

## **МОЛНИЕВАЯ ЗАЩИТА НА УРОВНЕ 21 ВЕКА ДЛЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ; ВЗРЫВООПАСНЫХ И НЕУСТОЙЧИВЫХ МАТЕРИАЛОВ.**

Ричард Киссл; Президент

Национальный Институт по Молниевой защите (NLSI)

[www.lightningsafety.com](http://www.lightningsafety.com)

### 1. АБСТРАКТ

Потери от поражений молнией в гражданском секторе США оцениваются в 4-5 миллиардов долларов в год (NLSI, 1999). В государственном и оборонном секторах, комиссия по безопасности взрывных операций министерства обороны США (DDESB) зарегистрировала 88 случаев взрывов амуниции, вызванных молнией, без указания стоимости потерь и количества вызванных смертей. DDESB был сформирован после взрыва в июле 1926 года в Пикатинни Арсенал, в результате которого погибло 14 человек и потери составили 70 миллионов долларов. Министерство Энергетики США зарегистрировало 346 случаев поражения молнией в объекты министерства в течение периода 1990-2000. Недавние инциденты поражения молнией арсеналов в России включают: июнь 1998 года вблизи Лозиный (Екатеринбург), июнь 2001 года вблизи Нерчинска (Сибирь), и июль 2001 года в Бурятии. В Бейра, Мозамбик (октябрь 2002), в результате поражения молнией произошел взрыв в депо амуниции, вызвав значительные материальные и человеческие потери. В связи с перечисленными инцидентами трудно утверждать что катастрофические последствия поражений молнией случаются редко. Как можно избежать потерь от поражения молнией в чувствительной объектах? Настоящая статья предлагает соответствующие этапы планирования молниевой защиты, применимые в большинстве современных условий.

### 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПОВЕДЕНИЕ МОЛНИИ.

2.1. Физика молнии. Характеристики молнии включают уровни токов достигающих 400 кА с 50% средним значением около 25 кА, температуры до 15.000 С, и напряжений в сотни миллионов вольт. Около десяти внутриоблачных молний приходится на одну молнию между облаком и землей. Глобально, около 2000 происходящих гроз вызывают около 50-100 разрядов на землю каждую секунду. Молния-это явление которое поддерживает электрический баланс земли. По современным представлениям процесс развития молнии между облаком и землей является процессом развития канала плазмы нисходящего лидера, продвигающего ступенями от грозового облака к земле. Расположенные на земле наружные терминалы как изгороди, деревья,

лезвия травы, углы зданий, люди, громоотводы, столбы электропередач и т.д. вызывают разную степень индукционной электрической активности. При напряжении электрического пробоя, на этих терминалах могут формироваться восходящие стримеры. При усиливающемся электрическом поле некоторые нисходящие лидеры придут в контакт с восходящими стримерами. В результате этого контакта происходит молниевый разряд на землю, обычно с серией последующих возвратных ударов.

2.2 Эффекты молниевых разрядов. Тепловой стресс материалов вокруг точки контакта молнии вызывается а) тепловой проводимостью, б) тепловым излучением от канала молнии, и с) Джоулиевым нагреванием. Радиальная акустическая волна может вызвать механическое повреждение. Магнитное давление—до 6000 атмосфер для 200 кА молнии—пропорционально квадрату тока и обратно пропорционально квадрату диаметра пораженного объекта (G. A. Odum, GAO Cosiltancy, 1996). В результате диэлектрического пробоя возникают искровые разряды. Горячие искры возникают когда капли расплавленного материала выбрасываются из горячих точек в местах контакта. Взрывание дугового разряда, в результате быстрого нагревания воздуха в замкнутом пространстве, разбивало на части массивные объекты (бетонные или из камня). Передача напряжения от молниевых проводников к электрической цепи объекта может произойти через емкостную связь, индукционную связь или же через сопротивление (т.е., путем пробивки изоляции). Из-за потери поверхностного эффекта затухания или экранирования, передаточный импеданс ведет к появлению помех в линиях силового питания и связи. Взаимная связь может навести напряжения в замкнутом контуре, что в свою очередь может вызвать появление тока в других, связанных контурах.

