

Способ расчета импульсного сопротивления стержневого заземлителя

АННЕНКОВ В.З.

Рассмотрен метод расчета импульсных коэффициентов стержневого заземлителя для различных грунтов и процессов искрообразования.

Ключевые слова: заземлители, импульсное сопротивление, грунт, зоны нелинейности, зоны искрообразования

A method for calculating the impulse coefficients of a rod-type grounding electrode for different soils and spark formation processes is considered.

Key words: grounding electrodes, impulse impedance, soil, nonlinearity zones, spark formation zones

Целью исследований является распространение результатов натурных испытаний заземлителей на другие грунты, отличные от грунтов в местах испытаний. Перед началом расчета импульсного сопротивления стержневого или другого сосредоточенного заземлителя необходимо определить токи начала зон нелинейности и искрообразования, а также ток возможного пробоя зоны искрообразования.

Характерные токи на границах зон нелинейности и искрообразования. При небольшом токе наблюдается пропорциональность между напряжением и током, стекающим с заземлителя. По мере увеличения тока напряжённость в земле возрастает, и когда ее значение превышает начальное, то [1]

$$E = E_H^{1-b} (rJ)^b, \quad (1)$$

где E_H — начальная напряженность, при которой нарушается пропорциональность между плотностью тока и напряженностью; b — коэффициент нелинейности — тангенс угла наклона зависимости напряженности от плотности тока; J — плотность

тока; r — удельное электрическое сопротивление, эквивалентное неоднородной структуре.

Начальная напряженность и коэффициент нелинейности могут быть определены в лаборатории в однородном электрическом поле. Этот путь проще, чем выявление зависимости между физическими и электрическими характеристиками, определение физических характеристик конкретного образца с последующим определением начальной напряженности и коэффициента нелинейности.

Ток, при котором нарушается указанная пропорциональность, равен [2]:

$$I_H = 2\rho L r_0 E_H / r, \quad (2)$$

где L — длина заземлителя; r_0 — его радиус.

Зависимость радиуса зоны нелинейности от тока молнии изображена на рис. 1 (кривая 1) [3]. Ось абсциссов совмещена с поверхностью заземлителя.

Когда напряжённость на поверхности заземлителя достигает пробивного значения, определяемого в однородном электрическом поле, земля вокруг

6. Бояринцев Ю.Е. Методы решения вырожденных систем обыкновенных дифференциальных уравнений. — Новосибирск: Наука, 1988.

7. Гридин В.Н., Михайлов В.Б., Куприянов Г.А., Михайлов К.В. Устойчивые численно-аналитические решения сверхжестких дифференциально-алгебраических систем уравнений. — Математическое моделирование, 2003, т.15, № 10.

информатики и автоматизации РАН защитил докторскую диссертацию по тематике, связанной с применением численно-аналитических методов в моделировании радиоэлектронных схем СВЧ диапазона. Ученый секретарь Центра информационных технологий в проектировании РАН.

Румянев В.В.

[28.04.11]

Авторы: Михайлов Вадим Борисович окончил факультет автоматики и вычислительной техники Ленинградского электротехнического института в 1973 г. В 1992 г. в Санкт-Петербургском институте

