

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТОКОВОГО ИМПУЛЬСА МОЛНИИ С ПОМОЩЬЮ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ МАГНИТОКУМУЛЯТИВНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

© 2011 г. Ю. В. Вилков, А. С. Кравченко, В. Д. Селемир, В. А. Терёхин

*РФЯЦ “ВНИИ экспериментальной физики”*

*Россия, 607188, Саров Нижегородской обл., ул. Мира, 37*

Поступила в редакцию 29.10.2010 г.

Приведены результаты испытаний источников энергии на основе магнитокумулятивных генераторов при моделировании воздействия токового импульса молнии на типовую систему заземления. Предложены численная модель работы таких источников энергии, а также модели импульсного сопротивления стержневого заземлителя, удовлетворительно согласующиеся с экспериментальными результатами. В проведенных экспериментах амплитуда токового импульса на стержневом заземлителе достигала 90 кА.

### ВВЕДЕНИЕ

Магнитокумулятивные генераторы (м.к.г.), появившиеся в середине прошлого века [1, 2], в настоящее время широко используются при проведении научных исследований в физике высоких плотностей энергии. Результаты исследований этих генераторов и источников сверхмощных импульсов энергии, созданных на их основе, представлены в материалах тринадцати Международных конференций по сверхсильным магнитным полям и родственным экспериментам (MEGAGAUSS).

В магнитокумулятивных генераторах химическая энергия мощных взрывчатых веществ эффективно преобразуется в энергию магнитного поля, а реализуемая электрическая мощность сравнима с механической мощностью взрывчатого вещества. Удельная электрическая мощность современных м.к.г. достигает 10 ГВт/кг [3, 4], максимальная мощность превышает 10 ТВт, что сравнимо с электрической мощностью, выделяемой на системах заземления наиболее энергоемкими рядами молнии.

Высокая удельная мощность магнитокумулятивных генераторов позволяет создавать на их основе транспортабельные источники энергии для проведения испытаний на грозобезопасность и грозозащищенность крупногабаритных промышленных и энергетических объектов в местах их расположения и функционирования.

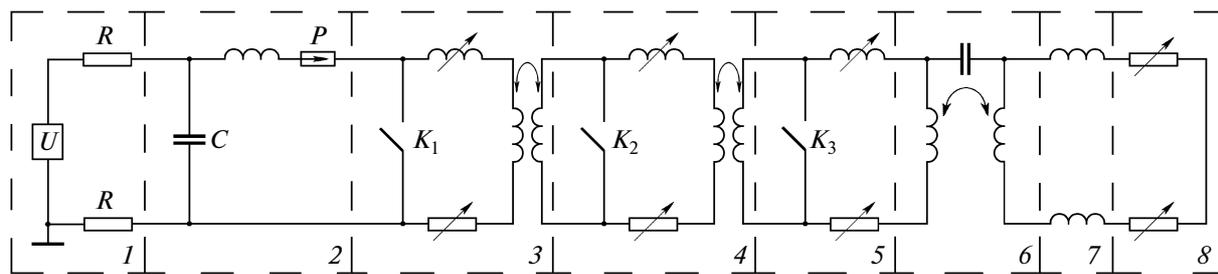
Источники энергии на основе м.к.г. являются эффективным инструментом для исследования защитных свойств систем заземления. С их помощью в системах заземления могут быть созданы импульсы тока с параметрами, превышающими параметры 98% молниевых разрядов.

Разработанный в РФЯЦ–ВНИИЭФ имитатор мощного разряда молнии на основе каскадного генератора ВМГ-320 [5] позволил провести серию экспериментов по исследованию воздействия токового импульса на стержневой заземлитель в грунте с удельным сопротивлением 100–200 Ом · м.

### ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ НА СТЕРЖНЕВОМ ЗАЕМЛИТЕЛЕ ТОКОВОГО ИМПУЛЬСА МОЛНИИ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ПОЛЯРНОСТИ

Импульс тока молнии положительной полярности вызван нейтрализацией положительного заряда облака. Это, как правило, единичный импульс, амплитуда которого может достигать 200 кА, а длительность на полувысоте – 500 мкс. Длительность фронта токового импульса разряда молнии положительной полярности составляет десятки микросекунд [6]. Такие разряды наиболее разрушительны по своим термическому и механическому воздействиям.

Для воспроизведения на системе заземления токового импульса молнии положительной полярности наиболее подходящим в настоящее время является генератор ВМГ-320. Эффективное время нарастания тока в этом генераторе составляет 50–70 мкс, а максимальная электрическая мощность достигает 300 ГВт. Электрическая схема источника энергии на основе каскадного генератора ВМГ-320 приведена на рис. 1. Работа такого источника энергии подробно описана в [7].



**Рис. 1.** Принципиальная схема устройства для моделирования токовых импульсов молнии на системе заземления. 1 – высоковольтный источник напряжения; 2 – конденсаторная батарея; 3–5 – каскадный взрывомагнитный генератор ВМГ-320 (3 – КМКГ-80, 4 – КМКГ-160, 5 – СМКГ-320); 6 – трансформаторный узел; 7 – линия передачи энергии от источника к системе заземления; 8 – система заземления.

Зависимость активного сопротивления стержневого заземлителя от величины импульса тока взята из [8]:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l + \sqrt{l^2 + r^2}}{r},$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление грунта;  $l$  – длина стержневого заземлителя в грунте;  $r$  – эффективная величина радиуса заземлителя как функция токового импульса  $I(t)$ .

