

С.В.КИПРИЧ; А.А.ПЕТКОВ, канд. техн. наук;
Д.Г.КОЛИУШКО, канд. техн. наук; НТУ "ХПИ"

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОДИНОЧНОГО ТРОСОВОГО МОЛНИЕОТВОДА

У статті розглянутий вибір оптимальних параметрів поодинокого тросового блискавководу (мінімальної висоти та місця розташування), який захищає систему об'єктів різної висоти.

The selection of optimal parameters (height and position) of single lightning conductor, which protect a group of different height buildings, is considered in this article.

Постановка проблеми. Обеспечение молниезащиты при проектировании зданий и сооружений является в настоящее время актуальной задачей. Важность этой проблемы усиливается из-за применения все более энергоемкого и дорогостоящего оборудования, что приводит к возрастанию материального ущерба в случае поражения молнией различных объектов.

Существующие методы расчета молниезащиты не позволяют определять оптимальные параметры (высоту и место размещения) молниеотводов, правильный выбор которых позволяет значительно снизить материальные затраты при их производстве и монтаже.

Анализ публикаций. В национальных и международных нормативных документах, регламентирующих построение молниезащиты зданий и сооружений [1-4], предусматривается наряду с использованием стержневых и сетчатых молниеотводов в качестве одного из основных средств защиты от прямого поражения молнией применение тросового молниеотвода. В руководящих документах, действующих в настоящее время на территории Украины [1] и России [2], достаточно подробно рассмотрено построение зоны защиты тросового молниеотвода с применением соотношений, полученных экспериментальным путем [5]. В рекомендациях международной электротехнической комиссии (МЭК) [3, 4], а также в [2] предусматривается расчет по методу фиктивной сферы (МФС). Однако в указанных документах, а также специальной литературе [5] изложены только общие принципы МФС, без приведения аналитических соотношений, позволяющих производить соответствующие расчеты. Вопросы оптимизации параметров одиночных стержневых молниеотводов рассмотрены в [6]. Поэтому проведение аналогичных исследований для одиночных тросовых молниеотводов также является актуальной задачей.

Целью настоящей статьи является разработка методики выбора оптимальных параметров (высоты и места размещения) и вывод аналитических соотношений для описания зоны защиты одиночного тросового молниеотво-

да, располагаемого на крышах зданий, при заданном уровне защиты группы сооружений, определяемом национальными нормативными документами Украины, России и международным стандартом МЭК 61024-1-1.

Материалы и результаты исследования. Пусть имеется система, состоящая из n объектов, произвольно расположенных на поверхности грунта и требующих защиты от прямого поражения молнией. Каждый объект представляет собой прямую призму, в верхнем и нижнем основаниях которой лежат выпуклые многоугольники. Рассмотрим задачу нахождения оптимального варианта размещения опор тросового молниеотвода, обеспечивающего с требуемой надежностью защиту всех n объектов.

В нашем случае условие защищенности одиночным тросовым молниеотводом системы объектов от поражения молнией имеет вид [6]:

$$f(X_{i,m}, Y_{i,m}, XP_1, YP_1, XP_2, YP_2, H) - H_m > 0, \quad (1)$$

где $m = 1 \dots n$ – количество объектов;

$i = 1 \dots k_m$, k_m – количество боковых ребер m -го объекта;

$X_{i,m}, Y_{i,m}$ – координаты i -го бокового ребра m -го объекта;

XP_1, YP_1, XP_2, YP_2 – координаты расположения опор одиночного тросового молниеотвода в плоскости, расположенной параллельно поверхности грунта;

H – высота подвеса троса одиночного тросового молниеотвода над поверхностью грунта (без учета провеса);

H_m – высота m -го объекта;

$f(\cdot)$ – функция, определяющая высоту зоны защиты.

Отметим, что вид функции $f(\cdot)$ в левой части выражения (1) определяется требуемой надежностью защиты и способом построения зоны защиты [1-4].

