

В настоящее время в России нет нормативно-технической документации по защите от вторичных проявлений молниевых разрядов. В существующих документах описываются только методы построения зон молниезащиты тех или иных объектов.

Между тем, как считают наши московские авторы, решение вопроса защиты должно начинаться с определения степени опасности для того или иного объекта со стороны молниевых разрядов.

ПАРАМЕТРЫ ИМПУЛЬСА МОЛНИИ

Расчет для защиты микропроцессорной аппаратуры и ее цепей

*Михаил Матвеев, к.ф.-м.н.,
Михаил Кузнецов, к.ф.-м.н.,
Иван Дутов,
Дмитрий Осьмушкин,
Руслан Мамлеев,
ООО «ЭЗЭП», г. Москва*

Опасность повреждения чувствительной аппаратуры и ее цепей будет зависеть от многих факторов, один из которых – параметры молниевых импульсов [1, 2]. Очевидно, что чем выше ток молнии, тем больше опасность. Аналогично можно сказать и о крутизне фронта молниевых импульсов – чем она выше, тем больше могут быть разности потенциалов, возникающие между различными точками объекта (при равных амплитудах тока), и тем, соответственно, выше опасность.

В этом случае необходимо определить, какие параметры молниевых импульсов (в первую очередь амплитуду и крутизну фронта) следует принимать в расчетах. Однако в российских документах возможность варьировать параметры молниевых импульсов либо вовсе не упоминается, либо рассматривается не достаточно. Так, в [1] приводится только 3 возможных набора параметров молниевых импульсов (токи 200, 150 и 100 кА). В международных стандартах [2] приведены данные по вероятностям молнии, однако для выбора предоставлены те же три набора со значениями токов – 200, 150 и 100 кА. Это приводит к тому, что, например, для объектов электроэнергетики используется только один набор параметров с током 100 кА.

Нам представляется, что такая ситуация может привести к необоснованным затратам на обеспечение защиты от вторичных проявлений молниевых разрядов.

Рассмотрим пример. Для небольшого здания, расположенного в центре города (например ПС на основе КРУЭ), опасность будет минимальна, поскольку разряд молнии в такой объект будет редким событием – один удар в 30 лет. Вероятность молниевых разрядов для так называемой отрицательной молнии с током 100 кА и выше, согласно [2], составляет менее 3,5%. Это означает, что разряд с током более 100 кА возможен 1 раз в ~850 лет. Естественно, что выбирая в этом случае для расчета ток молнии 100 кА, мы построим систему защиты от вторичных проявлений молнии с совершенно не нужным огромным запасом.

С другой стороны, для ПС 500 кВ с несколькими ОРУ вероятность поражения молнией будет значительно выше (несколько ударов молнии в год), соответственно, возрастает и опасность. За срок службы такого объекта в его систему молниезащиты возможен по крайней мере один разряд молнии с током 135 кА. В этом случае использование в расчетах тока 100 кА будет, наоборот, приводить к необоснованному уменьшению надежности системы защиты от проявлений молниевых разрядов.

Таким образом, при проектировании систем молниезащиты и защиты от вторичных проявлений молниевых разрядов необходимо иметь методику выбора параметров молнии, позволяющую обеспечивать необходимую надежность защиты и страховку от необоснованного удорожания таких систем. Ниже будет рассмотрен возможный метод.

ПАРАМЕТРЫ МОЛНИЕВОГО РАЗРЯДА

При рассмотрении проблемы опасности влияния молниевых разрядов на чувствительную аппаратуру и ее вторичные цепи, следует понимать, какие именно параметры импульса молнии

будут представлять наибольшую опасность. В [1], рассматриваются три типа импульса тока, протекающего при ударе молнии: первый, последующие и длительный. Форма первого и последующего импульсов тока описывается следующей формулой:

$$i(t) = [I(t/\tau_1)^{10} \cdot \exp(-t/\tau_2)] / h \cdot [1 + (t/\tau_1)^{10}], \quad (1)$$

где I – максимум тока; h – коэффициент, корректирующий значение максимума тока; t – время; τ_1 – постоянная времени для фронта; τ_2 – постоянная времени для спада.

На рис. 2 графически представлен вид импульса молнии и его основные параметры [2]. Длительный импульс принимается прямоугольным со средним током I и длительностью T . Согласно [1], импульсы тока молнии характеризуются следующим набором параметров:

- максимум тока I , кА;
- длительность фронта T_1 , мкс;
- время полуспада T_2 , мкс;
- средняя крутизна a , кА/мкс;
- заряд в импульсе Q , Кл;
- длительность T , с (для длинного импульса).

