



МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ А.А. ЕЖЕВСКОГО»  
(ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ)

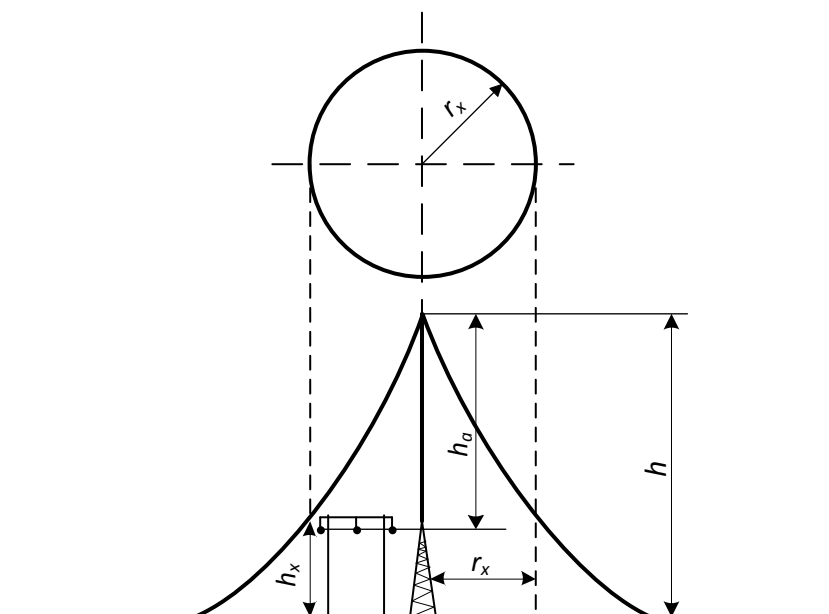
Энергетический факультет

Кафедра электроснабжения и электротехники

Подъячих С.В.

ЗАЩИТА ОТКРЫТОГО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА  
ПОДСТАНЦИИ ОТ ПРЯМЫХ УДАРОВ МОЛНИИ. РАСЧЕТ КОНТУРА  
ЗАЗЕМЛЕНИЯ ОРУ

Методические указания к расчетно-графической работе  
по дисциплине «Техника высоких напряжений» студентов  
(очного и заочного обучения) обучающихся по направлению подготовки  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника



Молодежный 2021

**УДК: 621.311.4**

ББК 31.16

Рецензент: д.т.н., доцент Алтухов И.В., профессор кафедры энергообеспечения и теплотехники ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ.

Защита открытого распределительного устройства подстанции от прямых ударов молнии. Расчет контура заземления ОРУ: методические указания к расчетно-графической работе / С.В. Подъячих. – Молодёжный: Издательство ФГБОУ ВО Иркутского ГАУ, 2021.- 21 С.

Методические указания к расчетно-графической работе по дисциплине «Техника высоких напряжений» предназначены для студентов (очного и заочного обучения) обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника. Включают в себя варианты для расчета, методику и пример выполнения расчетно-графического задания.

Методические указания рассмотрены и одобрены кафедрой электроснабжения и электротехники (протокол № 7 от 10.03.2021 г.).

Методические указания рекомендованы к печати методической комиссией энергетического факультета (протокол № 7 от 15.03.2021 г.).

© Подъячих С.В. 2021

© ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 2021

# ЗАЩИТА ОТКРЫТОГО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА (ОРУ) ПОДСТАНЦИИ ОТ ПРЯМЫХ УДАРОВ МОЛНИИ. РАСЧЕТ КОНТУРА ЗАЗЕМЛЕНИЯ ОРУ

*Исходные данные* (табл. 1 номер варианта соответствует номеру в ведомости): номинальное напряжение ОРУ ( $U_{\text{ном}}$ ); число ячеек ОРУ ( $n_{\text{я}}$ ); число воздушных линий электропередачи в схеме ОРУ ( $n_{\text{вл}}$ ); число ( $n_{\text{тр}}$ ) и тип грозозащитных тросов на линиях; длина пролета линии ( $l_{\text{п}}$ ); измеренное при средней влажности почвы удельное сопротивление грунта в районе расположения ОРУ ( $\rho_{\text{изм}}$ ); число грозовых часов за год в районе расположения подстанции ( $n_{\text{г}}$ ).

## Задание на расчет

1. Используя исходные данные, а также данные табл.2, начертить план и боковой разрез ОРУ, определить его основные размеры.

2. На территории ОРУ расставить молниеотводы для защиты электрооборудования от прямых ударов молнии. Определить необходимое число молниеотводов и рассчитать их высоту. На плане и боковом разрезе ОРУ показать границы зоны защиты молниеотводов.

3. С учетом сопротивления заземления естественных заземлителей (системы трос-опора воздушных линий) определить допустимую величину стационарного сопротивления заземления контура заземления ОРУ.

4. Определить параметры контура заземления (длину и число вертикальных электродов, шаг сетки), обеспечивающие допустимую величину его стационарного сопротивления заземления.

5. Подсчитать импульсное сопротивление заземления контура во время грозового сезона.

6. Определить число повреждений в год изоляции электрооборудования ОРУ от прямых ударов молнии в молниеотводы. Оценить, находится ли в допустимых пределах показатель надежности (число лет безаварийной работы электрооборудования) молниезащиты ОРУ. Указать, какие мероприятия могут улучшить этот показатель.

