

Министерство общего и профессионального образования Российской Федерации

Дальневосточный государственный технический университет

ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИИ

Учебное пособие к практическим занятиям для студентов специальностей электрические станции 1001 и электроснабжение промпредприятий 1004

Владивосток

1999

Одобрено научно-методическим Советом университета

УДК 621. 316. 98. 027.3.048 (075.8).015.3

Задачи и методические указания предназначены для студентов специальностей электрические станции 1001 и электроснабжение промышленных предприятий 1004, изучающих курсы Электроизоляция и перенапряжения и Техника высоких напряжений.

Учебное пособие может быть использовано при выполнении курсовых и дипломных проектов, тематика которых связана с расчетом и проектированием грозозащиты распределительных устройств, линий электропередач и промышленных зданий и сооружений, а также заземляющих устройств для них.

Учебное пособие составлено на кафедре электроэнергетики доцентом В.Н. Лифановым.

Методические указания печатаются с оригинал-макета, подготовленного автором

Корректор В.В.Сизова

Технический редактор И.Д.Стукалова

ЛР № от г.

Подписано в печать г. Фолрмат 60x84/16.

Печать оцветная. Усл. печ. л. , Уч.- изд. л. 0.9.

Тираж 100 экз. Заказ . Цена “С”.

Отпечатано в типографии издательства ДВГТУ

Владивосток, ул, Пушкинская, 10

о Из-во ДВГТУ. 1999

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее пособие предназначено для выполнения практических занятий по курсу Техника высоких напряжений электроэнергетических специальностей 1001 и 1004.

При выполнении заданий необходимо использовать теоретические разделы курсов : Электрическая часть станций и подстанций, Электро-изоляция и перенапряжения, Теоретические основы электротехники, Электромагнитные переходные процессы, Электрические сети и системы.

Содержание пособия предусматривает изучение физической картины развития короны, перенапряжений и растекания тока молнии в земле на электрооборудовании ЛЭП и распредустройств.

Решение задач позволит приобрести студенту практические навыки анализа коронного явления на проводах, переходного процесса в силовых трансформаторах и линиях электропередачи, а также проектирования грозозащиты электрооборудования на распредустройствах и ЛЭП.

Вопросы самоконтроля охватывают объем теоретического материала для решения задач.

ВОПРОСЫ САМОКОНТРОЛЯ

1. Вид разряда не разрушающий изоляцию промежутка и от чего он зависит.

2. Вид ионизации для промежутков положительный стержень - отрицательная плоскость и отрицательный стержень положительная плоскость. Явление обратное процессу ионизации.
3. Объясните увеличение U_p при снижении давления в газовом промежутке и при увеличении давления в маслonaполненном кабеле, используя закон Пашена в равномерном промежутке.
4. Причина образования стримера и объяснить различную электрическую прочность промежутков по п.2, где формируются стример-анод и стример-катод соответственно.
5. Предложите способ оценки (выбора) изоляционного промежутка на ЛЭП переменного тока между проводом и опорой и дайте мероприятия исключающие общую и местную корону на проводе.
6. Причина образования лидера в длинном промежутке и физическое объяснение явлению грома в разряде молнии.
7. Приведите мероприятия по увеличению напряжения перекрытия для проходного маслonaполненного с фибровой втулкой изолятора, не изменяя его габарита, и схему замещения изоляции для оценки емкости между фланцем и шиной.
8. Приведите математическое выражение для формы экрана в опорном изоляторе, когда увеличивается напряжение перекрытия его.
9. Рассчитать ток через первый изолятор у провода двумя способами в гирлянде из двух изоляторов, если напряжение на проводе $U_n = 35 \text{ кВ}$ (110, 220), собственная емкость изолятора $C = 70 \text{ пФ}$ (75, 80), емкость относительно провода $C_n = 0,5 \text{ пФ}$ (1,0; 1,5), емкость относительно земли $C_3 = 1,5 \text{ пФ}$ (2,5; 5,0).
10. Устройство, назначение и принцип действия стержневых и тросовых молниеотводов, их зоны защиты.

11. Устройство, назначение и принцип действия защитных разрядников и заземлители и их характеристики.
12. Дайте понятие точке возмущения и узловой точке в электрической цепи ЛЭП и распределительных устройств при перенапряжениях.
13. Назначение устройств колец, экранов и слоистых обмоток внутри силовых трансформаторов.
14. Схемы замещения обмотки трансформатора в зависимости от формы падающей волны перенапряжения.
15. Принцип составления электрических схем грозозащиты электрооборудования ЛЭП и распределительных устройств.

ЗАДАНИЕ 1

ЗАДАЧА. Найти напряженность электрического поля при короне на линии электропередачи (ЛЭП) по данным табл. 1.2.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТА. 1. По формулам табл. 1.1 найти эквивалентный радиус расщепления проводов.

