

зависимость от амплитудного значения импульсного напряжения  $u_p(t)$  и рабочего напряжения  $U_0$  генератора. Показано, что приведенные расчетные соотношения можно применять при практических разработках мощных высоковольтных генераторов тока молнии и эксплуатации существующих ГБИТМ.

**Список литературы:** 1. *Кнопфель Г.* Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 391 с. 2. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / Под ред. *В.С.Комелькова.* – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с. 3. Патент України №6279, МКІ НОЗКЗ/53. Генератор імпульсних струмів // *Баранов М.І., Ігнатенко М.М., Колобовський А.К.* – Опубл. Бюл. № 5, 16.05.2005. – 4 с. 4. Патент України №15714, МКІ НОЗКЗ/53. Генератор великих імпульсних струмів блискавки // *Баранов М.І., Ігнатенко М.М.* – Опубл. Бюл. № 7, 17.07.2006. – 4 с. 5. *Баранов М.І., Ігнатенко Н.Н.* Повышение энергетической эффективности разрядных цепей генераторов больших импульсных токов с мощными емкостными накопителями энергии // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. – № 49. – С. 3-14. 6. *Ігнатенко Н.Н.* Расчет переходных процессов в генераторах тока молнии с замыкателями нагрузки // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. – № 11. – С. 38-45. 7. *Кремнев В.В., Месяц Г.А.* Методы умножения и трансформации импульсов в сильноточной электронике. – Новосибирск: Наука, 1987. – 226 с. 8. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения: Пер. с нем. / *М.Бейер, В.Бек, К.Меллер, В.Цаенгль;* Под ред. *В.П.Ларионова.* – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 555 с. 9. Техника высоких напряжений / Под ред. *Л.И.Сиротинского.* Часть первая – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1951. – 292с.

*Поступила в редколлегию 08.09.2009*

УДК 621.316.9

*С.В.КИПРИЧ*, млад.науч.сотр., НТУ «ХПИ»;  
*Г.М.КОЛИУШКО*, канд.техн.наук, ст.науч.сотр., НТУ «ХПИ»;  
*Д.Г.КОЛИУШКО*, канд.техн.наук, ст.науч.сотр., НТУ «ХПИ»;  
*А.А.ПЕТКОВ*, канд.техн.наук, ст.науч.сотр., НТУ «ХПИ»

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЦЕВЫХ ТОЧЕК ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ЗОНЫ ЗАЩИТЫ ДВОЙНОГО РАЗНОВЫСОКОГО СТЕРЖНЕВОГО МОЛНИЕОТВОДА

У роботі наведено математичну модель розрахунку зони захисту подвійного різновисокого стрижневого блискавководу. Показана ефективність методики кінцевих точок на прикладі зони захисту подвійного різновисокого стрижневого блискавководу за допомогою Visual Basic for Applications.

The mathematical model of the two different height lightning-rods protection zone calculation is represented in this paper. Efficiency of the ending points method is shown by example of the two different height lightning-rods protection zone with used of the Visual Basic for Applications.

**Постановка проблемы.** В настоящее время в связи с возросшей грозовой

активностью актуальной является задача обеспечения молниезащищенности различных объектов как промышленного, так и бытового назначения. Рост стоимости оборудования, а также его низкая помехозащищенность, связанная с применением микропроцессорной техники, еще более обостряют проблему надежной защиты объектов от поражения молнией. Для решения задачи молниезащищенности применяются различные виды молниеотводов и их сочетания. Одним из часто используемых типов молниеотводов является двойной разновысокий стержневой молниеотвод (ДРМ), который широко применяется при защите объектов электроэнергетики и промышленности: электрических подстанциях различного класса напряжения, атомных электростанциях, нефтеперекачивающих станциях и т.д. Изменение в Украине нормативной базы и тенденция к компьютеризации процесса проектирования молниезащиты вызывает необходимость дальнейших разработок по расчету зон защиты ДРМ.

