

СНИЖЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ЗА СЧЕТ РАЗВИТИЯ ПЛАЗМЕННЫХ КАНАЛОВ ВДОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ ГРУНТА

© 2022 г. Э. М. Базелян*

Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского, Москва, Россия

**e-mail: edwardbazelyan@mail.ru*

Поступила в редакцию 09.08.2022 г.

После доработки 06.09.2022 г.

Принята к публикации 10.09.2022 г.

Развита гипотеза, что снижение сопротивления заземления заземляющих электродов при растекании больших импульсных токов происходит вследствие развития скользящих плазменных каналов вдоль поверхности грунта в атмосферном воздухе. Электрическая прочность грунта не имеет при этом практического значения, значимым является только его удельное сопротивление, определяющее ток утечки через боковую поверхность канала, контактирующей с грунтом, который обеспечивает поставку энергии для разогрева плазмы. Развита расчетная компьютерная модель скользящих разрядов, оценено их количественное влияние на динамику изменения во времени входного сопротивления заземляющего электрода при различных токах молнии.

Ключевые слова: сопротивление заземления, входное сопротивление, стример, лидер, скользящий канал, молния, электрическое поле, компьютерное моделирование, деформация импульса перенапряжения

DOI: 10.31857/S0367292122601126

ВВЕДЕНИЕ

Сопротивление заземления – один из основных параметров, определяющих амплитуду и форму импульса грозового перенапряжения, уровень напряжений шага и прикосновения, опасных для человека и животных, долю тока молнии, ответвляющегося через грунт в подземные коммуникации, а также характер электромагнитных наводок во внутренних цепях объектов цифровой техники [1]. Величина входного сопротивления любого заземляющего устройства меняется во времени и существенно зависит от величины растекающегося с него тока. Причиной увеличения входного сопротивления в импульсном режиме, как известно, является индуктивность заземляющего электрода, задерживающего проникновение тока в сколько-нибудь протяженный проводник, и конечная скорость распространения в грунте электромагнитной волны. Последняя ограничивает объем грунта, в котором активно растекается ток молнии.

Сопротивление заземления в импульсном режиме может снижаться за счет емкостных утечек тока, реально значимых в грунтах низкой проводимости при высокой крутизне фронта тока молнии. Основной причиной практически значимого снижения сопротивления заземления являются ионизационные процессы в грунте [2–4]. Они

наблюдаются при больших токах в заземляющем устройстве, когда электрическое поле достаточно для производства плазмы. Традиционно предполагается, что созданная плазма увеличивает либо длину электрода образовавшимся плазменным каналом, либо его радиус в результате формирования вокруг электрода хорошо проводящего ионизованного чехла.

Экспериментальные и теоретические исследования импульсных характеристик грунта имеют едва ли не вековую историю [5, 6]. В большинстве работ оценивается так называемое импульсное сопротивление заземляющего устройства. Оно принимается равным отношению амплитудных значений напряжения на заземлителе к протекающему через него току. Величина не имеет физического смысла, поскольку указанным амплитудам соответствуют разные моменты времени. Параметр не удается использовать для уточненных расчетов перенапряжений и электромагнитных наводок, обусловленных распространением в земле тока молнии. Для этой цели требуется знать входное сопротивление заземляющего устройства. Динамика его изменения во времени определяет форму импульса напряжения на заземлителе.

Теоретическая оценка динамики входного заземления закономерно привлекает к себе внима-

ние, хотя эту задачу нельзя считать в полной мере определенной. До сих пор нет однозначных представлений о механизме ионизационных процессов в грунте, тем более о величине электрического поля их возбуждающего и поддерживающего развития. В подобных условиях делаются попытки развития обезличенных расчетных моделей, не отражающих каких-либо конкретных представлений о механизме ионизационных процессов в грунте [7, 8]. Исходные расчетные параметры таких моделей подгоняются под результаты лабораторных экспериментов, в ходе которых при различных токах измеряется входное сопротивление испытуемого заземлителя. Принципиально важно, что в большинстве экспериментов используются импульсные токи, амплитуда которых на порядок величины меньше тока молнии [9–13]. Тем не менее, по мнению разработчиков, созданные таким образом расчетные методики считаются пригодными для оценки импульсных характеристик заземляющих устройств при реальном токе молнии.

В этой статье, основанной на результатах полевых измерений условий растекания импульсных токов с амплитудой и временными параметрами тока молнии [14], сделана попытка анализа механизма ионизационных процессов в грунте и их влияния на импульсные характеристики заземляющего устройства, необходимые для расчета опасных воздействий молнии на современные технические объекты.

1. ИОНИЗАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГРУНТЕ

Твердая основа грунта – высокопрочная среда в отношении воздействия электрического поля. Ионизационные процессы происходят не в твердом теле, а в воздушных включениях, что заполняют землю, а также в открытом воздухе на внешней поверхности грунта. Сегодня достаточно детально изучены все основные типы газоразрядных процессов в воздухе – бесстримерная ультракорона, стример и лидер [15]. Зона ионизации короны имеет очень ограниченную протяженность; она существенно меньше радиуса вершины электрода, а внешняя зона заполнена объемным зарядом в виде малоподвижных ионов, которые не в состоянии заметно увеличить проводимость грунта. С рассматриваемых позиций коронный разряд не заслуживает внимания.

Стримерный разряд представляет собой волну ионизации, распространяющуюся на расстояния вплоть до метров за счет локального усиления электрического поля на своей головке. Процесс развития стримера экспериментально успешно воспроизводится в лаборатории и в компьютерных моделях. Тонкий след, который оставляет позади себя волна ионизации в воздухе нельзя

считать высоко проводящим плазменным каналом, поскольку он быстро теряет высокую начальную проводимость из-за электрон-ионной рекомбинации и трехтельного прилипания [16]. Причиной их большой активности является очень слабый разогрев стримера, газовая температура в котором практически не отличается от окружающей. В результате участки канала стримера теряют свою начальную проводимость при нормальных атмосферных условиях уже через 100–200 нс после их рождения [17]. При типичной скорости стримера порядка 10^7 см/с высокая проводимость плазмы в стримере сохраняется за головкой на длине порядка 10 см. Поэтому перекрытие стримером сколько-нибудь длинного воздушного промежутка не ведет к его искровому пробою. Быстрая потеря проводимости не позволяет рассматривать стримеры в качестве основной причины снижения сопротивления заземления в режиме растекания больших импульсных токов. Такое возможно только вследствие развития более энергоемкого процесса, формирующего протяженные горячие плазменные каналы, подобные каналу лидера в атмосферном воздухе.

Экспериментально показано [15], что канал лидера рождается в объеме стебля начальной стримерной вспышки (рис. 1), где собирается ток многочисленных стримерных ветвей. В совокупности он разогревает центральную часть стебля, процесс нагрева интенсифицируется развитием перегревной неустойчивости, локализующей ток в зоне малого радиуса [1]. Последующее развитие лидера осуществляется за счет непрерывного последовательного старта стримеров из его головки. Стартуя с частотой порядка 10^{10} с⁻¹ [15], они поставляют энергию для нагрева созданной плазмы, благодаря чему лидерный канал может практически неограниченно долго сохранять свою изначально высокую проводимость. Непрерывный старт стримеров хорошо различим и на непрерывной фоторазвертке процесса (рис. 2а), и на его статических фотографиях с экспозицией в десятки микросекунд, где канал лидера представляется окруженным следами многочисленных стримеров. Они уже прекратили свое развитие, оставив в промежутке транспортируемый объемный заряд. Снижая радиальное электрическое поле, этот заряд препятствует радиальному расширению канала лидера, благодаря чему повышается плотность энергии, выделяющейся в канале, и его газовая температура.

Представленная картина лидера в воздухе ничем не напоминает ионизованный канал, формирующийся вдоль проводящей поверхности грунта или воды [18]. У его головки нет стримеров, даже самых коротких (рис. 2б). Тем не менее канал продвигается от анода к катоду (или в обратном направлении) и, пересекая промежуток, вызыва-

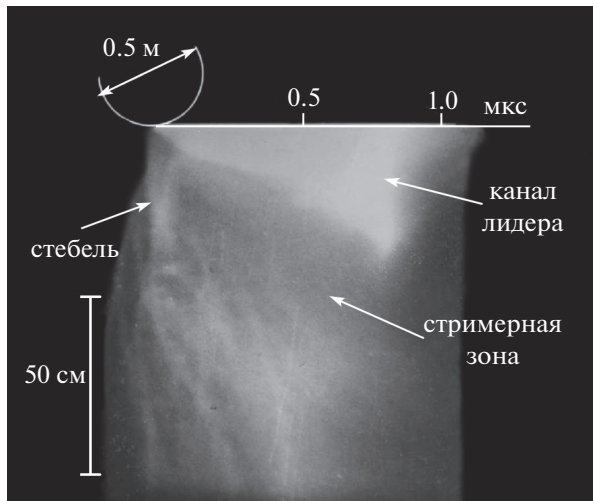


Рис. 1. Непрерывная фоторазвертка старта лидера в воздушном промежутке.