Следует отметить, что в рамках проблемы защиты вторичных цепей и чувствительной аппаратуры от вторичных проявлений молниевых разрядов, длительный импульс не может представлять существенной опасности для вторичных цепей и аппаратуры, т.к. предполагается, что молниезащита объекта обеспечена и все удары молний происходят в молниеприемники объекта. Это значит что основная часть тока молнии растекается по конструкциям и заземлению молниеприемника, а не по проводящим элементам вторичных цепей, и, как следствие, термический эффект для цепей будет незначителен. По этой же причине неопасными являются такие параметры, как время полуспада, заряд в импульсе и удельная энергия в импульсе.

Таким образом, по условиям защиты вторичных цепей и аппаратуры от вторичных проявлений молниевых разрядов, важными параметрами являются только ток молнии и длительность фронта. Следует отметить, что средняя крутизна фронта напрямую связана с длительностью фронта и возможно рассмотрение либо крутизны фронта, либо его длительности.

МЕТОДИКА ВЫБОРА ВЕЛИЧИНЫ ТОКА МОЛНИИ

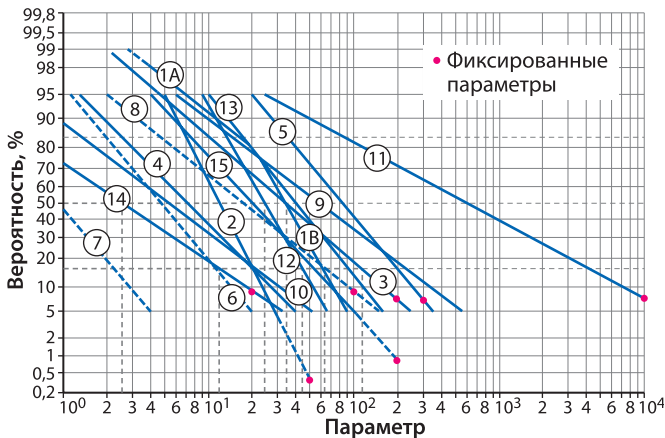
Согласно [2], величина тока молнии варьируется только в зависимости от уровня защиты объекта, что, как указывалось выше, не совсем корректно. Для более точной оценки опасности со стороны молниевых разрядов для микропроцессорной аппаратуры и вторичных цепей необходимо производить варьирование величины тока молнии в зависимости не только от уровня защиты объекта, но и от других условий объекта (размеров, климатических условий и т.п.).

Предлагаемый метод позволяет, по нашему мнению, осуществлять более гибкий подход по выбору тока молнии.

Сначала, согласно [2], определяется количество грозовых разрядов в объект. Затем вычисляется так называемая площадь

Параметры молниевых разрядов, приведенные в МЭК-62305-3

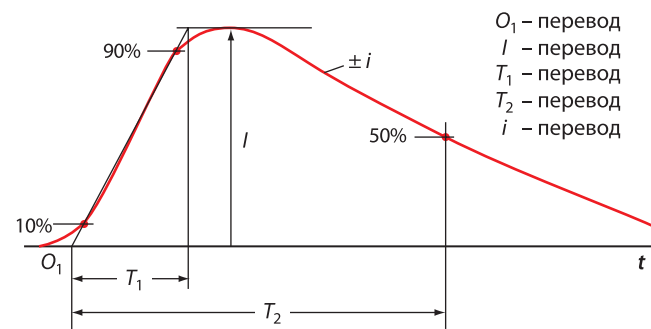
Рис. 1 •



Из представленных кривых нас интересуют № 1а и 1б (вероятность возникновения молнии с отрицательным током), № 3 (вероятность возникновения молнии с положительным током), № 12 ($di/dt_{0,1/0,9}$ – скорость нарастания фронта тока молнии, несущей отрицательный заряд), № 14 ($di/dt_{0,1/0,9}$ – скорость нарастания фронта тока молнии, несущей положительный заряд).

