

ПЕРСПЕКТИВА УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РАЗРЯД МОЛНИИ

Э.М. Базелян

АО “Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского”

E-mail: bazelyan@eninnet.ru

Положительный ответ на вопрос о принципиальной возможности управления разрядом молнии не вызывает сомнений. Проблема заключается не в установлении факта управления, а в оценке уровня эффективных управляющих воздействий. Она стала предметом повышенного внимания в последние годы в связи с насыщением рынка средств молниезащиты так называемыми активными молниеотводами, которые по мнению их разработчиков обеспечивают высокую надежность защиты от прямых ударов молнии на большой территории.

Внимание к искусственному изменению условий формирования длинного искрового разряда проявилось еще в начале прошлого века, когда для этой цели безуспешно пытались использовать предварительную ионизацию воздуха солями радия. Всех попытки объединяет единый принцип. Его основу составляет описание некоторого реально существующего физического явления, принципиально способного изменить условия зарождения или траекторию длинной искры. При этом умалчивается требуемый уровень управляющего воздействия, его полевые и энергетические характеристики. Разработчиков таких систем мало смущают результаты опыта эксплуатации активных молниеотводов в реальных условиях, которые демонстрируют достаточно высокую вероятность прорыва молнии в их зону защиты [1]. Сомнение в эффективности активных молниеотводов возникает и в связи с итогами сравнительных испытаний активных молниеотводов и традиционных той же высоты в полевых [2] и лабораторных условиях [3]. В экспериментах наблюдался даже преимущественный перехват искрового канала не активным, но традиционным молниеотводом, лишенным каких-либо управляющих воздействий.

Целенаправленная критика активных молниеотводов, в первую очередь ESE-системы, без особого успеха не менее двух десятилетий. К сожалению, результаты таких работ ограничиваются качественными выводами частного характера. Они не способны дать однозначную количественную оценку фактической эффективности рассматриваемой системы молниезащиты. Максимум, на что идут критики ESE-молниеотводов, это приравнивание их защитного действия к эффективности молниеотводов традиционного исполнения - факт далеко не очевидный, если принять во внимание уже упоминавшиеся результаты экспериментов [2-3].

В создавшейся ситуации целесообразно рассмотреть количественно последствия воздействия управляющего напряжения на условия старта и последующего развития встречного разряда от вершины молниеотвода, сосредоточив внимание на оценке влияния амплитуды управляющего импульса и его временных параметров в диапазоне, свойственном формированию нисходящей молнии.

Встречный разряд представляет наибольший интерес с рассматриваемых позиций, поскольку он наиболее доступен для управляющих воздействий, а его развитие предопределяет точку удара нисходящей молнии [4] или условия старта восходящей [5]. В медленно нарастающем электрическом поле грозового облака он начинается в форме нестационарной бесстримерной ультра короны, отличающейся слабым коронным током микроамперного уровня [11]. Корона формируется не только от высоких сооружений. В грозовой обстановке коронируют самые различные объекты с вершиной малого радиуса, например, ветви деревьев и кустарник. В совокупности это создает над земной поверхностью облако объемного заряда, снижающее под собой электрическое поле грозового облака.

Компьютерная модель нестационарной бесстримерной короны, развитая в [6], позволяет оценить динамику заполнения объемным зарядом приэлектродного пространства у коронирующего очага и проследить за экранирующим действием этого заряда в электрическом поле грозового облака и наложенного на него поля заряда лидера нисходящей молнии [7]. Переход встречного разряда в более энергетически мощную стримерную форму требует усиления коронного тока до некоторой критической величины, зависящей от радиуса коронирующей вершины r_0 . В [8] условие перехода для электродов сферической геометрии значение критического тока по этому условию может быть оценено как

$$i_{cr} = 8\pi\epsilon_0\mu_i r_0 E_{cor}^2, \quad (1)$$

где $E_{сок}$ – порог зажигания короны, ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума, μ_i – подвижность основного сорта коронных ионов. Для стержневого молниеотвода типичного радиуса $r_0 = 1 - 2$ см критический ток, равный $5 - 10$ мА, в медленно нарастающем поле грозового облака не достигим даже для экстремально высоких сооружений, высотой ~ 500 м.