Эффективный радиус заземлителя определяется критической величиной напряженности электрического поля в грунте  $E_k$ , при которой происходит искровой пробой:

$$r = a \left( \sqrt[3]{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{1}{27} \left(\frac{I}{a}\right)^6}} + \sqrt[3]{\frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{1}{27} \left(\frac{I}{a}\right)^6}} \right),$$

где  $a = \left(\frac{\rho I}{2\pi N}\right)^{3/2}$

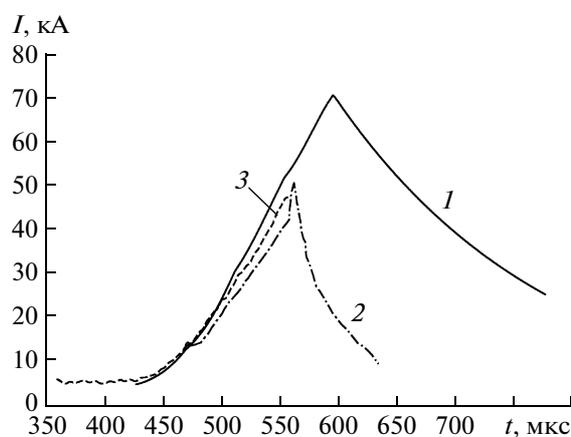
В работе [8] предполагается, что  $E_k \sqrt{r}$ , В · м<sup>-0.5</sup> =  $N \approx 1.78 \cdot 10^5$ .

Исследуемый стержневой заземлитель представлял собой металлическую трубу Ø50 мм, заглубленную в грунт на 2.25 м. Во вспомогательной системе заземления, расположенной на расстоянии 50 м, число заземлителей варьировалось в диапазоне от 10 до 20. Исследуемая почва – болотистая лесная равнина с удельным сопротивлением 100–200 Ом · м.

Получение надежных экспериментальных данных по измерению вольт-амперных характеристик стержневого заземлителя потребовало разработки нескольких вариантов конструкции высоковольтного трансформаторного узла, обеспечивающего высокие параметры импульса тока и напряжения на исследуемом стержневом заземлителе. При использовании в источнике энергии на основе ВМГ-320 трансформаторного узла из кабеля КВИ-300 [9] на

стержневом заземлителе был получен токовый импульс амплитудой 50 кА. На рис. 2 приведены временные зависимости импульса тока, полученные в эксперименте датчиками с разными частотными характеристиками, и расчетная кривая [10]. Резкий спад на экспериментальной кривой тока и ее существенное отличие от расчетной вызваны электрическим пробоем между обмотками трансформаторного узла (рис. 3). На рис. 4 приведены расчетная и экспериментальная временные зависимости активного сопротивления стержневого заземлителя.

Несмотря на преждевременный пробой (за 40 мкс до конца работы генератора), временной ход импульса тока до максимума и изменение активного сопротивления стержневого заземлителя удовлетворительно описываются используемой в расчетах зависимостью. К моменту времени, когда сила тока достигла своего максимума – 50 кА, активное сопротивление стержневого заземлителя уменьшилось с 75 до 8 Ом, т.е. более чем в 9 раз.



**Рис. 2.** Временная зависимость тока в системе заземления (1-й эксперимент): 1 – расчет; 2, 3 – эксперимент с разными датчиками.

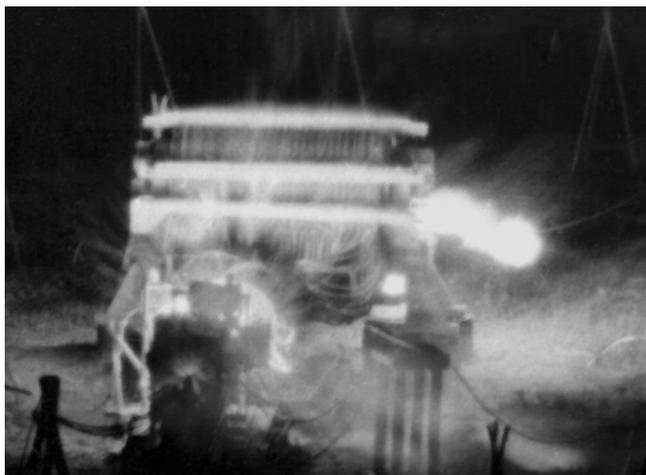


Рис. 3. Трансформаторный узел в момент пробоя между его обмотками.

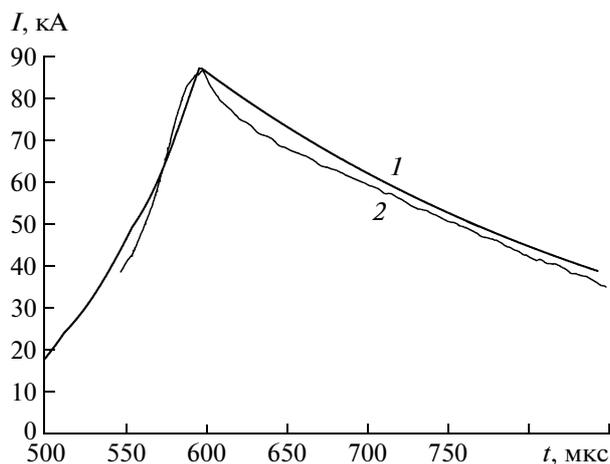


Рис. 5. Временная зависимость тока в системе заземления (2-й эксперимент): 1 – расчет; 2 – эксперимент.

