

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ ЗАЕМЛИТЕЛЕЙ

Канд. техн. наук ГЕРАСИМОВИЧ Д. А., магистр техн. наук ДЕРЮГИНА Е. А.

*ООО «Электросити»,
Белорусский национальный технический университет*

В [1] предложен метод и разработана программа расчета электромагнитных характеристик вертикальных стержневых заземлителей при стекании импульсных токов молнии. Программа апробирована для случая стекания в заземлитель синусоидального тока различной частоты. Для дальнейшего моделирования импульсных характеристик необходимо задание в программе временной зависимости тока молнии.

До недавнего времени основной аналитической зависимостью для описания формы импульса тока молнии была биэкспоненциальная зависимость [2]

$$i(t) = \frac{I_m}{\eta} (e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}), \quad (1)$$

где I_m – максимальное значение (амплитуда) импульса тока молнии; $\eta = e^{-t_{\max}/\tau_1} - e^{-t_{\max}/\tau_2}$ – коэффициент, корректирующий максимальное значение

импульса; $t_{\max} = \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \ln \left(\frac{\tau_1}{\tau_2} \right)$; $\tau_1 = \frac{t_{\phi} - t_{\text{и}}}{\ln 0,5}$ – постоянная времени фронта им-

пульса; $\tau_2 = \frac{t_{\phi}}{5}$ – постоянная времени спада импульса; t_{ϕ} – длительность фронта импульса; $t_{\text{и}}$ – время спада импульса, которое определяется промежутком времени до 50 % уменьшения значения тока по сравнению с I_m .

В настоящее время для описания импульса тока молнии стандартами [3, 4] предписывается использовать зависимость, которая более точно аппроксимирует форму импульса и дает нулевую производную по току в начальный момент времени [5]:

$$i(t) = \frac{I_m}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} e^{-t/\tau_2}, \quad (2)$$

где $\eta = e^{-\tau_1/\tau_2 (n\tau_2/\tau_1)^{1/(n+1)}}$; n – фактор крутизны импульса, $n = 10$ [3, 4]; τ_1, τ_2 определены в [3, 4].

Согласно [3, 4] используются два импульса тока молнии: первый с длительностью фронта $t_{\phi} = 10$ мкс и временем спада $t_{\text{и}} = 350$ мкс (10/350 мкс) и последующий – 0,25/100 мкс. Для описания этих импульсов в зависимости (2) принимают: $n = 10$, для первого импульса $\tau_1 = 19$ мкс, $\tau_2 = 485$ мкс и $\eta = 0,93$; для последующего – 0,454; 143 мкс и 0,993 [3, 4].

Для биэкспоненциальной зависимости в соответствии с выражением (1) аналогичные параметры будут: для первого импульса $\tau_1 = 490$ мкс, $\tau_2 = 2$ мкс и $\eta = 0,97$; для последующего – 144; 0,05 мкс и 0,997.

Численное моделирование импульсных характеристик заземлителей было проведено для обеих зависимостей токов молнии при первом и последующем импульсах тока молнии. В расчетах также варьировались: проводимость земли, длина заземлителя, его материал и радиус стержня заземлителя. Исходные данные, принятые в расчетах, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Электромагнитные свойства заземлителя и земли

Параметр	Заземлитель (сталь)	Земля
Электрическая проводимость, См/м	$\gamma_1 = 6,8 \cdot 10^6$	$\gamma_2 = 0,1$
		$\gamma_2 = 0,01$
		$\gamma_2 = 0,001$
		$\gamma_2 = 0,0001$
Магнитная проницаемость, Гн/м	$\mu_1 = 700 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}$	$\mu_2 = 4\pi \cdot 10^{-7}$
Диэлектрическая проницаемость, Ф/м	$\epsilon_1 = 8,86 \cdot 10^{-12}$	$\epsilon_2 = 8,86 \cdot 10^{-11}$

Аналогичные расчеты были проведены и для медных заземлителей.