Параметры формы импульса согласно [5].
Здесь $di/dt_{0,1/0,9}$ – тангенс угла наклона отрезка, проведенного между отметками 10% и 90% от величины пикового тока (отражает скорость нарастания/крутизну фронта)

Рис. 2 •



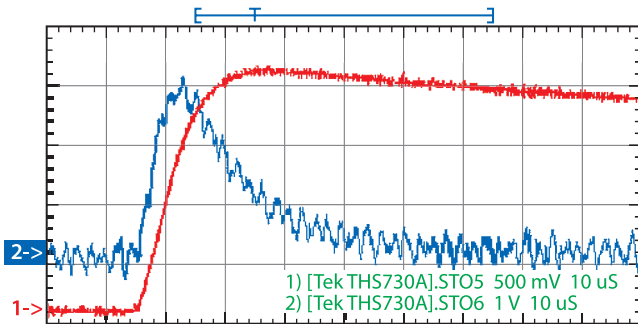
1/2

сбора молниевых разрядов, которая зависит только от геометрических параметров объекта (формулы для расчета приводятся в [3 и 2]). Так, чем объект выше и чем больше его площадь, тем больше молниевых разрядов может происходить в него за определенное время. После этого определяется ожидаемое количество ударов молнии в защищаемую территорию за год. Зная срок службы объекта до полной реконструкции, легко определить среднее число ударов в объект $N_{\text{ударов}}$.

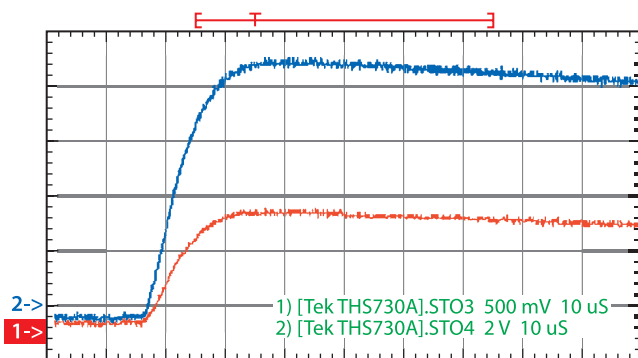
Теперь, основываясь на рассчитанных значениях, можно определить максимальную (как для положительных, так и для отрицательных импульсов) наиболее вероятную величину тока молнии, исходя из данных, представленных в [2]. Она будет соответствовать значению вероятности $p = 1 / (N_{\text{ударов}} + 1)$. При этом отдельно определяется вероятность для положительно и отрицательно заряженных молний. Следует отметить, что таким же способом можно определить и другие максимальные наиболее вероятные параметры молнии для того или иного объекта.

Величина тока, молнии рассчитанная по данному методу, позволяет более точно оценить максимальные разности потенциалов, воздействующие на оборудование объекта при ударе молнии в элементы системы молниезащиты. Это в свою очередь позволяет оптимально организовать защиту оборудования как с точки зрения безопасности, так и по условиям минимизации экономических затрат.

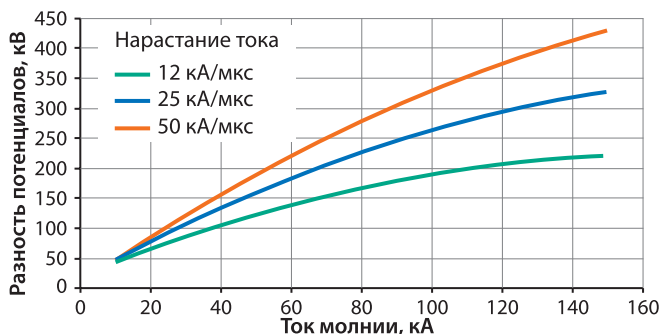
• **Рис. 3.** Вид фронтальной части импульса молнии (красная линия) и помехи (синяя линия) во вторичных цепях (протяженные заземлители)



• **Рис. 4.** Вид фронтальной части импульса молнии (красная линия) и помехи (синяя линия) во вторичных цепях (в условиях непротяженных заземлителей)



• **Рис. 5.** Результаты расчетов разностей потенциалов, возникающих при ударах молний с различными скоростями нарастания тока



НЕДОСТАТКИ МЕТОДА

Следует отметить, что в рамках описанного метода расчет временных параметров импульса не производится, и они принимаются согласно [1] и [2], т.е. 10/350 мкс. Именно это и является существенным недостатком, который особенно сильно сказывается при расчетах, выполняемых для объектов электроэнергетики. Это, в первую очередь, связано с тем, что на объектах электроэнергетики, как правило, присутствуют протяженные заземлители, обладающие высокой реактивной составляющей сопротивления. Для таких случаев максимальный уровень помехи во вторичных цепях, в первую очередь, будет определяться скоростью нарастания фронта (рис. 3)