Во втором эксперименте электрическая прочность трансформаторного узла была увеличена за счет использования во вторичной высоковольтной обмотке кабеля КВИ-500 [9]. Сравнение временного хода импульса тока в стержневом заземлителе с расчетным представлено на рис. 5. Амплитуда импульса тока, полученного в эксперименте, составила 87 кА, а длительность на полувывоте – 270 мкс. Расчетная величина электрического потенциала на стержневом заземлителе составила 0,5 МВ, а активное сопротивление заземлителя – 5,5 Ом.

В третьем эксперименте кроме вольт-амперной характеристики стержневого заземлителя регистрировалось образование и развитие поверхностных искровых каналов в его окрестности, а

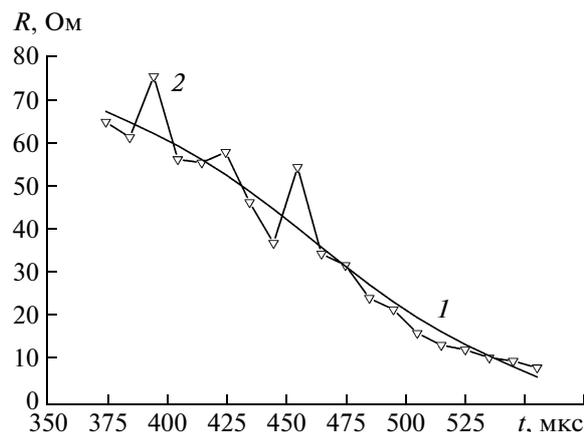


Рис. 4. Временная зависимость активного сопротивления стержневого заземлителя: 1 – расчет; 2 – эксперимент.

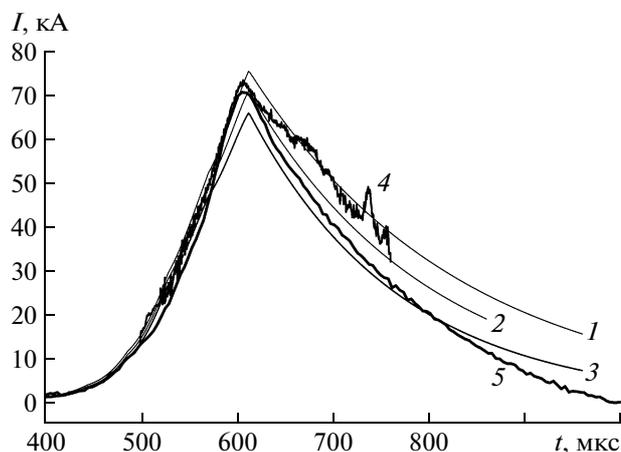
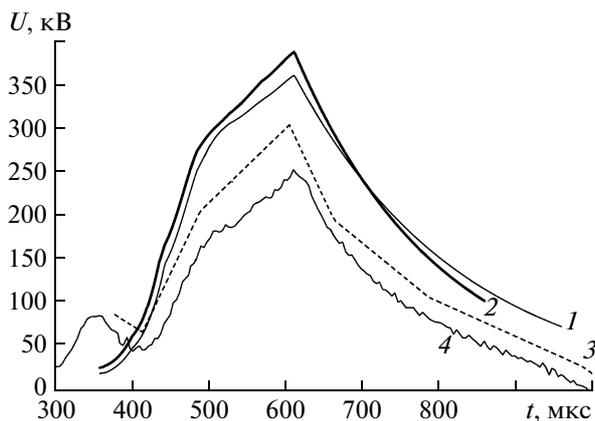


Рис. 6. Временная зависимость тока в системе заземления (3-й эксперимент): 1, 2, 3 – расчет при удельном сопротивлении грунта  $\rho$  соответственно 100, 140 и 200 Ом · м; 4, 5 – эксперимент с разными датчиками.

также распределение электрических потенциалов на радиусах 10 и 25 м от него. Сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей импульса тока в стержневом заземлителе в этом эксперименте представлено на рис. 6. Три расчетные кривые соответствуют различным значениям удельного сопротивления грунта (100, 140 и 200 Ом · м). При изменении удельного сопротивления грунта в 2 раза расчетные амплитуды импульса тока незначительно отличаются друг от друга и близки к зарегистрированной в эксперименте. Длительность импульса тока при этом отличается примерно на 20%.

На рис. 7 приведены импульсы электрических потенциалов на стержневом заземлителе, полу-



**Рис. 7.** Временная зависимость электрических потенциалов на стержневом заземлителе: 1, 2 — расчет при удельном сопротивлении грунта  $\rho$  соответственно 100 и 140 Ом · м; 3, 4 — эксперимент с разными датчиками.

ченные в эксперименте с двух датчиков. Там же приведены расчетные зависимости потенциала стержневого заземлителя при различных значениях удельного сопротивления грунта и при условии равномерного распределения тока в окрестности заземлителя. Величина активного сопротивления заземлителя на момент максимума импульса тока (70 кА) лежит в диапазоне 4–5 Ом.

Интегральная картина свечения источника энергии на основе каскадного генератора ВМГ-320 и искровых каналов в окрестности стержневого заземлителя, полученная в ночное время фотокамерой с открытым затвором, приведена на рис. 8.

Фрагмент свечения искровых каналов вокруг заземлителя показан на рис. 9.

Из картины, приведенной на рис. 8, видно, что развитие искровых каналов происходит не в сторону вспомогательной системы заземления, как ожидалось, а под углом примерно  $80^\circ$  к этому направлению. Максимальная длина мощных искровых каналов, как видно из рис. 9, достигает 30 м.

