

low current and high current LIVS discharges are similar. Possibilities to optimize LIVS discharges in the role of multicharged ion sources are found out.

PACS: 41.75.-i

УДК 537.523.4:537.53

Физические механизмы снижения напряжения пробоя в цепи стержневого молниеотвода с размыкаемым микроразрядником

Ю. К. Бобров, И. В. Журавков, Е. И. Остапенко, В. В. Стариков
ГНЦ "Всероссийский электротехнический институт", Москва, Россия

Ю. В. Юргеленас

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия

Предложено физическое обоснование эффекта снижения пробивного напряжения воздушного промежутка в цепи с размыкаемым микроразрядником. Данный эффект может быть использован для повышения эффективности грозозащиты стержневым молниеотводом. Исследованы процессы в электрической цепи молниеотвода с микроразрядником при грозовом электрическом пробое. Показано, что размыкания микроразрядника могут приводить к резонансным перенапряжениям в цепи постоянного тока и в итоге — к эффективному уменьшению пробивного напряжения разрядного промежутка молниеотвод — грозовое облако.

PACS: 07.50.-e

Введение

Известно, что наиболее частой причиной аварийных отключений линий электропередач высокого и сверхвысокого напряжений являются поражения молниями.

Существенное повышение эффективности грозозащиты может быть достигнуто путем включения размыкающего устройства — размыкаемого микроразрядника (РМ) — в цепь между молниеприемником и заземлением. Эффект снижения напряжения пробоя воздушного промежутка в цепи с РМ (эффект Журавкова) был открыт и запатентован в Российской Федерации и США в 1998 г. [1]. Он иллюстрируется простой электрической схемой, приведенной на рис. 1.

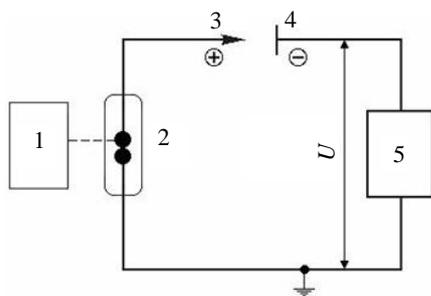


Рис. 1. Электрическая схема цепи с микроразрядником:

1 — привод микроразрядника; 2 — микроразрядник;
3 — стержень; 4 — плоскость; 5 — источник напряжения

На воздушный промежуток "стержень—плоскость" подано постоянное напряжение U , меньшее пробивного значения для данного промежутка, причем "стержень" имеет положительный потенциал относительно "плоскости". В качестве дополнительного элемента в цепь включен РМ, представляющий собой два шара малого диаметра, закрепленных на пружинящих электродах, обеспечивающих замыкание контакта между шарами, так что после размыкания контакта они снова возвращаются в замкнутое состояние.

При размыкании микроразрядника может произойти электрический пробой промежутка при напряжении, меньшем пробивного значения более чем в два раза. Этот эффект имеет место только при положительной полярности стержня и отсутствует при отрицательной полярности.

Эффект наблюдался автором на реальном молниеотводе и затем был подтвержден на лабораторной установке с напряжениями до 40 кВ. К сожалению, несмотря на 10-летнюю историю, данный метод снижения напряжения пробоя пока не нашел промышленного применения и до сих пор не имел теоретического обоснования. В то же время схема устройства технически простая и не требует изменения формы существующих молниеотводов, обуславливая минимальные затраты на внедрение данной технологии грозозащиты.

В данной работе исследуются физические механизмы снижения пробивного напряжения в цепи с РМ. Для этого оцениваются реактивные параметры разрядного LC-контура молнии и молниеотвода и исследуется процесс разряда в цепи последнего с РМ. Обосновывается возможность возникновения авторезонансного состояния в соответствующем LC-контуре, которое может быть причиной дополнительного перенапряжения в цепи.

Приведены результаты экспериментальных исследований этого эффекта на воздушных промежутках "стержень—плоскость" при напряжениях до 300 кВ.

Общая и эквивалентная электрическая схема начального состояния в системе "молниеотвод—грозовое облако"

Электрическая цепь лидера молнии наиболее адекватно могла бы описываться моделью длинной линии переменной во времени длины [2—5]. Однако теория длинных линий переменной длины в настоящее время отсутствует. Развитие такой теории применительно к модели распространяющихся лидеров молнии является актуальной задачей, ждущей своего решения. Поэтому в данной работе электрическая цепь разряда молнии моделируется посредством цепи с сосредоточенными параметрами.

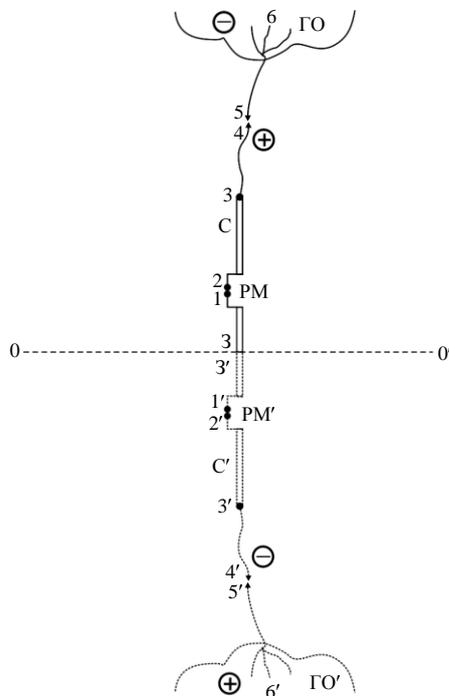


Рис. 2. Конструктивная схема стержневого молниеотвода с заземляющим устройством и грозовым облаком высотой $H_{th.cl}$ над поверхностью земельного грунта:
 0—0' — уровень нулевого потенциала земельного грунта $\Phi_{0-0'} = 0$; C — токоведущий спуск к заземлителю 3 от молниеприемника 3'; РМ — размыкаемый микроразрядник. Все элементы со штрихами — зеркальное отражение относительно идеальной проводящей поверхности грунта; ГО — грозное облако

На рис. 2 показана схема стержневого молниеотвода с заземляющим устройством в системе "грозовое облако—земля". Считается, что земляной грунт обладает хорошей электропроводностью, позволяющей воспользоваться методом зеркального отображения как грозного облака (ГО) над землей, так и устройств грозозащитного молниеотвода*. Основные электрические параметры контура тока разряда молнии в стержневой молниеотвод в виде эквивалентной электрической схемы приведены на рис. 3.

