

АННОТАЦИЯ

В статье изложены качественные расчёты и обоснования опасности вторичных влияний молнии для современных электронных систем. Показано, что даже далекие удары молнии могут привести к выходу из строя и неправильной работе электроники на промышленных предприятиях.

ANNOTATION

The article describes the qualitative calculations and justification of secondary effects of lightning hazard for modern electronic systems. It is shown that even distant lightning strikes can cause damage and malfunction of the electronics in the industry.

Вторичные влияния молнии. Как она поражает электронику предприятий

М. И. Фурсанов, д. т. н., профессор, зав. кафедрой
«Электрические системы» БНТУ

П. В. Криксин, аспирант БНТУ

Введение

Молния является одним из наиболее ярких природных явлений, впечатляющих своей мощностью и масштабом. Свою силу молния, как правило, демонстрирует в месте удара: разрушенные здания, повреждённые деревья, человеческие жертвы.

Принято считать, что наиболее часто воздействиям молнии подвергаются высокие и протяжённые объекты: башни, антенны, деревья, линии электропередачи. Действительно, больше всего она бьёт именно в такие объекты. Вместе с тем повреждения не ограничиваются прямым влиянием (ударами) молнии. Воздействия также оказывают электромагнитное поле и ток молнии, распространяющиеся на сотни метров и повреждающие оборудование и линии коммуникации.

О масштабах вторичных воздействий молнии и связанных с ними потерь можно судить по экономическому ущербу:

- ♦ за 1997 г. в США повреждено 101 000 ноутбуков и компьютеров; суммарные потери от повреждений составили 125,4 млн. USD (*Computer Security News*);
- ♦ за пять лет с 1992 по 1996 гг. страховая компания Paul Ins. выплатила более 1,7 млрд. USD за повреждения, вызванные молнией, что составило 8,7 % от всех инцидентов и 3,8 % от всех выплат (*Paul Ins. Co.*);

- ♦ за 1997 г. в США порядка 30 % всех отключений электропитания связано с молниевыми воздействиями с суммарными потерями около 1 млрд. USD (*Ralph Bernstein, EPRI*);
- ♦ с мая 1999 по май 2000 г. на 320 полностью автоматизированных дорожных пунктах в г. Вирджиния Бич (США) произошло 359 инцидентов, вызванных молнией, в результате чего было повреждено оборудование на 36 425 USD (*G. Van Eiken, Traffic Supervisor, City of Virginia Beach VA*);
- ♦ по данным компании, обслуживающей на АЭС цифровые устройства, порядка 19 % выхода их из строя связано с влияниями молнии (*US Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-6579*);
- ♦ с 1990 по 2000 гг. в США зафиксировано 346 воздействий молнии на оборудование атомных станций (*DOE Occurrence Reporting and Processing System Database*).

При подсчёте ущерба учитываются, как правило, очевидные экономические потери, тогда как весьма часто повреждения носят неявный характер: сбой в работе автоматизированной системы управления, повреждения внутренних элементов электроники, снижение ресурса работы оборудования. Разнообразие и масштабы влияний молнии характеризует цитата из книги известных учёных в области молниезащиты [1]:

Уверенного, а часто несколько самоуверенного инженера на каждом этапе технического прогресса она [молния] подстерегает с новым оружием и продолжает войну по новым, только ей известным правилам. Чем совершеннее и умнее становится техника, чем плотнее она набивается электроникой и полнее способна

заменить человека, тем изоцирэннее действует молния. Она нападает с неожиданной стороны и на какое-то время снова делает нас беспомощными.

<...>

Мир изменчив и зачастую сегодняшняя панацея становится бесполезной пилюлей раньше, чем обветшают рекламные листки. Повторяем, технический прогресс никогда не заставлял молнию врасплох. Совершенствование и миниатюризация технических устройств заставляют беспокоиться о всё более тонких механизмах вредных воздействий молнии. Предусмотреть их все не дано никакому прорицателю.