Вариант	$U_{\text{НОМ}},$ кВ	$n_{\text{я}}$	$n_{\text{вл}}$	$n_{\text{тр}}$	Тип троса	$l_{\text{п}},$ м	$\rho_{\text{ИЗМ}},$ Ом*м	$n_{\text{ч}},$ ч/ГОД
1.	110	14	7	1	С-50	200	150	45
2.	150	10	6	1	С-70	250	150	45
3.	220	10	4	2	С-85	300	150	45
4.	330	8	4	2	С-50	350	130	45
5.	110	7	4	1	С-85	220	130	40
6.	150	6	4	1	С-70	250	130	40
7.	220	12	7	2	С-50	220	160	40
8.	330	14	6	2	С-70	300	160	30
9.	110	10	5	1	С-85	200	160	30
10.	150	8	4	1	С-50	250	120	30
11.	220	6	4	2	С-70	300	120	50
12.	330	10	6	2	С-85	350	120	50
13.	110	7	4	1	С-50	200	140	50
14.	150	12	6	1	С-70	200	140	35
15.	220	8	4	2	С-50	250	140	35
16.	330	6	4	2	С-85	350	150	35
17.	110	10	5	1	С-70	180	150	50
18.	150	12	6	1	С-50	200	150	45
19.	220	14	7	2	С-70	250	160	40
20.	330	8	4	2	С-85	300	160	35
21.	110	6	4	1	С-50	200	160	30
22.	150	10	6	1	С-70	200	140	50
23.	220	7	4	2	С-50	220	140	35
24.	330	14	8	2	С-85	300	140	45
25.	110	8	4	1	С-70	180	130	40
26.	150	6	4	1	С-50	250	120	30
27.	220	8	4	2	С-70	300	120	50
28.	330	8	6	2	С-85	350	120	50
29.	110	8	4	1	С-50	200	140	50
30.	150	10	6	1	С-70	200	140	35
31.	220	12	7	2	С-70	250	160	40

Таблица 2

Размеры типового ОРУ выполненного по схеме: с двумя основными и третьей обходной системами шин

Размеры, м	Номинальное напряжение, кВ				
	110	150	220	330	500
А	8,0	11,5	11,75	18,0	29,0
Б	9,0	9,5	12,0	19,6	26,8
В	12,5	15,0	18,25	20,4	29,0
Г	10,5	16,0	20,5	31,5	45,0
Д	9,0	11,1	15,4	22,0	31,0
Е	2,5	3,0	4,0	8,0	11,0
Ж	2,0	2,55	3,7	4,0	5,5
З	7,5	8,0	11,0	11,0	14,5
И	11,0	13,0	16,5	16,5	23,6
к	3,0	4,25	4,0	4,5	6,0

### Пример выполнения

#### Исходные данные.

Номинальное напряжение: $U_{\text{НОМ}}$ , кВ	150
Число ячеек: $n_{\text{я}}$	12
Число воздушных линий: $n_{\text{ВЛ}}$	6
Число грозозащитных тросов: $n_{\text{ТР}}$	1
Тип грозозащитных тросов на линиях	С-70
Длина пролета линии: $l_{\text{п}}$ , м	250
Удельное сопротивление грунта: $\rho_{\text{ИЗМ}}$ , Ом·м	150
Число грозовых часов за год: $n_{\text{ч}}$ , ч/ГОД	45

## Расчётная часть

### 1. Определение размеров ОРУ.

По данным и на основе табл.2 [1] находим:

размеры ячейки: ширина – 11,1 м,

длина – 60,5 м;

размеры ОРУ: ширина –  $11,1 \times 12 = 133,2$  м,

длина – 60,5 м.

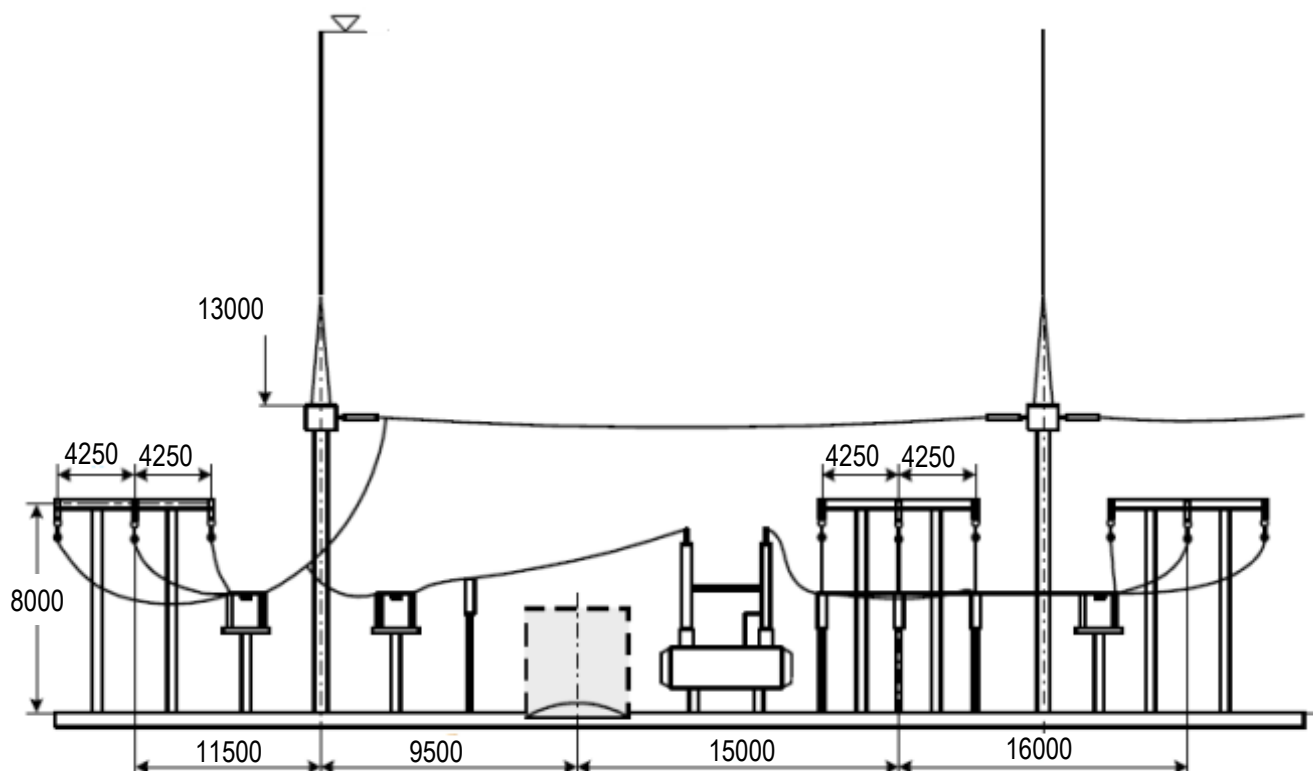


Рис. 1 Поперечный разрез ячейки ОРУ 150 кВ по присоединению блока.

