

С. В. КИПРИЧ, науч. сотр., НТУ «ХПИ»;

Д. Г. КОЛИУШКО, канд. техн. наук, ст. науч. сотр, НТУ «ХПИ»

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ ЗАЩИТЫ ДВОЙНОГО НАКЛОННОГО НЕПАРАЛЛЕЛЬНОГО ТРОСОВОГО МОЛНИЕОТВОДА МЕТОДОМ КОНЦЕВЫХ ТОЧЕК

В статье представлен расчет зоны защиты двойного наклонного непараллельного тросового молниеотвода с помощью метода конечных точек.

Ключевые слова: тросовый молниеотвод, математическое описание, зона защиты, метод конечных точек.

Постановка проблемы. Внедрение передовых технологий привело к повсеместной компьютеризации, как на производстве, так и в быту, причем не только для сложных систем, но и для простых технологических процессов. Поэтому актуальность вопроса молниезащиты усиливается, т. к. микропроцессорная техника особенно чувствительна как к прямым ударам молнии, так и к ее вторичным проявлениям. Требования к устройству молниезащиты с 2009 года ужесточились, что повлекло удорожание ее устройства. Для более эффективного использования средств молниезащиты (стержневых и тросовых молниеотводов) следует наиболее полно учитывать все комбинации зон защиты, для чего необходимо создать их математическое описание. В нормативном документе, регламентирующем устройство молниезащиты в Украине – ДСТУ Б В.2.5-38:2008 [1], приведено описание зон защиты простейших сочетаний молниеотводов (двойного стержневого и двойного тросового, а также замкнутого тросового молниеотводов), однако на практике встречается ряд других типов молниеотводов и их комбинаций, учет которых увеличит объем защищенной области.

Анализ публикаций. В указанном выше нормативном документе [1] отсутствует описание зоны защиты двойного тросового молниеотвода с различными высотами подвеса тросов на опорах и непараллельным расположением тросов (далее – двойного наклонного непараллельного тросового молниеотвода (ДННПТМО)). Вместе с тем, данный тип молниеотводов широко распространен на электроэнергообъектах различных классов напряжения. Для анализа молниезащищенности подобных объектов в [1] рекомендуется использовать программное обеспечение, позволяющее вычислять зоны защиты при произвольном расположении практически любого числа молниеотводов разных типов. Для этого необходимо разработать описание недостающих типов молниеотводов аналогично [2] и [3]. Так как поверхность зоны защиты ДННПТМО имеет сложный рельеф, то для создания ее математической мо-

дели целесообразно применить метод конечных точек [4]. Сущность метода состоит в определении координат конечных точек фигур и радиусов дуг окружностей, составляющих замкнутые линии границ зоны защиты на заданных высотах анализа.

Целью настоящей работы является расчет параметров зоны защиты двойного наклонного непараллельного тросового молниеотвода методом конечных точек.

Материалы и результаты исследований. Зона защиты ДННПТМО состоит из торцевых и внутренней областей. При построении торцевых областей зоны защиты ДННПТМО будем использовать соотношения, приведенные в [1] для одиночного и двойного тросового молниеотвода. Внутренняя область зоны защиты (между опорами ДННПТМО) представляет собой две пересекающиеся двускатные поверхности, которые соединяют между собой торцевые области. Пример построения зоны защиты ДННПТМО приведен на рис. 1.

Размеры торцевых областей зоны защиты у первой и второй пар опор (h_{01} , R_{01} и h_{02} , R_{02}) определяются по табл. 1, как для одиночных тросовых молниеотводов [1].

Параметры h_{C1} и h_{C2} в зависимости от надежности защиты, высоты пар опор молниеотводов и граничных расстояний между ними (см. табл. 2) определяются по (1) и (2).