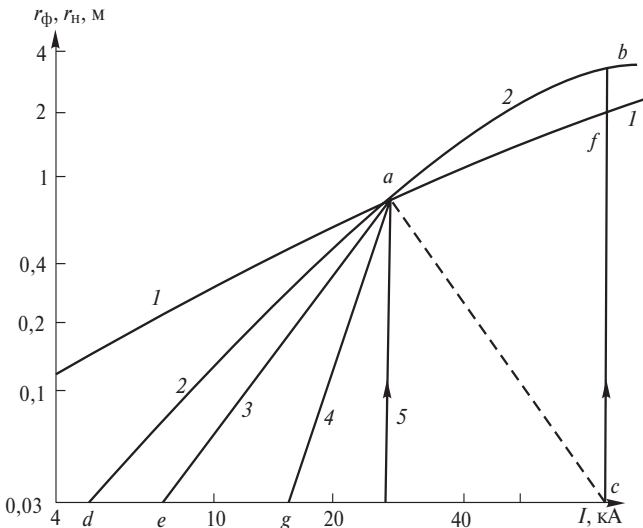


Рис. 1. Зависимости радиусов зон нелинейности и искрообразования от тока молнии ($r = 100$ Ом м; $r_0 = 3$ см; $L = 2,5$ м): 1 – радиус зоны нелинейности; 2 – фиктивный радиус зоны искрообразования при $b = 1$; 3 – при $b = 0,87$ (песок); 4 – при $b = 0,6$ (глина); 5 – при $b = 1/2$ (глина); 6 – при $b = 0,36$ (глина); - - - - ложная зависимость фиктивного радиуса искрообразования от тока

заземлителя начинает пробиваться, образуя в зоне нелинейности зону искрообразования, удельное сопротивление в которой много меньше, чем до пробоя. Поэтому условно сопротивление зоны нелинейности принимается равным нулю. Критическая напряжённость на границе зоны искрообразования при увеличении радиуса этой зоны, начиная с пробивного значения $E_{пр}$ в однородном электрическом поле, изменяется по закону [4]:

$$E_k = E_{пр} \sqrt{r_0 / r_{\phi}}, \tag{3}$$

где r_0 и r_{ϕ} – радиус заземлителя и фиктивный радиус зоны искрообразования (эквивалентный по сопротивлению) соответственно.

Зависимость фиктивного радиуса зоны искрообразования от тока при $b = 1$ – кривая 2, которая начинается с поверхности заземлителя (от точки d).

Поскольку граница зоны нелинейности определяется неизменной, начальной напряженностью, а зона искрообразования – напряженностью, зависимой от размеров этой зоны, то граница зоны искрообразования пересечет границу зоны нелинейности. Это произойдёт, если при этом ток молнии достаточен. До указанного пересечения грунт в зоне нелинейности имеет коэффициент нелинейности, меньший 1. После пересечения этот коэффициент становится равным 1 (по кривой 2 справа от точки a). Так как при этом $E_k < E_n$, зона нелинейности не может существовать. Затем зона искрообразования начинает распространяться при наличии прямой пропорциональности между плотностью тока и напряженностью электрического

поля. Этот процесс отличается от стекания тока с заземлителя в песчаном грунте, где коэффициент нелинейности только условно принимается равным 1, а равен примерно 0,87. Кривая 3 соответствует песчаному грунту для $b = 0,87$. Указанный ток пересечения границы зоны нелинейности I_a для стержневого заземлителя определен в [2]. Умножим обе части уравнения на r . После преобразований получаем, что произведение тока на удельное сопротивление грунта зависит от геометрических размеров заземлителей, а также от начального и пробивного значений напряженности:

$$r I_a = 2 \rho L r_0 E_n (E_{пр} / E_n)^4 \sqrt{((E_n / E_{пр})^4 + (L / r_0)^2)}. \tag{4}$$

Здесь L и r_0 – длина и радиус стержня соответственно.

Этапы расчёта импульсного сопротивления. Ход процесса и соответствующего расчёта зависит от коэффициента нелинейности.

Если коэффициент нелинейности $b > 1/2$, то зона искрообразования образуется и развивается в зоне нелинейности. Ток начала искрообразования из [2] после преобразований

$$I_{и} = (2 \rho L r_0 E_n / r) (E_{пр} / E_n)^{1/b}. \tag{5}$$

После начала искрообразования радиус зоны искрообразования увеличивается в соответствии с кривыми 2, 3 и 4 от точек d , e и g соответственно. Все кривые, а также кривая 1 (для радиуса нелинейности) пересекаются в точке a , которая соответствует начальной напряженности.

Справа от точки a расчет проводится так же, как в песчаном грунте, т.е. без учета нелинейности. При этом импульсное сопротивление уменьшается только за счет искрообразования.