Ниже рассмотрены наиболее характерные результаты проведенных численных исследований. Временные зависимости тока молнии, напряжения на заземлителе и импульсных сопротивлений для стальных заземлителей с внешним радиусом 6 мм приведены на рис. 1–4. Формы импульсов тока молнии для первого и последующего импульсов, получаемые по (1) и (2), в целом имеют схожий характер (рис. 1а–4а). При этом зависимость (2) обеспечивает более плавное изменение тока в начальные моменты времени, и в принятой системе координат времени амплитудное значение тока наступает позже на время $2t_\phi$ в сравнении с биэкспоненциальной зависимостью. Величина напряжения u , В, на рис. 1–4 приведена к амплитудному значению тока, равному 1 А.

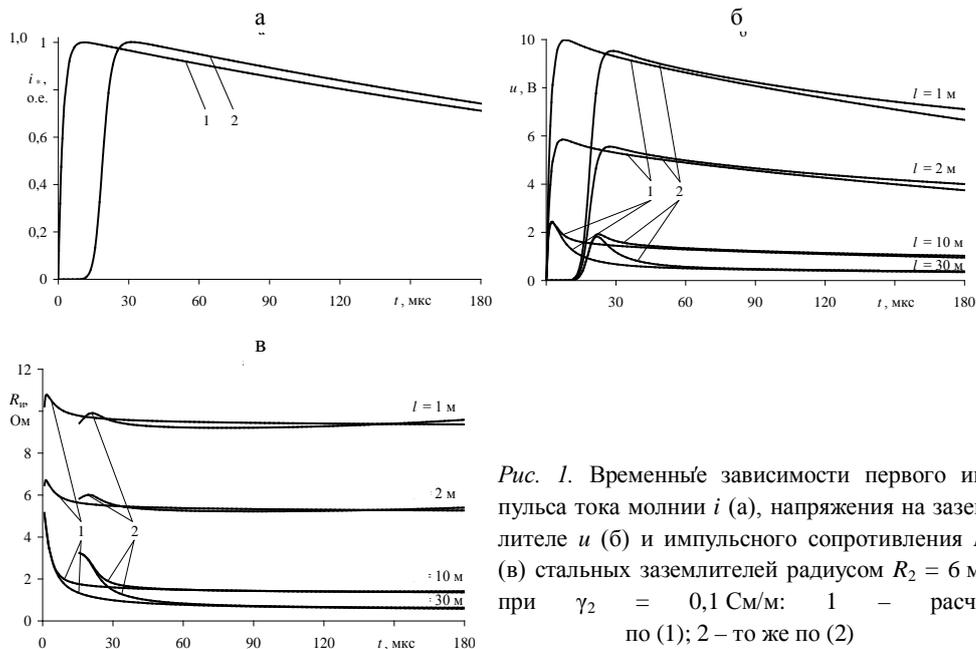


Рис. 1. Временные зависимости первого импульса тока молнии i (а), напряжения на заземлителе u (б) и импульсного сопротивления $R_{н}$ (в) стальных заземлителей радиусом $R_2 = 6$ мм при $\gamma_2 = 0,1$ См/м: 1 – расчет по (1); 2 – то же по (2)

