

Методика расчета прогнозируемого числа поражений молнией протяженных объектов

© М.М. Резинкина

Научно-технический центр магнетизма технических объектов НАН Украины,
61106 Харьков, Украина
e-mail: marinar2@mail.ru

(Поступило в Редакцию 26 июня 2007 г.)

Разработана методика расчета распределения прогнозируемого числа поражений молнией защищаемой молниеотводами территории протяженных объектов (например, высоковольтных подстанций). Показано, что к протяженным объектам, размещенным в декларируемой зоне защиты молниеотводов, не применимы прогнозы относительно числа их поражений молнией. Проведены расчеты распределения вероятности числа поражений молнией молниеотводов и защищаемых протяженных объектов при различном размещении молниеотводов.

PACS: 52.80.Mg, 92.60.Pw

Введение

Действующие в настоящее время руководящие материалы по выбору параметров средств молниезащиты [1] основаны на экспериментальном определении вероятности прорыва молнии в защищаемую молниеотводом зону в виде отношения числа прорывов на нее молний к общему количеству ударов молний, в том числе в молниеотвод [2]. Хотя РД [1] и предполагает подсчет ожидаемого количества ударов молний в здания и сооружения (см. [1] с. 25, 37), однако это делается лишь для того, чтобы определить, следует ли вообще производить защиту рассматриваемого типа объектов. В [1] предполагается, что R_0 — радиус так называемой поверхности стягивания (поверхности земли, которую в отсутствие молниеотвода поразили бы разряды молнии, если бы данные разряды не принял на себя возвышающийся объект) зависит лишь от высоты объекта h и равен $R_0 = 3h$. Такой подход не рассматривает возможность прорыва на объект молний, лидеры которых несут к земле предельно большие потенциалы U_1 , когда прорыв молнии может произойти с расстояния L , большего, чем $3h$ (например, при $U_1 \sim 200$ MV для $h \sim 10$ m, L составляет порядка 30 m, т. е. в 2 раза превышает $3h$). Следует учитывать также, что никакой равноценности геометрически подобных систем „молниеотвод–защищаемая зона“ быть не может, поскольку для молниеотводов разной высоты прогнозируемое число ударов как в них, так и в защищаемую зону будет существенно отличаться. Для того чтобы сравнивать защитные свойства молниеотводов различной высоты более объективно, предлагается рассчитывать прогнозируемое число ударов молнии в защищаемую зону и в сами молниеотводы, а не их отношение. При этом следует учитывать распределение вероятностей появления молний с током определенной амплитуды $P_i(I_i)$ (см., например, [3]).

Действующие нормативные документы основаны на результатах экспериментальных исследований вероят-

ности прорыва длинной искры на стержни, имитирующие молниеотводы и защищаемые объекты [2]. При оценке прогнозируемого числа поражений протяженного объекта следует суммировать все возможные удары в него независимо от места поражения. Таким образом, прогнозируемое число ударов молнии в протяженные объекты, находящиеся в декларируемой зоне защиты молниеотвода, может существенно превышать заявляемые 1 или 5% от общего числа ударов при степени надежности защиты 99 или 95% соответственно.

В условиях широкого распространения полупроводниковой техники представляется нежелательным увеличение числа ударов молнии даже в молниеотвод, поскольку каждый такой удар вызывает появление мощного электромагнитного поля и связанных с ним наводок, которые могут негативно влиять на работу чувствительной электронной аппаратуры.

Настоящая статья посвящена разработке принципов оценки вероятности поражения молний протяженных объектов, находящихся в зоне защиты молниеотводов. Рассматриваются также возможности выбора места размещения и высоты молниеотводов с тем, чтобы уменьшить число ударов молнии не только в защищаемую зону, но и в сами молниеотводы, увеличив при этом вероятность перехвата молний со сравнительно небольшими потенциалами, защита от которых представляет наибольшую сложность. При этом используется методика расчета вероятности поражения защищаемых объектов с учетом возможности появления молний как с наименьшими, так и с наибольшими уровнями потенциалов (см. [4,5]). Данная методика основана на модели, суть которой заключается в том, что процесс ориентировки лидерного канала молнии полагается начавшимся, когда его стримерная зона касается земли, заземленного объекта, молниеотвода или стримерной зоны его восходящего лидера (см. [6]). Полагается, что удар молнии пройдет в зону, которую первой достигнет один из конкурирующих искровых каналов, развивающихся

в стримерной зоне от лидерного канала молнии во всех возможных направлениях к заземленным участкам, подсоединение к которым обеспечивает образование гальванически замкнутой цепи. При этом учитываются процессы нелинейного изменения сопротивления искры по мере роста лидерного канала, сопротивление растеканию в месте заземления, а также зависимость скорости движения головки лидера от его потенциала.

