

М.М.РЕЗИНКИНА, докт.техн.наук;

В.В.КНЯЗЕВ, канд.техн.наук; НТУ «ХПИ»

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОЦЕСС ПРОДВИЖЕНИЯ ЛИДЕРНОГО КАНАЛА МОЛНИИ К ЗЕМЛЕ

Описано статистичну модель процесу орієнтування каналу блискавки на наземні об'єкти. Дана модель дозволяє оцінити імовірність перехоплення блискавки блискавковідводом. Ця модель може бути використана для розрахунку розподілів імовірності влучення блискавкою об'єктів, що захищаються системою блискавкозахисту.

Statistical model of the process of lightning channel orientation on the grounded objects has been described. This model allows to evaluate probability of the lightning interception by lightning rod. The elaborated model can be used for estimation of the probability distribution of the lightning attachment to the protected objects and lightning rod.

1. Введение

В настоящее время в Украине эффективность молниезащиты определяется его зоной защиты [1]. Международные нормативные документы (см. например [2-4]) предусматривают необходимость определения вероятности поражения объектов молнией. Известна методика оценки риска вследствие поражения молнией объекта в целом [2]. При этом зона его возможного поражения характеризуется радиусом L и оценивается исходя из условия, что L в три раза превышает высоту объекта h_0 . Такой подход не учитывает возможность прорыва на объект молний, лидеры которых несут к земле большие потенциалы U_1 , близкие к предельным значениям, когда прорыв молнии может произойти с расстояния, большего, чем $L = 3h_0$ (например, при $U_1 \sim 200$ МВ для $h_0 \sim 10$ м, L составляет порядка 60 м, то есть в 2 раза превышает величину $3h_0$).

Существующие методы определения зон защиты молниезащиты не позволяют в полной мере учесть весь комплекс явлений, влияющих на процесс молниезащиты. Наличие ряда объектов, например, стартовые ракетные комплексы, нефтехранилища, поражение которых молнией может привести к большим материальным потерям, а также техногенным катастрофам вызывает необходимость разработки моделей, позволяющих более точно оценить вероятность прорыва на них молнии. Такие модели необходимы также при оценке эффективности новых средств молниезащиты и сравнении их с существующими.

Вследствие трудностей, с которыми приходится сталкиваться при определении вероятности поражения объектов молнией в естественных условиях, широкое распространение находит математическое и физическое моделиро-

вание данного процесса. Однако описанные в литературе результаты физического моделирования имеют ряд ограничений, не позволяющих применять их ко всему спектру молний, несущих к земле потенциалы различных уровней. Так, в модельных экспериментах по определению зон защиты молниеотводов (см. например [5]) расположение высоковольтного электрода (имитирующего лидерный канал молнии) и заземленного электрода (имитирующего молниеотвод) постоянно и определяется, например, соотношением $h/H = 20$, где h – высота молниеотвода; H – расстояние от высоковольтного электрода до земли (аналог высоты ориентировки молнии). В то же время, согласно современным теориям (см. например [3,6]), высота ориентировки лидера молнии определяется в основном его потенциалом U_1 , поскольку длина последней ступени распространения лидерного канала L_S пропорциональна U_1 , и зависит от h лишь когда уровни h и L_S близки. Причем, опыты на моделях по определению зон защиты молниеотводов проводились при неизменном расстоянии в азимутальном направлении между высоковольтным электродом, имитирующим лидерный канал молнии, и защищаемым объектом. Такой подход не позволяет учесть наличие молний со сравнительно небольшим потенциалом, имеющих малые значения L_S , которые могут приблизиться к объекту с небольшой высоты. Лидерные каналы данных молний при приближении к зоне защиты сбоку могут просто «не заметить» молниеотвод и ударить мимо него в зону декларируемой защиты.

Наиболее близкими к практике представляются модели, основанные на электрогеометрическом методе, положенном в основу стандарта МЭК [4]. Как отмечается в [7], данный метод предполагает наличие функциональной зависимости между дистанцией поражения R и током молнии в 1-м компоненте I_1 : $R(I_1)$. Однако при этом не учитывается ряд особенностей, присущих процессу продвижения лидера молнии, в частности, влияние распределения электрического поля на направление и скорость продвижения лидера молнии. Функциональная зависимость $R(I_1)$, косвенно связывающая ток молнии и потенциал ее лидерного канала, существенно отличается от таковой, приведенной, например, в [6]. Причем, как отмечается в [6], для экспериментального определения зависимости $R(I_1)$ нет фактических данных, а теоретические оценки различных авторов отличаются в несколько раз.