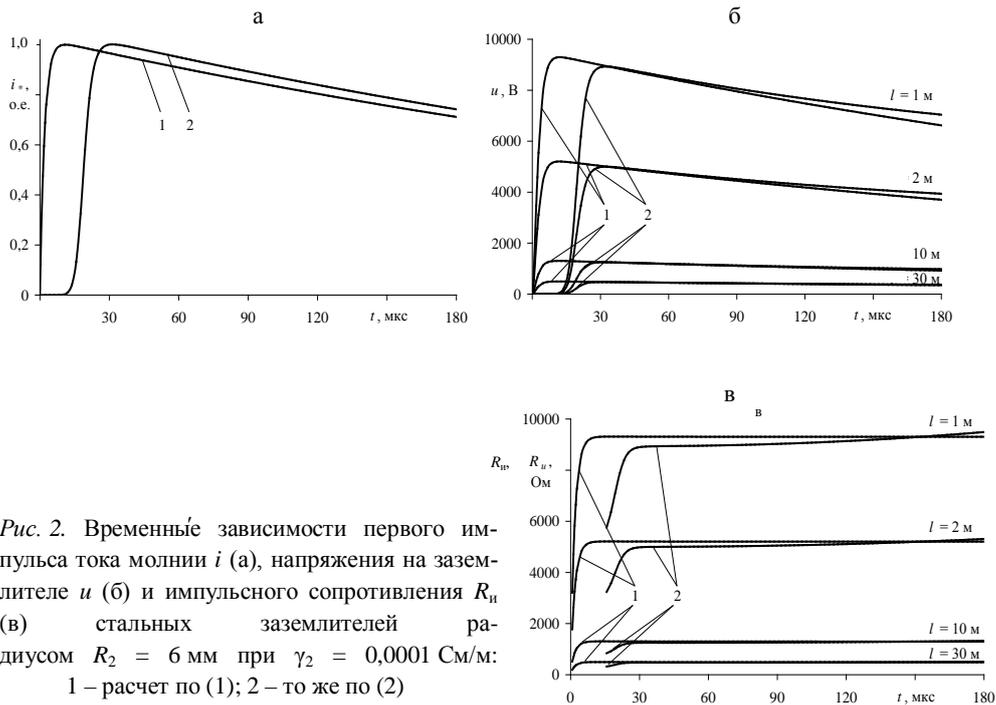


Рис. 2. Временные зависимости первого импульса тока молнии i (а), напряжения на заземлителе u (б) и импульсного сопротивления $R_{И}$ (в) стальных заземлителей радиусом $R_2 = 6$ мм при $\gamma_2 = 0,0001$ См/м: 1 – расчет по (1); 2 – то же по (2)

