критерий.

Полушаровой заземлитель. Зона нелинейности вокруг полушарового заземлителя возникает, когда ток заземлителя [5]:

$$I_{\text{н}} = \frac{2\pi r_0^2 E_{\text{н}}}{\rho}, \quad (4)$$

где r_0 — радиус заземлителя.

При этом радиус зоны нелинейности

$$r_{\text{н}} = \sqrt{\frac{\rho I}{2\pi E_{\text{н}}}}. \quad (5)$$

Искрообразование начинается с тока, равного

$$I_{\text{и}} = 2\pi r_0^2 \left(\frac{E_{\text{н}}}{\rho} \right) \left(\frac{E_{\text{пр}}}{E_{\text{н}}} \right)^{1/\beta}, \quad (6)$$

когда на поверхности заземлителя напряжённость превысит значение $E_{\text{пр}}$.

Отсюда следует, что формула (6) справедлива в диапазоне токов $I_{\text{н}} > I > I_{\text{и}}$.

Эквивалентный по сопротивлению (фиктивный) радиус зоны искрообразования [5]:

$$r_{\text{ф}} = \left(\frac{\left(\frac{\rho I}{2\pi E_{\text{н}}} \right)^{2\beta} \left(\frac{E_{\text{пр}}}{E_{\text{н}}} \right)^2}{r_0} \right)^{\frac{1}{4\beta-1}}. \quad (7)$$

Однако расчёты показывают, что в некоторых случаях значения тока молнии недостаточно для существования зоны искрообразования. Действительно, например, в глинистом грунте с удельным электрическим сопротивлением $\rho = 70$ Ом·м при $\beta = 0,36$, $E_{\text{н}} = 2$ кВ/см, $E_{\text{пр}} = 9$ кВ/см и $r_0 = 1$ м расчётное значение тока:

$$I_{\text{и}} = \frac{2\pi \cdot 1^2 \cdot 2 \cdot 10^5}{79} \left(\frac{9 \cdot 10^5}{2 \cdot 10^5} \right)^{0,35} = 1171 \text{ кА}, \quad (8)$$

что на порядок больше реальных токов молнии.

Построенные по (5) и (7) зависимости эквивалентного радиуса зоны искрообразования и радиуса зоны нелинейности от произведения удельного сопротивления и тока представлены на рис. 1 в виде кривых для различных коэффициентов нелинейности.

Следует отметить, что грунтов с $\beta < 0,36$ к настоящему времени не зафиксировано. Возможно, одна из причин — незначительное число исследованных образцов земли. Таким образом, пробой в земле вокруг полушарового заземлителя (не искрообразование) — пока чисто теоретическое явление.

Совместное решение формул (5) и (7) даёт абсциссу точки, в которой пересекаются все характеристики:

$$M = \rho I = 2\pi r_0^2 E_{\text{пр}} \left(\frac{E_{\text{пр}}}{E_{\text{н}}} \right)^3. \quad (9)$$

Для случая на рис. 1 $M = 710$ Ом·м·кА. Как видно из рис. 1, все указанные зависимости в логарифмических координатах прямолинейны. Они аналогичны зависимостям, ранее построенным для стержневого заземлителя [6]. Однако пробой зоны нелинейности начинается при $\beta = 1/4$, а не при $1/2$.

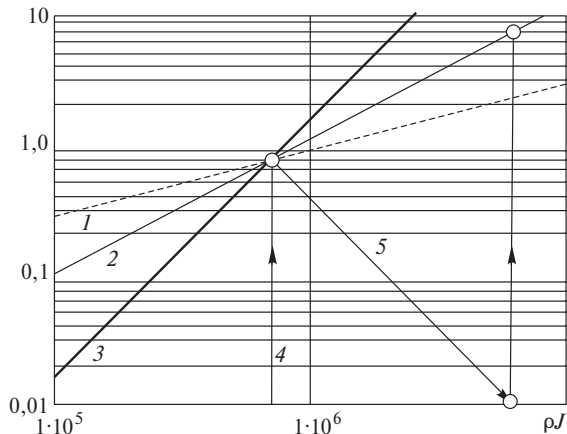


Рис. 1. Зависимости радиусов зон нелинейности и искрообразования вокруг полушарового заземлителя от произведения удельного сопротивления грунта на ток: 1 – радиус зоны нелинейности; 2–5 – радиусы зоны искрообразования (2 – $\beta=1$; 3 – $1/3$; 4 – $1/4$; 5 – $1/5$; 3 – ρI , Ом·м·А)

Вывод критериальных уравнений для полушарового заземлителя. Сначала рассмотрим случай отсутствия искрообразования. Снижение импульсного сопротивления вызывается только нелинейностью вольт-амперной характеристики грунта. При этом расчётный ток находится в диапазоне: $I_n < I < I_{и}$.

