

С.В.КИПРИЧ; А.А.ПЕТКОВ, канд. техн. наук;
Д.Г.КОЛИУШКО, канд. техн. наук; НТУ "ХПИ";
В.М. КУПРИЕНКО, канд. техн. наук; Научно-исследовательский центр
26 ЦНИИ МО РФ

МЕТОДИКА АНАЛИЗА МОЛНИЕЗАЩИЩЕННОСТИ ОБЪЕКТОВ ПРИ СЛОЖНОМ РЕЛЬЕФЕ ПОВЕРХНОСТИ ЗОНЫ ЗАЩИТЫ

У роботі запропонована методика розрахунку блискавковідводів, зони захисту яких утворюють складну поверхню. Показана ефективність розробленої методики на прикладі зони захисту подвійного стрижневого блискавковідводу.

In work the design procedure of lightning-rods which zones of protection form a difficult surface is offered. Efficiency of the developed method on an example of a protection zone of the double lightning-rods is shown.

Постановка проблемы. Среди проблем жизнеобеспечения различных технических объектов, зданий и сооружений одной из самых важных и актуальных сегодня является обеспечение молниезащищенности. Это объясняется рядом причин, основными из которых являются:

- 1) необходимость обеспечения безопасности обслуживающего персонала;
- 2) наличие на объектах значительного количества дорогостоящей микропроцессорной техники, которая может выйти из строя от удара молнии, что, в свою очередь, может привести к крупному материальному ущербу из-за нарушения сложного технологического процесса, простоя оборудования и т. п.

Решение задачи защиты от прямого поражения молнией требует постоянного совершенствования методов проектирования молниеотводов, в том числе и методик их расчета.

Анализ публикаций. Зоны защиты молниеотводов, обеспечивающих защиту зданий и сооружений от прямого поражения молнией, определяются согласно действующих нормативных документов [1, 2] по методикам, в основу которых положен графический способ. Однако при большом количестве и различном сочетании молниеотводов, защищающих объект, в соответствии с требованиями приведенных выше нормативных документов, возникают следующие проблемы при анализе молниезащищенности:

- отсутствуют методики построения некоторых сочетаний молниеотводов;
- сложность геометрических построений общей зоны защиты и большая вероятность возникновения ошибок, обусловленных человеческим фактором;
- отсутствует возможность визуального представления результатов анализа молниезащищенности объектов в трехмерном виде.

Некоторые недостатки можно устранить с помощью применения вычислительной техники: ускорить и упростить процесс расчета молниезащищенности объектов, снизить количество ошибок, а также получить наглядные результаты в двухмерном и трехмерном виде. Однако существующие в нормативных документах методики ориентированы на графические построения, что затрудняет непосредственное использование ЭВМ. Для алгоритмизации расчетов необходимо разработать математическое описание зон защиты, например, как изложено в публикациях [3, 4], в которых приведены аналитические соотношения для расчета зон защиты стержневого и тросового молниеотводов. Однако, чем сложнее тип молниеотвода (двойной или многократный стержневой, двойной тросовый и т. д.), тем сложнее рельеф поверхности, а, следовательно, и аналитические выражения для расчета его зоны защиты. Поэтому, принимая во внимание уже имеющийся опыт [3, 4], целесообразным является разработка более простого способа построения зон защиты для молниеотводов, перечисленных выше, и определения защищенности объектов.

Учитывая, что любой объект может быть представлен набором объектов-стержней [3], с практической точки зрения задача расчета молниезащищенности объекта-стержня с заданными координатами (X_T , Y_T) и высотой Z_T может иметь два варианта решения:

- 1) путем сравнения заданной координаты объекта Y_T и координаты Y границы зоны защиты на заданной высоте анализа (Z_T);
- 2) путем определения высоты зоны защиты в точке с координатами (X_T , Y_T) и сравнения ее с заданной высотой объекта Z_T .

Целью настоящей работы является разработка методики анализа молниезащищенности объектов при сложном рельефе поверхности зоны защиты.

