

Метод расчета зоны защиты стержневых и тросовых молниеотводов с использованием угла защиты α

КУПРИЕНКО В.М.

Предложена методика расчета зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов с использованием угла защиты α . Методика учитывает взаимное влияние двойных и многократных стержневых (тросовых) молниеотводов на размеры зоны защиты и основана на полученных автором результатах крупномасштабных испытаний. Приведен пример расчета молниезащитной системы условного объекта.

Ключевые слова: молниезащита, молниеотводы, зона защиты, угол защиты, расчет

Критическая оценка действующих отечественных и зарубежных нормативных документов в ряде появившихся за последнее время публикаций [1, 2] ставит вопрос о необходимости разработки нормативного документа по молниезащите на принципиально новой методической основе с учетом положительного опыта применения существующих методик.

Основу всех действующих нормативных документов составляет методика расчета и выбора параметров зоны защиты стержневых и тросовых молниеотводов, обеспечивающих требуемую надежность молниезащиты [3–6]. Базовым элементом различных методик является зона защиты одиночного стержневого молниеотвода высотой h , радиус защиты которого r_x определяет надежность молниезащиты объекта. Принципиальным вопросом при этом является методика расчета зоны защиты стержневого и тросового молниеотводов.

Основными показателями нормирования молниезащиты являются вероятность поражения объекта P_H прямым ударом молнии (ПУМ), эффективность (надежность) защитного действия устройств молниезащиты и функциональная взаимосвязь показателей эффективности с категорией молниезащиты объекта, его конструктивными особенностями и параметрами разряда молнии.

В зависимости от значимости объекта молниезащиты, типа здания (сооружения), его назначения, наличия взрывчатых или легко воспламеняющихся веществ, опасности для экологии, окружающей среды и населения, возможного материального ущерба объекты разделяются, как правило, на три категории [3, 5, 6]. Для объектов I, II и III категории молниезащиты соответствует один уровень защиты, который характеризуется эффективностью P_H внешней молниезащитной системы (МЗС) при

A procedure for calculating the protection zones of lightning rods and lightning conductors using the protection angle α is proposed. The procedure takes into account the mutual influence of double and multiple lightning rods (conductors) on the sizes of the protection zone and is based on the results of large-scale tests obtained by the author. An example of calculating the lightning protection system for a conditional facility is given.

Key words: lightning protection, lightning diverters, protection zone, protection angle, calculation

заданном предельно допустимом числе прорывов молнии к объекту. Допустимое число прорывов N_d (уд/год) и требуемая эффективность внешней молниезащиты P_H определяют уровень защиты объекта.

В результате многочисленных экспериментальных исследований, выполненных в ОАО «26ЦНИИ», разработан новый подход к расчету и выбору зоны защиты стержневых и тросовых молниеотводов. Зона защиты в предлагаемой методике определяется по значению угла защиты α . В отличие от методики расчета, предложенной в документе МЭК 62305, угол защиты α определяется не по так называемой «электрогеометрической» модели, а по результатам крупномасштабных испытаний с учетом взаимного влияния двойных и многократных стержневых (тросовых) молниеотводов. Суть предлагаемой методики заключается в следующем.

1. Для заданной категории объекта молниезащиты определяется требуемая надежность (эффективность) внешней МЗС (вероятность перехвата молнии P_H).

2. Выбирается наиболее приемлемый для данного объекта тип МЗС.

3. Проводится расчет высоты молниеотводов (высота подвеса троса) внешней МЗС по соответствующему категории объекта углу защиты α .

Выбор показателя эффективности (надежности) внешней молниезащитной системы для объекта заданной категории. Выбор типа и расчет высоты молниеотводов для защиты от прямого удара молнии (ПУМ) проводятся исходя из параметров объекта: длины, ширины, высоты ($a' b' h_0$) и заданной надежности (эффективности) P_H внешней МЗС. Объект считается защищенным, если совокупность всех его молниеотводов обеспечивает требуемое

значение эффективности (надежности) молниезащиты при заданной предельно допустимой частоте (вероятности) прорыва молнии к объекту (сооружению) N_d .