1. Методика расчета вероятности попадания молнии в протяженные объекты, расположенные в зоне защиты молниезащиты

Для того чтобы учесть все возможные варианты удара молнии в исследуемую территорию, разобьем ее площадь квадратной сеткой с шагом Δ : в результате получим K ячеек. Для учета того факта, что молнии могут попадать на исследуемую территорию также с окружающей ее зоны, расширим расчетную область, получив в результате J ячеек ($J > K$). Будем полагать, что вероятность попадания молнии одинакова в пределах каждой ячейки расчетной сетки. Пусть N_{kij} — прогнозируемое число ударов в k -й участок исследуемой территории молнии с разрядным током I_i , несущей к земле потенциал U_i , при локализации вершины лидерного канала молнии в момент ориентировки над j -м узлом расчетной сетки. Будем полагать также, что молния ударила в k -ю площадку расчетной области, если для рассматриваемого численного эксперимента время продвижения в нее лидерного канала не превышает 10% от минимального времени продвижения конкурирующих лидеров во все ячейки, на которые разбита расчетная область. Тогда P_{kij}^* — вероятность попадания в k -ю ячейку расчетной области молнии с потенциалом U_i , ориентировка лидерного канала которой начинается в j -й ячейке над рассматриваемым объектом, запишем в виде отношения N_{kij} к N_{ij} — общему прогнозируемому числу ударов в данном численном эксперименте:

$$P_{kij}^* = N_{kij}/N_{ij}, \quad (1)$$

где

$$N_{kij} = \begin{cases} 1, & \text{если молния с амплитудой тока} \\ & I_{i+1} \leq I \leq I_i \text{ ударила в } k\text{-ю ячейку,} \\ 0, & \text{если не ударила.} \end{cases}$$

Зная P_i — вероятность появления молнии с током, меньшим I_i (см., например, [3]), просуммировав все P_{kij}^* от ударов молний с амплитудами I_i , лидеры которых могут возникнуть над j -й ячейкой расчетной области, получим выражение для вероятности попадания молнии в k -ю ячейку в виде

$$\begin{aligned} P_k^* &= \sum_{i=1}^M (P_{i+1} - P_i) \sum_{j=1}^J \Delta^2 P_{kij}^* \\ &= \sum_{i=1}^M (P_{i+1} - P_i) \sum_{j=1}^J \Delta^2 N_{kij}/N_{ij}, \end{aligned} \quad (2)$$

где M — число интервалов, на которое разбит диапазон изменения тока молнии, причем $\sum_{i=1}^M (P_{i+1} - P_i) = 1$.

Тогда прогнозируемое число ударов в k -ю ячейку исследуемой территории можно найти как

$$N_k = P_k^* \Delta^2 10^{-6} N_m, \quad (2)$$

где N_m — среднегодовое число ударов молнии в 1 km^2 земной поверхности в данной географической зоне (см. [1]); Δ^2 — площадь ячейки в m^2 .

Величина P_k^* показывает, какова вероятность поражения молнией исследуемой области по отношению к средней для данной местности $P^* = 1$. Так, для молниезащиты $P^* \gg 1$, так как он притягивает к себе молнии со значительной площади; для области земли в зоне защитного действия молниезащиты $P^* < 1$.

Для расчета прогнозируемого числа ударов молнии область изменения вероятности появления отрицательных молний, ток которых лежит в интервале $(I_{i+1} - I_i)$, разбивалась на 21 часть ($M = 21$). Функциональная связь потенциала лидера молнии (который в настоящее время невозможно измерить) и тока молнии (который измеряется) можно определить в соответствии с [7, с. 172, 185] следующим образом:

$$U_1 \sim (500/0.6) I_1 \quad (4)$$

(см. табл. 1). Связь между потенциалом лидера молнии U_1 и ее током I_1 может быть определена также исходя из зависимости, установленной в [8] между дистанцией поражения R и током молнии в 1-м компо-

