

11/3/2

Одобрено кафедрой  
«Энергоснабжение электрических  
железных дорог»

## ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Задание на контрольную работу  
с методическими указаниями  
для студентов IV курса

специальности  
190401 ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ЭНС)



Москва — 2006

Составитель — канд. техн. наук, доц. А.Ф. Харченко

Рецензент — д-р техн. наук, проф. А.С. Серебряков

© Российский государственный открытый технический университет путей сообщения, 2006

## ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Контрольная работа по дисциплине «Техника высоких напряжений» состоит из четырех задач, в которых рассматриваются методы расчета: грозовых перенапряжений, защиты объектов с помощью одиночных стержневых молниеотводов, защиты высоковольтного оборудования подстанции с помощью вентильных разрядников и методы профилактического контроля старения внутренней изоляции.

Перед выполнением контрольной работы необходимо рассмотреть задание на контрольную работу и изучить методические указания к выполнению задач. Для более детального изучения теоретического материала следует использовать рекомендованную в методических указаниях литературу.

Номер варианта и соответствующие исходные данные для расчета выбираются по двум последним цифрам учебного шифра студента и приводятся в условиях на каждую задачу.

При выполнении контрольной работы необходимо соблюдать следующие правила:

- контрольная работа оформляется в виде расчетно-пояснительной записки в соответствии с общими требованиями к подобным документам;

- графический материал и эскизы желательно выполнять на миллиметровой бумаге в формате А4 (210×297);

- графики должны иметь наименование. В прямоугольной системе координат независимую переменную (аргумент) следует откладывать по горизонтальной оси, а функцию этого аргумента — по вертикальной оси;

- расшифровку каждого условного обозначения приводить в каждой задаче один раз при его первом использовании;

- при выполнении расчетов необходимо вначале привести расчетную формулу, сделать подстановку численных значений величин, входящих в формулу и затем записать результат с указанием размерности;

- в качестве пояснений не следует переписывать тексты методических указаний.

Для выполнения трудоемких по времени расчетов желатель-

но составить программу для ЭВМ, привести ее текст, подробный расчет первых двух значений, а все результаты дать в виде таблицы и графика.

Результаты расчета достаточно приводить с тремя-четырьмя значащими цифрами.

### **ЗАДАЧА №1. РАСЧЕТ ГРОВОНЫХ 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  $I_{\text{м}}$  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 «а» от ВЛ.

Значения всех переменных параметров для соответствующих вариантов приведены в табл. 1.1 и 1.2.

Таблица 1.1

Показатели	Вариант (предпоследняя цифра шифра)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
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	120
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 1.2

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

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАЧИ № 1

### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

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 индуктируют на поверхности земли и на расположенных на ней объектах заряды другого знака.

Когда канал лидера соединяются 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 [1; 2; 3; 4].

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, т.е. 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

$$\alpha_{cp} = I_M / \tau_{\phi}, \quad (1.1)$$

где  $\tau_{\phi}$  — 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

$$U_{оп} = R_3 I_M + L_o h \alpha_{cp}, \quad (1.2)$$

где  $R_3$  — импульсное сопротивление заземления опоры;  
 $I_M$  — амплитуда тока молнии;  
 $L_o$  — 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

$$U_{\text{пр}} = I Z_{\text{м пр}} / 2, \quad (1.3)$$

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

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.

Рассмотрим в упрощенной форме, как возникает электрическая составляющая индуктированного перенапряжения (рис. 1.1). При развитии лидерного канала молнии  $I$  вблизи ВЛ заряды канала молнии вызывают (наводят) на проводах 2 заряды противоположного знака (явление электрической индукции). Во время главного разряда, т.е. 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.

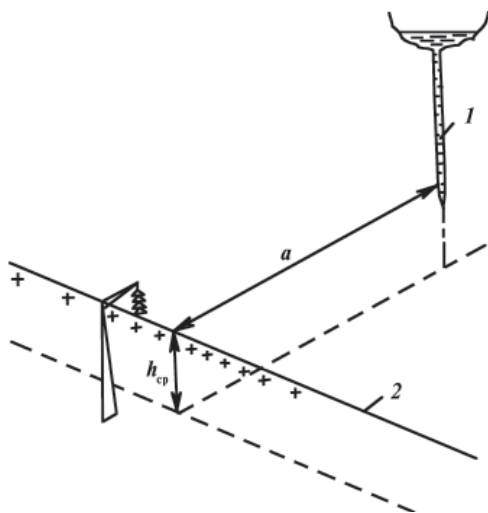


Рис. 1.1. К объяснению образования индуктированных перенапряжений:

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

Максимальное значения  $U_{\text{из}}$  прямо пропорционально амплитуде тока и средней высоте подвеса провода ( $h_{\text{ср}}$ ) и обратно пропорционально кратчайшему расстоянию « $a$ » от провода до точки удара молнии.

$$U_{\text{из}} = k_{\text{э}} h_{\text{ср}} I_{\text{м}} / a, \quad (1.4)$$

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

$$h_{\text{cp}} = h - 2f/3, \quad (1.5)$$

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  $U_{\text{им}}$  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  $k_m$ .

$$U_{\text{им}} = k_m h_{\text{cp}} I_m / a, \quad (1.6)$$

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

**Максимальное значение индуктированного напряжения равно [1]**

$$U_{\text{инд}} = U_{\text{из}} + U_{\text{им}} = (k_3 + k_m) h_{\text{cp}} I_m / a \approx 30 h_{\text{cp}} I_m / a. \quad (1.7)$$

Значения перенапряжений полученных по формулам (1.2), (1.3), (1.7) 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, увеличива-



ют разность потенциалов на изоляции, что второе слагаемое в формуле (1.2) 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

$$U_{\text{п}}/U_{\text{ф}} = U_{\text{п}}\sqrt{3} / U\sqrt{2}, \quad (1.8)$$

где  $U_{\text{п}}$  — 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 ( $U_{\text{оп}}$ ), ( $U_{\text{пр}}$ ), ( $U_{\text{инд}}$ ) с заданной импульсной прочностью изоляции ( $U_{\text{и}}$ ).

Перекрытие изоляции произойдет если:

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

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

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

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:

- в опору —  $I_3 = U_{\text{и}} / R_3$ ;
- в провод —  $I_3 = U_{\text{и}} / (Z_{\text{пр}} / 2)$ ;
- на расстоянии « $a$ » —  $I_3 = a \cdot U_{\text{и}} / 30 h_{\text{ср}}$ .