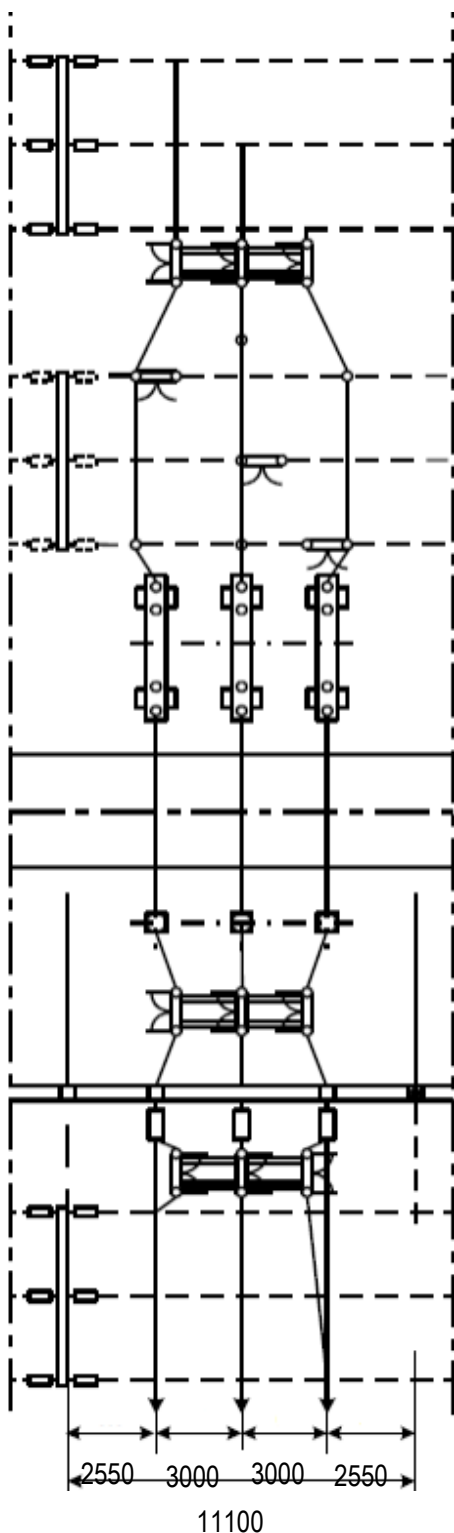


Рис.2 Схема заполнения ячейки ОРУ 150 кВ по отходящей линии.

**2. Выбор места установки и высоты молниеотводов. Расчет зон защиты молниеотводов.**

Молниеотводы должны обеспечивать зону защиты на высоте шинных порталов по всей территории ОРУ, также должны быть защищены линейные порталы.

Объекты высотой  $h_x$ , находящиеся внутри образуемого молниеотводами прямоугольника, защищены в том случае, если диагональ прямоугольника  $D$  удовлетворяет условию:

$$D \leq 8(h - h_x)p, \quad (1)$$

где  $h_x$  – высота защищаемого объекта, а внешняя часть зоны защиты определяется так же, как и зона защиты системы двух молниеотводов (рис. 5). Эффективность определенных таким способом зон защиты молниеотводов подтверждена длительным опытом эксплуатации и оценивается как 0,995

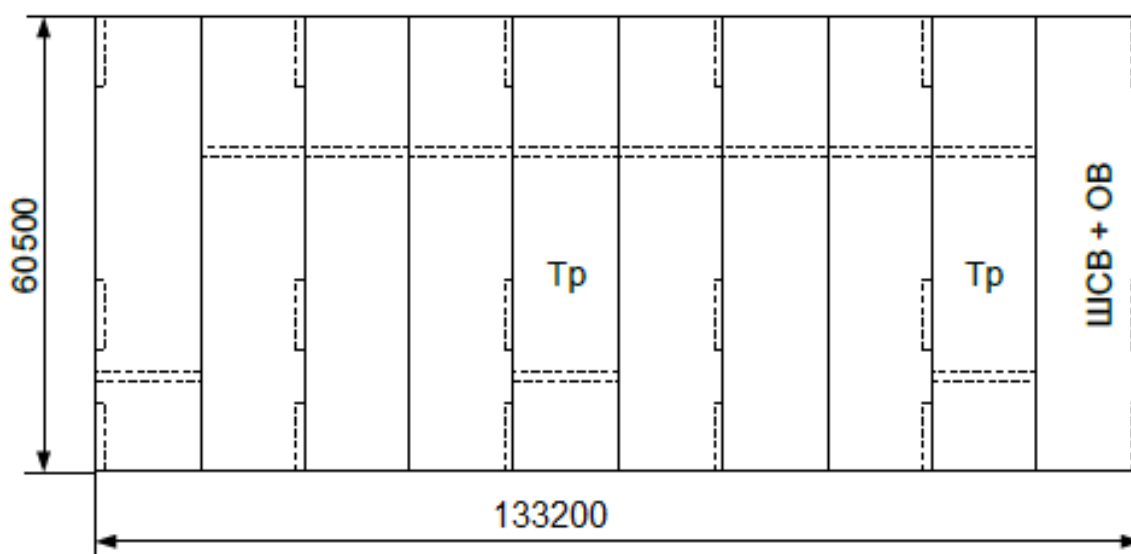


Рис.3 План открытого РУ 150 кВ.