Переход разряда в стримерную форму еще не означает, что от электрода будет формироваться встречный лидер. Как известно, положительная длинная искра при медленной скорости роста напряжения имеет явно выраженную фазу ступенчатого развития. Компьютерный анализ, выполненный в [9], дает основание считать, что канал, сформированный в процессе развития ступеней, четко фиксируемый на фоторазвертках, представляет собой лишь след, оставленный достаточно быстрым стримером, скорость формирования которого достигает 10^9 см/с. Газовая температура такого канала не превышает

400 - 500 К, а проводимость не сохраняется даже в течение 1 мкс. Для старта традиционного лидера с высокотемпературным проводящим каналом необходима мощная стримерная вспышка с длиной ветвей порядка 1 м. Падение напряжения на ней должно быть не меньше 400 кВ. При таком напряжении суммарный ток стримерных ветвей обеспечивает разогрев газа в объеме их общего стебля, стимулируя там старт лидерного канала [10]. Зарождение лидера в объеме стебля четко фиксируется на непрерывных фоторазветках, выполненных с высокой скоростью (рис. 1)

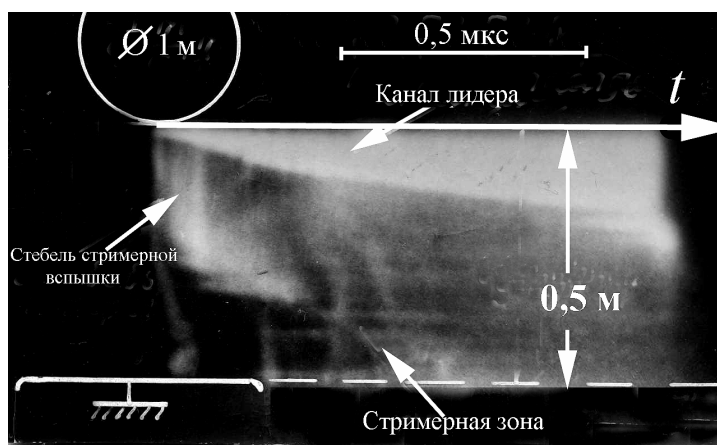


Рис. 1

Непрерывная разветвка зарождения лидера в стебле стримерной вспышки

В медленно нарастающем поле атмосферы условие перехода короны в стримерную форму не выполняется не только в момент старта встречного разряда, но даже при длительном формировании короны, когда ее ток многократно превосходит начальное значение.. На деле такой переход и последующий старт встречного лидера возможен только за счет быстрого усиления электрического поля зарядом лидера нисходящей молнии..

Момент старта встречного лидера трудно определить однозначно. Он в значительной степени зависит от таких случайных параметров, как погонный заряд лидера молнии, средняя скорость его развития, число ступеней, длина каждой из них и высота их возникновения. Это означает, что случайным образом варьирует и электрическое поле атмосферы, в котором предстоит продвигаться встречному лидеру.

Численный анализ показал, что ни ультра корона с ее объемным зарядом, ни стримерная вспышка, сохраняющая проводимость лишь в течение десятых долей микросекунды, не в состоянии воздействовать на ориентировку лидера нисходящей молнии. На это способен только встречный лидер, длина которого для практически значимого эффекта, как минимум, должна быть сопоставима с высотой объекта, от которого он стартовал. Следовательно, эффективность управляющих воздействий должна оцениваться способностью не только стимулировать старт встречного лидера, но и поддерживать его устойчивое развитие в течение достаточно длительного времени. Результаты, представленные ниже, получены при

помощи упрощенной расчетной компьютерной модели лидерного процесса от заземленного стержневого электрода конкретной высоты и радиуса [10]. В качестве исходных данных модель использует расчетные данные о характеристике нестационарной ультра короны от вершины электрода в электрическом поле атмосферы, нарастающем по заданному закону в течение заданного времени. По результатам этих расчетов в программу расчета встречного лидера вводится исходное распределение электрического поля в слое объемного заряда ультра короны над вершиной электрода.. Электрическое поле грозового облака в течение малого времени развития встречного лидера принимается неизменным. Условия зарождения встречного лидера не рассматриваются. Предполагается, что его старт априори обеспечен стримерной вспышкой требуемой мощности..