ет мощный импульс тока, характерный для короткого замыкания, демонстрируя тем самым, что во время движения в течение десятков-сотен микросекунд канал сохранял свою высокую проводимость. Такое возможно только при высокой газовой температуре.

Разогрев плазмы в отсутствие стримерной зоны дает основание полагать, что энергия, необходимая для нагрева, поставляется токами проводимости, которые стекают в грунт через контактирующую с ним боковую поверхность плазменного канала [19], а это значит, что темп нагрева и достигнутая газовая температура должны зависеть от величины тока, введенного в заземляющее

устройство, точнее, от доли тока через боковую поверхность растущего плазменного канала.

2. ВЛИЯНИЕ ТОКА В ЗАЗЕМЛИТЕЛЕ НА ИОНИЗАЦИЮ В ГРУНТЕ

По данным, обобщенным СИГРЭ [20], амплитуда тока даже слабой молнии лежит в пределах единиц килоампер, средней — исчисляется десятками килоампер, что же касается тока, реально опасного для линий электропередачи высокого напряжения, с тросовой молниезащитой, то речь должна идти о токах порядка 100 кА. Закономерен вопрос, в какой степени лабораторные эксперименты с источником тока ограниченной мощности и энергоемкости в состоянии воспроизвести динамику изменения во времени входного сопротивления заземляющего устройства. Так, в [7] развита компьютерная модель расчета входного сопротивления заземлителя $R_{вх}(t)$, где в качестве эталонных данных для ее калибровки использованы результаты лабораторных экспериментов при токах в десятки—сотни ампер. В качестве примера один из типичных вариантов такой модели и измерений представлен на рис. 3, где экспериментальные данные отмечены точками, а расчетные сплошной кривой. Предметом исследования был полусферический электрод диаметром 14 см в грунте с удельным сопротивлением $1200 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ при воздействии на него импульса напряжения амплитудой 70 кВ с фронтом около 1 мкс. При таком напряжении максимальный ток не превышал 45 А, а максимальная напряженность электрического поля на поверхности заземленного электрода была близка 1000 кВ/м, что достаточно для возбуждения ионизационных процессов. Выполненные изме-

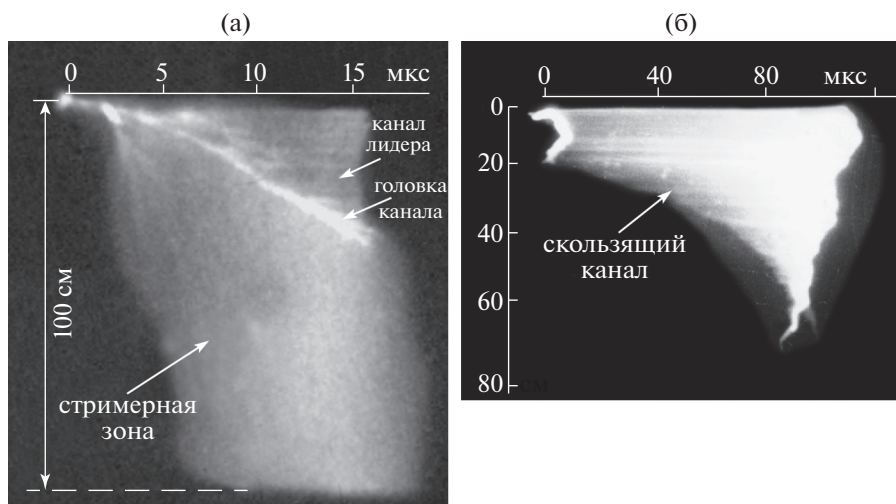


Рис. 2. Непрерывная фоторазвертка лидера в воздушном промежутке (а) и скользящего плазменного канала вдоль проводящей поверхности (б).

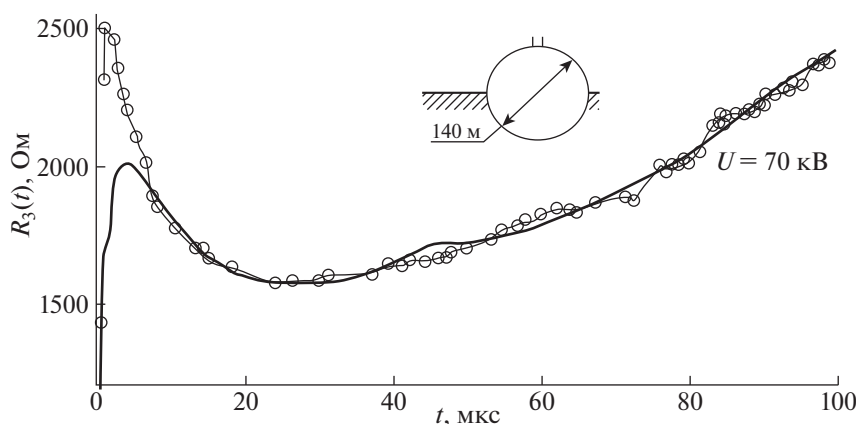


Рис. 3. К оценке методики расчета влияния ионизационных процессов по [7].