С каждым годом опасность и масштабы ущербов от косвенных влияний молнии возрастают, что во многом связано со следующими событиями [2]:

- ♦ фактически в течение одного поколения (около 30 лет) техника развилась и распространилась до такой степени, что устройства, ранее использовавшиеся лишь в специализированных центрах, теперь имеются практически в каждом доме (вычислительные устройства, системы телекоммуникации, управления и т. п.);
- ♦ системы питания устройств становятся более экономичными и маломощными, многие имеют уровень напряжения от 5 до 24 В;
- ♦ современные устройства часто эксплуатируются в существующих сетях, которые не могут обеспечить необходимый уровень качества и надёжности питания и именно в таких сетях наблюдаются наибольшие проблемы с современными устройствами.

Подверженность влияниям молнии современных устройств представлена в таблице [2].

Изложенная выше информация, по сути, характеризует обратную сторону прогресса, которая вместе с пользой принесла необходимость решения новых задач.

Важность решения таких задач в области молниезащиты покажем в настоящей статье. Актуальность этой темы возрастает в связи со сложившимися традиционными представлениями о молниезащите как о молниеотводе Франклина — высоком стальном заземлённом штыре. Кажущаяся простота решений таит скрытую опасность. И чем более современное и ответственное оборудование применяется на предприятии, тем больше такая опасность.

Механизмы влияния молнии

Молнии весьма разнообразны и имеют большое число отличий, например, по объектам, между которыми

Таблица. Величина опасных молниевых напряжений для современных устройств

Напряжение относительно земли (синфазное)	Устройство	Величина опасного напряжения (1,2 / 50 мкс)
	Силовые устройства	5–8 кВ
	Устройства телекоммуникации	1–3 кВ
Напряжение между жилами кабеля, входами устройства (противофазное)	Схемы с дискретными компонентами	0,5–5 кВ
	Интегральные микросхемы, биполярные устройства	3–300 В
	Операционные усилители, металл-оксид-полупроводниковая техника	3–100 В

происходит разряд, полярности заряда, направлению распространения и др. Рассмотрим молнию в том её виде, в котором обычно видим её воздействие: удар с облака на землю.

В качестве объекта возьмём на рассмотрение производственное здание и линию. Оказываемые при этом молниевые влияния и механизмы их распространения изображены на рис. 1.

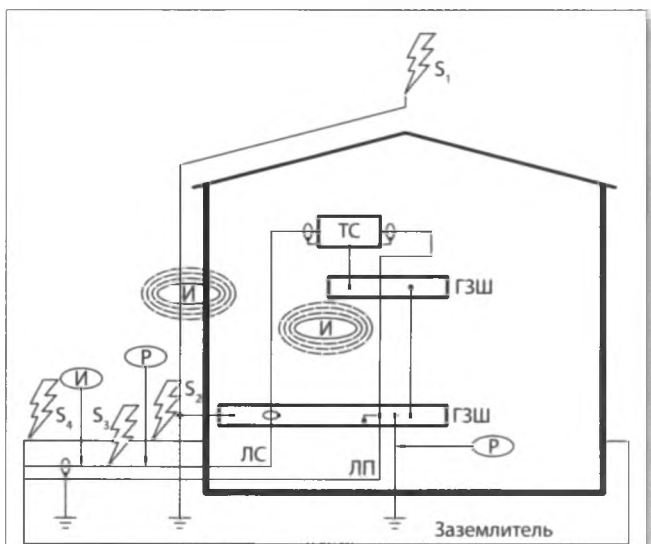


Рис. 1. Механизмы влияния молнии на объект

По точке удара молнии можно разделить на следующие типы:

- ♦ в объект (S₁);
- ♦ возле объекта (S₂);
- ♦ в линию коммуникации (S₃);
- ♦ возле линии коммуникации (S₄).

При этом оказываются следующие виды воздействий:

- ♦ прямые, связанные с непосредственным ударом молнии в объект или линию;
- ♦ вторичные, связанные с распространением тока и электромагнитного поля.

Прямой удар является наиболее опасным видом воздействия и с наибольшей вероятностью может привести к повреждению объекта, что происходит за счёт [3]:

- ♦ воздействия горячей плазменной дуги самой молнии, которая возникает в результате омического нагрева проводника или за счёт эрозии поверхности в месте разряда, что приводит к мгновенному механическому повреждению, пожару или взрыву;
- ♦ искрений, которые возникают за счёт разности потенциалов между различными поверхностями и связаны с резистивным или индуктивным сопротивлением.