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 [1]

$$P(I_x) = \exp(-0,04 I_x). \quad (1.9)$$

Следовательно, **вероятность перекрытия изоляции** ВЛ при ударе молнии:

- в опору —  $P_{\text{пер.оп}} = P(I_3) = \exp(-0,04 U_{\text{и}} / R_3). \quad (1.10)$

- в провод —  $P_{\text{пер.пр}} = P(I_3) = \exp[-0,04 U_{\text{и}} / (Z_{\text{пр}}/2)]. \quad (1.11)$

- на расстоянии «а»

$$P_{\text{пер.инд}} = P(I_3) = \exp(-0,04 a \cdot U_{\text{и}} / 30 h_{\text{ср}}). \quad (1.12)$$

В формулах (1.9) ÷ (1.12) ток  $I_x$  и  $I_3$  в кА.

### **Порядок выполнения и оформления задачи**

1.1. В расчетно-пояснительной записке привести условие задачи и исходные данные выбранного варианта.

1.2. Вычислить величину перенапряжения на ВЛ при ударе молнии в опору, в провод и на заданном расстоянии от ВЛ по формулам (1.2), (1.3) и (1.7).

1.3. Вычислить кратность перенапряжения изоляции ВЛ при ударе молнии в опору, в провод и на заданном расстоянии от ВЛ по формуле (1.8).

1.4. Вычислить вероятность перекрытия изоляции во время разряда молнии в опору, в провод и на заданном расстоянии от ВЛ по формулам (1.10), (1.11) и (1.12).

1.5. Данные, полученные в п.п. 1.2, 1.3 и 1.4, свести в таблицу и дать заключение о наиболее уязвимом месте удара молнии.

### **Вопросы для самоподготовки к защите контрольной работы**

- 1.1. Какие основные стадии проходит разряд молнии?
- 1.2. Что такое грозовые перенапряжения и почему они возникают?
- 1.3. Как влияет величина заземления опоры на значение перенапряжения?

1.4. Из каких составляющих складывается индуктированное перенапряжение?

1.5. Как определяется кратность перенапряжения?

1.6. Как определяется вероятность перекрытия изоляции при грозовых перенапряжениях?

1.7. Когда возникают наибольшие перенапряжения на ВЛ при ударе молнии?

### ЗАДАЧА №2. 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  $\tau_\phi = 10^{-6}$  с установлен одиночный молниеотвод. Глубина нижнего конца фундамента молниеотвода от поверхности земли  $h_\phi = 3,2$  м, ширина фундамента  $a_\phi = 0,8$  м, удельное сопротивление земли  $\rho$ , Ом·м. Схема расположения молниеотвода и защищаемого объекта приведена на рис. 2.1.

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.

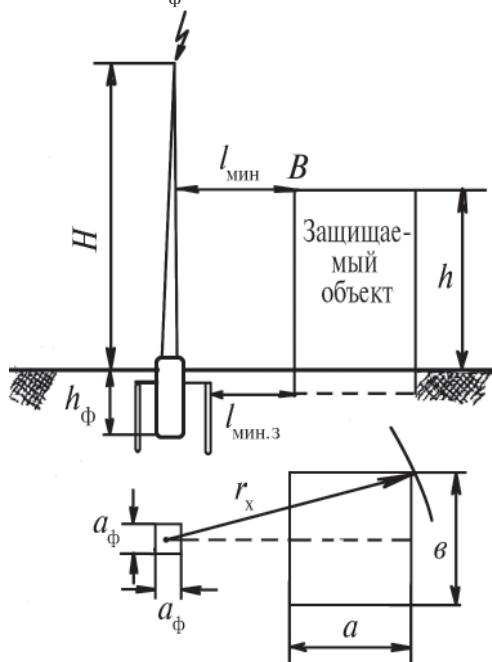


Рис. 2.1. Схема расположения молниеотвода и защищаемого объекта

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 табл. 2.1 и 2.2.

Таблица 2.1

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

Таблица 2.2

Показатели	Вариант (предпоследняя цифра шифра)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ширина объекта $a, \text{м}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8
Длина объекта $b, \text{м}$	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
Высота объекта $h, \text{м}$	12	11	10	9,5	9,0	10,5	12,5	11,5	8,5	8,0

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАЧИ № 2

### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

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  $(0,4 \div 1,7)10^{-6} \text{ Гн/м}$ .

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 [5].

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 [1]:

- сопротивление железобетонного фундамента

$$R_{\phi} = 1,7(\rho / 2\pi t) \ln(4t / b); \quad (2.1)$$

- сопротивление горизонтальной полосы

$$R_{\pi} = (\rho / \pi \ell) \ln(1,5 \cdot \ell / \sqrt{b\ell}); \quad (2.2)$$

- сопротивление вертикальной трубы или стержня

$$R_{\text{тр}} = (\rho / 2\pi \ell) \ln\{[4\ell (2t + \ell)] / [d (4t + \ell)]\}, \quad (2.3)$$

где  $\ell$  — 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 (2.1), (2.2), (2.3) сопротивления заземлителей называют стационарными.

При прохождении через заземлитель импульса тока молнии сопротивление заземлителя отличается от рассчитанного по формулам (2.1), (2.2), (2.3), 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  $\delta_{и}$ .

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

$$R_{и} = \delta_{и} R / \eta_{и} n, \quad (2.4)$$

где  $\eta_{и}$  — 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  $\delta_{и}$  и  $\eta_{и}$  для некоторых конструкций заземлителей приведены в табл. 2.3 [1; 2].

Расчет сопротивления заземлителя начинается с определения сопротивления железобетонного фундамента по формулам (2.1) и (2.4).

Поскольку импульсное сопротивление фундамента, как правило, больше допустимого значения заземлителя ( $R_3 = 10$  Ом), то возникает необходимость сооружения дополнительного (искусственного) заземлителя. Параллельное соединение сопро-

Таблица 2.3

Заземлитель	$\eta_{и}$	$\delta_{и}$ 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 токоотвода	1,0	0,65	0,55	0,45

тивления фундамента и искусственного заземлителя не должно превышать 10 Ом. Поэтому **импульсное сопротивление искусственного заземлителя** вычисляется по следующей формуле

$$R_{ин} = R_{фи} \cdot R_3 / (R_{фи} - R_3) = 10 R_{фи} / (R_{фи} - 10). \quad (2.5)$$

В качестве искусственного заземлителя в грунте с удельным сопротивлением  $\rho = (100 \div 200)$  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 (2.2), (2.4) и равно

$$R_{ин} = [(\rho/\pi\ell)\ln(1,5\ell/\sqrt{bt})] \delta_{и} / \eta_{и} n. \quad (2.6)$$

Значения коэффициентов  $\delta_{и}$ ,  $\eta_{и}$  выбирается по **табл. 2.3.**

Если импульсное сопротивление искусственного заземлителя в виде полос

$$R_{\text{пи}} \leq R_{\text{ии}}, \quad (2.7)$$

то общее импульсное сопротивление заземлителя

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

Если неравенство (2.7) 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 (2.3), (2.4) и равно

$$R_{\text{три}} = (\rho / 2\pi\ell) \ln\{[4\ell(2t+\ell)]/[d(4t+\ell)]\} \delta_{\text{и}} / \eta_{\text{и}} n. \quad (2.8)$$

Значения коэффициентов  $\delta_{\text{и}}$ ,  $\eta_{\text{и}}$  выбирается по табл. 2.3.

