

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования

«Уральский государственный университет путей сообщения»
(УрГУПС)

Кафедра «Теоретические основы электротехники»

Г.Б. Дурандин
Е.П. Никитина
Е.П. Санникова

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ



Посвящается 50-летию
УЭМИИТ – УрГАПС - УрГУПС

Екатеринбург
2006

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования

«Уральский государственный университет путей сообщения»
(УрГУПС)

Кафедра «Теоретические основы электротехники»

Г.Б. Дурандин
Е.П. Никитина
Е.П. Санникова

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

**Задания на контрольные работы
с методическими указаниями для студентов заочного обучения
специальностей**

- 190401 – Электроснабжение железнодорожного транспорта
- 190303 – Электрический транспорт железных дорог
- 190402 – Автоматика и связь на железнодорожном транспорте

Екатеринбург
2006

Задание на контрольные работы по материаловедению и технике высоких напряжений (ТВН) предназначено для студентов заочного отделения университета, изучающих дисциплины в соответствии с учебными планами и программами, и содержит две контрольные работы – по дисциплинам «Материаловедение» «Техника высоких напряжений» (ТВН).

Первая контрольная работа - по дисциплине «Материаловедение», содержит семь задач и методические указания для их выполнения. Первую контрольную работу выполняют студенты всех специальностей (190401, 190402, 190303).

Вторая контрольная работа - по дисциплине «Техника высоких напряжений», содержит восемь задач и методические указания к их решению. Вторую контрольную работу выполняют студенты специальностей (190401 и 190303).

В полном объеме первую и вторую контрольную работу выполняют только студенты специальности 190401.

Преподаватель, ведущий указанные дисциплины, имеет право скорректировать задание на контрольные работы.

Составили:

Г.Б. Дурандин, д-р техн. наук, профессор кафедры ТОЭ, УрГУПС,

Е.П. Никитина, ст. преподаватель кафедры ТОЭ, УрГУПС,

Е.П. Санникова, ст. преподаватель кафедры ТОЭ, УрГУПС.

Рецензент: А.П. Сухогузов, зав. кафедрой ТОЭ, канд. техн. наук, профессор, УрГУПС.

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Контрольные задания имеют 100 вариантов. Вариант контрольного задания должен соответствовать двум последним цифрам учебного шифра студента. В случае, если шифр однозначный, то предпоследняя цифра принимается равной 0.

Студенты должны выполнить контрольное задание в сроки, установленные календарным планом учебной работы. После проверки преподавателем контрольного задания студент допускается к собеседованию, на котором защищает выполненную контрольную работу.

Для облегчения изучения курса и выполнения контрольных заданий в период лабораторных сессий предусмотрены лекции по основным разделам курса, лабораторные занятия, групповые и индивидуальные консультации.

Требования к выполнению контрольной работы

1. Контрольная работа выполняется в виде расчетно-пояснительной записки в соответствии с общими требованиями к подобным документам.
2. Текст задания должен быть полностью переписан в контрольную работу с числовыми данными, соответствующими выполняемому варианту.
3. Расчетную часть каждой задачи следует сопровождать краткими и четкими пояснениями.
4. При решении задач необходимо пользоваться Международной системой единиц СИ.
5. При выполнении расчетов следует привести расчетную формулу, сделать подстановку числовых значений и записать результат без промежуточных вычислений. Полученные результаты вычислений должны быть записаны с обязательным указанием единиц измерения. При выполнении таблиц дается пример расчета одной строки таблицы.
6. Следует приводить расшифровку условных обозначений всех величин, входящих в расчетные формулы.
7. Контрольная работа должна быть написана чернилами, аккуратно и четко. Допускается машинописный или набранный на компьютере текст. Страницы должны быть пронумерованы.
8. Графический материал выполняется на миллиметровой бумаге с применением чертежных инструментов в масштабе с соблюдением действующих ГОСТ.
9. В конце работы должен быть указан список литературы, которая использовалась при выполнении задания, дата выполнения задания и подпись студента.
10. Представленная на проверку контрольная работа не зачитывается, если она содержит ошибки или не удовлетворяет перечисленным выше требованиям. Преподаватель указывает свои замечания и возвращает работу студенту для исправлений. Все исправления должны выполняться после записи первоначального решения.