Для оценки возможных колебательных режимов в разрядном контуре тока молнии и молниеотвода электрическую схему на рис. 3 можно упростить, представив основные емкостные и индуктивные элементы их эквивалентными значениями:

$$L_k^{eq} = L_{0-1} + L_{2-3} + L_{3-4} + L_{5-6}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{C_k^{eq}} = \frac{1}{C_{1-2}} + \frac{1}{C_{4-5}} + \frac{1}{C_{th.cl-earth}}$$

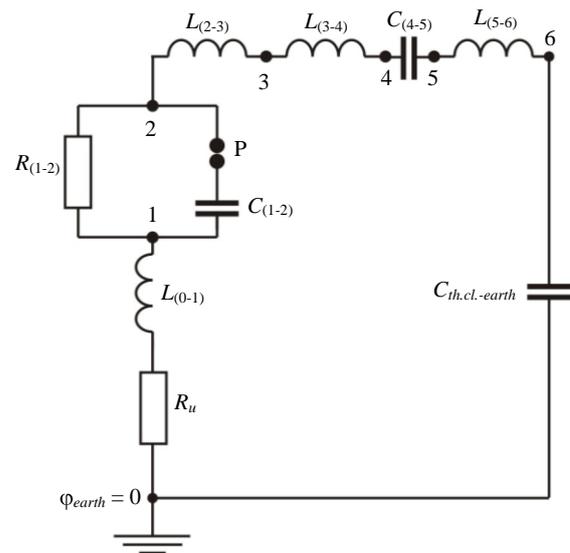


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема с сосредоточенными параметрами в соответствии с конструктивной схемой, приведенной на рис. 2:

R_u — импульсное сопротивление заземления; $L_{(0-1)}$ — индуктивность участка заземляющего спуска от размыкаемого микроразрядника (электрод 1) до уровня нулевого потенциала; $R_{(1-2)}$, $C_{(1-2)}$ — соответственно, активное сопротивление плазмы и емкость между электродами 1 и 2 размыкаемого микроразрядника; $L_{(2-3)}$ — индуктивность участка заземляющего спуска от размыкаемого микроразрядника (электрод 2) до молниеприемника 3 молниеотвода; $L_{(3-4)}$ — индуктивность восходящего "встречного" лидера молнии; $C_{(4-5)}$ — емкость между каналами восходящего и нисходящего лидеров; $L_{(5-6)}$ — индуктивность нисходящего лидера молнии; $C_{th.cl-earth}$ — емкость относительно земельного грунта

* В случае вечномёрзлого грунта его поверхность может рассматриваться как непроницаемая, и зеркальное отражение наземных устройств приводит к иному подходу при расчете емкости элементов этих наземных устройств и ГО [6].

Оценка реактивных параметров контура разрядного тока молнии

Индуктивные параметры

Индуктивные параметры оцениваются согласно данным работы [6].

Индуктивность стального ферромагнитного заземляющего спуска. Представляют интерес два подхода:

1) оценка всех индуктивных параметров схемы рис. 3, предполагающая наличие сформировавшейся лидерной стадии разряда молнии;

2) оценка лишь тех индуктивных параметров системы, которые существуют до начала лидерного разрядного процесса.

В первом варианте учитываются не только стационарные элементы конструкции молниеотвода, такие как стальной ферромагнитный заземляющий спуск с молниеприемником, импульсным сопротивлением заземления R_{μ} и РМ 1—2, но и индуктивные параметры лидерных каналов молнии, в том числе обширной области тока смещения при разряде емкости $C_{th.cl-earth}$ ГО относительно земли.

Во втором варианте следует определить только индуктивные параметры существующей конструкции молниеотвода с отсутствием лидерных каналов молнии для прогноза возможного возникновения колебательных процессов в ожидаемом контуре разрядного тока молнии с РМ как источником возбуждения высокочастотного резонансного режима в контуре. В случае попадания в резонанс напряжений могут возникнуть большие перенапряжения на молниеприемнике с иницированием стримерно-лидерной стадии восходящего встречного лидера, что может оказаться достаточным для объяснения рассматриваемого эффекта существенного увеличения пробиваемого расстояния при включении РМ.

Можно указать и третий вариант схемы с развитаым нисходящим лидером молнии и высотой его ориентировки на молниеотвод h_{lead} , когда в систему определяющих индуктивных параметров задачи должна быть включена индуктивность лидера молнии длиной $H_{th.cl} - h_{lead}$, где $H_{th.cl}$ — высота грозового облака.

Из всех составляющих индуктивности (1) только $L_{(0-1)} + L_{(2-3)}$ образуются неизменными во времени по диаметру и длине значениями индуктивности обычно стального ферромагнитного проводника – заземляющего спуска молниеотвода в виде катаного провода диаметром 8—10 мм, длиной $l_{(0-3)} \approx 15$ м и относительной магнитной проницаемостью в пределах $\mu = 700$ —900. Вследствие больших значений μ внутренняя индуктивность L_i заземляющего спуска может вносить существенный и даже определяющий вклад в его

полную индуктивность с учетом внешней ее составляющей L_e [6]:

$$L_{0-3} = L_{i\ 0-3} + L_{e\ 0-3},$$

причем

$$L_{i\ 0-3} = \frac{\mu_0 \mu l_{(0-3)}}{8\pi} \xi,$$

что при абсолютной магнитной постоянной $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м и приведенных выше данных стального спуска дает значение $L_{i(0-3)} = 525 \cdot \xi$ мкГн. Коэффициент ξ зависит от частоты тока ω , радиуса поперечного сечения проводника r и его удельной электропроводности γ . Поскольку

$$\xi = \xi\ kr,$$

где

$$k = \sqrt{\omega \mu_0 \mu \gamma},$$

то согласно [6] $kr = 4,48$, откуда следует $\xi = 0,61$, и внутренняя индуктивность равна $L_{i(0-3)} \approx 320$ мкГн. Внешняя индуктивность

$$L_{e\ 0-3} = \frac{\mu_0 l_{0-3}}{2\pi} \left(\ln \frac{2l_{0-3}}{r} - 1 \right) = 12,045 \text{ мкГн} \quad (2)$$

в сумме с внутренней индуктивностью дает полную индуктивность спуска $L_{(0-3)} = 332,3$ мкГн, причем составляющая внешней индуктивности не превышает 4 % ее общего значения.

Индуктивность лидерных каналов молнии.

Если полагать средний радиус каналов лидеров молнии, равным $r_{lead} \approx 2 \cdot 10^{-2}$ м и длиной l_{lead} , индуктивности плазменных каналов лидеров молнии будут определяться по формуле

$$L_{lead} = \frac{\mu_0 l_{lead}}{2\pi} \left(\ln \frac{2l_{lead}}{r_{lead}} - 1 \right),$$

что, например, при $l_{lead} = l_{(3-4)} = 50$ м и $l_{lead} = l_{(5-6)} = 900$ м дает $L_{(3-4)} = 72,5$ мкГн и $L_{(5-6)} = 1873,4$ мкГн.