2.3. Поведение Молнии. Абсолютная защита от молнии может существовать только в полностью замкнутой и толстостенной клетке Фарадея, однако такое решение в большинстве случаев непрактично. Предотвращение молнии существует только как инструмент торговли в воображении тех кто пытается заработать на этой идее. Новая информация о молнии может оказать заметное влияние на методы молниевой защиты для чувствительных объектов. Во-первых, было установлено, что среднее расстояние между последовательными разрядами молнии на землю больше чем считалось раньше. Безопасное расстояние от предыдущего разряда, рекомендованное в прошлом, было 2–5 км. Новые данные показывают, что безопасное расстояние должно быть 10–13 км (Lopez & Holle, National Severe Storms

Laboratory, 1998). Во-вторых, около 40 процентов молний на землю раздваиваются, то есть имеют два или больше канала на землю одновременно. Это означает большее число разрядов на землю, чем измерялось раньше (Krider, Intl. Conf. Atmospheric Electricity, 1998). В третьих, радиальные горизонтальные дуговые разряды длиной более чем 20 м от базовой точки контакта молнии с землей увеличивают размеры зоны повреждения (Sandia Labs, 1997). Молния-это капризное, редкое, стохастическое и непредсказуемое явление.

Когда молния поражает объект или сооружение, ток возвратного удара разветвляется между всеми параллельными цепями, существующими между точкой контакта и землей. Разделение тока происходит обратно пропорционально импедансу соответствующей цепи,  $Z$  ( $Z = R + XL$ , омическое сопротивление плюс индуктивная реактивность). Омическое сопротивление будет малым в предположении эффективных связей между металлическими проводниками. Индуктивность и связанная с ней индуктивная реактивность определяется комбинацией индивидуальных параллельных индуктивных цепей. По существу, молния представляет собой источник тока. Конкретный разряд содержит определенное количество заряда (кулон=ампер/секунда), который должен быть нейтрализован во время процесса разряда. Если ток возвратного удара равен 50 кА – этот ток будет течь по цепи с любым сопротивлением, будь то 1  $\Omega$  или 1000  $\Omega$ . Поэтому достижение наименьшего возможного импеданса ведет к минимальному значению транзитного напряжения, появляющегося вдоль цепи устройства, по которой течет ток ( $E(t) = I(t)E + Ldi/dt$ ).

### 3. ДЕЗАЙН МОЛНИЕВОЙ ЗАЩИТЫ.

Снижение потерь от молнии может быть достигнуто путем применения поэтапного подхода, описанного ниже.

7.1 Наружные терминалы. Начиная с Франклина, громоотводы устанавливались на зданиях в местах, предназначенных для контакта молнии. В 1876 году Д. Максвелл высказал предположение, что громоотводы Франклина на зданиях притягивают большее число разрядов, чем если бы громоотводы не были установлены. Громоотводы не следует устанавливать на хранилищах взрывчатых материалов. Такой дизайн, называемый *интегральным наружным терминалом*, не создает защиту для электроники, взрывчатых материалов, или людей внутри современных сооружений. Индукционная и емкостная связи от проводников, возбужденных молнией, вызывает значительные напряжения и токи на внутренних проводниках в силовых цепях и цепях связи.

При многих обстоятельствах системы мачт и нависающих кабелей над или около защищаемого объекта представляют собой альтернативу громоотводу. Такой тип дизайна называется *непрямым наружным терминалом*. Он рассчитан на привлечение молнии сверху или за пределами чувствительной установки, таким образом исключая или же уменьшая вероятность скачков нежелательных токов и напряжений на установки и оборудование.

Исследование применимости диэлектрического экранирования может предоставить дополнительную защиту в случаях когда подавление восходящего лидера может повлиять на величину напряжения пробоя (Sandia Laboratories, 1997). Нетрадиционные виды дизайна наружных терминалов, которые обещают предотвращение молнии, или изменение ее направления движения (DAS/CTS- рассеиватели зарядов) или привлечения и захвата молнии (возбудители раннего стримера-ESE) должны рассматриваться с большим скептицизмом. Их бесполезность была хорошо показана в таких публикациях как NASA/NAVY Tall Tower Study, 1975; R. H. Golde "Lightning", 1977; FAA Airport Study, 1989; T. Horwath "Computation of Lightning Protection", 1991; D. MacKerras et al., IEE Proc- Sci. Meas. Technol., Vol. 144, No.1, 1997; National Lightning Safety Institute "Royal Thai Air Force Study", 1997; A. Mousa "IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 13, No.4, 1998; International Conference on Lightning Protection-Technical Committee personal correspondence, 2000, etc. Признанные специалисты (Golde и Moore) исследовали свойства радиоактивных наружных терминалов и признали эти терминалы неэффективными.