Пусть из множества объектов n имеется n_g объектов, на которых допускается установка опор тросового молниеотвода (предполагается, что на объекте может располагаться только одна опора молниеотвода). Тогда задача выбора оптимального варианта размещения и высоты тросового молниеотвода состоит в:

– нахождении всех возможных вариантов размещения одиночного тросового молниеотвода;

– определении для каждого варианта минимальной высоты подвеса троса над поверхностью грунта, при которой выполняется условие защищенности системы объектов или констатации факта о невозможности одновременной защиты всех n объектов;

– выборе тросового молниеотвода, у которого приведенные экономические затраты при производстве и монтаже минимальны.

Количество возможных вариантов размещения одиночного тросового молниеотвода S определяется как количество сочетаний по два - $C_{n_g}^2$ из n_g

объектов, допускающих установку на своих верхних основаниях опор тросового молниеотвода ($n_g \leq n$):

$$S = C_{n_g}^2 = \frac{n_g(n_g - 1)}{2}. \quad (2)$$

Далее определим для каждого варианта минимальную высоту подвеса, при которой выполняется условие защищенности системы объектов (1), при условии ограниченности высоты подвеса троса над поверхностью грунта:

$$H_H < H \leq H_B, \quad (3)$$

где $H_H = \max(H_m)$, при $m = 1 \dots n$ – высота самого высокого объекта;

H_B – предельная высота подвеса троса, устанавливаемая описанием способа построения зоны защиты (определяется нормативным документом).

Учитывая принятую форму объектов и монотонность изменения функции $f(\cdot)$ [1-4] можно утверждать, что если в интервале высот, определяемых (3), существует молниеотвод, защищающий все объекты, то имеется только одно граничное значение высоты, при увеличении которого всегда будет обеспечиваться такая защита. Это значение определяет минимальную высоту подвеса троса и может быть найдено из решения системы нелинейных уравнений:

$$f(X_{i,m}, Y_{i,m}, XP_1, YP_1, XP_2, YP_2, H) - H_m = 0, \quad (4)$$

где $m = 1 \dots n$ и $i = 1 \dots k_m$;

$$H = H' + H_1 = H'' + H_2;$$

H' и H'' – соответственно высота первого и второго объектов, на которых установлены опоры одиночного тросового молниеотвода;

H_1 и H_2 – высоты опор одиночного тросового молниеотвода, установленных на первом и втором объектах соответственно.

Решение данной системы уравнений может быть найдено путем последовательного увеличения высоты подвеса троса, начиная с H_H , с некоторым шагом и определения для каждого значения высоты зоны защиты, с последующим анализом защищенности системы объектов согласно (1). Уменьшая величину шага, всегда можно получить наперед заданную точность определения высоты молниеотвода. Минимальная высота подвеса троса одиночного тросового молниеотвода, при которой все объекты системы защищены и является решением данного уравнения.

Последний этап решения задачи – выбор тросового молниеотвода, отвечающего некоторому критерию оптимальности, в качестве которого примем величину, отражающую затраты на сооружение молниеотвода:

$$KR = \alpha_1 H_1' + \alpha_2 H_2'' + \alpha_3 L, \quad (5)$$

где α_1 и α_2 – весовые коэффициенты, зависящие от материала опор и сложности конструкции (при одинаковой конструкции и материале опор $\alpha_1 = \alpha_2$);

α_3 – весовой коэффициент, зависящий от материала троса;

L – длина одиночного тросового молниеотвода.

Тогда, из множества молниеотводов минимальной высоты оптимальным будем считать тот, для которого критерий KR принимает наименьшее значение.

Рассмотрим более подробно второй этап задачи выбора оптимального тросового молниеотвода. Решение (4) непосредственно связано с видом функции $f(\cdot)$ в левой части выражения (1), который зависит от способа построения зоны защиты одиночного тросового молниеотвода. В настоящее время наиболее распространены два способа, которые принципиально отличаются друг от друга: первый определяется согласно [1, 2], а второй – согласно рекомендациям МЭК [3, 4].