В отличие от уравнений для стержневого заземлителя критериальные уравнения для полушарового заземлителя можно получить из формул импульсного сопротивления [6]:

при $\beta \neq 1/2$

$$R_{и} = \left(\frac{\rho}{2\pi}\right)^\beta \left(\frac{E_n}{I}\right)^{1-\beta} \frac{r_n^{1-2\beta} - r_0^{1-2\beta}}{1-2\beta} + \frac{\rho}{2\pi r_n}; \quad (10)$$

при $\beta = 1/2$

$$R_{и} = \left(\frac{\rho}{2\pi}\right)^\beta \left(\frac{E_n}{I}\right)^{1-\beta} \ln\left(\frac{r_n}{r_0}\right) + \frac{\rho}{2\pi r_n}. \quad (11)$$

В качестве исходного критерия выбираем отношение радиуса заземлителя к радиусу зоны нелинейности:

$$\Pi = r_0 / r_n. \quad (12)$$

Искомый критерий подобия

$$\Pi_1 = \frac{2\pi r_0}{\rho} R_{и}. \quad (13)$$

Из (10) и (11) после преобразований получаем два критериальных уравнения до начала искрообразования:

$$\Pi_1 = \Pi \left(1 + \frac{\Pi^{1-2\beta}}{1-2\beta}\right); \quad (14)$$

$$\Pi_1 = \Pi - \ln \Pi. \quad (15)$$

Как показали расчёты, оба полученные критериальные уравнения при $\beta=1/2$ имеют один и тот же график, поэтому можно пользоваться критериальным уравнением (14), как более общим. Однако вместо значения 0,5 необходимо использовать ближайшие, например 0,49 или 0,51.

По (14) на рис. 2 построены критериальные кривые при коэффициентах нелинейности, равных 0,87; 0,6 и 0,33 для использования при проектировании и в эксплуатации. Область применения построенных кривых – от тока начала нелинейности (4) до тока начала искрообразования (6).

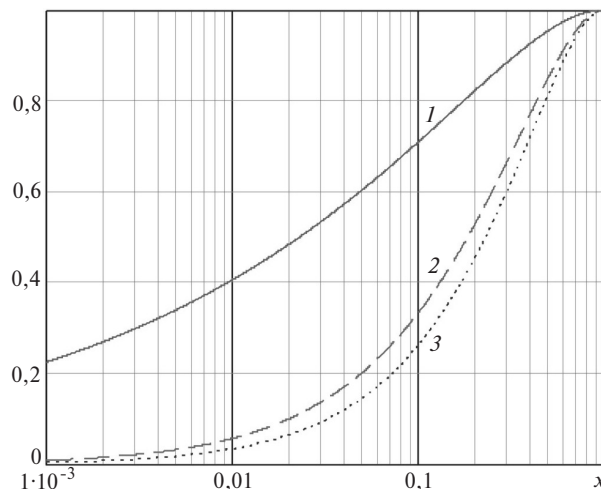


Рис. 2. Критериальные кривые полушарового заземлителя до начала искрообразования ($\Pi(x) = M(x) = N(x) = \Pi_2$; $x = \Pi_1 = r_0/r_n$; $\Pi(x) - \beta=0,87$; $N(x) - \beta=0,5$; $M(x) - \beta=0,33$); 1 – $I(x)$; 2 – $N(x)$; 3 – $M(x)$)

Области после начала искрообразования. Рассмотрим область $I_n < I < I_d$. Искрообразование увеличивает расчётный радиус заземлителя, поэтому в уравнении (10) заменяем r_0 на r_ϕ :

$$R_{и} = \left(\frac{\rho}{2\pi}\right)^\beta \left(\frac{E_n}{I}\right)^{1-\beta} \frac{r_n^{1-2\beta} - r_\phi^{1-2\beta}}{1-2\beta} + \frac{\rho}{2\pi r_n}, \quad (16)$$

где эквивалентный радиус зоны искрообразования определяется по (7).