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

$$R_{\text{зи}} = R_{\text{фи}} R_{\text{пи}} R_{\text{три}} / (R_{\text{фи}} R_{\text{пи}} + R_{\text{фи}} R_{\text{три}} + R_{\text{три}} R_{\text{пи}}) \leq R_{\text{з}} = 10 \text{ Ом.} \quad (2.9)$$

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 попадания молнии, называется его зоной защиты.

Зоны защиты молниеотводов установлены на основе лабораторных испытаний, и 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  $r_x$ . (см.рис. 2.1)

Для объектов высотой  $h_x \leq 20$  м радиус  $r_x$  вычисляется по формуле [1]

$$r_x = 1,5 (H - h_x / 0,92). \quad (2.10)$$

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

$$\alpha_{cp} = I_m / \tau_{\phi}. \quad (2.11)$$

Максимальный потенциал в точке молниеотвода на расстоянии  $h_x = h$  от заземлителя, т.е. на высоте защищаемого объекта, наступает в момент максимума тока молнии

$$U_{hx} = R_3 I_m + L_0 h \alpha_{cp}, \quad (2.12)$$

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  $\ell_{мин.в}$  от молниеотвода до защищаемого объекта рассчитывается с учетом

допустимой напряженности электрического поля  $E = 500 \text{ кВ/м}$ , но не меньше 5 м.

$$\ell_{\text{мин.в}} = (R_3 I_M + L_o h \alpha_{\text{ср}}) / 500 \geq 5 \text{ м.} \quad (2.13)$$

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

$$\ell_{\text{мин.з}} = R_3 I_M / 300 \geq 3 \text{ м.} \quad (2.14)$$

**Радиус защищаемой зоны** молниеотвода на высоте защищаемого объекта  $h$  определяется, используя теорему Пифагора (см. рис 2.1),

$$r_x = \sqrt{(\ell_{\text{мин.в}} + a)^2 + (s/2)^2}. \quad (2.15)$$

Зная радиус защищаемой зоны и высоту защищаемого объекта, высоту молниеотвода  $H$  определяют из соотношения (2.10)

$$H = (r_x / 1,5) + 1,09h. \quad (2.16)$$

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  $L_o = 1,7 \text{ мкГн/м}$ . Если в (2.13) и (2.14) подставить эти значения то

$$\ell_{\text{мин.в}} = 0,12 R_3 + 0,1h, \text{ а } \ell_{\text{мин.з}} = 0,2 R_3.$$

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

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЗАДАЧИ

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

2.2. Рассчитать импульсное сопротивление фундамента молниеотвода по формулам (2.1) и (2.4). Импульсный коэффициент для сопротивления фундамента вне зависимости от сопротивления грунта принять  $\delta_{\text{иф}}=0,8$ , а глубина нижнего конца фундамента  $t = h_{\text{ф}}$ .

2.3. Рассчитать необходимое импульсное сопротивление искусственного заземлителя по формуле (2.5).

2.4. Рассчитать импульсное сопротивление, состоящее из двух горизонтальных полос по формуле (2.6) и по неравенству (2.7) сделать вывод о достаточности этого сопротивления.

2.5. Если неравенство (2.7) не выполняется, изменяя количество или длину труб продолжить расчет импульсного сопротивления искусственного заземлителя по формуле (2.8) до тех пор, пока не будет выполняться неравенство (2.9).

2.6. Рассчитать минимально допустимые расстояния от молниеотвода до защищаемого объекта по формулам (2.13) и (2.14), радиус зоны защиты  $r_x$  на высоте объекта  $h$  по формуле (2.15) и высоту молниеотвода  $H$  по формуле (2.16). При расчете по формуле (2.13) принять, что  $L_o = 1 \cdot 10^{-6}$  Гн/м,  $\alpha_{\text{ср}}$  вычислить по формуле (2.11).

2.7. 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. 2.6.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ К ЗАЩИТЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

2.1. Из чего состоит молниеотвод?

2.2. Что такое естественные и искусственные заземлители?

2.3. Что такое стационарное и импульсное сопротивление заземлителя?

2.4. Что такое коэффициент использования заземлителя и от чего он зависит?

2.5. Как определяются минимально допустимые расстояния от молниеотвода до защищаемого объекта?

2.6. Что такое зона защиты молниеотвода и как она определяется?

2.7. Как учитывается сезонное изменение сопротивление грунта?

### **ЗАДАЧА №3. ЗАЩИТА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПОДСТАНЦИЙ ОТ НАБЕГАЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ ГРОВОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ВЕНТИЛЬНЫХ РАЗРЯДНИКОВ**

*Условие задачи и исходные данные.* Волна перенапряжения  $U_{\text{пад}}$  приходит с линии с волновым сопротивлением  $Z_1$  на высоковольтное оборудование подстанции с волновым сопротивлением  $Z_2$  и минимальным разрядным напряжением  $U_{\text{мин}}$ . Аналитически волна грозового перенапряжения описывается уравнением:

$$U_{\text{пад}}(t) = U [\exp(-t / T_1) - \exp(-t / T_2)], \quad (3.1)$$

где  $T_1, T_2$  и  $U$  — параметры, приведенные в табл. 3.1.

Для защиты высоковольтного оборудования подстанции установлен вентильный разрядник с заданной вольтамперной характеристикой. Числовые значения вольтамперной характеристики разрядника, общие для всех вариантов, приведены в табл. 3.2. Импульсное пробивное напряжение разрядника  $U_{\text{пр}} = 100$  кВ.

Требуется:

1. Определить максимальное напряжение на защищаемом объекте ( $U_{\text{макс.}}$ ).

2. Дать заключение об эффективности применения данного разрядника для защиты высоковольтного оборудования с минимальным разрядным напряжением  $U_{\text{мин}}$ .

Числовые значения переменных параметров для различных вариантов приведены в табл. 3.1 и 3.3.