Таблица 1.1

Значение коэффициентов β и k и эквивалентного радиуса $r_э$ для фазы

Число проводов в фазе, n	2	3	4
Коэффициент β	2	$\frac{2\sqrt{3}}{3}$	$\frac{3\sqrt{2}}{4}$
Коэффициент k	$1 + 2 (r_0/\alpha)$	$1 + 2\sqrt{3}(r_0/\alpha)$	$1 + 3\sqrt{2}(r_0/\alpha)$
Эквивалентный радиус, $r_э$	$\sqrt{r_0 \alpha}$	$\sqrt[3]{r_0 \alpha^2}$	$\sqrt[4]{\sqrt{2}(r_0 \alpha^3)}$

Примечание: r_0 - радиус провода; α - шаг расщепления фазы

2. Для заданной системы проводов вычислить потенциальные коэффициенты α . Причем α_{kk} называют собственными потенциальными коэффициентами k -го провода. Потенциальный коэффициент α_{ik} ($i \neq k$) определяет составляющую потенциала k -го провода, создаваемую зарядом i -го провода, α_{ik} взаимные потенциальные коэффициенты проводов i и k . Коэффициенты α вычисляют

$$\alpha_{kk} = 0,018 \cdot \ln(2 h_k / r_k), \text{М/пФ} ; \alpha_{ik} = 0,018 \cdot \ln(D_{ik} / d_{ik}), \text{М/пФ}, (1.1)$$

где размеры обозначены по рис .1.1, а $h_{cp} = h_k - 2f/3$, здесь f - стрела подвеса провода.

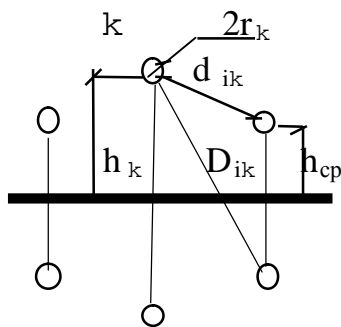


Рис.1.1. Система проводов и их зеркальных изображений

$$\begin{aligned} \beta_{22} &= \frac{\alpha_{11} \cdot \alpha_{33} - \alpha_{13}^2}{\Delta} ; & \beta_{23} = \beta_{32} &= \frac{\alpha_{31} \cdot \alpha_{21} - \alpha_{23} \cdot \alpha_{11}}{\Delta} ; \\ \beta_{33} &= \frac{\alpha_{11} \cdot \alpha_{22} - \alpha_{12}^2}{\Delta} ; & \beta_{31} = \beta_{13} &= \frac{\alpha_{12} \cdot \alpha_{23} - \alpha_{21} \cdot \alpha_{22}}{\Delta}, \end{aligned} (1.3)$$

где определитель $\Delta = \alpha_{11} \cdot \alpha_{22} \cdot \alpha_{33} - \alpha_{11} \cdot \alpha_{23}^2 - \alpha_{22} \cdot \alpha_{31}^2 - \alpha_{33} \cdot \alpha_{12}^2 + 2 \cdot \alpha_{12} \cdot \alpha_{23} \cdot \alpha_{31}$. Здесь перестановка индексов у коэффициентов α и β подчинена циклической закономерности в прямом и обратном направлении 1 - 2 - 3 - 1.

4. Определить рабочие емкости проводов трехфазной линии по формулам (1.4) при симметрии векторов в момент времени t , когда ось действительная

совпадает с направлением вектора напряжения U_1 , тогда напряжение в фазе 1 максимально и равно U , а в фазах 2 и 3 - $0,5U$. Таким образом, средняя фаза C_1 обладает большей напряженностью, а $C_2 = C_3$.

$$\begin{aligned} C_1 &= g_1 / U = \beta_{11} - (\beta_{12} + \beta_{13}) / 2; \\ C_2 &= g_2 / U = \beta_{22} - (\beta_{21} + \beta_{23}) / 2; \\ C_3 &= g_3 / U = \beta_{33} - (\beta_{31} + \beta_{32}) / 2. \end{aligned} \quad (1.4)$$

5. По заданным напряжениям полюсов или фаз и известным рабочим емкостям вычислить удельные заряды проводов. При этом амплитуда фазного напряжения находится

$$U_{\phi} = U_{\text{раб max}} \cdot \sqrt{3}, \quad (1.5)$$

где $U_{\text{раб max}}^{220} = 1,15 \cdot U_H$; $U_{\text{раб max}}^{330} = 1,1 \cdot U_H$; $U_{\text{раб max}}^{500,750} = 1,05 \cdot U_H$.

Тогда соответственно удельные заряды на проводах

$$q_1 = C_1 \cdot U_{\phi}; \quad q_2 = q_3 = C_2 \cdot U_{\phi}. \quad (1.6)$$

6. Вычислить средние напряженности на поверхности расщепленных проводов по формулам

$$E_{1cp} = 0,018 \cdot q_1 / (n \cdot r_o); \quad E_{2cp} = E_{3cp} = 0,018 \cdot q_2 / (n \cdot r_o), \quad (1.7)$$

где n - число проводов в фазе.

7. По формулам табл.1.1 вычислить максимальные напряженности на поверхности проводов по зависимости

$$E_{\max} = k \cdot E_{\text{ср}}, \quad (1.8)$$

где k - по табл. 1.1 для двух, трех и четырех проводов в фазе.

8. Рассчитать приближенно напряженность поля на поверхности провода трехфазной линии

$$E_{\max} = k \cdot E_{\phi} = 0,018 \cdot k \cdot C_p \cdot U_{\phi} / (n \cdot r_o), \text{ В/см}, \quad (1.9)$$

где рабочая емкость проводов $C_p = 0,24 \cdot 10^5 / \lg (D_o/r_o)$, пФ/м, где $D_o = d$;

r_o и k определяются по табл.1.1, а на среднем проводе E_{\max} найденное по (1.9) повышается на 7%.