3.2. Нисходящие проводники. Нисходящий проводник устанавливается снаружи сооружения. Жесткий плоский проводник предпочтительнее гибкому кабелю из-за лучшей индуктивности. Проводники не должны быть окрашены, так как это увеличит импеданс. Чтобы избежать проблемы с перепрыгиванием разряда, должны применяться только постепенные изгибы. Где это представляется практичным, стальная структура здания, как часть подсистемы, подобной клетке Фарадея, может также быть использована вместо нисходящего проводника

3.3. Перемычки гарантируют, что несвязанные проводящие объекты имеют одинаковый электрический потенциал. Без правильно установленных перемычек система молниевой защиты не будет работать. Все металлические проводники, входящие в объект (например, электрические линии, газовые и водяные трубы, линии связи, воздухопроводы аэрокондиционеров, трубопроводы, железнодорожные рельсы, навесные мостовые краны, закатывающиеся двери; металлические рамы дверей, перила, и т.д.) должны быть привязаны к одному потенциалу земли.

Соединение переключкой должно быть по возможности не механическим, а сварным, особенно в местах под поверхностью. Механические соединения подвержены коррозии и физическим повреждениям. Не следует игнорировать воздуховоды, проходящие из одного здания в другое, поскольку они могут стать проводниками электричества. Рекомендуются частые инспекции и замерение сопротивления переключек (максимум  $10 \text{ m}\Omega$ ) для гарантии надежного электрического соединения.

**3.4 Заземление**. Система заземления должна иметь низкий импеданс на землю и низкое сопротивление. Анализ спектра типичного импульса молнии показывает как высокочастотную так и низкочастотную составляющие. Для импульса молнии система заземления ведет себя как волновод, поэтому к ней применима теория распространения волн. Значительная часть тока молнии после удара на землю распространяется горизонтально, только менее чем 15 процентов тока проникает вглубь земли. В результате, низкое сопротивление ( $25 \Omega$ ) значительно менее важно чем объемная эффективность заземления.

Эквипотенциальное заземление достигается тогда когда все оборудование внутри объекта привязано к главному узлу заземления, который в свою очередь соединен с внешней системой заземления. Следует избегать замкнутые контуры и их последствий-дифференциальных наработаний по времени. Система заземления должна быть спроектирована так, чтобы уменьшить импеданс переменного тока и сопротивление постоянному току. Применение заземления типа counterpoise (закопанные проводники) или радиальных лучей может снизить импеданс, поскольку эти типы позволяют энергии молнии разветвляться с каждым закопанным проводником, таким образом разделяющим градиент напряжения. Эффективны также кольца заземления вокруг объектов, соединенные между собой. Правильное применение бетонных опор и фундаментов увеличивает объем. Для почвы с высоким сопротивлением, или низким содержанием влаги, или при температурах замерзания, добавление в почву уголь, специальных смесей на основе угля, натуральных солей или других включений с низким сопротивлением может оказаться полезным. Эти средства должны применяться для каждого случая отдельно тогда, когда добиться снижения импеданса заземления традиционными способами либо трудно либо слишком дорого.

**3.5 Проблема коррозии** и катодной реактивности должна приниматься во внимание в стадии анализа. Биметаллические соединения должны применяться в местах контактов неоднородных материалов. Соединения алюминиевых нисходящих проводников с медными проводами

заземления представляют собой типичный случай, когда серьезные проблемы могут возникнуть в будущем.

**3.6. Импульсы.** Электронные и электрические защитные устройства полностью описаны в IEEE 1100. Обычные предохранители и выключатели не способны выдержать быстрые изменения напряжения, вызванные молнией. Устройства защиты от импульсов (SPD –ограничители) могут зашунтовать ток, заблокировать энергию против распространения вдоль линии, отфильтровать определенные частоты, или же реагировать на совокупность нескольких факторов. Рекомендуется применять устройства ограничения напряжения, которые способны выдержать очень высокие импульсы тока, а также уменьшить особенно быстрый фронт ( $dv/dt$  и  $di/dt$ ) скачка.