Эффективность внешней молниезащитной системы P_H должна соответствовать установленной категории здания (сооружения) и является исходной предпосылкой для ее проектирования. Категория молниезащиты объекта (здания, сооружения) указывается в задании на проектирование.

На первом этапе выбора МЗС разрабатывается расчетная модель объекта и выполняется анализ грозовой активности (среднегодового числа грозовых разрядов на единицу площади) в рассматриваемой местности. Эти данные служат основой для определения вероятности поражения N_{Π} незащищенного объекта разрядом молнии. Определение N_{Π} проводится по следующим формулам [3]:

для сосредоточенных сооружений (дымовые трубы, вышки и т.п.)

$$N_{\Pi} = 9\rho h_0^2 n 10^{-6};$$

для зданий и сооружений прямоугольной формы (или приведенных к прямоугольной форме)

$$N_{\Pi} = [(a + 6h_0)(b + 6h_0) - 7,7h_0^2] n 10^{-6},$$

где h_0 — наибольшая высота здания или сооружения, м; a , b — длина и ширина здания или сооружения соответственно, м; n — среднегодовое число ударов молнии в 1 км² земной поверхности (удельная плотность ударов молнии в землю) в месте нахождения здания или сооружения.

На втором этапе устанавливается N_d — предельно допустимое для данного объекта число ударов молнии в год (уровень защиты). Например, для объектов I категории один раз в 1000, II категории — 500, III категории — 100 лет.

На третьем этапе проводится сравнение вероятности поражения N_{Π} незащищенного объекта заданной категории с предельно допустимым для рассматриваемого объекта среднегодовым числом прямых ударов молнии N_d в год, приводящих к опасным последствиям.

Если $N_{\Pi} > N_d$, то проводится выбор внешней МЗС. Для этой цели определяется расчетная эффективность P_{Φ} внешней МЗС, которая обеспечивает не превышение предельно допустимого числа ударов молнии в год для объекта заданной категории:

$$P_{\Phi} = 1 - N_d / N_{\Pi}.$$

Для обеспечения требуемого уровня молниезащиты эффективность выбранной внешней МЗС P_H должна быть не ниже ее расчетного значения —

$P_H > P_{\Phi}$. Если это условие выполняется, то по данным таблицы определяется угол защиты α , обеспечивающий требуемую эффективность P_H внешней МЗС, и проводится расчет ее параметров.

Расчет высоты молниеотводов внешней МЗС. Приведенная далее методика определения высоты отдельно стоящих стержневых и тросовых молниеотводов по защитному углу α распространяется на устройство молниезащиты маловысотных (до 20 м) объектов [6]. При этом высота отдельно стоящих стержневых (тросовых) молниеотводов не должна превышать 60 м [4].

Методика определения параметров молниеотводов по углу защиты α может быть распространена на более высокие здания и сооружения при установке молниезащитных устройств непосредственно на объекте. При этом суммарная высота объекта защиты и установленных на нем молниеотводов не должна превышать 60 м.

Угол защиты α определяется от вершины стержневого или тросового молниеотвода до наиболее удаленной точки объекта на его высоте h_0 . Метод защитного угла может быть использован как для простых по форме сооружений, так и для объектов сложных форм.

При определении угла защиты стержневые молниеотводы, мачты и тросы размещаются так, чтобы все части здания (сооружения) на его высоте h_0 находились в зоне защиты, образованной под углом α к вершине молниеотвода высотой h .

Значения угла защиты α одиночных (внешний угол защиты) и многократных молниеотводов (внутренний угол защиты), обеспечивающих требуемый уровень молниезащиты для зданий и сооружений высотой до 20 м различной категории и занимаемой площади, приведены в таблице. Там же приведены рекомендуемые площади объекта в плане, для которого целесообразно применять выбранную схему молниезащиты.