рения демонстрируют характерное снижение сопротивления заземления, минимальное значение которого наблюдалось с существенным запаздыванием (~ 25 мкс) по отношению к максимуму приложенного напряжения. Для объяснения полученного результата была высказана гипотеза о запаздывании процесса ионизации, который осуществлялся по релаксационному закону, в данном случае с постоянной времени 12 мкс (подгонка по результатам эксперимента). Значение этого параметра оказалось существенно неоднозначным. В той же работе при увеличении воздействующего напряжения всего до 105 кВ, значение постоянной времени снизилось почти в 5 раз, а при напряжении в 300 кВ упало до 0.5 мкс. Авторы не связывают запаздывание с каким-либо газоразрядным процессом, а потому даже не обсуждают его механизм и возможность аналитической оценки. Тем не менее для подгонки под эксперимент запаздывание вводится и в расчет динамики роста входного сопротивления при снижающемся токе, правда совсем с другими постоянными времени.

Формализованное отношение к оценке динамики роста входного сопротивления при снижающемся токе свойственно и расчетной модели [8], которая основана на балансе энергии в зоне ионизации грунта. Предполагается, что каким-то неизвестным механизмом энергия накапливается там во время ионизации при нарастающем токе, а затем сбрасывается в виде потерь, когда ток убывает. Механизм потерь отождествляется с тем, что свойственен гашению дуги в камере воздушного выключателя. Это позволяет авторам статьи предложить алгоритм оценки динамики роста сопротивления заземления после достижения этим параметром минимального значения.

Во всех расчетных моделях, подобных обсуждаемым, определяющим параметром является среднее критическое электрическое поле в грун-

те, которое принимается равным 100–300 кВ/м. Именно оно задает габариты зоны ионизации, а следовательно, и величину сопротивления заземления в импульсном режиме. Вопрос о механизме газоразрядных процессов остается при этом открытым. Тем самым исключается возможность построения расчетных компьютерных моделей, пригодных для анализа динамики изменения входного сопротивления во времени для заземляющих устройств реального исполнения.

3. РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ С ПЛАЗМЕННЫМИ КАНАЛАМИ ВДОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ ГРУНТА

Существование таких каналов при токах с параметрами, типичными для разряда молнии, надежно наблюдалось в полевых экспериментах (см. [14, 21, 22]). Принципиально важно, что по прямым измерениям среднее продольное электрическое поле по их длине не превышало 10 кВ/м, что в десятки раз меньше величины поля, используемой в моделях ионизованного чехла. Для построения расчетной модели не менее важны следующие выявленные особенности развития скользящих разрядов.

Они формируются в открытом воздухе, а потому их параметры не зависят непосредственно от состава грунта. Зона ионизации, рождающая новый участок канала, целиком располагается в воздухе, причем, на очень коротком участке непосредственно у головки. Величина порогового поля головки определяется не грунтом, а состоянием воздуха в атмосфере. При нормальных условиях она близка к 3×10^6 В/м. Наконец, скорость формирования скользящего канала может быть отождествлена со скоростью лидера в воздухе, которая согласно измерениям в [23] в зависимости

от тока через головку канала $i_{\text{тип}}$ может быть оценена эмпирическим выражением

$$v_c = 1.9 \times 10^{4.0.67} i_{\text{тип}} \text{ [м/с]},$$

где $i_{\text{тип}}$ измеряется в А.

Из практически значимых параметров грунта в модели используется только его удельное сопротивление. Оно определяет ток утечки через поверхность контакта плазменного канала с грунтом, осуществляя тем самым поставку энергии для нагрева созданной плазмы. В грунтах крайне низкой проводимости дополнительным источником тока в канале служит емкостная утечка. Однако, как уже отмечалось, она может не приниматься во внимание по сравнению с резистивной составляющей при удельном сопротивлении грунта до 1000–1500 Ом м и длительности фронта импульса тока молнии порядка 10 мкс. Собственно заземляющее устройство ограниченных размеров может отображаться в расчетной модели лишь своим стационарным сопротивлением заземления, которое необходимо для определения доли тока молнии, ответвляющегося в формирующийся скользкий канал (каналы).