Материалы и результаты исследований. Анализ общих видов зон защиты молниеотводов различных типов, приведенных в нормативных документах [1, 2], показывает, что все поверхности зон защиты могут быть образованы путем перемещения параллельно плоскости XOY в положительном направлении оси OZ одной или нескольких замкнутых линий, состоящих из отрезков прямой линии и/или дуг окружности. Причем при перемещении каждому значению высоты анализа соответствуют свои значения координат концевых точек фигур, составляющих замкнутую линию, и радиуса дуг окружности, например для двойного стержневого молниеотвода (см. рис. 1).

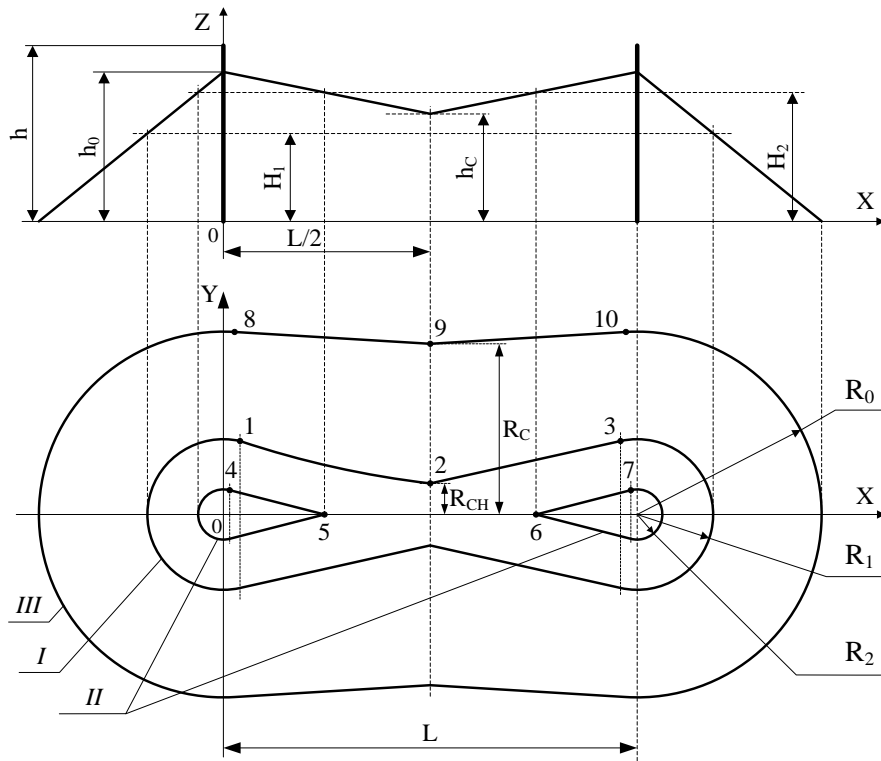


Рис. 1. Зона защиты двойного стержневого молниеотвода и ее границы на трех характерных уровнях анализа (H_1 , H_2 и на уровне грунта) для случая при $2h < L \leq 4h$ для надежности защиты 0,995:

- h – высота молниеотвода;
- L – расстояние между стержнями молниеотвода;
- h_0 – максимальная высота зоны защиты;
- R_0 – радиус конуса на уровне грунта;
- R_C – полуширина внутренней области на уровне грунта (зависит от надежности защиты, высоты молниеотвода и расстояния между его стержнями);
- R_1 и R_2 – радиусы конуса на высотах анализа H_1 и H_2 соответственно;
- R_{CH} , h_C – параметры зоны защиты молниеотвода, зависящие от надежности защиты, высоты молниеотвода, расстояния между его стержнями и высоты анализа;
- I , II и III – границы зоны защиты на высотах анализа H_1 , H_2 и на уровне грунта соответственно;
- 1 – 10 – концевые точки фигур при различных уровнях анализа.