**Анализ публикаций.** В Украине до 2009 года основным нормативным документом, который регламентировал методику построения зон защиты большинства встречающихся на практике типов молниеотводов, являлся [1] (далее – РД). Согласно ему два стержневых молниеотвода разной высоты, но не превышающей 150 м, образуют зону защиты, представленную на рис. 1, которая состоит из торцевых областей, ограниченных коническими поверхностями и внутренней области со сложным рельефом поверхности. Причем габаритные размеры торцевых областей зоны защиты определяются по соотношениям для одиночных стержневых молниеотводов, а габаритные размеры ее внутренней области определяются по формулам:

$$R_C = (R_{01} + R_{02})/2; \quad (1)$$

$$h_C = (h_{C1} + h_{C2})/2; \quad (2)$$

$$R_{CH} = R_C \frac{h_C - h_A}{h_C}. \quad (3)$$

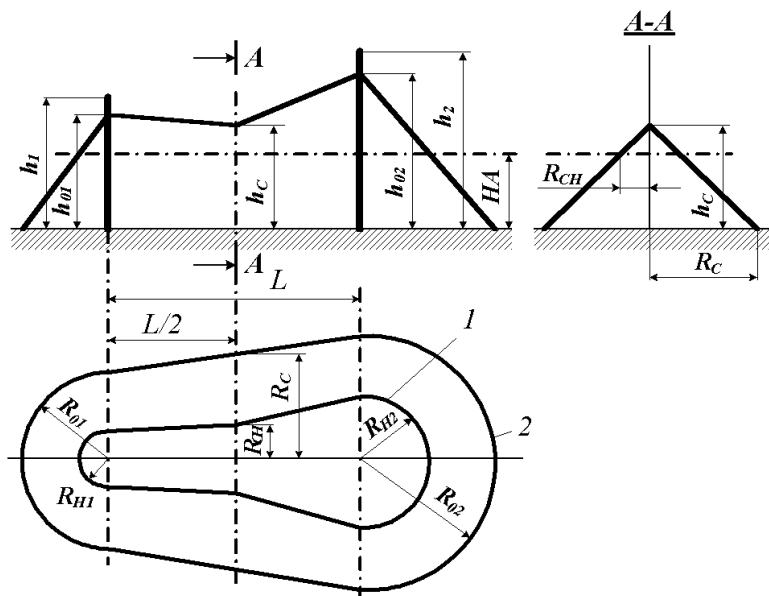


Рисунок 1 – Зона защиты двух стержневых молниеотводов разной высоты, согласно РД

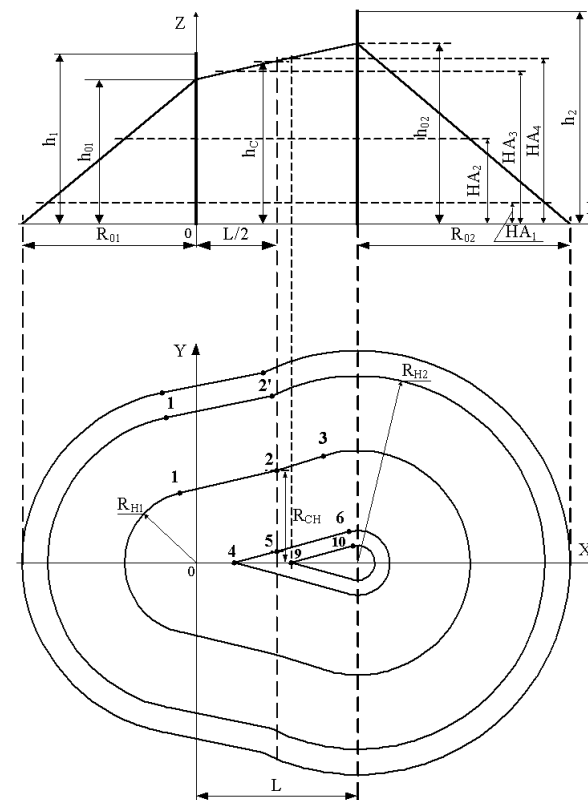


Рисунок 2 – Зона защиты ДРМ и ее границы на характерных высотах анализа для надежности защиты 0,995 при  $h_1 < h_2$ ,  $h_{01} < h_C < h_{02}$  и  $R_C \leq \sqrt{R_{02}^2 - L^2/4}$ ;