Для решения проблем практической молниезащиты представляется целесообразным разработка математической модели, описывающей стохастический процесс продвижения лидерного канала молнии на завершающем этапе его развития при приближении к земле. При этом необходимо учесть зависимость скорости продвижения канала лидера от напряженности электрического поля, характер распределения трехмерного поля в окрестности молниеотвода и защищаемых объектов, снижение сопротивления стримеров в сквозной фазе, величину сопротивления растеканию системы заземления исследуемых объектов. В настоящее время в мире накоплено большое количество экспе-

риментальных данных по электрофизическим характеристикам длинных искр и молний, а также зонам защиты одиночных молниеотводов. Эти данные были положены в основу разрабатываемой модели.

2. Основные принципы модели, описывающей процесс ориентировки лидера молнии на заземленные объекты

Согласно [8], при пробое длинных воздушных промежутков длина стримерной зоны примерно равна той высоте, с которой начинается ориентировка лидера на наземный электрод. Причем, это относится как к положительным, так и к отрицательным лидерам. Применим тот же принцип к сверхдлинным искрам – молниям. В соответствии с имеющимися экспериментальными данными, из-за большого сопротивления холодной плазмы стримерных каналов головка стримера теряет гальваническую связь с лидером, а множество стримеров образует стримерную зону, распределение электрического поля в которой близко к равномерному из-за выравнивания поля избыточным зарядом, расположенном в многочисленных головках стримеров [9]. Будем полагать, что так называемый «последний удар», то есть последняя ступень движения лидерного канала молнии к земле и расположенным на ней объектам, начинается, когда стримерная зона доходит до них. Причем, «последний удар» представляет собой продвижение в сквозной фазе канала лидера через стримерную зону. Будем полагать также, что именно с этого момента начинается процесс ориентировки лидера молнии на наземные объекты, в которые впоследствии и ударит молния. Под длиной стримерной зоны понимается расстояние от головки лидера, на котором стримеры останавливаются [6].

В [9] отмечается, что в сквозной фазе развития лидера в длинных воздушных промежутках наблюдается сильное ветвление каналов, причем одновременно развивается несколько параллельных ветвей со своими головками. Будем полагать, что на финальной стадии продвижения молнии к земле имеет место одновременное развитие нескольких конкурирующих лидерных каналов, причем возвратный удар будет происходить по тому из них, который первым достигнет узла с нулевым потенциалом. Учитывая, что диаметр канала лидеров на много порядков меньше их длины, а также расстояния между ними, не будем учитывать взаимное влияние электрических полей лидеров друг на друга.

Поскольку лидеры продвигаются в ионизированной стримерной зоне, а процесс их распространения носит стохастический характер, будем последовательно рассматривать все возможные направления распространения лидера. Причем, для определения вероятности поражения молнией исследуемых объектов, последовательно рассматривается приближение лидера к ним с различных расстояний в аксиальном и азимутальном направлениях, а также под различными углами к вертикальному направлению. Нулевым моментом времени при моделировании будем полагать момент начала сквозной фазы, то

есть момент касания стримерной зоной заземленного узла.

Полагается, что в сквозной фазе головка лидера подсоединена гальванически к рассматриваемому заземленному узлу через сопротивление соответствующего стримера из стримерной зоны: $R_F = R_{P_F} L_{st}$ (где R_{P_F} – погонное сопротивление каналов стримеров в сквозной фазе; L_{st} – длина стримерной зоны). При определении разрядного тока учитывается снижение величины R_F вследствие того, что погонное сопротивление стримера обратно пропорционально протекающему через него току, а L_{st} уменьшается по мере роста лидера.

При работе модели полагается, что произошло подсоединение лидерного канала молнии к рассматриваемому узлу, если либо его коснулся канал лидера, либо удельное сопротивление канала подсоединенного к нему стримера упало до величины, лишь в 10 раз превышающей удельное сопротивление лидерного канала (обычно погонное сопротивление стримерного канала на много порядков превосходит погонное сопротивление лидерного канала). Будем полагать, что это можно рассматривать как условие превращения стримерного канала разряда в лидерный, поскольку именно низкая проводимость канала стримера определяет отсутствие его гальванической связи с лидерным каналом.