Данные по углу α , приведенные в таблице, получены в результате большого числа крупномасштабных испытаний по сравнительной оценке эффективности различных схем молниезащиты для объекта в форме квадрата ($a = b$). Для объекта, вытянутого по форме ($b \gg 0$), угол защиты увеличивается, что приводит к увеличению зоны защиты одинаковых по высоте молниеотводов.

Для внешней зоны каждого из многократных стержневых молниеотводов, двойного тросового молниеотвода и молниезащитной сетки угол защиты α определяется как для одиночного молниеотвода (стержневого, тросового).

При прочих равных условиях угол защиты α многократных молниеотводов и двойного тросового

Категория объекта по молниезащите	Уровень защиты		Угол защиты α , град							
			внешний		внутренний				внешний	
	Схема молниезащиты объектов высотой до 20 м									
	Дополнительное число прорывов N_d , уд/в год	Надежность МЗС P_H	одиночный стержень		двойной стержень		четыре стержня		тросовая	
			Площадь объекта в плане (не более), м ²						одиночный	двойной
		0,5	100	100	400	2000	2500	2000	2500	
I	0,001	0,99	25	30	45	42	40	56	32	68
II	0,002	0,95	32	38	50	48	46	60	57	75
III	0,01	0,9	35	46	56	54	52	68	70	78

го молниеотвода во внутренней области между молниеотводами значительно больше, чем у одиночного стержневого и одиночного тросового молниеотвода (см. таблицу).

Учет влияния формы объекта при определении значения угла защиты α . Изменение формы объекта (когда размер a не равен b) характеризуется значением угла b (рис. 1): угла между осью, соединяющей молниеотводы, и радиусом защиты r_x от каждого из молниеотводов до наиболее удаленной точки n по оси симметрии на высоте объекта h_0 .

На рис. 2 приведены полученные экспериментально графические зависимости изменения угла защиты α от угла b ($40^\circ > b > 0$) в случае защиты объекта двумя стержневыми молниеотводами. При $b=0$ объект высотой h_0 представляет собой линию и угол защиты α имеет максимальное значение (для I уровня защиты при $b=0$ - $\alpha=55^\circ$, при $a=b$ угол $\alpha=40^\circ$).

Углы защиты α и b могут быть использованы при расчете высоты молниеотводов для объекта любой формы. При этом активная часть молниеотводов, возвышающихся над объектом, определяется

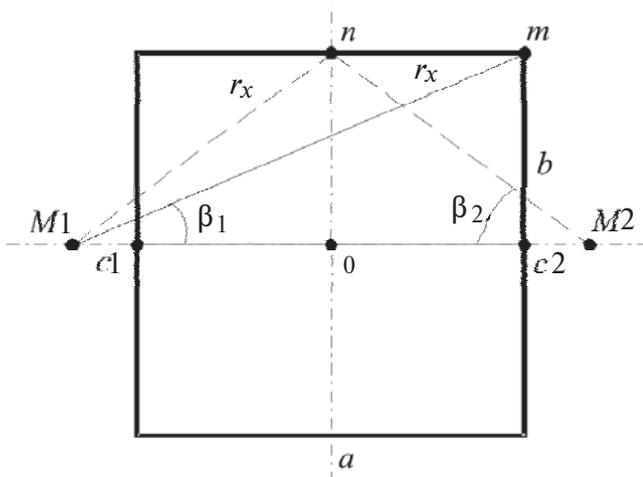


Рис. 1. Определение угла β_1 одиночного ($M1$) и угла β_2 двойного ($M1, M2$) молниеотводов на высоте объекта h_0

ся по формуле: $h_{\text{ф}} = \frac{a+2l}{2 \operatorname{tg} \alpha \cos b}$, а высота каждого из двух одинаковых стержневых молниеотводов $h_M = h_{\text{ф}} + h_0$.

Аналогичным образом с использованием угла защиты α и угла b может быть определена высота и расстановка многократных (4-х, 6-ти и т.д.) стержневых молниеотводов. При условии, что расстояние между крайней парой стержневых молниеотводов определяется по углу защиты как для двойных стержневых молниеотводов одинаковой высоты, а внутренний угол защиты последовательности из четырех стержневых молниеотводов определяется по данным таблицы.