Таким образом, согласно рис. 2 и 3 канальные лидерные элементы разрядного тока молнии и ферромагнитный заземляющий спуск молниеотвода в сумме дают значение индуктивности разрядного тока молнии, равное

$$L_k = L_{i\ 0-3} + L_{e\ 0-3} + L_{3-4} + L_{5-6} = 2280,94 \text{ мкГн.} \quad (3)$$

Результат (3) содержит принятые при оценке неопределенности значения длин лидерных каналов $l_{(3-4)}$ и $l_{(5-6)}$. Одним из способов определения степени значимости вклада лидерных каналов в

полную индуктивность может быть расчет характеристик разрядного контура при полном их игнорировании, т. е. $l_{(3-4)} = 0$, $l_{(5-6)} = 0$ и $L_k = L_{i\ 0-3} + L_{e\ 0-3}$.

Индуктивностью обширной емкости $C_{(th.cl-earth)}$ можно пренебречь из-за отсутствия канальной формы тока смещения.

Емкостные параметры

Емкостные параметры оцениваются согласно данным работы [7]. В эквивалентной электрической схеме разряда молнии в молниеотвод (см. рис. 2, 3) имеются три емкости. Емкость ГО относительно земной поверхности $C_{(th.cl-earth)}$, вероятно, одна из самых больших в схеме. Как источник тока молнии она заряжена до очень высокого отрицательного электрического потенциала, составляющего, как правило, несколько мегавольт. Для равнинных местностей полярность разрядов молнии отрицательная с вероятностью около 90 %. В этих случаях встречные лидеры молниеотводов имеют положительную полярность, физические процессы возникновения и распространения их излагаются в работе [8].

Емкость микрозарядного промежутка. Емкость $C_{(1-2)}$ между электродами РМ теоретически может быть очень большой, так как при размыкании электродов расстояние между ними изменяется, начиная от атомно-молекулярных значений $d = (5-10) \cdot 10^{-10}$ м (нанометры) до микрорасстояний в доли миллиметра. При этом емкость между электродами будет очень большой, если площадь их поверхности S не зависит от расстояния между электродами $S \neq f(d)$. Во всяком случае не представляется практически возможным рассчитать емкость между электродами с такими малыми расстояниями между ними [7]. Поэтому и в случае микрозазоров приходится переходить к оценкам, например, при малых расстояниях между электродами, и принять некоторую "макроскопическую" для них величину площади, участвующей в формировании соответствующей емкости $C_{(1-2)}$. Например, при площади $S = \pi r^2$, $r = 3 \cdot 10^{-3}$ м и $d = 10^{-9}$ м емкость составит значение

$$C_{(1-2)} = \frac{\epsilon_0 S}{d} = \frac{\pi 9 \cdot 10^{-6}}{4\pi 9 \cdot 10^9 \cdot 10^{-9}} = 0,25 \text{ мкФ},$$

а при $d = 0,5 \cdot 10^{-9}$ м значение емкости будет в два раза больше, т. е. $C_{(1-2)} = 0,5$ мкФ.

Можно сравнить значения емкости $C_{(1-2)}$ с емкостью ГО размерами $d = 10^3$ м и $r \approx 10^3$ м, т. е.

$$C_{(th.cl-earth)} = \frac{\pi \cdot 10^6}{4\pi 9 \cdot 10^9 \cdot 10^3} = 0,025 \text{ мкФ}.$$

Из сравнения следует, что $C_{(1-2)} \sim 10-20 \cdot C_{(th.cl-earth)}$, т. е. при принятой весьма ориентировочной оценке геометрических размеров ГО с его высотой $H_{th.cl}$ указанные емкости очень велики и соизмеримы по своим значениям. Самой малой в схеме является емкость $C_{(4-5)}$, в результате чего имеет место неравенство

$$\frac{1}{C_{(4-5)}} \gg \frac{1}{C_{(th.cl-earth)}} \geq \frac{1}{C_{(1-2)}},$$

откуда следует, что эквивалентной емкостью разрядного контура должна быть принята емкость между лидерными каналами $C_k^{eq} = C_{(4-5)}$ как самая малая емкость в контуре.

Физические процессы в межэлектродном микрозазоре РМ. При малых (нанометровых) расстояниях, возникающих между электродами при размыкании микрозарядника даже небольшая разность потенциалов в зазоре создает в нем чрезвычайно сильное электрическое поле с напряженностью, сопоставимой с величиной атомного поля $E_a = 5,14 \cdot 10^{11}$ В/м. Так как ширина такого зазора намного меньше средних расстояний между молекулами окружающего атмосферного воздуха, то каких-либо электрических разрядов в зазоре быть не может, поскольку в нем отсутствует газовая среда. Условия в таких малых зазорах подобны условиям глубокого вакуума.

Первым из возможных физических процессов по величине напряженности электрического поля в зазоре будет автоэлектронная эмиссия из электрода—катода 2 с переносом и поглощением электронного потока автоэмиссии электродом—анодом 1 (см. рис. 2). Однако только лишь электронный поток не оказывается достаточным для образования электропроводящей плазменной среды в зазоре, для чего необходимо также обеспечить поток в него положительных ионов анода. Физической причиной такого возможного и, вероятно, осуществляемого ионного потока может быть "полевое испарение металла" [9] или, в другой терминологии, его "кулоновский взрыв" [10]. Эти механизмы имеют в сущности одну и ту же физическую основу, а именно, в сильном поле порядка нескольких вольт на ангстрем поверхностные электроны металла—анода втягиваются вглубь, оголяя его поверхностные ионы и обеспечивая их взаимное кулоновское отталкивание и распад—испарение ионов с поверхности, а также дальнейшее распространение фронта волны испа-

рения ионов в глубь металла, или при каком-либо способе достаточно быстрого освобождения поверхностных электронов металла, вызывая вынужденную эмиссию электронов наружу от него и, таким образом, также оголяя ионный остов металлической решетки, когда в пределах поверхностного слоя остаются единственные силы кулоновского отталкивания ионов — кулоновский взрыв. С этой целью на поверхность металла действуют либо мощным лазерным излучением ультрафиолетового диапазона с возможностью проникновения излучения на заметную глубину металла, либо осуществляется электрический взрыв проволочек в таком быстром режиме, при котором обеспечивается нагревание до высоких температур только электронов металла при сохранении прежней низкой температуры ионов.

В дальнейшем предстоит выяснить, какой механизм эмиссии ионов металла—анода осуществляется в действительности. Возможно, она вызвана мощным потоком автоэлектронов из катода с последующим "кулоновским взрывом" анода или существует тонкий анодный слой с чрезвычайно сильным электрическим полем у анода с эмиссией ионов вследствие "полевого испарения металла анода". Возможно также одновременное действие указанных факторов, аналогичное термоавтоэлектронной эмиссии, приводящее к образованию электронно-ионной плазмы в зазоре микроразрядника.