1 МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

ЗАДАЧА 1

К плоскому конденсатору прямоугольной формы, имеющего пластины шириной a и длиной b , приложено напряжение U . Между обкладками конденсатора расположен диэлектрический слой толщиной d с относительной диэлектрической проницаемостью ε_r .

Известны: удельное объемное сопротивление диэлектрика ρ , удельное поверхностное сопротивление ρ_s , тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$.

Требуется:

1. Определить ток утечки, мощность потерь и удельные диэлектрические потери при включении конденсатора на постоянное напряжение.
2. Начертить упрощенную схему замещения реального диэлектрика и построить векторную диаграмму токов.
3. Определить диэлектрические потери при включении того же конденсатора на переменное напряжение с действующим значением U промышленной частоты.
4. Построить график зависимости диэлектрических потерь от частоты питающего напряжения ($f_1 \leq f \leq f_2$).

Числовые данные приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Числовые данные задачи 1

Параметр	Последняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
a , мм	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
b , мм	600	650	550	500	150	100	200	250	300	350
d , мм	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
U , кВ	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
f_1 , Гц	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
f_2 , МГц	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Предпоследняя цифра шифра										
Параметр	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ε_r	1,95	2,0	2,05	2,1	2,15	2,2	2,25	2,3	2,35	2,4
$\rho \cdot 10^{+16}$, Ом·м	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
$\rho_s \cdot 10^{+15}$, Ом	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\operatorname{tg}\delta \cdot 10^{-2}$	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9

Методические указания к решению задачи 1

В цепях постоянного тока через твердый диэлектрик протекает незначительный ток, обусловленный движением свободных носителей зарядов (электронов, ионов), который называется током утечки или током проводимости. Этот ток равен сумме объемного I_V и поверхностного I_S токов, величина каждого из которых зависит от приложенного напряжения U и сопротивления данного диэлектрика (объемного R_V и поверхностного R_S , соответственно).

Объемное и поверхностное сопротивления образца прямоугольной формы вычисляются по следующим формулам:

$$R_V = \rho \frac{h}{ab}, \quad (1.1)$$

$$R_S = \rho_s \frac{h}{2(a+b)}, \quad (1.2)$$

где ρ, ρ_s – удельное объемное и поверхностное сопротивления диэлектрика; a, b – геометрические размеры пластин конденсатора; h – толщина диэлектрического слоя.

Диэлектрическими потерями называется мощность, рассеиваемая в диэлектрике при воздействии на него электрического поля и вызывающая его нагрев. При постоянном напряжении нагрев диэлектрика обусловлен только током утечки и пропорционален его квадрату.

При переменном напряжении нагрев диэлектрика зависит также от активной составляющей поляризационного тока и определяются углом диэлектрических потерь $tg\delta$. Активная мощность, рассеиваемая в диэлектрике, равна

$$P_a = U^2 \omega C tg\delta, \quad (1.3)$$

где U – напряжение, приложенное к конденсатору; ω – круговая частота питающего напряжения; $tg\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; C – емкость плоского конденсатора.

Емкость плоского конденсатора равна

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{S}{d}, \quad (1.4)$$

где ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; ε_0 – диэлектрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; S – площадь пластин конденсатора; d – расстояние между пластинами (толщина диэлектрического слоя).

В электроизоляционных материалах диэлектрические потери характеризуют удельными потерями p , равными

$$p = \frac{P_a}{V}, \quad (1.5)$$

где V – объем диэлектрического слоя.

ЗАДАЧА 2

Диэлектрик изоляционной конструкции состоит из двух слоев различных материалов. Материал первого слоя имеет относительную диэлектрическую проницаемость ε_1 , удельную проводимость γ_1 . Материал второго слоя – соответственно ε_2 и γ_2 , d_1 и d_2 – толщина первого и второго слоев диэлектрика, S – площадь электродов.

Требуется:

1. Начертить два варианта схемы замещения двухслойного диэлектрика и рассчитать их параметры.

2. Рассчитать и построить графическую зависимость емкости изоляционной конструкции от частоты приложенного напряжения в диапазоне от 0 до 100 Гц.

3. Определить степень увлажнения изоляции, считая, что причиной ее неоднородности является ее увлажнение.