Таблица 3.1

Показатель	Вариант (предпоследняя цифра шифра)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Напряжение волны $U$ , кВ	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480
Постоянная времени $T_1$ , мкс	40	42	44	46	48	50	53	54	56	58
Постоянная времени $T_2$ , мкс	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95

Таблица 3.2

Ток разрядника $I_p$ , кА	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	1,0	2,0	3,0	5,0	10
Напряжение разрядника $U_p$ , кВ	44	50	54	57	60	72	86	88	94	98

Таблица 3.3

Показатели	Вариант (последняя цифра шифра)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Минимальное разрядное напряжение $U_{мин}$ , кВ	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
Сопrotивление $Z_1$ , Ом	300	330	340	360	380	400	420	440	460	480
Сопrotивление $Z_2$ , Ом	200	250	300	350	400	450	500	300	350	400

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАЧИ №3

### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Молниезащита подстанций включает в себя две отдельных задачи:

- защиту открытого распределительного устройства (ОРУ) от прямых ударов молнии;
- защиту электрооборудования от импульсов грозовых перенапряжений, набегающих с воздушных линий.

Защита электрооборудования ОРУ подстанций от прямых ударов молнии осуществляется с помощью стержневых молниеотводов.

По экономическим соображениям уровень изоляции подстанционного оборудования устанавливается ниже уровня изоляции линии. Поэтому импульсы перенапряжения, образующиеся при ударах молнии в линию и имеющие амплитуду, равную или меньшую импульсному разрядному напряжению линейной изоляции, будут приходиться на подстанционное оборудование и представлять для них опасность.

При воздействии указанного грозового импульса напряжения в схеме подстанции возникает сложный волновой процесс. Даже в простейших схемах расчет напряжения на изоляции электрооборудования весьма громоздок, поэтому исследования молниезащиты подстанций проводятся на ЭВМ или физических моделях.

Практика проектирования и эксплуатации показала, что в инженерных расчетах защиты электрооборудования подстанции с применением защитных аппаратов допустимо применение приближенного подхода. За амплитуду набегающей (падающей) волны принимается амплитуда, равная 50% импульсному разрядному напряжению линейной изоляции.

Для упрощения в данной задаче не учитывается изменение крутизны фронта падающей волны вследствие действия импульсной короны на проводах и принимается, что напряжение на защищаемом объекте равно напряжению на разряднике, т.е. не учитывается повышение напряжения на защищаемом объекте из-за удаленного расположения разрядника.

Основными аппаратами защиты электрооборудования подстанций от набегающих импульсов служат вентильные разрядники (РВ) и ограничители перенапряжения нелинейные (ОПН).

Вентильный разрядник состоит из многократного искрового промежутка и соединенного последовательно с ним резистора с нелинейной вольтамперной характеристикой. Для выравнивания распределения напряжения вдоль искровых промежутков параллельно им включаются шунтирующие резисторы.

При воздействии на РВ импульса перенапряжения проби-

вается искровой промежуток и через разрядник проходит импульсный ток, создающий падение напряжения на нелинейном сопротивлении. Благодаря нелинейности вольтамперной характеристики сопротивление падения напряжения мало меняется при существенном изменении тока, что и обеспечивает ограничение перенапряжения и защиту изоляции оборудования от повреждения.

Одной из основных характеристик РВ является остающееся напряжение  $U_{\text{ост}}$ , представляющее собой падение напряжения на сопротивлении резистора при определенном токе (5÷14 кА в зависимости от типа РВ), который называется током координации.

Остающееся напряжение и близкое к нему по значению импульсное пробивное напряжение многократного искрового промежутка РВ должно быть на 20÷25% ниже разрядного или пробивного напряжения защищаемой изоляции (координационный интервал).

Вслед за импульсным током через РВ проходит сопровождающий ток промышленной частоты. Сопротивление нелинейного резистора при рабочем напряжении резко возрастает, сопровождающий ток существенно ограничивается, и при подходе синусоидального тока к нулевому значению дуга в искровых промежутках гаснет. Наибольшее напряжение промышленной частоты на РВ, при котором надежно обрывается сопровождающий ток (ток гашения), называется напряжением гашения.

К недостаткам РВ можно отнести то, что они имеют большие массогабаритные характеристики, резисторы обладают сравнительно невысокой нелинейностью, имеют сложную конструкцию искровых промежутков с шунтирующими сопротивлениями при ограничении больших перенапряжений. Кроме того, при работе искровых промежутков возникают большие градиенты перенапряжения в индуктивных элементах близкорасположенного оборудования (силовых трансформаторах, реакторах, электрических машинах).

Основным рабочим элементом ограничителей перенапряжения нелинейных (ОПН) является высоконелинейный резистор (варистор). Варисторы выполнены из металлооксидной

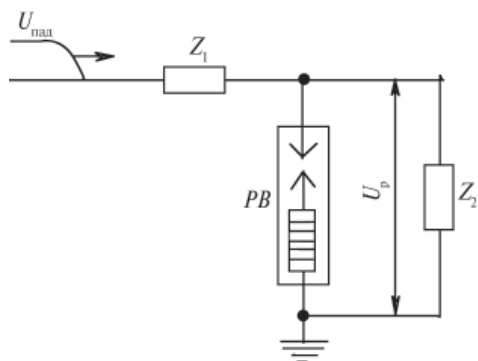
керамики, состоящей на ~90% из окиси цинка и некоторого количества окислов других металлов (висмута, сурьмы, кобальта, марганца и т.п.). Варисторы выпускаются в виде дисков диаметром от нескольких до ста миллиметров и толщиной от единиц до нескольких десятков миллиметров.

В ОПН варисторы собираются последовательно в виде столбов, помещенных в герметичный диэлектрический корпус (фарфоровый или пластмассовый). В ряде случаев такие столбы соединяются параллельно.

В силу очень большой нелинейности вольтамперной характеристики варисторов сопровождающий ток при рабочем напряжении (доли миллиампера) безопасен для защищаемого устройства (ОПН) и не создает заметных потерь энергии. В ОПН отсутствуют искровые промежутки, следовательно, отсутствует понятие напряжения гашения.

Преимуществами ОПН являются возможность глубокого ограничения перенапряжений, в том числе междуфазных, малые габариты, позволяющие использовать их в качестве опорных изоляционных колонн, большая пропускная способность.

Однако при постоянном нахождении ОПН под напряжением возникает проблема обеспечения тепловой устойчивости при



длительных повышении рабочих напряжений или ограниченных по времени повышении напряжения в рабочих режимах электроустановок.