При выполнении условия $L_i \leq L_{Ci}$ величина h_{Ci} определяется по (1), а при $L_{Ci} < L_i \leq L_{maxi}$ величина h_{Ci} определяется по (2), где i – номер пары опор молниеотвода (1 или 2).

$$h_{Ci} = h_{0i}; \quad (1)$$

$$h_{Ci} = h_{0i} \frac{L_{maxi} - L}{L_{maxi} - L_{Ci}}. \quad (2)$$

В зависимости от соотношений между параметрами зоны защиты ДННПТМО изменяется и ее форма. Характерные формы зон защиты на различных высотах анализа (НА) для ДННПТМО при определенных соотношениях параметров приведены в табл. 3.

Для построения границ зоны защиты ДННПТМО на различных высотах анализа необходимо определить координаты конечных точек фигур, составляющих зону защиты и радиусы конусов торцевых областей. При анализе зоны защиты ДННПТМО (вариант 1) были выведены формулы для определения координат конечных точек (см. рис. 1) на характерных высотах анализа, которые приведены в табл. 4.

В табл. 4 принято:

$$R_{H1} = \frac{R_{01}}{h_{01}}(h_{01} - НА); \quad (3)$$

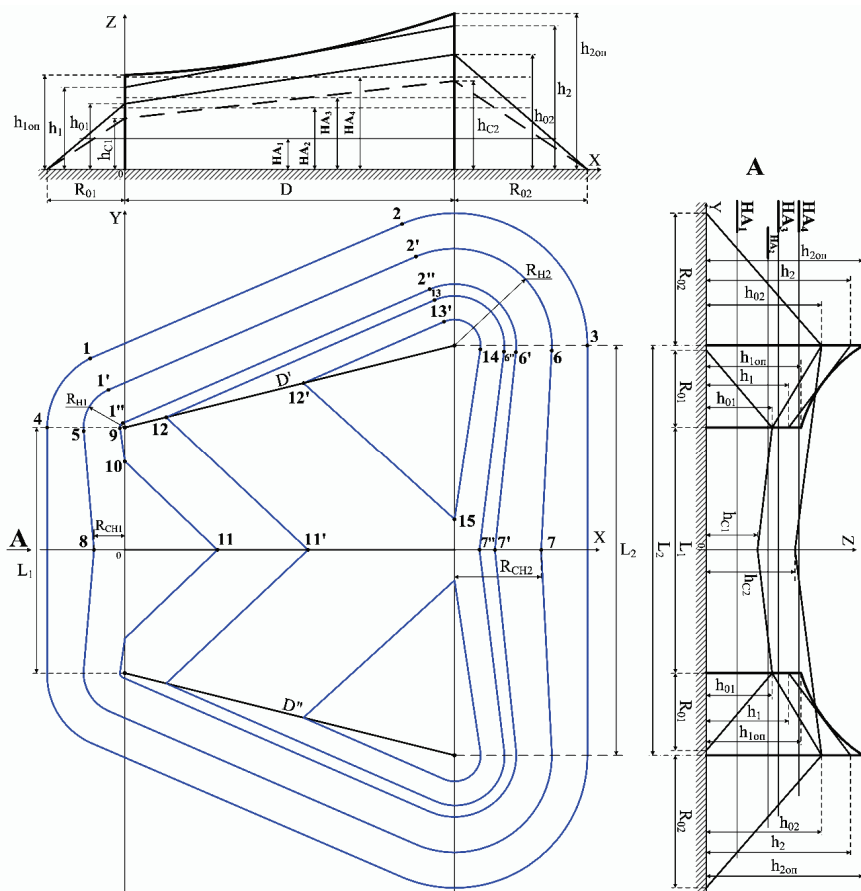


Рисунок 1 – Зона защиты наклонного непараллельного тросового молниеотвода и ее границы на пяти высотах анализа (НА1, НА2, НА3, НА4 и уровне грунта) при $h_{10n} < h_{20n}$:

h_{10n} – высота подвеса тросов на меньшей (первой) паре опор; h_{20n} – высота подвеса тросов на большей (второй) паре опор; h_1 и h_2 – высоты подвеса тросов с учетом провеса на первой и второй парах опор соответственно; L_1 – расстояние между опорами первой пары тросов; L_2 – расстояние между опорами второй пары тросов; D' и D'' – расстояния между первой и второй опорой тросов (в рассмотренном случае $D' = D''$); D – проекция длин тросов на горизонтальную ось; h_{01} , R_{01} и h_{02} , R_{02} – размеры торцевых областей зоны защиты у первой и второй пар опор соответственно; h_{C1} и h_{C2} – минимальные высоты зоны защиты посередине между первой и второй парами опор соответственно; $R_{Н1}$ и $R_{Н2}$ – радиусы конусов торцевых областей на соответствующих высотах анализа; $R_{СН1}$ и $R_{СН2}$ – ширина горизонтального сечения в центре между первой и второй парами опор соответственно на соответствующих высотах анализа; 1-15, 1'-2', 6'-7', 11'-13', 1''-2'', 6''-7'' – характерные концевые точки на различных высотах анализа

Таблица 1 – Параметры торцевых областей зоны защиты тросового молниеотвода

Надежность защиты, Pз	Высота молниеотвода h, м	Высота конуса h ₀ , м	Радиус конуса R ₀ , м
0,9	от 0 до 150	0,87h	1,5h
0,99	от 0 до 30	0,8h	0,95h
	от 30 до 100	0,8h	[0,95 – 7,14·10 ⁻⁴ (h – 30)]h
	от 100 до 150	0,8h	[0,9 – 1·10 ⁻³ (h – 100)]h
0,999	от 0 до 30	0,75h	0,7h
	от 30 до 100	[0,75 – 4,28·10 ⁻⁴ (h – 30)]h	[0,7 – 1,43·10 ⁻³ (h – 30)]h
	от 100 до 150	[0,72 – 1·10 ⁻³ (h – 100)]h	[0,6 – 1·10 ⁻³ (h – 100)]h

Таблица 2 – Расчет граничных расстояний зоны защиты двойного тросового молниеотвода

Надежность защиты, Pз	Высота молниеотвода h, м	L _C , м	L _{max} , м
0,9	от 0 до 150	3,0h	6,0h
0,99	от 0 до 30	2,5h	5,0h
	от 30 до 100	[2,5 – 7,14·10 ⁻³ (h – 30)]h	5,0h
	от 100 до 150	[2,0 – 5·10 ⁻³ (h – 100)]h	[5,0 – 5·10 ⁻³ (h – 100)]h
0,999	от 0 до 30	2,25h	4,75h
	от 30 до 100	[2,25 – 3,57·10 ⁻³ (h – 30)]h	[4,75 – 3,57·10 ⁻³ (h – 30)]h
	от 100 до 150	[2,0 – 5·10 ⁻³ (h – 100)]h	[4,5 – 5·10 ⁻³ (h – 100)]h

$$R_{H2} = \frac{R_{02}}{h_{02}}(h_{02} - HA); \quad (4)$$

$$R_{CH} = R_0 \frac{h_C - HA}{h_C}; \quad (5)$$

$$D' = \sqrt{D^2 + \left(\frac{L_2 - L_1}{2}\right)^2}; \quad (6)$$

$$A = \sqrt{D'^2 - (R_{H2} - R_{H1})^2}; \quad (7)$$

$$B = \frac{R_{H2}L_2\sqrt{L_2^2 + 4R_{CH2}^2 - 4R_{H2}^2 + 4R_{H2}^2R_{CH2}}}{L_2^2 + 4R_{CH2}^2}; \quad (8)$$