9. Находят значение критической напряженности коронного разряда на проводе заданной ЛЭП по зависимости

$$E_{\text{кр}} = 23,3 \cdot m \cdot \delta (1 + (0,62 / (r_o^{0,32} \cdot \delta^{0,3}))), \text{ кВ/см}, \quad (1.10)$$

где m - коэффициент гладкости провода от 0,6 до 0,85; $\delta = 1,013$; r_o - эффективный радиус провода.

10. По сравнению результатов E_{\max} и $E_{\text{кр}}$ ответить есть корона на проводе ЛЭП или нет, если есть, то дать рекомендации по исключению общей короны на проводах. Ответить о зависимости местной короны на линии электропередачи и как в эксплуатации она исключается.

11.

Таблица 1.2

Варианты исходных данных

№п /п	U _н , кВ	Тип провода	r _о , см	α, см	d, м	h _к , м	f, м
1	220	1хАСО-300	1,28	-	5,25	8,5	1,5
2	220	1хАСО-500	1,51	-	5,25	12,5	1,5

3	330	2хАСО-300	1,28	40,0	7,5	22,0	2,0
---	-----	-----------	------	------	-----	------	-----

Продолжение табл.1.2

4	330	2хАСО-400	1,36	50,0	7,5	21,0	2,0
5	500	2хАСО-400	1,36	40,0	12,0	23,0	2,0
6	500	2хАСО-500	1,51	50,0	13,0	22,0	2,0
7	500	3хАСУ-185	0,92	40,0	12,6	23,5	2,0
8	750	3хАСУ-300	1,28	50,0	17,8	22,5	2,0
9	750	4хАСО-600	1,66	60,0	19,8	25,0	2,5
0	750	5хАСУ-400	1,45	50,0	17,5	23,5	2,5

9. Литература

Долгинов А.И. Техника высоких напряжений в электроэнергетики.

- М.: Энергия,1968. - 468 с.

ЗАДАНИЕ 2

ЗАДАЧА. Рассчитать и построить в координатах ($U, x/l$) огибающую максимальных градиентов вдоль обмотки двухобмоточного трансформатора при попадании на ввод его электромагнитной волны перенапряжения с прямоугольным фронтом и амплитудой U_0 . Обмотка трансформатора имеет n катушек, емкость каждой катушки относительно корпуса ΔC и между катушками ΔK по всей единичной длине l обмотки (схема замещения обмотки трансформатора только по емкостям справедлива, когда на вход ее попадает крутая форма напряжения). В расчете свободной составляющей распределенного напряжения учесть первые три гармоники, амплитуды которых определяются по формулам:

для трансформатора с заземленной нейтралью

$$A_k = U_o / (\pi \cdot k \cdot (1 + (1/\alpha_1) \cdot (k \cdot \pi)^2 / 2)); \quad (2.1)$$

для трансформатора с изолированной нейтралью

$$A_k = 4 \cdot U_o / ((2 \cdot k - 1) \cdot \pi \cdot (1 + (1/\alpha_1) \cdot ((2 \cdot k - 1) \cdot \pi)^2 / 2)), \quad (2.2)$$

где k - натуральный ряд чисел; в (2.1) k - номер гармоники; в (2.2) $(2 \cdot k - 1)$ - номер гармоники.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТА. 1. Найти коэффициент α_1 по параметрам обмотки из табл.2.1.

$$\alpha_1 = \sqrt{C/K} = \sqrt{(\Delta C_n / \Delta K \cdot n) \cdot l^2}. \quad (2/3)$$

2. Построить начальное распределенное напряжение для схемы замещения обмотки трансформатора, принимая значение переменной величины $x/l = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0$ для выражения

$$U_{\text{нач}} = U_o \cdot e^{-\alpha_1 \cdot (x/l)}. \quad (2.4)$$

3. Построить функцию напряжения в установившемся режиме для схемы замещения согласно режима нейтрали и переменной величины x/l .

4. Рассчитать амплитуду гармоники A_k , построить свободную составляющую распределенного напряжения $U_{\text{св1}}$ в координатах x/l с учетом того, что если потенциалы в начале и в конце обмотки фиксированы (заземленная нейтраль), то имеем узлы высших гармоник в этих местах обмотки и целое число полуволн по всей ее длине; если потенциал фиксирован в начале обмотки и неопределен в конце (изолированная нейтраль), то имеем узел высших гармоник в начале и пучок их в конце обмотки и поэтому целое число четверть-волны на-

пряжений по всей длине обмотки. Рассчитать первые три гармоники для любого режима нейтрали. Проверить полученную огибающую свободной составляющей напряжения путем разности амплитуд напряжений начального распределения и установившегося

$$U_{св2} = U_{нач} - U_{уст.} \quad (2.6)$$

Если $U_{св1}$ и $U_{св2}$ отличаются друг от друга на 10% и более, то изменить основные параметры ΔC уменьшить в 2 -5 раз, а ΔK увеличить в 2 -3 раза и повторить расчет по п.п.2,4

5. Построить максимальную огибающую распределенного напряжения U_{max} по обмотке трансформатора как сумму векторов по абсолютной величине свободной составляющей и установившейся

$$U_{max} = 1U_{св1} + 1U_{уст1} \quad (2.6)$$

6. Сделать заключение по распределению U_{max} , где в начале или в конце обмотки трансформатора необходимо усилить изоляцию, чтобы исключить пробой ее от набегающей волны перенапряжения и предложить мероприятия.