$h_1$  и  $h_2$  – высоты молниеотводов;  $L$  – расстояние между молниеотводами;  $h_{01}$ ,  $R_{01}$  и  $h_{02}$ ,  $R_{02}$  – габаритные размеры торцевых областей зоны защиты молниеотводов 1 и 2;  $R_C$ ,  $h_C$  и  $R_{CH}$  – параметры внутренней области зоны защиты, зависящие от надежности защиты, высоты молниеотводов, расстояния между ними и высоты анализа;  $HA_1$ ,  $HA_2$ ,  $HA_3$  и  $HA_4$  – высоты анализа, причем  $HA_1 \leq h_{01}$ ,  $HA_2 \leq h_{01}$ ,  $h_{01} < HA_3 \leq h_C$ ,  $h_C < HA_4 < h_{02}$ ;  $R_{H1}$  и  $R_{H2}$  – радиусы конусов торцевых областей зоны защиты на соответствующих высотах анализа  $HA$  для молниеотводов 1 и 2 соответственно; 1 – 10, 2' – 10' – концевые точки фигур на различных высотах анализа

Для определения параметров ( $h_{C1}$ ,  $h_{C2}$ ), входящих в состав соотношения (2), в РД используются формулы для соответствующих параметров двойного стержневого молниеотвода (при  $h_1 = h_2$ ).

Как видно из рис. 1 рельеф зоны защиты ДРМ определен параметрами, ори-

ентированными на ее графическое построение, и достаточно сложен для проведения численных расчетов, необходимость в которых возникает, в частности, при компьютерном моделировании молниезащищенности различных объектов.

Действующий с 2009 года в Украине [2] (далее – ДСТУ), к сожалению, не содержит расчетных соотношений для определения габаритных размеров зоны защиты ДРМ, а только лишь предусматривает возможность использования неких специальных программ. Учитывая идентичность подходов к построению зон защиты молниеотводов в РД и ДСТУ, ДРМ, построенный на основании данных ДСТУ, как и в РД, будет также содержать внутреннюю область с рельефом, достаточно сложным для проведения численных расчетов. Снижения затрат ресурсов ЭВМ при проведении расчетов зон защиты со сложным рельефом поверхности можно достичь, используя предложенный авторами метод конечных точек [3], сущность которого состоит в определении координат конечных точек фигур, составляющих замкнутую линию границы зоны защиты, и радиуса дуг окружности ( $R_H$ ) на заданной высоте анализа, и определении с их помощью координат любых точек зоны защиты.

**Целью** настоящей работы является вывод аналитических выражений координат конечных точек ДРМ, необходимых для построения его зоны защиты в процессе компьютерного моделирования молниезащищенности объектов.

**Материалы и результаты исследований.** Детальный анализ материалов РД показывает, что в зависимости от параметров, входящих в (1) – (3), зоны защиты имеют вид, отличный от приведенного в РД (см. рис. 1). Расчетные зоны защиты ДРМ для надежности 0,995 приведены на рис. 2–4. В зависимости от соотношений между параметрами зоны защиты ( $h_1$ ,  $h_2$ ,  $L$ ,  $h_C$  и  $R_C$ ) изменяется ее вид, а, следовательно, и выражения для конечных точек.

Для варианта зоны защиты при условиях  $h_{01} < h_C < h_{02}$  и  $R_C \leq \sqrt{R_{02}^2 - L^2/4}$  (см. рис. 2) конечная точка 2' представляет собой пересечение дуги окружности (радиусом  $R_{H2}$ ), образованной зоной защиты большего молниеотвода и касательной к дуге окружности (радиусом  $R_{H1}$ ), образованной зоной защиты меньшего молниеотвода, проведенной из точки с координатами ( $L/2$ ;  $R_{CH}$ ).

Соотношения для определения параметров  $h_{01}$ ,  $h_{02}$ ,  $R_{01}$ ,  $R_{02}$ ,  $h_{C1}$ ,  $h_{C2}$  приведены в табл. 1.