Числовые данные приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Параметры двухслойного конденсатора

Параметры	Последняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ε_1	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4
ε_2	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,5	2,4
$\gamma_1 \cdot 10^{-11}$ См/м	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0
$\gamma_2 \cdot 10^{-8}$ См/м	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8
Предпоследней цифра шифра										
Параметры	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d_1 , мм	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
d_2 , мм	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
S , см ²	400	410	420	430	440	450	460	470	480	490

Методические указания к решению задачи 2

В данной задаче рассматриваются некоторые особенности поляризации неоднородных диэлектриков, которые имеют место в изоляции конструкций высокого напряжения.

Виды поляризации можно разделить на две большие группы:

- поляризация практически мгновенная и без рассеяния энергии (упругая);

- поляризация замедленная и сопровождаемая рассеянием энергии в диэлектрике, то есть его нагревом, которую называют релаксационной.

К первой группе относятся электронная и ионная поляризации, а ко второй группе – дипольно-релаксационная, электронно-релаксационная и ионно-релаксационная поляризации.

Кроме перечисленных, существует дополнительный вид поляризации, проявляющийся в твердых диэлектриках неоднородной структуры – миграционная поляризация. Она связана с перемещением свободных зарядов (электронов и ионов) в пределах слоев и включений диэлектрических конструкций. Количественный расчет ряда параметров, связанных с миграционной поляризацией и является переметом данной задачи контрольной работы.

Сущность миграционной поляризации рассмотрим на примере двухслойного диэлектрика. Для такого диэлектрика возможны две схемы замещения, показанные на рис. 1.1. (а и б).

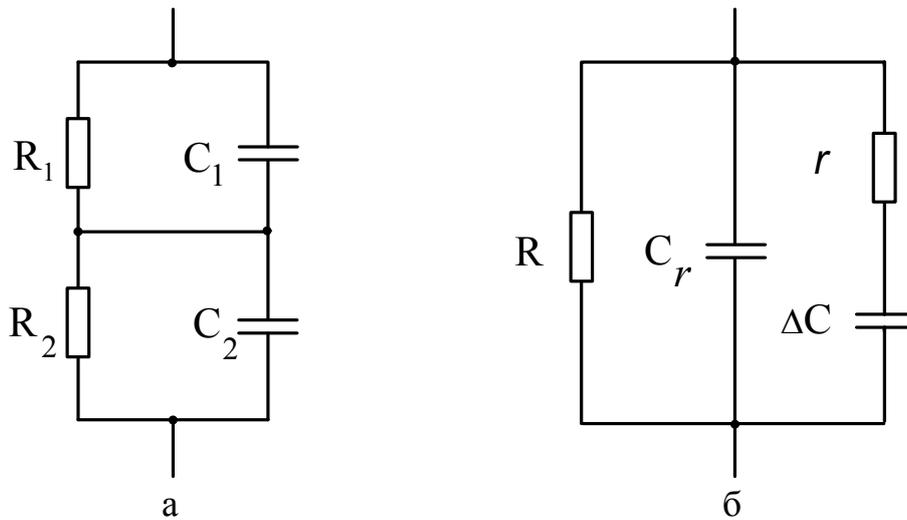


Рис. 1.1. Схемы замещения двухслойного диэлектрика

Элементы схемы замещения по слоям (рис. 1.1, а) можно выразить через параметры слоев диэлектрика следующим образом:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{d_1}{\gamma_1 \cdot S}, \\
 R_2 &= \frac{d_2}{\gamma_2 \cdot S}, \\
 C_1 &= \varepsilon_0 \varepsilon_1 \frac{S}{d_1}, \\
 C_2 &= \varepsilon_0 \varepsilon_2 \frac{S}{d_2},
 \end{aligned}
 \tag{1.6}$$

где d_1, d_2 – толщина первого и второго слоев диэлектрика; γ_2, γ_1 – удельная проводимость слоев; S – площадь электродов; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – относительная диэлектрическая постоянная слоев; ε_0 – диэлектрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Вторая схема замещения (рис. 1.1, б) состоит из элементов, характеризующих двухслойный диэлектрик в целом. Сопротивление утечки R , характеризующее проводимость двухслойного диэлектрика в установившемся

режиме. Геометрическая емкость C_r определяется только размерами и диэлектрическими проницаемостями слоев и в ней не учитывается влияние процессов проводимости. Эти параметры могут быть определены следующим образом:

$$\begin{aligned} R &= R_1 + R_2, \\ C_r &= \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}. \end{aligned} \quad (1.7)$$