На каждом расчетном шаге определяется распределение заряда по поверхности металлического стержневого электрода и уже сформированного канала встречного лидера, а также эффективный потенциал его головки, который служит исходным параметром для расчета длины стримерной зоны лидера, его тока, продольной напряженности электрического поля в канале и скорости роста канала. Под эффективным напряжением понималась разность потенциалов собственно лидерной головки и точки ее расположения, где поле создается объемным зарядом короны и априори заданным электрическим полем атмосферы (его источник грозовое облако и канал лидера нисходящей молнии). Время формирования встречного лидера достаточно, чтобы в большей части его канала принять состояние плазмы сопоставимым состоянием квазистационарной дуги, поле которой согласно [11] принято обратно пропорциональным лидерному току.

$$E_L \approx \frac{a_E}{i_L} \text{ В/м,} \quad (2)$$

где $a_E = 3 \times 10^4$ ВА/м. При этом скорость роста встречного лидера задается эмпирическим соотношением через эффективное напряжение на головке его канала

$$v_L \approx b_v \sqrt{U_{ef}} \text{ м/с} \quad (3)$$

где $b_v = 15$ м/(В^{1/2} с). Ток лидера определялся скоростью поставки заряда формирующемуся каналу с погонной емкостью C_L

$$i_L = C_L U_{ef} v_L, \quad (4)$$

причем погонная емкость лидера определяется в основном зарядом его чехла радиусом R_{cov}

$$C_L = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(L/R_{cov})} \quad (5)$$

В выполненных расчетах использовано значение $C_L = 24$ пФ/м, заимствованное из экспериментов с длинной лабораторной искрой [12]. Оно не принципиально отличается от значения $C_L = \pi\epsilon_0$, принятого в [13].

Следует подчеркнуть качественный характер расчетной модели, которая претендует только на выявление общих представлений о механизме управления встречным лидером и потому может мириться с погрешностями оценки конкретных параметров на уровне десятков процентов, в первую очередь, из-за неопределенности значения погонной емкости встречного лидера и зависимости скорости его роста от энерговклада в канал. Тем не менее, тестирование модели по результатам лабораторных исследований лидерного процесса в длинных лабораторных воздушных промежутках [11] показало правомерность ее применения в рамках поставленной задачи.

Методологически целесообразно первоначально исключить учет экранирующего эффекта объемного заряда ультра короны и оценить уровень управляющего напряжения, ΔU на электроде относительно земли, которое способно поддержать устойчивое формирование встречного лидера в электрическом поле атмосферы, свободной от объемного заряда. Используя (2) – (5), для этой цели можно записать элементарное уравнение

$$\Delta U = \left(\frac{a_E}{b_v C_L E_0} \right)^{2/3} - E_0 h \quad (6)$$

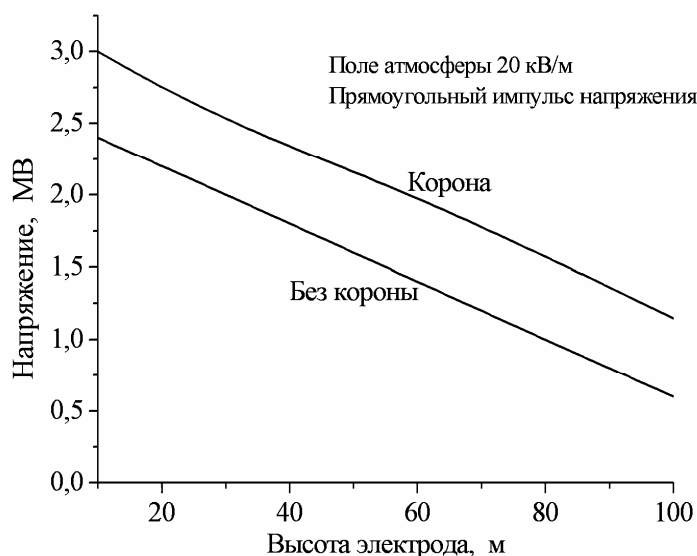


Рис. 2

Расчетная амплитуда управляющего импульса напряжения неограниченной длительности для возбуждения восходящей молнии

