

**НЕГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
МОСКОВСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

Кафедра Энергетики  
название кафедры

**УТВЕРЖДАЮ**  
Проректор по учебно-методической работе  
к.ф.н. Яблоновская Т.В.  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Учебно-методический комплекс**  
Раздел Методические указания по выполнению контрольной работы № 1  
учебное пособие, практикум или иное

**по дисциплине**  
Техника высоких напряжений  
наименование дисциплины

**для студентов по направлению подготовки**  
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»  
код, наименование направления (специальности)

Зав. кафедрой

к.т.н. Антаненкова И.С.  
уч. степень, уч. звание, ФИО

\_\_\_\_\_ «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.  
подпись

Разработчик (составитель) УМК

к.т.н., доцент Шеманаева Л.И.  
уч. степень, уч. звание, ФИО

\_\_\_\_\_ «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.  
подпись

Москва, 2016 г.

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО НАПИСАНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ № 1 ПО КУРСУ «ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ»**

Практическая часть курса «Техника высоких напряжений» заключается в выполнении контрольных работ, основные аспекты решения которых изложены в соответствующих методических указаниях.

Для успешного выполнения контрольных работ необходимо изучить материалы дисциплины в соответствии с рабочей программой. По каждой задаче, предлагаемой в задании, даны краткие методические указания к решению. Более подробные сведения можно найти в литературе, список которой приведен в конце задания на контрольные работы.

Исходные данные для расчетов выбираются по цифрам учебного шифра и приводятся в условиях на каждую задачу.

При оформлении контрольной работы необходимо соблюдать следующие требования:

1. Контрольная работа на проверку преподавателю отправляется в формате Word с титульным листом, образец оформления которого прилагается (Приложение 1).

2. Перед решением контрольной работы необходимо привести индивидуальные исходные данные, определенные по индивидуальному номеру студента (ИНС).

3. Графический материал выполняется на миллиметровой бумаге или в графических программах. Масштабы для графиков выбираются самостоятельно с соблюдением ГОСТ.

4. Порядок оформления каждой задачи должен соответствовать рекомендованному в задании на контрольную работу.

5. При выполнении расчетов следует привести расчетную формулу, сделать подстановку численных значений и записать результат, мотивируя все расчетные действия.

6. Следует давать расшифровку условных обозначений всех величин, входящих в формулы. Расшифровку каждого условного обозначения достаточно привести один раз при его первом появлении.

7. Все расчеты следует вести с точностью до трех значащих цифр, если она не оговаривается особо.

8. Не следует переписывать в качестве пояснений текст из методических указаний или литературных источников. Необходимые пояснения нужно формировать самостоятельно, по возможности кратко и ясно.

9. После проведения всех необходимых расчетных операций необходимо выписать все искомые величины в ответ и сделать вывод.

Контрольная работа, выполненная не по своему варианту или с нарушением представленных требований, проверке не подлежит.

## **Задача 1. Зависимость разрядных напряжений внешней изоляции от атмосферных условий**

Воздушный промежуток изоляционной конструкции, работающей на переменном напряжении промышленной частоты, с межэлектродным расстоянием  $L$  имеет разрядное напряжение  $U_0$  при нормальных атмосферных условиях. Определить разрядное напряжение воздушного промежутка при атмосферном давлении  $p$ , температуре  $t$  и абсолютной влажности воздуха  $\gamma$ .

### **Методические указания к решению задачи**

В изоляционных конструкциях электротехнических установок вся изоляция подразделяется на внешнюю и внутреннюю.

К внешней изоляции относятся:

- воздушные промежутки между проводами разных фаз линии электропередачи;
- промежутки между контактами разъединителя, внешние поверхности изоляторов и т. п.

Электрическая прочность внешней изоляции определяется пробоем промежутков в атмосферном воздухе или перекрытием в воздухе по поверхности изоляционных деталей.

К внутренней изоляции относятся:

- изоляция обмоток трансформаторов и электрических машин;
- изоляция кабелей;
- герметизированная изоляция вводов и т. д.

Электрическая прочность внутренней изоляции определяется пробоем промежутков, заполненных твердым, жидким или газообразным (не атмосферным воздухом) диэлектриком.

Такое подразделение изоляции связано со специфическими особенностями внешней и внутренней изоляции, существенными различиями в методах их проектирования и испытания.

Особенностью внешней изоляции является зависимость ее электрической прочности от атмосферных условий. Разрядные напряжения чисто воздушных промежутков зависят от давления, температуры и влажности воздуха, а характеристики промежутков в воздухе вдоль поверхности изолятора – от количества и свойств загрязнений, осевших на эту поверхность.

Смена метеорологических условий (например, появление мокрых осадков) может качественно изменять состояние поверхностей изоляторов наружной установки и механизм развития разрядов вдоль них, что сильно сказывается на значениях разрядных напряжений. В связи с этим разрядные напряжения внешней изоляции изоляторов подразделяются на сухоразрядные (при чистых и сухих поверхностях), мокроразрядные (при чистых смачиваемых дождем поверхностях) и влагоразрядные (при загрязненных и увлажненных поверхностях). При измерении мокро- и влагоразрядных напряжений искусственный дождь и увлажненные загрязнения создаются строго регламентированными способами.

Важным свойством внешней изоляции является ее самовосстанавливаемость. Это свойство заключается в том, что электрическая прочность внешней изоляции после пробоя или перекрытия может через короткое время полностью восстанавливаться до исходного уровня. Практическое значение этого состоит в том, что в редких, особо неблагоприятных условиях можно допускать перекрытие внешней изоляции, а дальнейшую нормальную работу всей установки обеспечивать, например, с помощью системы автоматического повторного включения (АПВ).

У внутренней изоляции практически отсутствует зависимость электрической прочности от атмосферных условий. Точнее, на поведение внутренней изоляции не влияют случайные и сравнительно быстрые колебания температуры и влажности окружающего воздуха, если они не выходят за пределы допустимых. На свойства внутренней изоляции оказывают влияние только средние за относительно длительный период времени значения температуры и влажности окружающего воздуха.

Особенностью внутренней изоляции является то, что ее пробой или полностью необратим (приводит к выходу из строя оборудования), или приводит к ухудшению ее характеристик. Поэтому состояние внутренней изоляции в процессе эксплуатации должно периодически

контролироваться для своевременного выявления развивающихся дефектов и предотвращения аварийных отказов электрооборудования.

Однако контроль качества внутренней изоляции проводится не по результатам измерения фактических пробивных напряжений, а путем проверки способности изоляции выдержать испытательные напряжения, выбираемые с учетом возможных перенапряжений, так как после измерения пробивного напряжения оборудование будет заведомо непригодно к работе. Длительная электрическая прочность проверяется косвенными методами.

Еще одно практическое значение необратимости пробоя внутренней изоляции заключается в том, что внутренняя изоляция изоляционных конструкций должна обладать более высоким уровнем электрической прочности, чем внешняя изоляция, то есть таким уровнем, при котором пробой полностью исключается в течение всего срока службы. Для внешней изоляции допускается ограниченное число перекрытий в особо неблагоприятных условиях с устранением замыканий с помощью АПВ.

Важным свойством внутренней изоляции является старение. Под старением изоляции понимается постепенное ухудшение ее свойств с течением времени. Причиной старения являются электрические, тепловые, механические и другие нагрузки, действующие на изоляцию при эксплуатации. Практическое значение этого свойства внутренней изоляции состоит в ограничении сроков службы изоляционных конструкций.

У внутренней изоляции механизм пробоя может быть существенно отличимым при электрических воздействиях разной длительности. Соответственно, разными будут и пробивные напряжения. Для многих видов внутренней изоляции пробивное напряжение при временах воздействия в несколько десятков микросекунд, характерных для грозовых перенапряжений, может в десятки раз превышать пробивные напряжения при воздействиях длительностью в несколько лет, соответствующих воздействию рабочего напряжения. В связи с этим в инженерной практике различают три вида электрической прочности внутренней изоляции:

- кратковременную при внутренних перенапряжениях (при приложении к изоляции стандартных грозовых импульсов);
- кратковременную при внутренних перенапряжениях (при приложении стандартных коммутационных импульсов);
- длительную (способность выдерживать воздействие рабочего напряжения в течение требуемого срока службы).

Целесообразность применения в установках высокого напряжения в качестве диэлектриков кроме окружающего воздуха специальных твердых, жидких и газообразных материалов, составляющих внутреннюю изоляцию, заключается в следующем. Во-первых, элементы внутренней изоляции из твердых диэлектриков выполняют функции механического крепления проводников. Кроме того, через внутреннюю изоляцию осуществляется отвод тепла, выделяющегося при прохождении рабочих токов; здесь наиболее эффективны жидкие диэлектрики.