В общем, процесс растекания при увеличении тока делится на три части:

- с зоной нелинейности до начала искрообразования;
- с зоной искрообразования в зоне нелинейности после начала искрообразования;
- с зоной искрообразования без зоны нелинейности справа от точки a , при этом ток искрообразования больше тока I_a .

Если коэффициент нелинейности $b = 1/2$, то в момент $I = I_a$ происходит пробой зоны нелинейности, и далее зона искрообразования также развивается при коэффициенте нелинейности, равном 1.

Если коэффициент нелинейности $b < 1/2$, то искрообразование не происходит до момента, когда ток становится равным току начала искрообразования (5). При этом $I_{и} > I_a$. В момент, когда ток $I = I_{и}$, происходит пробой зоны нелинейности от

точки c до точки b , и далее искрообразование также развивается при коэффициенте нелинейности, равном 1 в соответствии с кривой 2. Необходимо отметить, что при $b < 1/2$ математическая зависимость фиктивного радиуса от тока является физически ложной, за исключением точки c .

Таким образом, при $b < 1/2$ расчёт разбивается на два этапа:

расчёт только с учётом нелинейности без учёта искрообразования, до точки a ;

расчёт только с учётом искрообразования и без учёта нелинейности, после точки a .

Значения трёх токов, рассчитанных по формулам (2), (4) и (5), приведены в таблице. В этой таблице удельные электрические сопротивления образцов и значения пробивной напряжённости $E_{пр}$ взяты из [5]; коэффициенты нелинейности и начальные напряжённости E_H — из [1]; длина стержневого заземлителя 2,5 м, радиус 3 см. Если удельное сопротивление грунта будет отличаться от принятого в таблице, то изменятся и токи в соответствии с (2), (4), (5).

Влияние характерных токов на импульсное сопротивление заземлителя. На рис. 2 приведены расчётные зависимости импульсных коэффициентов стержневого заземлителя в различных грунтах.

Расчёт проведен по различным формулам в зависимости от коэффициента нелинейности и положения характерных токов.

Кривая на рис. 2 построена как средняя по опытным точкам натуральных полевых испытаний (под руководством В.А. Вайнера, см. [4].) Из рис. 2 видно, что после тока начала нелинейности I_H импульсные коэффициенты начинают плавно уменьшаться при увеличении тока. Уменьшение импульсного сопротивления при этом происходит только за счет нелинейности вольт-амперной характеристики. После тока I_a уменьшение сопротивления происходит только за счет искрообразования. При этом коэффициент нелинейности равен 1 и начинается более интенсивное снижение импульсного сопротивления. Именно в этот момент ток испытаний — порядка 20 кА — достигает своего предельного значения.

У заземлителя в глинистом грунте искрообразование так и не наступило. Приведенные на рис. 2 данные многолетних натуральных испытаний хорошо согласуются с расчётными характеристиками для глинистого и перегнойного грунтов. Расчётная характеристика для перегнойного грунта обладает меньшей нелинейностью, но с наступлением ис-