Методика расчета зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов по углу защиты α . Двойной стержневой молниеотвод. Схема расчета высоты двух стержневых молниеотводов при их расположении вдоль оси симметрии объекта приведена на рис. 3.

Минимально допустимое расстояние l от края защищаемого объекта до молниеотводов определяется по требованиям, изложенным в [3, 5, 6].

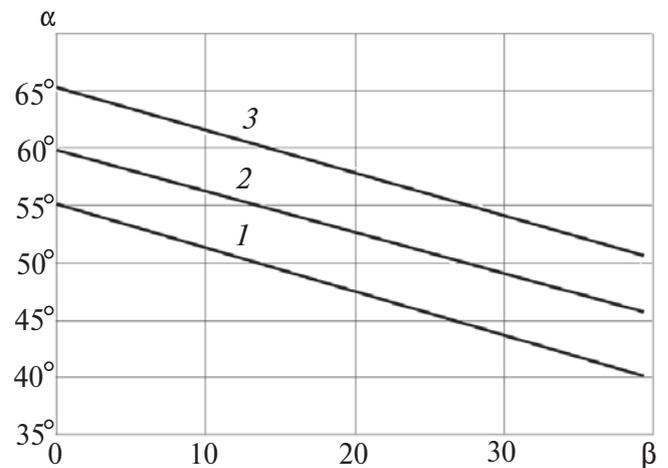


Рис. 2. Графические зависимости изменения угла α от угла b при защите двумя стержневыми молниеотводами: 1 - для $P_H=0,99$; 2 - 0,95; 3 - 0,90

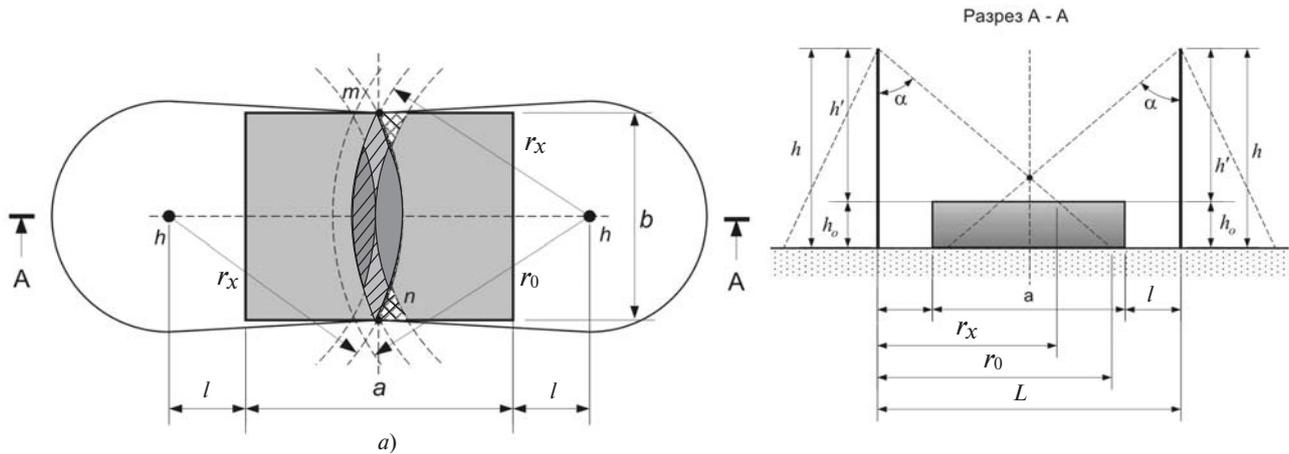


Рис. 3. Схема для расчета высоты двух стержневых молниеотводов

Порядок расчета двух одинаковых по высоте стержневых молниеотводов:

определяется расчетная эффективность молниезащиты P_H^{ϕ} ;

для P_H^3 P_H^{ϕ} по данным таблицы определяется внутренний угол защиты a в зависимости от категории объекта и его площади¹;

определяется радиус зоны защиты каждого из молниеотводов до расчетной точки n, m (см. рис. 3) на расстоянии $r_{x1} = r_{x2} = r_x$ и высоте h_0 объекта:

$$r_x = \sqrt{(L/2)^2 + (b/2)^2}, \text{ где } L = a + 2l;$$

по углу защиты a определяется эффективная высота молниеотводов: $h_{\phi} = r_x / \text{tga}$;

определяется высота молниеотводов, обеспечивающая требуемую эффективность молниезащиты P_H : $h = h_{\phi} + h_0$.