Учитывая, что в ДСТУ отсутствуют соотношения, позволяющие рассчитывать зону защиты ДРМ, в качестве аналога примем базовые соотношения (1) – (3) методики построения зоны защиты двух стержневых молниеотводов разной высоты, приведенные в РД. В качестве соотношений для определения параметров (1) – (2) используем соотношения, приведенные в ДСТУ для двойного стержневого молниеотвода с одинаковой высотой стержней. В табл. 2 приведены соотношения для определения параметров  $h_{01}$ ,  $h_{02}$ ,  $R_{01}$ ,  $R_{02}$  в зависимости от надежности защиты и высоты молниеотводов.

Параметры  $h_{C1}$  и  $h_{C2}$  в зависимости от надежности защиты, высоты молниеотводов и граничных расстояний между ними (см. табл. 3) определяются по (4) и (5).

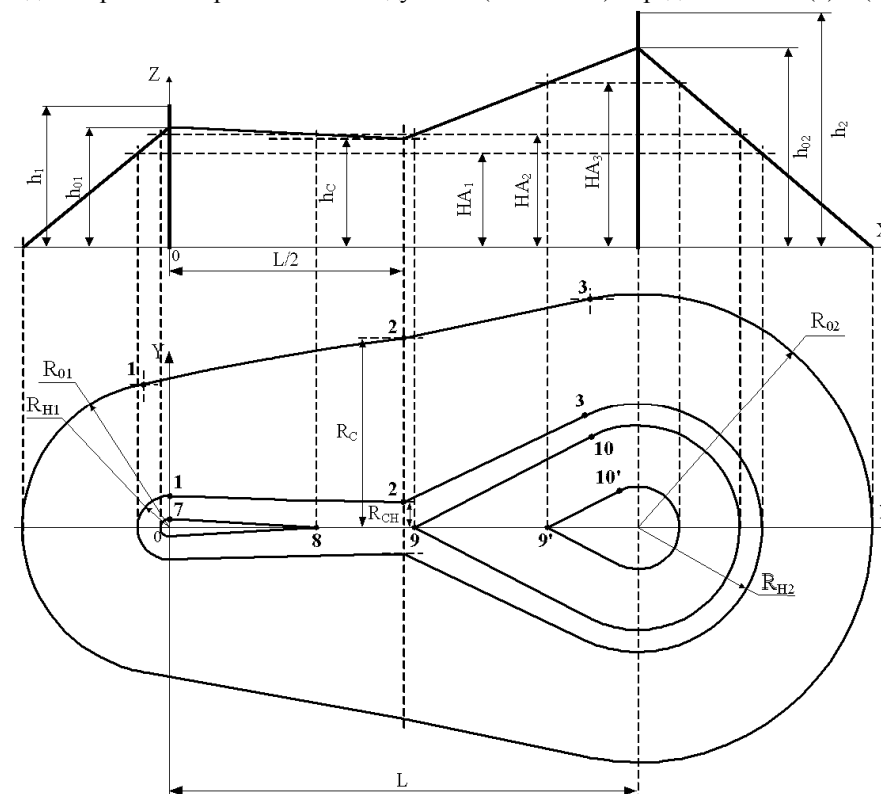


Рисунок 3 – Зона защиты ДРМ и ее границы на характерных высотах анализа для надежности защиты 0,995 при  $h_1 < h_2$  и  $h_C \leq h_{01}$ ;  $h_{A1} \leq h_C$ ,  $h_C < h_{A2} \leq h_{01}$ ,  $h_{01} < h_{A3} < h_{02}$ . Обозначения те же, что и на рис. 2.