Соотношения для определения величин h_0 и R_0 двойного стержневого молниеотвода в зависимости от его высоты и надежности приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Надежность защиты, P_z	Высота молниеотвода h , м	Высота конуса h_0 , м	Радиус конуса на уровне грунта R_0 , м
0,9	от 0 до 100	0,85h	1,2h
	от 100 до 150	0,85h	$[1,2 - 1 \cdot 10^{-3}(h - 100)]h$
0,95	от 0 до 150	0,92h	1,5h
0,99	от 0 до 30	0,8h	0,8h
	от 30 до 100	0,8h	$[0,8 - 1,43 \cdot 10^{-3}(h - 30)]h$
	от 100 до 150	$[0,8 - 1 \cdot 10^{-3}(h - 100)]h$	0,7h
0,995	от 0 до 150	0,85h	$(1,1 - 0,002h)h$
0,999	от 0 до 30	0,7h	0,6h
	от 30 до 100	$[0,7 - 7,14 \cdot 10^{-4}(h - 30)]h$	$[0,6 - 1,43 \cdot 10^{-3}(h - 30)]h$
	от 100 до 150	$[0,65 - 1 \cdot 10^{-3}(h - 100)]h$	$[0,5 - 2 \cdot 10^{-3}(h - 100)]h$

При заданном типе молниеотвода значение координат концевых точек определяется как высотой анализа HA , так и местом расположения фигуры относительно оси OX , принятой за горизонтальную ось (в нижней при $Y < 0$ или верхней при $Y > 0$ полуплоскости плоскости XOY), а радиус дуги окружности только высотой анализа.

Рассмотрим часть фигуры, составляющей границу зоны защиты, расположенную в верхней полуплоскости.

Пусть на высоте анализа $HA = Z$ граница зоны защиты молниеотвода при изменении координаты x от X_1 до X_2 имеет в сечении параллельном плоскости XOY вид отрезка прямой линии (см. рис. 2а). Пусть также часть плоскости, лежащая между осью OX и отрезком прямой принадлежит зоне защиты, а другая часть, лежащая над отрезком прямой, находится вне зоны защиты. Отрезок имеет следующие координаты концов 1(X_1 ; Y_1 ; Z) и 2(X_2 ; Y_2 ; Z). Причем координаты X_1 , Y_1 и X_2 , Y_2 определяются высотой Z .

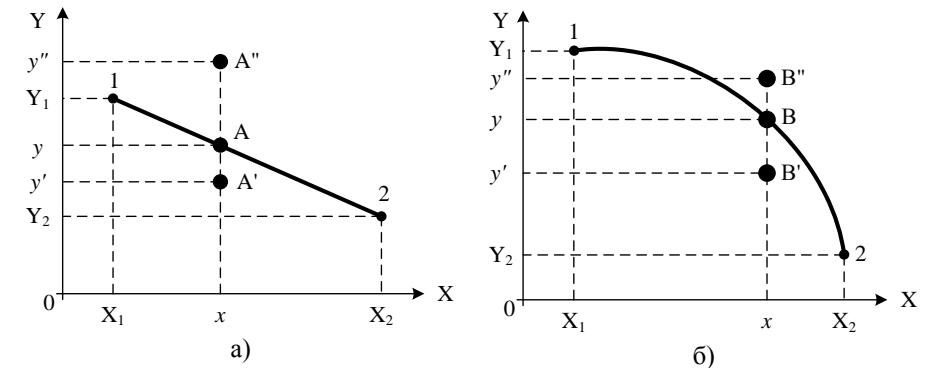


Рис. 2. Нахождение координат точки, лежащей на границе зоны защиты

Рассмотрим точки А, А' и А", лежащие на одной прямой, параллельной оси ОУ, и в той же плоскости, что и отрезок (1, 2), причем точка А(х; у; Z) лежит на границе зоны защиты. Тогда, задавая координату $x \in (X_1, X_2)$, можем определить координату у границы зоны защиты по формуле (1), вытекающей из геометрических построений, показанных на рис. 2а:

$$y = Y_1 + (x - X_1) \frac{Y_1 - Y_2}{X_1 - X_2}. \quad (1)$$

Аналогично для варианта, когда фигура, составляющая границу зоны защиты, имеет вид дуги окружности, рассмотрим точки В, В' и В", лежащие в той же плоскости, что и дуга (1, 2) (см. рис. 2б). И для заданной координаты х точки В(х; у; Z), лежащей на границе зоны защиты, можно найти координату у по формуле:

$$y = Y_0 + \sqrt{R_H^2 - (x - X_0)^2}, \quad (2)$$

где X_0, Y_0 – координаты центра дуги окружности;