В задаче производится расчет разрядного напряжения внешней изоляции с учетом атмосферных условий. Учет давления, температуры и влажности атмосферного воздуха на практике необходим, во-первых, чтобы иметь возможность сопоставить разрядные напряжения (для этого они должны быть отнесены к одинаковым условиям), и, во-вторых, чтобы устанавливать испытательные напряжения в конкретных условиях эксперимента по нормированным значениям, отнесенным к нормальным атмосферным условиям.

Формула, связывающая разрядные (испытательные) напряжения внешней изоляции в условиях эксперимента и при нормальных атмосферных условиях, выглядит следующим образом:

$$U = U_0(k_p k_t / k_\gamma),$$

где  $U$  – разрядное (испытательное) напряжение в условиях эксперимента;  $U_0$  – разрядное (испытательное) напряжение при нормальных атмосферных условиях;  $k_p$ ,  $k_t$ ,  $k_\gamma$  – поправочные

коэффициенты, учитывающие давление, температуру и влажность воздуха.

В качестве нормальных атмосферных условий принято считать: температуру воздуха  $20\text{ }^{\circ}\text{C} = 293\text{ }^{\circ}\text{K}$ , давление  $760\text{ мм рт. ст.} = 101,3\text{ кПа} \approx 100\text{ кПа}$  и абсолютную влажность  $11\text{ г/к}^3$ .

Значения поправочных коэффициентов рассчитываются по формулам, установленным соответствующим ГОСТ 1516.2-97. Формула для поправочного коэффициента на давление имеет вид:

$$k_p = (p / p_0)^m,$$

где  $p_0$  – нормальное атмосферное давление;  $p$  – атмосферное давление в условиях эксперимента;  $m$  – показатель степени, зависящий от типа и размеров изоляционной конструкции и вида воздействующего напряжения.

Поправочный коэффициент на температуру определяется следующим образом:

$$k_t = (T_0 / T)^n = [(273 + t_0) / (273 + t)]^R,$$

где  $T_0$  и  $t_0$  – температура нормальных атмосферных условий по шкале Кельвина и Цельсия соответственно;  $T$  и  $t$  – температура условий эксперимента по шкале Кельвина и Цельсия соответственно;  $n$  – показатель степени, зависящий от типа и размеров изоляционной конструкции и вида воздействующего напряжения.

Поправочный коэффициент на абсолютную влажность воздуха при относительно больших напряжениях считается равным:

$$k_\gamma = k^w,$$

где  $k$  – вспомогательный коэффициент, зависящий от типа изоляционной конструкции и вида воздействующего напряжения;  $w$  – показатель степени, зависящий от типа и размеров изоляционной конструкции и вида воздействующего напряжения.

При малых расстояниях между электродами, то есть при малых напряжениях ( $U < 141\text{ кВ}$ ), поправка на влажность рассчитывается следующим образом:

$$k_\gamma = 1 + (k^w - 1)U/141.$$

Электрические поля во внешней изоляции установок высокого напряжения получаются *резконеоднородными*, что связано с соотношением геометрических размеров токоведущих частей и изоляционных расстояний. Резконеоднородными называются электрические поля, у которых коэффициент неоднородности, равный отношению наибольшей напряженности поля к средней в промежутке, превышает 3.

Значения показателей степени  $m$ ,  $n$  и  $w$  в приведенных выше формулах для резконеоднородных электрических полей при работе на переменном напряжении частоты 50 Гц можно определить по графикам рисунка 1.1. При указанных условиях значения показателей степени зависят от межэлектродного расстояния  $L$ . Значения  $m$  и  $n$  определяются по кривой 1, а значение  $w$  – по кривой 2. При тех же условиях вспомогательный коэффициент  $k$  зависит от абсолютной влажности воздуха. Данная зависимость приведена в таблице 1.1.

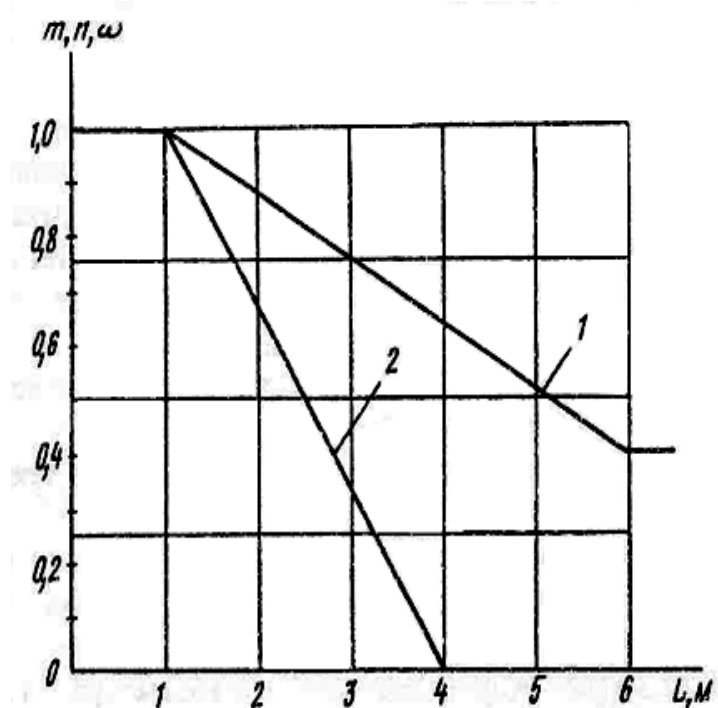


Рисунок 1.1 – Зависимость показателей степени  $m$ ,  $n$ ,  $w$  от межэлектродного расстояния

Таблица 1.1 – Зависимость коэффициента  $k$  от абсолютной влажности воздуха

$\gamma$ , г/м <sup>3</sup>	0	5	11	15	20	25
$k$	1,15	1,08	1,0	0,95	0,9	0,85

Следует отметить уменьшение влияния атмосферных условий на разрядные напряжения внешней изоляции при увеличении межэлектродных расстояний в промежутках с резконеоднородным электрическим полем при переменном напряжении. Это иллюстрируется уменьшением показателей степени  $m$ ,  $n$ ,  $w$  при увеличении межэлектродного расстояния  $L$  на графиках рисунка 1.1.

Кроме того, характер влияния атмосферных условий на разрядные напряжения зависит от метеорологических условий. В частности, атмосферные условия практически не оказывают влияния на влагоразрядные напряжения. Температура воздуха и дождевой воды практически не влияет на мокроразрядное напряжение изоляторов, а давление оказывает на него влияние.

#### Последовательность расчета:

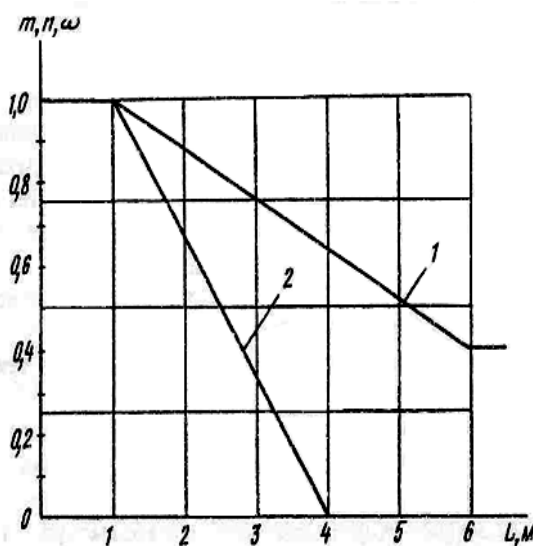
1. Построить графики зависимостей показателей степени для поправочных коэффициентов на давление, температуру и влажность воздуха от межэлектродного расстояния и вспомогательного коэффициента для поправочного коэффициента на влажность от абсолютной влажности воздуха.
2. Определить показатели степени для поправочных коэффициентов на давление и температуру воздуха.
3. Рассчитать поправочные коэффициенты на давление и температуру воздуха.
4. Определить показатель степени и вспомогательного коэффициента для поправочного коэффициента на абсолютную влажность воздуха.
5. Рассчитать поправочный коэффициент на абсолютную влажность воздуха.
6. Рассчитать разрядное напряжение воздушного промежутка при заданных атмосферных условиях.

Таблица 1.2 – Исходные данные

Параметры	Последняя цифра учебного шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$U_0$ , кВ	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
$L$ , м	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0
	Предпоследняя цифра учебного шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P$ , кПа	105	106	107	104	96	95	04	95	96	95
$t$ , °С	-30	-20	-10	-30	+50	+60	+70	+50	+60	+70
$\gamma$ , Г/м <sup>3</sup>	16	18	22	25	1	2	3	4	5	6

**Пример расчета:**

1. Построить графики зависимостей показателей степени для поправочных коэффициентов на давление, температуру и влажность воздуха от межэлектродного расстояния и вспомогательного коэффициента для поправочного коэффициента на влажность от абсолютной влажности воздуха.



2. Определить показатели степени для поправочных коэффициентов на давление и температуру воздуха.

По графику находим  $m$  и  $n$ :

$$m = 0,92,$$

$$n = 0,92.$$

3. Рассчитать поправочные коэффициенты на давление и температуру воздуха.