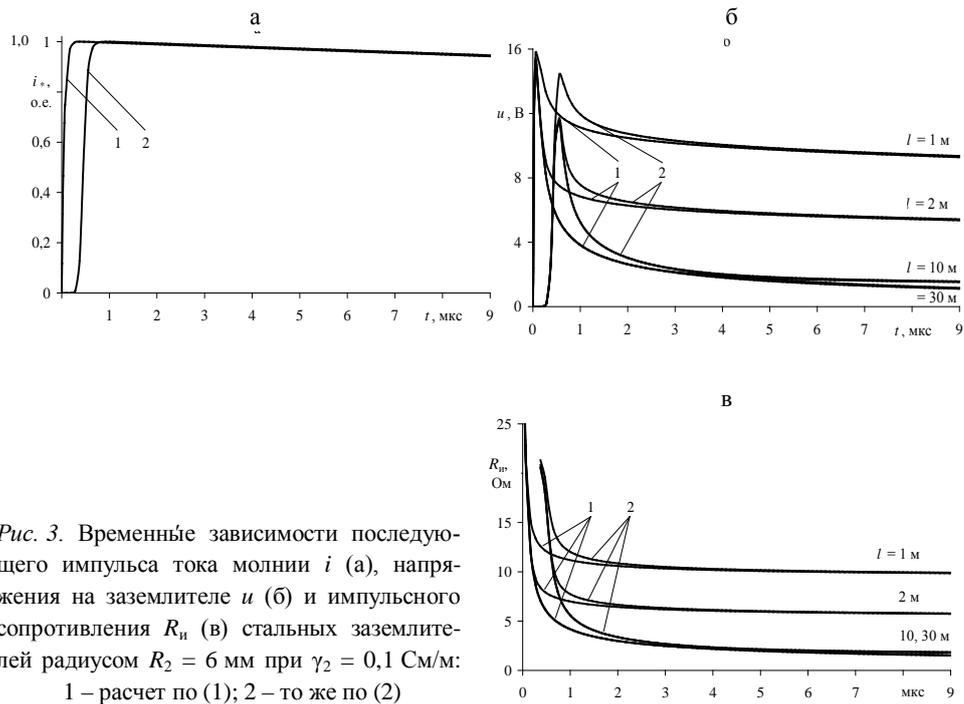


Рис. 3. Временные зависимости последующего импульса тока молнии i (а), напряжения на заземлителе u (б) и импульсного сопротивления $R_{И}$ (в) стальных заземлителей радиусом $R_2 = 6$ мм при $\gamma_2 = 0,1$ См/м: 1 – расчет по (1); 2 – то же по (2)

Для первого импульса характерно достаточно плавное изменение во времени тока в сравнении с последующим импульсом. Соответственно для заземлителей небольшой длины l (до 2 м) напряжение на заземлителе (рис. 1б, 2б) в целом повторяет зависимость тока, а импульсное сопротивление

ние (рис. 1в, 2в) во времени изменяется не так существенно, как для последующего импульса. При хорошей проводимости земли ($\gamma_2 = 0,1 \text{ См/м}$) амплитуда напряжения несколько опережает по времени амплитуду тока (рис. 1б). Причем это опережение более существенно проявляется с увеличением длины заземлителя. Таким образом, в хорошо проводящих грунтах с ростом длины заземлителя существенную роль начинают играть индуктивные свойства земли. Импульсное сопротивление заземлителя в данном случае несколько больше своего установившегося значения, а с ростом длины заземлителя увеличение сопротивления в начальные моменты времени более существенно (рис. 1в).

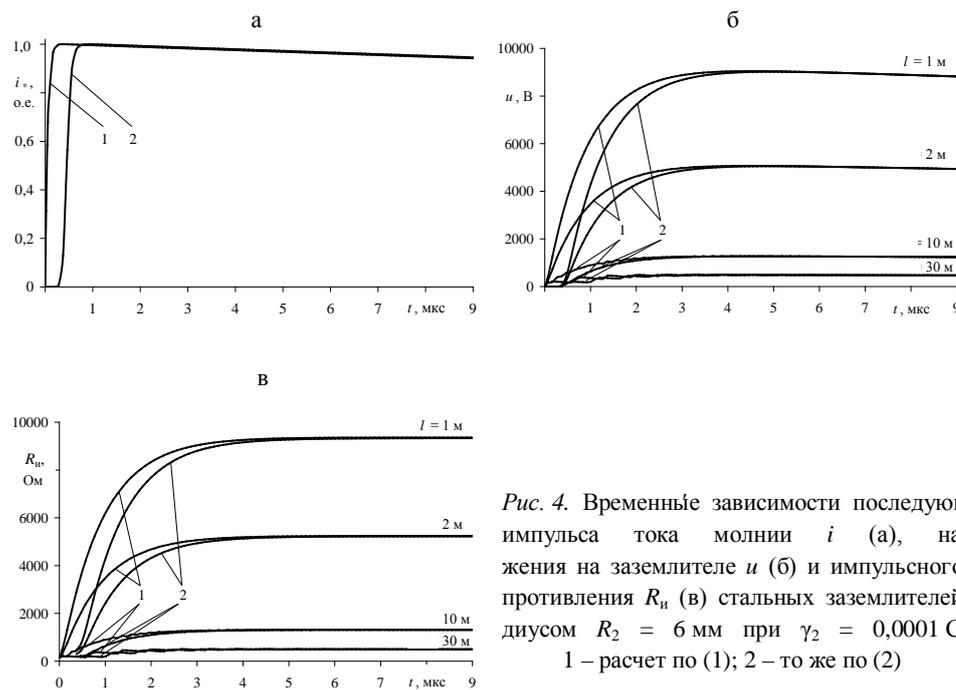


Рис. 4. Временные зависимости последующего импульса тока молнии i (а), напряжения на заземлителе u (б) и импульсного сопротивления $R_{и}$ (в) стальных заземлителей радиусом $R_2 = 6 \text{ мм}$ при $\gamma_2 = 0,0001 \text{ См/м}$: 1 – расчет по (1); 2 – то же по (2)