Таблица 1. Параметры расчета прогнозируемого числа ударов молнии

№	I_i, kA	$P_{i+1} - P_i$	ΔP_i	U_1, MV [7]
1	2–3	1–0.99	0.01	8
2	3–4	0.99–0.98	0.01	8.5
3	4–5	0.98–0.97	0.01	9
4	5–6	0.97–0.96	0.01	10
5	6–7	0.96–0.95	0.01	10.5
6	7–8	0.95–0.93	0.02	11
7	8–9	0.93–0.92	0.01	11.5
8	9–10	0.92–0.91	0.01	12.5
9	10–12	0.91–0.89	0.02	12.5
10	12–15	0.89–0.85	0.04	13
11	15–20	0.85–0.79	0.06	14
12	20–25	0.79–0.72	0.07	18
13	25–30	0.72–0.57	0.15	22
14	30–40	0.57–0.37	0.2	28
15	40–50	0.37–0.25	0.12	36
16	50–60	0.25–0.15	0.1	44
17	60–70	0.15–0.08	0.07	52
18	70–80	0.08–0.05	0.03	60
19	80–90	0.05–0.03	0.02	70
20	90–100	0.03–0.02	0.01	75
21	100–150	0.02–0	0.02	100

Таблица 2. Примеры расчета вероятности поражения молнией протяженного объекта

№	D, m	h, m	$H + h, m$	Количество молниеотводов	P_1^*	P_{ob}^*	$P_{max ar}^*$	P_{ob}^*/P_1^*	$P_{max ar}^*/P_1^*$
1	10	6	11.5	1	$1.11 \cdot 10^{-4}$	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$3.70 \cdot 10^{-6}$	1.79	0.033
2	20	12	23	1	$2.90 \cdot 10^{-4}$	$4.59 \cdot 10^{-4}$	$4.64 \cdot 10^{-6}$	1.58	0.016
3	40	24	46	1	$4.46 \cdot 10^{-4}$	$1.21 \cdot 10^{-3}$	$6.57 \cdot 10^{-6}$	2.71	0.015
4	20	12	16	4	$6.37 \cdot 10^{-4}$	$1.75 \cdot 10^{-4}$	$2.41 \cdot 10^{-6}$	0.275	0.0038
5	20	12	17.5	4	$8.37 \cdot 10^{-4}$	$2.94 \cdot 10^{-5}$	$5.78 \cdot 10^{-7}$	0.035	0.00069
6	20	12	19	4	$8.94 \cdot 10^{-4}$	$4.84 \cdot 10^{-6}$	$1.70 \cdot 10^{-7}$	0.0054	0.00019

ненте I_1 : $R = 9.4I_1^{2/3}$ (где R в [m], I_1 в [kA]), тогда

$$U_1 = E_1^- \cdot R = (1.0 \cdot 9.4)I_1^{2/3} = 9.4I_1^{2/3}, \quad (5)$$

где U_1 в [MV]; E_1^- — напряженность, необходимая для продвижения лидера отрицательной полярности [MV/m]; $E_1^- = 10 \text{ kV/cm} = 1.0 \text{ MV/m}$ (см., например, [7]).

В пользу того, что более достоверно связь между током молнии и ее потенциалом описывается в [7], а не в [8], может служить тот факт, что средняя длина ступени отрицательного лидера молнии полагается равной 30 м, что соответствует наиболее распространенному току молнии в 30 кА. Значение 30 м получается, если пользоваться зависимостью $U_1(I_1)$, приведенной в [7], а не в [8].

Рассчитаем вероятность поражения молнией протяженного объекта, целиком лежащего в зоне, которая, согласно [1], обеспечивает его защиту со степенью надежности 95%. Для того чтобы показать количественные отличия в прогнозируемом числе ударов в молниеотводы различной высоты и в защищаемые ими объекты, рассчитаем прогнозируемое число ударов молнии в три геометрически подобные системы „молниеотвод–объект“. Пусть данная система представляет собой защищаемый объект в виде параллелепипеда (здания) высотой h и габаритами $D \times D$, а молниеотвод — размещенный в центре его верхнего основания (крыши) — стержень высотой H . Полная высота молниеотвода ($H + h$) выбрана такой, чтобы защищаемый объект находился в зоне защиты, определяемой в соответствии с [1] как имеющая степень надежности 95%.