7. Таблица 2.1

Варианты исходных данных

№ п/п	U _о , кВ	п, шт.	ΔC, пФ	ΔK, пФ	Режим нейтрали
1	100	10	10	400	заземл.и изолир.
2	150	15	15	750	-“-
3	200	20	20	800	-“-
4	250	25	25	900	-“-

5	300	30	30	1000	-“-
---	-----	----	----	------	-----

Продолжение табл.2.1

6	400	40	10	1000	-“-
7	500	50	15	900	-“-
8	600	60	20	800	-“-
9	700	70	25	750	-“-
0	1000	80	30	600	-“-

8. Литература

1. Техника высоких напряжений./ Л.Ф.Дмоховская, В.П.Ларионов, В.В.Базуткин и др.// Под ред. Д.В.Разевига. - М.: Энергия.1976, с.265-262.
2. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений./ Под ред. В.П. Ларионова. - М.: ЭАИ.1986,с.337-347.
3. Лифанов В.Н. Электроизоляция и перенапряжения./ Учебн. пособие. Вл-к. ДВГТУ, 1995, с. 51-73.

ЗАДАНИЕ 3

ЗАДАЧА. Рассчитать и построить зону защиты для ОРУ 110 (220, 500) кВ от прямых ударов молнии (ПУМ). Молниеотводы расположить на порталах шинпровода и отдельно стоящие согласно разработанного ОРУ в дипломном проекте (вид с верху по ячейкам трансформатора и линий электропередач). Размеры по периметру ОРУ привести.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ. Зона защиты молниеотводов зависит от высоты ориентировки молнии H - это расстояние между головкой лидера, развивающегося канала молнии, до земли, где начинается

сказываться влияние молниеотвода или объекта. Начиная с $H = 300$ м при высоте молниеотвода $h \leq 30$ м формируется 100 % зона ориентации молнии в виде параболоида вращения с основанием радиуса $R \leq 3,5h$. Защитное действие молниеотводов оценивается зависимостью вероятности Ψ поражения объекта от соотношения геометрических размеров: расстояния между молниеотводами α и высотой объекта h_x по рис.3.1.

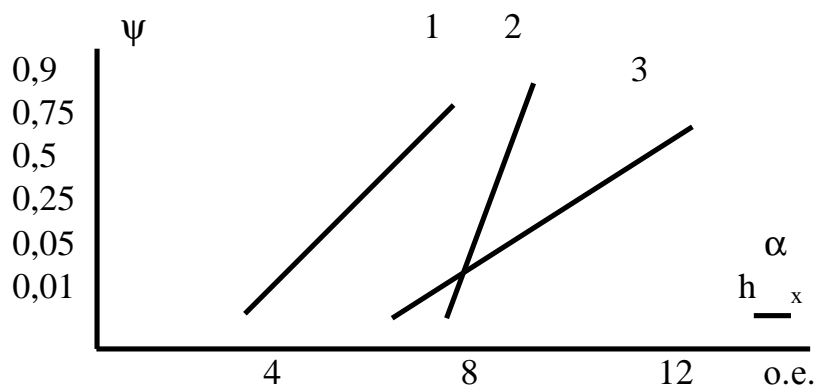


Рис. 3.1. Зависимость вероятности поражения объекта от параметров на вероятностной бумаге

Надежность молниезащиты объекта на высоте h_x может быть оценена вероятностным числом поражений его в течение года

$$n_o = n \cdot \Psi, \quad (3.1)$$

где n_o - число поражений молнией объекта из общего n числа ударов молнии в году.

Следовательно, $\Psi = 0,01$ означает, что возможно одно поражение объекта из 100 ударов молнии.

Расчет зоны защиты для двух молниеотводов одинаковой высоты выполняется по рис.3.2. Если $\alpha = 2R = 7h$ - расстояние между молниеотводами, то поверхность между ними не будет поражаться молнией. Объект в точке между

молниеотводами на высоте h_o может быть защищен молниеотводами высотой h и установленными на расстоянии

$$\alpha \leq 7 \cdot (h - h_o) \cdot p \text{ или } h_o = h - \alpha / 7p, \quad (3.2)$$

где $p = 1$ при $h \leq 30$ м ; $p = \sqrt{30/h} = 5,5 \sqrt{h}$ при $h = 30 - 100$ м.