В новых проектных разработках и при реконструкции действующих электроустановок  $PB$  заменяется ОПН.

Подробные сведения о защите подстанционного оборудования от грозовых и коммутационных импуль-

Рис. 3.1. Схема включения вентильного разрядника для защиты электрооборудования от перенапряжений



сов можно найти в рекомендованной литературе [1; 2; 7; 8].

Схема включения вентильного разрядника для защиты изоляции электрооборудования от перенапряжения представлена на рис. 3.1.

Для определения напряжения на разряднике удобно использовать метод эквивалентного генератора.

Данный метод предусматривает переход от исходной схемы к эквивалентной схеме, показанной на рис. 3.2, где  $E_{\text{экв}}$  и  $Z_{\text{экв}}$  – соответственно напряжение холостого хода (при непробитом искровом промежутке разрядника) с учетом коэффициента преломления падающего импульса и сопротивление относительно точек подключения разрядника при закороченном источнике. Эти величины равны:

$$\begin{aligned} E_{\text{экв}}(t) &= U_{\text{пад}}(t) \cdot 2Z_2 / (Z_1 + Z_2) = \\ &= U[2Z_2 / (Z_1 + Z_2)] [\exp(-t / T_1) - \exp(-t / T_2)]. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Здесь  $2Z_2 / (Z_1 + Z_2)$  – коэффициент преломления падающей волны.

$$Z_{\text{экв}} = Z_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2). \quad (3.3)$$

До момента пробоя искрового промежутка РВ напряжение на защищаемом оборудовании равно  $E_{\text{экв}}(t)$ .

После пробоя искрового промежутка напряжение на разряднике будет равно:

$$\begin{aligned} U(t) &= E_{\text{экв}}(t) - I_p(t) Z_{\text{экв}} = \\ &= U_{\text{пад}}(t) \cdot 2Z_2 / (Z_1 + Z_2) - I_p(t) Z_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2), \end{aligned} \quad (3.4)$$

где  $I_p(t)$  – ток через разрядник.

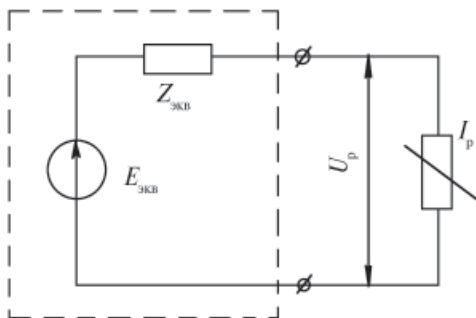


Рис.3.2. Эквивалентная схема для расчета напряжения на разряднике

Уравнение (3.4) содержит нелинейный член, поэтому оно может быть решено графически или аналитически с применением, например, математического пакета Mathcad.

Максимальному напряжению на защищаемом объекте ( $U_{\text{макс}}$ ) соответствует максимальное значение  $U_p(t)$  вычисленное по уравнению (3.4).

Чтобы определить момент времени  $t_m$ , когда импульс падающей волны достигает максимума можно воспользоваться математическими законами определения экстремума. Для этого необходимо взять производную от  $U_{\text{пад}}(t)$  согласно (3.1) и приравнять ее к нулю. В результате математических действий получим, что

$$t_m = (T_2 T_1 / T_1 - T_2) \ln(T_1 / T_2). \quad (3.5)$$

Применение уравнения (3.5) значительно упрощает графическое определение  $U_{\text{макс}}$ .

Заключение об эффективности применения данного разрядника для защиты высоковольтного оборудования делается на основе сравнения максимального значения на разряднике  $U_{\text{макс}}$  (с учетом 30% запаса) с минимальным разрядным напряжением оборудования, т.е. для защиты оборудования данным разрядником должно выполняться неравенство

$$U_{\text{макс}} \cdot 1,3 \leq U_{\text{мин}}. \quad (3.6)$$

### **Порядок выполнения и оформления задачи**

3.1. В расчетно-пояснительной записке привести условие задачи и исходные данные выбранного варианта. Нарисовать схему включения вентильного разрядника и эквивалентную схему для расчета напряжения на разряднике.

3.2. При графическом решении уравнения (3.4) необходимо провести в прямоугольной системе координат следующие построения.

3.2.1. В первом квадранте построить вольт-секундная характеристику падающей волны с учетом коэффициента преломления, т.е.

$$E_{\text{экв}}(t) = U_{\text{пад}}(t) \cdot 2Z_2 / (Z_1 + Z_2) =$$

$$= U [2Z_2 / (Z_1 + Z_2)] [\exp(-t / T_1) - \exp(-t / T_2)].$$

Значения  $U$ ,  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  для каждого варианта приведены в табл.3.1 и табл.3.3. При определении  $E_{\text{экв}}(t)$  значение переменной величины  $t$  с шагом 0,2 мкс рассчитывается до  $t = 2$  мкс.

3.2.2. Во втором квадранте построить:

— вольтамперную характеристику разрядника  $U_p = f(I_p)$ , заданную в табл. 3.2;

— падение напряжения на эквивалентном сопротивлении  $Z_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2)$ , при значениях тока, указанных в табл. 3.2.

— суммарное падение этих составляющих в зависимости от тока протекающего через разрядник, т.е.  $U_p + I_p \cdot Z_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2)$ , что равно  $E_{\text{экв}}(t)$  после пробоя искрового промежутка разрядника.

3.3. Построить график изменения значений напряжения на разряднике в зависимости от времени  $U_p(t)$  и в первом квадранте.

Пример такого построения показан на рис. 3.3.

До момента пробоя искрового промежутка РВ (точка А на кривой в первом квадранте рис. 3.3) напряжение на защищаемом оборудовании по форме и значению соответствует  $E_{\text{экв}}(t)$ . При

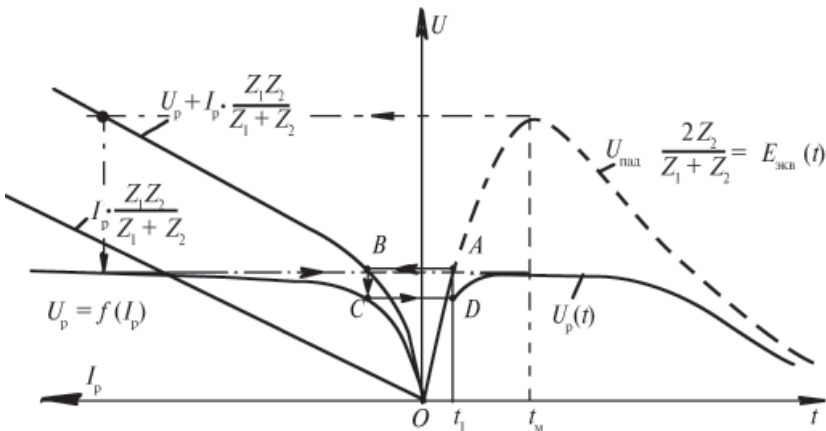


Рис.3.3. Графическое определение напряжения на разряднике и защищаемом объекте

$E_{\text{экв}}(t_1) = U_{\text{пр}} = 100$  кВ происходит пробой искровых промежутков РВ и через разрядник начинает протекать ток. На графике (рис. 3.3) это соответствует параллельному переносу значения  $E_{\text{экв}}(t_1)$  из первого квадранта во второй квадрант на кривую суммарного падения напряжения (точка *B*). Вертикальный спуск с точки *B* на кривую вольтамперной характеристики разрядника (точка *C*) соответствует решению уравнения (3.4).