Обнаруженная асимметрия в распределении искровых каналов, а также их большая длина объясняют существенное отличие экспериментальных и расчетных величин амплитуды электрического потенциала стержневого заземлителя. При таком неоднородном распределении импульса тока в грунте и по искровым каналам величина активного сопротивления заземлителя не поддается расчету с требуемой точностью.

#### ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ИМПУЛЬСА ТОКА МОЛНИИ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ПОЛЯРНОСТИ

Скорость нарастания тока в разряде молнии отрицательной полярности примерно на порядок выше, чем в разряде молнии положительной полярности. Поэтому амплитуда индуцированного напряжения и связанные с ним нарушения в электрических цепях более опасны при воздействии импульсов тока молнии отрицательной полярности. К тому же число таких разрядов составляет около 90% от всех молниевых разрядов, поэтому для подтверждения надежности систем молниезащиты необходимо создание энергоемких источников, обеспечивающих высокую (до



**Рис. 8.** Интегральная картина свечения источника энергии на основе каскадного генератора ВМГ-320 и искровых каналов в окрестности стержневого заземлителя.



Рис. 9. Свечение искровых каналов в окрестности стержневого заземлителя.

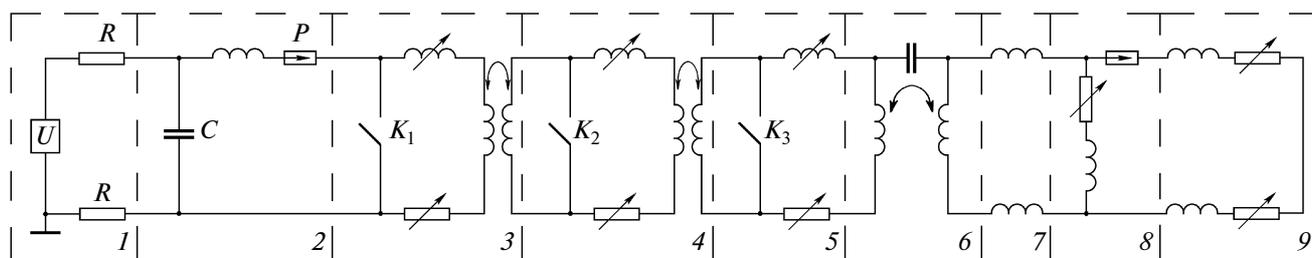


Рис. 10. Принципиальная схема устройства для формирования импульса тока с уменьшенной длительностью фронта. 1 – высоковольтный источник напряжения; 2 – конденсаторная батарея; 3–5 – каскадный взрывомагнитный генератор ВМГ-320 (3 – КМКГ-80, 4 – КМКГ-160, 5 – СМКГ-320); 6 – трансформаторный узел; 7 – линия передачи энергии от источника к системе заземления; 8 – узел разрыва токового контура; 9 – система заземления.

100 кА/мкс) скорость нарастания токового импульса.

Время нарастания тока в существующих и проектируемых магнитокумулятивных генераторах, как правило, больше 10 мкс, следовательно, для формирования на системе заземления токовых импульсов с микросекундным временем нарастания необходимо использование дополнительных формирующих и коммутирующих устройств.

Существенное сокращение фронта импульса тока на системе заземления возможно с помощью разрыва токового контура электрически взрывающимися проводниками (э.в.п.).

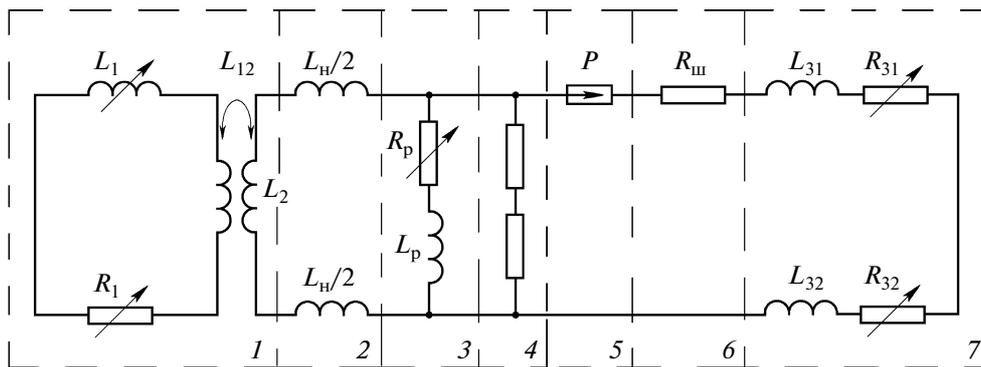
При воспроизведении токового импульса молнии положительной полярности с помощью каскадного генератора ВМГ-320 время нарастания тока составляет примерно 70 мкс. Для сокращения длительности фронта импульса тока система заземления подсоединяется параллельно узлу раз-

рыва с помощью высоковольтного газонаполненного разрядника.