Нормативные документы Украины [1] и Российской Федерации [2] определяют зону защиты одиночного тросового молниеотвода высотой H как показано на рис. 1 (зона защиты конического типа). Для удобства проведения анализа разобьем зону защиты на 6 областей. Из них – четыре торцевых – 1, 2, 5 и 6 и две боковых – 3 и 4. Высота зоны H_0 и радиус торцевых зон на уровне грунта R_0 в зависимости от надежности защиты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Надежность защиты, Pз	Высота молниеотвода H, м	Высота конуса H ₀ , м	Радиус конуса на уровне грунта R ₀ , м	
0,9	от 0 до 150	0,87H	1,5H	[2]
0,95	от 0 до 150	0,92H	1,7H	[1]
0,99	от 0 до 30	0,8H	0,95H	[2]
	от 30 до 100	0,8H	$[0,95 - 7,14 \cdot 10^{-4}(H - 30)]H$	
	от 100 до 150	0,8H	$[0,9 - 1 \cdot 10^{-3}(H - 100)]H$	
0,995	от 0 до 150	0,85H	$(1,35 - 0,0025H)H$	[1]
0,999	от 0 до 30	0,75H	0,7H	[2]
	от 30 до 100	$[0,75 - 4,28 \cdot 10^{-4}(H - 30)]H$	$[0,7 - 1,43 \cdot 10^{-3}(H - 30)]H$	
	от 100 до 150	$[0,72 - 1 \cdot 10^{-3}(H - 100)]H$	$[0,6 - 1 \cdot 10^{-3}(H - 100)]H$	

Радиус полуокружности горизонтального сечения торцевой области на высоте анализа R_{HA} определяется по соотношению:

$$R_{HA} = R_0(H_0 - HA) / H_0. \quad (6)$$

Для анализа защищенности системы объектов необходимо иметь следующую информацию:

– количество и аналитическое описание каждой из поверхностей, фрагменты которых образуют зону защиты тросового молниеотвода;

– выражение для кривой, ограничивающей зону защиты, при пересечении каждого фрагмента горизонтальной плоскостью, отстоящей на высоте анализа НА от плоскости XOY ($HA \geq 0$);

– интервалы изменения координат X и Y кривой, ограничивающей зону защиты, в зависимости от НА.