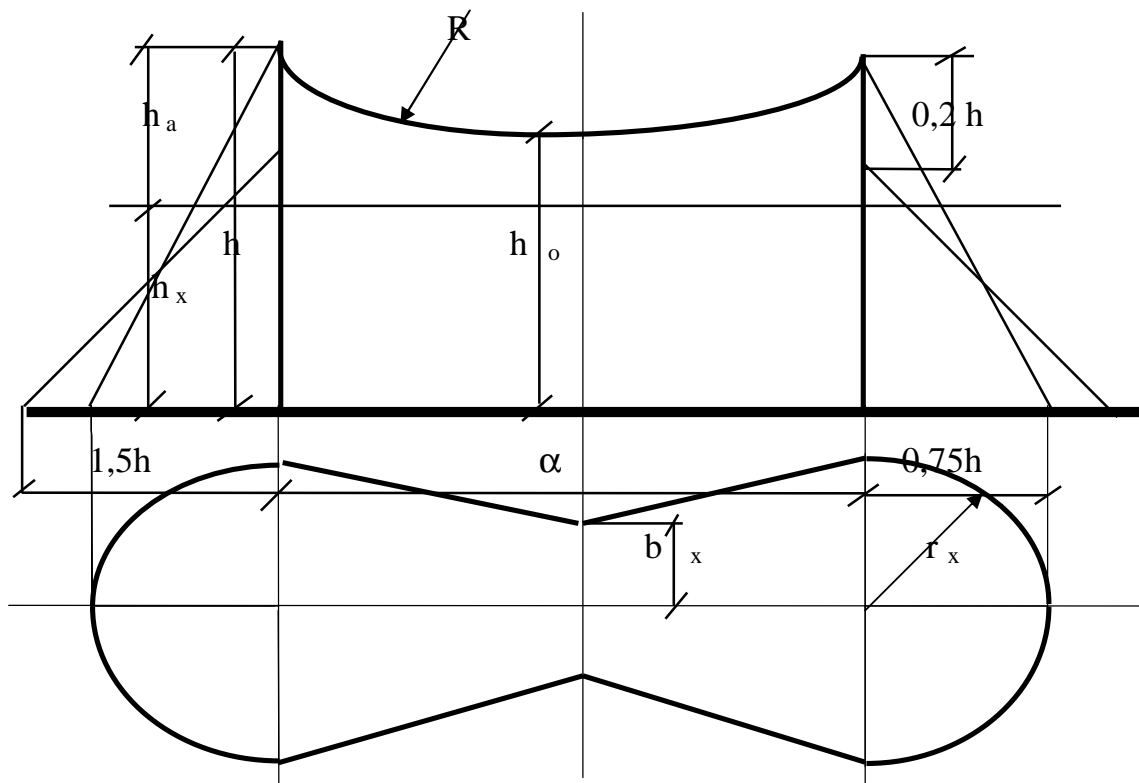


Рис.3.2. Зона защиты двух стержневых молниеотводов

Расчет зоны защиты молниеотводов сводится к построению пространства вблизи их. Радиус зоны защиты r_x на высоте h_x (высота защищаемого высоковольтного оборудования) рассчитывается выражением

$$r_x = (h - h_x) \cdot 1,6 \cdot p / (1 + h_x / h) = h_a \cdot p \cdot 1,6 / (1 + h_x / h). \quad (3.3)$$

Ширина защитной зоны b_x для объекта посередине между молниеотводами на высоте h_x может быть найдена по зависимости

$$b_x = 1,5 h_0 \cdot (1 - h_x / (0,8 \cdot h_0)). \quad (3.4)$$

Объекты открытых распределительных устройств станций и подстанций, которые располагаются на большой территории, защищают несколькими молниеотводами. В этом случае внешняя часть зоны защиты определяется как зона защиты двух молниеотводов. Внутренняя часть зоны защиты нескольких молниеотводов не строится. Объект высотой h_x , находящийся внутри треугольника или прямоугольника, образуемого молниеотводами будет защищен в том случае, если диаметр окружности, проходящей через вершины молниеотводов или диагональ прямоугольника, в углах которого находятся молниеотводы, не будет больше по приведенному неравенству на высоте h_x

$$D \leq 8 \cdot p \cdot (h - h_x). \quad (3.5)$$

Для двух молниеотводов разной высоты рис.3.3 сначала строится зона защиты одного молниеотвода Mh_1 большей высоты, затем через вершину молниеотвода Mh_2 проводят горизонталь до пересечения с зоной защиты Mh_1 , считая, что вершина некоторого фиктивного молниеотвода Mh_3 совпадает с этой точкой пересечения. Затем для молниеотводов Mh_2 и Mh_3 одинаковой высоты строится зона защиты на расстоянии α .



Для одиночного молниеотвода, если $h_x \leq 2h / 3$, то радиус зоны $r_x = 1,5 h \cdot (h - h_x / (0,8 \cdot h))$, если $h_x \geq 2h / 3$, то $r_x = 0,75 h \cdot (1 - h / h_x)$

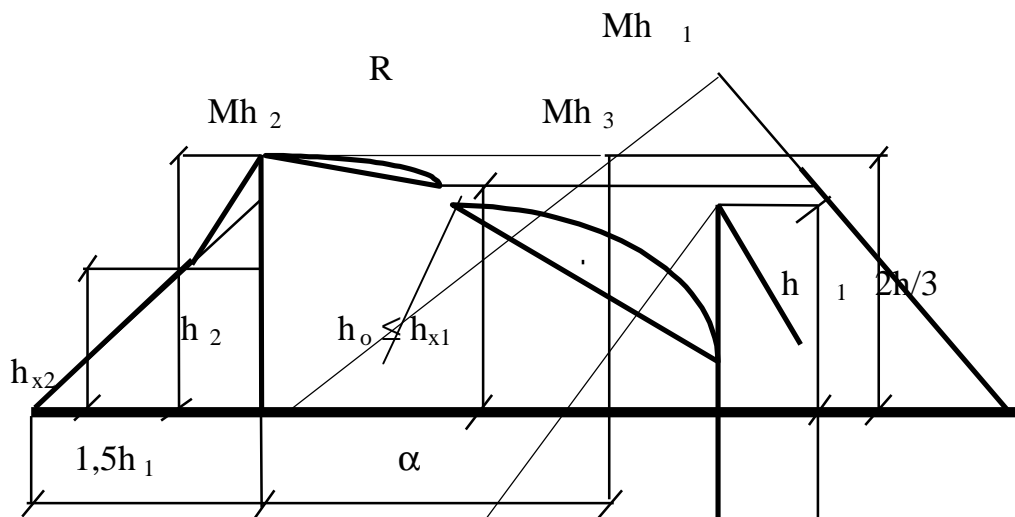


Рис.3.3. Зона защиты двух молниеотводов разной высоты

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАНИЯ. Рассчитать и построить зону грозозащиты ОРУ 110 кВ подстанции с двумя системами шин.