С этого момента изменение значения падающей волны или  $E_{\text{экв}}(t)$  приведет к изменению тока через разрядник, а напряжение на защищаемом объекте будет равно напряжению на разряднике  $U_{\text{р}} = f(I)$ .

Для построения зависимости напряжения на защищаемом объекте во времени  $U_{\text{р}} = f(t)$ , необходимо значение напряжения с вольтамперной характеристики разрядника перенести в первый квадрант на соответствующее время  $t$ . Для точки *C* вольтамперной характеристики разрядника это время равно  $t_1$ . Как следует из графического построения (см. рис. 3.3) в момент пробоя искровых промежутков происходит резкое изменение напряжения на защищаемом объекте (точка *D*).

Дальнейшее построение зависимости  $U_{\text{р}} = f(t)$  проводится в такой же последовательности при изменении значений  $E_{\text{экв}}(t)$ .

При  $E_{\text{экв}}(t_{\text{м}})$  значение  $U_{\text{р}} = f(t_{\text{м}}) = U_{\text{макс}}$ , т.е. соответствует максимальному значению напряжения на защищаемом объекте.

3.4. По неравенству (3.6) сделать вывод об эффективности применения вентильного разрядника с заданной вольтамперной характеристикой для защиты изоляции высоковольтного оборудования подстанции.

### **Вопросы для самоподготовки к защите контрольной работы**

3.1. Чем определяется максимальная амплитуда падающей волны на подстанционное оборудование?

3.2. От чего зависит коэффициент преломления падающей волны?

3.3. Каков принцип защиты высоковольтного оборудования подстанций с помощью РВ и ОПН?

3.4. Из каких основных элементов состоят РВ и ОПН?

3.5. Каковы основные характеристики вентильных разрядников?

3.6. Каковы основные недостатки применения РВ?

3.7. Как делается вывод о защите оборудования данным разрядником?

**ЗАДАЧА № 4. МЕТОДЫ ПРОФИЛАКТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ  
ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
ПО АБСОРБЦИОННЫМ ЯВЛЕНИЯМ И ПО ТАНГЕНСУ УГЛА  
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ**

*Условие задачи и исходные данные.* Внутренняя изоляция высоковольтного оборудования состоит из двух слоев имеющих в установившемся режиме соответственно сопротивление утечки  $R_1$ ,  $R_2$  и емкости слоев  $C_1$  и  $C_2$ .

Требуется по характеру изменения тока абсорбции и значению сопротивления изоляции в исходном состоянии изоляции и при уменьшении сопротивления первого слоя в 100 раз ( $0,01R_1$ ) дать заключение о качестве изоляции и определить допустимость степени увлажнения.

Тангенс угла диэлектрических потерь при температуре  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  равен  $-\text{tg}\delta_0$ ; коэффициент, характеризующий температурную зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от температуры, равен  $-\alpha$ .

Требуется рассчитать и построить графики зависимости тангенса диэлектрических потерь и мощности потерь в диэлектрике при изменении температуры от  $20^\circ\text{C}$  до  $100^\circ\text{C}$  и приложении переменного напряжения  $U = 10$  кВ с частотой 50 Гц.

Значения всех переменных параметров для соответствующих вариантов приведены в табл. 4.1

Таблица 4.1

Параметры	Вариант (последняя цифра учебного шифра)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_1, 10^6, \text{Ом}$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
$C_1, 10^{-6}, \text{Ф}$	3,6	3,4	3,2	3,0	2,8	2,6	2,4	2,2	2,0	1,8
$R_2, 10^6, \text{Ом}$	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
$C_2, 10^{-6}, \text{Ф}$	36	34	30	32	28	26	24	22	20	18
$\text{tg}\delta, 10^{-3}$	4,0	3,8	3,6	3,4	3,2	3,0	2,8	2,6	2,4	2,2
$\alpha, 10^{-3}, ^\circ\text{C}^{-1}$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

*Примечание.* Например, при цифре шифра 1 сопротивление  $R_1 = 110 \cdot 10^6 \text{ Ом}$ .

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАЧИ № 4

### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В процессе эксплуатации высоковольтного оборудования из-за перегрева, увлажнения, механических повреждений и перенапряжений происходит общее старение изоляции. В изоляции возникают распределенные и местные (сосредоточенные) дефекты. Постепенно развиваясь, эти дефекты способны настолько снизить пробивное или разрядное напряжение, что изоляция может не выдержать перенапряжений, время от времени появляющихся в электрических системах, или даже рабочего напряжения [1; 2; 9; 10].

В большинстве случаев эти дефекты не могут быть обнаружены путем простого осмотра изоляции и для их выявления необходимы специальные методы испытаний, которые называются профилактическими.

Группа профилактических методов контроля изоляции, при которых используются по сравнению с рабочими малые напряжения и различные косвенные способы оценки характеристик изоляции называется неразрушающие испытания. Другую группу испытаний с использованием напряжения, повышенного по сравнению с рабочим и вызывающего ускоренное разрушение изоляции в дефектном месте, называют разрушающими испытаниями.

Для каждого вида изоляции характерны определенные виды дефектов и применяются различные методы профилактических испытаний. Периодичность и нормы испытаний устанавливаются стандартами и ведомственными инструкциями для каждого вида электрооборудования.

Согласно существующим представлениям основной причиной старения внутренней изоляции при воздействии сильных электрических полей являются так называемые частичные разряды (ЧР). ЧР возникают в газовых включениях или прослойках жидкого диэлектрика. Скорость разрушения изоляции зависит от интенсивности ЧР. Регистрация интенсивности ЧР во время эксплуатации высоковольтного оборудования и в лабораторных условиях проводится с помощью электрических, оптических и ультразвуковых методов.