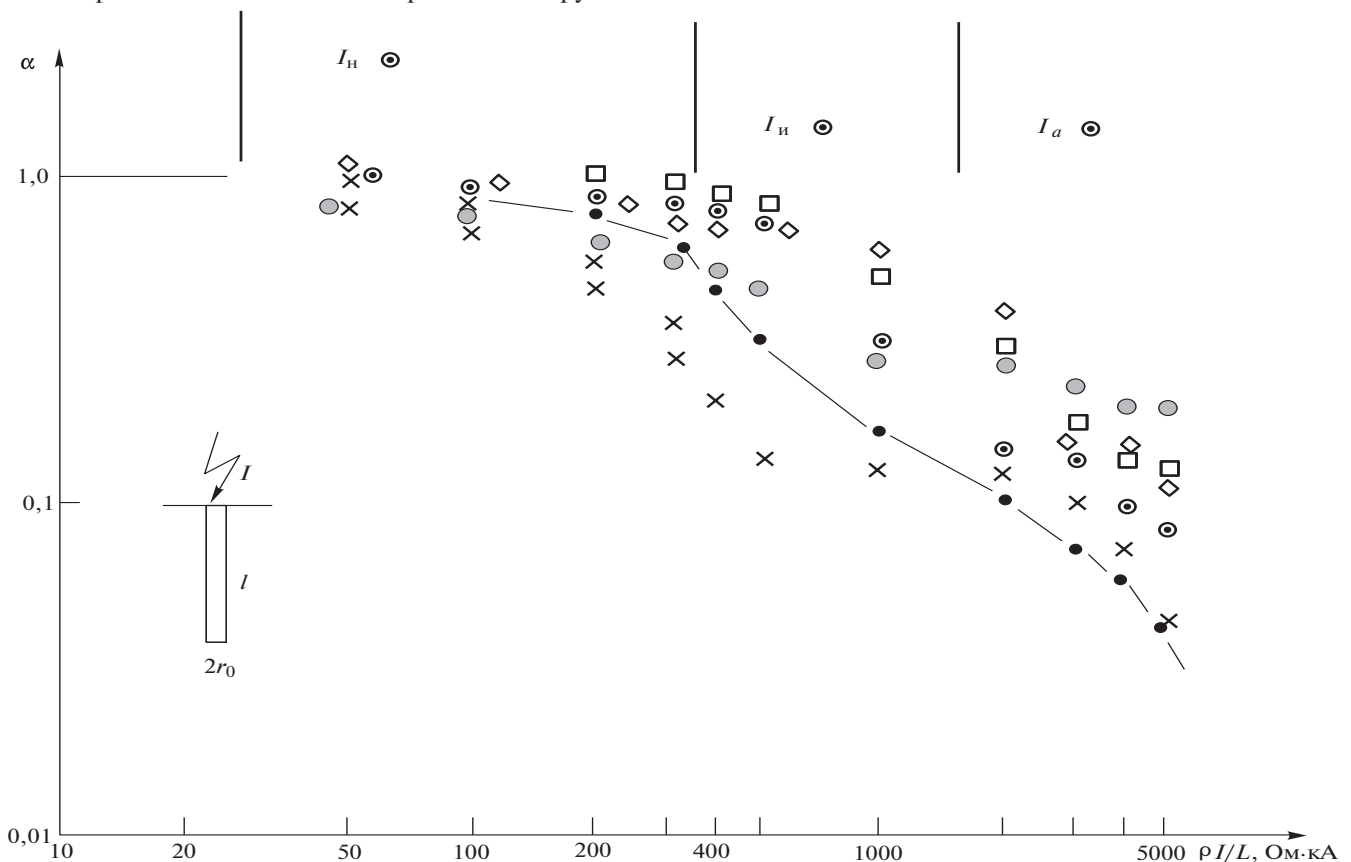


Рис. 2. Результаты расчетов для разных образцов почвы и данные натуральных испытаний: \odot — растительный перегной; \bullet — красная глина; \times — то же при $r_1 = 2r$; \square — песок; \diamond — желтая глина; \cdot — натурные испытания

Образец почвы	Удельное электрическое сопротивление ρ , Ом м	Коэффициент нелинейности b	Напряженность, кВ/см		Токи, изменяющие процессы нелинейности и искрообразования, кА		
			E_H	$E_{пр}$	I_H	$I_{и}$	I_a
Песок	450	0,87	4,84	12,8	0,51	1,55	3,55
	1000	0,88	2,34	13,2	0,11	0,79	3,8
Глина	70	0,51	1,99	8	1,34	6,6	3,8
	70	0,36	2,11	8	1,34	6,6	22
	600	0,37	1,36	4	0,1	4,6	1,78
	600	0,45	0,81	5,5	0,063	4,5	3,3
Перегной	20	0,85	0,63	14	1,46	7,2	4618
	90	0,9	0,74	9,3	0,38	6,4	131
	105	0,87	0,83	7,2	0,38	7,1	131
	550	0,8	1,3	7,5	0,11	9,96	4
	3500	0,66	1,2	-	0,016	0,283	0,794

искрообразования начинает приближаться к опытной.