Два остальных параметра этой схемы замещения можно определить из условия равенства полных сопротивлений диэлектрика в обеих схемах замещения:

$$\begin{aligned} r &= \frac{R_1 R_2 \cdot (R_1 + R_2) \cdot (C_1 + C_2)^2}{(R_1 C_1 - R_2 C_2)^2}, \\ \Delta C &= \frac{(R_1 C_1 - R_2 C_2)^2}{(R_1 + R_2)^2 (C_1 + C_2)}. \end{aligned} \quad (1.8)$$

При длительном приложении к двухслойному диэлектрику постоянного напряжения U_0 вследствие наличия проводимости на границе слоев будет накапливаться заряд абсорбции Q_{abc} . Образование этого заряда является следствием миграционной поляризации, его величина равна суммарному заряду на границе раздела слоев, то есть

$$|Q_{abc}| = |Q_1 - Q_2| = U_0 \cdot \frac{R_1 C_1 - R_2 C_2}{R_1 + R_2}. \quad (1.9)$$

Из этого выражения видно, что заряд абсорбции будет существовать при выполнении условия

$$R_1 C_1 \neq R_2 C_2.$$

Условие неоднородности двухслойной изоляции будет иметь вид

$$\frac{\varepsilon_1}{\gamma_1} \neq \frac{\varepsilon_2}{\gamma_2}. \quad (1.10)$$

При приложении двухслойному диэлектрику переменного напряжения емкость неоднородного диэлектрика зависит от частоты приложенного напряжения, то есть

$$C(\omega) = C_r + \Delta C \cdot \frac{1}{1 + \omega^2 T^2}, \quad (1.11)$$

где ω – круговая частота приложенного напряжения; T – постоянная времени, равная

$$T = r \cdot \Delta C = \frac{R_1 R_2 \cdot (C_1 + C_2)}{R_1 + R_2}. \quad (1.12)$$

Явление миграционной поляризации нашло широкое применение при контроле состояния изоляционных конструкций, в частности, загрязнения и увлажнения. При появлении увлажненного слоя в изоляции ее реакцию на

приложение переменного напряжения можно рассматривать в соответствии со схемами замещения рис. 1.1.

Контроль степени увлажнения производится путем измерения емкости изоляции при различных частотах. При этом емкость изоляции с ростом частоты изменяется тем сильнее, чем больше степень неоднородности изоляции, то есть чем больше толщина увлажненного слоя. При отсутствии увлажнения (однородной изоляции) емкость от частоты не зависит.

На практике для контроля степени увлажнения изоляции производят измерения емкости при двух частотах 2 Гц и 50 Гц при постоянной температуре. На основе опыта установлено, что степень увлажнения изоляции допустимая, если выполняется условие

$$\frac{C_2}{C_{50}} \leq 1,3.$$

В противном случае считается, что изоляция недопустимо увлажнена.

ЗАДАЧА 3

Дайте определение проводника. Приведите практическую классификацию проводниковых материалов. Перечислите основные физические свойства проводников и кратко поясните их физический смысл.

Для заданных проводниковых материалов определите к какому классу они относятся, приведите их основные физические характеристики и кратко опишите свойства заданных материалов, укажите основные области их применения.

В табл. 1.3 для каждого варианта заданы марки проводниковых материалов.

Таблица 1.3

Проводниковые материалы

Вариант	Предпоследняя цифра шифра	Последняя цифра шифра
0	Медь М1	Манганин
1	Алюминий А1	Константан
2	Сталь	Вольфрам
3	Серебро	Фехраль
4	Медь М0	Алюмель
5	Кадмиевая бронза	Вольфрам
6	Альдрей	Нильзибер
7	Бериллиевая бронза	Станнит ниобия (Nb ₂ Sn)
8	Латунь	Нихром
9	Алюминий АВ	Галлид ваннадия (V ₂ Ga)

Методические указания к решению задачи 3

Проводники – это электротехнические материалы, имеющие удельное сопротивление в пределах от 10^{-8} до 10^{-5} Ом·м при нормальной температуре.

Наличие свободных электронов обуславливает высокую пластичность, характерный блеск металлов, высокую электро- и теплопроводность.

К основным электрическим характеристикам проводников относятся электропроводность, удельное сопротивление, температурный коэффициент удельного сопротивления, величина термоэлектродвижущей силы.