R_H – радиус дуги окружности на уровне анализа НА, определяется по формуле:

$$R_H = \frac{R_0}{h_0} (h_0 - НА). \quad (3)$$

Очевидно, что для точек А' и В' (см. рис. 2), лежащих внутри зоны защиты $y' < y$, а для точек А" и В", лежащих вне зоны защиты $y'' > y$.

При расположении фигуры, составляющей границу зоны защиты в нижней полуплоскости, соотношения, аналогичные (1) и (2) имеют вид:

$$y = - \left[Y_1 + (x - X_1) \frac{Y_1 - Y_2}{X_1 - X_2} \right]; \quad (4)$$

$$y = Y_0 - \sqrt{R_H^2 - (x - X_0)^2}. \quad (5)$$

Предположим, что зона защиты расположена симметрично оси ОХ таким образом, что в любом ее сечении плоскостью, параллельной плоскости ХОУ зона защиты охватывает часть оси, например, как показано на рис. 1.

Тогда решение задачи определения защищенности точки Т(X_T, Y_T, Z_T) производится в следующем порядке:

1) для заданной надежности защиты, характеристик молниеотвода и высоты анализа $НА = Z_T$ определяются геометрические параметры зоны защиты;

2) определяются координаты концевых точек фигур и радиусы дуг окружностей, образующих границу зоны защиты;

3) ось ОХ разбивается на $n + 2$ интервала, границы которых соответствуют Х-координатам каждой фигуры, входящей в состав границы зоны защиты: $(-\infty, X_1), [X_1, X_2], (X_2, X_3), \dots (X_{n-1}, X_n), (X_n, \infty)$, где n – количество фигур;

4) определяется интервал, содержащий координату точки X_T . Если $X_T \in (-\infty, X_1)$ или $X_T \in (X_n, \infty)$, то заданная точка Т находится вне зоны защиты и расчет считается оконченным;

5) определяется координата у границы зоны защиты в данном сечении при $x = X_T$ и сравнивается ее значение с Y_T :

– если $Y_T > 0$ и $y \geq Y_T$ или если $Y_T < 0$ и $y \leq Y_T$, то заданная точка Т лежит внутри зоны защиты, т. е. защищена;

– если $Y_T > 0$ и $y < Y_T$ или если $Y_T < 0$ и $y > Y_T$, то заданная точка Т лежит вне зоны защиты, т. е. не защищена.

Предложенная методика справедлива также для определения молниезащищенности бесконечно тонкого объекта-стержня высотой Z_T . Если необходимо определить защищенность реального объекта, то его необходимо представить стержневой структурой, определяющей габариты [3] и каждый объект-стержень проверить на защищенность. Если хотя бы один из них окажется незащищенным, то объект незащищен в целом.

Определение высоты зоны защиты над точкой, расположенной в плоскости ХОУ, с заданными координатами Т(X_T, Y_T) с использованием (1) – (5) при условии, что точка принадлежит зоне защиты, построенной на уровне грунта, производится в следующем порядке:

1) вычисляется координата у границы зоны защиты для высоты уровня анализа НА и заданной координаты X_T ;

2) сравнивается полученное значение у с заданным значением Y_T :

– если $Y_T = y$, то текущее значение высоты анализа НА и есть искомая высота зоны защиты в заданной точке;

– если $Y_T < y$ – необходимо увеличивать высоту анализа НА с шагом Δh до выполнения условия $Y_T > y$, пересчитывая на каждом шаге координату у границы зоны защиты, после чего искомое значение высоты зоны защиты (h_{33}) в точке с заданными координатами (X_T, Y_T) определяется как:

$$h_{33} = НА_T - \Delta h, \quad (6)$$

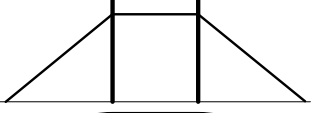
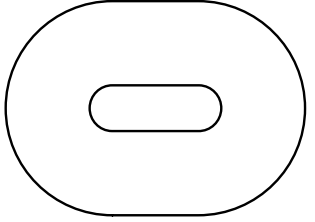