Подсчет прогнозируемого числа ударов молнии в объект рассчитывается в виде суммы всех ударов в него независимо от места поражения. Примем за базовую систему со следующими геометрическими параметрами: $h = 12$, $D = 20$, $H = 11$ м (полная высота молниеотвода $H + h = 23$ м). Рассмотрим случай удара молнии, несущей к земле потенциал $U_1 = 28 \text{ kV}$. Согласно известным данным (см. [3,7]), появление таких молний является весьма вероятным событием ($\Delta P = 0.2$), а данный уровень U_1 примерно соответствует среднему уровню потенциалов лидерного канала молний. Рассчитанные для этого случая вероятности представлены в табл. 2 под номером 2.

При этом под P_1^* понимается вероятность попадания молнии в молниеотвод; под $P_{max ar}^*$ — максимальная

вероятность попадания молнии в защищаемую область, исключая молниеотвод (данную величину можно трактовать как вероятность попадания молнии в объект, площадь которого не превышает площади ячейки расчетной сетки); под P_{ob}^* — суммарная вероятность попадания в протяженный объект. Были также проведены расчеты для случая системы, геометрически подобной предыдущей, размеры которой в 2 раза меньше: $h = 6$, $D = 10$, $H = 5.5$ м (см. табл. 2, номер 1). Аналогичные расчеты были проведены при вдвое большей высоте молниеотвода — $H = 22$ м (полная высота $H + h = 46$ м) и защищаемых объектов — $h = 24$, $D = 40$ м (см. табл. 2, номер 3).

Результаты расчета вероятности поражения молнией для этого случая приведены на рис. 1 и 2. Рис. 2 во всем соответствует рис. 1, за исключением не показанной

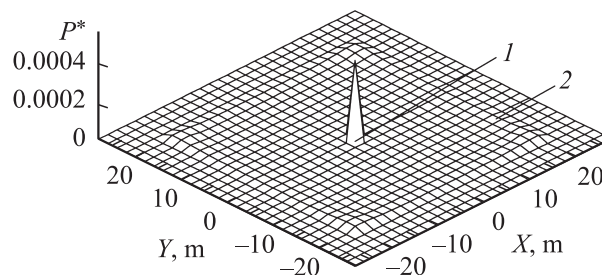


Рис. 1. Рассчитанная картина распределения вероятности попадания молнии в защитную зону молниеотвода (1 — молниеотвод, 2 — защищаемый объект).

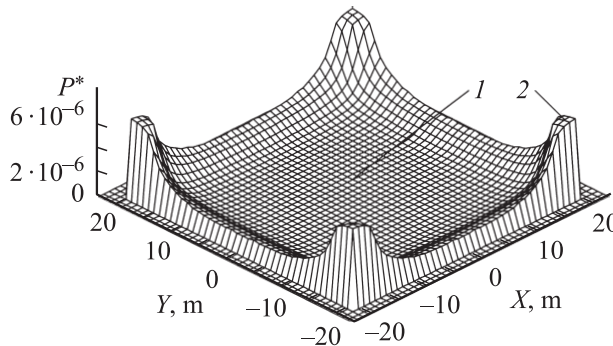


Рис. 2. Рассчитанная картина распределения вероятности попадания молнии в защитную зону при не показанной вероятности попадания молнии в молниеотвод (1 — место размещения молниеотвода, 2 — защищаемый объект).

на нем вероятности попадания молнии в молниеотвод. Из полученных данных можно сделать ряд выводов. Во-первых, хотя отношение прогнозируемого числа ударов молнии в локальные области защищаемой зоны к числу ударов в молниеотвод для трех рассмотренных случаев примерно одинаково и не превышает уровня 0.05 (см. столбец $P_{\max \text{ аг}}^*/P_1^*$ в табл. 2), т. е. обеспечивает защиту с декларируемым в [1] уровнем надежности 95%, абсолютные уровни P^* существенно возрастают с увеличением габаритов системы. Второй вывод, хотя и является вполне очевидным, не нашел отражения в действующих нормативных документах по молниезащите. Понятно, что для протяженных объектов прогнозируемое число ударов в них должно суммироваться независимо от места попадания. Таким образом, вероятность попадания молнии в протяженные объекты, целиком лежащие в декларируемой защитной зоне, может оказаться существенно выше, чем для объектов малой площади. Так, для рассмотренных случаев (см. табл. 2, номера 1–3) общее прогнозируемое число ударов в расположенные в декларируемой защищенной зоне протяженные объекты оказалось большим, чем в молниеотвод. Как и следовало ожидать, с увеличением габаритов системы прогнозируемое число ударов молнии в защищаемый объект также увеличивается. Таким образом, для протяженных объектов прогнозы относительно их защищенности, оцененные в соответствии с действующими нормативными документами, оказываются неприменимыми.