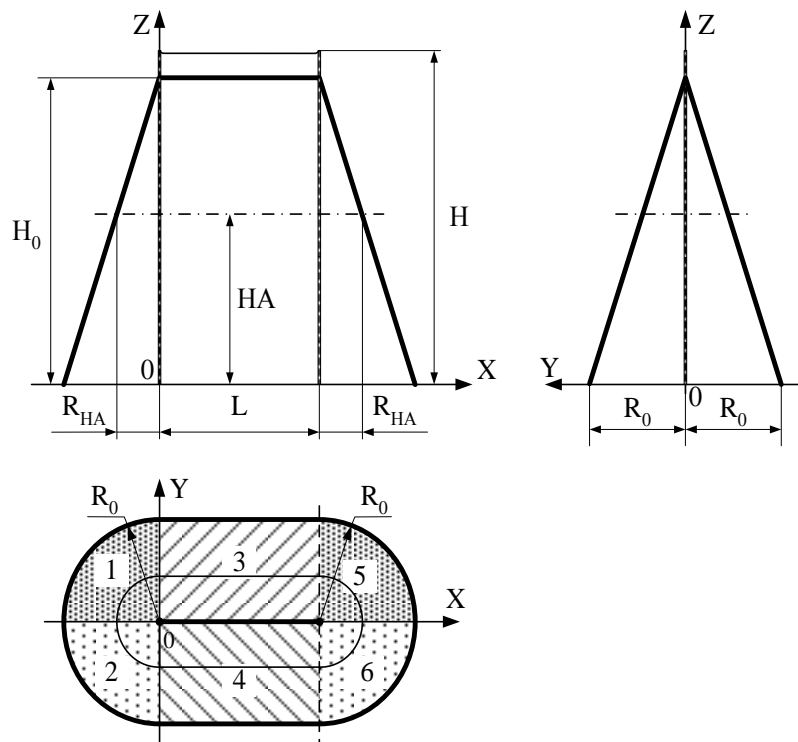


Рис. 1. Зона защиты одиночного тросового молниеотвода конического типа.
H – высота подвеса троса молниеотвода; H_0 – высота зоны защиты; HA – высота анализа; R_0 , R_{HA} – радиусы торцевой зоны защиты на поверхности грунта и на высоте анализа соответственно; L – расстояние между опорами.

Для получения вышеуказанной информации авторами были проведены математические расчеты и выведены аналитические соотношения, позволяющие производить расчеты зоны защиты одиночного тросового молниеотвода конического типа, которые сведены в табл. 2-4.

Таблица 2

	Область зоны защиты	
	1	2
Уравнение кривой на уровне анализа НА	$X^2 + Y^2 = (R_0(H_0 - HA)/H_0)^2$	
Изменение координаты X	$-R_0 \leq X \leq 0$	
Изменение координаты Y	$0 \leq Y \leq \sqrt{R_0^2 - X^2}$	$0 \geq Y \geq -\sqrt{R_0^2 - X^2}$
Уравнение поверхности	$X^2 + Y^2 = (R_0(H_0 - Z)/H_0)^2$	
Выражение для координаты Z поверхности зоны	$Z = H_0 \left(1 - \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{R_0} \right)$	

Таблица 3

	Область зоны защиты	
	3	4
Уравнение кривой на уровне анализа НА	$Y = R_0(H_0 - HA)/H_0$	$Y = -R_0(H_0 - HA)/H_0$
Изменение координаты X	$0 < X < L$	
Изменение координаты Y	$0 \leq Y \leq R_0$	$0 \geq Y \geq -R_0$
Уравнение поверхности	$Y = R_0(H_0 - Z)/H_0$	$Y = -R_0(H_0 - Z)/H_0$
Выражение для координаты Z поверхности зоны	$Z = H_0 \left(1 - \frac{Y}{R_0} \right)$	$Z = H_0 \left(1 + \frac{Y}{R_0} \right)$

Таблица 4

	Область зоны защиты	
	5	6
Уравнение кривой на уровне анализа НА	$(X - L)^2 + Y^2 = (R_0(H_0 - HA)/H_0)^2$	
Изменение координаты X	$L \leq X \leq L + R_0$	
Изменение координаты Y	$0 \leq Y \leq \sqrt{R_0^2 - (X - L)^2}$	$0 \geq Y \geq -\sqrt{R_0^2 - (X - L)^2}$
Уравнение поверхности	$(X - L)^2 + Y^2 = (R_0(H_0 - Z)/H_0)^2$	
Выражение для координаты Z поверхности зоны	$Z = H_0 \left(1 - \frac{\sqrt{(X - L)^2 + Y^2}}{R_0} \right)$	

Примечание. В таблицах принято:

$$L = \sqrt{(XP_2 - XP_1)^2 + (YP_2 - YP_1)^2} . \quad (7)$$

Стандарт международной электротехнической комиссии (МЭК) [3] в качестве одного из способов построения зоны защиты молниеотвода устанавливает обкатывание его фиктивной сферой радиуса R (см. рис. 2), величина которого в зависимости от уровня защиты приведена в табл. 5.