По величине удельного сопротивления проводники можно разделить на два больших класса: материалы высокой проводимости и материалы с высоким удельным сопротивлением.

Определите к какому классу относятся заданные материалы, укажите их основные электрические и физические характеристики и области их применения .

ЗАДАЧА 4

Дайте определение полупроводника. Приведите классификацию полупроводниковых материалов. Изучите и приведите основные свойства характеристики (физические, механические, химические) заданного полупроводникового материала, перечислите его отличительные особенности и области применения.

Укажите назначение заданного полупроводникового прибора, приведите его основные характеристики, начертите принципиальную схему и кратко опишите принцип его действия. Укажите, какие полупроводниковые материалы применяются для изготовления заданного прибора.

В табл. 1.4 для каждого варианта задан полупроводниковый материал и полупроводниковый прибор.

Таблица 1.4

Полупроводниковые материалы и приборы

Вариант	Предпоследняя цифра шифра	Последняя цифра шифра
0	Карбид кремния	Тиристор
1	Германий	Вентильный разрядник
2	Селен	Фоторезистор
3	Арсенид галлия	Варистор
4	Кремний	Силитовые стержни
5	Антимонид индия	Терморезистор
6	Фосфид галлия	Позистор
7	Сернистый свинец	Выпрямительный диод
8	Гемиоксид меди	Датчик Холла
9	Теллуристый кадмий	Тензорезистор

Методические указания к решению задачи 4

Полупроводники - это большая группа веществ с электронной проводимостью, удельное сопротивление которых при нормальной температуре изменяется в пределах от 10^{-6} до 10^{+8} Ом·м.

Проводимость полупроводников существенно зависит от внешних энергетических воздействий, а также от наличия различных примесей.

Разнообразные свойства полупроводников обусловили повсеместное внедрение полупроводниковой техники во все отрасли промышленности. Благодаря простоте и надежности конструкции, малым габаритам и весу полупроводниковые приборы получили широкое применение и на железнодорожном транспорте.

По указанной литературе ознакомиться с классификацией полупроводниковых материалов, их основными физическими свойствами, зависимостью этих свойств от внешних факторов. Указать, в чем главное отличие полупроводниковых материалов от остальных электротехнических материалов.

При описании заданного полупроводника указать, к какому классу он относится, перечислить его основные физические свойства (механические, электрические и т.д) и характеристики.

При описании заданного полупроводникового прибора необходимо указать принцип работы, его основные характеристики (вольтамперные, температурные, световые и т.д), какие полупроводниковые материалы используются для его изготовления, в каких устройствах на железнодорожном транспорте он применяется.

ЗАДАЧА 5

Сердечник из электротехнической стали прямоугольной формы с площадью сечения S и длиной l работает в переменном магнитном поле с частотой 50 Гц и амплитудой B_{max} . Для материала сердечника заданы основная кривая намагничивания $B = f(H)$ и зависимость удельных потерь от амплитуды магнитной индукции $p_{y0} = \varphi(B_{max})$ для данной частоты.

Требуется:

1. Построить основную кривую $B = f(H)$ намагничивания заданного материала.
2. Рассчитать и построить зависимость магнитной проницаемости материала сердечника от напряженности магнитного поля $\mu = f(H)$.
3. Начальную и максимальную магнитную проницаемость и индукцию насыщения материала.
4. Определить удельные магнитные потери в материале при заданной величине магнитной индукции, построить график зависимости удельных потерь от амплитуды магнитной индукции.
5. Рассчитать потери мощности в заданном сердечнике.

Кривая намагничивания материала сердечника для каждого варианта приведена в табл. 1.5. Зависимость удельных потерь в магнитном материале

от амплитуды магнитной индукции при частоте 50 Гц одинаковая для всех вариантов и приведена в табл. 1.6. Размеры сердечника и амплитуды магнитной индукции для каждого варианта приведены в табл. 1.7