Таблица 1

Надежность защиты, $P_z$	Высота молниеотвода $h$ , м	Высота конуса $h_0$ , м	Радиус конуса на уровне грунта $R_0$ , м	Условие	Высота зоны защиты посередине между молниеотводами $h_C$ , м
0,95	от 0 до 150	0,92h	1,5h	$L \leq h$	$h_0$
				$h < L \leq 6h$	$h_0 - 0,14(L - h)$
0,995	от 0 до	0,85h	$(1,1 - 0,002h)h$	$L \leq h$	$h_0$

150	$h < L \leq 6h$	$h_0 = (0,17 + 3 \cdot 10^{-4}h) \cdot (L - h)$
-----	-----------------	---

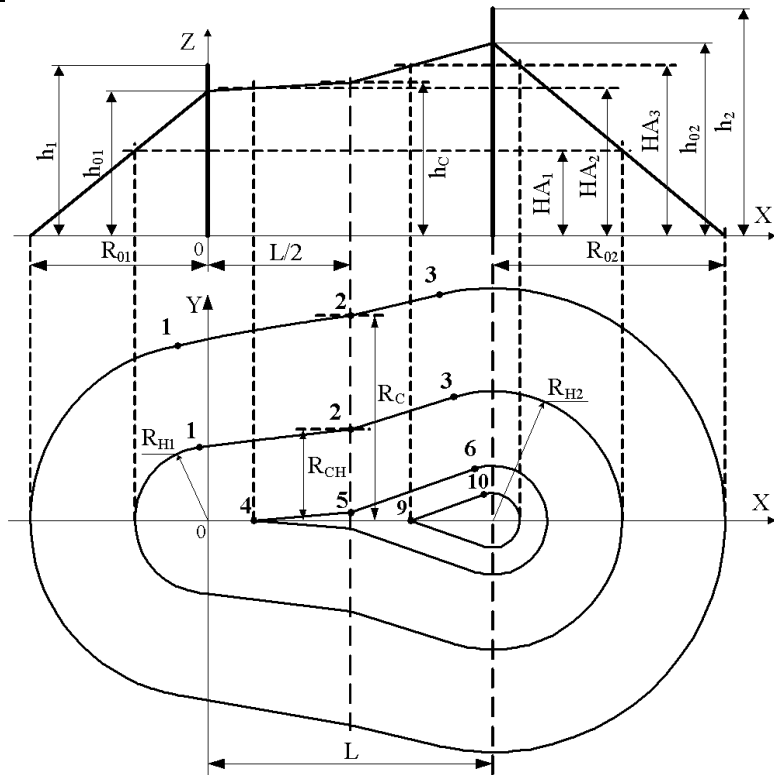


Рисунок 4 – Зона защиты ДРМ и ее границы на характерных высотах анализа для надежности защиты 0,995 при  $h_1 < h_2$  и  $h_{01} < h_c < h_{02}$  и  $R_C \leq \sqrt{R_{02}^2 - L^2/4}$ ;  $HA_1 \leq h_{01}$ ,  $h_{01} < HA_2 \leq h_c$ ,  $h_c < HA_3 < h_{02}$ . Обозначения те же, что и на рис.2.

Таблица 2

Надежность защиты, Pз	Высота молниеотвода h, м	Высота конуса h <sub>0</sub> , м	Радиус конуса на уровне грунта R <sub>0</sub> , м
0,9	от 0 до 100	0,85h	1,2h
	от 100 до 150		$[1,2 - 1 \cdot 10^{-3}(h - 100)] h$
0,99	от 0 до 30	0,8h	0,8h
	от 30 до 100		$[0,8 - 1,43 \cdot 10^{-3} \times (h - 30)] h$
	от 100 до 150	$[0,8 - 1 \cdot 10^{-3}(h - 100)] h$	0,7h
0,999	от 0 до 30	0,7h	0,6h

	от 30 до 100	$[0,7 - 7,14 \cdot 10^{-4} \times (h - 30)] h$	$[0,6 - 1,43 \cdot 10^{-3} \times (h - 30)] h$
	от 100 до 150	$[0,65 - 1 \cdot 10^{-3}(h - 100)] h$	$[0,5 - 2 \cdot 10^{-3}(h - 100)] h$