Опытная характеристика является нижней огибающей расчётных значений для всех образцов грунта, исследованных в [5]. Поэтому можно гарантировать, что действительные значения импульсных сопротивлений могут быть больше, чем полученные во время натурных испытаний, а не меньше, как хотелось бы, чтобы иметь некоторый запас при расчёте молниезащиты.

Необходимо отметить, что ход опытной зависимости свидетельствует не о снижении скорости уменьшения импульсного сопротивления при увеличении тока, но наоборот говорит о катастрофическом уменьшении этого сопротивления при предельных использованных во время испытаний и токах после тока I_a .

Кроме того, расчётные импульсные коэффициенты при реальных токах молнии на порядок меньше, чем на рис. 2. Например, для перегнойного грунта $a = 0,0056$ при 100 кА.

Пример расчета. Допустим, требуется рассчитать зависимость от тока молнии импульсного сопротивления стержневого заземлителя длиной 2,5 м и радиусом 3 см, расположенного в глинистом грунте со следующими характеристиками: $b = 0,36$; $\rho = 760$ Ом·м; $E_H = 2,11$ кВ/см; $E_{пр} = 8$ кВ/см.

1. Определяем ток начала нелинейности по формуле (2):

$$I_H = 2\rho \sqrt[3]{0,03 \sqrt[3]{1,1 \cdot 10^5}} = 1,7 \text{ кА.}$$

Ток I_a в рассматриваемом случае определять не нужно, так как $b < 1/2$.

2. Находим ток искрообразования или ток пробоя зоны нелинейности по (5):

$$I_{и} = I_H (E_H / E_{пр})^{1/b} = 1,4 \cdot 10^3 (8 / 2,11)^{1/0,36} = 57,6 \text{ кА.}$$

Расчет разбивается на две ветви:

только с процессом нелинейности;

только с процессом искрообразования после пробоя зоны нелинейности.

Рассчитываем импульсное сопротивление ветви только с процессом нелинейности [6]:

$$r_{H1} = \rho I / (2\rho L E_H) = 70 \sqrt[3]{6 \cdot 10^3} / (2\rho \sqrt[3]{2,5 \sqrt[3]{1,1 \cdot 10^5}}) = 1,2 \text{ м.}$$

$$r_H = L \sqrt{\sqrt{(1 + 4(r_{H1} / L)^2)} - 1} / 2 =$$

$$= 2,5 \sqrt{\sqrt{(1 + 4(1,2 / 2,5)^2)} - 1} / 2 = 1,1 \text{ м.}$$

$$R_{и1} = (\rho / (2\rho L)) [(L / r_{H1})^{1-b} \sqrt[3]{\rho dg / (g\sqrt{1+g^2})}] +$$

$$+ \ln((1 + \sqrt{(1 + (r_H / L)^2}) / (r_H / L)) = (70 / 2\rho \sqrt[3]{2,5}) [2,5 / 1,1]^{1-b} \cdot$$

$$\sqrt[3]{\rho dg / (g\sqrt{1+g^2})} + \ln((1 + \sqrt{(1 + (1,1 / 2,5)^2}) / (1,1 / 2,5)) = 12,3 \text{ Ом.}$$

Затем определяем импульсное сопротивление после пробоя зоны нелинейности [7]:

$$r_{фТ} = \sqrt[3]{((\rho I / (2\rho L E_{пр}))^2) =$$

$$= \sqrt[3]{((70 \sqrt[3]{6 \cdot 10^3} / (2\rho \sqrt[3]{2,5 \sqrt[3]{1,1 \cdot 10^5}}))^2) = 2,8 \text{ м;}$$