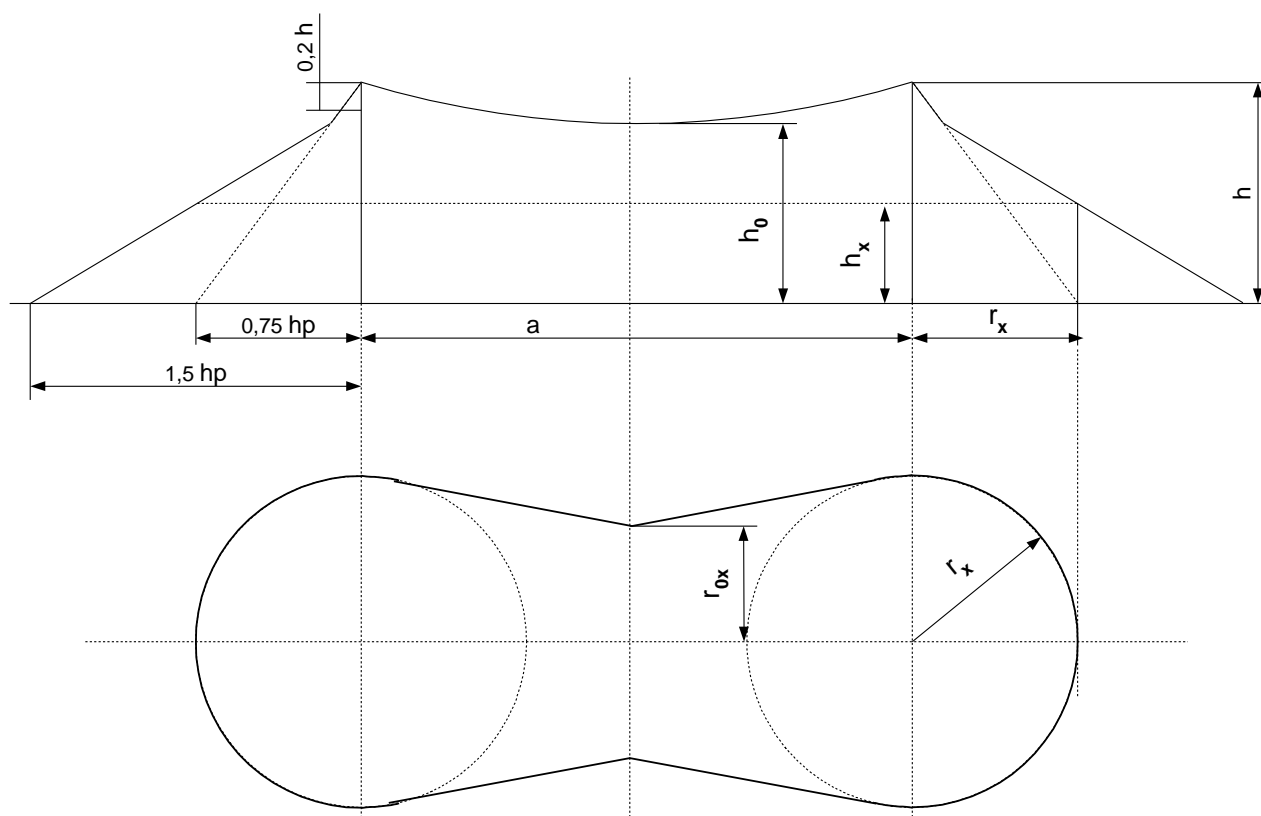


Рис.4. Построение зоны защиты двух стержневых молниеотводов.

$$r_x = 1,6ph \frac{h - h_x}{h + h_x} = 1,6p \frac{h - h_x}{1 + h_x/h}, \quad (2)$$



$$h_0 = h - \frac{a}{7p}, \quad (3)$$

$$r_{0x} = 1,6p \frac{h_0 - h_x}{1 + h_x/h_0}. \quad (4)$$

Для молниеотводов высотой 30 – 100 м вводится поправочный коэффициент  $p$ , учитывающий снижение защитного действия:

$$p = \sqrt{\frac{30}{h}}, \quad (5)$$

где  $h$  – высота молниеотвода, м. При  $h \leq 30$  м  $p = 1$ .

Минимально необходимую высоту молниеотводов ОРУ можно определить из следующих условий:

1. Исходя из формулы (1), при  $h_x = 13$  м (высота линейных порталов) и  $p = 1$ , высота молниеотводов составляет:

$$h = \frac{D}{8} + h_x = \frac{55,0}{8} + 13 = 19,88 \text{ м,}$$

$$D = \sqrt{(n \cdot d)^2 + (\delta + \epsilon + z/2)^2} = \sqrt{(4 \cdot 11,1)^2 + (9,5 + 15 + 0,5 \cdot 16)^2} = 55,0 \text{ м,}$$

где  $n$  – количество ячеек между молниеотводами.

2. Исходя из формул (3,4), при  $h_x = 8$  м (высота шинных порталов) и  $p = 1$ , высота молниеотводов составляет:

$$h_{0,2} = \frac{(h_x + 0,625r_{0x}) \pm \sqrt{(h_x + 0,625r_{0x})^2 + 2,5r_{0x}h_x}}{2},$$

$$h_{01} = 29,809 \approx 29,8 \text{ м; } h_{02} = -4,614 \approx -4,6 \text{ м;}$$

$$h = h_0 + \frac{a}{7p} = 29,8 + \frac{4 \cdot 11,1}{7 \cdot 1} = 36,15 \text{ м}$$

Из расчетов видно, что минимальная высота молниеотводов, обеспечивающая надежную защиту от ПУМ, должна составлять 36,15 м, это слишком большая высота, поэтому более рационально увеличить число молниеотводов. Расположим их через одну ячейку и пересчитаем.

$$h = \frac{D}{8} + h_x = \frac{39,4}{8} + 13 = 17,92 \text{ м,}$$

$$D = \sqrt{(n \cdot d)^2 + (\delta + \epsilon + z/2)^2} = \sqrt{(2 \cdot 11,1)^2 + (9,5 + 15 + 0,5 \cdot 16)^2} = 39,4 \text{ м,}$$

где  $n = 2$  – количество ячеек между молниеотводами.