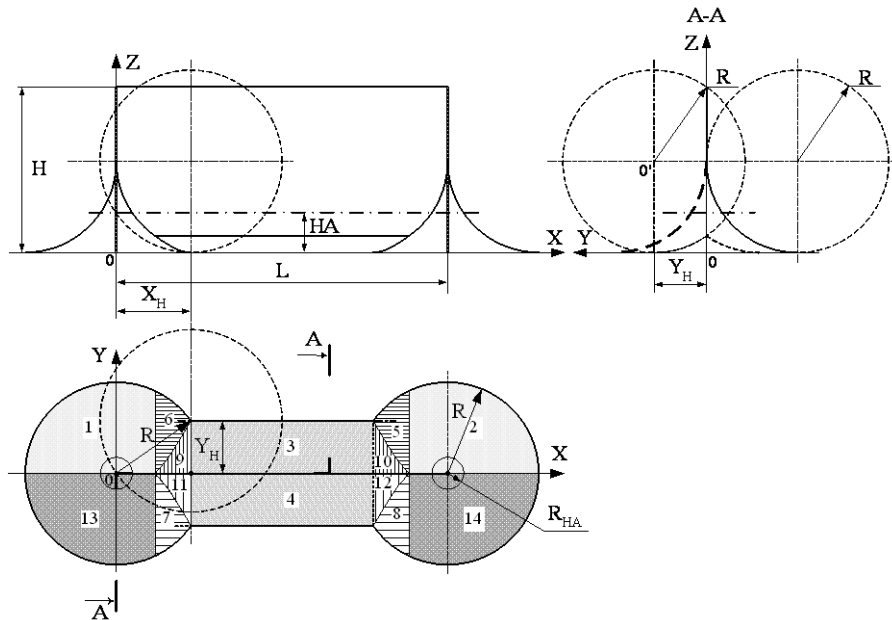


Рис. 2. Зона защиты одиночного тросового молниеотвода, построенная с помощью фиктивной сферы радиуса R при $R < H \leq 2R$.

R, R_{HA} – радиусы фиктивной сферы и торцевой зоны защиты на уровне анализа соответственно; H, HA – высоты подвеса троса молниеотвода и анализа соответственно; X_H, Y_H – координаты точки излома поверхности зоны защиты на уровне грунта.

Таблица 5

Уровень защиты	Радиус фиктивной сферы R, м
I	20
II	30
III	45
IV	60

В качестве примера рассмотрим расчет зоны защиты по методу фиктивной сферы для случая, когда высота зоны защиты $R < H \leq 2R$ и длина тросового молниеотвода $L > 2(H - R)$.

Радиус окружности горизонтального сечения зоны защиты R_{HA} на высоте анализа HA определяется по соотношению:

$$R_{HA} = R - \sqrt{R^2 - (R - HA)^2} . \quad (8)$$

Выведенные авторами аналитические соотношения, позволяющие производить расчеты зоны защиты одиночного тросового молниеотвода, построенной по методу фиктивной сферы радиуса R, сведены в табл. 6-10.

Таблица 6

Уравнение кривой на уровне анализа HA	
Зона	Выражение
1, 2, 5, 6, 7, 8, 13, 14	$(X - A)^2 + Y^2 = R_{HA}^2$
3, 9, 10	$Y = \sqrt{R^2 - X_H^2} - \sqrt{R^2 - (R - HA)^2}$
4, 11, 12	$Y = -\sqrt{R^2 - X_H^2} + \sqrt{R^2 - (R - HA)^2}$

В таблицах принято:

A = 0 – для зон 1, 6, 7, 9, 11, 13;

A = L – для зон 2, 5, 8, 10, 12, 14;

$$X_H = H - R . \quad (9)$$

Таблица 7

Диапазон изменения координаты X	
Зона	Выражение
1, 13	$-R_{HA} \leq X \leq R - \sqrt{R^2 - X_H^2}$
2, 14	$L - (R - \sqrt{R^2 - X_H^2}) \leq X \leq L + R_{HA}$
3, 4	$X_H < X < L - \tilde{O}_H$
5, 8, 10, 12	$L - X_H < X < L - (R - \sqrt{R^2 - X_H^2})$
6, 7, 9, 11	$R - \sqrt{R^2 - X_H^2} \leq X < X_H$