Возникающие при этом последствия от удара зависят от параметров объекта и могут иметь следующий вид:

- ♦ для здания — разрушение, пожар, взрыв;
- ♦ для линий коммуникации — повреждение изоляции, срабатывание автоматики, повреждение линейных сооружений;
- ♦ для человека — поражение электрическим током.

Помимо прямых ударов молнии, воздействия на объект оказывают вторичные явления, которые в основном связаны с распространением тока и электромагнитного поля, и приводят к:

- ♦ подъёму потенциала в точке стекания тока в землю;
- ♦ неравномерности потенциала между различными частями оборудования, поверхности, проводников;
- ♦ наведённым напряжениям и токам в линиях коммуникации и цепях устройств;
- ♦ влияниям электромагнитного поля на электронные системы устройств.

Результат вторичных воздействий, как правило, менее разрушителен, однако представляет серьёзную опасность в связи с большой территорией воздействия и охватом множества устройств.

Вероятность поражения молнией

Молния — вероятностный процесс, и предугадать её появление и последствия воздействий также можно лишь с некоторой вероятностью, которая связана

с количеством грозовых дней в году или количеством разрядов молнии на 1 км². Статистику о количестве грозовых дней на территории Беларуси можно узнать на сайте Белгидрометеоцентра.

Плотность грозовых разрядов N_G , исходя из количества грозовых дней в году, можно определить по следующему соотношению [3]:

$$N_G = 0,1 \cdot T. \quad (1)$$

По плотности грозовых разрядов можно рассчитать количество опасных случаев N для какого-либо объекта [3]:

$$N = N_G \cdot A \cdot C, \quad (2)$$

где N_G — плотность разрядов молнии в землю, удар/км²; A — площадь сбора данных, определяющая территорию, удар молнии в которую представляет опасность для объекта, км²; C — повышающие либо понижающие коэффициенты, характеризующие увеличение или уменьшение вероятности воздействия молнии на объект, *отн. ед.*

Рассмотрим количество и величины опасных воздействий, которые могут влиять на объект и связанные с ним линии коммуникации.

Объект

В качестве объекта исследования рассмотрим небольшое промышленное предприятие, связанное линиями коммуникации (интернет, телефон, телемеханика и т. п.), с головным узлом или с диспетчерским пунктом.

Условимся, что линии коммуникации и здания расположены в пригороде на ровной местности (то есть нет каких-либо повышающих либо понижающих опасность факторов), в регионе со средним количеством грозовых дней, равным 28.

Параметры здания № 1 примем следующими:

- ♦ высота — 10 м;
- ♦ ширина и длина — 100×100 м.

Параметры здания № 2:

- ♦ высота — 5 м;
- ♦ ширина и длина — 20×20 м.

Здания связаны между собой линией коммуникации:

- ♦ тип линии (рассмотрим два случая): воздушная с высотой подвеса $h = 6$ м и подземная, проложенная в грунте с удельным сопротивлением $\rho = 100$ Ом·м;
- ♦ длина линии — 1000 м;

- ♦ материал изоляции — бумажная с уровнем устойчивости к перенапряжениям 1,5 кВ;
- ♦ линия не имеет экрана и не защищена каким-либо иным способом.

Структурная схема объекта исследования приведена на рис. 2.

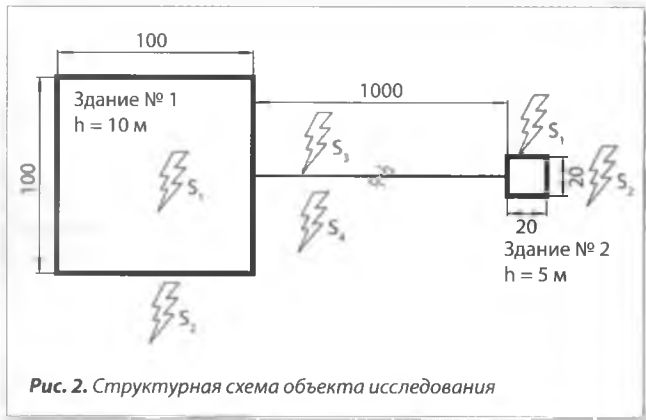


Рис. 2. Структурная схема объекта исследования

В реальности рассматриваемый объект может быть небольшим административным или производственным зданием, как, например, на рис. 3 и 4.