2. Пример расчета вероятности попадания молнии на территорию энергетического объекта, защищаемого молниеотводами

При проектировании, а также при оценке надежности уже действующих объектов, критичных к ударам молнии (например, высоковольтные подстанции, нефте- и газопередающие станции и др.), представляется желательным получение информации о прогнозируемом числе ударов в различные сооружения рассматриваемых объектов. Причем важной является также информация о прогнозируемом числе ударов молний с определенными уровнями токов, в том числе наибольшими, наименьшими и наиболее распространенными. Для того чтобы получить такую информацию, было разработано программное обеспечение, основанное на использовании формул (2), (3) и моделей, описанных в [4–6]. Данная программа позволяет вводить информацию о координатах и высоте сооружений рассматриваемого объекта. Вводятся также данные о месте размещения и высоте молниеотводов и защитных сеток.

Алгоритм работы программы заключается в следующем. Исследуемый объект разбивается квадратной сеткой с заданным шагом Δ . Такая же сетка наносится на плоскость над исследуемым объектом, с которой в каждую ячейку объекта может пройти удар молнии

(назовем ее условно областью облаков). Причем поскольку удар молнии может пройти из зоны, лежащей за пределами исследуемой территории, область облаков больше области исследуемого объекта.

Рассмотрим все возможные сценарии удара молнии из каждой ячейки, на которые разбита зона облаков. Для этого, зафиксировав месторасположение вершины лидера молнии в определенной ячейке зоны облаков, рассчитаем время продвижения искры в стримерной зоне лидерного канала молнии в каждую ячейку исследуемого объекта при потенциале лидерного канала молнии, найденном по формуле (4), для определенного уровня тока молнии при заданной вероятности его появления (см. табл. 1). При работе модуля программы, имитирующей продвижение лидерного канала молнии в стримерной зоне, учитываются нелинейный характер изменения тока искры, зависимость ускорения и скорости продвижения стримера от напряженности электрического поля, величина сопротивления растекания в месте подсоединения искры к земле и др. (см. [6]). Высота, с которой процесс ориентировки лидерного канала молнии полагается начавшимся, определяется как минимальная высота, с которой при текущем положении вершины лидерного канала молнии с потенциалом U_i до земли или заземленного участка достигается расстояние, равное радиусу зоны отрицательного стримера ($L_{st} = U_i/E_1^-$). Будем полагать, что удар молнии пройдет лишь в ячейке объекта, время продвижения в которые не превышает 10% от минимального времени для данного численного эксперимента (см. [6]). Просуммировав прогнозируемое число состоявшихся ударов в каждую ячейку объекта, путем перебора всех возможных потенциалов лидерного канала молнии, возникающих с определенной вероятностью, а также мест расположения ячеек, на которые разбита область облаков, получим картину распределения числа ударов молнии на территории исследуемого объекта.

На рис. 3 представлены рассчитанные распределения P^* — вероятности попадания молнии в каждую ячейку, на которые разбита территория комплекса зданий одного из объектов энергетической системы Украины, для всего спектра молний в диапазоне от $U_1 = -8$ до -100 MV (см. табл. 1). Величина P^* рассчитана относительно

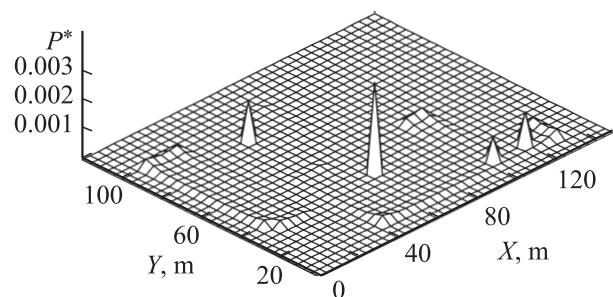


Рис. 3. Рассчитанная картина распределения вероятности попадания молнии на территорию исследуемого объекта (см. рис. 4) для молний, несущих к земле потенциалы от $U_1 = -8$ до -100 MV (шаг разбиения объекта $\Delta = 4$ м).