При малой проводимости земли ($\gamma_2 = 0,0001 \text{ См/м}$) амплитуды напряжения (рис. 2б) и тока (рис. 2а) практически совпадают во времени даже при больших длинах заземлителей ($l = 30 \text{ м}$). Таким образом, для первого импульса в плохо проводящих грунтах ни индуктивные, ни емкостные параметры заземлителя не оказывают заметного влияния, т. е. заземлитель в этом случае является сосредоточенным. Также следует отметить, что в первые моменты времени сопротивление заметно меньше своего установившегося значения (рис. 2в). Вызвано это существенным влиянием токов смещения (емкостными параметрами земли) в первые моменты времени, однако сопротивление возрастает практически до установившегося значения еще до достижения максимумов тока и напряжения. Схожие результаты по изменению сопротивления во времени для вертикального заземлителя получены в [6].

Для последующего импульса (рис. 3, 4) характерно более быстрое изменение тока во времени. В земле с хорошей проводимостью ($\gamma_2 =$

= 0,1 См/м) опережение напряжения более существенно (0,4 мкс при длинах заземлителей более 2 м) (рис. 3б). При этом пиковые значения напряжений (рис. 3б) и импульсных сопротивлений (рис. 3в) практически не изменяются с увеличением длины заземлителя более 2 м. Пиковые значения импульсных сопротивлений в несколько раз (до 20) превышают установившиеся. Отмеченное свидетельствует о существенном влиянии индуктивных параметров земли в данном случае, а при длинах более 2 м такой заземлитель можно рассматривать как бесконечно длинный (протяженный).

В земле с плохой проводимостью ($\gamma_2 = 0,0001$ См/м) заметно проявляются емкостные параметры земли (токи смещения) (рис. 4). Амплитудные значения напряжений заметно отстают от амплитуд тока (на время до 4 мкс) (рис. 4б), а импульсные сопротивления возрастают в переходном режиме до установившихся значений (рис. 4в). В момент максимума тока сопротивления значительно меньше установившихся значений, а при достижении максимума напряжения импульсные сопротивления соизмеримы с установившимися значениями. С увеличением длины проводника в отличие от случая хорошей проводимости земли сопротивление заземлителя продолжает снижаться. Отмеченное говорит о несущественном влиянии индуктивных параметров земли для таких длин заземлителей. Для заземлителей длиной 10 м и более начинает проявляться лишь незначительный колебательный характер изменения во времени напряжения (рис. 4б) и импульсного сопротивления (рис. 4в) на фронте импульса молнии.

Сравнение результатов, полученных для биэкспоненциального закона изменения тока молнии (1) (кривые 1 на рис. 1–4) и для формулы (2) (кривые 2 на рис. 1–4), показывает, что максимальные величины напряжений и импульсных сопротивлений несколько меньше при использовании зависимости (2). Особенно заметно это проявляется в земле с хорошей проводимостью (рис. 1, 3), где пиковые значения импульсных сопротивлений могут отличаться на 10 % и более. Объясняется это более гладким характером зависимости (2).