По ГОСТ 1516-2-97

$$K_p = \left(\frac{p}{p_0}\right)^m = \left(\frac{94}{100}\right)^{0,92} = 0,944, \text{ где } p_0 = 100 \text{ кПа,}$$

$$K_t = \left(\frac{T_0}{T}\right)^n = \left(\frac{293}{263}\right)^{0,92} = 1,104.$$

4. Определить показатель степени и вспомогательного коэффициента для поправочного коэффициента на абсолютную влажность воздуха.

Для  $y = 3 \text{ г/м}^3$ ,  $k = 1,1$ .

По графику  $\alpha$  находим  $\omega$ :

$$\omega = 0,8.$$

5. Рассчитать поправочный коэффициент на абсолютную влажность воздуха.

$$K_y = k^\omega = 1,1^{0,8} = 1,079.$$

6. Рассчитать разрядное напряжение воздушного промежутка при заданных атмосферных условиях.

$$U = U_0(K_p \cdot K_t / K_y) = 700(0,944 \cdot 1,104 / 1,079) = 676 \text{ кВ.}$$

## Задача 2. Расчет грозовых перенапряжений на высоковольтных линиях электропередач

### Условие задачи и исходные данные

Высоковольтная линия электропередач (ВЛ) с номинальным напряжением  $U$  и волновым сопротивлением  $Z_{\text{пр}} = 300$  Ом расположена в зоне грозовой деятельности.

Импульсная прочность изоляции ВЛ равна  $U_{\text{и}}$ , высота металлической опоры и высота подвеса провода равна  $h$ , стрела провеса провода равна  $f$ , индуктивность единицы длины опоры  $L_0 = 0,5 \cdot 10^{-6}$  Гн/м, импульсное сопротивление заземления опоры  $R_3 = 10$  Ом.

Требуется определить величину перенапряжения на ВЛ, кратность перенапряжения и вероятность перекрытия изоляции во время разряда молнии с амплитудой  $I_M$  и длительностью нарастания (фронта) косоугольной волны тока равной  $\tau_{\text{ф}} = 10^{-6}$  с:

- при ударе молнии в опору;
- при ударе молнии в провод;
- при ударе молнии на расстоянии  $a$  от ВЛ.

Значения всех переменных параметров для соответствующих вариантов приведены в таблицах 2.1 и 2.2.

Таблица 2.1

Показатели	Вариант (предпоследняя цифра шифра)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Напряжение линии $U$ , кВ	10	35	110	35	10	110	10	35	110	10
Импульсная прочность изоляции линии $U_{\text{и}}$ , кВ	120	350	650	350	120	650	120	350	650	20
Высота подвеса провода $h$ , м	10	12	16	14	11	18	10	15	18	11
Стрела провеса провода $f$ , м	1,5	2	3	2,5	2	4	1,8	3,5	4,5	1,8

Таблица 2.2

Показатели	Вариант (предпоследняя цифра шифра)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Амплитуда тока молнии $I_M$ , кА	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Расстояние от места удара молнии до ВЛ $a$ , м	5	7,5	10	12	13	14	15	18	19	20

### Методические указания к выполнению задачи

Молния представляет собой электрический разряд между облаком и землей или между облаками.

На начальной стадии, называемой лидерной, канал разряда молнии развивается ступенчато. Ступени следуют друг за другом с интервалом 30-50 мкс. Во время каждой ступени канал удлиняется на 5-100 м. Канал лидера окружен обширной зоной ионизации. Зона ионизации лидера имеет избыточный заряд того же знака, что и облако. Заряды облака и лидера индуцируют на поверхности земли и на расположенных на ней объектах заряды другого знака.

Когда канал лидера соединяется с землей или объектом, расположенным на земле, начинается главная стадия разряда. Во время этой стадии происходит нейтрализация зарядов,



образовавшихся во время развития лидера. Процесс распространяется в направлении от земли к облаку со скоростью достигающей половины скорости распространения света и сопровождается сильным свечением канала молнии. Канал разряда, разогретый за очень короткое время до температуры  $(20-30)10^3$  К, быстро расширяется, что вызывает распространение в окружающем воздухе ударной волны, вырождающейся в звуковую и воспринимаемой как гром.

Ток в канале молнии за несколько микросекунд достигает амплитуды 2-250 кА, а затем за время 25-150 мкс спадает до половины максимального значения.

Более подробные сведения о механизме развития молнии и молниезащиты можно найти в рекомендованной литературе.

При расчетах перенапряжений и молниезащиты принимается во внимание, что волновое сопротивление канала молнии составляет более 1000 Ом и влияние сопротивлений заземлений с  $R_3 \leq 50$  Ом на амплитуду молнии можно не учитывать, то есть рассматривать молнию как источник тока.

С точки зрения воздействия на изоляцию ВЛ, кроме амплитуды тока молнии  $I_M$ , важное значение имеет крутизна фронта тока молнии, поскольку она определяет индуктивное падение напряжения в проводниках и индуцированные напряжения в магнитно-связанных цепях.

При расчетах перенапряжений для удобства используют среднюю крутизну:

$$\alpha_{\text{ср}} = I_M / \tau_{\text{ф}}, \quad (2.1)$$

где  $\tau_{\text{ф}}$  – длительность нарастания (фронта) тока главного разряда молнии.

Величина перенапряжения на вершине опоры при прямом ударе молнии в опору равна сумме падений напряжения на импульсном сопротивлении заземления и индуктивности опоры:

$$U_{\text{оп}} = R_3 I_M + L_0 h \alpha_{\text{ср}}, \quad (2.2)$$

где  $R_3$  – импульсное сопротивление заземления опоры;  $I_M$  – амплитуда тока молнии;  $L_0$  – удельная индуктивность опоры;  $h$  – высота опоры.

Под таким же напряжением окажется и изоляция проводов линии электропередачи.

При ударе молнии в провод линии электропередач ток молнии растекается по пораженному проводу в обе стороны, поэтому амплитуда волны перенапряжения на проводах определяется по формуле:

$$U_{\text{пр}} = I_M Z_{\text{пр}} / 2, \quad (2.3)$$

где  $Z_{\text{пр}}$  – волновое сопротивление провода.

Удары молнии вблизи ВЛ вызывают так называемые индуцированные перенапряжения. Индуцированные перенапряжения  $U_{\text{инд}}$  на фазных проводах имеют электрическую  $U_{\text{из}}$  и магнитную  $U_{\text{им}}$  составляющие.

Рассмотрим в упрощенной форме, как возникает электрическая составляющая индуцированного перенапряжения (рисунок 2.1).

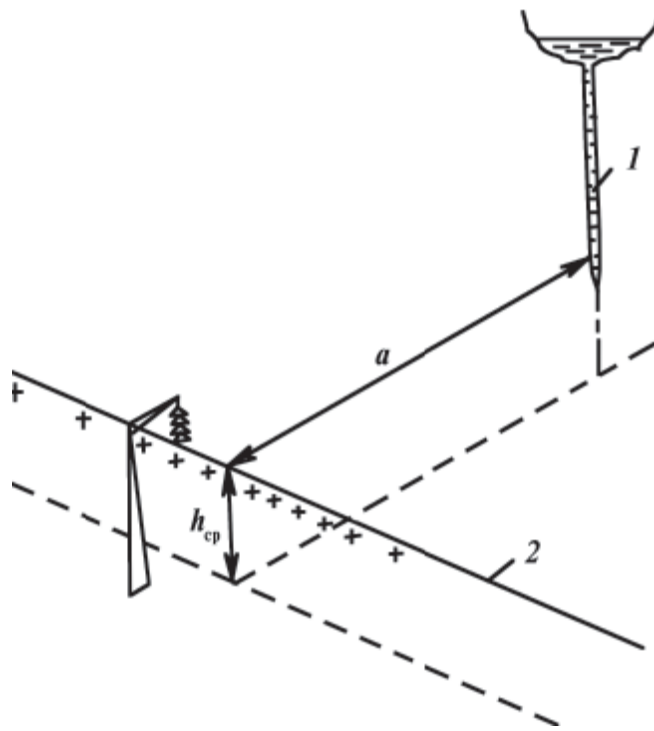


Рисунок 2.1 – Образование индуктированных перенапряжений:

$1$  – упрощенный вид канала лидера молнии;  $2$  – условный вид проводов линии электропередач;  $(-)$  – заряды в канале лидера отрицательной полярности;  $(+)$  – наведенные заряды положительной полярности на проводах

При развитии лидерного канала молнии  $1$  вблизи ВЛ заряды канала молнии связывают (наводят) на проводах  $2$  заряды противоположного знака (явление электрической индукции).

Во время главного разряда, то есть когда молния достигает земли, заряды лидера молнии нейтрализуются, при этом связанные на проводе заряды освобождаются, что сопровождается повышением потенциала провода и образованием импульса напряжения, распространяющегося по проводу в обе стороны.