Обратное можно сказать про объекты, где элементы системы молниезащиты имеют обособленное заземление (например, газоконденсаторные станции) и, как следствие, небольшую реактивную составляющую. Для таких молниеприемников форма импульса тока молнии, как правило, повторяет форму импульса напряжения (рис. 4)

Для оценки влияния скорости нарастания тока молнии на уровень помехи во вторичных цепях расчетными методами была проведена оценка для случая большого количества протя-

женных заземлителей, имеющих форму сетки с шагом 10x10 м. Разность потенциалов измерялась между узлом заземляющего устройства вблизи молниеприемника и удаленной от молниеприемника точкой заземляющего устройства. В расчетах использовались различные значения крутизны нарастания фронта (12, 25 и 50 кА/мкс) и тока молнии (от 10 до 150 кА). Результаты представлены на рис. 5

Скорость нарастания тока молнии значительно влияет на разность потенциалов между различными точками заземляющего устройства (следовательно, и на уровень помехи во вторичных цепях). Так, например, при токе молнии 100 кА увеличение крутизны импульса в 4 раза приводит к увеличению разности потенциалов в 2 раза. Здесь следует заметить, что это справедливо только для рассматриваемого в расчете объекта. Для объектов с другой конфигурацией заземлителей указанные соотношения могут быть иными.

Таким образом, для организации эффективной и оптимальной защиты оборудования объекта от воздействий, возникающих при ударах молний в элементы системы молниезащиты, необходимо производить расчет не только величины тока молнии, но и временных параметров токового импульса (величины di/dt). Однако, вероятностные зависимости, приведенные в [2] для di/dt и I , не связаны между собой. Для примера, согласно [2] амплитуда 50% отрицательно заряженных молний не будет превышать 33,3 кА, при этом параметр di/dt для этой выборки может быть различным. С другой стороны, параметр di/dt 50% отрицательно заряженных молний не будет превышать 24,3 кА/мкс, но при этом амплитуда также может принимать различные значения. Значит, количество молний, имеющих параметры фронта и амплитуду, равную 33,3 кА, и di/dt , равный 24,3 кА/мкс, окажется намного меньше 50%. Это говорит о том, что в [2] нет прямой связи между di/dt и I , хотя, следуя логике, эти параметры должны быть напрямую связаны.

Таким образом, выбирая независимо оба параметра (I и di/dt) в соответствии с определенной вероятностью, мы можем необоснованно одновременно завязать ток и скорость нарастания фронта, что приведет к значительному увеличению рассчитанных величин разностей потенциалов, воздействующих на защищаемое оборудование. Поэтому отсутствие связи между вероятностными зависимостями параметров I и di/dt может привести к дополнительным затратам при организации защиты вторичных цепей и аппаратуры. Однако если информация о связи между указанными параметрами появится, возникнет и возможность однозначно выбирать худшие по условиям воздействия на защищаемую аппаратуру параметры молнии.

В отсутствии указанной статистической информации представляется оптимальным использование метода выбора параметра только по току молнии при фиксированном среднем di/dt или, что выглядит предпочтительнее, при фиксированном времени возрастания импульса тока (т.е. при фиксированной форме импульса с параметрами 10/350 мкс).

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ МОЛНИЕВОГО РАЗРЯДА

Для определения рассматриваемых параметров импульса молнии можно воспользоваться, например, вероятностными зависимостями, приведенными в [2]. В качестве основы для этого документа взяты измерения Бергера [4] и Андерсена [5]. В [2] для вероятности одного и того же события можно выбрать два различных тока. Один – для нисходящей молнии, несущей положительный заряд, другой – для нисходящей молнии, несущей отрицательный заряд.

При этом в [2] нет прямого указания, величину какого из токов выбирать в качестве расчетной или же необходимо использовать оба значения. В документе, кроме того, приводятся величины производной di/dt , которые также могут быть использованы для расчетов. Как было сказано выше, для объектов электроэнергетики именно она и будет определять максимальное электромагнитное воздействие на вторичные цепи (из-за наличия существенной реактивной составляющей сопротивления). Однако таких значений снова оказывается два – одно для молниевых разрядов с положительным зарядом, другое для молниевых разрядов с отрицательным зарядом.

Нельзя не учитывать положительно заряженные молнии и выбирать для расчетов статистику только отрицательно заряженных молний, ссылаясь на текст МЭК и [1], о том, что только 10% молниевых разрядов имеют положительный заряд.