Также рекомендуется защита главной панели силовой системы, защита всех вторичных распределительных панелей, и защита всех важных включенных устройств, таких как контрольные инструменты, компьютеры, принтеры, сигналы пожарной тревоги, устройства записи данных. Важным является также защита входящих и выходящих линий данных и связи (модэм и т.д). Все электрические устройства, обслуживающие центральные объекты, такие как дистанционные сигналы тревоги, видео камеры, фонари освещения на высоких мачтах и т.д. также нуждаются в защите.

Ограничители напряжения должны устанавливаться с короткими концами, ведущими к соответствующим панелям. При быстром фронте нарастания, индуктивность кабеля становится значительной, и высокое переходное напряжение может развиваться вдоль длинных концов. Рекомендуются ограничители с заменяемыми внутренними модулями. Во всех случаях рекомендуется использовать быстрые, самопроверяемые и высокого качества компоненты устройств импульсной защиты. Ограничительные устройства могут использовать разрядники, дивертеры, варисторы на основе окислов металла, газовые аресторы, силиконные каскадные диоды или другие элементы. Предпочтение отдается гибридным устройствам, использующим комбинации перечисленных элементов. Ограничительные устройства, отвечающие европейскому стандарту CE, проверяются с  $10 \times 350 \text{ us}$  формой волны, в то время как проверка соответствия стандарту IEEE и UL требует  $8 \times 20 \text{ us}$  формы волны. Рекомендуется, чтобы те, кто интересуется требованиями и спецификацией ограничительных устройств, согласовал их со стандартом CE, а также стандартом качества ISO 9000-9001.

Непрерываемые источники питания (UPS) обеспечивают питание от батареи в случаях ненормального уровня силового питания,

прерывания подачи электричества, переключения батареи конденсаторов, молнии, и т. д. UPS применяются как замещение основного источника питания или же как временные источники питания. Они не должны использоваться вместо специальных ограничительных устройств. Правильная установка прибора, отвечающая категории А, включает в себя: соединение от стенной розетки AC – к ограничительному устройству – затем к непрерываемому источнику питания – и затем уже к прибору.

**3.7 Обнаружение.** Детекторы молний, разных типов и по разным ценам, применяются для раннего предупреждения. Потребители должны быть на чеку относительно чрезмерной уверенности в системах обнаружений молний. Эти системы не без недостатков и не всегда обнаруживают молнии. Детекторные системы не могут предсказать появление молнии. Смысл их применения состоит в том, чтобы с приближением молний отключить объект от внешней линии питания и подключить его к резервному источнику питания. В совокупности с детекторами нужно применять такие средства предупреждения как радио, сирены, и громкоговорители. Более детальное описание детекторов молнии может быть найдено на [www.lightningsafety.com](http://www.lightningsafety.com).

**3.8 Проверка и технический уход.** Современные методы диагностической проверки способны удостоверить работоспособность отдельных устройств в системе защиты и установить путь прохождения молнии по пораженному объекту. Датчики регистрации проходящего тока молнии могут быть установлены на нисходящих проводниках. Регулярная физическая инспекция и испытания должны быть частью установленной программы по поддержанию системы молниевой защиты в работающем состоянии. Без такой программы система защиты от молнии может стать неэффективной.

#### 4. ВОПРОСЫ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ.

Защита от молнии должна практиковаться всеми людьми во время грозы. Полезно определить расстояние до грозы. Используя принцип Вспышка/Звук (В/З), на каждые 3 секунды от момента видимой вспышки молнии до момента услышанного звука грома – молния на один километр дальше. Если В/З равно 6, расстояние до молнии 2 км и т. п. Расстояние между каналами разных молний на землю может быть от 8 до 13 км. Национальный Институт Молниевой Защиты (NLSI) рекомендует применять правило 30/30: остановить всякую активность на открытом воздухе когда В/З=30, то есть когда расстояние до молнии составляет 10 км или же когда слышен первый раскат грома. Активность не должна возобновляться до истечения 30 минут после