Оно демонстрирует тот факт, что лидер продолжит свое развитие без торможения, пока продольная напряженность электрического поля в его канале не будет превышать поле в

атмосфере E_0 . Уровень эффективного управляющего напряжения ΔU определяется двумя основными параметрами, - напряженностью электрического поля атмосферы E_0 и высотой электрода h . Зависимость $\Delta U(h)$ построена на рис. 2 по выражению (6) для $E_0 = 20$ кВ/м. Более сильное поле грозового облака у поверхности земли мало вероятно вследствие экранирования земной поверхности зарядом короны от многочисленных локальных источников усиления поля. По мере роста высоты объекта от 10 до 100 м требуемое управляющее воздействие монотонно снижается, но даже для предельно высокого оно не опускается ниже 500 кВ (рис. 2). Если же ориентироваться на ординарную высоту сооружения около 30 м, управляющее напряжение составит примерно 2 МВ. Важно учесть, что при более вероятном значении поля атмосферы $E_0 = 10$ кВ/м это значение почти удвоится, достигнув 3,8 МВ.

Таким образом, управление неизбежно приходится связывать с использованием напряжения мегавольтного уровня. Оно увеличивается в еще большей степени в реальных условиях, когда нужно принять во внимание перераспределение электрического поля в окрестности вершины рассматриваемого электрода объемным зарядом ультра короны.

Результаты компьютерного расчета на рис. 2 показывают, что за счет влияния короны расчетный уровень управляющего напряжения повысился примерно еще на 500 кВ независимо от высоты электрода. Расчет выполнен для ультра короны от стержневого электрода с полусферической вершиной радиусом 2 см. Предполагалось, что поле атмосферы линейно нарастает до амплитудного значения 20 кВ/м в течение 10 с. Время порядка 10 с представляется минимальным для релаксации заряда в грозовой ячейке после очередного старта из нее молнии [14]. За это время передний фронт объемного заряда короны удалялся от вершины примерно на 40 м независимо от высоты электрода. Однако количество заряда в коронном слое сильно зависело от этой высоты, нарастая от $6,2 \times 10^{-5}$ до $1,7 \times 10^{-3}$ Кл по мере ее увеличения от 10 до 100 м. Импульс управляющего напряжения в модельном расчете имел неограниченную длительность

Оценивая полученные результаты, следует иметь в виду, что эффективность управляющего воздействия в очень сильной степени зависит от реальной длительности импульса напряжения (рис. 3) Так в случае электрода высотой 30 м в электрическом поле 20 кВ/см найденное выше значение управляющего напряжения (2,5 МВ) при сокращении длительности импульса до 100 мкс (по уровню 0,5) было способно обеспечить развитие восходящего лидера на длину всего 3 м, а при длительности 10 мкс эффект воздействия напряжения оказывается ничтожным ($\sim 0,5$ м). Ослабление управляющего воздействия при сокращении длительности импульса напряжения не удастся компенсировать увеличением его амплитуды в сколько-нибудь разумных пределах. Например, воздействие импульса напряжения с амплитудой 5 МВ при

длительности 100 мкс в рассмотренном выше варианте расчета позволило сформировать встречный лидер длиной всего 5,6 м.