При  $h_x = 8$  м (высота шинных порталов) и  $p = 1$ , высота молниеотводов составляет:

$$h_{0,2} = \frac{(h_x + 0,625r_{0x}) \pm \sqrt{(h_x + 0,625r_{0x})^2 + 2,5r_{0x}h_x}}{2},$$

$$h_{01} = 24,34 \approx 24,3 \text{ м; } h_{02} = -4,04 \approx -4,0 \text{ м;}$$

$$h = h_0 + \frac{a}{7p} = 24,3 + \frac{2 \cdot 11,1}{7 \cdot 1} = 27,5 \text{ м}$$

Из расчетов видно, что минимальная высота молниеотводов, обеспечивающая надежную защиту от ПУМ, должна составлять 27,5 м

Для проверки правильности выбранной высоты молниеотводов рассчитаем зону защиты одиночных молниеотвода на разных уровнях:

на уровне шинных порталов

$$r_x = 1,6p \frac{h - h_x}{1 + h_x/h} = 1,6 \cdot 1 \cdot \frac{27,5 - 8}{1 + 8/27,5} = 24,3 \text{ м,}$$

на уровне линейных порталов

$$r_x = 1,6p \frac{h - h_x}{1 + h_x/h} = 1,6 \cdot 1 \cdot \frac{27,5 - 13}{1 + 13/27,5} = 15,8 \text{ м.}$$

Далее рассчитаем зону защиты двухстержневых молниеотводов 1-2; 2-3; 4-5; 5-6:

расстояние между молниеотводами  $a = 2 \cdot 11,1 = 22,2$  м.

$$h_0 = h - \frac{a}{7p} = 27,5 - \frac{22,2}{7 \cdot 1} = 24,3 \text{ м.}$$

На уровне шинных порталов  $h_x = 8$  м,

$$r_{0x} = 1,6p \frac{h_0 - h_x}{1 + h_x/h_0} = 1,6 \cdot 1 \cdot \frac{24,3 - 8}{1 + 8/24,3} = 19,7 \text{ м,}$$

на уровне линейных порталов  $h_x = 13$  м,

$$r_{0,x} = 1,6p \frac{h_0 - h_x}{1 + h_x/h_0} = 1,6 \cdot 1 \cdot \frac{24,7 - 13}{1 + 13/24,7} = 11,8 \text{ м,}$$

Рассчитаем зону защиты двухстержневых молниеотводов 1-4; 2-5; 3-6.

Расстояние между молниеотводами:  $a = б + в + 0,5г = 11 + 9,5 + 0,5 \cdot 16 = 32,5$  м.

$$h_0 = h - \frac{a}{7p} = 27,5 - \frac{32,5}{7 \cdot 1} = 22,9 \text{ м,}$$

на уровне шинных порталов  $h_x = 8$  м,

$$r_{0,x} = 1,6p \frac{h_0 - h_x}{1 + h_x/h_0} = 1,6 \cdot 1 \cdot \frac{22,9 - 8}{1 + 8/22,9} = 17,6 \text{ м,}$$

на уровне линейных порталов:  $h_x = 13$  м,

$$r_{0,x} = 1,6p \frac{h_0 - h_x}{1 + h_x/h_0} = 1,6 \cdot 1 \cdot \frac{22,9 - 13}{1 + 13/22,9} = 10,1 \text{ м.}$$

выполненные расчеты показали, что территория ОРУ на высоте шинных и линейных порталов защищена от прямых ударов молнии с вероятностью 0,995.

На рис. 5 приведено расположение молниеотводов и зона защиты на двух уровнях, шинных и линейных порталов. Видно, что она закрывает всю площадь ОРУ.

Чтобы не загромождать схему, зона защиты на уровне линейных порталов показана сплошной.