Таблица 3. Вероятности попаданий молнии в здания объекта

№ объекта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
P^*	0	0.0004	0.0059	0.000016	0.000096	0.000028	0.003	0.0013	0.00078	0.001	0.0056

N_m — среднегодового числа ударов молнии в 1 km^2 земной поверхности в данной географической зоне (см. [1]). Таким образом, прогнозируемое число ударов в ячейки

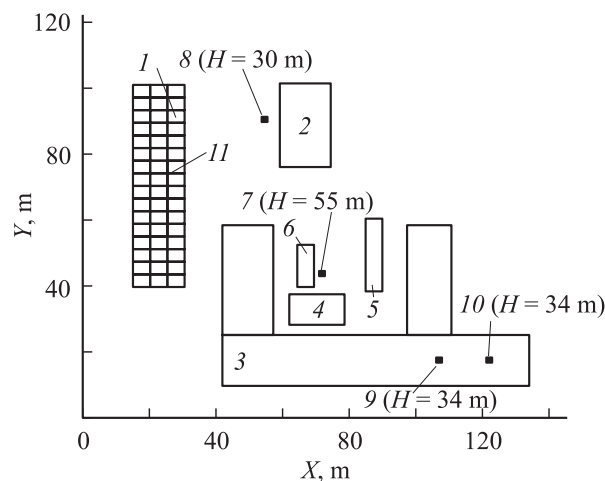


Рис. 4. План исследуемого энергетического объекта: 1 — здание высотой 24 м с размещенной на крыше защитной сеткой II (габариты ячеек $5 \times 4 \text{ м}$); 2 — здание высотой 4 м, 3 — здание высотой 24 м; 4–6 — здания высотой 4 м; 7–10 — молниеотводы (высота H каждого из них указана на рисунке).

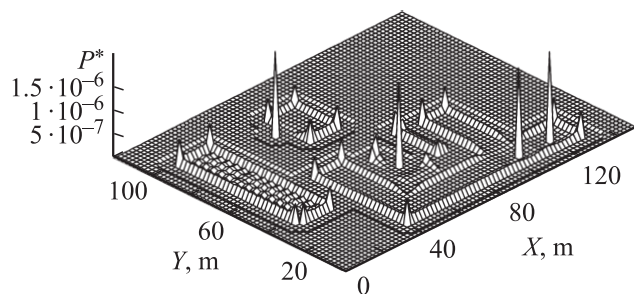


Рис. 5. Рассчитанная картина распределения вероятности попадания молнии на территорию исследуемого объекта (см. рис. 4) для случая молнии, несущей к земле потенциал $U = -8 \text{ MV}$ (вероятность появления — 0.01%). Шаг разбиения объекта $\Delta = 2 \text{ м}$.

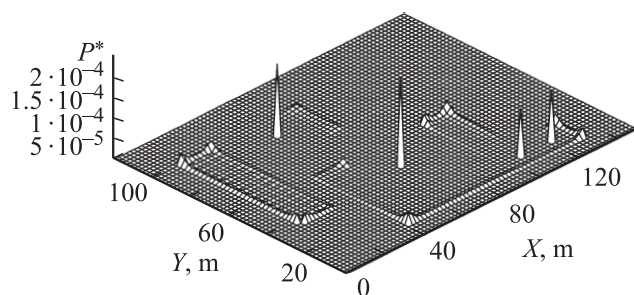


Рис. 6. То же, что на рис. 5, для $U = -22 \text{ MV}$ (вероятность появления — 0.15%). Шаг разбиения объекта $\Delta = 2 \text{ м}$.

площадью Δ^2 исследуемой территории определяется по формуле (3). На рис. 4 показан план данного объекта с указанием высоты зданий и молниеотводов.

На рис. 5 представлено рассчитанное распределение P^* для случая появления молний с потенциалом $U_1 = -8 \text{ MV}$ (вероятность — 0.01%). На рис. 6 приведено рассчитанное распределение P^* для случая появления молний с потенциалом $U_1 = -22 \text{ MV}$ (вероятность — 0.15%).

В табл. 3 представлены рассчитанные значения вероятности попадания молнии в здания и молниеотводы на исследуемой территории (номера объектов соответствуют плану, приведенному на рис. 4).