Таблица 3 – Формы зоны защиты ДННПТМО на различных высотах анализа

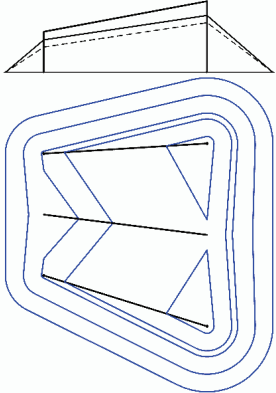
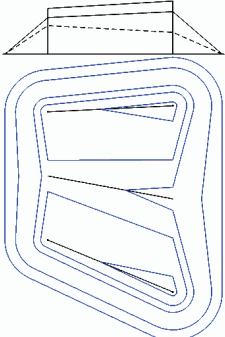
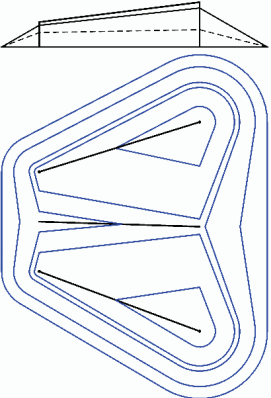
Вариант зоны защиты ДННПТМО	Условие изменения формы зоны защиты ДННПТМО	Форма (эскиз) зоны защиты ДННПТМО на различных высотах анализа
1	$h_{c2} \geq h_{01} > h_{c1}$	
2	$h_{c2} < h_{c1}$	
3	$h_{c1} < h_{c2} < h_{01}$	

Таблица 4 – Определение координат концевых точек

№ точки	Координата X	Координата Y
1, 1', 1"	$-R_{H1} \cdot \left[\frac{2D \cdot (R_{H2} - R_{H1}) + A \cdot (L_2 - L_1)}{2D^2} \right]$	$L_1/2 + \sqrt{R_{H1}^2 - x^2}$
2, 2', 2"	$D - R_{H2} \cdot \left[\frac{2D \cdot (R_{H2} - R_{H1}) + A \cdot (L_2 - L_1)}{2D^2} \right]$	$L_2/2 + \sqrt{R_{H2}^2 - (D - x)^2}$
3	$D + R_{O2}$	$L_2/2$
4	$-R_{O1}$	$L_1/2$
5	$-C$	$L_1/2 - \sqrt{R_{H1}^2 - C^2}$
6, 6', 6"	$D + B$	$L_2/2 - \sqrt{R_{H2}^2 - B^2}$
7, 7', 7"	$D + R_{CH2}$	0
8	$-R_{CH1}$	0
9	$-\sqrt{R_{H1}^2 - \left(L_1/2 - y \right)^2}$	$L_1/2 - \frac{2R_{H1}^2(h_{O1} - h_{C1})}{L_1(h_{O1} - HA)}$
10	0	$\frac{L_1(HA - h_{C1})}{2(h_{O1} - h_{C1})}$
11, 11'	$\frac{D(HA - h_{C1})}{h_{C2} - h_{C1}}$	0
12, 12'	$D - \frac{D(h_{O2} - HA)}{h_{O2} - h_{O1}}$	$L_2/2 - \frac{(L_2 - L_1)(h_{O2} - HA)}{2(h_{O2} - h_{O1})}$
13, 13'	$D - R_{H2} \cdot \frac{2DR_{H2}(h_{O2} - h_{O1}) + (L_2 - L_1) \times \dots}{\dots \times \sqrt{D'^2(h_{O2} - HA)^2 - R_{H2}^2(h_{O2} - h_{O1})^2}} \dots$	$L_2/2 + \sqrt{R_{H2}^2 - (D - x)^2}$
14	$D + R_{H2} \sqrt{1 - \frac{4R_{H2}^2(h_{O2} - h_{C2})^2}{L_2^2(h_{O2} - HA)^2}}$	$L_2/2 - \sqrt{R_{H2}^2 - (x - D)^2}$
15	D	$L_2/2 - \frac{L_2(h_{O2} - HA)}{2(h_{O2} - h_{C2})}$

$$C = \frac{R_{Н1}L_1\sqrt{L_1^2 + 4R_{СН1}^2 - 4R_{Н1}^2} + 4R_{Н1}^2R_{СН1}}{L_1^2 + 4R_{СН1}^2}. \quad (9)$$

Формулы для определения координат концевых точек для других вариантов зон защиты (вариант 2 и 3) выводятся аналогичным способом.