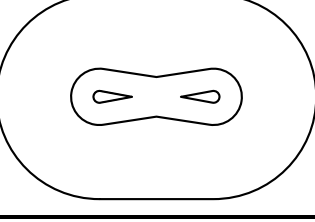
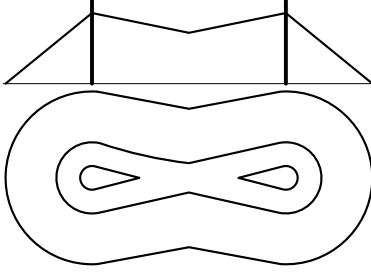
где $НА_T$ – значение высоты анализа при $Y_T > y$;

– если $Y_T > y$ – необходимо уменьшать высоту анализа с шагом Δh до выполнения условия $Y_T \leq y$, при этом текущее значение высоты анализа НА и есть искомое значение высоты зоны защиты в точке с заданными координатами.

Для проверки предложенной методики рассмотрим расчет зоны защиты двойного стержневого молниеотвода, обладающей сложным рельефом поверхности.

Форма зоны защиты (а, следовательно, и координаты концевых точек фигур и радиусы дуг окружностей, образующих границу зоны защиты) изменяются в зависимости от надежности защиты и соотношения высоты и расстояния между стержнями молниеотвода (см. табл. 2 и табл. 3) [1, 2].

Таблица 2.

Надежность защиты, P_z	Условие	Форма зоны защиты на различных уровнях анализа	Прим.
0,9	$L \leq L_C$		[2]
0,95	$L \leq h$		[1]
0,99	$L \leq L_C$		[2]
0,995	$L \leq h$		[1]
0,999	$L \leq L_C$		[2]
0,9	$L_C < L \leq L_{max}$		
0,95	$h < L \leq 6h$		[1]
0,99	$L_C < L \leq L_{max}$		[2]
0,995	$h < L \leq 2h$		[1]
0,999	$L_C < L \leq L_{max}$		[2]
0,995	$2h < L \leq 4h$		

Примечание: L_C и L_{max} – предельные расстояния двойного стержневого молниеотвода [2], вычисляются по эмпирическим формулам табл. 3.

В зависимости от надежности защиты, параметров молниеотвода, соотношения значений высоты анализа НА и высоты h_C , изменяются значения координат концевых точек фигур, составляющих замкнутую линию. Выражения, определяющие их, для границы зоны защиты двойного стержневого молниеотвода, расположенной в положительной полуплоскости XOY, приведены в табл. 4, а радиусы дуг окружностей определяются по (3).

Таблица 3.

Надежность защиты P_z	Высота молниеотвода h , м	L_C , м	L_{max} , м
0,9	от 0 до 30	2,5h	5,75h
	от 30 до 100	2,5h	$[5,75 - 3,57 \cdot 10^{-3}(h - 30)]h$
	от 100 до 150	2,5h	5,5h
0,99	от 0 до 30	2,25h	4,75h
	от 30 до 100	$[2,25 - 0,0107(h - 30)]h$	$[4,75 - 3,57 \cdot 10^{-3}(h - 30)]h$
	от 100 до 150	1,5h	4,5h
0,999	от 0 до 30	2,25h	4,25h
	от 30 до 100	$[2,25 - 0,0107(h - 30)]h$	$[4,25 - 3,57 \cdot 10^{-3}(h - 30)]h$
	от 100 до 150	1,5h	4,0h

Таблица 4.