3. Принципы выбора высоты и места размещения молниеотводов

Отличие используемого подхода к расчету вероятности поражения молнией защищаемых зон и объектов от традиционных заключается в том, что основную роль в выборе лидерным каналом молнии объекта поражения на земле играет соотношение расстояний между их стримерными зонами, а не между ними самими. При этом учитывается, что напряженность развития стримера отрицательной полярности (которую, как правило, имеет лидерный канал молнии) в 2 раза больше, чем для стримера положительной полярности (которую, как правило, имеет встречный лидер с земли). Таким образом, лидерный канал молнии может выбрать местом удара объект, с которого развивается встречный лидер, а не участок, расстояние до которого меньше, чем расстояние до такого объекта (рис. 7). Это объясняется тем, что даже если расстояние от головки лидерного канала молнии до молниеотвода превышает расстояние до земли ($L_6 > L_7$, рис. 7), после касания стримерных зон восходящего и нисходящего лидеров молниеотвода и канала молнии процесс гальванического замыкания цепи по линии, соединяющей стримерные зоны (L_6 , рис. 7), может произойти быстрее, чем процесс развития пробоя более короткого воздушного промежутка (L_7 , рис. 7).

Для того чтобы от объекта или молниеотвода развивался встречный лидер, необходимо выполнение ряда условий. Во-первых, на поверхности рассматриваемого объекта должна достигаться напряженность электрического поля, не меньшая 30 kV/cm , т.е. достаточная для возникновения пробоя. Во-вторых, вблизи объекта должна быть напряженность электрического поля, не меньшая 5 kV/cm , достаточная для продвижения положительного лидера. В-третьих, поскольку встречный лидер будет возникать с задержкой, он должен появляться за некоторое время до того, как стримерная зона лидерного канала молнии коснется объекта.

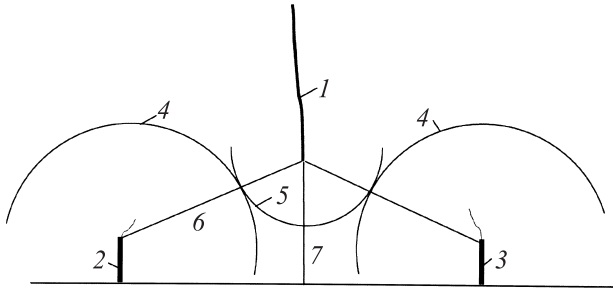


Рис. 7. Иллюстрация выбора лидерным каналом молнии места удара: 1 — лидерный канал молнии; 2, 3 — молниеотводы; 4 — стримерные зоны молниеотводов 2, 3; 5 — стримерная зона лидерного канала молнии 1; 6 — расстояния между стримерной зоной лидерного канала 1 и молниеотводами 2, 3; 7 — расстояние между лидерным каналом 1 и ближайшей к нему зоной на поверхности земли.

В-четвертых, необходимо время, чтобы встречный лидер достиг некоторой длины, чтобы его можно было считать лидером, имеющим стримерную зону.

Можно сделать вывод, что для того, чтобы по возможности сократить количество ударов молнии в молниеотвод, нет надобности увеличивать его высоту свыше совершенно необходимых уровней. Наиболее рациональ-

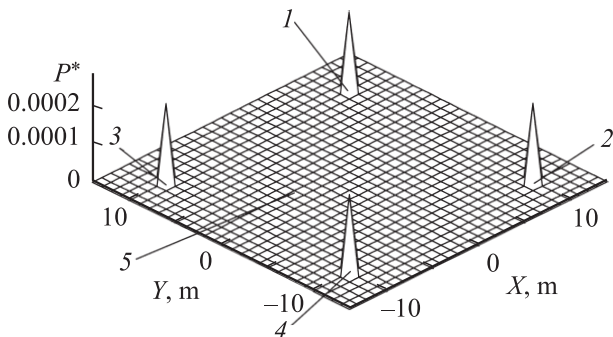


Рис. 8. Рассчитанная картина распределения вероятности попадания молнии в защитную зону молниеотвода (1–4 — молниеотводы, 5 — защищаемый объект).

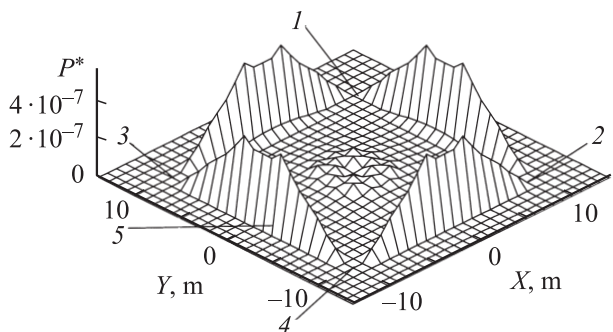


Рис. 9. Рассчитанная картина распределения вероятности попадания молнии в защитную зону при не показанной вероятности попадания молнии в молниеотвод (1–4 — место размещения молниеотводов, 5 — защищаемый объект).