После преобразований (16) получаем критериальное уравнение в следующем виде:

$$\frac{2\pi r_\phi R_{и}}{\rho} = \frac{r_\phi}{r_n} \left(1 + \frac{1 - \left(\frac{r_\phi}{r_n}\right)^{1-2\beta}}{1-2\beta}\right). \quad (17)$$

Обозначая $\Pi_2 = r_\phi / r_n$ и $\Pi_3 = \frac{2\pi r_\phi R_{и}}{\rho}$,

получаем критериальное уравнение полушарового заземлителя после начала искрообразования:

$$\Pi_3 = 1 + \frac{1 - \Pi^{1-2\beta}}{1 - 2\beta}. \quad (18)$$

Критериальные кривые, построенные по уравнению (18) для различных коэффициентов нелинейности, приведены на рис. 3. Как видно из рис. 3, импульсное сопротивление с уменьшением коэффициента нелинейности также уменьшается, но растёт с увеличением исходного критерия подобия.

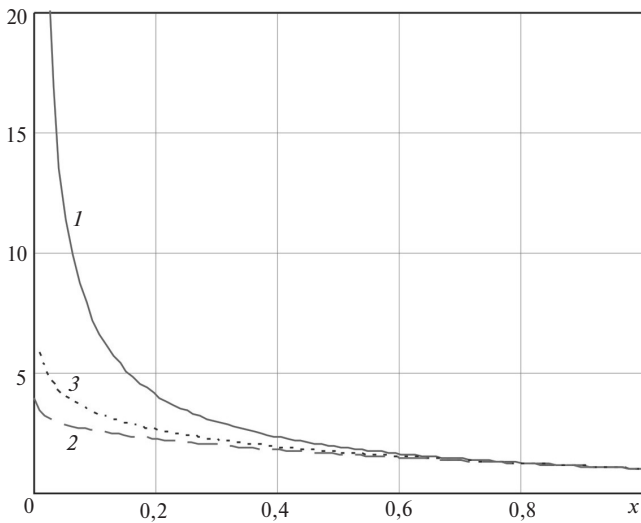


Рис. 3. Определение импульсного сопротивления полушарового заземлителя после начала искрообразования ($\Pi(x) = M(x) = N(x) = \Pi_3$; $x = r_{\Phi}/r_H$ $\Pi(x) - \beta = 0,87$; $M(x) - \beta = 0,51$; $N(x) - \beta = 0,33$); 1 – $I(x)$; 2 – $N(x)$; 3 – $M(x)$

Как видно из сравнения уравнений (14) и (18), для учёта всех происходящих процессов у заземлителей в нелинейных грунтах не удалось создать одно критериальное уравнение. При аналитическом решении нельзя изменить условия задачи. Кроме того, $\beta = idem$ – отдельный критерий подобия, и он учитывается путём размещения нескольких критериальных кривых на одном рисунке.

Критериальные кривые для стержневого заземлителя. Пренебрегаем искажением электрического поля в торце стержня. Зона нелинейности вокруг стержневого заземлителя возникает при токе, равном [6]:

$$I_H = \frac{2\pi r_0 L E_H}{\rho}, \quad (19)$$

где L – длина заземлителя.

При этом радиус зоны нелинейности:

$$r_H = L \sqrt{\frac{1 + 4 \left(\frac{r_{H1}}{L} \right)^2}{2}},$$

где

$$r_{H1} = \frac{\rho I}{2\pi L E_H}.$$

Искрообразование в земле начинается при токе, равном

$$I_{и} = \frac{2\pi r_0 L E_H}{\rho} \left(\frac{E_{пр}}{E_H} \right)^{1/\beta} = I_H \left(\frac{E_{пр}}{E_H} \right)^{1/\beta}, \quad (20)$$

где $E_{пр}$ – пробивная напряжённость, определяемая в однородном электрическом поле, с которой начинается искрообразование вокруг заземлителя.

Выражения (19) и (20) отличаются от аналогичных (4) и (6) для полушарового заземлителя заменой радиуса r_0 на длину стержня L .

Таким образом, зона нелинейности располагается в области, ограниченной токами начала нелинейности и начала искрообразования.