Максимальные значения  $U_{из}$  прямо пропорционально амплитуде тока и средней высоте подвеса провода ( $h_{cp}$ ) и обратно пропорционально кратчайшему расстоянию « $a$ » от провода до точки удара молнии:

$$U_{из} = k_3 h_{cp} I_M / a, \quad (2.4)$$

где  $k_3$  – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность сопротивления и уменьшающийся при возрастании скорости главного разряда молнии.

Средняя высота подвеса провода на опорах ВЛ определяется по формуле:

$$h_{cp} = h - 2f / 3, \quad (2.5)$$

где  $h$  – высота подвеса провода на опорах ВЛ;  $f$  – стрела провеса провода.

Изменение магнитного поля при главном разряде приводит к возникновению магнитной составляющей индуктированного напряжения в петле «опора=гирлянда изоляторов – провод-земля».

Максимальное значение  $U_{им}$  также прямо пропорционально амплитуде тока и средней высоте подвеса провода и обратно пропорционально кратчайшему расстоянию  $a$  от провода до точки удара молнии, но имеет свой коэффициент пропорциональности  $k_M$ :

$$U_{им} = k_M h_{ср} I_M / a, \quad (2.6)$$

где  $k_M$  – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность сопротивления и увеличивающийся при возрастании скорости главного разряда молнии.

Максимальное значение индуктированного напряжения равно:

$$U_{инд} = U_{из} + U_{им} = (k_3 + k_M) h_{ср} I_M / a \approx 30 h_{ср} I_M / a. \quad (2.7)$$

Значения перенапряжений, полученных по формулам (2.2), (2.3), (2.7), оценочные, поскольку не учитывают многие факторы, влияющие на величину перенапряжения. Например, не учитывается, что индуктированные перенапряжения возникают также и при ударах молнии в провода (тросы) и опоры и, накладываясь на перенапряжения прямого удара, увеличивают разность потенциалов на изоляции; что второе слагаемое в формуле (2.2) имеет существенное значение только в пределах фронта тока молнии.

Учет этих и других факторов значительно усложнил бы расчет перенапряжений.

Кратность перенапряжения изоляции линии определяется как отношение величины перенапряжения к амплитудному значению фазного напряжения линии:

$$U_{п} / U_{ф} = U_{п} \sqrt{3} / U \sqrt{2}, \quad (2.8)$$

где  $U_{п}$  – максимальное значение перенапряжения в зависимости от места удара молнии;  $U$  – действующее (эффективное) значение номинального (междуфазного) напряжения ВЛ.

Для оценки вероятности перекрытия изоляции необходимо сравнивать рассчитанные значения перенапряжения  $U_{оп}$ ,  $U_{пр}$ ,  $U_{инд}$  с заданной импульсной прочностью изоляции  $U_{и}$ .

Перекрытие изоляции произойдет, если:

$$U_{оп} = R_3 I_M + L_0 h_{ср} \alpha_{ср} \approx R_3 I_M \geq U_{и};$$

$$U_{пр} = I_M Z_{пр} / 2 \geq U_{и};$$

$$U_{инд} = 30 h_{ср} I_M / a \geq U_{и}.$$

Как видим, перекрытие изоляции определяется амплитудой тока молнии и местом удара молнии.

Минимальная амплитуда молнии  $I_3$ , при которой происходит перекрытие изоляции, при ударе молнии:

$$- \text{ в опору } - I_3 = U_{и} / R_3;$$

$$- \text{ в провод } - I_3 = U_{и} / (Z_{пр} / 2);$$

$$- \text{ на расстоянии } a - I_3 = a U_{и} / 30 h_{ср}.$$

Вероятность перекрытия изоляции  $P_{пер}$  равна вероятности удара молнии с  $I \geq I_3$ . Вероятность того, что ток молнии больше заданного значения  $I_x$ , обычно аппроксимируется экспоненциальной функцией:

$$P(I_x) = \exp(-0,04 I_x). \quad (2.9)$$

Следовательно, вероятность перекрытия изоляции ВЛ при ударе молнии:

$$- \text{ в опору } - P_{пер.оп} = P(I_3) = \exp(-0,04 U_{и} / R_3); \quad (2.10)$$

$$- \text{ в провод } - P_{пер.пр} = P(I_3) = \exp[-0,04 U_{и} / (Z_{пр} / 2)]; \quad (2.11)$$

$$- \text{ на расстоянии } a - P_{пер.инд} = P(I_3) = \exp(-0,04 a U_{и} / 30 h_{ср}). \quad (2.12)$$

В формулах (2.9)-(2.12) ток  $I_x$  и  $I_3$  выражается в кА.

**Последовательность расчета:**

1. В расчетно-пояснительной записке привести условие задачи и исходные данные выбранного варианта.
2. Вычислить величину перенапряжения на ВЛ при ударе молнии в опору, в провод и на заданном расстоянии от ВЛ по формулам (2.2), (2.3) и (2.7).
3. Вычислить кратность перенапряжения изоляции ВЛ при ударе молнии в опору, в провод и на заданном расстоянии от ВЛ по формуле (2.8).
4. Вычислить вероятность перекрытия изоляции во время разряда молнии в опору, в провод и на заданном расстоянии от ВЛ по формулам (2.10), (2.11) и (2.12).
5. Данные, полученные в п.п. 2, 3 и 4, свести в таблицу и дать заключение о наиболее уязвимом месте удара молнии.

### Пример расчета

1. Вычислить величину перенапряжения на ВЛ при ударе молнии в опору, в провод и на заданном расстоянии от ВЛ по формулам (2.2), (2.3) и (2.7).

При расчетах перенапряжений для удобства используют среднюю крутизну:

$$\alpha_{\text{ср}} = I_{\text{м}} / \tau_{\text{ф}} = 15 / 1 = 15 \text{ кА/мкс.}$$

Величина перенапряжения на вершине опоры при прямом ударе молнии в опору равна сумме падений напряжения на импульсном сопротивлении заземления и индуктивности опоры:

$$U_{\text{оп}} = R_3 I_{\text{м}} + L_0 h \alpha_{\text{ср}} = 10 \cdot 15 \cdot 10^3 + 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 16 \cdot 15000 \cdot 10^3 = 150 \text{ кВ.}$$

Под таким же напряжением окажется и изоляция проводов линии электропередачи.

При ударе молнии в провод линии электропередач ток молнии растекается по пораженному проводу в обе стороны, поэтому амплитуда волны перенапряжения на проводах определяется по формуле (2.3):

$$U_{\text{пр}} = I_{\text{м}} Z_{\text{пр}} / 2 = 15 \cdot 10^3 \cdot 300 / 2 = 2250 \text{ кВ.}$$

Максимальное значение индуктированного напряжения равно:

$$U_{\text{инд}} = U_{\text{из}} + U_{\text{им}} = (k_3 + k_{\text{м}}) h_{\text{ср}} I_{\text{м}} / a \approx 30 h_{\text{ср}} I_{\text{м}} / a = 30 \cdot 14 \cdot 15 \cdot 10^3 / 10 = 630 \text{ кВ.}$$

Удары молнии вблизи ВЛ вызывают так называемые индуктированные перенапряжения. Индуктированные перенапряжения  $U_{\text{инд}}$  на фазных проводах имеют электрическую  $U_{\text{из}}$  и магнитную  $U_{\text{им}}$  составляющие.

Средняя высота подвеса провода на опорах ВЛ определяется по формуле (2.5):

$$h_{\text{ср}} = h - 2f / 3 = 16 - 2 \cdot 3 / 3 = 14 \text{ м.}$$

2. Вычислить кратность перенапряжения изоляции ВЛ при ударе молнии в опору, в провод и на заданном расстоянии от ВЛ по формуле (2.8).

Кратность перенапряжения изоляции линии определяется как отношение величины перенапряжения к амплитудному значению фазного напряжения линии:

$$U_{\text{п}} / U_{\text{ф}} = U_{\text{оп}} \sqrt{3} / U \sqrt{2} = (150 \sqrt{3}) / (110 \sqrt{2}) = 259,5 / 155,5 = 1,66.$$

$$U_{\text{п}} / U_{\text{ф}} = U_{\text{пр}} \sqrt{3} / U \sqrt{2} = (2250 \sqrt{3}) / (110 \sqrt{2}) = 25,03.$$

$$U_{\text{п}} / U_{\text{ф}} = U_{\text{инд}} \sqrt{3} / U \sqrt{2} = (630 \sqrt{3}) / (110 \sqrt{2}) = 7,0.$$

3. Вычислить вероятность перекрытия изоляции во время разряда молнии в опору, в провод и на заданном расстоянии от ВЛ по формулам (2.10), (2.11) и (2.12).

Для оценки вероятности перекрытия изоляции необходимо сравнивать рассчитанные значения перенапряжения  $U_{\text{оп}}$ ,  $U_{\text{пр}}$ ,  $U_{\text{инд}}$  с заданной импульсной прочностью изоляции  $U_{\text{и}}$ .