Таблица 1.5

Кривая намагничивания материала сердечника

Последняя цифра шифра	Значения параметров Н (кА/м) и В(Тл)							
0	Н	$0,1 \cdot 10^{-3}$	0,25	1,0	2,5	5,0	10	15
	В	$5,4 \cdot 10^{-5}$	1,1	1,45	1,7	1,88	1,94	1,95
1	Н	$0,1 \cdot 10^{-3}$	0,25	1,0	2,5	5,0	10	15
	В	$5,2 \cdot 10^{-5}$	1,0	1,35	1,60	1,79	1,86	1,87
2	Н	$0,1 \cdot 10^{-3}$	0,25	1,0	2,0	4,0	10	16
	В	$5,1 \cdot 10^{-5}$	0,96	1,25	1,45	1,75	1,85	1,86
3	Н	$0,1 \cdot 10^{-3}$	0,25	1,0	2,0	4,0	10	16
	В	$4,9 \cdot 10^{-5}$	0,98	1,30	1,45	1,77	1,87	1,88
4	Н	$0,1 \cdot 10^{-3}$	0,25	1,0	2,5	5,0	10	16
	В	$5,5 \cdot 10^{-5}$	1,20	1,55	1,80	1,98	2,04	2,05
5	Н	$0,1 \cdot 10^{-3}$	0,25	1,0	2,5	5,0	10	15
	В	$5,3 \cdot 10^{-5}$	1,05	1,40	1,65	1,84	1,91	1,92
6	Н	$0,1 \cdot 10^{-3}$	0,25	1,0	2,5	5,0	10	15
	В	$4,8 \cdot 10^{-5}$	1,15	1,50	1,70	1,98	1,99	2,00
7	Н	$0,1 \cdot 10^{-3}$	0,25	1,0	2,5	5,0	10	16
	В	$5,3 \cdot 10^{-5}$	1,17	1,51	1,73	1,89	1,95	1,96
8	Н	$0,1 \cdot 10^{-3}$	0,25	1,0	2,5	5,0	8,0	16
	В	$4,9 \cdot 10^{-5}$	1,03	1,43	1,58	1,84	1,97	1,98
9	Н	$0,1 \cdot 10^{-3}$	0,25	1,0	2,5	5,0	10	15
	В	$5,0 \cdot 10^{-5}$	1,17	1,52	1,76	1,95	20,1	2,02

Таблица 1.6

Зависимость удельных потерь в магнитном материале от амплитуды магнитной индукции при частоте 50 Гц

B_{max} , Тл	0,5	1,0	1,5	1,7	2,0
$p_{уд/50}$, Вт/кг	0,3	1,1	2,5	3,2	4,4

Таблица 1.7

Размеры сердечника и амплитуды магнитной индукции

Параметры	Последняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$S, \text{ см}^2$	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
$l, \text{ м}$	0,3	0,29	0,28	0,27	0,26	0,25	0,24	0,23	0,22	0,21
Предпоследняя цифра шифра										
Вариант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$B_{\text{max}}, \text{ Тл}$	0,9	1,1	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8

Методические указания к решению задачи 5

По магнитным свойствам материалы можно разделить на слабомагнитные (диамагнетики и парамагнетики) и сильномагнитные (ферромагнетики и ферримагнетики). У сильномагнитных материалов магнитная проницаемость $\mu_r \gg 1$ и зависит от напряженности внешнего магнитного поля. Как известно, величина магнитной проницаемости характеризует способность материала усиливать магнитное поле. К магнитным материалам относятся ферромагнетики и ферримагнетики.

Протекание процессов намагничивания в магнитных материалах характеризуется кривой намагничивания - зависимостью магнитной индукции от напряженности магнитного поля $B = f(H)$.

Зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля может быть рассчитана по формуле

$$B = \mu_0 \mu_r H, \quad (1.13)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ_r – относительная магнитная проницаемость материала.

Относительная магнитная проницаемость, которую на практике называют сокращенно магнитной проницаемостью, определяется по основной кривой намагничивания как отношение индукции к напряженности магнитного поля в данной точке кривой намагничивания с учетом магнитной постоянной $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, то есть

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H}. \quad (1.14)$$

На рис. 1.2 показан характер изменения магнитной проницаемости μ_r от напряженности магнитного поля H . Очевидно, что магнитная проницаемость пропорциональна крутизне кривой намагничивания и при определенном значении напряженности она достигает своего максимального значения μ_{max} . Далее крутизна кривой намагничивания уменьшается и магнитная про-

ницаемость резко падает до значения практически равного единице в области насыщения.