Расчётные события

Рассчитаем количество опасных событий в год для следующих случаев воздействия ударов молнии:

- ♦ в здании;
- ♦ возле здания;
- ♦ в линию коммуникации;
- ♦ возле линии коммуникации.

Удар молнии в здание

Количество ударов молнии в здание рассчитаем по формуле (2). Площадь сбора данных определим по следующей формуле [4]:

$$A_d = (ab + 6Na + 6Nb + 9\pi N^2) \cdot 10^{-6}, \quad (3)$$

где a — длина здания, m ; b — ширина здания, m ; N — высота здания, m .

При принятых исходных данных площадь сбора данных составит:

- ♦ для здания № 1 — $A_{d1} = 0,025 \text{ км}^2$;
- ♦ для здания № 2 — $A_{d2} = 0,002 \text{ км}^2$.

Соответственно, количество прямых ударов молнии составит:

- ♦ для здания № 1 — $N_{d1} = 0,07$ удара в год, или 1 удар в 14 лет;
- ♦ для здания № 2 — $N_{d2} = 0,006$ удара в год, или 1 удар в 156 лет.



Рис. 3. Промышленное предприятие вблизи города с цехами, гаражами и СТО



Рис. 4. Здание вокзала в городской черте с производственными и административными помещениями

Удары молнии вблизи здания

Опасными считаются удары молнии на расстоянии ближе 250 м от периметра здания [3]. Итоговая площадь сбора данных определяется как площадь территории на расстоянии 250 м от периметра объекта A_m за вычетом площади сбора данных от прямых ударов молнии A_d , то есть $A_m - A_d$.

Площадь сбора данных A_m рассчитаем по формуле (3), при этом заменим $3N$ на 250 м:

- ♦ для здания № 1 — $A_{m1} = 0,256 \text{ км}^2$ и $(A_{m1} - A_{d1}) = 0,256 - 0,025 = 0,231 \text{ км}^2$;
- ♦ для здания № 2 — $A_{m2} = 0,207 \text{ км}^2$ и $(A_{m2} - A_{d2}) = 0,207 - 0,002 = 0,205 \text{ км}^2$.

Соответственно, количество ударов молнии вблизи зданий по формуле (2) составит:

- ♦ для здания № 1 — $N_{m1} = 0,65$ удара в год, или 1 удар в 1,5 лет;
- ♦ для здания № 2 — $N_{m2} = 0,57$ удара в год, или 1 удар в 1,7 лет.

Удар молнии в линию коммуникации

Количество ударов молнии в линию рассчитаем по формуле (2), где площадь сбора данных определим следующим образом [4]:

- ♦ для воздушной линии:

$$A_{da} = 2 \cdot 10^{-6} [L - 3(H_1 + H_2)] \cdot h \cdot C_e \quad (4)$$

- ♦ для кабельной линии:

$$A_{db} = 2 \cdot 10^{-6} [L - 3(H_1 + H_2)] \cdot D \cdot C_e \quad (5)$$

где L — длина линии, м; H_1 — высота здания (сооружения) с одной стороны линии, м; H_2 — высота здания (сооружения) с другой стороны линии, м; h — высота линии, м; C_e — коэффициент, который зависит от условий расположения линии, *отн. ед.*; D — расстояние пробоя грунта, м, которое зависит от его удельного сопротивления.

Коэффициент C_e , зависящий от условий расположения, примем равным 1. Расстояние пробоя грунта при его удельном сопротивлении $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ составляет $D = 4,82 \text{ м}$.

При принятых исходных данных площадь сбора данных составит:

- ♦ для воздушной линии — $A_{da} = 0,11 \text{ км}^2$;
- ♦ для подземной линии — $A_{db} = 0,009 \text{ км}^2$.

Соответственно, количество прямых ударов составит:

- ♦ для воздушной линии — $N_{da} = 0,0308$ удара в год, или *1 удар в 32 года*;
- ♦ для подземной линии — $N_{db} = 0,0252$ удара в год, или *1 удар в 39 лет*.