Таблица 3

Надежность защиты, Pз	Высота молниеотвода h, м	L <sub>C</sub> , м	L <sub>max</sub> , м
0,9	от 0 до 30	2,5 h	5,75 h
	от 30 до 100		$[5,75 - 3,57 \cdot 10^{-3} \times (h - 30)] h$
	от 100 до 150		5,5 h
0,99	от 0 до 30	2,25 h	4,75 h
	от 30 до 100	$[2,25 - 0,0107(h - 30)] h$	$[4,75 - 3,57 \cdot 10^{-3} \times (h - 30)] h$
	от 100 до 150	1,5 h	4,5 h
0,999	от 0 до 30	2,25 h	4,25 h
	от 30 до 100	$[2,25 - 0,0107(h - 30)] h$	$[4,25 - 3,57 \cdot 10^{-3} \times (h - 30)] h$
	от 100 до 150	1,5 h	4,0 h

При выполнении условия  $L \leq L_{Ci}$  величина  $h_{Ci}$  определяется по (4), а при  $L_{Ci} < L \leq L_{maxi}$  величина  $h_{Ci}$  определяется по (5) где  $i$  – номер молниеотвода, 1 или 2.

$$h_{Ci} = h_{0i}; \quad (4)$$

$$h_{Ci} = h_{0i} \frac{L_{maxi} - L}{L_{maxi} - L_{Ci}}; \quad (5)$$

В зависимости от соотношений между параметрами зоны защиты изменяется и ее форма. Характерные формы зон защиты на различных высотах анализа (НА) для ДРМ при определенных соотношениях параметров приведены на рис. 2 – 4.

Выведенные координаты концевых точек, указанных на рис. 2 – 4 приведены в табл. 4.

$$R_{H1} = \frac{R_{01}}{h_{01}} (h_{01} - HA); \quad (6)$$

$$R_{H2} = \frac{R_{02}}{h_{02}} (h_{02} - HA); \quad (7)$$

$$A = \frac{2R_{H1}R_{CH}\sqrt{4R_{CH}^2 + L^2 - 4R_{H1}^2} - 2LR_{H1}^2}{4R_{CH}^2 + L^2}; \quad (8)$$

$$B = \frac{L(HA - h_{01})}{2(h_C - h_{01})}; \quad (9)$$

$$C = \frac{LR_{H2} \sqrt{4R_{CH}^2 + L^2 - 4R_{H2}^2} + 4R_{H2}^2 R_{CH}}{4R_{CH}^2 + L^2}; \quad (10)$$

$$D = \frac{L(h_{02} - HA)}{2(h_{02} - h_C)}; \quad (11)$$

$$E = \frac{2AR_{CH} + L\sqrt{R_{H1}^2 - A^2}}{2A + L}; \quad (12)$$

$$F = \frac{2(\sqrt{R_{H1}^2 - A^2} - R_{CH})}{2A + L}; \quad (13)$$

$$G = \sqrt{R_{H2}^2(F^2 + 1) - E^2 - L^2F^2 + 2LEF}. \quad (14)$$

Таблица 4

№ точки	Координата X	Координата Y
1	- A	$\sqrt{R_{H1}^2 - A^2}$
2	L/2	R <sub>CH</sub>
2'	$\frac{(EF+L) - \sqrt{R_{H2}^2(F^2+1) - E^2 - L^2F^2 + 2LEF}}{F^2+1}$	$\sqrt{R_{H2}^2 - \left(L - \frac{EF+L-G}{F^2+1}\right)^2}$
3	$L - \sqrt{R_{H2}^2 - C^2}$	C
4	B	0
5	L/2	R <sub>CH</sub>
6	$L - \sqrt{R_{H2}^2 - C^2}$	C
7	$\frac{R_{H1}^2}{B}$	$\frac{R_{H1}}{B} \sqrt{B^2 - R_{H1}^2}$
8	B	0
9 (9')	L - D	0
10 (10')	$L - \frac{R_{H2}^2}{D}$	$\frac{R_{H2}}{D} \sqrt{D^2 - R_{H2}^2}$

Примечание: Номера точек соответствуют обозначениям на рис.2 – 4.