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что импульсные сопротивления существенно зависят от свойств земли и формы импульса тока (первый или последующий импульс). Кроме того, импульсное сопротивление значительно изменяется во времени и его значения в моменты максимума тока молнии и максимума напряжения на заземлителе могут существенно отличаться. Для дальнейшего определения зоны стекания тока с заземлителя в импульсном режиме целесообразно исследование импульсных сопротивлений в зависимости от длины заземлителя с учетом отмеченных выше факторов. Такие результаты приведены на рис. 5, 6. Их анализ показывает, что первоначально с увеличением длины заземлителя происходит значительное снижение сопротивлений. Затем по достижении некоторой эквивалентной длины (начиная с которой заземлитель можно считать протяженным) сопротивления с увеличением длины заземлителя уменьшаются незначительно. При этом импульсные сопротивления, соответствующие максимуму напряжения, становятся значительно больше (от 1,3 до 3,5 раза) сопротивлений в момент максимума тока для всех случаев.

а

б

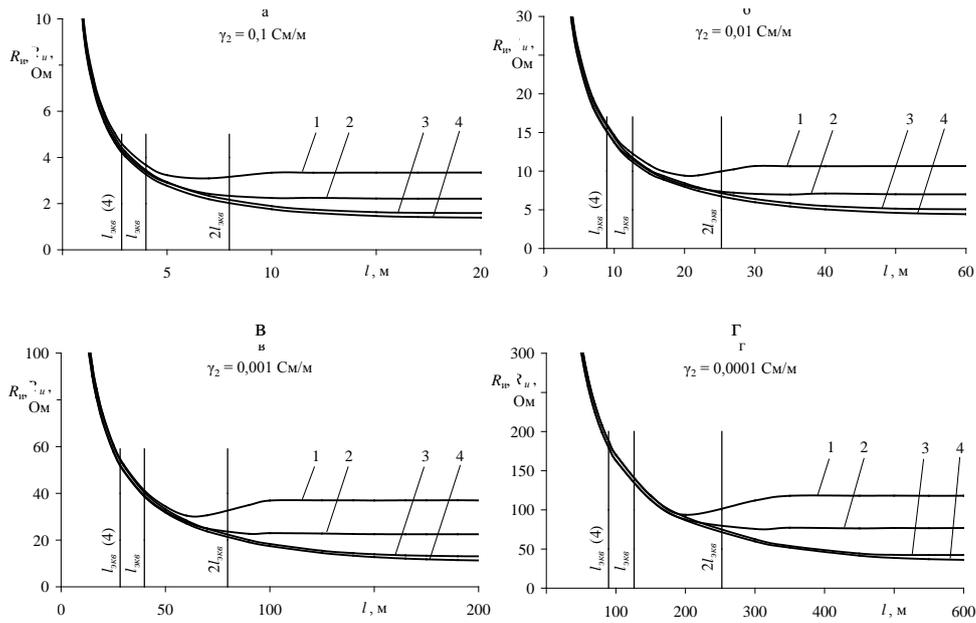


Рис. 5. Зависимости импульсного сопротивления $R_{и}$ стальных заземлителей радиусом $R_2 = 6$ мм от длины l для различной проводимости земли при стекании первого импульса тока молнии: 1 – в момент максимума напряжения, ток молнии по (1); 2 – то же, ток молнии по (2); 3 – в момент максимума тока, ток молнии по (1); 4 – то же, ток молнии по (2)