Удары молнии возле линии коммуникации

Количество ударов определим по формуле (2). Площадь сбора данных составит A_s [4]:

$$A_s = 0,216 \cdot \rho^{1/2} \cdot L \cdot U_w^{1,8} \quad (6)$$

где U_w — устойчивость линии к импульсным перенапряжениям, кВ.

Площадь сбора данных составит:

- ♦ для воздушной линии — $A_{da} = 1,04 \text{ км}^2$;
- ♦ для подземной линии — $A_{db} = 0,5 \text{ км}^2$.

Соответственно, количество ударов возле линии составит:

- ♦ для воздушной линии — $N_{za} = 2,92$ удара в год, или *1 удар каждые 4 месяца*;
- ♦ для подземной линии — $N_{zb} = 1,46$ удара в год, или *1 удар каждые 8 месяцев*.

Воздействия, оказываемые на объект, являются суммой компонентов отдельных воздействий. Если

просуммировать полученные выше результаты, то для всего объекта в целом получим:

- ♦ для воздушной линии — $N_a = 4,25$ удара в год;
- ♦ для подземной линии — $N_b = 2,78$ удара в год.

Иначе говоря, рассматриваемый объект ежегодно будет подвергаться 3 или 5 опасным воздействиям молнии (в зависимости от типа линии коммуникации).

Насколько негативными будут итоговые последствия, зависит от параметров объекта, силы тока молнии, наличия дополнительных защитных мер и ряда иных условий.

В этой цепочке весьма важным фактором является *устойчивость оборудования к импульсам перенапряжений*. В Беларуси параметры устойчивости портов оборудования к импульсам напряжения нормируются стандартом СТБ МЭК 61000-4-5-2006, который устанавливает процедуру испытания портов и выдерживаемое ими напряжение. Оно характеризуется испытательными уровнями от 1 до 4 с соответствующими выдерживаемыми напряжениями от 0,5 до 4 кВ.

Следующим важным фактором является *величина воздействующей помехи*, которая определяется как параметрами источника, так и приёмника помех. Чтобы понять, каким может быть уровень воздействующих помех, проведём некоторые упрощённые расчёты, позволяющие на качественном уровне оценить их величину.

Помехи при ударах молнии вблизи линий телекоммуникаций

Рассмотрим воздушную неэкранированную линию, расположенную на высоте 6 м. Наибольшие величины индуцируемых напряжений будут наблюдаться в середине и на концах линии при расположении источника на равном расстоянии от обоих концов (рис. 5).

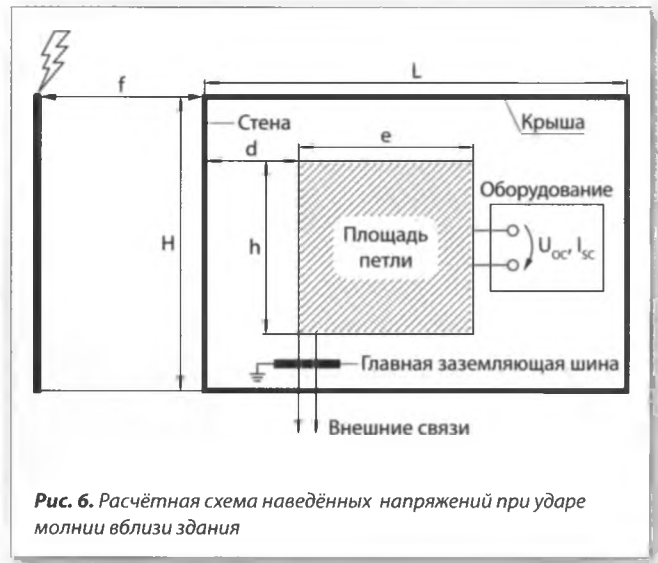
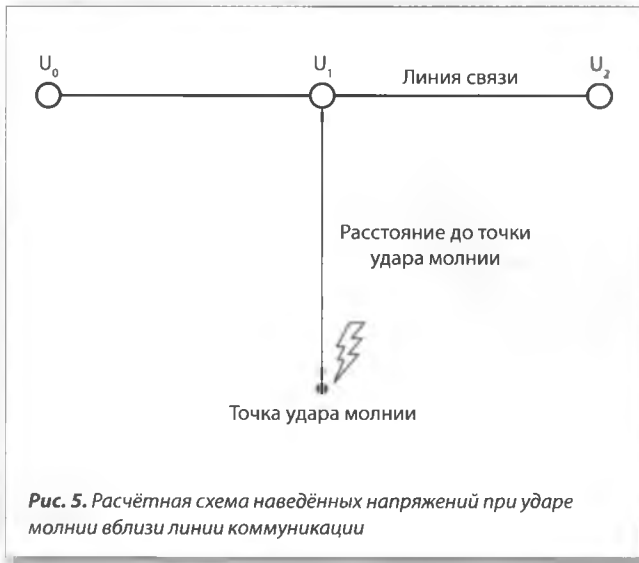
Напряжение в середине (U_1) и на концах линии (U_0 и U_2) рассчитаем по следующим формулам [5]:

$$U_1 = \frac{30 \cdot I_p \cdot h}{d} \left(1 + \frac{v}{\sqrt{2-v^2}} \right) \quad (7)$$

$$U_0 = U_2 = \frac{30 \cdot I_p \cdot h}{d} \quad (8)$$

где I_p — пиковый ток молнии, кА; d — расстояние от точки удара до линии коммуникации, м; h — высота подвеса линии, м; v — соотношение скоростей обратного импульса молнии и скорости света.

Величину тока молнии примем равной 30 кА и 100 кА.



Расстояние от линии до точки удара $d = 1000$ м.
Исходя из принятых данных величины напряжений составят:

- ♦ при токе молнии 30 кА: в середине линии — 7,02 кВ, на концах — 5,4 кВ;
- ♦ при токе молнии 100 кА: в середине линии — 23,04 кВ, на концах — 18,0 кВ.

Таким образом, получается, что даже удар молнии на расстоянии километра может стать причиной появления в линии напряжений в несколько киловольт. Часто применяемые меры, например, экранирование или прокладка линий в земле, позволяют снизить величину возникающих напряжений. Вместе с тем даже с учётом этих факторов величина воздействий может быть недопустимо высокой.

Помехи при ударах молнии вблизи здания

Ближние удары молнии могут вызывать индуцируемые напряжения в расположенных в здании электронных системах. Чтобы оценить возможную величину этих напряжений, рассмотрим расчётную схему на рис. 6.

Как и в предыдущих случаях, величина помехи будет зависеть от параметров источника и приёмника помех.

Источник помех (молния) характеризуется величиной тока, фронтом импульса и удалённостью от приёмника помех.

Приёмник помех характеризуется величиной петель, которые работают как антенны и воспринимают электромагнитное поле. В реальных случаях такие петли могут возникать при разработке проекта без учёта требований электромагнитной совместимости, когда различные линии (питания, связи, заземления и т. п.)

подводятся к устройству по разным трассам, и без применения защитных мер.

Пиковое значение напряжения U_{oc} , возникающее в разомкнутой цепи, определяется по следующей формуле [7]:

$$U_{oc} = L_M \cdot \frac{I_p}{T_1}, \tag{9}$$

где L_M — взаимная индуктивность между схемой, в которой индуцируется напряжение, и током разряда молнии, мкГн; T_1 — длительность фронта тока разряда молнии, мкс.

Пиковое значение тока в короткозамкнутой цепи определяется по формуле [7]:

$$I_{sc} = \frac{U_{oc} \cdot T_1}{L_s}, \tag{10}$$

где L_s — собственная индуктивность витка, мГн. Взаимная индуктивность L_M может быть рассчитана по следующей формуле [7]:

$$L_M = 0,2 \cdot \eta \cdot K_s \cdot K_c \cdot h \cdot \ln \left(\frac{f+d+e}{f+d} \right), \tag{11}$$

где h — ширина или высота витка, м; e — длина витка, м; f — расстояние от канала разряда до стены сооружения, м; d — расстояние от витка до стены сооружения, м; $\eta = 0,12 \times w$ — коэффициент экранирования для экрана сооружения (экран LPZ 1), где w — ширина ячейки экрана, м; K_s — коэффициент экранирования, учитывающий экранирующий эффект экрана кабеля, отн. ед.; K_c — коэффициент, учитывающий распределение тока между идущими вниз проводниками.