Многokратные стержневые молниеотводы. Для четырех стержневых молниеотводов одинаковой высоты, размещаемых симметрично относительно оси симметрии на расстоянии l от объекта и l_1 от его углов, их высота рассчитывается по схеме (рис. 4) в следующей последовательности:

определяется радиус зоны внутренней области защиты молниеотводов: $r_x = \sqrt{(b/2 + l)^2 + (a/2 - l_1)^2}$, где $r_x = r_{x1} = r_{x2} = r_{x3} = r_{x4}$ (внешняя область зоны защиты определяется как для двух стержневых молниеотводов);

определяется эффективная высота молниеотводов: $h_{\phi} = \frac{r_x}{\text{tga}}$, где a – внутренний угол – определяется по данным таблицы для эффективности молниезащиты P_H ;

определяется по данным таблицы для эффективности молниезащиты P_H ;

определяется высота молниеотводов: $h_1 = h_2 = h_3 = h_4 = h_{\phi} + h_0$.

Число стержневых молниеотводов для одного объекта не ограничено и определяется его размерами (площадью) независимо от категории объекта. При числе молниеотводов больше четырех каждая последующая пара совместно с предыдущей рассматривается как четырехстержневая МЗС, внутренний угол защиты a которой определяется по данным таблицы.

Тросовые молниеотводы. Схема расчета высоты подвеса одиночного троса при заданном значении эффективности молниезащиты P_H приведена на рис. 5.

Порядок расчета высоты подвеса троса: определяется расчетная эффективность P_H^{ϕ} ;

для P_H^3 P_H^{ϕ} определяется угол защиты a по данным таблицы;

по углу защиты a и ширине объекта b определяется высота подвеса троса над объектом: $h_{\phi} = b/2 \text{tga}$;

с учетом стрелы провеса троса определяется высота подвеса на опорах: $h_T = h_{\phi} + h_0 + Dh_T$.

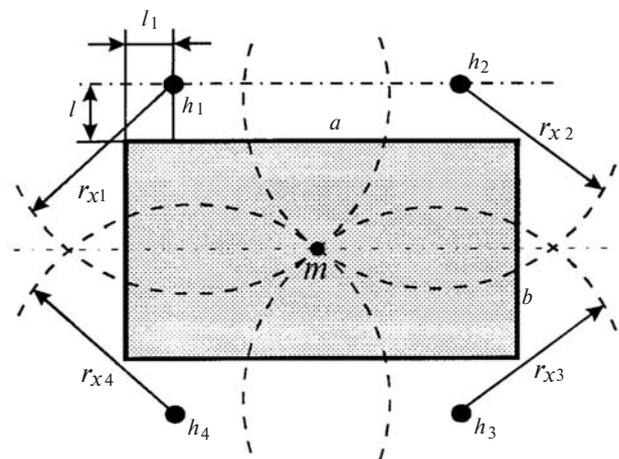


Рис. 4. Схема молниезащиты сооружения четырьмя отдельно стоящими стержневыми молниеотводами

¹ Внутренний угол защиты a определяется только для пространства, заключенного между двумя стержневыми молниеотводами на расстоянии L между ними. За пределами этой зоны угол защиты a определяется как для одиночного стержневого молниеотвода.