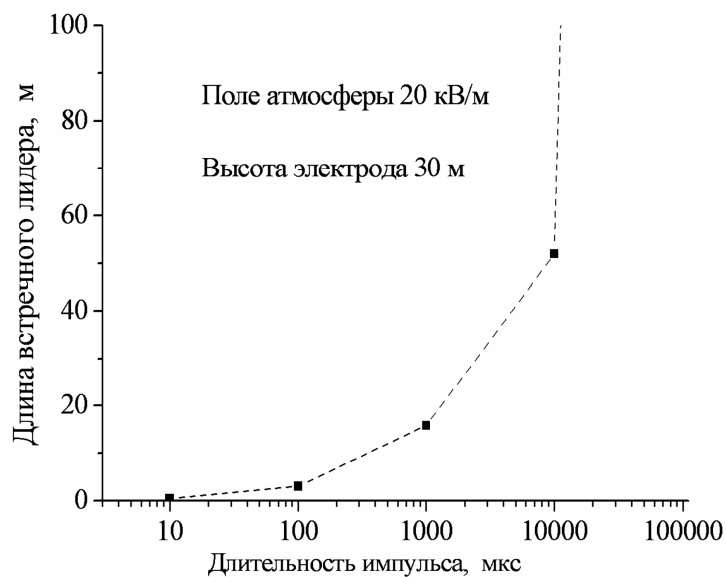


Рис. 3

Зависимость длины встречного лидера, сформированного от стержневого электрода высотой 30 м под действием управляющего импульса напряжения амплитудой 2,5 МВ различной длительности

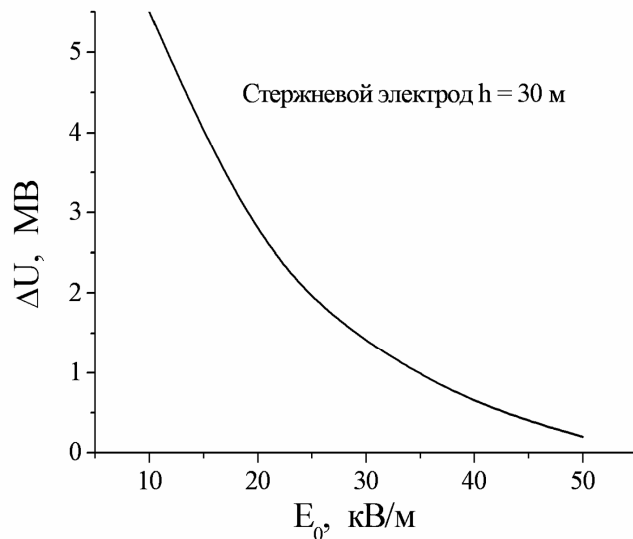


Рис. 4

Расчетная амплитуда эффективного управляющего воздействия на встречный лидер от стержневого электрода высотой 30 м в различном электрическом поле атмосферы

В прикладном отношении наибольшее внимание заслуживает ситуация, когда встречный лидер формируется в электрическом поле существенно более сильном по сравнению с тем, в котором стартовали и развивалась ультра корона. Такой расчетный компьютерный вариант воспроизводит развитие встречного разряда при значительном сближении с рассматриваемым заземленным электродом канала лидера нисходящей молнии, транспортирующего значительный

заряд в чехле и на своей поверхности. Результаты модельных расчетов, представленные на рис. 4 демонстрируют зависимость амплитуды эффективного управляющего напряжения от величины внешнего электрического поля атмосферы для электрода высотой 30 м. Принято, что длительность управляющего импульса не ограничена, а ультра корона существовала на вершине радиусом 2 см в течение 10 с при линейном росте электрического поля до 20 кВ/см. По расчетным данным в электрическом поле атмосферы свыше 35 кВ/м для устойчивого формирования встречного лидера достаточно подать на электрод импульс напряжения менее 1 МВ. Однако, и в этом случае эффективность управления в сильной степени зависит от длительности управляющего импульса. Так, в электрическом поле атмосферы 40 кВ/м при импульсе напряжения 600 кВ, достаточном при неограниченной длительности для формирования восходящей молнии от электрода высотой 30 м, при длительности импульса в 100 мкс длина встречного лидера составила 3 м, а при 10 мкс всего 1,8 м. Последствия подобных воздействий вряд ли значимы в практическом отношении.

Практический интерес представляют два принципиально разных пути использования управляющих воздействий. С одной стороны, хотелось бы отказаться от работы с запуском малых ракет и генерировать восходящие молнии на открытых высоковольтных стендах, используя для управляющих воздействий ГИН ультравысокого напряжения с большой емкостью в ударе. Другая задача связана с увеличением радиуса защиты молниеотвода при помощи более раннего старта и активного развития от него встречного лидера. Технические требования к источнику управляющего напряжения здесь принципиально разные из-за различных ограничений по энергоемкости, выходному напряжению, а главное, - по габаритам.