Молниеотводы расположены на порталах высотой 11 м по рис.3.4, порталы первой и второй системы шин высотой 8,2 м. Построение зоны защиты начинают с проведения окружности через вершины молние-отводов М1-М3-М4 диаметром $D = 50$ м (затем 55м, 60 м). При этом полная защищенность площади треугольника 1-3-4 подчиняется неравенству (3.5), по которому минимальная активная высота молниеотводов должна быть $h_a = D / 8 = 50 / 8 = 6,3$ м, а для М1-М2-М4 - $h_a = 60 / 8 = 7,5$ м, для

12

М2-М4-М5 - $h_a = 55 / 8 = 6,9$ м. В прямоугольнике М3-М4-М6-М7 - $h_a = \alpha / 8 = 51 / 8 = 6,4$, а в прямоугольнике М4-М5-М7-М8 - $h_a = 57 / 8 = 7,2$ м. Для всех молниеотводов можно принять $h_a = 7,5$ м.

ниеотводами М1-М3 и М2-М5. Тогда радиус основной зоны защиты молниеотводов высотой $h = 18,5$ м на уровне высоты порталов $h_x = 8,2$ м выразится

$$r_x = 1,5 \cdot h \cdot (1 - h_x / (0,8 \cdot h)) = 1,5 \cdot 18,5 \cdot (1 - 8,2 / (0,8 \cdot 18,5)) = 12,6 \text{ м.}$$

Максимальная высота зоны защиты посередине между молниеотводами М1-М3 и М2-М5 оценится $h_o = h - \alpha / 7 = 18,5 - 43 / 7 = 12,3$ м.

Ширина зоны защиты на уровне $h_x = 8,2$ м будет

13

$$b_x = 1,5 \cdot h_o \cdot (1 - h_x / (0,8 \cdot h_o)) = 1,5 \cdot 12,3 \cdot (1 - 8,2 / (0,8 \cdot 12,3)) = 3 \text{ м.}$$

Построением зоны защиты охватываются порталы на уровне высоты $h_x = 8,2$ м, а между молниеотводами М6-М7-М8 строится зона защиты на уровне $h_x = 11$ м.

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЯ. 1. Задание на дипломное проектирование КЭС, ТЭЦ или ГРЭС, а именно планы ОРУ 110 кВ, 220 кВ или 500 кВ, их размеры по периметру с указанием порталов шинных присоединений.

2. Задание на проектируемую подстанцию с указанием расположения зданий и сооружений по территории ее.

ЛИТЕРАТУРА. П.В.Борисоглебский, Л.Ф.Дмоховская, В.П.Ларионов и др. Техника высоких напряжений. / Под ред. Д.В.Разевига. - М.: Энергия, 1964, с.274 - 279.

ЗАДАНИЕ 4

ЗАДАЧА. Рассчитать импульсное сопротивление заземлителя молниеотвода с учетом удельного сопротивления грунта.

ПОРЯДОК РАСЧЕТА. 1. Определяется сопротивление единичных заземлителей (луча, контура, вертикального заземлителя) по табл.4.1.

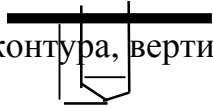
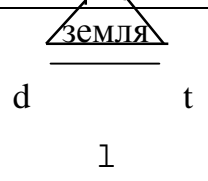
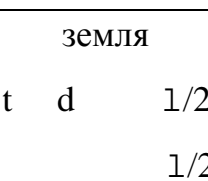
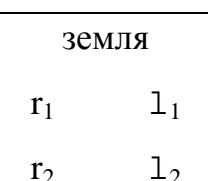
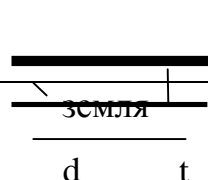
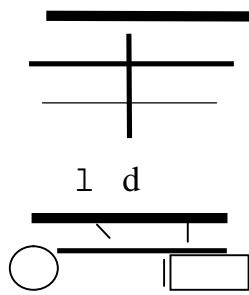


Таблица 4.1

Расчетные формулы для оценки сопротивления единичного заземлителя

Тип	Эскиз	Расчет. формулы	Примеч.
Горизонт. луч		$R_3 = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \ln \frac{1}{2t} \right)$	d - диаметр
Вертикал. трубчат. или стерж.		$R_3 = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \ln \frac{1}{2s} + \frac{1}{2} \right)$	угл.сталь d=0,95b b- ширина
Глубинный верт.,грунт неоднор.		$R_3 = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^n \gamma_{li} l_{li} \ln \frac{1}{d}$	эл. поле в земле плоскопа- раллельн.
Кольцевой или прям. контур		$R_3 = \frac{\rho}{2\pi^2 D_3} \left(\ln \frac{8D_3}{d} + \ln \frac{\pi D_3}{4t} \right)$	D=D ₃ или D ₃ =√4ABπ