Проникновение в изоляцию из окружающей среды влаги, различных примесей и кислорода значительно ускоряют процессы старения изоляции.

При неразрушающих методах испытаний для оценки качества изоляции используются измерения характера изменения характеристик диэлектриков во времени, от частоты испытательного напряжения и от температуры.

В качестве внутренней изоляции высоковольтного оборудования очень часто применяются комбинации диэлектриков, сочетание которых позволяет получить наиболее благоприятные свойства изоляционной конструкции. В частности, очень большое распространение получила слоистая изоляция, в состав которой входят пропитанные маслами волокнистые материалы типа бумаги (кабели, конденсаторы, трансформаторы и др.).

Ухудшение качества слоистой изоляции в большинстве случаев происходит путем более или менее однородного изменения свойств одного из слоев, тогда как характеристика других слоев остаются практически неизменными. Это приводит к изменению неоднородности изоляции. По характеру этого изменения можно судить о состоянии изоляции.

В простейшем случае неоднородная изоляция состоит из двух слоев, каждый из которых характеризуется своей удельной

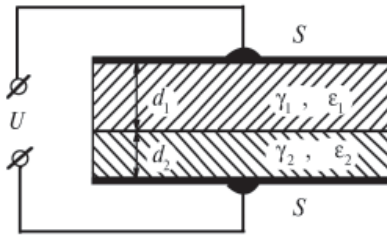


Рис. 4.1. Модель двухслойного диэлектрика

проводимостью слоев  $\gamma$  и диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Модель двухслойного диэлектрика представлена на рис. 4.1.

Для анализа процессов в модели двухслойной изоляции можно использовать схемы замещения, показанные на рис. 4.2. В схеме на рис. 4.2, а сопротивление утечки первого и второго слоев в установленном режиме соответственно равны:

$$R_1 = d_1 / \gamma_1 S \text{ и } R_2 = d_2 / \gamma_2 S, \quad (4.1)$$

а емкости этих слоев равны

$$C_1 = \epsilon_0 \epsilon_1 S / d_1 \text{ и } C_2 = \epsilon_0 \epsilon_2 S / d_2. \quad (4.2)$$

Здесь  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  — удельные проводимости слоев;  
 $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  — электрическая постоянная;

$\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  — диэлектрические проницаемости слоев;

$d_1$  и  $d_2$  — толщина слоев;

$S$  — площадь электродов и границы между слоями.

При подключении диэлектрика к источнику с постоянным напряжением, кроме постоянного тока утечки из-за миграционной поляризации диэлектриков, в течение непродолжительного времени наблюдается так называемый ток абсорбции. Со

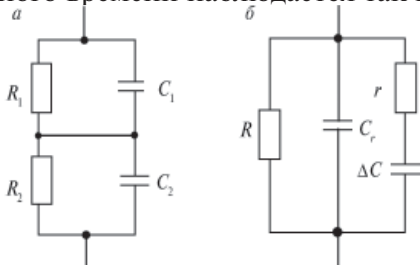


Рис. 4.2. Схема замещения двухслойного диэлектрика

временем ток абсорбции спадает до нуля по экспоненциальному закону. В процессе старения изоляции, например увлажнения одного из слоев, ток абсорбции уменьшается. Это обстоятельство используется для контроля состояния изоляции.



Схема представленная на рис. 4.2, б эквивалентна схеме на рис. 4.2, а. В этой схеме замещения:

сопротивление утечки всей изоляции в установившемся режиме

$$R = R_1 + R_2, \quad (4.3)$$

геометрическая емкость изоляции

$$C_r = C_1 C_2 / (C_1 + C_2). \quad (4.4)$$

Ветвь « $r - \Delta C$ » отражает накопление заряда абсорбции, параметры ее определяются из условия равенства полных сопротивлений обеих схем замещения:

$$r = R_1 R_2 (R_1 + R_2)(C_1 + C_2)^2 / (R_1 C_1 - R_2 C_2)^2; \quad (4.5)$$

$$\Delta C = (R_1 C_1 - R_2 C_2)^2 / (R_1 + R_2)^2 (C_1 + C_2). \quad (4.6)$$

Если изоляция однородна, т.е.  $R_1 C_1 = R_2 C_2$  или  $\epsilon_1 / \gamma_1 = \epsilon_2 / \gamma_2$ , то  $r = \infty$  и  $\Delta C = 0$ , т.е. заряд абсорбции в этом случае не накапливается.

Из схемы замещения на рис. 4.2, б следует, что при подключении неоднородной изоляции к источнику постоянного напряжения ток, проходящий через изоляцию (без учета кратковременного тока заряда геометрической емкости  $C_r$ ), изменяется во времени в соответствии с выражением

$$I(t) = (U/R) + (U/r)\exp(-t/\tau), \quad (4.7)$$

где  $\tau = r\Delta C = R_1 R_2 (C_1 + C_2) / (R_1 + R_2). \quad (4.8)$

При этом изменяется и сопротивление изоляции

$$R(t) = U/I(t) = R/[1 + (R/r)\exp(-t/\tau)]. \quad (4.9)$$

Как следует из (4.8) и (4.9), пределы и скорость изменения  $R(t)$  определяются всеми параметрами обоих слоев изоляции. При сильном увлажнении, загрязнении или растрескивании изоляции из-за различной способности материалов к увлажнению или загрязнению объемное сопротивление одного из слоев

резко падает. Диэлектрическая проницаемость при этом увеличивается незначительно.

Вследствие этого сопротивление утечки изоляции  $R(t)$  и постоянная времени  $\tau$  уменьшаются.

На практике оценка состояния изоляции производится по значениям сопротивления  $R(t)$ , измеренным через 15 с и 60 с после включения постоянного напряжения. В качестве источника постоянного тока используются переносные приборы мегаомметры, имеющие напряжение 500, 1000 или 2500 В. Заключение о качестве изоляции делается по значению  $R_{60}$  и коэффициенту абсорбции

$$k_{\text{абс}} = R_{60}/R_{15}. \quad (4.10)$$

Для изоляции в нормальном состоянии характерны высокие значения  $R_{60}$  (не менее 1 МОм на 1 кВ номинального напряжения).

Опытным путем установлено, что  $R_{60}/R_{15} < 1,3$  изоляция недопустимо увлажнена.

Если к двухслойному диэлектрику прикладывается переменное напряжение, то оказывается, что емкость неоднородного диэлектрика зависит от частоты.