Для графического отображения результатов расчета с целью проверки правильности выведенных соотношений была создана программа в приложении Microsoft Excel с использованием Visual Basic for Applications.

На рис. 2 показано рабочее окно разработанной программы для определения параметров зоны защиты двойного наклонного непараллельного тросового молниеотвода (для надежности защиты $P_3 = 0,99$, при высотах подвеса тросов с учетом провиса на первой паре опор $h_1 = 40$ м, на второй паре опор $h_2 = 120$ м, расстоянием между первыми и вторыми парами опор в горизонтальной проекции $D = 200$ м, расстоянием между опорами первой пары $L_1 = 120$ м и расстоянием между опорами второй пары $L_2 = 300$ м), а также графического отображения габаритов зоны защиты и ее границ на заданных высотах анализа НА (0, 22, 30, 60 и 80 м).

В ячейках С1 – С6 вводятся исходные данные, правильность задания которых проверяется блоком контроля.

В ячейки С8 – С17 программа выдает габаритные размеры зоны защиты ДННПТМО. В ячейке D4 вычисляется приведенная длина заданных тросов (без провиса).

В ячейках F1 – J1 задаются желаемые высоты для построения границ зоны защиты.

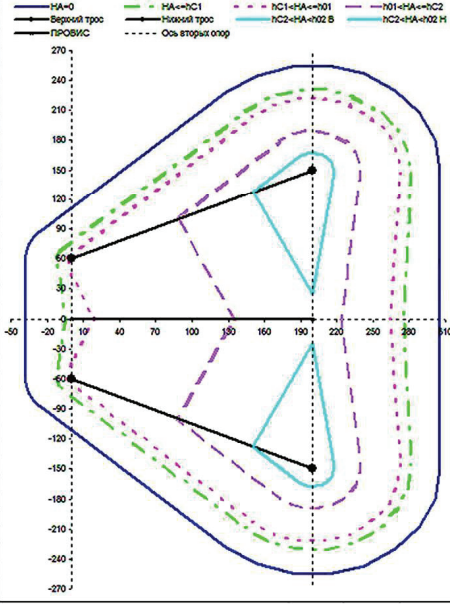
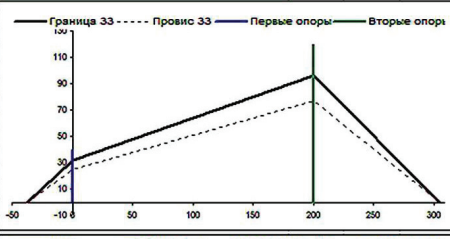
В ячейках F2-8, G2-8, H2-8, I2-8, J2-8 отображаются значения радиусов дуг окружностей и других характеристических размеров границ зоны защиты для соответствующих анализируемых высот. В ячейках G22-25 – H22-25, G29-34 – H29-34, G38-44 – H38-44, G48-52 – H48-52, G56-59 – H56-59 выдаются значения координат концевых точек границ зоны защиты на соответствующих высотах анализа НА. По этим данным автоматически строится два рисунка: сечение по продольной оси зоны защиты ДННПТМО с заданными параметрами и границы зоны защиты ДННПТМО на заданных высотах – высотах анализа.

Ячейка A19 является информационной, в которой могут появляться сообщения о некорректном задании исходных данных либо вывод о вырождении зоны защиты ДННПТМО заданных параметров в зону защиты другого вида.