Электрическая схема источника энергии на основе каскадного генератора ВМГ-320 для формирования импульса тока с уменьшенной длительностью фронта приведена на рис. 10. Величина активного сопротивления узла разрыва из электрически взрывающихся медных проводников в полиэтиленовой изоляции достаточно хорошо описывается следующей зависимостью [11]:

$$R_p(t) = R_p(0) + K \frac{R_p(0)}{m} \int_0^t I_p^2(t) R_p(t) dt,$$

где  $R_p(t)$  – сопротивление узла разрыва;  $K = 9.6 \times 10^{-3}$  г/Дж, если отношение  $R_p(t)/R_p(0) \leq 20$  и  $K = 48 \cdot 10^{-3}$  г/Дж, если отношение  $20 < R_p(t)/R_p(0) \leq 200$ ;  $R_p = \text{const}$ , если отношение  $R_p(t)/R_p(0) > 200$ ;  $m$  – масса меди в узле разрыва;  $I_p(t)$  – ток в узле разрыва.



**Рис. 11.** Эквивалентная электрическая схема источника энергии на основе генератора ВМГ-160. 1 – ВМГ-160 с трансформаторным узлом; 2 – индуктивный накопитель; 3 – узел разрыва из медных проводников в полиэтиленовой изоляции; 4 – делитель напряжения; 5 – высоковольтный обстрояющий разрядник; 6 – шунт; 7 – система заземления.

При формировании импульса тока с длительностью фронта микросекундного диапазона необходимо учитывать конечную скорость распространения искрового канала как в грунте, так и по его поверхности [12, 13]. Оценка скорости продвижения искрового канала приведена в [12, 13]:

$$v = k[I(t)]^{2/3},$$

где  $k = 8600$  при  $I(t)$  от 1 до 23 А и  $k = 26500$  при  $I(t)$  от 85 до 1100 А.

Таким образом, изменение эффективного радиуса искрообразования стержневого заземлителя на фронте токового импульса можно записать в следующем виде:

$$dr/dt = k[I(t)/n]^{2/3},$$

где  $I(t)$  – ток в заземлителе,  $n$  – число искровых каналов.

В численных расчетах число искровых каналов в окрестности стержневого заземлителя принималось равным 100, а увеличение коэффициента  $k$  в 3 раза происходило при  $I(t) = 23$  А.

В работе [14] приведены результаты численных расчетов источника энергии на основе каскадного генератора ВМГ-320, которыми была показана возможность формирования на стержневом заземлителе длиной 1 м импульса тока амплитудой более 200 кА. Эти результаты были получены при решении системы уравнений, описывающих электрическую схему, представленную на рис. 10, с использованием приведенных зависимостей для активных сопротивлений узла разрыва и стержневого заземлителя.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МОДЕЛИ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СТЕРЖНЕВОГО ЗАЕМЛИТЕЛЯ

Рассмотренная модель равномерного ионизирующего расширения исходного радиуса стерж-

невого заземлителя весьма условна, во всяком случае, не подтверждена экспериментально. В то же время при воспроизведении токового импульса молнии положительной полярности нами получены надежные данные о возникновении и развитии вдоль поверхности земли скользящих разрядов длиной до 30 м, для которых величина активного сопротивления обратно пропорциональна их длине.

Большое количество искровых каналов в грунте и по его поверхности и значительная асимметрия в их распределении не позволяют адекватно описать импеданс стержневого заземлителя при воздействии импульса тока молнии отрицательной полярности. Для получения новых экспериментальных данных проведено два эксперимента с источником энергии на основе магнитокумулятивного генератора ВМГ-160, подробно описанного в [11].

Электрическая схема источника энергии на основе ВМГ-160 приведена на рис. 11.

Магнитокумулятивный генератор с уменьшающимися величинами  $L_1$  и  $R_1$  генерирует импульс тока амплитудой до 30 МА на нагрузке с индуктивностью 8 нГн. На выходе генератора имеется трансформаторный узел с входной индуктивностью 33 нГн. Индуктивность высоковольтной обмотки трансформаторного узла составляет 28 мкГн, взаимная индукция между обмотками – 0.8 мкГн.

В качестве накопительной индуктивности использовалась двухпроводная передающая линия из высоковольтного провода длиной 15 м и индуктивностью 15 мкГн. Узел разрыва изготовлен из 28 медных проводников  $\varnothing 0.35$  мм и длиной 12 м. Каждый проводник помещен в полиэтиленовую оболочку с внутренним диаметром 0.72 мм и наружным диаметром 4.4 мм. Масса меди в узле раз-

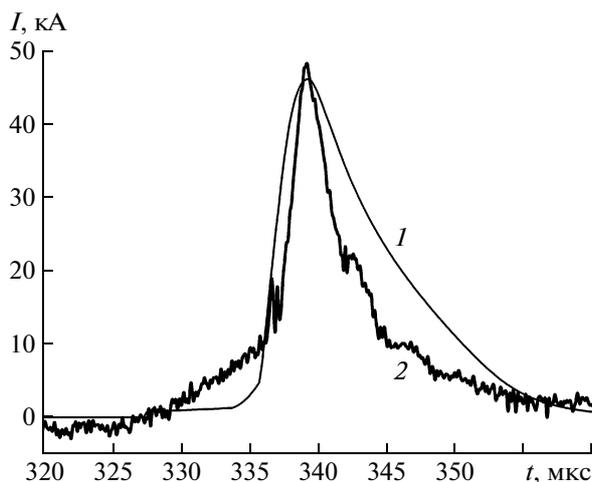


Рис. 12. Временная зависимость тока в системе заземления (4-й эксперимент): 1 — расчет; 2 — эксперимент.

рыва 288 г, начальное сопротивление 79 мОм, индуктивность 7 мкГн.

В качестве разрядника обострителя использовался двухэлектродный газонаполненный неуправляемый разрядник с полусферическими электродами  $\varnothing 20$  мм. При величине зазора 20 мм и заполнении газом  $\text{SF}_6$  под давлением 1 атм пробой разрядника происходит при напряжении около 150 кВ.