Электрическое поле грозового облака у поверхности земли с растительным покровом и различными сооружениями вряд ли может превысить 20 кВ/м. Именно на это электрическое поле атмосферы и приходится ориентироваться, оценивая управляющее напряжение ΔU , принципиально способное возбудить восходящую молнию. Типовые высоты ГИН открытой установки находятся в пределах 30 м. Это второй исходный параметр оценочного компьютерного расчета. Большинство ГИН успешно работают с выходным напряжением на уровне 5 МВ. Тем самым задается предельная величина напряжения ΔU . Об условиях старта восходящего лидера беспокоиться не приходится. При управляющем напряжении мегавольтного уровня они будут выполнены автоматически при размещении стартового электрода на крыше ГИН.

Результаты компьютерного расчета на рис. 5 демонстрирую длину сформированного встречного лидера при различной длительности управляющего импульса, снижающегося по экспоненте. Компьютерное моделирование показало, что для производства жизнеспособного лидера, рождающего восходящую молнию, длительность управляющего импульса должна быть

не меньше 5 мс. Только при такой длительности ток головки канала и скорость восходящего лидера не снижаются по мере его формирования уже после выхода за пределы области, заполненной объемным зарядом ультра короны (рис. 6),

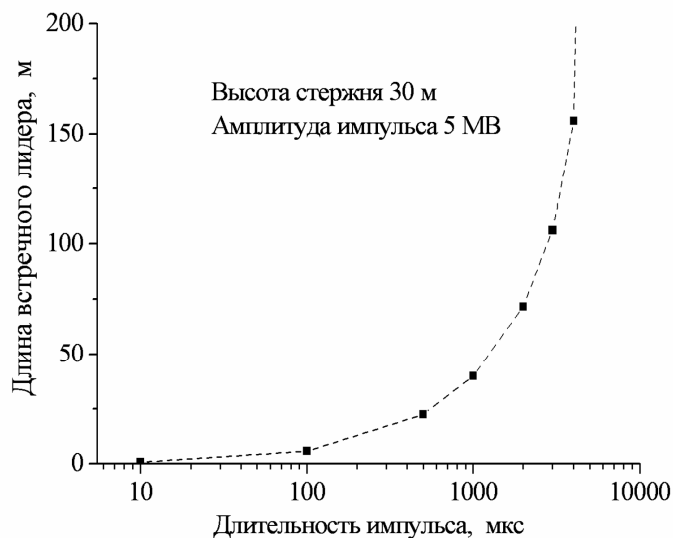


Рис. 5

Зависимость длины встречного лидера, сформированного от электрода высотой 30 м под действием управляющего импульса в 5 МВ различной длительности

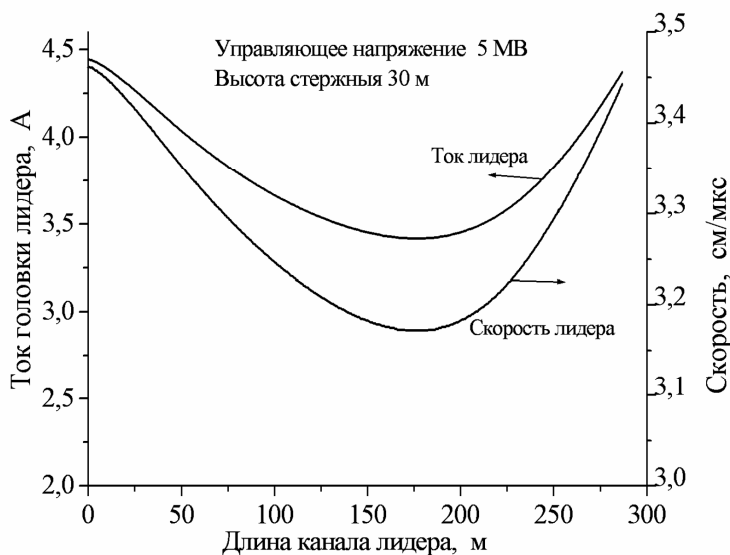


Рис. 6

Динамика изменения скорости роста встречного лидера и тока его головки при воздействии управляющего импульса амплитудой 5 МВ при длительности 5 мс. Электрическое поле атмосферы 20 кВ/м