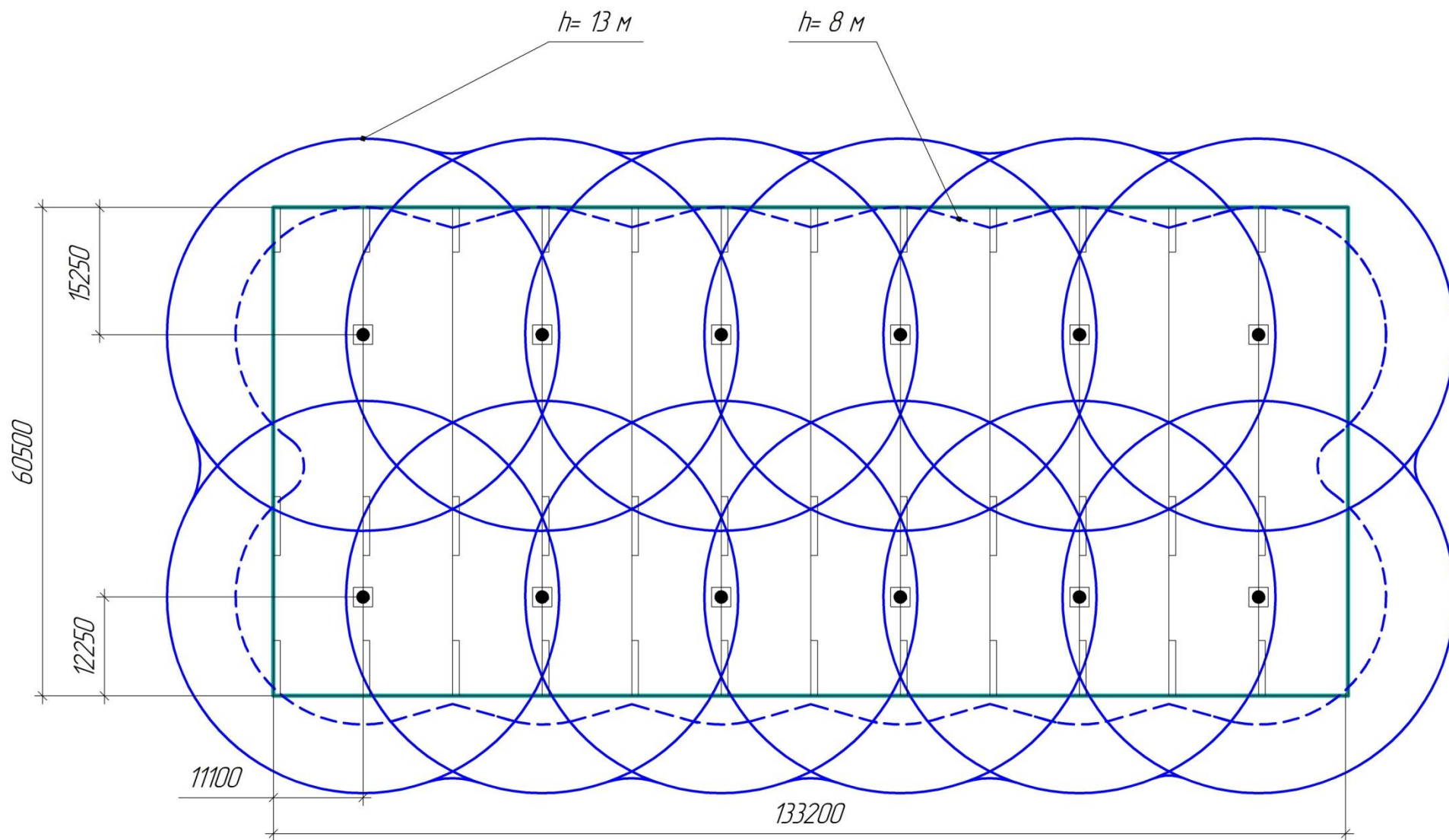


Рис. 5 Зона защиты ОРУ 150 кВ на высоте  $h = 13 \text{ м}$  и  $h = 8 \text{ м}$ .

### 3. Расчет заземляющего устройства и сопротивления заземления естественных заземлителей.

Согласно требованию ПУЭ сопротивление заземлителя опоры  $R_{оп}$  при удельном сопротивлении грунта  $100 < \rho_1 < 500$  Ом·м в любое время года должно быть меньше или равно 15 Ом.

Расчетное значение удельного сопротивления для слоя сезонных изменений:

$$\rho_{расч} = \rho_{изм} \cdot K_c, \quad (6)$$

где  $K_c$  - сезонный коэффициент.

В табл.1 приведены значения  $K_c$  для средней полосы России (II климатическая зона) при толщине слоя сезонных изменений  $H_c = 2$  м в условиях зимы (для расчета рабочих и защитных заземлителей) и в условиях грозового сезона “лето” (для расчета заземлений грозозащиты).

Таблица 1.

Значения сезонного коэффициента  $K_c$

Заземление	Влажность почвы перед измерением		
	повышенная	средняя	пониженная
Рабочее и защитное	5	2,7	1,9
Грозозащиты	2,6	1,4	–

Таким образом, расчетное значение удельного сопротивления:

летом:  $\rho_{расч} = \rho_{изм} \cdot K_c = 150 \cdot 1,4 = 210$  Ом·м,

зимой:  $\rho_{расч} = \rho_{изм} \cdot K_c = 150 \cdot 2,7 = 405$  Ом·м.

В целях улучшения растекания тока, заземлители закладываются в грунт на глубину 0,5 – 1 м и более (для вертикальных заземлителей это глубина закладки верхней кромки). Это связано с тем, что на глубине грунт в меньшей степени подвержен высыханию в жаркие летние месяцы года.

Выбираем заземлитель опоры в виде 2-х горизонтальных лучей и 3-х вертикальных электродов длиной 5м и диаметром 20 мм (рис. 6).

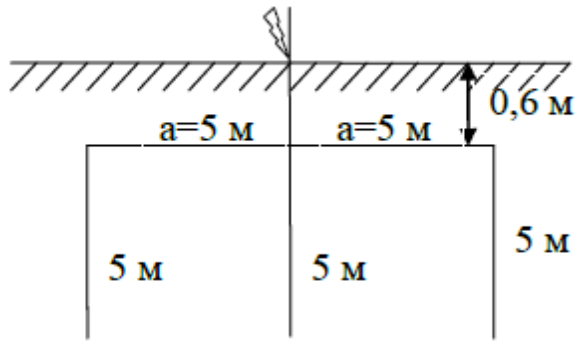


Рис.6 Сечение n-лучевого заземлителя опоры с вертикальными электродами.

Сопротивление n-лучевого заземлителя с вертикальными электродами рассчитывается по формуле

$$R_{\text{оп}} = A \cdot \Delta b \cdot \rho_3 / \ell_{\text{л}} \quad (7)$$

где  $A$  – коэффициент подобия зависящий от числа лучей и отношения диаметра к длине,  $\Delta b$  – коэффициент зависящий от отношений  $a/\ell_{\text{в}}$  и  $\ell_{\text{в}}/(n_{\text{в}} \cdot \ell_{\text{л}})$ :

$$a/\ell_{\text{в}} = 5/5 = 1; d_{\text{л}}/\ell_{\text{л}} = 20 \cdot 10^{-3}/5 = 4 \cdot 10^{-3}; n_{\text{л}} = 2, \text{ тогда } A = 0,75 \text{ (рис.3-13 [3]);}$$

$$\ell_{\text{в}}/(n_{\text{в}} \cdot \ell_{\text{л}}) = 5/(2 \cdot 5) = 0,5; a/\ell_{\text{л}} = 5/5 = 1, \text{ тогда } \Delta b = 0,42 \text{ (рис.3-16 [3]).}$$

Для лета:

$$R_{\text{оп}} = 0,75 \cdot 0,42 \cdot 210/5 = 13,23 < R_{\text{оп.доп}} = 15 \text{ Ом;}$$

для зимы  $R_{\text{оп}} = 0,75 \cdot 0,42 \cdot 405/5 = 25,5 > R_{\text{оп.доп}} = 15 \text{ Ом}$  – больше допустимого, поэтому увеличим число лучей до 4 горизонтальных и 4 вертикальных лучей.

Тогда  $a/\ell_{\text{в}} = 5/5 = 1; d_{\text{л}}/\ell_{\text{л}} = 20 \cdot 10^{-3}/5 = 4 \cdot 10^{-3}; n_{\text{л}} = 4$ , тогда  $A = 0,5$  (рис.3-13 [3]);

$$\ell_{\text{в}}/(n_{\text{в}} \cdot \ell_{\text{л}}) = 5/(4 \cdot 5) = 0,25; a/\ell_{\text{л}} = 5/5 = 1, \text{ тогда } \Delta b = 0,31 \text{ (рис.3-16 [3]).}$$

Для лета:

$$R_{\text{оп}} = 0,5 \cdot 0,31 \cdot 210/5 = 6,15 < R_{\text{оп.доп}} = 15 \text{ Ом;}$$

$$\text{для зимы } R_{\text{оп}} = 0,5 \cdot 0,31 \cdot 405/5 = 12,6 < R_{\text{оп.доп}} = 15 \text{ Ом.}$$

Рассчитаем далее активное сопротивление петли «трос – опора»:

$$R_{\text{тр-оп}} = \sqrt{\frac{1}{n_{\text{тр}}} \cdot R_{\text{оп}} \cdot l_{\text{пр}} \cdot R_{\text{тр.уд.}}} \quad (8)$$

где  $R_{\text{оп}}$  – сопротивление заземления опоры,

$\ell_{\text{оп}} = 0,25 \text{ км}$  – длина пролета линии,

$R_{\text{тр.уд.}} = 2,4 \text{ Ом/км}$  – удельное сопротивление троса С – 70

$n_{\text{тр}} = 1$  – число грозозащитных тросов на линиях.