последнего разряда грома или последней видимой молнии. Этот консервативный подход может оказаться непригодным при всех обстоятельствах. Если человек неожиданно оказался вблизи разряда молнии, ему следует принять так называемую позицию защиты от молнии. Эта позиция означает быть на удалении от других людей и от металлических объектов, опуститься на колени с ногами вместе, нагнуть голову, и руками закрыть уши для уменьшения акустического шока от близкого разряда грома. При угрозе молнии, стандартные меры предосторожности включают в себя: избегание контактов с водой и металлическими объектами, сойти вниз со всех высоких сооружений, включая крыши, избегание одиночных деревьев, не пользование телефоном. Полностью замкнутый металлический корпус автомобиля является вполне безопасным местом нахождения, поскольку автомобиль представляет собой неполную клетку Фарадея. Большое постоянное здание также может считаться безопасным местом. При всех обстоятельствах, люди должны стараться избегать превращения в часть электрической цепи. (Бенджамин Франклин советовал внутри дома лечь в гамак из шелка, поддерживаемый двумя деревянными столбами.)

Каждая организация должна принять и обнародовать План Защиты от Молнии, который бы отвечал специфике данной организации. Основным правилом, отвечающим всем обстоятельствам, должно быть: "Если ты слышишь это (гром)-эвакуируй, если ты видишь это (молнию)-спасайся".

## 5. НОРМЫ И СТАНДАРТЫ.

В США нет такого одного стандарта, который бы содержал всю необходимую информацию по молниевой защите. Поэтому необходимо ознакомиться с различными официальными документами по вопросам молниевой защиты. Важным является стандарт Федеральной Авиационной Администрации FAA-STD-019c. Рекомендуется также IEEE142 и IEEE1100. Другие рекомендуемые федеральные стандарты включают документы военных ведомств MIL HDBK 419A, Army PAM 385-64, NAVSEA OP5, AF1 32-1065, NASA STD E0012E, MIL STD 188-124B, MIL STD 1542B, MIL STD 5087B, и UFC 3-570-01.

Полезными могут оказаться также DOE M440.1-1 и Английский стандарт BS6551. Германский стандарт по молниевой защите атомных электростанций KTA 2206 обращает особое внимание на взаимную связь перенапряжений на инструментальных и контрольных кабелях. Документ серии IEC 61024 Европейской Международной Электротехнической



Комиссии является единственным и наилучшим документом для инженеров по проблемам молниевой защиты. Принятый во многих странах, IEC 61024 является научно обоснованным документом, применяемым ко многим видам дизайна. Большинство стандартов игнорируют весьма важный вопрос о электромагнитной совместимости, что особенно важно для безопасности при работе со взрывчатыми материалами и для объектов с электроникой, и мониторными системами.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Молния непредсказуема в своем поведении и может вызвать повреждение несмотря на все усилия предотвратить его. Для достижения максимального эффекта, любой всесторонний подход к проблеме защиты от молнии должен быть выработан специально для данного объекта. Для избежания потерь от молнии рекомендуется обращать систематическое внимание на детали заземления, связей, экранирования, наружных терминалов, устройств защиты от скачков напряжения, детектирования и оповещения, техобразования персонала, технического ухода и применения принципов менеджмента при наличии риска.

## 7. ЛИТЕРАТУРА

- 7.1 International Conference on Lightning Protection (ICLP) Proceedings, Cracow (2002), Athens (2000), Birmingham (1998), Florence (1996).
- 7.2 IEEE STD 142-1991 Grounding of Industrial and Commercial Power Systems.
- 7.3. IEEE STD 1100-1999 Powering and Grounding Electronic Equipment.
- 7.4 IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Nov. 1998.
- 7.5 National Research Council, Transportation Research Board, NCHRP Report 317, June 1989.
- 7.6 International Electrotechnical Commission (IEC), International Standard for Lightning Protection. See: <http://www.iec.ch>.
- 7.7 Gardner R. L., Lightning Electromagnetics, Hemisphere Publishing, NY NY, 1991.
- 7.8 EMC for Systems and Installations, T. Williams and K. Armstrong, Newnes, Oxford UK, 2000.
- 7.9 NATO STANAG 4236, Lightning Environmental Conditions, 1995.

---

Примечание: Разрешено копировать и воспроизводить эту статью. Пожалуйста укажите NLSI как первоначальный автор. Национальный Институт Молниевой Защиты (NLSI) является некоммерческой независимой организацией, предоставляющей объективную информацию по вопросам молниевой безопасности. Посетите также NLSI [\*\*www.lightningsafety.com\*\*](http://www.lightningsafety.com).

Переводчик: V. Mazur