При достаточно резком падении напряжения на микрозазоре ток в плазме стремится к нулевому значению, и начинают преобладать процессы ее остывания и развала вследствие различных физических механизмов потерь заряженных частиц (диффузия электронов, их рекомбинация с металлическими ионами и дрейфа на анод, прилипание к электроотрицательным атомам) и энергии (теплопроводность — электронная, ионная, лучистая).

Следует иметь в виду возможность наличия высокочастотного режима в основном реактивного LC -контура разрядного тока молнии, когда напряжение на зазоре с плазмой меняет свою полярность, а ток проходит через ноль с попыткой развала плазмы и дальнейшим ее импульсно-периодическим образованием.

С учетом этого достаточно очевидного обстоятельства можно также рассматривать режим периодического угасания плазмы в каждый момент прохождения тока через нулевое значение. Иными словами, достаточно один раз создать микрозазор, как в дальнейшем в цепи заземляющего ферромагнитного спуска молниеотвода автоматически с собственной частотой LC -контура возникнут импульсно-периодические зажигания и погасания плазмы в зазоре, согласованные с высокочастот-

ными колебаниями напряжения в цепи разряда молнии, в том числе еще до этапа возникновения ее лидерных каналов. Даже в их отсутствие существуют индуктивно-емкостные параметры "заземляющий спуск — его емкость относительно ГО" с учетом зеркального отражения всех конструктивных элементов контура (см. рис. 2). Такой режим импульсно-периодического возникновения и исчезновения плазмы в зазоре РМ, навязанный высокочастотными колебаниями напряжения в контуре тока молнии, может быть назван авторезонансным состоянием разрядного контура тока молнии вследствие наличия в нем РМ.

Емкость относительно земли и грозового облака. Чтобы доказать возможность высокочастотного режима в контуре разрядного тока молнии, необходимо в дополнение к данным по индуктивностям определить соответствующий емкостный параметр $C_{(4-5)}$ между нисходящим и восходящим лидерами молнии (рис. 4).

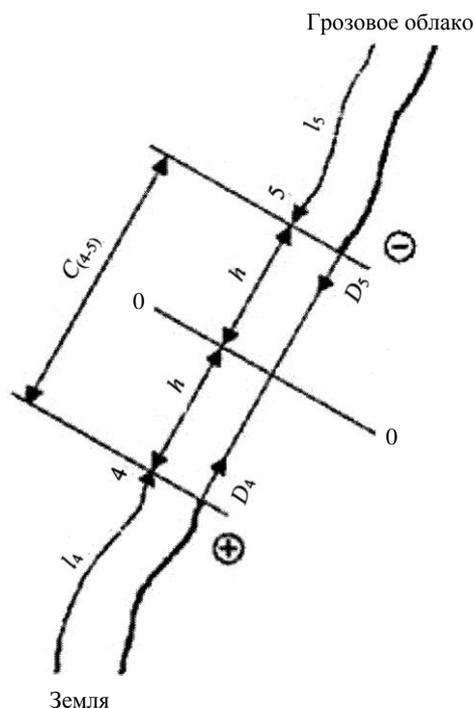


Рис. 4. Упрощенная схема встречных лидеров

Согласно [7] емкость провода конечной длины l диаметром $2a$ и высотой h оконечности провода над плоскостью 0—0 (рис. 5) рассчитывается по формуле

$$C' \approx \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{l}{a} - D_2}, \quad (4)$$

где параметр D_2 зависит от отношения (h/l) , причем в широких пределах изменения этого отношения $0,332 < h/l < 0,475$ среднее значение параметра

равно $D_2 \approx 0,4$, хотя общий диапазон значений отношения очень велик $0,02 < h/l < \infty$, при нем параметр изменяется в пределах, соответственно, $0,928 > D_2 > 0$.

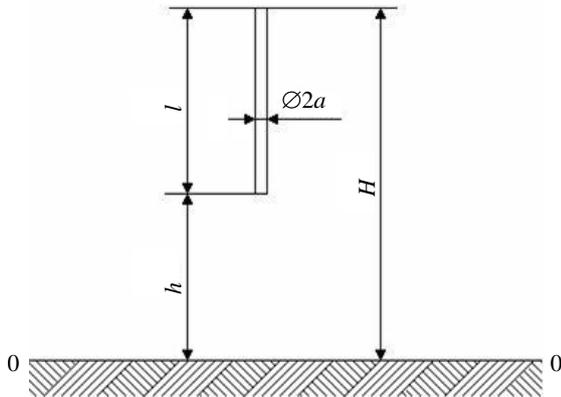


Рис. 5. Идеализированная схема для расчета емкости стержня круглого сечения над идеально проводящей плоскостью 0—0

В момент начала зарождения нисходящего лидера молнии $l(t = t_0) = 0$, а $h(t = t_0) = H_{th.cl}$, так что $h(t_0)/l(t_0) \rightarrow \infty$ и $D_2 = 0$. Наоборот, при $l(t) \gg h(t)$ $h(t)/l(t)$ — очень малая величина, и $D_2 \rightarrow 1$.

- Значение емкости относительно земли лидерного канала молнии длиной $l = 100$ м, радиусом $a \approx 5 \cdot 10^{-3}$ м и высотой ГО $H_{th.cl} = 10^3$ м, так что $h/l = 9 \rightarrow D_2 = 0,34$ оценивается, согласно (4), величиной $C' \approx 435$ пФ. Емкость между лидерными каналами (см. рис. 5) будет в два раза меньше как эквивалентная двум емкостям C' , соединенным последовательно [7], т. е. $C_{(4-5)} = (1/2) C' = 217,5$ пФ.

- Значение емкости заземляющего спуска относительно ГО при $l = 15$ м, $a = 4 \cdot 10^{-3}$ м, $h = 935$ м оценивается также по формуле (4) при $(h/l) = 65,7 \rightarrow D_2 = 0,2$, т. е. $C_{(3-6)} = 52$ пФ.

Некоторые характеристики параметров во времени. Определяющей в основном оказывается зависимость $C' \approx C'(l, l/a)$, причем при заданной высоте грозового облака $H_{th.cl}$ справедливо равенство

$$l \cdot t + h \cdot t = H_{th.cl} \cdot t$$

Это равенство справедливо для любого момента времени t . Как следует из эксперимента, если скорость фронта лидера фактически постоянна во времени $D_{lead}(t) = const$, то при значениях $l(t) = D_{lead} \cdot t$ и $h(t) = H_{th.cl} - l(t) = H_{th.cl} - D_{lead} \cdot t$ для отношения (h/l) можно написать

$$\frac{h \cdot t}{l \cdot t} = \frac{H_{th.cl} - D_{lead} \cdot t}{D_{lead} \cdot t} = \frac{H_{th.cl}}{D_{lead} \cdot t} - 1 = \frac{M}{t} - 1,$$

где $M = H_{th.cl}/D_{lead}$ — новая константа во времени.