Для лета:  $R_{\text{тр-оп}} = \sqrt{\frac{1}{1} \cdot 2,4 \cdot 0,25 \cdot 6,15} = 1,98 \text{ Ом},$

для зимы:  $R_{\text{тр-оп}} = \sqrt{\frac{1}{1} \cdot 2,4 \cdot 0,25 \cdot 12,55} = 2,74 \text{ Ом}.$

Сопротивление естественных заземлителей находится по формуле

$$R_{\text{ест}} = \frac{R_{\text{тр-оп}}}{n_{\text{вл}}} . \quad (9)$$

для лета:  $R_{\text{ест}} = \frac{R_{\text{тр-оп}}}{n_{\text{вл}}} = \frac{1,98}{6} = 0,33 < 0,5 \text{ Ом},$

для зимы:  $R_{\text{ест}} = \frac{R_{\text{тр-оп}}}{n_{\text{вл}}} = \frac{2,74}{6} = 0,46 < 0,5 \text{ Ом}.$

Из расчета видно, что достаточно использования только естественных заземлителей опор воздушных ЛЭП, для заземления ОРУ (подстанции), согласно требованию ПУЭ стационарное сопротивление заземлителей для подстанций 110 кВ и более должно быть  $R_{\text{з доп}} \leq 0,5 \text{ Ом}.$

#### ***4. Расчет заземляющего устройства и сопротивления заземления искусственных заземлителей.***

При достаточной густоте сетки, что характерно для современных подстанций,  $R$  практически не зависит от диаметра и глубины укладки электродов и подсчитывается по эмпирической формуле:

$$R_{\text{иск}} = \rho_{\text{э}} \left( \frac{A}{\sqrt{S}} + \frac{1}{L + n \cdot l_{\text{в}}} \right) , \quad (10)$$

где  $A$  – коэффициент, зависящий от значения  $\frac{l_{\text{в}}}{\sqrt{S}}$  ;

$L_{\text{г}}$ - суммарная длина всех горизонтальных заземляющих электродов (полос);  
 $n$  и  $l_{\text{в}}$  – число и длина вертикальных электродов;  $S$  – площадь, занимаемая заземлителем.

Длину вертикальных электродов рекомендуется брать в пределах 3–10 м. Устанавливаются они по периметру контура заземления в узлах сетки. Шаг сетки контура заземления рекомендуется принимать в пределах 5 – 10 м.

Горизонтальные электроды прокладываются на глубине 0,7 м. по периметру ОРУ и между ячейками.

Таким образом, длина горизонтальных электродов:

$$L = 2 \cdot 133,2 + 13 \cdot 60,5 = 1052,9 \text{ м,}$$

$$\sqrt{S} = \sqrt{60,5 \cdot 133,2} = 89,8 \text{ , где } S \text{ – площадь, занимаемая ОРУ,}$$

$$\rho_3 = K_c \cdot \rho_{\text{изм}} = 1,4 \cdot 150 = 210 \text{ Ом} \cdot \text{м, } \frac{l_B}{\sqrt{S}} = 0 \Rightarrow A = 0,44 \text{ [3].}$$

$$R_{\text{иск}} = \rho_3 \left( \frac{A}{\sqrt{S}} + \frac{1}{L + n \cdot l_B} \right) = 210 \cdot \left( \frac{0,44}{73,3} + \frac{1}{722,1} \right) = 1,23 \text{ Ом.}$$

Рассчитаем стационарное сопротивление заземления подстанции:

$$R_{\text{стан}} = \frac{R_{\text{ест}} \cdot R_{\text{иск}}}{R_{\text{ест}} + R_{\text{иск}}} = \frac{0,33 \cdot 1,23}{0,33 + 1,23} = 0,26 < 0,5 \text{ Ом.}$$

### **5. Расчет импульсного сопротивления заземляющего контура.**

Рассчитаем импульсное сопротивление заземляющего контура во время грозового сезона.

$$Z_{\text{и}} = \alpha_{\text{и}} \cdot R_{\text{иск}} \text{ ,} \quad (11)$$

где  $\alpha_{\text{и}}$  – импульсный коэффициент, который рассчитывается по формуле:

$$\alpha_{\text{и}} = \sqrt{\frac{1500 \cdot \sqrt{S}}{(\rho_3 + 320) \cdot (I_M + 45)}} = \sqrt{\frac{1500 \cdot 89,8}{(210 + 320) \cdot (15 + 45)}} = 2,06 \text{ ,} \quad (12)$$

где  $I_M = 15$  кА – среднестатистическое значение тока молнии для РТ.

$$Z_{\text{и}} = \alpha_{\text{и}} \cdot R_{\text{иск}} = 2,06 \cdot 1,23 = 2,5 \text{ Ом.}$$

### **6. Расчет грозоупорности ОРУ подстанции.**

Грозоупорность ОРУ – ожидаемое число лет безаварийной работы:

$$M = \frac{1}{\beta_1 + \beta_2 + \beta_3} \text{ ,} \quad (13)$$

где  $\beta_1$  – коэффициент, учитывающий вероятность прорыва молнии в зону защиты молниеотводов  $P_{\text{прор}} = 0,005$  (зона защиты молниеотводов рассчитывается с надежностью 0,995),