Соотношения, приведенные в табл. 4 и (6) – (14), для определения координат концевых точек фигур, образующих границу зоны защиты ДРМ справедливости для случаев:

- при  $L \leq L_{max1}$  для надежностей защиты 0,9, 0,99 и 0,999;

- при  $L \leq 6h_1$  для надежности защиты 0,95;
- при  $L \leq 4h_1$  для надежности защиты 0,995.

При этом в соотношениях изменяются лишь габаритные размеры ( $h_1, h_2, L, h_{01}, h_{02}, R_{01}, R_{02}, h_C, R_C, R_{CH}, R_{H1}, R_{H2}$ ) зоны защиты.

При расстоянии между молниеотводами  $L > L_{max1}$  для надежностей защиты 0,9, 0,99, 0,999, при  $L > 4h_1$  для надежности защиты 0,995 и при  $L > 6h_1$  для надежности защиты 0,95 их следует рассматривать как одиночные стержневые молниеотводы.

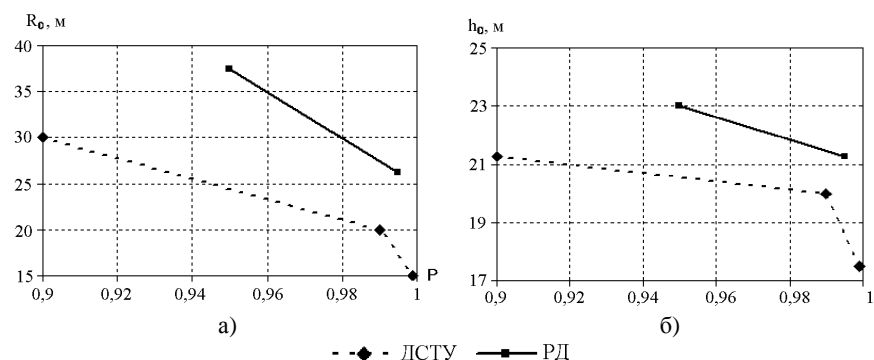


Рисунок 5 – Сравнение параметров ( $R_0$  и  $h_0$ ) торцевых областей зоны защиты для одиночного стержневого молниеотвода высотой 25 м по РД и ДСТУ в зависимости от значений надежности защиты P

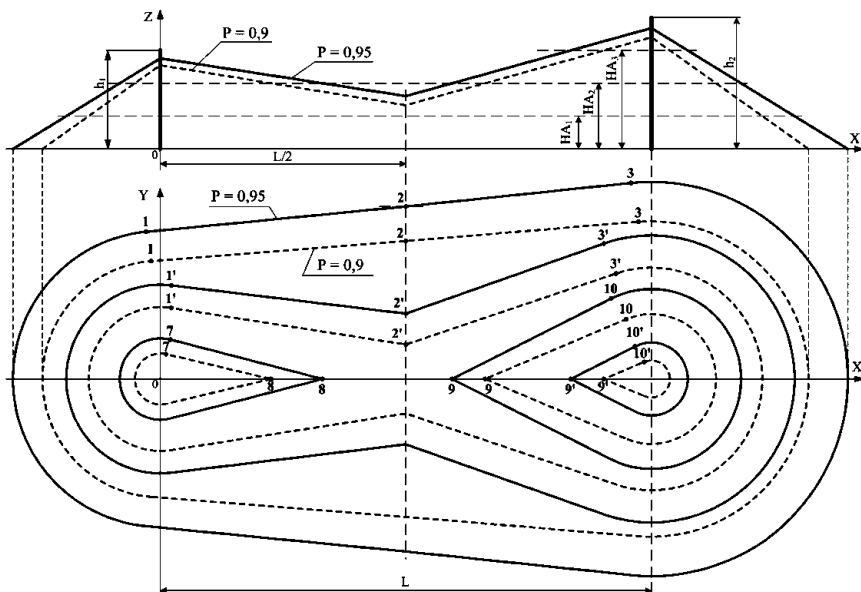


Рисунок 6 – Сравнение зон защиты ДРМ для надежностей защиты  $P = 0,9$  и  $P = 0,95$

Для проверки выведенных соотношений и анализа зоны защиты ДРМ была разработана компьютерная программа в среде электронных таблиц Microsoft Excel с использованием приложения Visual Basic for Applications, которая позволяет определить основные параметры зоны защиты ДРМ, координаты концевых точек на заданных высотах анализа и выдает полученные результаты (границы зоны защиты) в графическом виде.