Алгоритм численного решения сводится к определению тока через головку растущего канала с учетом утечек в грунт через проводимость боковой поверхности собственного плазменного канала и всех соседних, если от заземляющегося электрода одновременно стартует их несколько. Предполагается, что все эти каналы одинаковы и располагаются на поверхности грунта с равным угловым шагом. Подробное изложение процедуры счета методом эквивалентных зарядов представлено в [24]. Расчетный алгоритм в этой статье уточнен лишь учетом динамики изменения во времени продольного электрического поля в плазменном канале при росте или снижении протекающего вдоль него тока. Для этой цели вместо усредненного и неизменного во времени значения напряженности продольного поля, принятого в [24] равным 10 кВ/м, вводится значение, равное полю в открытой стационарной дуге, которое согласно [25] при токе i может быть приближенно оценено по эмпирическому выражению

$$E(i) = 3200 + 5200/i \text{ [В/м]},$$

при i в А.

В процессе нагрева поле в канале снижается по релаксационному закону с постоянной времени, которая согласно лабораторным экспериментам [1] может быть принята равной $T_1 = 40$ мкс, при охлаждении по тем же экспериментальным данным рост поля более медленный, с постоянной времени около 200 мкс.

Для тестирования расчетной модели были выбраны результаты полевых измерений [13], выполненные при растекании тока 84 кА в грунте с

Таблица 1. Данные, полученные компьютерным расчетом для заземлителя

Число искровых каналов	4	6	8	10	12
Сопротивление заземления, Ом	10.8	9.9	9.5	9.2	9.1

удельным сопротивлением 100–200 Ом·м. Максимум тока соответствовал времени около 15 мкс; длительность импульса по уровню 0.5 равнялась 35 мкс. В компьютерном расчете импульс тока имитировался выражением

$$i(t) = I_0(e^{-0.057t} - e^{-0.08t}),$$

где время измерялось в мкс.

Неопределенным в исходных данных компьютерного расчета оказывается число скользких каналов, которые одновременно формируются по поверхности грунта от точки ввода тока молнии в заземляющий электрод. Однако, как было установлено, результаты расчета достаточно слабо меняются в зависимости от этого параметра. В сказанном убеждают следующие данные (табл. 1), полученные компьютерным расчетом для заземлителя с стационарным значением сопротивления заземления 25 Ом в грунте удельным сопротивлением 200 Ом·м для момента времени 15 мкс, соответствующего максимуму растекающегося тока.

Максимальный разброс расчетных данных при трехкратном изменении числа каналов не превышает 15% от их среднего значения, причем, с увеличением числа каналов область разброса сокращается. О динамике изменения входного сопротивления заземления во времени можно судить по данным рис. 4, где результаты компьютерного расчета при 6-ти скользких каналах сопоставляются с полевыми измерениями, демонстрируя их совпадение с погрешностью, вполне допустимой в инженерной практике. Это позволяет использовать компьютерную модель для анализа специфики изменения входного сопротивления в зависимости от величины тока молнии и проводимости грунта, в котором он растекается.

4. ИМПУЛЬСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО ЭЛЕКТРОДА ДЛЯ ТОКА МОЛНИИ

Входное сопротивление заземляющего устройства $R_g(t)$ определяет амплитуду и форму резистивной составляющей грозового перенапряжения при ударе молнии в опоры воздушной линии электропередачи (ВЛ) высокого напряжения или в ее молниезащитные тросы. С достаточно высокой вероятностью перенапряжение спо-

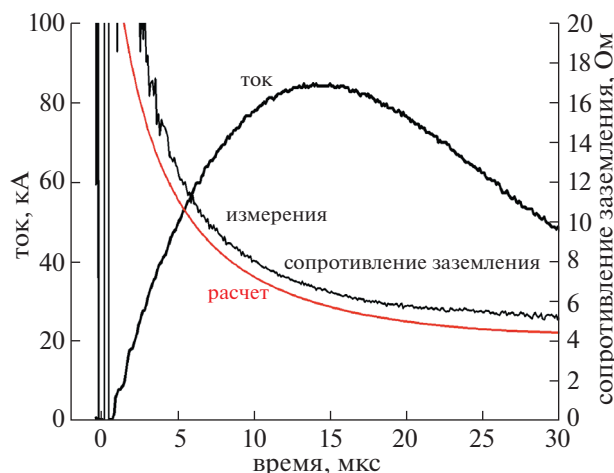


Рис. 4. Сопоставление результатов численного моделирования с измерениями сопротивления заземления в полевых условиях при удельном сопротивлении грунта $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и импульсном токе амплитудой 84 кА .