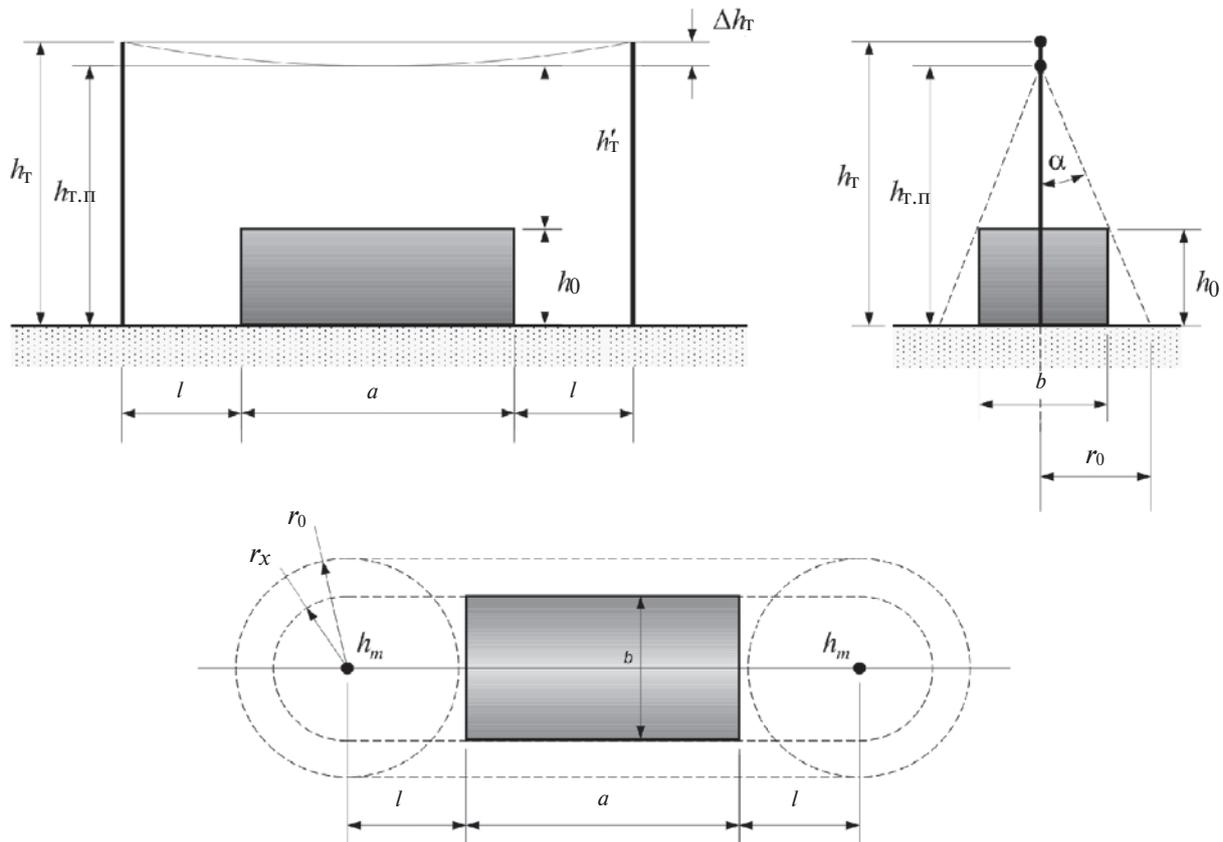


Рис. 5. Схема для расчета высоты подвеса троса

Величина провеса Dh_T в зависимости от расстояния между опорами троса принимается: при $L < 120$ м $Dh_T = 2$ м; при $120 < L \leq 150$ м $Dh_T = 3$ м.

Для двойного тросового молниеотвода внешний угол защиты α определяется по данным таблицы как для одиночного троса, а внутренний угол защиты α — по данным таблицы для области пространства, заключенного между параллельными тросами.

Молниезащита зданий (сооружений) высотой до 60 м. Как правило, высокие здания и сооружения относятся к объектам II и III категории молниезащиты.