Необходимость учета молний обеих полярностей легко видеть на следующем примере. В объект размером 100x100 м (площадь сбора зарядов $\approx 80000 \text{ м}^2$), расположенный в зоне с грозовой активностью 40–60 часов в год за 30 лет произойдет примерно 10 ударов молнии. Тогда хотя бы одна из молний будет иметь положительный заряд. Это означает, что нельзя отбросить вариант возникновения молний с положительным зарядом.

Но даже решив учитывать обе полярности, невозможно получить четкого представления о том, каково соотношение положительно и отрицательно заряженных молний в том или ином регионе земного шара. В [2] принята некоторая усредненная цифра (1 к 9) соотношения положительных и отрицательных молний, которая не учитывает географических и климатических особенностей расположения объекта. Известно, что плотность нисходящих молниевых разрядов на землю может существенно различаться по регионам земного шара и зависит от геологических, климатических факторов, а также загрязненности атмосферы. Это значение увеличивается от полюсов к экватору, но практически равно нулю в пустынях. Соответственно все это влияет на число грозовых часов и на соотношение разно заряженных молний.

Приведем пример с США, для которых имеются такие статистические данные. На западном побережье может быть более 20% положительно заряженных молний от общего числа [6], тогда как на восточном – менее 4–6%. В Японии количество положительно заряженных молний доходит до 20–40%. При этом грозовой сезон длится весь год. Отметим, что написано в [3]: «Соотношение полярностей разрядов молнии зависит от географического положения местности. В отсутствие местных данных принимают это соотношение равным 10% для разрядов с положительными токами и 90% для разрядов с отрицательными токами.» Поскольку для России такой статистики в открытых источниках нет, то приходится использовать указанное соотношение, совпадающее с приведенным в [2].

Таким образом, при расчете величины тока молнии, исходя из данных [1] и [2], мы обязаны учитывать молниевые разряды обеих полярностей. Однако, как это сделать, из указанных документов пока не ясно. Авторы [2] сделали попытку учесть обе полярности именно путем принятия единой формы импульса с фиксированным временем нарастания. Это удобно, поскольку позволяет варьировать только один параметр (величину тока молнии), что и сделано в описанном выше методе определения максимального тока молнии для конкретного объекта. С другой стороны, как показали расчеты в большинстве случаев, импульсы положительной полярности менее опасны, чем импульсы отрицательной полярности. Опасность импульсов положительной полярности следует учитывать только в случае очень больших объектов и/или расположенных в районах с высокой грозовой активностью. В последнем случае необходимо, определив число ударов молнии в объект за весь срок службы и приняв, например, приведенное в [2] соотношение числа положительных и отрицательных молний, определить отдельно число ударов положительно заряженных молний в объект, и отдельно – число отрицательно заряженных. После получения вероятности ударов молнии с каждой из полярностей необходимо вычислить параметры молнии с той и другой полярностью и определить, какие из них будут приводить к возникновению большей опасности для аппаратуры и ее цепей. Определенные таким образом параметры молнии и следует использовать для дальнейших расчетов.

ВЫВОДЫ

Исходя из сказанного, можно сделать следующие выводы:

1. При оценке опасности молниевых разрядов, необходимо:
 - учитывать влияние особенностей объекта (геометрические размеры, уровень грозовой активности в регионе, и т.п.) на параметры импульса молнии;
 - учитывать как ток молнии, так и скорость нарастания фронта импульса молнии.
2. В настоящее время отсутствует статистическая информация по связи вероятностных зависимостей I и di/dt , а также по количеству положительных и отрицательных молниевых разрядов для различных регионов РФ.
3. Ввиду отсутствия указанной статистической информации, предложенный в статье метод оценки параметров импульса молнии представляется наиболее эффективным.

4. Необходимо начать дискуссию, имеющую целью определить наиболее оптимальный метод как получения, так и использования необходимых статистических данных, актуальных именно для территории РФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. СО 153-34.21.122-2003 «Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций».
2. МЭК 62305 Lightning protection (Молниезащита).
3. РД 34.21.122-87 «Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений».
4. Berger K., Anderson R.B., Kroninger H. «Parameters of lightning flashes», 1975. Electra 80: 223-37.
5. Anderson R.B., Eriksson A.J. «Lightning parameters for engineering application», 1980. Electra 69: 65-102.
6. Amy E. Becker, Dr. Patrick S. Market, «A study of lightning flashes attending periods of banded heavy snowfall». Thesis Supervisor. 2007.