Может оказаться, что расчётный ток молнии меньше тока начала искрообразования. В этом случае снижение импульсного сопротивления обеспечивается только нелинейностью вольт-амперной характеристики грунта. Действительно, например, при $r_0 = 0,03$, $L = 3$, $E_H = 105$, $E_{пр} = 106$ и $\beta = 0,36$ расчёт по формуле (20): $I_{и} = 203$ кА, что больше расчётного тока молнии.

Импульсное сопротивление стержневого заземлителя в случае отсутствия искрообразования равно:

$$R_{и} = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\left(\frac{2\pi L E_H}{\rho I} \right)^{1-\beta} r_H / L \int \frac{d\lambda}{r_0 / L (\lambda \sqrt{1 + \lambda^2})^\beta} + \ln \frac{1 + \sqrt{1 + (r_H / L)^2}}{r_H / L} \right). \quad (21)$$

Критериальное уравнение и кривые стержневого заземлителя до начала искрообразования в земле. За исходный выбираем критерий, равный относительному радиусу зоны нелинейности:

$$\Pi_5 = r_{H1} / L. \quad (22)$$

Искомый критерий подобия

$$\Pi_6 = \frac{2\pi L}{\rho} R_{и}. \quad (23)$$

Используя (22), (23) и (21), получаем критериальное уравнение для стержневого заземлителя в виде:

$$\Pi_7 = \left(\frac{1}{\Pi_5} \right)^{1-\beta} r_H / L \int \frac{d\lambda}{r_0 / L (\lambda \sqrt{1 + \lambda^2})^\beta} + \ln \frac{1 + \sqrt{1 + (r_H / L)^2}}{r_H / L}, \quad (24)$$

где

$$r_H / L = \sqrt{(\sqrt{1 + 4\Pi_3^2} - 1) / 2}. \quad (25)$$

По уравнению (24) на рис. 4 построены критериальные кривые для трёх коэффициентов нелинейности: $\beta=0,87; 1/2$ и $1/3$. Из рис. 4 видно, что с уменьшением коэффициента нелинейности уменьшается и критерий Π_6 , а с ним — и импульсное сопротивление из-за уменьшения удельного сопротивления грунта около заземлителя.

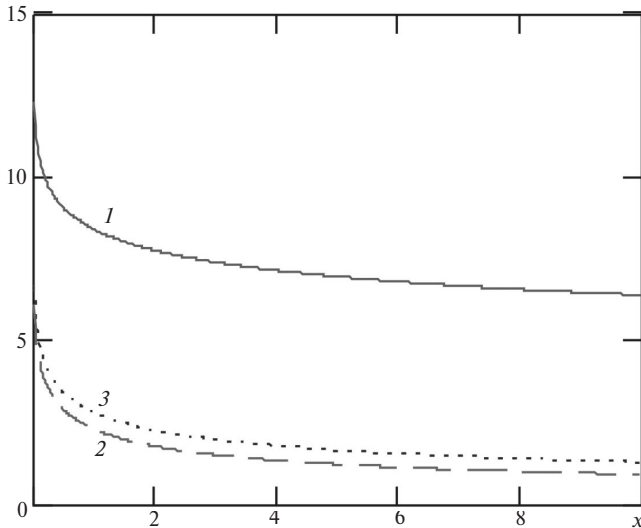


Рис. 4. Критериальные кривые стержневого заземлителя до искрообразования в земле ($\Pi(x) = M(x) = N(x) = \Pi_6; x = \Pi_5 = r_{H1}/L; \Pi(x) - \beta=0,87; M(x) - \beta=0,51; N(x) - \beta=0,33; 1 - I(x); 2 - N(x); 3 - M(x)$)

Критериальное уравнение для стержневого заземлителя после начала искрообразования и до исчезновения зоны нелинейности. Импульсное сопротивление в этом случае рассчитывается по формуле, аналогичной (24), однако радиус заземлителя r_0 необходимо заменить на эквивалентный по сопротивлению:

$$\Pi_7 = \left(\frac{1}{\Pi_5}\right)^{1-\beta} \frac{r_H/L}{r_\Phi/L (\lambda\sqrt{1+\lambda^2})^\beta} \int \frac{\partial\lambda}{\lambda\sqrt{1+\lambda^2}} + \ln \frac{1 + \sqrt{1 + (r_H/L)^2}}{r_H/L}. \quad (26)$$

Поэтому за исходные критерии подобия необходимо принять: $\Pi_8 = r_\Phi/L$ и Π_5 . Критерий r_H/L — (25).