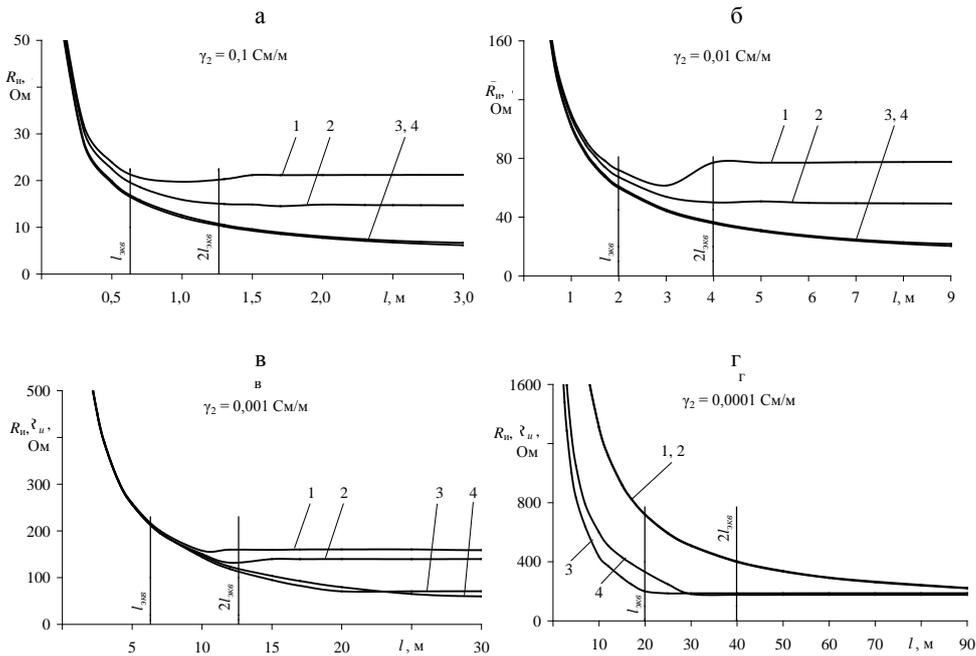


Рис. 6. Зависимости импульсного сопротивления $R_{и}$ стальных заземлителей радиусом $R_2 = 6$ мм от длины l для различной проводимости земли при стекании последующего импульса тока молнии: 1 – в момент максимума напряжения, ток молнии по (1); 2 – то же, ток молнии по (2); 3 – в момент максимума тока, ток молнии по (1); 4 – то же, ток молнии по (2)

Эквивалентная длина существенно зависит от свойств земли и формы импульса тока. Например, при хорошей проводимости земли ($\gamma_2 = 0,1$ См/м) для последующего импульса тока эквивалентная длина заземлителя менее 1 м (рис. 6а), тогда как при плохой проводимости земли ($\gamma_2 = 0,0001$ См/м) для первого импульса тока она более 100 м (рис. 5г). Для приближенной оценки эквивалентной длины (эффективной зоны стекания тока с заземлителя) в зависимости от свойств земли и формы импульса тока можно воспользоваться аналогией со стационарным режимом, для которого эффективная зона стекания тока с заземлителя составляет порядка глубины проникновения плоской электромагнитной волны [7]. Тогда для импульсного режима эквивалентную длину заземлителя можно оценить соотношением

$$l_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{\tau}{\gamma_2 \mu_2}}, \quad (3)$$

где $\tau = \frac{t_{\text{ф}}}{5}$ определяется длительностью фронта импульса тока молнии $t_{\text{ф}}$.

Результаты, приведенные на рис. 5, 6, показывают, что соотношение (3) достаточно хорошо определяет зону стекания тока с заземлителя в зависимости от свойств земли и формы импульса тока, а при достижении $2l_{\text{экв}}$ и более сопротивление заземлителя снижается незначительно.

Приведенные результаты исследований получены для уединенного вертикального заземлителя. Качественная оценка эквивалентной длины в целом будет справедлива и для горизонтального заземлителя. В этой связи представляет интерес сравнение с аналогичными данными, полученными для горизонтальных заземлителей. В соответствии с [8] при хорошей проводимости земли сопротивление заземления молниеотвода определяется сопротивлением заземления части контура в радиусе 20 м. Полученные здесь результаты показывают, что для первого импульса тока молнии указанная зона справедлива при проводимости земли порядка $\gamma_2 = 0,01$ См/м, для второго – 0,001 См/м, т. е. для достаточно плохо проводящих грунтов. Соответственно при проводимостях земли, выше указанных, эффективный радиус заземления будет еще меньше, а при меньших проводимостях, наоборот, больше. В [9] для приближенных оценок эквивалентного размера активно работающей части заземляющего контура в грунте с $\rho_2 \geq 500$ Ом/м ($\gamma_2 \leq 0,002$ См/м) предложено выражение