14



Свайный
фундамент

Грибовид.
подножник

Продолжение табл.4.1

$R_3 = \frac{1,25 \cdot 1,4 \cdot \rho}{2\pi \cdot l} \ln \frac{1}{d}$

1,25-коэф.
неод. грун.
и бетона

$R_{пл} = \frac{1,25 \cdot 1,4 \cdot \rho}{2\pi \cdot l} \ln \frac{1}{d}$

1,4-коэф.
различ. со-

$$R_{\text{ст}} = \frac{1,25 \cdot 1,4 \cdot \rho}{2 \pi \cdot l \cdot d} \ln \frac{2D_{\text{э}}}{d}$$

$$R_3 = \frac{R_{\text{пл}} \cdot R_{\text{ст}}}{R_{\text{пл}} + R_{\text{ст}}} \cdot \frac{1}{\eta_3}$$

прот. метал. верх. и арматур. каркаса

Коэффициенты использования для одностоечных опор $\eta_3 = 0,6$, а $\eta_i = 0,4$; для порталных опор $\eta_3 = 0,9$, а $\eta_i = 0,8$.

2. По заданному значению импульсного тока I_i в табл.4.4, отводимого всем заземлителем, рассчитывается ток I приходящий на каждый единичный заземлитель. Расчет ведется в предположении, что ток распределяется обратно пропорционально R_3 , найденному по табл.4.1.

3. По кривым рис.4.1 для заданных I_i , ρ и линейных размеров заземлителя

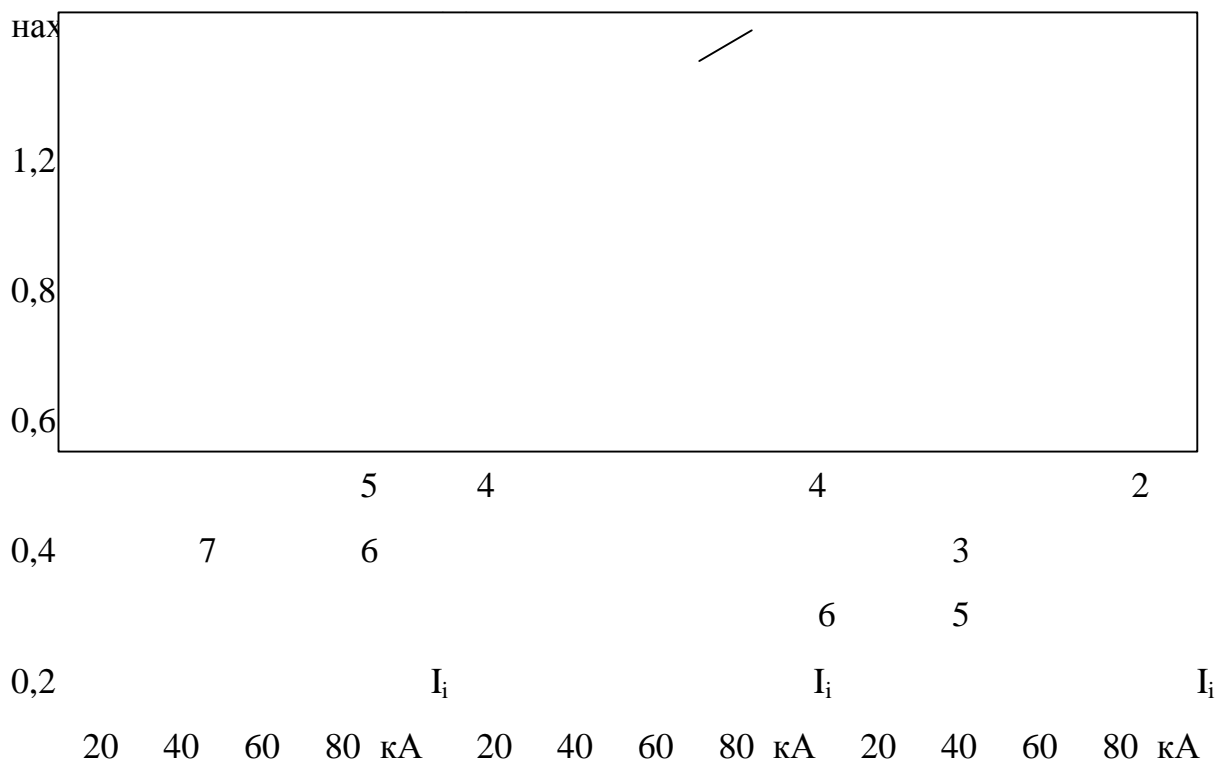


Рис.4.1. Оценка импульсного коэффициента α_i для лучевого а), контурного б) и вертикального стержневого в) заземлителей

Для заземлителя а): 1 - $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $l = 20 \text{ м}$; 2 - $\rho = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $l = 40 \text{ м}$; 3 - $\rho = 500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $l = 2,0 \text{ м}$; 4 - $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $l = 20 \text{ м}$; 5 - $\rho =$

15

$500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $l = 5 \text{ м}$; 6 - $\rho = 500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $l = 10 \text{ м}$; 7 - $\rho = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $l = 10 \text{ м}$.

Для заземлителя б): 1 - $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $D = 12 \text{ м}$; 2 - $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $D = 4 \text{ м}$; 3 - $\rho = 500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $D = 8 \text{ м}$; 4 - $\rho = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $D = 12 \text{ м}$.

Для заземлителя в): 1 - $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $l = 5 \text{ м}$; 2 - $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $l = 2 \text{ м}$; 3 - $\rho = 500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $l = 5 \text{ м}$; 4 - $\rho = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $l = 5 \text{ м}$; 5 - $\rho = 500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $l = 2 \text{ м}$; 6 - $\rho = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $l = 2 \text{ м}$.