$$M = \sqrt{(1/4 + (1/27)(L/r_{фТ})^6) =$$

$$= \sqrt{(1/4 + (1/27)(2,5/2,8)^6) = 0,52;$$

$$r_{ф} = (\sqrt[3]{(1/2 + M)} + \sqrt[3]{(1/2 - M)}) r_{фТ} =$$

$$= (\sqrt[3]{(1/2 + 0,52)} + \sqrt[3]{(1/2 - 0,52)}) 2,8 = 2,1;$$

$$R_{и2} = (\rho / (2\rho L)) \ln[(1 + \sqrt{(1 + (r_{ф} / L)^2}) / (r_{ф} / L)] =$$

$$= (70/2\rho \cdot 2,5) \ln[1 + \sqrt{1 + (2,1/2,5)^2} / (2,1/2,5)] = 4,6 \text{ Ом.}$$

По полученным таким образом точкам на рис. 3 построен график зависимости импульсного сопротивления от тока. На рис. 3 линия f — b соответствует линии c — b на рис. 1, но при другом токе. Из рис. 1 видно, что происходит пробой не только зоны нелинейности, но и части зоны, где соблюдается пропорциональность между плотностью тока и напряженностью электрического поля.

Разработанные методы расчета хорошо согласуются с результатами уже проведенных испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Анненков В.З.** Вольт-амперные характеристики грунтов при токах молнии. — Электричество, 1986, №2.
2. **Анненков В.З.** Зоны искрообразования и пробоя грунта при растекании тока молнии с сосредоточенных заземлителей. — Электричество, 1995, №8.
3. **Анненков В.З.** Метод расчета импульсного сопротивления стержневого заземлителя. — Электричество, 1997, №8.
4. **Анненков В.З.** Искрообразование в земле вокруг заземлителей молниезащиты. — Электричество, 1993, №12.
5. **Рябкова Е.Я.** Электропроводность и импульсные характеристики грунтов. Изв. вузов. Энергетика, 1958, №3.
6. **Анненков В.З.** Расчет импульсных характеристик стержневого заземлителя с учетом нелинейности грунта. — Электричество, 1989, №11.
7. **Анненков В.З.** Метод расчета импульсного сопротивления стержневого заземлителя в песчаном грунте. — Электричество, 1995, №6.

[07.02.11]

Автор: **Анненков Виктор Захарович** окончил электроэнергетический факультет Московского

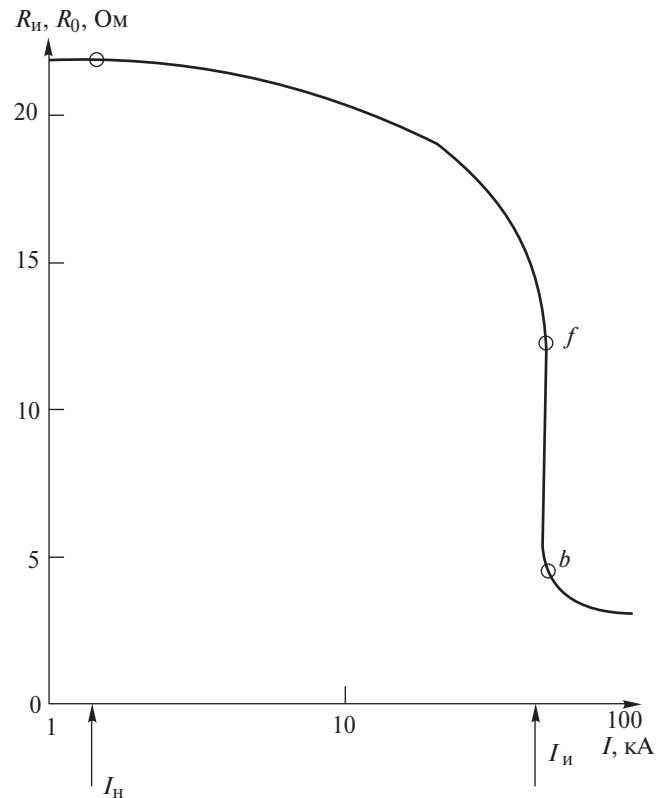


Рис. 3. Зависимость импульсного сопротивления от тока

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.