$$l_{\text{экв}} = 20 \sqrt{\frac{\rho_2}{500}}. \quad (4)$$

Данное выражение получено на основании анализа активно работающей длины горизонтальной шины при линейно нарастающем токе с фронтом 2 мкс. Такая скорость нарастания соответствует первому импульсу тока. Сопоставление результатов, полученных по (3) и (4), для первого импульса (рис. 5) показывает, что эти выражения дают соизмеримые результаты, при этом по (3) зона стекания на 30 % больше. Следует также отметить результаты экспериментальных исследований по распределению потенциала вдоль горизонтальной шины [10]. Они также подтверждают, что зона стека-

ния тока вдоль заземлителя тем меньше, чем выше частота источника (меньше постоянная времени фронта импульса) и чем ниже сопротивление грунта.

ВЫВОДЫ

1. Математическое моделирование импульсных характеристик показало, что максимум напряжения на заземлителе в зависимости от свойств земли и формы импульса тока молнии может как опережать, так и отставать от максимума тока молнии. В грунтах с хорошей проводимостью напряжение опережает ток, а величины импульсных сопротивлений больше их установившихся значений. В грунтах с плохой проводимостью, наоборот, ток опережает напряжение, а сопротивление в импульсном режиме меньше, чем в установившемся.

2. Импульсное сопротивление заземлителя в момент максимума напряжения всегда больше, чем в момент максимума тока. По достижении некоторой эквивалентной длины заземлителя его импульсное сопротивление уменьшается незначительно.

3. Предложен приближенный критерий оценки эквивалентной длины заземлителя (зоны стекания тока с заземлителя) в импульсном режиме, который учитывает параметры импульса тока молнии и свойства земли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимович, Д. А. Метод расчета электромагнитных характеристик вертикальных стержневых заземлителей при стекании импульсных токов молнии / Д. А. Герасимович, Е. А. Дерюгина // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2011. – № 6. – С. 12–20.

2. Кадомская, К. П. Моделирование волны тока молнии при расчетах грозоупорности электрических сетей / К. П. Кадомская, А. А. Рейхердт // Электричество. – 2006. – № 11. – С. 17–23.

3. Protection against lightning. Part 1: General principles: IEC 62305-1. – Ed. 1. – 2006. – 128 p.

4. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций: утв. М-вом энергетики Рос. Федерации 30.06.03. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 57 с.

5. Heidler, F. Calculation of lightning current parameters / F. Heidler, J. M. Cvetić, B. V. Stanić // IEEE Trans. Power Del. – 1999. – Vol. 14, № 2. – P. 399–404.

6. Poljak, D. Wire antenna model for transient analysis of simple grounding systems, part I: the vertical grounding electrode / D. Poljak, V. Doric // Progress in Electromagnetics Research. – 2006. – Vol. PIER 64. – P. 149–166.

7. Герасимович, Д. А. Математическое моделирование электромагнитных характеристик уединенных бесконечно длинных стержневых заземлителей при стекании переменного тока промышленной частоты / Д. А. Герасимович, Е. А. Дерюгина // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2010. – № 4. – С. 5–13.

8. Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений: РД 153–34.3–35.125–99. – Введ. 12.07.1999. – СПб.: Изд-во ПЭИПК, 1999. – 227 с.

9. Базелян, Э. М. Особенности работы заземлителей молниеотводов в грунтах низкой проводимости / Э. М. Базелян, М. И. Чичинский // Электрические станции. – 2005. – № 8. – С. 75–82.

10. Экспериментальные исследования заземлителей молниезащиты при воздействии импульсных токов / Р. К. Борисов [и др.] // Электро. – 2004. – № 1. – С. 13–16.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 02.12.2011