Молниезащита высоких объектов осуществляется преимущественно молниеотводами, устанавливаемыми на здании (сооружении). Молниеотводы выполняются в виде стержневых, тросовых молниеотводов, молниезащитной сетки или их произвольной комбинации. В исключительных случаях по требованию заказчика и при соответствующем обосновании защита высоких объектов может осуществляться отдельно стоящими молниеотводами по особому проекту.

Высота и число стержневых молниеотводов, устанавливаемых на здании (сооружении), а также высота подвеса тросов и их число определяются также углом защиты α , обеспечивающим молниезащиту сооружения заданной категории. Значение

угла защиты α стержневых и тросовых молниеотводов определяется относительно плоской части кровли здания на ее высоте h_0 . Угол защиты α определяется по данным таблицы. Высота молниеотводов определяется по приведенной методике.

Пример. Требуется выполнить расчет молниезащиты для условного сооружения I категории размерами $a' b' h_0 = 40' 40' 10$ м. Плотность грозовых разрядов в месте размещения сооружения $n = 4$ (1/км² в год). Расчетное число ударов в год в незащищенное сооружение $N_{\Pi} = 0,037$. Для сооружений I категории предельно допустимое число ударов молнии (в год), приводящих к опасным последствиям, не более $N_{\text{д}} = 0,001$, т.е. $N_{\Pi} > N_{\text{д}}$. Следовательно, необходимо принять меры по созданию внешней МЗС сооружения с надежностью не ниже $P_{\text{н}} = 1 - N_{\text{д}} / N_{\Pi} = 0,97$.

По данным таблицы предельно допустимому числу ударов молнии в сооружение на уровне $N_{\text{д}} = 0,001$ (т.е. один раз в 1000 лет) соответствует надежность внешней МЗС (вероятность перехвата молнии) на уровне $P_{\text{н}} \approx 0,99$. В данном случае $P_{\text{н}} < P_{\text{н}}$. Следовательно, условие по обеспечению молниезащиты на уровне $P_{\text{н}} = 0,99$ удовлетворяется полностью.

По таблице выбирается схема молниезащиты, определяется угол защиты α и проводится расчет параметров внешней МЗС.

Расчет параметров молниезащиты. В а р и а н т 1.

Для защиты сооружения использованы два отдельно стоящих стержневых молниеотвода на расстоянии $l=5$ м от защищаемого объекта. Расстояние между двумя стержневыми молниеотводами составляет $L=50$ м. Площадь сооружения равна 1600 м². По таблице для двух стержневых молниеотводов определяем угол защиты: $\alpha=40^\circ$.

Определяем радиус зоны защиты каждого из молниеотводов до расчетной точки n (см. рис. 3) на расстоянии $r_{x1}=r_{x2}=r_x$ и высоте объекта $h_0=10$ м:

$$r_x = \sqrt{(L/2)^2 + (b/2)^2} = 32 \text{ м, где } L = a + 2l.$$

По углу защиты α определяем эффективную высоту молниеотводов: $h_{\text{эф}} = r_x / \text{tga} = 38,1$ м.

Определяем высоту молниеотводов, обеспечивающих требуемую эффективность молниезащиты P_H : $h = h_{\text{эф}} + h_0 = 48,1$ м.

Следовательно, для защиты сооружения с надежностью $P_H = 0,99$ потребуется два стержневых молниеотвода высотой по $48,1$ м, установленных от него на расстоянии $l=5$ м.

В а р и а н т 2. Для защиты сооружения использованы четыре отдельно стоящих стержневых молниеотвода на расстоянии $l=5$ м от защищаемого объекта и на расстоянии $l_1=5$ м от углов по двум противоположным сторонам. Расстояние между двумя противоположными стержневыми молниеотводами $L_1=50$ м. Расстояние между двумя смежными стержневыми молниеотводами $L_2=30$ м.

Для внутренней зоны четырех стержневых молниеотводов определяем угол защиты $\alpha_1=56^\circ$. Для внешней зоны двух стержневых молниеотводов, обеспечивающих защиту выступающей за пределы внутренней зоны части сооружения, угол защиты определяется отдельно.