ным представляется использование нескольких коротких молниеотводов (высотой до 5–10 м), расположенных на крыше здания вдоль его периметра.

Для геометрии рассмотренного ранее защищаемого объекта (параллелепипед с основанием $20 \times 20 \text{ м}^2$ и высотой 12 м) рассчитаем распределение вероятностей поражения объектов молнией, несущей к земле потенциал 28 kV (вероятность появления таких молний — $\Delta P = 0.2$ — см. табл. 1). В качестве средств защиты предлагается разместить 4 молниеотвода по углам здания.

В табл. 2 представлены результаты расчета вероятностей для различных высот молниеотводов (номера 4–6). На рис. 8, 9 показаны результаты расчета вероятности поражения объекта молнией для случая высоты молниеотводов $H + h = 17.5 \text{ м}$. Причем рис. 9 во всем соответствует рис. 8, за исключением не показанной на нем вероятности попадания молнии в молниеотводы. Как видно из табл. 2, суммарное прогнозируемое число ударов молнии в защищаемые объемы $P_{\text{об}}^*$ существенно снижается по сравнению со случаем базового варианта (см. табл. 2, номер 2). Из проведенных расчетов видно, что высоту молниеотвода можно выбирать исходя из условия обеспечения требуемого уровня надежности защиты, а также минимизации прогнозируемого числа попаданий молнии в молниеотводы. Этому условию отвечает вариант 5 (табл. 2), обеспечивающий снижение вероятности попадания молний в протяженный защищаемый объект до уровня надежности защиты ниже чем 0.05%.

Допустим, что так называемые активные молниеотводы, призванные расширить зону защиты молниеотвода за счет виртуального увеличения его высоты на длину восходящего лидера, действительно способны генерировать восходящий лидер большой длины. Тогда они могли бы лишь ухудшить ситуацию, увеличивая число притянутых молний с наибольшими потенциалами и не повышая число притянутых боковых молний сравнительно малых потенциалов. Возможно, что такие „активные молниеотводы“ должны быть небольшой высоты (до 5–10 м) и входить в группу аналогичных, но пассивных молниеотводов, с тем чтобы наряду с защитой от молний со сравнительно малыми потенциалами обеспечивать защиту от молний с повышенными потенциалами, которые могут поразить защищаемый объект.

Выводы

1. Разработана методика численного расчета распределения прогнозируемого числа ударов молнии в защищаемые молниеотводами протяженные объекты. Данная методика учитывает вероятность появления молний с различными потенциалами и изменение в зависимости от этого радиуса стримерной зоны лидерного канала молнии, момент касания которой участка земли или заземленного объекта определяет начало ориентировки на него молнии. При этом учитываются также нелинейный характер изменения тока искры в стримерной

зоне, зависимость скорости и ускорения стримера от напряженности электрического поля, влияние величины сопротивления растекания в месте заземления объекта.

2. Показано, что для протяженных объектов не могут быть применены те же принципы, что и для объектов малой площади, для которых были получены зоны защиты молниеотводов [2]. Поскольку данные принципы положены в основу действующих нормативных документов по молниезащите, при выборе средств защиты протяженных объектов следует учитывать, что вероятность прорыва на них молнии может быть существенно выше, чем декларируется в [1].

3. Выполнен пример расчета распределения прогнозируемого числа ударов молнии на территории одного из энергетических объектов. Показано изменение характера данного распределения в зависимости от величины потенциала лидерного канала молнии.

4. Предложены принципы выбора средств молниезащиты, обеспечивающие снижение числа попаданий молний в молниеотводы. Выполнен пример расчета, иллюстрирующий преимущества предложенной схемы молниезащиты.

Список литературы

- [1] РД 34.21.122-87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. М.: Энергоатомиздат, 1989. 56 с.
- [2] Акоюн А.А. // Тр. ВЭИ. 1940. Вып. 36. С. 94–159.
- [3] IEC 1312-1. International Standard „Protection against lightning electromagnetic impulse“. Geneva: IEC, 1995. 81 p.
- [4] Резинкина М.М., Князев В.В., Кравченко В.И. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 1. С. 63–68.
- [5] Резинкина М.М., Князев В.В., Кравченко В.И. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 8. С. 44–48.
- [6] Резинкина М.М., Князев В.В., Кравченко В.И. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 9. С. 44–51.
- [7] Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001. 319 с.
- [8] IEC 61024-1. International Standard „Protection of structures“. Part I. General Principles. 1990. 47 p.