Скорость изменения отношения $(h/l)(t)$ в отличие от скорости лидеров не является постоянной, а изменяется обратно пропорционально квадрату времени

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{h \cdot t}{l \cdot t} \right] = - \frac{M}{t^2}.$$

Например, если высота ГО $H_{th.cl} \approx 10^3$ м, а скорость лидера молнии $D_{lead} \approx 2 \cdot 10^4$ м/с, то $M = 5 \cdot 10^{-2}$ с. Константа M имеет смысл времени, необходимого для пересечения фронтом лидера расстояния между ГО и земной поверхностью, т. е. расстояния $H_{th.cl}$.

Вполне возможно, что указанные функции параметров во времени, играющие существенную роль в течение процессов распространения лидерных каналов молнии, имеют меньшее значение для определения начальных условий в предполагаемом разрядном контуре молнии, когда ее лидерная стадия еще даже не началась.

Параметры колебательного контура разряда молнии и его резонансное состояние

Имея оценочные значения реактивных параметров цепи контура разрядного тока молнии при $C_k^{eq} = C_{(4-4)} = 217,5$ пФ и $C_k^{eq} = C_{(3-6)} = 52$ пФ, а также $L_k^{eq} = 2280$ мкГн и $L_k^{eq} = 32,3$ мкГн, можно определить основные характеристики колебательного контура.

- **Характеристическое сопротивление контура** $\rho = \sqrt{L/C}$:

с учетом только индуктивности и емкости токоведущего заземляющего спуска $L_k^{eq} = 332,3$ мкГн,

$$C_k^{eq} = 52 \text{ пФ} \text{ — } \rho_{(1-3)} = 2,52 \text{ кОм};$$

с учетом индуктивностей и емкостей лидерных каналов молнии $L_k^{eq} = 2280,94$ мкГн,

$$C_k^{eq} = 217,5 \text{ пФ} \text{ — } \rho_{light} = 3,24 \text{ кОм}.$$

- **Собственная частота контура** $f = 2\pi\sqrt{LC}^{-1}$ соответственно равна:

$$f_k^{(1-3)} = 1,23 \text{ МГц};$$

$$f_k^{light} = 0,23 \text{ МГц}.$$

Круговые частоты, соответственно, равны $\omega_k^{(1-3)} = 7,73 \cdot 10^6$ рад/с и $\omega_k^{light} = 1,45 \cdot 10^6$ рад/с.

Таким образом, в плазме зазора РМ ток размыкается и замыкается (1,23—0,23) миллионов раз в секунду и, следовательно, емкость между электродами 1—2 автоматически управляется (создается и шунтируется плазмой) с частотой разрядного кон-

тура молнии, размыкаясь в ноль тока и заряжаясь при распаде плазмы. Такой режим микроразрядника может быть назван авторезонансным, поскольку коммутация им осуществляется автоматически на частоте разрядного контура молнии. Поэтому при наличии РМ в цепи заземляющего спуска молниеотвода напряжение на молниеприемнике и на фронте образовавшегося нисходящего лидера будут резонансно возрастать по схеме резонанса напряжений в последовательно соединенных реактивных элементах цепи контура разряда молнии.

Условие резонанса в контуре, как известно, может быть записано как равенство его реактивных сопротивлений, т. е.

$$x_L = \omega L_k = x_C = \frac{1}{\omega C_k}. \quad (5)$$

Для контура без лидерных каналов при значениях $L_k^{eq} = 332,3 \cdot 10^{-6}$ Гн, $C_k^{eq} = 52 \cdot 10^{-12}$ Ф условия резонанса в соответствии с (5) определяются резонансной частотой контура $\omega_0 = \omega_k^{1-3}$, т. е. величиной $\omega_k^{1-3} = 7,73 \cdot 10^6$ рад/с, оцененной выше.

Известно, что при резонансе напряжений их значения на индуктивности и емкости могут значительно превышать напряжение на так называемых "зажимах цепи", т. е. между электродами 1 и 2 микроразрядника, которое может быть принято равным падению напряжения на импульсном сопротивлении заземления R_u . Полное сопротивление цепи z при $x = x_L - x_C = 0$ минимально, $z = \sqrt{R_u^2 + x^2} = R_u$, а ток i при заданном напряжении $\Delta\varphi_{(th.cl-earth)}$ достигает наибольшего значения $i = \Delta\varphi_{(th.cl-earth)} / R_u$. В предельном (теоретическом) случае при $R_u = 0$ полное сопротивление цепи контура в режиме резонанса также равно нулю, а ток при любом конечном значении напряжения $\Delta\varphi$ бесконечно велик. Точно также бесконечно велики напряжения на индуктивности и емкости.

Из условия (5) следует, что резонанса можно достичь, изменяя либо частоту напряжения источника (частоту цепи контура тока молнии), либо параметры цепи — индуктивность и емкость. Надо обратить внимание на определяющую роль РМ в обеспечении такой частоты коммутаций, которая всегда равна резонансной (собственной) частоте цепи контура разрядного тока молнии даже при дальнейшем существенном изменении реактивных параметров контура в процессе распространения плазмы пробоя воздуха молнией. Такое самосогласованное автоматизированное резонансное состояние опять-таки объясняется мгновенным со-

ответствием собственной частоты контура и коммутациями в микроразряднике.

Резонансный режим в контуре обеспечивается прежде всего в том случае, если характерная длительность изменений параметров цепи значительно превосходит характерное время, необходимое для достижения резонансного состояния. Например, если принять скорость лидера D_{lead} и его длину распространения, равную 100 диаметрам лидерного канала $l_{lead} \approx 100 d_{lead}$, предположительно мало изменяющую индуктивность и емкость лидера, то за характерное время изменения параметров лидера можно принять величину d_{lead}/D_{lead} , которая должна превышать характерное время развития резонанса $\sim 1/\omega_k^{light}$. При экспериментальных значениях $D_{lead} \approx 2 \cdot 10^4$ м/с, $d_{lead} \approx 8 \cdot 10^{-3}$ м и $\omega_k^{light} = 1,45 \cdot 10^6$ можно получить

$$\begin{aligned} \frac{l_{lead}}{D_{lead}} &= \frac{100 d_{lead}}{D_{lead}} = \frac{8 \cdot 10^{-1}}{2 \cdot 10^4} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ с} \geq \\ &\geq \frac{1}{\omega_k^{light}} = 0,69 \cdot 10^{-6} \text{ с}. \end{aligned}$$

Еще большая надежность возникновения и развития резонанса будет в цепи контура тока молнии в отсутствие лидерного процесса распространения разряда молнии, когда нет подвижных и деформируемых в пространстве и времени реактивных элементов цепи контура тока молнии. В этом случае "время ожидания" резонансного режима разрядного процесса стремится к бесконечности, что всегда превышает необходимое время развития резонансных явлений.