Перекрытие изоляции произойдет, если:

$$U_{\text{оп}} = R_3 I_{\text{м}} + L_0 h \alpha_{\text{ср}} \approx R_3 I_{\text{м}} \geq U_{\text{и}};$$

$$150 \text{ кВ} < 650 \text{ кВ.}$$

Перекрытия изоляции не будет, если:

$$U_{\text{пр}} = I_{\text{м}} Z_{\text{пр}} / 2 \geq U_{\text{и}};$$

$$2250 \text{ кВ} > 650 \text{ кВ};$$

$$U_{\text{инд}} = 30 h_{\text{ср}} I_{\text{м}} / a \geq U_{\text{и}};$$

$$630 \text{ кВ} < 650 \text{ кВ.}$$

Минимальная амплитуда молнии  $I_3$ , при которой происходит перекрытие изоляции, при ударе молнии:

- в опору –  $I_3 = U_{\text{и}}/R_3 = 650 \cdot 10^3/10 = 65 \text{ кА}$ ;
- в провод –  $I_3 = U_{\text{и}}/(Z_{\text{пр}}/2) = 650 \cdot 10^3/(300/2) = 4,3 \text{ кА}$ ;
- на расстоянии  $a$  –  $I_3 = aU_{\text{и}}/30 h_{\text{ср}} = 10 \cdot 650 \cdot 10^3/(30 \cdot 14) = 15,4 \text{ кА}$ .

Вероятность перекрытия изоляции  $P_{\text{пер}}$  равна вероятности удара молнии с  $I \geq I_3$ . Вероятность того, что ток молнии больше заданного значения  $I_x$  обычно аппроксимируется экспоненциальной функцией:

$$P(I_x) = \exp(-0,04 I_x).$$

Следовательно, вероятность перекрытия изоляции ВЛ при ударе молнии:

- в опору –  $P_{\text{пер.оп}} = P(I_3) = \exp(-0,04 U_{\text{и}} / R_3) = \exp(-0,04 \cdot 650 \cdot 10^3/10) = 0,33 \text{ кА}$ ;
- в провод –  $P_{\text{пер.пр}} = P(I_3) = \exp[-0,04 U_{\text{и}} / (Z_{\text{пр}}/2)] = \exp[-0,04 \cdot 650 \cdot 10^3/(300/2)] = 0,69$
- на расстоянии  $a$  –  $P_{\text{пер.инд}} = P(I_3) = \exp(-0,04 a U_{\text{и}}/30 h_{\text{ср}}) = \exp(-0,04 \cdot 10 \cdot 650 \cdot 10^3/(30 \cdot 14)) =$

0,5.

$U_{\text{оп}}$	$U_{\text{пр}}$	$U_{\text{инд}}$	Кратность перен.			$I_3$			$P_{\text{пер}}$		
			оп	пр	инд	оп	пр	инд	оп	пр	инд
150	2250	630	1,66	25,03	7,0	65	4,3	15,4	0,33	0,69	0,5

По итогам расчета наиболее уязвимым местом удара молнии является провод  $P_{\text{пер.пр}} = 0,69$  кА.

### Задача 3. Защита объекта от прямых ударов молнии с помощью стержневого молниеотвода

#### Условие задачи и исходные данные

Для защиты объекта с шириной  $a$ , длиной  $b$  и высотой  $h$  от прямых ударов молнии с амплитудой  $I_m$  и временем нарастания фронта  $\tau_{\text{ф}} = 10^{-6}$  с установлен одиночный молниеотвод. Глубина нижнего конца фундамента молниеотвода от поверхности земли  $h_{\text{ф}} = 3,2$  м, ширина фундамента  $a_{\text{ф}} = 0,8$  м, удельное сопротивление земли  $\rho$ , Ом·м. Схема расположения молниеотвода и защищаемого объекта приведена на рисунке 3.1.

#### Требуется:

1. Рассчитать устройство заземления молниеотвода, состоящее из естественного заземлителя (фундамента молниеотвода) и искусственного заземлителя из условий, что допустимое импульсное сопротивление устройства заземления  $R_3$  не должно превышать 10 Ом. Начертить эскиз контура заземления совместно с защищаемым объектом.

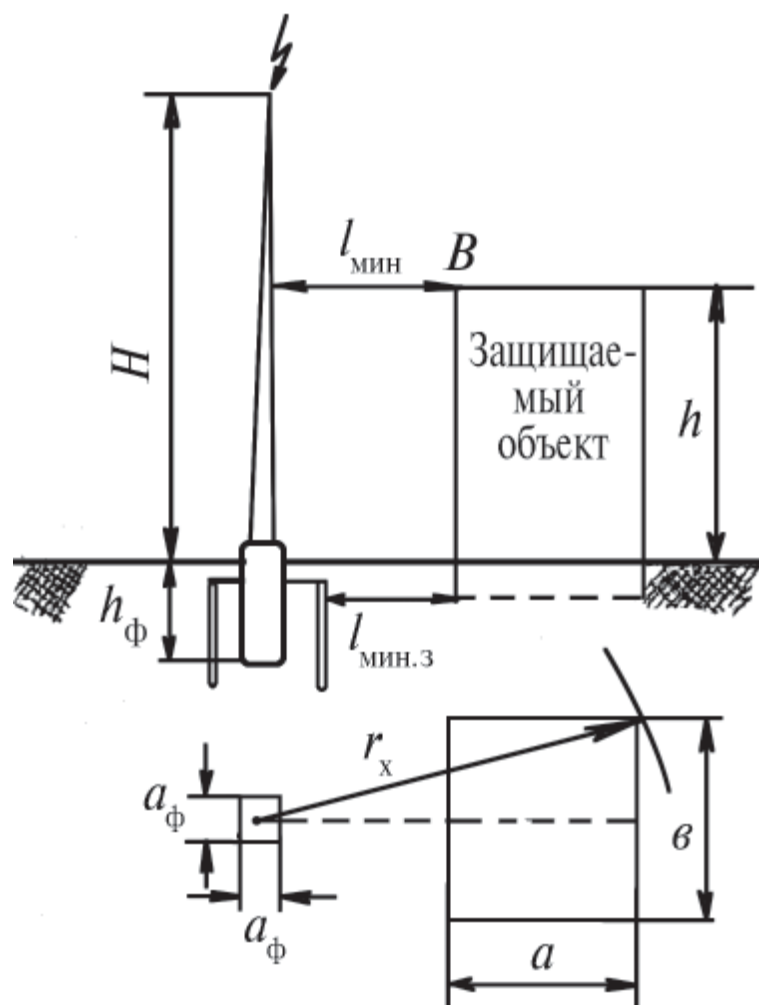


Рисунок 3.1 – Схема расположения молниеотвода и защищаемого объекта

2. Рассчитать минимально допустимые расстояния от молниеотвода до защищаемого объекта, радиус зоны защиты  $r_x$  на высоте объекта  $h$  и высоту молниеотвода  $H$ . На эскизе показать сечение зоны защиты стержневого молниеотвода.

Значения соответствующих переменных параметров для различных вариантов задания приведены в таблицах 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1

Показатели	Вариант (последняя цифра шифра)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Амплитуда тока молнии $I_m$ , кА	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Удельное сопротивление грунта $\rho$ , Ом·м	100	200	500	200	100	200	500	200	100	250

Таблица 3.2

Показатели	Вариант (предпоследняя цифра шифра)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0

Ширина объекта $a$ , м	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8
Длина объекта $b$ , м	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
Высота объекта $h$ , м	12	11	10	9,5	9,0	10,5	12,5	11,5	8,5	8,0

### Методические указания к выполнению задачи

Защита от прямых ударов молнии осуществляется с помощью молниеотводов. Молниеотвод представляет собой возвышающееся над защищаемым объектом устройство, через которое ток молнии, минуя защищаемый объект, отводится в землю. Молниеотвод состоит из молниеприемника, непосредственно воспринимающего на себя удар молнии, токоотвода и заземлителя.

Молниеотводы по типу молниеприемника разделяются на стержневые и тросовые. Стержневые молниеотводы выполняются в виде вертикально установленных стержней (мачт), соединенных с заземлителем.

Токоотводом служат металлические или железобетонные опоры или стальные провода сечением не менее  $50 \text{ мм}^2$ , активное сопротивление которых составляет доли Ома, а индуктивность зависит прежде всего от его длины. Удельная индуктивность токоотводов  $L_0$  зависит от конструкции молниеотвода и изменяется в диапазоне  $(0,4-1,7)10^{-6} \text{ Гн/м}$ .

Заземлители делятся на естественные и искусственные. В качестве естественных заземлителей стержневых молниеотводов используются их железобетонные фундаменты. Для искусственных заземлителей используются вертикальные и горизонтальные электроды (заземлители). Для горизонтальных заземлителей используется стальная или медная полоса с площадью поперечного сечения более  $100 \text{ мм}^2$  для стали и  $50 \text{ мм}^2$  для меди или многопроволочный медный канат с поперечным сечением не менее  $35 \text{ мм}^2$ . В качестве вертикальных заземлителей применяются стальные трубы, стержни и профильная сталь.