Для уменьшения индуктивности системы заземления исследуемый стержневой заземлитель длиной 1 м размещался в центре окружности  $\varnothing 100$  м, по которой равномерно располагалась вспомогательная система заземлителей из 20 металлических стержней. Обратный токопровод из 20 изолированных проводов из кабеля РК-50-11-11 соединял узел разрыва со вспомогательной системой заземления. В центре окружности один конец узла разрыва и 20 проводов обратного токопровода были подняты относительно исследуемого стержневого заземлителя на высоту 12 м с помощью деревянной диэлектрической мачты.

Зарегистрированный в эксперименте импульс тока в стержневом заземлителе представлен на рис. 12. На этом же рисунке приведена расчетная зависимость импульса тока, полученная с учетом конечной скорости распространения искрового разряда в грунте. На рис. 13 представлено сравнение расчетного и экспериментального импульсов напряжения на узле разрыва. Амплитуда импульса тока, сформированного в стержневом заземлителе длиной 1 м, составила 48 кА, а импульса напряжения на системе заземления — 1.1 МВ. Близкое совпадение амплитудных и временных характеристик импульсов тока в заземлителе и напряжения на системе заземления подтверждает справедли-

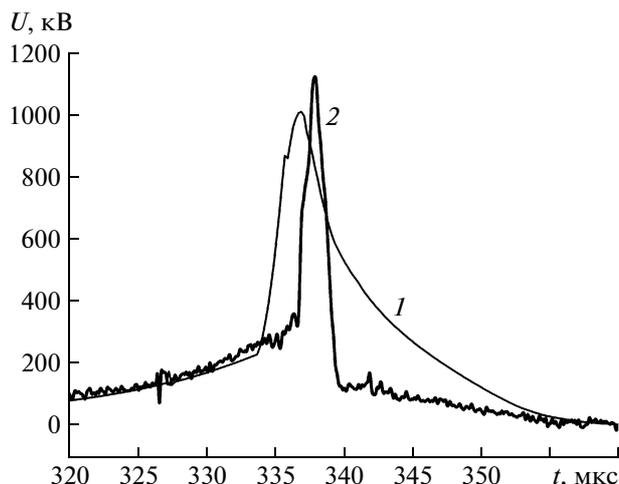


Рис. 13. Временная зависимость напряжения на узле разрыва: 1 — расчет; 2 — эксперимент.

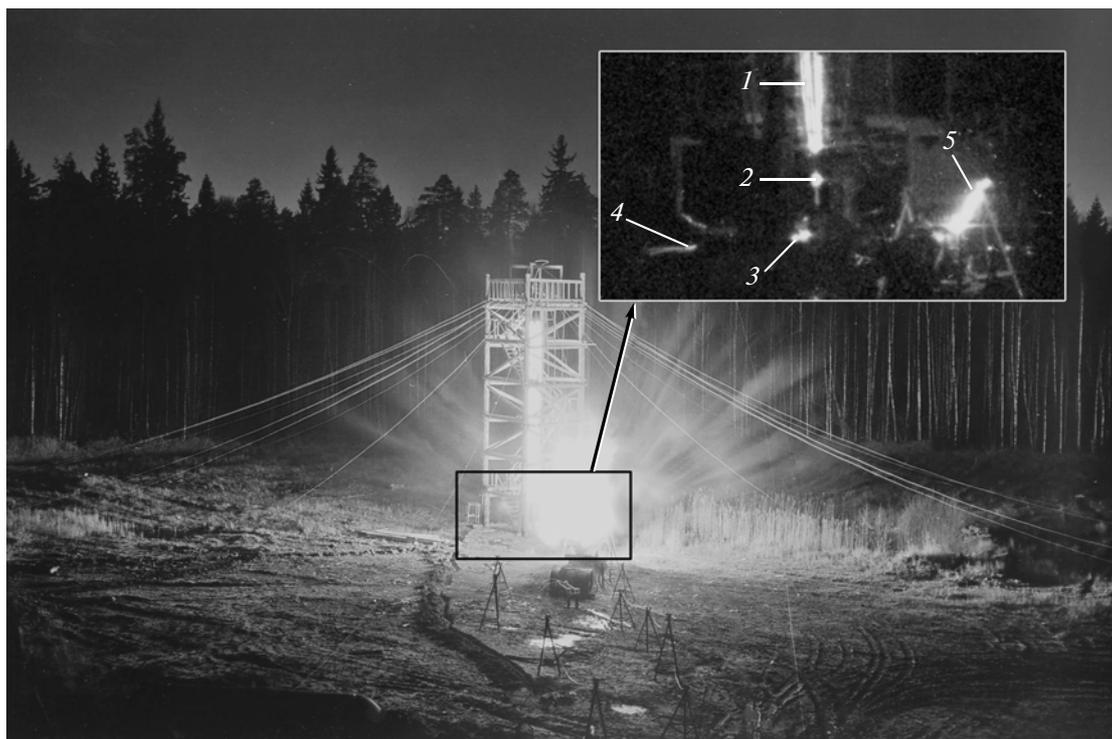
вость предложенной модели активного сопротивления стержневого заземлителя при токе до 50 кА и длине искровых каналов по поверхности грунта 3 м (рис. 14).

Небольшое отличие по длительности расчетного импульса тока от полученного в эксперименте объясняется возникновением электрического пробоя на выходе трансформаторного узла генератора ВМГ-160 (рис. 14).