Определяем радиус зоны защиты каждого из четырех молниеотводов до расчетной точки m (см. рис. 4) на расстоянии $r_{x1}=r_{x2}=r_{x3}=r_{x4}=r_x$ и высоте объекта $h_0=10$ м:

$$r_x = \sqrt{(a/2 - l_1)^2 + (b/2 + l)^2} = 29,2 \text{ м.}$$

По углу защиты α_1 определяем эффективную высоту молниеотводов: $h_{\text{эф}} = r_x / \text{tga}_1 = 19,7$ м.

Определяем высоту молниеотводов, обеспечивающих требуемую надежность молниезащиты P_H : $h = h_{\text{эф}} + h_0 = 29,7$ м.

Проверяем обеспеченность молниезащиты части сооружения размерами $b' l_1' h_0$, выступающей за пределы внутренней зоны, двумя стержневыми молниеотводами высотой $h=29,2$ м.

Для этого определяем расстояние r_{x5} , на котором обеспечивается защита двумя стержневыми

молниеотводами выступающей части сооружения:

$$r_{x5} = \sqrt{(b/2 + l)^2 + (l_1)^2} = 25,5 \text{ м.}$$

Так как выступающая часть образует вытянутый прямоугольник, то определяем значение угла b , определяющее увеличение угла защиты α_2 : $\text{tgb} = l_1 / b/2 + 1$. Получаем $b=11,3^\circ$.

По графическим зависимостям, приведенным на рис. 2, определяем значение угла α_2 в зависимости от значения угла b : $\alpha_2 = 52^\circ$.

По эффективной высоте молниеотводов $h_{\text{эф}}=19,7$ м и расстоянию r_{x5} определяем расчетное значение угла защиты α_2 , необходимое для защиты выступающей части сооружения при двухстержневой молниезащите: $\text{tga}_2 = r_{x5} / h_{\text{эф}} = 1,29$. Получаем $\alpha_2 = 52,3^\circ$, т.е. защита находится на пределе требуемого уровня.

Следовательно, для обеспечения надежности $P_H = 0,99$ потребуются четыре стержневых молниеотвода высотой не $29,7$ м, установленных на расстоянии $l=5$ м и $l_1=5$ м, а высотой 30 м, что обеспечит необходимый уровень защиты сооружения.

В а р и а н т 3. Для защиты сооружения использованы два молниезащитных троса, подвешенных на опорах с двух сторон над срезом кровли. Расстояние между двумя тросовыми молниеотводами $L=40$ м. По таблице для двух тросовых молниеотводов определяем угол защиты $\alpha=68^\circ$. По углу защиты α определяем высоту подвеса тросов над кровлей сооружения: $h_{\text{эф}} = a / 2 \text{tga} = 8$ м.

С учетом стрелы провеса троса определяем высоту подвеса на опорах: $h_T = h_{\text{эф}} + h_0 + Dh_T = 20$ м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Инструкция** по устройству молниезащиты/М. Кузнецов, М. Матвеев. – Новости ЭлектроТехники, 2008, № 2(50).
2. **Базелян Э.М.** Анализ исходных посылок и конкретных рекомендации стандарта МЭК 365 по защите от прямых ударов молнии. – Сб. докл. I Российской конф. по молниезащите. – Новосибирск, Сибирская энергетическая академия, 2007.
3. **РД 34.21.122–87.** Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. (Минэнерго СССР). – М.: Энергоатомиздат, 1989.
4. **МЭК 62305 ч.1–5.** Стандарт по молниезащите.
5. **СО 153-343.21.122–2003.** Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. – М.: МЭИ, 2004.
6. **ВСП 22-02–07(МО РФ).** Нормы по проектированию, устройству и эксплуатации молниезащиты объектов военной инфраструктуры. – М., 2007.

[10.05.12]

А в т о р: Куприенко Василий Михайлович окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института в 1972 г. по специальности «Инженерная электрофизика». В 2009 г. защитил докторскую диссертацию в ОАО «26ЦНИИ». Начальник отдела филиала ОАО «26ЦНИИ».