Заземлитель характеризуется значением сопротивления, которое окружающая земля оказывает стекающему с него току. Сопротивление заземлителя зависит от его геометрических размеров и удельного сопротивления грунта  $\rho$ , в котором он находится.

Для приближенного расчета сопротивления заземления одиночного стержневого молниеотвода или линейной опоры используются следующие формулы:

- сопротивление железобетонного фундамента:

$$R_{\text{ф}} = 1,7(\rho / 2\pi t)\ln(4t / b), \quad (3.1)$$

- сопротивление горизонтальной полосы:

$$R_{\text{п}} = (\rho / \pi l)\ln(1,5l / \sqrt{bt}), \quad (3.2)$$

- сопротивление вертикальной трубы или стержня:

$$R_{\text{тр}} = (\rho/2\pi l)\ln\{[4l(2t + l)]/[d(4t + l)]\}, \quad (3.3)$$

где  $l$  – длина трубы или полосы;  $t$  – глубина залегания полосы, верхнего конца вертикального электрода или нижнего конца фундамента;  $b$  – ширина полосы или фундамента;  $d$  – диаметр трубы или стержня.

Рассчитанные по формулам (3.1), (3.2), (3.3) сопротивления заземлителей называют стационарными.

При прохождении через заземлитель импульса тока молнии сопротивление заземлителя отличается от рассчитанного по формулам (3.1), (3.2), (3.3), так как при этом вокруг заземлителя



образуются зоны искрения, которые как бы увеличивают размеры электродов. С другой стороны, быстрое нарастание импульсного тока создает падение напряжения на индуктивности протяженного заземлителя, что ограничивает отвод тока с удаленных его частей.

Влияния этих и ряда других факторов учитывается импульсным коэффициентом  $\delta_n$ .

Если заземлитель состоит из  $n$  труб или полос, то его импульсное сопротивление равно:

$$R_n = \delta_n R / \eta_n n, \quad (3.4)$$

где  $\eta_n$  – импульсный коэффициент использования заземлителя, учитывающий ухудшение условий растекания тока молнии вследствие взаимного экранирования электродов.

Импульсные коэффициенты даже для конкретного расположения и размеров электродов не являются величиной постоянной и зависят от амплитуды тока, удельного сопротивления и пробивной напряженности грунта.

Усредненные значения  $\delta_n$  и  $\eta_n$  для некоторых конструкций заземлителей приведены в таблице 3.3.

Расчет сопротивления заземлителя начинается с определения сопротивления железобетонного фундамента по формулам (3.1) и (3.4).

Поскольку импульсное сопротивление фундамента, как правило, больше допустимого значения заземлителя ( $R_3 = 10$  Ом), то возникает необходимость сооружения дополнительного (искусственного) заземлителя. Параллельное соединение сопротивления фундамента и искусственного заземлителя не должно превышать 10 Ом. Поэтому импульсное сопротивление искусственного заземлителя вычисляется по следующей формуле:

$$R_{ин} = R_{фн} R_3 / (R_{фн} - R_3) = 10 R_{фн} / (R_{фн} - 10). \quad (3.5)$$

В качестве искусственного заземлителя в грунте с удельным сопротивлением  $\rho = (100-200)$  Ом·м следует выбрать наиболее простой искусственный заземлитель, состоящий из двух горизонтальных полос шириной 0,04 м и длиной по 5-10 м, симметрично расходящихся от точки присоединения токоотвода и расположенных на глубине 0,5 м.

Импульсное сопротивление такого заземлителя вычисляется по формулам (3.2), (3.4) и равно:

$$R_{ин} = [(\rho/\pi l) \ln(1,5l/\sqrt{bt})] \delta_n / \eta_n n. \quad (3.6)$$

Значения коэффициентов  $\delta_n$ ,  $\eta_n$  выбирается по таблице 3.3.

Таблица 3.3

Заземлитель	$\eta_n$	$\delta_n$ при удельном сопротивлении $\rho$ , Ом·м		
		100 (глина, чернозем)	200 (суглинок)	500 (супесок)
Вертикальные стержни, соединенные полосой (расстояние между стержнями вдвое больше их длины) в количестве: 2-4 8 15	0,75			
		0,5	0,45	0,3
		0,7	0,55	0,4
		0,8	0,7	0,55
Две горизонтальные полосы длиной по 5 м, расходящиеся в противоположные стороны от точки присоединения	1,0	0,65	0,55	0,45



Если импульсное сопротивление искусственного заземлителя в виде полос

$$R_{\text{пи}} \leq R_{\text{ии}}, \quad (3.7)$$

то общее импульсное сопротивление заземлителя равно:

$$R_{\text{зи}} = R_{\text{фи}} R_{\text{пи}} / (R_{\text{фи}} + R_{\text{пи}}) \leq R_3 = 10 \text{ Ом.}$$

Если неравенство (3.7) не выполняется, то необходимо уменьшить импульсное сопротивление искусственного заземлителя. Для этого следует к горизонтальным полосам присоединить (с помощью сварки) вертикальные стержни в виде труб длиной 2-3 м с диаметром 0,05 см. Трубы к полосам присоединять на расстоянии вдвое больше их длины.

Импульсное сопротивление вертикальных труб вычисляется по формулам (3.3), (3.4) и равно:

$$R_{\text{три}} = (\rho / 2\pi l) \ln \{ [4l(2t+l)] / [d(4t+l)] \} \delta_{\text{и}} / \eta_{\text{и}} n. \quad (3.8)$$

Значения коэффициентов  $\delta_{\text{и}}$ ,  $\eta_{\text{и}}$  выбирается по таблице 3.3.

Изменяя количество или длину труб, необходимо добиться, чтобы параллельное соединение  $R_{\text{пи}}$  и  $R_{\text{три}}$  было меньше или равно  $R_{\text{ии}}$ . Тогда:

$$R_{\text{зи}} = R_{\text{фи}} R_{\text{пи}} R_{\text{три}} / (R_{\text{фи}} R_{\text{пи}} + R_{\text{фи}} R_{\text{три}} + R_{\text{три}} R_{\text{пи}}) \leq R_3 = 10 \text{ Ом.} \quad (3.9)$$

Расчет импульсного сопротивления заземлителя по приведенной методике дает оценочный результат. Более полный расчет сопротивления заземлителей приведен в [6]. Но надо отметить, что сопротивление грунта – величина переменная не только по глубине расположения элементов заземлителя, но оно изменяется в течение сезона грозовой деятельности в разной степени в разных районах страны.

При измерениях удельного сопротивления грунта вводят так называемый сезонный коэффициент, который может изменяться от 1,4 до 2,6. Поэтому точные расчеты импульсных сопротивлений заземлителей на практике применяются редко.

Пространство вблизи молниеотвода, защищенное от попаданий молнии, называется его зоной защиты.

Зоны защиты молниеотводов установлены на основе лабораторных испытаний, надежность их подтверждена многолетним опытом эксплуатации. Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода высотой  $H \leq 30$  м представляет собой круговой конус с вершиной на высоте  $0,9H$ , сечение которого на высоте  $h_x$  имеет радиус  $r_x$ . (рисунок 3.1).

Для объектов высотой  $h_x \leq 20$  м радиус  $r_x$  вычисляется по формуле:

$$r_x = 1,5 (H - h_x / 0,92). \quad (3.10)$$

При прохождении тока по молниеотводу создается падение напряжения на сопротивлении заземлителя  $R_3$  и на индуктивности токоотвода. При средней крутизне фронта тока молнии:

$$\alpha_{\text{ср}} = I_{\text{м}} / \tau_{\text{ф}}. \quad (3.11)$$

Максимальный потенциал в точке молниеотвода на расстоянии  $h_x = h$  от заземлителя, то есть на высоте защищаемого объекта, наступает в момент максимума тока молнии:

$$U_{h_x} = R_3 I_{\text{м}} + L_0 h \alpha_{\text{ср}}, \quad (3.12)$$

где  $L_0$  – индуктивность единицы длины молниеотвода, зависящая от конструкции токоотвода.

Защищаемый объект должен полностью входить в зону защиты молниеотводов. Вместе с тем он должен располагаться на определенном расстоянии от них. Если это расстояние меньше допустимого, то при ударах молнии могут происходить перекрытия с частями молниеотвода на защищаемый объект. При установке отдельно стоящего стержневого молниеотвода должно соблюдаться безопасное расстояние по воздуху и в земле от молниеотвода и его заземлителей до элементов защищаемого объекта.