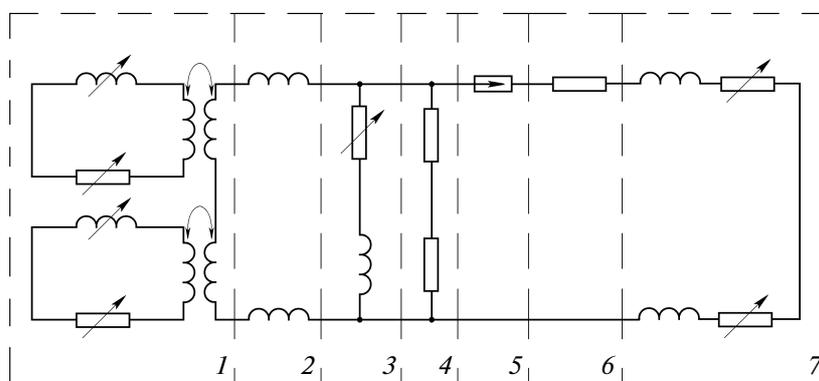
Для увеличения амплитуды импульса тока в стержневом заземлителе использовался источник энергии на основе двух генераторов ВМГ-160. Эквивалентная электрическая схема источника энергии приведена на рис. 15.

К вторичным обмоткам трансформаторных узлов генераторов ВМГ-160, соединенным последовательно друг с другом, с помощью линии передачи энергии длиной 25 м (индуктивность — 32 мкГн) подключался узел разрыва из э.в.п. Узел разрыва токового контура был изготовлен из 13 медных проводников  $\varnothing 0.6$  мм и длиной 11 м. Каждый медный проводник помещался в полиэтиленовую оболочку с внутренним диаметром 1.1 мм и внешним диаметром 7 мм. Общее сечение электрически взрывающихся проводников  $3.68 \text{ мм}^2$ . Масса меди в узле разрыва равна 360 г, величина начального сопротивления — 53 мОм. Узел разрыва располагался вертикально над стержневым заземлителем. Верхний конец узла разрыва с помощью 20 высоковольтных проводов соединялся со вспомогательной системой заземления. Индуктивность узла разрыва оценивается в 7 мкГн.

Измеренное на постоянном токе активное сопротивление стержневого заземлителя длиной 1 м равно 175 Ом, а активное сопротивление вспомогательной системы заземления — 4.5 Ом.



**Рис. 14.** Интегральная картина свечения источника энергии на основе генератора ВМГ-160. 1 – э.в.п.; 2 – разрядник; 3 – точка ввода тока в стержневой заземлитель; 4 – искровой канал; 5 – свечение выхода трансформатора, вызванное электрическим пробоем.



**Рис. 15.** Эквивалентная электрическая схема источника энергии на основе двух генераторов ВМГ-160. 1 – два генератора ВМГ-160 с трансформаторными узлами; 2 – индуктивный накопитель; 3 – узел разрыва из медных проводников в полиэтиленовой изоляции; 4 – делитель напряжения; 5 – высоковольтный обостряющий разрядник; 6 – шунт; 7 – система заземления.

Индуктивность всей системы заземления оценивается в 7 мкГн.

В эксперименте с источником энергии на основе двух генераторов ВМГ-160 на стержневом заземлителе был получен импульс тока амплитудой 88 кА. Сравнение характера изменения расчетного импульса тока с полученным в эксперименте показано на рис. 16. В расчетах учтено, что при напряжении на выходе источника энергии

500 кВ происходит пробой трансформаторных узлов генераторов ВМГ-160 и ток затухает в контуре с индуктивностью 39 мкГн.

В этом эксперименте также зарегистрировано возникновение и развитие искровых каналов по поверхности грунта. Длина искровых каналов достигала 8 м, а скорость их движения превысила 2 м/мкс. Фотография искровых каналов в максимуме тока через заземлитель представлена на рис. 17. Мак-

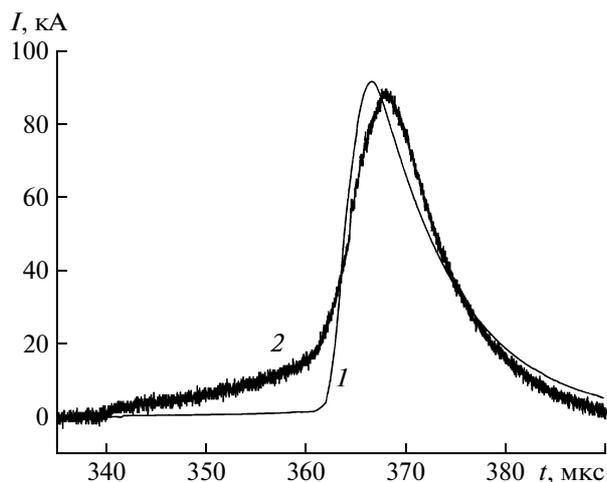


Рис. 16. Временная зависимость тока в системе заземления (5-й эксперимент): 1 — расчет; 2 — эксперимент.

симальное удлинение искровых каналов с точностью до 2 мкс совпадает с максимумом тока.

Несмотря на относительно большую длину искровых каналов и значительную асимметрию в их распространении, хорошее совпадение расчетного импульса тока с экспериментальным подтверждает удовлетворительную работоспособность модели активного сопротивления стержневого заземлителя при воспроизведении импульса тока молнии отрицательной полярности с помощью источника энергии на основе магнитокумулятивного генератора.