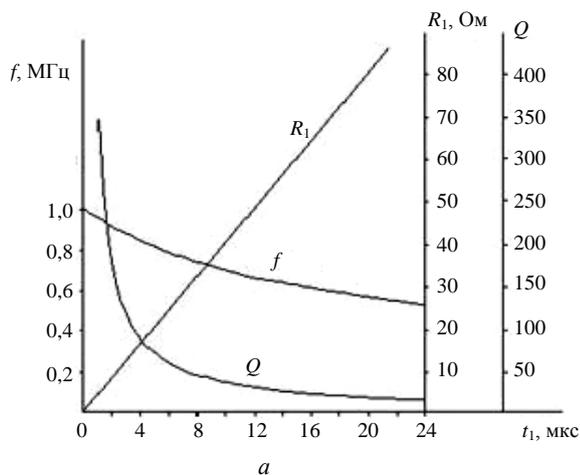
Считая, что условия развития резонанса напряжений осуществлены во времени, необходимо оценить их качественную характеристику, которая связывается с добротностью Q колебательного контура. Добротность Q определяется как отношение напряжения на эквивалентных индуктивности L_k^{eq} и емкости C_k^{eq} к напряжению $\varphi_{(1-2)}$, создаваемого при коммутациях на емкости $C_{(1-2)}$ при резонансе напряжений

$$Q = \frac{\varphi L_k^{eq}}{\varphi_{(1-2)}} = \frac{\varphi C_k^{eq}}{\varphi_{(1-2)}} = \frac{\rho i}{R_u} = \frac{\rho}{R_u}. \quad (6)$$

Как известно, Q также называется не только добротностью контура, но и его коэффициентом резонанса. Помимо реактивных элементов контура, его добротность существенным образом зависит от активного параметра — импульсного сопротивления заземления R_u и, например, в

условиях вечномерзлого грунта $R_u \rightarrow \infty$ добротность контура (б) почти нулевая, и никакого резонанса напряжений в цепи контура тока молнии ожидать не приходится*. Если принять нормальные условия грунта с регламентируемым значением $R_u = 10$ Ом, то добротность при $\rho_{(1-3)} = 2,52$ кОм очень велика: $Q = 2,52 \cdot 10^2$, и напряжение на индуктивности (молниеприемнике) увеличивается при резонансе в 252 раза на частоте $f_k^{(1-3)} = 1,23$ МГц, обеспечиваемой размыкаемым микроразрядником. В связи с этим РМ может быть назван высокочастотным генератором в цепи контура тока молнии, возбуждающим в нем резонанс напряжений.

На рис. 6 изображена зависимость добротности колебательного контура разрядного тока молнии от времени с учетом увеличения активного сопротивления каналов лидеров при их развитии. Из данного рисунка следует, что при зарождении лидерных каналов, когда их активные сопротивления близки к начальным нулевым значениям, резонанс напряжений обеспечивается с большой надежностью. Именно в данный начальный момент зарождения лидерных каналов обуславливается их ориентация на молниеприемник молниеотвода.



$$\varphi_{L_k^{eq}} = Q\varphi_{(1-2)} = 252 \cdot 1 \text{ кВ} = 252 \text{ кВ}.$$

Такая величина резонансного перенапряжения, безусловно, повлияет как на начальный старт встречного высоковольтного лидера молниеотвода, так и на нисходящий лидер молнии, т. е. на самой емкости $C_k^{eq} \approx C_{(4-5)}$ возникнет также резонанс перенапряжений той же величины (252 кВ).

Эффект существенного увеличения пробиваемого расстояния на макете промежутка "стержень—плоскость" с последовательно включенным РМ

Схема макета для иллюстрации исследуемого эффекта при электрическом пробое воздушного промежутка с включением РМ в расщелку контура показана на рис. 1. Эффект существенного (в два—три раза) увеличения пробиваемого расстояния между стержневым электродом положительной полярности и плоским электродом следует также объяснить рассмотренным выше резонансным режимом разрядной цепи.

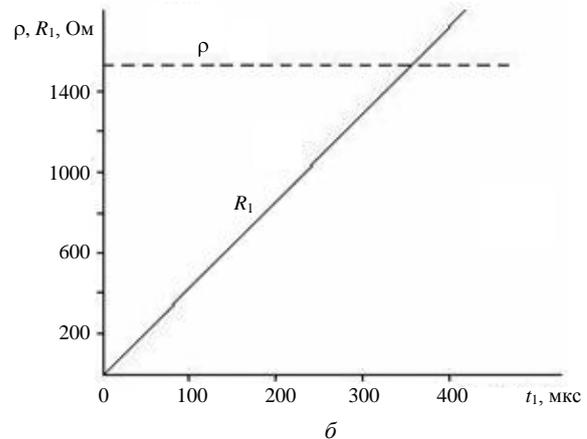


Рис. 6. Параметры разрядного тока молнии:

а — зависимость добротности $Q(t)$ разрядного тока молнии от времени t формирования и распространения разряда молнии в ее лидерной стадии; б — изменение резистивного параметра $R_{lead}(l(t))$ лидеров при их удлинении в процессе распространения

Для оценки абсолютных значений перенапряжений при резонансе необходимо оценить исходное напряжение $\varphi_{(1-2)}$. Если полагать, что расстояние между электродами 1—2 $d_{(1-2)} \approx 10^{-4}$ м, а напряженность электрического поля $E_{(1-2)} \approx 100$ кВ/см = 10^7 В/м, то искомое напряжение равно $\varphi_{(1-2)} = E_{(1-2)} d_{(1-2)} = 10^3$ В. Резонансное перенапряжение на молниеприемнике составит значение

Емкость стержня относительно плоскости оценивается также по формуле (4) при известных значениях $l = 0,1$ м, $a = 5 \cdot 10^{-3}$ м, что при отношении $h/l = 4 \cdot 10^{-2}/10^{-1} = 0,4 \rightarrow D_2 = 0,604$ дает

$$C' = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{l}{a} - D_2} = 2,32 \text{ пФ}.$$

С учетом зеркального отражения в идеально проводящей плоскости емкость составит значение $C_{(4-5)} = 1/2 C' = 1,16$ пФ. Индуктивности частей цепи контура согласно формуле (2)

* Вероятно, этот эффект отсутствия резонанса напряжений наблюдается в высоковольтных сетях ОАО "Тюменьэнерго" с низким уровнем грозоупорности воздушных линий электропередачи и низкой надежностью по этой причине энергоснабжения нефтегазовой компании "Октябрьскнефтегаз".

$$L_e = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{a} - 1 \right)$$

составляют следующие значения — для стержня:

$$l_{(2-3)} = 0,1 \text{ м}, a = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}, L_{e \ 2-3} = 0,054 \text{ мкГн};$$

$l_{(1-6)} + l_{(4-5)} = 0,14 \text{ м}, l_{(5-6)} = 0,15 \text{ м}$, при среднем значении $a = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ $L_{e \ 1-6} + L_{e \ 4-5} = 0,448 \text{ мкГн}$.