Данная зависимость выражается формулой

$$C(\omega) = C_r + \Delta C / (1 + \omega^2 \tau^2), \quad (4.11)$$

где  $\omega$  — круговая частота приложенного напряжения.

Контроль степени увлажнения при переменном токе производится путем измерения емкости изоляции на различных частотах. Емкость изоляции с ростом частоты изменяется тем сильнее, чем больше степень неоднородности изоляции, т.е. чем больше степень увлажнения.

На практике измерения емкостей производятся с помощью приборов контроля влажности (ПКВ) при двух частотах: 2 Гц и 50 Гц.

Заключение о степени увлажнения изоляции делают по значению отношения  $C_2/C_{50}$  или  $\Delta C/C_r$ .

На основе опыта установлено, что для изоляции в нормальном состоянии допустимые значения составляют

$$C_2/C_{50} \leq 1,2 \div 1,3.$$

Изоляция недопустимо увлажнена, если измеренные значения различаются более, чем в 1,3 раза, т.е. если  $C_2/C_{50} > 1,3$ .

Под воздействием переменного напряжения в диэлектрике возникают токи проводимости и смещения, которые обуславливают так называемые диэлектрические потери. Величина диэлектрических потерь является хорошим показателем состояния диэлектрика, так как появление всякого рода примесей, газовых включений и увлажнения диэлектриков приводят к заметному их увеличению.

Мощность потерь в диэлектрике при неизменной температуре равна

$$P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta, \quad (4.12)$$

т.е. мощность потерь пропорциональна тангенсу угла диэлектрических потерь.

В связи с этим, в качестве количественного показателя, характеризующего потери в диэлектрических материалах на переменном напряжении, на практике используется не непосредственно угол диэлектрических потерь  $\delta = 90^\circ - \psi$ , а его тангенс —  $\operatorname{tg} \delta$ .

Напомним, что  $\psi$  — угол фазового сдвига между током и напряжением в диэлектрике.

Величину тангенса диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta$  при профилактических испытаниях обычно измеряют с помощью моста переменного тока (моста Шеринга) при напряжении 10 кВ независимо от номинального напряжения, если  $U_{\text{ном}} > 10$  кВ.

В лабораториях определяют зависимость  $\operatorname{tg} \delta = f(U)$  в интервале  $(0,5 \div 1,5) U_{\text{раб}}$ . У изоляции нормального качества значение  $\operatorname{tg} \delta$  при напряжении до  $1,5 U_{\text{раб}}$  в большинстве случаев остается практически неизменным. Если же при повышении напряже-

ния  $\operatorname{tg}\delta$  начинает быстро возрастать, то это свидетельствует о возникновении частичных разрядов в газовых включениях, которые приведут к ухудшению свойств изоляции.

Отметим, что диэлектрические потери пропорциональны частоте приложенного напряжения. Измерение  $\operatorname{tg}\delta$  при частоте 50 Гц является одним из наиболее распространенных методов контроля изоляции электрооборудования высокого напряжения.

Оценка состояния изоляции по значениям  $\operatorname{tg}\delta$  предусматривается Правилами устройств электроустановок (ПУЭ) почти для всех видов изоляции.

В справочниках и ПУЭ даны нормированные значения  $\operatorname{tg}\delta_0$  в абсолютных значениях или в процентах для диэлектрических материалов и отдельных видов электрооборудования.

Удельная проводимость  $\gamma$  диэлектриков, а, следовательно, и  $\operatorname{tg}\delta$ , достаточно сильно зависит от температуры, тогда как диэлектрическая проницаемость в небольшом интервале температур можно считать независимой от температуры. От  $\operatorname{tg}\delta$  зависит мощность диэлектрических потерь и, следовательно, температурный режим работы изоляции. Для большинства материалов зависимость  $\operatorname{tg}\delta = f(T)$  может быть хорошо описана экспоненциальным законом

$$\operatorname{tg}\delta = \operatorname{tg}\delta_0 \cdot \exp[\alpha (T - T_0)], \quad (4.13)$$

где  $\operatorname{tg}\delta$  — тангенс угла диэлектрических потерь при температуре  $T$ ;

$\operatorname{tg}\delta_0$  — тоже при температуре  $T_0$ ;

$\alpha$  — постоянный коэффициент, характеризующий материал.

### **Порядок выполнения и оформления задачи**

4.1. В расчетно-пояснительной записке привести условие задачи и исходные данные выбранного варианта. Нарисовать обе схемы замещения двухслойного диэлектрика.

4.2. По формулам (4.3) — (4.6) вычислить параметры схемы замещения (рис.4.2, б) по данным, приведенным в табл. 4.1 и при уменьшении значения  $R_1$  в сто раз.

4.3. По формуле (4.9) определить сопротивление изоляции при приложении постоянного напряжения в течение 60 и 15 с, когда  $R_1$  соответствует табл. 4.1 и 0,01  $R_1$ .

4.4. Вычислить коэффициент абсорбции по формуле (4.10) и по коэффициенту абсорбции и значению сопротивления  $R_{60}$  сделать заключение о состоянии изоляции, когда  $R_1$  соответствует табл. 4.1 и 0,01  $R_1$ .

4.5. По формуле (4.13) рассчитать зависимость  $\text{tg}\delta$  от температуры с шагом 20°C. Результаты привести на графике.

4.6. Рассчитать по формуле (4.12) и изобразить графическую зависимость мощности потерь от температуры. Расчетные точки взять из пункта 4.5.

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ К ЗАЩИТЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ**

4.1 Чем отличаются разрушающие от неразрушающих методов испытания изоляции?

4.2. Каковы основные методы неразрушающих испытаний применяющихся для профилактического контроля внутренней изоляции?

4.3. Почему существует ток абсорбции?

4.4. Как оценивается состояние изоляции по коэффициенту абсорбции?

4.5. Какие основные методы контроля изоляции при использовании переменного напряжения?

4.6. Почему диэлектрические потери измеряются по тангенсу угла диэлектрических потерь?

4.7. Как зависят диэлектрические потери от величины и частоты приложенного напряжения и от температуры диэлектрика?

### **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.

## ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Задание на контрольную работу  
с методическими указаниями

Редактор *Г.В. Тимченко*  
Компьютерная верстка *Г.Д. Волкова*

---

Тип.зак.		Тираж 1 000 экз.
Подписано в печать 08.02.06	Гарнитура Newton	Офсет
Усл.печ.л. 2,5	Допечатка тиража	Формат 60 × 90 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>

---

Издательский центр РГОТУПСа,  
125808, Москва, Часовая ул., 22/2

Участок оперативной печати РГОТУПСа,  
125808, Москва, Часовая ул., 22/2