$\beta_3$  – коэффициент, учитывающий вероятность отключения подстанции из-за набегающих с ЛЭП волн грозовых перенапряжений. Обычно  $\beta_3 = 0$ , поскольку на



подстанции установлены защитные аппараты (ОПН, РВ), обеспечивающие 100% защиту от набегающих волн,

$\beta_2$  – коэффициент, учитывающий вероятность отключения подстанции из-за перекрытия с молниеотвода на ошиновку при протекании тока молнии через молниеотвод при прямом ударе молнии в молниеотвод.

$$\beta_2 = N_{уд} \cdot P_{откл} \cdot P_{прор}, \quad (14)$$

где  $P_{откл}$  – вероятность отключения подстанции,

$$P_{откл} = P_{пер} \cdot \eta, \quad (15)$$

где  $\eta$  – вероятность того, что возникшее перекрытие перейдет в устойчивое короткое замыкание  $\eta = 0,7$  при номинальном напряжении до 150 кВ [2],

$P_{пер}$  – вероятность перекрытия, определяется как вероятность появления тока молнии со значением:

$$I_M = \frac{U_{50\%}}{Z_{И} + \delta \cdot h_{П}}, \quad (16)$$

где  $\delta = 0,3$  – для линии с одним тросом,

$h_{П}$  – высота линейного портала,

$U_{50\%}$  – 50% импульсное разрядное напряжение для гирлянды изоляторов, определяется исходя из числа изоляторов в гирлянде.

Принимаем степень загрязненности атмосферы – II, тогда эффективная удельная длина пути утечки для РУ 150 кВ:

$$\lambda_{эф} = 1,5 \text{ см/кВ}, \quad [2, \text{табл.6-2.}]$$

Выбираем изолятор ПС 6 – А, имеющий параметры: [2, табл.6-1.]

$H = 130$  мм – строительная высота изолятора,

$D = 255$  мм – диаметр тарелки изолятора,

$L_y = 255$  мм – геометрическая длина пути утечки,

$K = 1$  – поправочный коэффициент.

Рассчитаем число изоляторов в гирлянде:

$$n = \frac{K \cdot \lambda_{\text{эф}} \cdot U_{\text{наиб.раб.}}}{L_y} + 2 = \frac{1 \cdot 1,8 \cdot 172}{25,5} + 2 = 14. \quad (17)$$

Принимаем число изоляторов в гирлянде  $n = 14$  шт.

Длина гирлянды составляет:  $l_r = H \cdot n = 0,13 \cdot 14 = 1,82$  м,

по рис. 6-8 [2] определяем  $U_{50\%} = 1100$  кВ,

$$I_M = \frac{U_{50\%}}{Z_{\text{и}} + \delta \cdot h_{\text{и}}} = \frac{1100}{2,5 + 0,3 \cdot 13} = 171,13 \text{ кА}. \quad (18)$$

Рассчитаем вероятность появления тока молнии 171,13 кА (эта вероятность является вероятностью перекрытия линейной изоляции)

$$P(I_M) = e^{\frac{-I_M}{26}} = e^{\frac{-171,13}{26}} = 0,00139, \quad (20)$$

$$P_{\text{откл}} = P_{\text{пер}} \cdot \eta = 0,00139 \cdot 0,7 = 0,00097$$

Число ударов молнии в молниеотводы ОРУ в год, при средней грозовой деятельности 45 ч/год:

$$\begin{aligned} N_{\text{уд}} &= [(A + 7h) \cdot (B + 7h)] \cdot 6,7 \cdot n_{\text{ч}} \cdot 10^{-8} = \\ &= [(133,2 + 7 \cdot 27,5)(60,5 + 7 \cdot 27,5)] \cdot 6,7 \cdot 45 \cdot 10^{-8} = 0,248, \text{ уд/год}, \end{aligned} \quad (21)$$

где  $A$  и  $B$  – длина и ширина подстанции,  $h$  – наибольшая высота молниеотвода.

Тогда:  $\beta_2 = N_{\text{уд}} \cdot P_{\text{откл}} = 0,248 \cdot 0,00097 = 0,000241$  .

$\beta_2 = N_{\text{уд}} \cdot P_{\text{прор}} = 0,248 \cdot 0,005 = 0,00124$

Ожидаемое число лет безаварийной работы:

$$M = \frac{1}{\beta_1 + \beta_2 + \beta_3} = \frac{1}{0,000241 + 0,00124 + 0} = 674,2 \text{ года}.$$

Такое значение числа лет безаварийной работы считается допустимым для подстанций напряжением до 150 кВ.

**Вывод** по результатам выполненных расчетов.

Из расчетов видно, что выбранное количество и месторасположение молниеотводов обеспечивает надежную защиту ОРУ от прямых ударов молнии.

Ожидаемое число лет безаварийной работы 674 года является хорошим показателем грозоупорности проектируемой подстанции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ларионов В. П. Основы молниезащиты. – М.: Знак, 1999.
2. Ларионов В.П. Аронов М.А. Молниезащита в электроэнергетике. – М.: Знак, 1999.
3. Правила устройства электроустановок.
4. Электротехнический справочник, т. 3, кн. 1, под общ. ред. профессоров МЭИ: И.Н. Орлова (гл. ред.) и др. – 7-е изд., испр. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
5. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. – СПб.: Издательство ДЕАН, 2005. – 64 с.

Составитель  
Подъячих Сергей Валерьевич

ЗАЩИТА ОТКРЫТОГО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА  
ПОДСТАНЦИИ ОТ ПРЯМЫХ УДАРОВ МОЛНИИ. РАСЧЕТ КОНТУРА  
ЗАЗЕМЛЕНИЯ ОРУ

Методические указания к расчетно-графической работе  
по дисциплине «Техника высоких напряжений» студентов  
(очного и заочного обучения) обучающихся по направлению подготовки  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Лицензия на издательскую деятельность  
ЛР №070444 от 11.03.1998 г.

Подписано в печать 18.06.2018 г.  
Формат 60×86/16  
Печ. л. 0,745  
Тираж 50 экз.

Издательство Иркутского государственного  
аграрного университета им. А.А. Ежевского  
664038, Иркутская область, Иркутский район,  
поселок Молодежный