Аналогично имеем $L_{e \ 5-6} + L_{e \ 1-4} = 0,12 \text{ мкГн}$.

Тогда суммарная индуктивность составит величину

$$\Sigma L_e = 0,054 + 0,448 + 0,12 = 0,622 \text{ мкГн}.$$

Собственная частота разрядного контура макета будет равна

$$f_k = \left[2\pi \sqrt{C_{(4-5)} \Sigma L_e} \right]^{-1} = 187 \text{ МГц},$$

круговая частота $\omega_k = 2\pi f_k = 1,175 \cdot 10^9 \text{ рад/с} = \omega_0$.

Условие резонанса напряжений в контуре, согласно (5), осуществляется на резонансной собственной частоте ω_0 .

Характеристическое сопротивление контура равно

$$\rho = \sqrt{\frac{\Sigma L_e}{C_{(4-5)}}} = 732 \text{ Ом}.$$

Активный параметр контура в явном виде отсутствует, однако его значение может быть оценено с учетом активного сопротивления подводящих проводников.

Если эти медные проводники имеют средний диаметр поперечного сечения $d_{light} = 10^{-3} \text{ м}$ и длину $l_{light} \approx 3 \cdot 10^{-1} \text{ м}$, то при удельном электрическом сопротивлении меди $\rho_{light} = 0,017 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ сопротивление подводящих проводников будет равно

$$R_{cond} = \frac{\rho_{light} l_{cond}}{\pi d_{light} \cdot 2} = 0,00648 \text{ Ом}.$$

Если R_{cond} — единственный активный параметр цепи разрядного контура и сопротивлением излучения можно пренебречь, хотя при высоких частотах сопротивление излучения может составлять значительную составляющую активных потерь из контура, добротность контура будет очень значительной

$$Q = \frac{\rho}{R_{cond}} = \frac{732}{648 \cdot 10^{-5}} = 1,13 \cdot 10^5,$$

что свидетельствует о высоком качестве резонанса в контуре.

Для оценки перенапряжений на стержне следует определить напряжение $\varphi_{(1-2)}$ на электродах РМ. Это напряжение можно оценить, полагая расстояние между электродами равным $d_{(1-2)} \approx 10^{-3} \text{ м}$ с напряженностью электрического поля в зазоре около $E_{(1-2)} \approx 30 \text{ кВ/см} = 3 \cdot 10^5 \text{ В/м}$, т. е.

$$\varphi_{(1-2)} \approx 3 \cdot 10^5 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 10^2 \text{ В}.$$

Тогда резонансное перенапряжение как "ожидаемая" величина составит значение

$$\begin{aligned} \varphi_{L \ 3} &= Q \varphi_{1-2} = 1,13 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 10^2 = \\ &= 3,39 \cdot 10^7 = 33,9 \text{ МВ}, \end{aligned}$$

что превышает предел электрической прочности промежутка $l_{(3-4)}$.

Такое перенапряжение, превышающее даже уровень потенциала самой молнии, безусловно, приведет к так называемым "повторным зажиганиям" плазмы разрядов, и уровень резонансного перенапряжения ограничится остающимся потенциалом среза напряжения на наиболее электрически слабом месте всей системы изоляционной конструкции.

Возникновение большого резонансного перенапряжения в макете промежутка "стержень—плоскость" с последовательно включенным РМ вполне объясняет сущность действия разрядника и открывает возможности для конструктивного решения вопросов совершенствования грозозащиты отдельно стоящими стержневыми молниеотводами.

Таким образом, эффект увеличения пробиваемого расстояния путем включения РМ в цепь разрядного контура на макете получает свое удовлетворительное объяснение. Отсутствие этого эффекта при смене полярности стержня на отрицательную объясняется известным "эффектом полярности", состоящем в возрастании электрической прочности воздуха при отрицательной полярности острого электрода в 2—2,5 раза по сравнению с положительной. Физическая сущность его рассмотрена в работе [8].

Эффект полярности главным образом обусловлен значительно большими потерями свободных электронов из области ионизации в результате их диффузии и особенно дрейфа во внешнем электрическом поле. Последний канал потерь представляет собой прямые потери электронов за счет их дрейфового движения в электрическом поле отрицательной полярности на всех стримерно-лидерных стадиях пробоя, поскольку поле такой отрицательной полярности "выносит" электроны из области их ионизационного образования в отличие от положительного поля, удерживающего

их в области ионизации со значительно более надежным образованием плазмы электрических пробоев газов [8]. Такие интенсивные дрейфовые потери свободных электронов ионизации приводят к исключению возможности пробоя даже в условиях больших резонансных перенапряжений.

Экспериментальное исследование эффекта снижения пробивного напряжения в воздушном промежутке на уровне 300 кВ

В испытательном зале Всероссийского электротехнического института на установке высокого выпрямленного напряжения 300 кВ были проведе-

ны эксперименты с РМ по схеме, приведенной на рис. 1.

Основные экспериментальные данные о пробивных напряжениях для различных стержневых электродов, полученные для промежутка "стержень—плоскость", приведены на рис. 7, а—в. Из них следует, что пробивные напряжения в цепи с РМ существенно меньше 50%-ных пробивных напряжений.

На рис. 8 представлена осциллограмма тока в разрядном промежутке РМ. Можно сделать вывод, что полученная теоретическая оценка частоты авторезонансного состояния соответствует его реальной частоте.