№ точки	Координата X	Координата Y
1	$\sqrt{R_H^2 - A^2}$	A
2	$\frac{L}{2}$	R_{CH}
3	$L - \sqrt{R_H^2 - A^2}$	A
4	$\frac{R_H^2}{B}$	$\sqrt{B^2 - R_H^2} \cdot \left(\frac{R_H}{B}\right)$
5	B	0
6	$L - B$	0
7	$L - \frac{R_H^2}{B}$	$\sqrt{B^2 - R_H^2} \cdot \left(\frac{R_H}{B}\right)$
8	$\sqrt{R_0^2 - C^2}$	C
9	$\frac{L}{2}$	R_C
10	$L - \sqrt{R_0^2 - C^2}$	C

Примечание: Номера точек соответствуют обозначению на рис. 1.

$$R_{CH} = R_C \frac{h_C - HA}{h_C}, \quad (7)$$

где R_C и h_C – параметры зоны защиты, определяемые по табл. 5;

$$A = \frac{R_H L \sqrt{L^2 + 4R_{CH}^2 - 4R_H^2} + 4R_H^2 R_{CH}}{L^2 + 4R_{CH}^2}; \quad (8)$$

$$B = \frac{L(h_0 - HA)}{2(h_0 - h_c)}; \quad (9)$$

$$C = \frac{R_0 \cdot L \sqrt{L^2 + 4R_C^2 - 4R_0^2} + 4R_0^2 R_C}{L^2 + 4R_C^2}. \quad (10)$$

Таблица 5.

Надежность защиты, Pз	Условие	h _c	R _c
0,9	L ≤ L _c	h ₀	R ₀
0,9	L _c < L ≤ L _{max}	$\frac{L_{max} - L}{L_{max} - L_c} h_0$	R ₀
0,95	L ≤ h	h ₀	R ₀
0,95	h < L ≤ 6h	h ₀ - 0,14 (L - h)	R ₀
0,99	L ≤ L _c	h ₀	R ₀
0,99	L _c < L ≤ L _{max}	$\frac{L_{max} - L}{L_{max} - L_c} h_0$	R ₀
0,995	L ≤ h	h ₀	R ₀
0,995	h < L ≤ 2h	h ₀ - (0,17 + 3·10 ⁻⁴ h)(L - h)	R ₀
0,995	2h < L ≤ 4h	h ₀ - (0,17 + 3·10 ⁻⁴ h)(L - h)	$R_0 \left[1 - \frac{0,2(L - 2h)}{h} \right]$
0,999	L ≤ L _c	h ₀	R ₀
0,999	L _c < L ≤ L _{max}	$\frac{L_{max} - L}{L_{max} - L_c} h_0$	R ₀

Соотношения, приведенные в табл. 4, 5 и (7) – (10), для определения координат концевых точек фигур, образующих границу зоны защиты двойного стержневого молниеотвода справедливы для случаев:

- при L ≤ 4h для надежности защиты 0,995 [1];
- при L ≤ 6h для надежности защиты 0,95 [1];
- при L ≤ L_{max} для надежностей защиты 0,9, 0,99 и 0,999 [2].

При этом в соотношениях изменяются лишь габаритные размеры (h, L, h₀, R₀, h_c, R_c, R_{CH}, R_H) зоны защиты.

При расстоянии между молниеотводами:

- L > 4h для надежности защиты 0,995 [1];
 - L > 6h для надежности защиты 0,95 [1];
 - L > L_{max} для надежностей защиты 0,9, 0,99 и 0,999 [2],
- их следует рассматривать как одиночные молниеотводы.

Для реализации предложенной методики расчета молниезащищенности заданной точки двойным стержневым молниеотводом с известными параметрами была разработана программа в приложении Microsoft Excel с использованием Visual Basic for Applications.

Блок-схема для программы определения защищенности точки представлена на рис. 3, а интерфейс программы на рис. 4.