По результатам компьютерного расчета средний ток источника управляющего напряжения, поставляющий энергию в канал восходящего лидера, близок к 1 А. Так, за время около 8.75 мс в лидер длиной 285 м был поставлен электрический заряд около 7,5 мКл. При этом напряжение на выходе управляющего источника снизилось от 5,0 до 2,15 МВ. Для

обеспечения такого режима работы источника управляющего напряжения, его выходная емкость должна быть не меньше 2000 пФ. Требование без проблем обеспечивается современным ГИН, собранным, например, по схеме Фитча, даже при учете расхода энергии на внутренние потери при формировании столь длительного импульса напряжения.

Таким образом, возбуждение триггерных молний при помощи управляющих воздействий высокого напряжения представляется принципиально возможным. Тем не менее, необходимо отметить, что технические возможности искусственного возбуждения триггерных молний сильно усложняются при попытках работы с более слабым электрическим полем атмосферы. Например, при его напряженности $E_0 = 10$ кВ/м не удастся использовать источник с выходным напряжением 5 МВ при емкости в ударе меньше 50- 60 нФ.

Крайне малая перспективность повышения эффективности молниеотводов за счет управляющего напряжения вытекает из уже выполненного анализа. Как известно, радиус стягивания молний пропорционален высоте стержневого молниеотвода ($R_{at} = 3h_M$). Для увеличения радиуса хотя бы в 2 раза высоту молниеотвода надо приблизительно удвоить за счет восходящего лидера. Как это следует из расчетных данных рис. 5, для этой цели потребуются импульс управляющего напряжения амплитудой 5 МВ и длительностью около 500 мкс – абсолютно нереальные параметры для ординарного молниеотвода. Даже если предусмотреть систему синхронизации и подавать управляющий импульс уже при значительном усилении электрического поля атмосферы зарядом приближающейся нисходящей молнии, положение не станет заметно благоприятней в практическом отношении. Например, по результатам численного моделирования в поле атмосферы 40 кВ/м импульс неограниченной длительности при напряжении 600 кВ, способный обеспечить развитие восходящей молнии от электрода высотой в 30 м, создаст лидер длиной всего в 3,2 и 1,8 м при длительности в 100 и 10 мкс соответственно. Столь малое увеличение эффективной высоты электрода не может иметь практического значения.

Особый интерес к амплитуде и длительности управляющего воздействия возникает в связи с оценкой эффективности молниеотводов с ранней стримерной эмиссией (ESE молниеотводы) самого различного конструктивного исполнения, которые особо активно рекламируются на мировом и отечественных рынках средств молниезащиты. . Конструкция претендует на опережение старта стримерной вспышки с молниеотвода по сравнению с защищаемым объектом за счет подачи на вершину молниеотвода импульса высокого напряжения, сформированного внутренним источником. Он черпает энергию из электрического поля атмосферы благодаря току ультра короны, которая формируется от острий “активной” насадки. Объем насадки, где размещается источник управляющего напряжения, как правило, не превышает нескольких литров. При таком объеме источник, собранный по классической схеме

Маркса, не в состоянии обеспечить длительность импульса более 1 – 3 мкс при амплитуде близкой к 200 кВ, заявляемой в рекламных проспектах.

Чтобы произвести анализ результатов столь кратковременного воздействия напряжения на формирование импульсного разряда, недостаточно результатов численного моделирования по используемым компьютерным моделям, поскольку они не учитывают влияния объемного заряда самой стримерной вспышки, предшествующей старту встречного лидера. Следует иметь в виду двойственную природу такого влияния. Во-первых, ток стримерной вспышки разогревает ее стембель, где при определенном энергокладе возможно зарождение канала встречного лидера. Во-вторых, заряд стримерных ветвей резко снижает электрическое поле в приэлектродной области, задерживая продвижение родившегося лидерного канала на время, необходимое для восстановления поля за счет дополнительного подъема напряжения и в результате дрейфа объемного заряда в глубину разрядного промежутка. Эффект экранирования очень значителен. По экспериментальным данным [11] изменение заряда стримерной вспышки от 0,4 до 1,4 мкКл приводило к увеличению напряжения старта жизнеспособного лидера от стержневого электрода радиусом 1,5 см от 400 до 800 кВ.