При определенном сочетании исходных данных зона защиты ДННПТМО может вырождаться либо в совокупность зон защиты наклонного тросового молниеотвода (НТМО) и одиночного стержневого молниеотвода (ОСМО), либо в зону защиты двойного стержневого молниеотвода (ДСМО). Проверка условий вырождения приведена на рис. 3.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Надежность защиты	P_0	0,99		HA	0	22	30	60	80
2	Высота 1 опоры тросового молниеотвода	h_1	40		R_{01}	37,71	11,79	2,36		
3	Высота 2 опоры тросового молниеотвода	h_2	120	D'	R_{02}	105,60	81,40	72,60	39,60	17,60
4	Расстояние между 1 и 2 опорой (в гориз. проекции)	D	200	107,70	R_{01}	37,71	4,38			
5	Расстояние между первыми опорами	L_1	120		R_{02}	105,60	75,35	64,35	23,10	
6	Расстояние между вторыми опорами	L_2	300		A	83,62	82,18	81,65	100,16	106,26
7					B	105,60	81,33	72,49	39,36	17,48
8	Радиус от первой опоры на уровне грунта	R_{01}	37,71		C	37,71	11,69	2,36		
9	Радиус от второй опоры на уровне грунта	R_{02}	105,60							
10	Высота конуса 1	h_{01}	32,00							
11	Высота конуса 2 (MAX высота зоны защиты)	h_{02}	96,00							
12	Высота провисания между меньшими опорами	h_{c1}	24,89							
13	Высота провисания между большими опорами	h_{c2}	76,80							
14	Минимальное предельное расстояние (1 опора)	L_{c1}	97,14							
15	Минимальное предельное расстояние (2 опора)	L_{c2}	228,00							
16	Максимальное предельное расстояние (1 опора)	L_{max1}	200,00							
17	Максимальное предельное расстояние (2 опора)	L_{max2}	588,00							

РАСЧЕТ



	X	Y
0		
1	-25,36	87,91
2	128,99	228,16
3	305,60	150,00
4	-37,71	60,00

	X	Y
22		
1'	-8,00	68,66
2'	144,76	209,79
5	-11,69	58,54
6	281,33	146,68
7	275,35	0,00
8	-4,38	0,00

	X	Y
30		
1''	-1,60	61,73
2''	150,57	203,18
6'	272,49	146,96
7'	264,35	0,00
9	-2,33	59,67
10	0,00	43,12
11	19,69	0,00

	X	Y
60		
6''	239,36	145,61
7''	223,10	0,00
11'	135,27	0,00
12	87,50	99,38
13	173,02	178,98

	X	Y
80		
12'	150,00	127,50
13'	188,01	162,88
14	217,42	147,52
15	200,00	25,00

Рисунок 2 – Интерфейс программы расчета параметров зоны защиты двойного наклонного непараллельного тросового молниеотвода и построения границ зоны защиты ДННПТМО на заданных высотах анализа