Для описания процесса выбора лидером молнии объекта для удара используем известный принцип «минимальное время – максимальная вероятность». Этот принцип применяется к описанию физических явлений, а также процессов молниезащиты (см., например, [10]). Будем полагать, что вероятность попадания молнии в некоторый узел обратно пропорциональна времени продвижения до него лидера.

Описанная модель процессов развития лидерного канала молнии (подробнее см. [11]) была реализована в виде программного обеспечения для персонального компьютера. Адекватность расчета с помощью предложенной модели максимальных радиусов зоны защиты одиночных молниеотводов от поражения лидером молнии отрицательной полярности подтверждается совпадением полученных результатов с нормируемыми значениями для молниеотводов высотой ниже 150 м при двух уровнях вероятности перехвата ими молнии.

3. Критерии подобия между модельными экспериментами и разрядом молнии

В результате сравнения проведенных расчетов с помощью программного обеспечения, основанного на разработанной модели, описывающей электрофизические процессы продвижения лидера молнии к земле, с известными экспериментальными данными по высоковольтному пробое длинных разрядных промежутков, сформулированы требования, соблюдение которых позволяет добиться подобия между модельными экспериментами и разрядом молнии (при этом подразумевается соблюдение геометрического подобия между молниеотводом и защищаемыми объектами в модельных и натуральных

экспериментах):

1. Длина разрядного промежутка должна быть не меньше, чем длина максимального стримерного канала высоковольтного разряда для условий проведения экспериментов.

2. При изменении расстояния между заземленным и высоковольтным электродом необходимо также менять величину подаваемого на промежуток напряжения, чтобы смоделировать наличие молний с различным потенциалом, имеющих различную длину стримерной зоны.

3. При тестировании средств активной молниезащиты необходимо убедиться, что подаваемое на промежуток высокое напряжение достаточно для возникновения лидера с заземленного электрода, а расстояние между генерирующим восходящий лидер заземленным электродом и высоковольтным электродом превышает предполагаемую длину восходящего лидера и радиус его стримерной зоны.

4. Выводы

1. Разработанная модель электрофизических процессов, сопровождающих продвижение лидерного канала молнии, может быть использована для расчетов по сравнительной оценке молниеотводов различных типов, например активных, а также для определения вероятности прорыва молнии на исследуемые объекты различных пространственных конфигураций, в том числе высотой более 150 м.

2. Предложены рекомендации по выбору условий проведения модельных экспериментов, обеспечивающих их адекватность моделируемым явлениям.

3. При разработке новых нормативных документов в области молниезащиты может быть использована разработанная методика расчета вероятности поражения молнией объектов. Это позволит уточнить и научно обосновать меры, принимаемые для уменьшения вероятности поражения молнией рассматриваемых объектов.

Список литературы. 1. РД 34.21.122-87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. – М.: Энергоатомиздат, 1989. 2. Assessment of the risk of damage due to lightning // Technical report IEC 1662. – Geneva. – 1995. – 109 p. 3. IEC 1312-1. International standard «Protection against lightning electromagnetic impulse». – Geneva: IEC. – 1995. – 81 p. 4. The International Standard IEC 1024-1. Protection of structures. – Part I: General Principles. – 1990. 5. Электрофизические основы техники высоких напряжений / Под ред. И.П.Верещагина, В.П.Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 541 с. 6. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. – М.: Физматлит, 2001. – 319 с. 7. Ларионов В.П. Основы молниезащиты. – М.: Знак, 1999. – 103 с. 8. Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И. Физические и инженерные основы молниезащиты. – Л. Гидрометеозат, 1978. – 223 с. 9. Горин Б.Н., Шкилев А.В. Электричество. – 1974. – № 2. – С. 29-38. 10. Briet R. The International Journal of EMCTM, ITEMTM. – 1997. – P. 91. 11. Резинкина М.М., Князев В.В., Кравченко В.И. Статистическая модель процесса ориентировки лидера молнии на наземные объекты // Журнал технической физики. – 2005. – Т. 75, № 9. – С. 44-51.

Поступила в редколлегию 25.10.2006.