собно перекрыть по воздуху изоляцию класса 110 и 220 кВ, а при очень больших токах молнии и изоляцию ВЛ 330 кВ. Речь таким образом идет об изоляционных воздушных промежутках длиной 1–3 м. На территории Европы примерно 90% молний несут отрицательный заряд. Длительность их импульсного тока лежит в пределах до 100 мкс при длительности фронта импульса 1–10 мкс [20]. При таких временных параметрах время перекрытия изоляционных промежутков не превышает 20–30 мкс, а при воздействии молний с большим током оно сокращается до единиц микросекунд. Именно этот временной диапазон представляет практическую значимость для анализа динамики изменения входного сопротивления сосредоточенных заземляющих устройств опор ВЛ, не обладающих сколько-нибудь весомой индуктивностью.

Расчетные результаты $R_g(t)$ на рис. 5 и 6 получены для импульсов тока с временными параметрами 5.5/75 мкс, которые согласно [20] соответствуют 50%-м значениям первого компонента отрицательной молнии. Принято, что молния ударяет в молниеприемник с сосредоточенным заземлителем, рекомендованным в [26]; его стационарное сопротивление заземления может быть приближенно оценено как $R_0 = 0.1 \rho$ [Ом]. Данные на рис. 5 соответствуют типичным грунтам на территории России с $\rho = 300 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, а на рис. 6 грунтам низкой проводимости с $\rho = 1500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Можно видеть, что кратность снижения сопротивления заземления в обследованном временном диапазоне практически не зависит от удельного сопротивления грунта. Она нарастает с

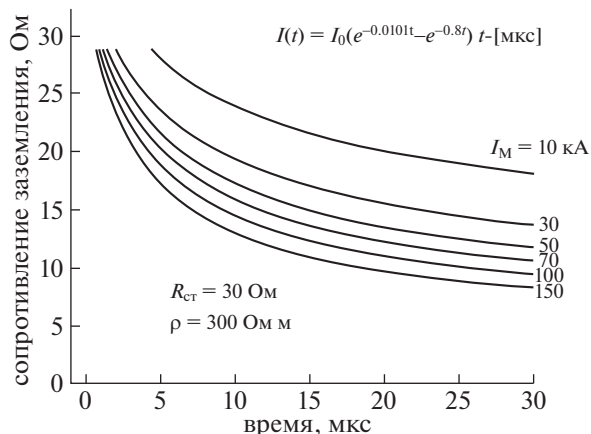


Рис. 5. Динамика изменения во времени входного сопротивления заземляющего электрода в грунте с удельным сопротивлением $300 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ при токе с временными параметрами 5.5/75 мкс различной амплитуды.

течением времени по мере постепенного роста плазменных каналов и увеличения амплитуды тока молнии, ускоряющего их рост.

Можно убедиться, что последствия развития ионизационных процессов в грунте не слишком значительны. Так для средней по силе молнии с током 30 кА при времени воздействия $t = 5 \text{ мкс}$ сопротивление заземления снижается всего на 20%, при $t = 10 \text{ мкс}$ – снижение близко к 35%, а при $t = 30 \text{ мкс}$ величина $R_g(t)$ падает по сравнению с R_0 приблизительно в 2 раза. Принципиально важно, что величина тока молнии усиливает эффективность ионизационных процессов не в очень сильной степени. Так, при токе амплиту-

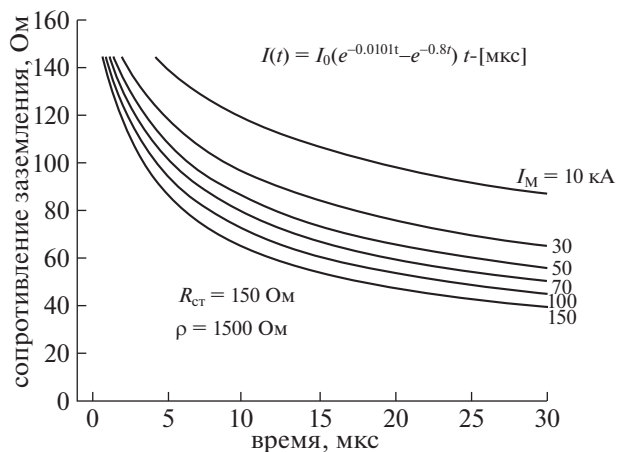


Рис. 6. Динамика изменения во времени входного сопротивления заземляющего электрода в грунте с удельным сопротивлением $1500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ при токе с временными параметрами 5.5/75 мкс различной амплитуды.