Для построения критериальных кривых в одной плоскости один из критериев необходимо принять неизменным. Критериальное уравнение:

$$\Pi(x)_9 = \ln \frac{1 + \sqrt{1 + R(x)^2}}{R(x)} + \left(\frac{1}{x}\right)^{1-\beta} \frac{R(x)}{r_\Phi/L (y\sqrt{1+y^2})^\beta} \partial\beta. \quad (27)$$

При этом принято $\Pi_8 = 0,2$, чтобы построить кривые. При эквивалентном относительном радиусе зоны искрообразования, равном $r_\Phi/L = 0,2$, построены критериальные кривые стержневого зазем-

лителя при различных коэффициентах нелинейности грунта (рис. 5)

Как видно из сравнения формул (26) и (27), для стержневого заземлителя также уже создано два критериальных уравнения. Поэтому очевидно, что для заземлителей в нелинейных грунтах нельзя создать одно критериальное уравнение.

При дальнейшем увеличении тока молнии, когда расчётный радиус зоны искрообразования становится больше радиуса зоны нелинейности, зона нелинейности исчезает и процесс искрообразова-

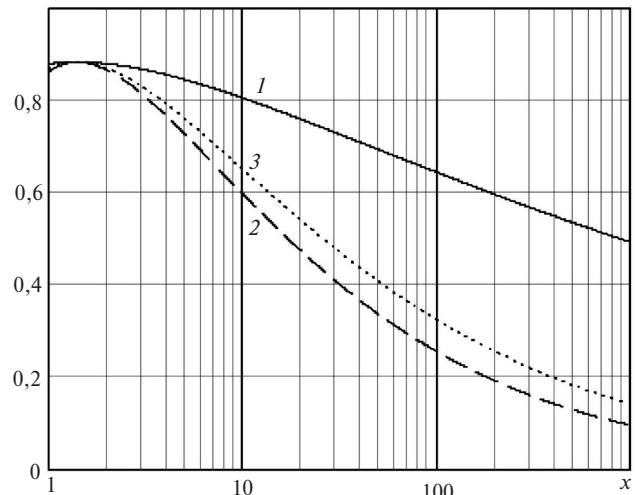


Рис. 5. Критериальные кривые для стержневого заземлителя при $r_\Phi/L = 0,2$ ($\Pi(x) = M(x) = N(x) = \Pi_8; \Pi(x) - \beta=0,87; M(x) - \beta=0,51; N(x) - \beta=0,33; R(x)=r_H/L, x=\Pi_5; 1 - I(x); 2 - N(x); 3 - M(x)$)

ния проходит при коэффициенте нелинейности, равном 1. Это явление аналогично процессу до момента начала нелинейности, когда критерием подобия является отношение радиуса заземлителя к его длине. В рассматриваемом случае в связи с увеличением радиуса до эквивалентного критерий подобия: $\Pi_{10} = r_\Phi/L$.

Критериальное уравнение при коэффициенте нелинейности, равном 1, получено ранее [6].

Расчёт по критериям подобия, как аналитический метод, не может изменять исходные условия. Поэтому при возникновении новых процессов при стекании тока, когда изменяются начальные условия, необходимы новые критерии подобия.

Приложение 1. 1. Определение импульсного сопротивления до начала искрообразования по критериальной кривой. Допустим, требуется определить импульсное сопротивление полушарового заземлителя диаметром 20 см при импульсном токе 100 кА в грунте со следующими электрическими характеристиками: $\rho=100$ Ом/м, начальная напряжённость $E_H = 1$ кВ/см, коэффициент нелинейности грунта $\beta=1/2$. Для этого необходимо:

1) определить значение исходного критерия подобия по (12):

$$\frac{r_0}{r_H} = \frac{r_0}{\sqrt{\frac{\rho I}{2\pi E_H}}} = 0,0025;$$

2) по рис. 2 найти значение искомого критерия: $\Pi_1 = 0,1$;

3) по критерию Π_1 определить импульсное сопротивление (14):

$$R_{и} = \frac{\rho \Pi_1}{2\pi r_0} = 16 \text{ Ом.}$$

2. *Определение импульсного сопротивления полушарового заземлителя без критериальной кривой.* Исходные данные те же, что в п.1:

определяется радиус нелинейности:

$$r_H = \sqrt{\rho I / 2\pi E_H} = 4 \text{ м};$$

импульсное сопротивление по (10) $R_{и} = 16 \text{ Ом}$.