Прямые измерения показали, что последствиями кратковременного дополнительного импульса напряжения оказывается не ускорение старта встречного лидера, а его задержка на десятки микросекунд, что полностью снимает вопрос об эффективности ESE- молниеотводов. А если и говорить об эффективности, то исключительно в негативном плане. Защитное действие такого молниеотвода должно быть заметно слабее, чем традиционного аналогичной высоты.

С учетом этого факта становятся понятными результаты испытаний ESE молниеотводов в полевых и лабораторных условиях [2,3], показавшие их существенно меньшую эффективность по сравнению с обычными стержневыми равной высоты, - более чем убедительное основание для отказа от их применения в практике молниезащиты.

Заключение

1. Анализ механизмов развития встречного разряда от наземных сооружений в грозовой обстановке показал, что управляющее воздействие высокого напряжения должно быть направлено на изменение момента старта и обеспечение устойчивости развития встречного лидера. Изменение условий возникновения стримерной вспышки само по себе не является эффективным.

2. Получено аналитическое выражение для оценки величины управляющего воздействия на встречный лидер в атмосфере, свободной от объемного заряда ультра короны. В типичном грозовом поле 20 кВ/м требуемая амплитуда управляющего импульса неограниченной длительности, возбуждающая триггерную молнию, снижается от 2,4 до 0,6 МВ при увеличении

высоты стержневого заземленного электрода в пределах 10 - 100 м; учет объемного заряда ультра короны повышает амплитуду эффективного управляющего импульса еще на 0,5 МВ

4. Современные ГИН открытой установки с выходным напряжением от 5 МВ пригодны для инициирования восходящих триггерных молний в грозовой обстановке.

5. Резкое снижение эффективности управляющих воздействий на встречный лидер при сокращении длительности импульса напряжения исключает их применение в практической молниезащите для расширения радиуса защиты молниеотводов.

Литература

1. *Hartono A, Robiah I* // Proceedings 25th International Conference on Lightning Protection, ICLP Rhodes, 2000 P. 357
2. *Куприяенко В.М.* // Труды IV Российской конференции по молниезащите. С. Петербург. 2014. с. 214.
3. *W. Rison* // 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491), Toronto, Ont., 2003, pp. 2195-2200 Vol. 4, doi: 10.1109/PES.2003.1270959.
4. *Lightning Protection. Golde R.H. Edit. Academic Press. 1977*
5. *Александров Н.Л., Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* // Физика плазмы. 2005. т. 31, С. 84.
6. *Александров Н.Л., Базелян Э.М., Драбкин М.М., Карпенгер Р.Б., Райзер Ю.П.* // Физика плазмы. 2002, т. 28, с. 1032.
7. *Aleksandrov N.L., Bazelyan E.M., Carpenter R.B., Jr., Drabkin M.M., Raizer Yu.P* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. V. 34, P. 3256
8. *Bazelyan E M, Raizer Yu P. Aleksandrov N L* // Plasma Sources: Sci. Technol. 2008, 17 (024015), 17.
9. *Базелян Э.М., Попов Н.А.* // Физика плазмы. 2020. т. 46, с. 237
10. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* // Искровой разряд. М: Изд. МФТИ. 1977. 320 с.
11. *Райзер Ю.П.* // Физика газового разряда. – Долгопрудный: Интеллект. 2009. 734 с. \
12. *Les Renardieres Group 1977 Positive discharges in long air gaps—1975 results and Conclusions* // *Electra*/ 1977. V **53**, p/ 31
13. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* // Физика молнии и молниезащиты. М. Физматлит. 2001 319 с.
14. *Мучник В.М.* // Физика грозы. Л: Гидрометеиздат . 1974. 351 с.