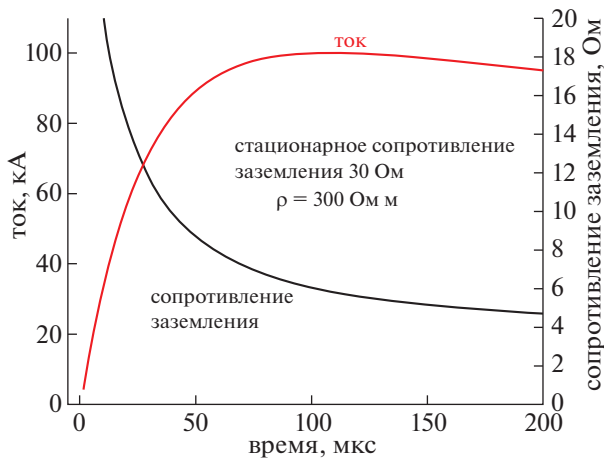


Рис. 7. Динамика изменения во времени входного сопротивления заземляющего электрода при воздействии положительной молнии с “аномальным” током 100/1000 мкс.

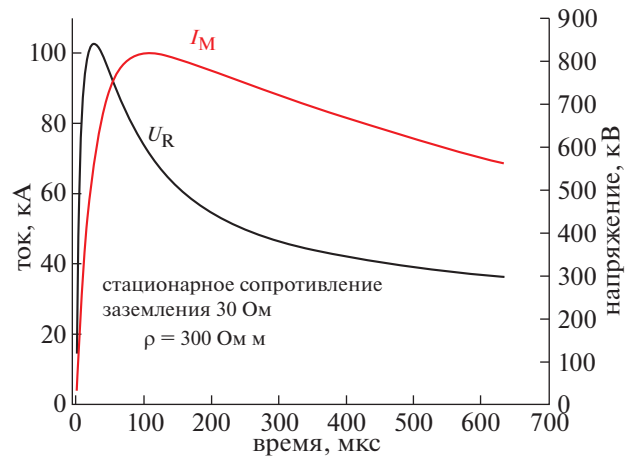


Рис. 8. Расчетный импульс резистивной составляющей напряжения на заземляющем электроде в условиях, аналогичных указанным на рис. 7.

дой 150 кА, (вероятность превышения близка к 1%) кратность снижения сопротивления заземления увеличивает приведенную выше всего в 1.5 раза.

В полной мере эффект ионизации грунта проявляется при растекании импульсного тока положительных молний с так называемым “аномальным” током длительностью до 1000 мкс с фронтом около 100 мкс. Результаты компьютерного моделирования на рис. 7 демонстрируют динамику изменения входного сопротивления заземлителя в грунте с удельным сопротивлением 300 Ом при таком токе амплитудой 100 кА. Здесь в момент времени 100 мкс, соответствующий максимуму тока, сопротивление заземления снизилось в 5 раз по сравнению со своим стационарным значением. За счет столь резкого снижения резистивная составляющая напряжения сильно деформируется (рис. 8). Ее фронт укорачивается едва ли не до 20 мкс, а длительность импульса (по уровню 0.5) составляет всего 220 мкс. Есть основания считать, что при такой деформации импульса напряжения и очень существенном снижении его амплитуды положительной молнии с аномально длинным импульсом тока не ведут к перекрытиям изоляции ВЛ высокого напряжения при грозовых воздействиях.

В заключение следует обратить внимание на весьма слабую зависимость результатов компьютерного моделирования от величины продольного электрического поля в канале скользящего разряда. Достаточно отметить, что увеличение этого параметра в 2.5 раза при моделировании динамики изменения входного сопротивления заземлителя со стационарным значением 30 Ом в грунте с $\rho = 300 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ привело к росту входного

сопротивления в обследованном временном диапазоне 5–30 мкс не более, чем на 10%. Тем самым в известной мере оправдывается упрощенная расчетная модель процесса, исключая учет индуктивности формирующегося плазменного канала.

ВЫВОДЫ

1. Основной причиной снижения входного сопротивления сосредоточенных заземляющих устройств при растекании больших импульсных токов является формирование от точки ввода скользящих искровых каналов вдоль поверхности грунта в атмосферном воздухе.
2. Среднее продольное электрическое поле в грунте, оцененное в различных источниках в 100–300 кВ/м, не имеет сколько-нибудь значимого отношения к характеристике ионизационных процессов, изменяющих сопротивление заземления.
3. Энергия для разогрева формирующихся скользящих каналов поставляется током утечки через поверхность их контакта с грунтом без старта стримеров от головки канала.
4. В процентном отношении кратность снижения входного сопротивления заземляющего устройства практически не зависит от удельного сопротивления грунта и определяется только амплитудой и временными параметрами тока молнии.
5. Минимальное значение входного сопротивления не совпадает по времени с амплитудой тока в заземляющем устройстве; эффект снижения продолжается и на спаде токового импульса по мере дальнейшего роста скользящих плазменных каналов.