4. Определяется коэффициент η_i по табл. 4.2.

5. где R_{ci} составного заземлителя по зави-

сим

$$\frac{\sum R_i}{\eta_i} = \frac{\alpha_i \cdot R_z}{\eta_z \cdot \eta_i}, \quad (4.1)$$

где

Таблица 4.2

ования заземлителей

Э			Коэфф.исп., η_z	Коэфф.исп., η_i
	А. Лучевые	любая	1	1
1	1			
		10	0,9	0,8

1	20	0,93	0,8
	40	0,95	0,85
1	10	0,75	0,65
	20	0,8	0,7
	40	0,85	0,75
В. Вертикальные	$\alpha / 1$ кол-во		
α	2 2	0,9	0,8
	3	0,95	0,85
	2 3	0,85	0,75
	3	0,9	0,8
α	2	0,75	0,65
	4		
	3	0,8	0,7

Примечание: η_z - коэффициент использования вследствие эффекта экранирования, когда проводимость составного заземлителя понижается по сравнению с суммой проводимости отдельных его участков при про-

16

текании тока промышленной частоты; η_i - импульсный коэффициент использования.

Таблица 4.3

Классификация грунтов по удельному сопротивлению

Группа	Уд.сопрот., Ом • м	Тип грунта
1	< 100	Чернозем, глина, суглинок, торф
2	100 - 300	Лесс, суглинок, влаж. глина до 40 %
3	300 -500	Песок, пески с галькой
4	500 -1000	Сухие пески и валуны

5	> 1000	Степ.пески, мяг.грун.($< 1,5\text{м}$)и скала
---	--------	---

6. Пример расчета. а) При общей длине полосы $l = 20$ м рассмотрим вариант кольцевого заземлителя. Учитывая поперечные связи, выбираем диаметр кольца $D = 8$ м. По формуле для кольцевого заземлителя в табл.4.1 находим для $I_i = 80$ кА $\alpha_i = 0,3$. По (4.1) искомое сопротивление найдется с учетом данных табл.4.2

$$R_i = \frac{R_z \cdot \alpha_i}{\eta_z \cdot \eta_i} = 11.$$

Кольцевой заземлитель в грунте с $\rho = 500$ Ом•м оказывается примерным двухлучевому ($R_i = 16$ Ом). Однако прокладка кольцевого заземлителя более сложная;

б) кольцевой заземлитель усиливается забивкой четырех труб по периметру. Длина труб $l = 2$ м, диаметр - $d = 50$ мм. По данным измерения расчетное удельное сопротивление грунта для трубчатого заземлителя принимается равным $\rho = 200$ Ом•м. Сопротивление одной трубы в грунте с $\rho = 200$ Ом•м равно $R_{\text{тр}} = 80$ Ом, а четырех труб $80 / 4 = 20$ Ом. Сопротивление кольца $R_{\text{зк}} = 37$ Ом. Ток $I_i = 80$ кА распределяется пропорционально проводимостям кольца и труб. Приблизненно находим $I_{\text{ик}} = 25$ кА, $I_{\text{итр}} = 55$ кА. Импульсный коэффициент трубы длиной $l = 2$ м при $I_{\text{итр}} = 55 / 4 = 15$ кА и $\rho = 200$ Ом•м равен $\alpha_i = 0,55$ по рис.4.1 и следовательно

$$R_{\text{итр}} = \frac{R_{\text{тр}} \cdot \alpha_i}{4} = \frac{80 \cdot 0,55}{4} = 11 \text{ Ом}$$

Коэффициент использования заземлителя (кольцевой с четырьмя трубами) определяется по табл.4.2 равным

$$\eta_i = 0,75 (D / 1) .$$

По (4.1) вычисляется значение сопротивления составного заземлителя

$$R_{ic} = \frac{R_{itr} \cdot R_{ik}}{(R_{itr} + R_{ik}) \cdot \eta_i} = \frac{11 \cdot 18,5}{(11 + 18,5) \cdot 0,75} = 9 \text{ Ом.}$$

Трубы снижают импульсное сопротивление току растекания, тот же эффект дает снижение удельного сопротивления грунта (как в примере с $\rho = 500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ до $\rho = 200 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), т.е. заметного снижения R_{ic} не будет при $\rho = 500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

7. Варианты расчетных данных.

Таблица 4.4

Исходные данные задания

Варианты	Групп. грунта	Длина l, м	Ток Ii, кА	Заглубл. t, м	Примечание
1	1	40	40	0,5	Для всех вариантов: полоса: от 4х40 мм ² до 6х65 мм ² ; труба: диаметром d = 25 - 50 мм; уголок: 45х45 - 65х65 мм; длиной l = 1,5 - 2,5 м (тоже полоса), кольцо диаметром D = 4 - 12 мм; прямоугольник: A = 1 - 5 м, B = 5 - 1 м
2	1	20	30	0,6	
3	2	40	60	0,7	
4	2	20	50	0,5	
5	3	10	60	0,6	
6	4	20	70	0,7	
7	1	20	20	0,7	
8	2	40	60	0,6	
9	2	20	70	0,5	
0	3	40	80	0,8	

8. Литература. Долгинов А.И. Техника высоких напряжений в электро-энергетике. - М.: Энергия, 1968. - 307 - 310 с.