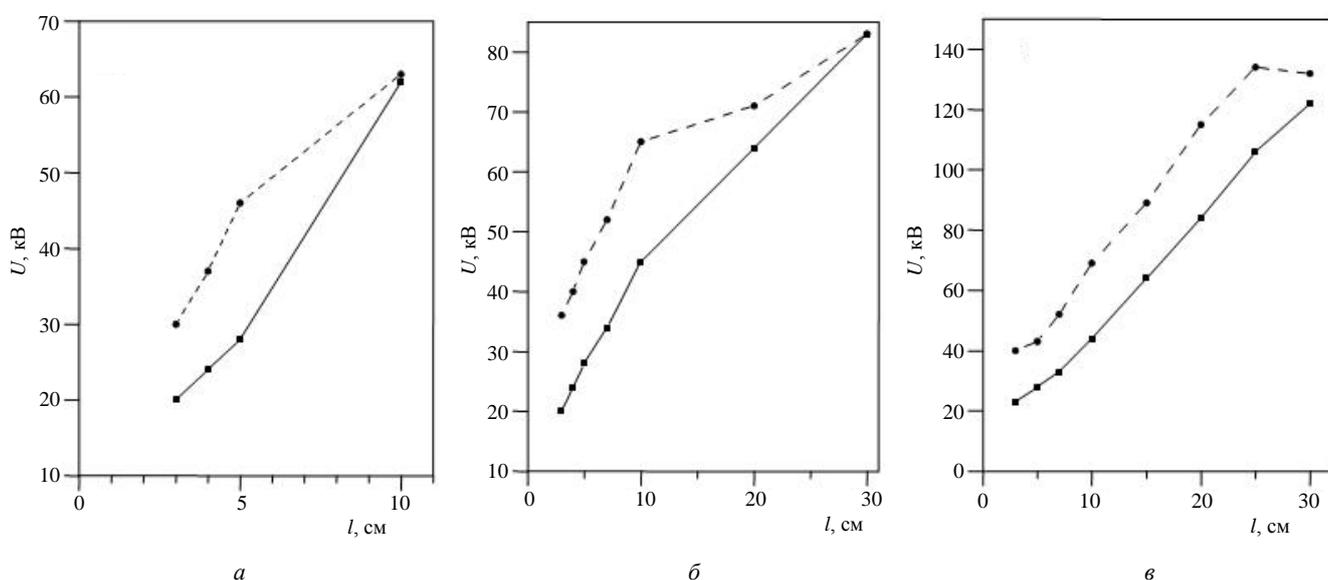


Рис. 7. Сравнительные характеристики пробивных напряжений U для промежутков "стержень—плоскость" с различной геометрией стержневого электрода в зависимости от длины промежутка l :
 — с включенным РМ; - - - - без РМ;
 а — катод—плоскость; анод—стержень $d = 1,5$ мм; б — катод—плоскость; анод—стержень $d = 3$ мм;
 в — катод—плоскость; анод—стержень $d = 3$ мм, наконечник — шарик диаметром 6 мм

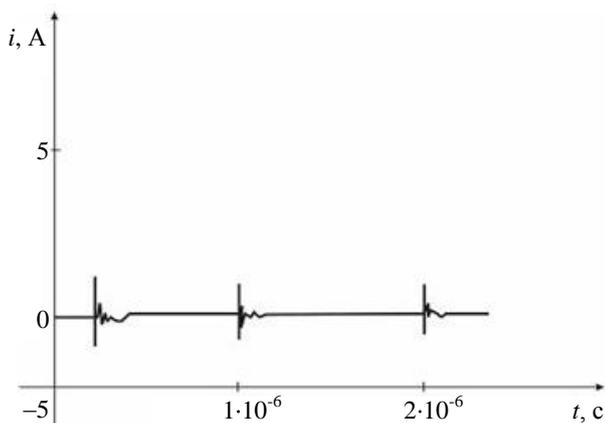


Рис. 8. Осциллограмма тока в разрядном промежутке размыкаемого микроразрядника

Выводы

1. Размыкаемый микроразрядник в цепи высокого постоянного напряжения является эффективным фактором снижения пробивного напряжения воздушного промежутка "стержень—плоскость".
2. Эффект ориентации молнии и увеличение пробивных расстояний между лидером молнии и молниеотводом может быть объяснен возникновением состояния резонанса напряжений в цепи контура разрядного тока молнии.
3. Резонансом напряжений в последовательной LC-цепи макета разрядного промежутка объясняется увеличение в два—три раза пробивного расстояния между электродами "положительный стержень — плоскость" при включении в разрядную цепь промежутка РМ.
4. Установлен эффект авторезонансного состояния в разрядной цепи молнии и макета разрядного промежутка, возникающего вследствие коммутационных свойств микроразрядника и осуществляемого даже при изменении реактивных параметров разрядных цепей контуров молнии и макета.
5. Отсутствие эффекта увеличения пробивного расстояния при отрицательной полярности стержневого электрода объясняется известным эффектом полярности [11], физическое содержание которого рассмотрено в [8].
6. Существует необходимость практического использования эффекта увеличения пробивных расстояний путем использования РМ в конструкциях отдельно стоящих стержневых молниеотводов.

7. Теоретический оценочный анализ, макетирование и экспериментальные данные подтверждают эффективность нового метода возможного повышения надежности грозозащиты.

Литература

1. Журавков И. В. Способ осуществления электрического пробоя газового диэлектрика в резко неоднородном поле: Пат. 2135991 РФ на изобретение, 1998.
2. Стекольников И. С. Природа длинной искры. — М.: Изд-во АН СССР, 1960.
3. Бобров Ю. К., Шостак В. А.: Тез. докл. I Всес. науч.-техн. конф. "Безопасность полета в условиях опасных внешних воздействий". — Киев, 1981. С. 16, 17.
4. Бобров Ю. К.// Техническая электродинамика. 1991. № 3. С. 29—32.
5. Бобров Ю. К., Сорокин А. В.// Там же. 1986. № 5. С. 12—18.
6. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивных: Справочная книга. — Л.: Энергоатомиздат, 1986.
7. Иосель Ю. Я., Кочанов Э. С., Струнский М. Г. Расчет электрической емкости. — Л.: Энергоиздат, 1981.
8. Дьяков А. Ф., Бобров Ю. К., Сорокин А. В., Юргеленас Ю. В. Физические основы электрического пробоя газов/ Под ред. А. Ф. Дьякова. — М.: Изд-во МЭИ, 1998.
9. Бобров Ю. К., Сорокин А. В. Испарение металла и поверхностные процессы в сильных полях: В кн. Физико-технические проблемы передачи электрической энергии//Сб. науч. статей/ Под ред. А. Ф. Дьякова. — М.: Изд-во МЭИ, 1998. № 1. С. 254—317.
10. Рухадзе А. А., Юсупалиев У.// ЖТФ. 2004. Т. 74. № 7. С. 127, 128.
11. Дмоховская Л. Ф., Ларионов В. П., Пинталь Ю. С., Рязевиг Д. В., Рябкова Е. А. Техника высоких напряжений. — М.: Энергия, 1976.

Статья поступила в редакцию 26 июня 2008 г.

Physical mechanisms of breakdown voltage reduction by means of insertion of the breakable microdischarger into electric circuit of a lightning diverter

Yu. K. Bobrov, I. V. Zhuravkov, E. I. Ostapenko, V. V. Starikov
All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

Yu. V. Yurgelenas
Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Science, Moscow, Russia

The physical explanation is proposed for the effect of an air gap breakdown voltage reduction by insertion of the breakable microdischarger into electric circuit of a definite current. This effect can be utilized to increase an efficiency of lightning protection. The processes in the electric circuit of the lightning diverter during a lightning breakdown are investigated. It is shown that contact breaking of the microdischarger can cause resonance overvoltages in the direct current circuit which results in effective breakdown voltage reduction of the gap between the lightning diverter and a thunder cloud.