Результаты экспериментов по воспроизведению на типовом заземлителе импульсов тока с помощью источника энергии на основе м.к.г. приведены в таблице.

№ эксперимента	$I$ , кА	$U$ , кВ	$\tau$ , мкс	$t$ , мкс	$l_{\max}$ , м	$k$	$P_{\max}$ , ГВт	$dI/dt$ , кА/мкс	$\int I^2 dt$
1	50	400	70	75	3	0.11	20	0.4	$1.4 \cdot 10^5$
2	90	500*	70	220	**	0.073	45	1.4	$1.2 \cdot 10^6$
3	74	300	70	200	30	0.08	22	1.2	$6 \cdot 10^5$
4	48	1100	2	5	3–4	0.13	50	20	$7.5 \cdot 10^3$
5	88	1000*	4	10	8	0.06	88	24	$6 \cdot 10^4$

Примечание.  $I$  — амплитуда токового импульса в стержневом заземлителе;  $U$  — амплитуда электрического потенциала на системе заземления;  $\tau$  — длительность фронта токового импульса;  $t$  — длительность импульса тока на полувысоте;  $l_{\max}$  — максимальная длина искровых каналов;  $k$  — коэффициент уменьшения активного сопротивления стержневого заземлителя;  $P_{\max}$  — максимальная мощность на стержневом заземлителе;  $dI/dt$  — максимальное значение производной тока в стержневом заземлителе; \* — расчетное значение; \*\* — возникновение искровых каналов на поверхности грунта не наблюдалось.

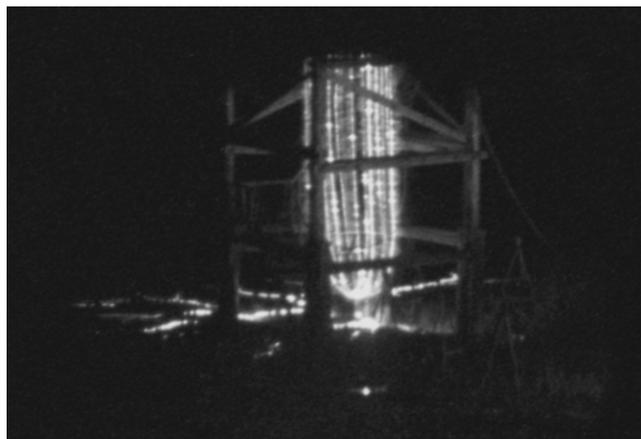


Рис. 17. Вид искровых каналов при максимуме тока через заземлитель.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Серия экспериментов с источниками энергии на основе мощных магнитокумулятивных генераторов подтвердила возможность создания транспортабельных имитаторов молниевых разрядов для проведения испытаний на грозобезопасность и грозозащищенность крупногабаритных промышленных и энергетических объектов в местах их расположения и функционирования.

В экспериментах по воспроизведению на стержневом заземлителе токового импульса амплитудой 70–90 кА впервые:

- зафиксировано возникновение и развитие вдоль поверхности грунта мощных искровых каналов длиной до 30 м;

- обнаружена значительная асимметрия в распределении электрических потенциалов вокруг стержневого заземлителя, коррелирующая с асимметрией мощных искровых каналов;

— в грунте с удельным сопротивлением  $200 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  зарегистрировано уменьшение величины активного сопротивления стержневого заземлителя более чем в 12 раз.

Две модели активного сопротивления стержневого заземлителя при скорости нарастания тока меньше  $10 \text{ кА/мкс}$  и больше  $20 \text{ кА/мкс}$  удовлетворительно описывают его вольт-амперную характеристику.

Результаты этих работ были доложены на конференциях MEGAGAUSS IX–XII.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сахаров А.Д., Людаев Р.З., Смирнов Е.Н. и др. // ДАН СССР. 1965. Т. 196. № 1. С. 65.
2. Fowler C.M., Garn W.B., Caird R.S. // J. Appl. Phys. 1960. V. 31. № 3. P. 558.
3. Селемир В.Д., Демидов В.А., Пляшкевич Л.Н. и др. // Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применения. Саров: ВНИИЭФ, 1997. Т. 1. С. 248.
4. Людаев Р.З., Кравченко А.С., Юрыжев А.С. и др. // Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применения. Саров: ВНИИЭФ, 1997. Т. 1. С. 310.
5. Pavlovskii A.I., Lyudaev R.Z., Sel'chenkov L.I. et al. // Megagauss Physics and Technology. N.Y. and London: Plenum Press, 1980. P. 585–593.
6. Молниезащита зданий и сооружений: состояние нормативных документов РФ и обзор документов Международной электротехнической комиссии // Электричество. 2002. № 6. С. 47.
7. Кравченко А.С., Вилков Ю.В. // ПТЭ. 2006. № 4. С. 79.
8. Анненков В.З. // Электричество. 1998. № 6. С. 18.
9. Высоковольтные кабели и провода. Ч. 1. Аналитическая информация. М.: Информэлектро, 1990.
10. Вилков Ю.В., Золотов В.А., Кравченко А.С. и др. // Электричество. 2004. № 8. С. 2.
11. Кравченко А.С., Борискин А.С., Вилков Ю.В. и др. // ПТЭ. 2000. № 2. С. 70.
12. Базелян Э.М. // Электричество. 1991. № 11. С. 27.
13. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001.
14. Вилков Ю.В., Кравченко А.С., Саиткулов М.М. и др. // ПТЭ. 2007. № 3. С. 64.