Индуктивность витка L_4 определяется по следующей формуле:

$$L_4 = 0,8 \cdot \sqrt{e^2 + h^2} - 0,8 \cdot (e+h) + 0,4 \cdot e \cdot \ln \left[\frac{2h/r}{e + \sqrt{e + (h/e)^2}} \right] + 0,4 \cdot h \cdot \ln \left[\frac{2e/r}{e + \sqrt{e + (e/h)^2}} \right] \quad (12)$$

В качестве исходных данных примем следующие параметры:

- ♦ здание № 1 100×100 м. Предположим, что линии в здании разведены таким образом, что ширина и длина витка составляют 10×10 м;
- ♦ здание № 2 20×20 м. Предположим, что линии в здании разведены таким образом, что ширина и длина витка составляют 5×5 м;
- ♦ точка удара молнии находится на расстоянии 10 м от здания;
- ♦ длительность фронта импульса составляет 10 мкс для первого импульса молнии при токе 100 кА и 0,25 мкс — для последующего импульса при токе 25 кА;
- ♦ ни здание, ни линии не имеют экранов, а линии проложены проводом сечением 2,5 мм².

Тогда при принятых исходных данных оказываемые молнией воздействия составят:

- ♦ для здания № 1: *почти 2 кВ при первом ударе молнии и более 19 кВ при последующем;*
- ♦ для здания № 2: *почти 500 В при первом ударе молнии и почти 5 кВ при последующем.*

Таким образом, даже удары молнии на достаточно большом расстоянии от зданий могут вызвать появление в цепях электронных устройств напряжения в несколько киловольт и вызывать сбои в работе и повреждения.

Заключение

Электромагнитная совместимость технических средств является важным фактором надёжной работы современных электронных устройств. Защита от воздействий молнии в этом контексте — одна из первоочередных задач. Это связано с повсеместным распространением молний, широким спектром оказываемых воздействий и большой мощностью влияний. Необходимость защиты устройств от воздействий молний обостряется в связи с повсеместным

распространением электронных устройств и тенденциями к их миниатюризации.

Малое внимание к вопросу во многом обусловлено неявным характером вторичных воздействий молнии. Если о том, что выход из строя электронного устройства произошёл по причине далекого разряда молнии, можно как-то догадаться, то отследить скрытые дефекты и уменьшение срока службы практически невозможно.

Там, где считают деньги, там и разбираются в причинах проблем. И в этом ракурсе весьма примечательна информация западных компаний о повреждениях и их стоимости. По их данным, суммы повреждений составляют десятки и сотни миллионов долларов в рамках государства и тысячи и десятки тысяч для предприятий.

Количество опасных воздействий, оказываемых на оборудование и системы даже среднего по величине предприятия, достаточно велико. Даже если десятая часть таких воздействий приведёт к повреждению оборудования или же просто к сбоям в его работе, то экономические потери могут быть весьма существенными.

Чтобы представить реальную угрозу и масштабы потерь для предприятия, нужно ответить на вопрос, что будет, если выйдет из строя автоматика технологической линии, сгорит сервер с данными, произойдёт сбой в работе бухгалтерской программы, отключится электроснабжение. Очевидно, что для современного предприятия такие воздействия и потери недопустимы. С каждым днём понимание этого в промышленности становится больше, ведь ситуация аналогична заботе о здоровье: лучше и дешевле предупредить, чем потом разбираться с проблемами. ■■■

Литература

1. Базелян, Э. М. and Райзен, Ю. П. Физика молнии и молниезащиты. Москва : Физматлит, 2001.
2. Schaden durch Blitz und Überspannung. Berlin : GDV, 2007.
3. IEC 62305-2: 2006. Protection against lightning – Part 2: Risk management.
4. ITU-T K.47. Protection of telecommunication lines against direct lightning flashes .
5. ITU-T K.67-2006. Expected surges on telecommunications and signalling networks due to lightning.
6. Шваб, А. Электромагнитная совместимость. [ed.] Кужекин. [trans.] В. Д. Мазина and С. А. Спектора. Москва : Энергоатомиздат, 1995.