Минимально допустимое расстояние по воздуху  $l_{\text{мин.в}}$  от молниеотвода до защищаемого объекта рассчитывается с учетом допустимой напряженности электрического поля  $E = 500$  кВ/м, но не меньше 5 м:

$$l_{\text{мин.в}} = (R_3 I_M + L_0 h \alpha_{\text{ср}}) / 500 \geq 5 \text{ м.} \quad (3.13)$$

Максимальный потенциал в точке молниеотвода на уровне земли наступает также в момент максимума тока молнии и равен:

$$U_3 = R_3 I_M.$$

Минимальное расстояние в земле  $l_{\text{мин.з}}$  между заземлителем и ближайшей к нему точкой заземления защищаемого объекта рассчитывается с учетом допустимой напряженности электрического поля в земле  $E = 300$  кВ/м, но не меньше 3 м:

$$l_{\text{мин.з}} = R_3 I_M / 300 \geq 3 \text{ м.} \quad (3.14)$$

Радиус защищаемой зоны молниеотвода на высоте защищаемого объекта  $h$  определяется с помощью теоремы Пифагора (рисунок 3.1):

$$r_X = \sqrt{(l_{\text{мин}} + a)^2 + b/2^2} \quad (3.15)$$

Зная радиус защищаемой зоны и высоту защищаемого объекта, высоту молниеотвода  $H$  определяют из соотношения (3.10):

$$H = (r_X / 1,5) + 1,09h. \quad (3.16)$$

В электроэнергетике часто принимают расчетные значения тока молнии и средней крутизны его фронта, соответственно, 60 кА и 30 кА/мкс, а индуктивность единицы длины токоотвода  $L_0 = 1,7$  мкГн/м. Если в (3.13) и (3.14) подставить эти значения, то получим:

$$l_{\text{мин.в}} = 0,12 R_3 + 0,1h;$$

$$l_{\text{мин.з}} = 0,2 R_3.$$

Отметим, что на практике иногда приходится по известным  $l_{\text{мин.з}}$ ,  $l_{\text{мин.в}}$  и  $h$  находить по вышеприведенным формулам величину сопротивления заземления, обеспечивающую безопасность сближения молниеотвода и защищаемого объекта.

#### **Последовательность расчета:**

1. В расчетно-пояснительной записке привести условие задачи и исходные данные выбранного варианта. Нарисовать схему расположения молниеотвода и защищаемого объекта.

2. Рассчитать импульсное сопротивление фундамента молниеотвода по формулам (3.1) и (3.4). Импульсный коэффициент для сопротивления фундамента вне зависимости от сопротивления грунта принять  $\delta_{иф} = 0,8$ , а глубину нижнего конца фундамента  $t = h_{\phi}$ .

3. Рассчитать необходимое импульсное сопротивление искусственного заземлителя по формуле (3.5).

4. Рассчитать импульсное сопротивление, состоящее из двух горизонтальных полос по формуле (3.6) и по неравенству (3.7) сделать вывод о достаточности этого сопротивления.

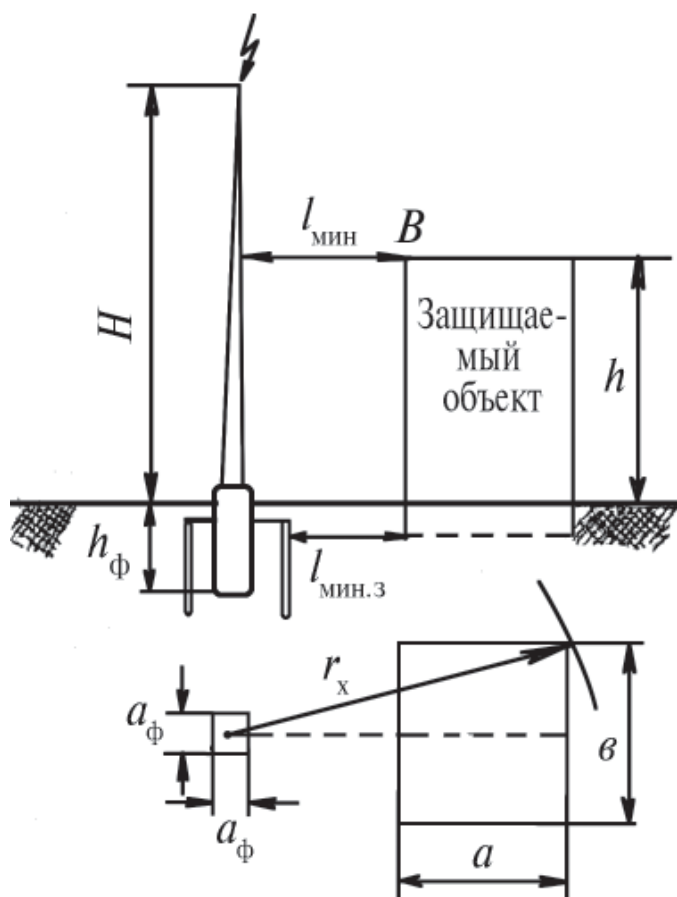
5. Если неравенство (3.7) не выполняется, изменяя количество или длину труб, продолжить расчет импульсного сопротивления искусственного заземлителя по формуле (3.8) до тех пор, пока не будет выполняться неравенство (3.9).

6. Рассчитать минимально допустимые расстояния от молниеотвода до защищаемого объекта по формулам (3.13) и (3.14), радиус зоны защиты  $r_x$  на высоте объекта  $h$  по формуле (3.15) и высоту молниеотвода  $H$  по формуле (3.16). При расчете по формуле (3.13) принять, что  $L_0 = 1 \cdot 10^6$  Гн/м,  $\alpha_{ср}$  вычислить по формуле (3.11).

7. Начертить эскиз контура заземления совместно с защищаемым объектом. На эскизе показать сечение зоны защиты стержневого молниеотвода и взаимное расположение защищаемого объекта и искусственных заземлителей с учетом результатов, полученных в п. 6.

### Пример расчета

1. В расчетно-пояснительной записке привести условие задачи и исходные данные выбранного варианта. Нарисовать схему расположения молниеотвода и защищаемого объекта.



2. Рассчитать импульсное сопротивление фундамента молниеотвода по формулам (3.1) и (3.4). Импульсный коэффициент для сопротивления фундамента вне зависимости от сопротивления грунта принять  $\delta_{иф} = 0,8$ , а глубину нижнего конца фундамента  $t = h_{\phi}$ .

Сопротивление железобетонного фундамента равно:

$$R_{\phi} = 1,7(p/2\pi t)\ln(4t/b) = 1,7(200/2\pi \cdot 3,2)$$

$$\ln(4 \cdot 3,2/4,2) = 16,9 \ln(3,04) = 18,8 \text{ Ом.}$$

Импульсное сопротивление равно:

$$R_{\phi} = \delta_u r / \eta_u n = 0,8 \cdot 18,8 / 1,0 \cdot 1 = 15,04 \text{ Ом.}$$

3. Рассчитать необходимое импульсное сопротивление искусственного заземлителя:

$$R_{\text{ун}} = R_{\phi u} R_3 / (R_{\phi n} - R_3) = 10 R_{\phi n} / (R_{\phi n} - 10) = 29,8 \text{ Ом.}$$

4. Рассчитать импульсное сопротивление, состоящее из двух горизонтальных полос:

$$R_n = (p/\pi L) \ln(1,5/\sqrt{bt}) = (200/\pi 5) \ln(1,5 \cdot 5/\sqrt{0,004 \cdot 0,5}) = 50,58 \text{ Ом,}$$

$$R_{\text{ну}} = R_n \delta_u / n_u n = 50,58 \cdot 0,8 / 1 \cdot 2 = 20,23 \text{ Ом, где } R_{\text{ну}} \leq R_{\text{ун}};$$

$$20,23 \text{ Ом} \leq 29,8 \text{ Ом} - \text{достаточное сопротивление.}$$

5. Если неравенство (3.7) не выполняется, изменяя количество или длину труб, продолжить расчет импульсного сопротивления искусственного заземлителя по формуле (3.8) до тех пор, пока не будет выполняться неравенство (3.9).

6. Рассчитать минимально допустимые расстояния от молниеотвода до защищаемого объекта:

$$L_{\text{мин}} b = (R_3 \cdot I_M + L_0 h \alpha_{\text{ср}}) / 500 = (10 \cdot 30 \cdot 10^3 + 10^{-6} \cdot 10,5 \cdot 3 \cdot 10) / 500 = 1,23 \cdot 10^3 \geq 5 \text{ м.}$$

$$U_3 = R_3 I_M = 10 \cdot 30 \cdot 10^3 = 300 \text{ кВ.}$$

$$L_{\text{мин.з.}} = R_3 I_M / 300 = 10 \cdot 30 \cdot 10^3 / 300 = 1 \text{ м.}$$

Радиус защиты  $r_x$  на высоте объекта  $h$  равен:

$$r_x = \sqrt{a^\alpha + b^\alpha} = \sqrt{4^\alpha + 4,2^\alpha} = 5,8 \text{ м/}$$

Высота молниеотвода  $H$  равна:

$$H = (r_x / 1,5) + 1,09 h = (5,8 / 1,5) + 1,09 \cdot 10,5 = 15,3 \text{ м.}$$

7. Начертить эскиз контура заземления совместно с защищаемым объектом.