6. Зависимость минимального значения входного сопротивления от величины тока молнии характеризуется существенной нелинейностью, которая ограничивает эффект при воздействии экстремально мощных молний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001.
2. *Sunde E.* Earth conduction effects in transmission systems. Toronto: D Van Nostrand Company, 1949.
3. *Рябкова Е.Я.* Заземление в установках высокого напряжения. М.: Энергия. 1978.
4. *Анненков В.З.* // Электричество. 1993. № 12. С. 15.
5. *Вайнер А.Л., Потужный А.К., Фертик С.М.* // Электрические станции. 1941. № 3. С. 15.
6. *Вайнер А.Л., Потужный А.К., Фертик С.М.* // Электричество. 1947. № 2. С. 40.
7. *Шишигин С.Л., Шишигин Д.С., Смирнов И.Н.* // VII Российская конф. по молниезащите. СПб., 10–13 мая 2022.
8. *Sekioka S., Lorentzou M., Philippakou M., Prousalidis J.* // IEEE Transac. On Power Delivery. 2006. V. 21. P. 194.
9. *Wen X., Feng Z., Lu H., Tong X., Lan L., Chen W., Tan B.* // IET Sci. Measurements Tech. 2016. V. 10. P. 228.
10. *Vasilyak L.M., Pecherkin V.Ya., Vetchinin S.P., Panov V.A., Son E.E., Efimov B.V., Danilin A.N., Kolobov V.V., Selivanov V.N., Ivonin V.V.* // J Phys D: Appl Phys. 2015. V. 48. P. 285201.
11. *Василяк Л.М., Ветчинин С.М., Панов В.Н., Печеркин В.Я., Сон Э.Е.* // ТВТ. 2014. Т. 52. С. 825.
12. *Lee B.H., Park G.H., Kim H.G., Lee K.S.* // J. Electr. Eng. Technol. 2009. V. 4 (1). P. 98.
13. *Androvitsaneas V.P., Gonos I.F., Stathopoulos I.A.* // Electric Power Systems Res. 2016. V. 139. P. 109.
14. *Смирнов В.П., Фортвов В.Е., Быков Ю.А. Ермолаев В.А., Сон Э.Е., Базелян Э.М., Скобарихин Ю.В., Грабовский Е.В., Олейник Г.М., Шишлов А.О., Грибов А.Н., Григорьянц В.К., Горюшин Ю.А.* // Физика плазмы. 2016. Т. 42. С. 172.
15. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Искровой разряд. Долгопродный: Изд-во МФТИ, 1997.
16. *Kossyi I.A., Kostinsky A.Yu., Matveyev A.A., Silakov V.P.* // Plasma Sources Sci. Technol. 1992. V. 1. P. 207.
17. *Базелян Э.М., Александров Н.Л.* // Физика плазмы. 2022. Т. 48. С. 639.
18. *Базелян Э.М., Хлапов А.В., Шкилев А.В.* // Электричество. 1992. № 9. С. 19.
19. *Базелян Э.М.* // Электричество. 1991. № 11. С. 27.
20. *Lightning Parameters for Engineering Applications.* 2013. CIGRE. Rep. 549 Working Group C4.407.
21. *Vilkov Yu., Zolotov V., Kravchenko A., Selemir V., Terkhin V., Yuryzhev A.* // IEEE 34th Intern. Conf. on Plasma Sci. 2007.
22. *Вилков Ю.В., Кравченко А.С., Саиткулов М.М., Седемир В.Д., Терехин В.А., Тютяев А.А.* // ПТЭ. 2007. № 3. С. 64.
23. *Андреев М.Г., Базелян Э.М., Булатов М.У., Кужекин И.П., Макальский Л.М., Сухаревский Д.И., Сысоев В.С.* // Физика плазмы. 2008. Т. 34. С. 663.
24. *Базелян Э.М., Сысоев В.С., Андреев М.Г.* // Физика плазмы. 2009. Т. 35. С. 763.
25. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1992.
26. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений РД.34.21.122-87 // Инструктивные указания по проектированию электротехнических промышленных установок. М.: Энергоатомиздат, 1988. С. 10.