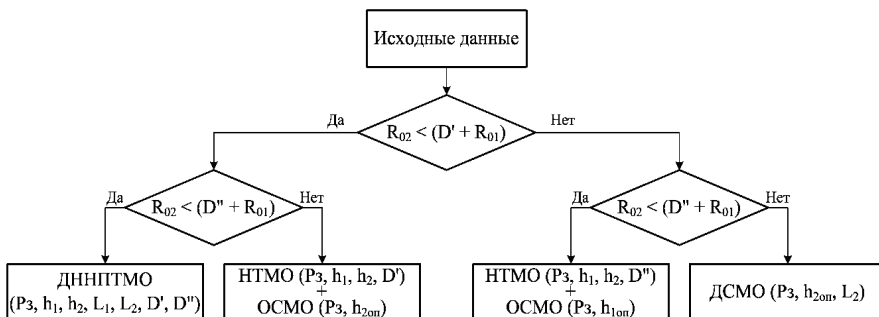


Рисунок 3 – Проверка условий вырождения ДННПТМО в другие виды

	A	B	C	D
1	Надежность защиты	P₃	0,9	
2	Высота 1 опоры тросового молниеотвода	h₁	45	
3	Высота 2 опоры тросового молниеотвода	h₂	120	D'
4	Расстояние между 1 и 2 опорой (в гориз проекции)	D	100	107,70
5	Расстояние между первыми опорами	L₁	120	
6	Расстояние между вторыми опорами	L₂	200	
7				
8	Радиус от первой опоры на уровне грунта	R₀₁	67,50	
9	Радиус от второй опоры на уровне грунта	R₀₂	180,00	
10	Высота конуса 1	h₀₁	39,15	
11	Высота конуса 2 (МАХ высота зоны защиты)	h₀₂	104,40	
12	Высота провисания между меньшими опорами	h_{c1}	39,15	
13	Высота провисания между большими опорами	h_{c2}	104,40	
14	Минимальное предельное расстояние (1 опора)	L_{c1}	135,00	
15	Минимальное предельное расстояние (2 опора)	L_{c2}	360,00	
16	Максимальное предельное расстояние (1 опора)	L_{max1}	270,00	
17	Максимальное предельное расстояние (2 опора)	L_{max2}	720,00	
18				
19	Двойной стержневой МО высотой h2оп	РАСЧЕТ		

Рисунок 4 – Результаты работы программы при вырождении ДННПТМО в двойной стержневой молниеотвод

В качестве примера на рис. 4 показано окно программы для случая вырождения ДННПТМО в ДСМО, которое происходит вследствие того, что построить внутреннюю область зоны защиты не представляется возможным из-за размещения малых торцевых областей внутри больших. Таким образом, при выполнении указанных условий тросовые молниеотводы теряют свои функции и зона защиты образуется только за счет опор, на которых они подвешены.

Выводы.

1. Создано математическое описание зоны защиты двойного наклонного непараллельного тросового молниеотвода.
2. Разработана компьютерная программа для расчета параметров и графического представления формы зоны защиты двойного наклонного непараллельного тросового молниеотвода с блоком контроля исходных данных.
3. Определены условия, при которых зона защиты двойного наклонного непараллельного тросового молниеотвода вырождается либо в совокупность зон защиты наклонного тросового молниеотвода и одиночного стержневого молниеотвода, либо в зону защиты двойного стержневого молниеотвода.

Список литературы: 1. Улаштування блискавкозахисту будівель і споруд (ІЕС 62305:2006, NEQ) : ДСТУ Б В.2.5-38:2008. – [Чинний від 2009–01–01]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2008. – 48 с. – (Національний стандарт України). 2. Киприч С. В. Применение метода конечных точек для построения зоны защиты двойного разнвысокого стержневого молниеотвода / С. В. Киприч, Г. М. Колиушко, Д. Г. Колиушко, А. А. Петков // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск : Техніка і електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2009. – № 39. – С. 69-78. 3. Киприч С. В. Расчет параметров зоны защиты наклонного тросового молниеотвода методом конечных точек / С.В. Киприч, Д.Г. Колиушко, А.А. Петков // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2011. – №16. – С. 90-96. 4. Киприч С. В. Методика анализа молниезащищенности объектов при сложном рельефе поверхности зоны защиты / С. В. Киприч, А. А. Петков, Д. Г. Колиушко // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск : Техніка і електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2008. – №21. – С. 66-78.

Поступила в редколлегию 22.04.2013.

УДК 621.316.9

Расчет параметров зоны защиты двойного наклонного непараллельного тросового молниеотвода методом конечных точек / С. В. Киприч, Д. Г. Колиушко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 27 (1000). – С. 58-68. – Бібліогр.: 4 назв.

У роботі наведено розрахунок зони захисту подвійного нахиленого непараллельного тросового блискавководводу за допомогою методу кінцевих точок.

Ключові слова: тросовий блискавководвід, математичний опис, зона захисту, метод кінцевих точок.

Double inclined unparallelled lightning conductor protection zone calculation by the instrumentality of the ending points method is represented in this paper.

Keywords: lightning conductor, mathematical formulation, protection zone, ending points method.