Однако в случае стержневого заземлителя импульсное сопротивление определяется с помощью ЦВМ, так как соответствующий интеграл не может быть выражен через аналитические функции.

Приложение 2. Обобщённый критерий подобия. Используя опыт по составлению критериев подобия, можно составить обобщённый критерий подобия всех электромагнитных процессов.

В [3] приведены два известных критерия электромагнитных процессов вообще: $\pi_1 = (\mu\gamma\lambda^2)/t = \text{idem}$; $\pi_2 = \varepsilon/\gamma t = \text{idem}$. Оставив критерий π_1 без изменений, делим его на квадрат второго критерия. В результате получаем третий обобщённый критерий электромагнитных процессов: $\pi_3 = \mu\lambda^2 t / \varepsilon^2 \gamma = \text{idem}$.

Выводы. 1. Каждому физическому процессу при растекании тока молнии в земле соответствуют отдельные критериальные уравнения. Невозможно составить одно критериальное уравнение для всего процесса стекания тока молнии с заземлителя молниезащиты.

2. Каждому коэффициенту нелинейности соответствует отдельная критериальная кривая. Использование критериальных кривых упрощает определение импульсного сопротивления заземлителей молниезащиты, а также помогает анализу происходящих процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Анненков В.З.** Вольт-амперные характеристики грунтов при токах молнии. — Электричество, 1986, № 2, с. 57–60.
2. **Анненков В.З.** Искрообразование в земле вокруг заземлителей молниезащиты. — Электричество, 1993, № 12, с. 15–20.
3. **Веников В.А.** Теория подобия и моделирования. М.: «Высшая школа», 1976.
4. **Корсунцев А.В.** Применение теории подобия к расчёту импульсных характеристик сосредоточенных заземлителей. — Электричество, 1958, № 5, с. 31–35.
5. **Анненков В.З.** Метод расчёта полушарового заземлителя. Электричество, 1988, № 2, с. 6–13.
6. **Анненков В.З.** Критерии подобия и расчёт сосредоточенных заземлителей молниезащиты. — Электричество, 1998, № 6, с. 18–25.
7. **Анненков В.З.** Метод расчёта импульсного сопротивления стержневого заземлителя. — Электричество, 1997, № 8, с. 59–66.

[29.01.2018]

А в т о р: 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 плохих проводящих грунтах». В настоящее время пенсионер.

Elektrichestvo, 2018, No. 12, pp. 22–27

DOI:10.24160/0013-5380-2018-12-22-27

Equations for Determining Surge Impedance of Lumped Grounding Electrodes

ANNENKOV Vactor. Z. (Moscow, Russia) – Cand. Sci. (Eng.), Pensioner

Each physical process associated with spreading of lightning current in soil is described by individual criterion equations, which determine the entire totality of semispherical sets of grounding electrodes. It is not possible to write a single criterion equation for the entire lightning current sinking process from the lightning protection grounding electrode. Each nonlinearity coefficient corresponds to an individual criterion curve. The article deals with deriving criterion equations and plotting criterion curves the use of which facilitates determination of the surge impedance of lightning protection grounding electrodes and helps to analyze the associated processes.

Key words: lightning currents, grounding electrode, field strength in soil, criterion equations, surge impedance

REFERENCES

1. **Annenuov V.Z.** Elektrichestvo – in Russ. (Electricity), 1986, No. 2, pp. 57–60.
2. **Annenuov V.Z.** Elektrichestvo – in Russ. (Electricity), 1993, No. 12, pp. 15–20.
3. **Venikov V.A.** Teoriya podobiya i modelirovaniya (Theory of Simulanty and Design). Moscow, Vysshaya shkola, 1976.

4. **Korsunsv A.V.** Elektrichestvo – in Russ. (Electricity), 1958, No. 5, pp. 31–35.
5. **Annenuov V.Z.** Elektrichestvo – in Russ. (Electricity), 1988, No. 2, pp. 6–13.
6. **Annenuov V.Z.** Elektrichestvo – in Russ. (Electricity), 1998, No. 6, pp. 18–25.
7. **Annenuov V.Z.** Elektrichestvo – in Russ. (Electricity), 1997, No. 8, pp. 59–66.

[29.01.2018]