Как указывалось выше, габаритные размеры торцевых областей зоны защиты ДРМ определяются исходя из параметров зоны защиты одиночных стержневых молниеотводов. Анализ параметров зоны защиты одиночных стержневых молниеотводов по материалам РД и ДСТУ (см. табл. 1 и табл. 2) показывает, что при одной и той же степени надежности (терминология РД) (надежности защиты (терминология ДСТУ)) зоны защиты имеют различные габаритные размеры (см. рис. 5). Объяснение этого факта отсутствует в известной авторам литературе и подлежит объяснению разработчиками ДСТУ, так как они ввели более жесткие нормы.

В связи с вышеизложенным было проведено сравнение зон защиты ДРМ, построенных для надежности защиты 0,9 и 0,95, которое приведено на рис. 6. Из приведенного сравнения видно, что сохраняется та же тенденция. И, как следствие, зона защиты более жесткого случая (при  $P = 0,95$ ) оказалась больше, чем менее жесткого (при  $P = 0,9$ ).

Так как существует множество объектов, спроектированных для надежно-

стей, приведенных в РД, а вновь введенный нормативный документ ДСТУ распространяется как на вновь строящиеся, так и на эксплуатируемые объекты, то возникает необходимость проверки их надежности защиты.

#### Выводы.

1. Разработана математическая модель для расчета зоны защиты ДРМ, необходимая для создания программного обеспечения, предусмотренного ДСТУ.
2. Показано, что в зависимости от соотношения между параметрами ДРМ изменяется форма и габариты его зоны защиты.
3. Приведены аналитические выражения для определения координат концевых точек, необходимых для построения зоны защиты ДРМ, которые были использованы для компьютерного моделирования молниезащищенности объектов.
4. На базе выведенных математических соотношений разработана программа, позволяющая производить построения зоны защиты ДРМ заданных параметров на четырех высотах анализа согласно РД и ДСТУ.
5. Проведенное сравнение зон защиты ДРМ, рассчитанных по РД и ДСТУ, выявило проблему преемственности этих нормативных документов. Это, в конечном итоге, не позволяет утверждать, что в настоящее время молниезащищенность какого-либо из объектов Украины отвечает требованиям нового нормативного документа (ДСТУ).

**Список литературы:** 1. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений: РД 34.21.122-87 / М-во энергетики и электрификации СССР. – Офиц. изд. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 56 с. 2. Улаштування блискавкозахисту будівель і споруд (IEC 62305:2006, NEQ): ДСТУ Б В.2.5-38:2008. – [Чинний від 2009–01–01]. – К.: Мінеріонбуд України, 2008. – 48 с. – (Національний стандарт України). 3. Методика аналізу молниезахищенності об'єктів при складному рельєфі поверхні зони захисту / С.В.Курпич, А.А.Петков, Д.Г.Колушико // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2008. – №21. – С. 66–78.

Поступила в редакцію 05.11.2009.

УДК 621.317.3

**В.В.КНЯЗЕВ**, канд.техн.наук, вед.науч.сотр., НТУ «ХПИ»;  
**В.И.КРАВЧЕНКО**, докт.техн.наук, профессор, НТУ «ХПИ»;  
**И.П.ЛЕСНОЙ**, зав.лаб., НТУ «ХПИ»;  
**Ю.С.НЕМЧЕНКО**, гл.метролог, НТУ «ХПИ»

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОКИХ ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ЭТАЛОНЕ-ТН

Описано метрологічне обладнання для атестації засобів вимірювання високих імпульсних напруг практично при реальних параметрах вимірюваних напруг. Наведена методика метрологічної атестації засобів вимірювання високих імпульсних напруг, а також експериментальні результати цієї процедури на макеті омичного дільника напруги на 300 кВ.