Таблица 8

Диапазон изменения координаты Y	
Зона	Выражение
1, 2	$0 \leq Y \leq \sqrt{R_{HA}^2 - (X-A)^2}$
3	$0 \leq Y \leq \sqrt{R_{HA}^2 - X_H^2}$
4	$0 \geq Y \geq -\sqrt{R_{HA}^2 - X_H^2}$
5, 6	$Y' \leq Y < \sqrt{R_{HA}^2 - (X-A)^2}$
7, 8	$-Y' \geq Y > -\sqrt{R_{HA}^2 - (X-A)^2}$
9, 10	$0 < Y < Y'$
11, 12	$0 > Y > -Y'$
13, 14	$0 \geq Y \geq -\sqrt{R_{HA}^2 - (X-A)^2}$

В таблице принято:

$$Y' = \frac{(X-A)^2 - (R - \sqrt{R^2 - X_H^2})^2}{2(R - \sqrt{R^2 - X_H^2})}. \quad (10)$$

Таблица 9

Уравнение поверхности	
Зона	Выражение
1, 2, 5, 6, 7, 8, 13, 14	$(X-A)^2 + Y^2 = (R - \sqrt{R^2 - (R-Z)^2})^2$
3, 9, 10	$Y = \sqrt{R^2 - X_H^2} - \sqrt{R^2 - (R-Z)^2}$
4, 11, 12	$Y = -\sqrt{R^2 - X_H^2} + \sqrt{R^2 - (R-Z)^2}$

Таблица 10

Выражение для координаты Z поверхности зоны	
Зона	Выражение
1, 2, 5, 6, 7, 8, 13, 14	$Z = R - \sqrt{R^2 - (R - \sqrt{(X-A)^2 + Y^2})^2}$
3, 9, 10	$Z = R - \sqrt{R^2 - (\sqrt{R^2 - X_H^2} - Y)^2}$
4, 11, 12	$Z = R - \sqrt{R^2 - (\sqrt{R^2 - X_H^2} + Y)^2}$

Указанные в таблицах 2-10 формулы получены в предположении, что тросовый молниеотвод ориентирован в плоскости XOY, как показано на рис. 1, а именно: одна из опор тросового молниеотвода помещена в начало координат, а положение троса совпадает с осью OX. Однако в общем случае в практике анализа молниезащиты имеет место произвольное расположение тросового молниеотвода в плоскости XOY и для использования приведенных выше соотношений, необходимо предварительно преобразовать систему координат (например, по формулам, приведенным в [7]).

Выводы.

1. Сформулирована задача выбора оптимальных параметров одиночного тросового молниеотвода как задача нелинейного программирования и предложена методика ее решения.

2. Выведены аналитические соотношения, описывающие поверхность зоны защиты одиночного тросового молниеотвода, в виде явной функции высоты точки поверхности в зависимости от ее координат на поверхности грунта по методикам [1-4].

Материалы статьи будут использованы при разработке экспертной системы для проектирования молниезащиты.

Список литературы: 1. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений (РД 34.21.122-87). М.: Энергоатомиздат, 1989. – 56 с. 2. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 57 с. 3. IEC standard 1024-1 (1990 г.) Protection of structures against lightning. Part 1: General principles. 4. IEC standard 61024-1-1 (1993 г.) Protection of structures against lightning. Part 1: General principles. Section 1: Guide A – Selection of protection levels for lightning protection systems. 5. Ларионов В.П. Основы молниезащиты. Под ред. И.М. Бортника. – М.: Знак, 1999. – 104 с. 6. Петков А.А., Колушко Д.Г., Колушко Г.М. Выбор оптимальных параметров одиночного стержневого молниеотвода // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка. – Харків: НТУ "ХПІ". - №35. – 2004. С. 64 – 71. 7. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. – М.: "Наука". – 1965. – 872 с.