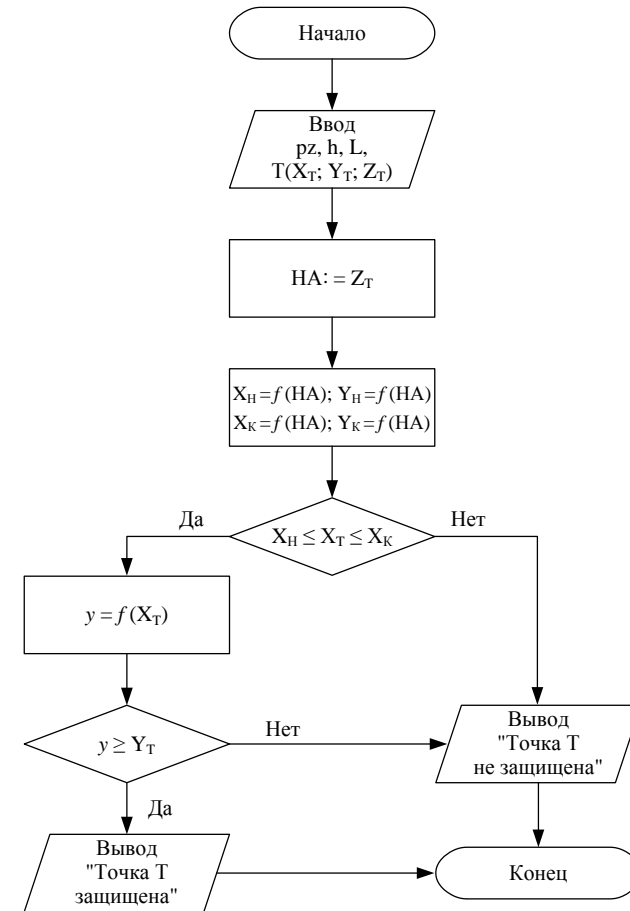


Рис. 3. Блок-схема для программы расчета молниезащищенности заданной точки двойным стержневым молниеотводом

	A	B	C	D
1	Надежность защиты	pz	0,995	
2	Высота молниеотвода	h	30	
3	Расстояние между стержнями молниеотвода	L	70	
4	Высота уровня анализа	HA=Z	15	
5				
6	Радиус на уровне грунта	R0	31,2	
7	Полуширина зоны на уровне грунта	RC	29,12	
8	Высота конуса (максимальная высота зоны защиты)	H0	25,5	
9	Радиус на уровне анализа	RH	12,847	
10	Ширина горизонтального сечения на уровне анализа	RCH	5,3032	
11	Высота зоны в середине пролета	hc	18,34	
12				
13				
14		X	2	
15	Точка защищена	Y	10	
16		Z	15	
17				
18				
19	Координата на границе зоны защиты	y	12,69	
20				
21		Зона I		
22	<i>Концевая точка</i>	1	2	3
23	X	2,8164	35	67,184
24	Y	12,535	5,3032	12,535
25				
26	Определение молниезащищенности			
27				

Рис. 4. Интерфейс программы расчета молниезащищенности заданной точки двойным стержневым молниеотводом с заданными параметрами

На рис. 4 показано рабочее окно разработанной программы для определения защищенности стержневого объекта с координатами (2; 10) и высотой 15 м двойным стержневым молниеотводом высотой 30 м с расстоянием между стержнями 70 м, при условии, что заданный молниеотвод должен обеспечить для объекта зону защиты типа А. Координаты расположения стержней молниеотвода: (0; 0) и (70; 0).

В ячейках С1-С4 и С14-С16 представлены значения исходных данных, необходимые величины для расчета – в ячейках С6-С11 и С19, вывод о защищенности – в ячейке А15.

Выводы:

1. Предложена методика анализа молниезащищенности объектов при сложном рельефе поверхности зон защиты молниеотводов.
2. На примере двойного стержневого молниеотвода приведен порядок расчета защищенности объекта-стержня с заданными координатами молниеотводом произвольного типа.
3. Разработана методика определения высоты зоны защиты над точкой, расположенной в плоскости ХОУ, с заданными координатами.
4. Разработана программная реализация и приведен пример расчета молниезащищенности заданной точки двойным стержневым молниеотводом с известными параметрами.

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. 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". – 2004. – №35. – С. 64-71. 4. Куприч С.В., Петков А.А., Колушко Д.Г. Выбор оптимальных параметров одиночного тросового молниеотвода // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2005. – №49. – С. 36-45.

Поступила в редколлегию 19.03.08.