## ВОПРОСЫ К ЗАЩИТЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ № 1

1. Какие основные стадии проходит разряд молнии?
2. Что такое грозовые перенапряжения и почему они возникают?
3. Как влияет величина заземления опоры на значение перенапряжения?
4. Из каких составляющих складывается индуктированное перенапряжение?
5. Как определяется кратность перенапряжения?
6. Как определяется вероятность перекрытия изоляции при грозовых перенапряжениях?
7. Когда возникают наибольшие перенапряжения на ВЛ при ударе молнии?
8. Из чего состоит молниеотвод?
9. Что такое естественные и искусственные заземлители?
10. Что такое стационарное и импульсное сопротивление заземлителя?
11. Что такое коэффициент использования заземлителя и от чего он зависит?
12. Как определяются минимально допустимые расстояния от молниеотвода до защищаемого объекта?
13. Что такое зона защиты молниеотвода и как она определяется?
14. Как учитывается сезонное изменение сопротивление грунта?

## РЕКОМЕНДОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах: Учебник для вузов/Под общ. ред. В.П. Ларионова – М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Радченко В.Д. Техника высоких напряжений устройств электрической тяги. – М.: Транспорт, 1975.

3. Ларионов В.П. Основы молниезащиты. – М.: Знак, 1999.
4. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. – М.: Физматлит, 2001.
5. Правила устройств электроустановок. Разд. 1. 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.
6. Рябкова Е.Я. Заземления в установках высокого напряжения. – М.: Энергия, 1978.
7. Серебряков А.С. Техника высоких напряжений. Перенапряжения в электрических системах и защита от них: Уч. пос. – М.: РГОТУПС, 2000.
8. Ограничители перенапряжений в электроустановках 6-750 кВ. Методическое и справочное пос./Под ред. М.А. Аронова. – М.: Знак, 2001.
9. Серебряков А.С. Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы: Уч. пос. для вузов ж.д. транспорта. – М.: Маршрут, 2005.
10. Серебряков А.С. Техника высоких напряжений. Профилактический контроль и испытания изоляции: Уч. пос. – М.: РГОТУПС, 1997.
11. ГОСТ 1516.2-97 Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции.



Негосударственное образовательное учреждение  
высшего образования  
Московский технологический институт

---

Факультет Техники и современных технологий  
Кафедра Энергетики  
Уровень образования Бакалавриат  
Направление Электроэнергетика и электротехника  
Профиль \_\_\_\_\_

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 1  
по дисциплине: «Техника высоких напряжений»

Выполнил:  
Студент \_\_\_ курса  
\_\_\_\_\_ формы обучения  
ИНС: \_\_\_\_\_  
(ФИО)  
Проверил \_\_\_\_\_  
(ФИО)

Москва 201\_\_ г.

**Таблица значений критерия Стьюдента (t-критерия)**

Таблица П – Критические значения коэффициента Стьюдента (*t*-критерия) для различной доверительной вероятности *p* и числа степеней свободы *f*

<i>f</i>	<i>p</i>							
	0.80	0.90	0.95	0.98	0.99	0.995	0.998	0.999
1	3.0770	6.3130	12.7060	31.820	63.656	127.656	318.306	636.619
2	1.8850	2.9200	4.3020	6.964	9.924	14.089	22.327	31.599
3	1.6377	2.35340	3.182	4.540	5.840	7.458	10.214	12.924
4	1.5332	2.13180	2.776	3.746	4.604	5.597	7.173	8.610
5	1.4759	2.01500	2.570	3.649	4.0321	4.773	5.893	6.863
6	1.4390	1.943	2.4460	3.1420	3.7070	4.316	5.2070	5.958
7	1.4149	1.8946	2.3646	2.998	3.4995	4.2293	4.785	5.4079
8	1.3968	1.8596	2.3060	2.8965	3.3554	3.832	4.5008	5.0413
9	1.3830	1.8331	2.2622	2.8214	3.2498	3.6897	4.2968	4.780
10	1.3720	1.8125	2.2281	2.7638	3.1693	3.5814	4.1437	4.5869
11	1.363	1.795	2.201	2.718	3.105	3.496	4.024	4.437
12	1.3562	1.7823	2.1788	2.6810	3.0845	3.4284	3.929	4.178
13	1.3502	1.7709	2.1604	2.6503	3.1123	3.3725	3.852	4.220
14	1.3450	1.7613	2.1448	2.6245	2.976	3.3257	3.787	4.140
15	1.3406	1.7530	2.1314	2.6025	2.9467	3.2860	3.732	4.072
16	1.3360	1.7450	2.1190	2.5830	2.9200	3.2520	3.6860	4.0150
17	1.3334	1.7396	2.1098	2.5668	2.8982	3.2224	3.6458	3.965
18	1.3304	1.7341	2.1009	2.5514	2.8784	3.1966	3.6105	3.9216
19	1.3277	1.7291	2.0930	2.5395	2.8609	3.1737	3.5794	3.8834
20	1.3253	1.7247	2.08600	2.5280	2.8453	3.1534	3.5518	3.8495
21	1.3230	1.7200	2.2.0790	2.5170	2.8310	3.1350	3.5270	3.8190
22	1.3212	1.7117	2.0739	2.5083	2.8188	3.1188	3.5050	3.7921
23	1.3195	1.7139	2.0687	2.4999	2.8073	3.1040	3.4850	3.7676
24	1.3178	1.7109	2.0639	2.4922	2.7969	3.0905	3.4668	3.7454
25	1.3163	1.7081	2.0595	2.4851	2.7874	3.0782	3.4502	3.7251
26	1.315	1.705	2.059	2.478	2.778	3.0660	3.4360	3.7060
27	1.3137	1.7033	2.0518	2.4727	2.7707	3.0565	3.4210	3.6896
28	1.3125	1.7011	2.0484	2.4671	2.7633	3.0469	3.4082	3.6739
29	1.3114	1.6991	2.0452	2.4620	2.7564	3.0360	3.3962	3.8494
30	1.3104	1.6973	2.0423	2.4573	2.7500	3.0298	3.3852	3.6460

<b>32</b>	1.3080	1.6930	2.0360	2.4480	2.7380	3.0140	3.3650	3.6210
<b>34</b>	1.3070	1.6909	2.0322	2.4411	2.7284	3.9520	3.3479	3.6007
<b>36</b>	1.3050	1.6883	2.0281	2.4345	2.7195	9.490	3.3326	3.5821
<b>38</b>	1.3042	1.6860	2.0244	2.4286	2.7116	3.9808	3.3190	3.5657
<b>40</b>	1.303	1.6839	2.0211	2.4233	2.7045	3.9712	3.3069	3.5510
<b>42</b>	1.320	1.682	2.018	2.418	2.6980	2.6930	3.2960	3.5370
<b>44</b>	1.301	1.6802	2.0154	2.4141	2.6923	3.9555	3.2861	3.5258
<b>46</b>	1.300	1.6767	2.0129	2.4102	2.6870	3.9488	3.2771	3.5150
<b>48</b>	1.299	1.6772	2.0106	2.4056	2.6822	3.9426	3.2689	3.5051
<b>50</b>	1.298	1.6759	2.0086	2.4033	2.6778	3.9370	3.2614	3.4060
<b>55</b>	1.2997	1.673	2.0040	2.3960	2.6680	2.9240	3.2560	3.4760
<b>60</b>	1.2958	1.6706	2.0003	2.3901	2.6603	3.9146	3.2317	3.4602
<b>65</b>	1.2947	1.6686	1.997	2.3851	2.6536	3.9060	3.2204	3.4466
<b>70</b>	1.2938	1.6689	1.9944	2.3808	2.6479	3.8987	3.2108	3.4350
<b>80</b>	1.2820	1.6640	1.9900	2.3730	2.6380	2.8870	3.1950	3.4160
<b>90</b>	1.2910	1.6620	1.9867	2.3885	2.6316	2.8779	3.1833	3.4019
<b>100</b>	1.2901	1.6602	1.9840	2.3642	2.6259	2.8707	3.1737	3.3905
<b>120</b>	1.2888	1.6577	1.9719	2.3578	2.6174	2.8598	3.1595	3.3735
<b>150</b>	1.2872	1.6551	1.9759	2.3515	2.6090	2.8482	3.1455	3.3566
<b>200</b>	1.2858	1.6525	1.9719	2.3451	2.6006	2.8385	3.1315	3.3398
<b>250</b>	1.2849	1.6510	1.9695	2.3414	2.5966	2.8222	3.1232	3.3299
<b>300</b>	1.2844	1.6499	1.9679	2.3388	2.5923	2.8279	3.1176	3.3233
<b>400</b>	1.2837	1.6487	1.9659	2.3357	2.5882	2.8227	3.1107	3.3150
<b>500</b>	1.2830	1.6470	1.9640	2.3330	2.7850	2.8190	3.1060	3.3100