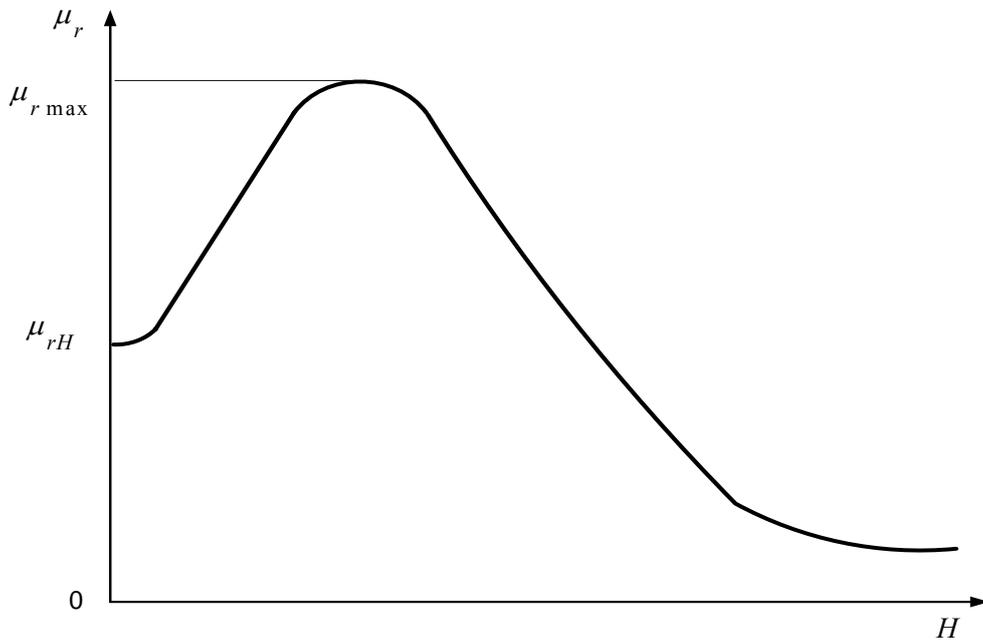


Рис. 1.2 Зависимость $\mu = f(H)$ ферромагнитного материала

По своим свойствам магнитные материалы делятся на магнитомягкие и магнитотвердые материалы.

Магнитомягкие материалы применяются для изготовления сердечников электрических машин и аппаратов, в измерительных приборах, там, где при наименьших затратах энергии требуется достигнуть наибольшей индукции, а магнитотвердые – в качестве материала постоянных магнитов.

Процесс перемагничивания ферромагнитных материалов в переменных магнитных полях всегда сопровождается тепловыми потерями, которые обусловлены потерями на гистерезис и динамическими потерями. Динамические потери вызываются вихревыми токами и магнитной вязкостью материала, так называемые потери на магнитное последствие.

Потери на гистерезис пропорциональны площади статической петли гистерезиса, но ее сложная форма значительно усложняет их аналитический расчет. Для расчета потерь энергии за один цикл перемагничивания в единице объема вещества применяется эмпирическая формула

$$W_H = \eta B_{max}^n, \quad (1.15)$$

где η – коэффициент, зависящий от материала; B_{max} – максимальная индукция, достигаемая в течении цикла; n – показатель степени ($n = 1,6 - 2,0$).

Тогда мощность, расходуемая на гистерезис, будет равна

$$P_H = \eta B_{max}^n fV, \quad (1.16)$$

где f – частота тока; V – объем ферромагнитного сердечника.

Потери на вихревые токи зависят от электрического сопротивления сердечника. Чем выше удельное электрическое сопротивление ферромагнетика, тем меньше потери на вихревые токи.

Для расчета мощности, расходуемой на вихревые токи, также используется эмпирическая формула

$$P_f = \xi B_{\max}^2 f^2 V, \quad (1.17)$$

где ξ – коэффициент, зависящий от материала сердечника.

В инженерной практике для упрощения расчетов потерь в ферромагнитных сердечниках вводится понятие удельных потерь, то есть потерь мощности, приходящихся на единицу массы материала, которые равны

$$p_y = \frac{P}{m}, \quad (1.18)$$

где P – суммарные потери в сердечнике; m – масса сердечника.

Как видно из приведенных выше формул, мощность потерь в ферромагнетиках зависит от амплитуды магнитной индукции и частоты, поэтому в справочных данных обычно приводятся несколько значений удельных потерь для определенных значений магнитной индукции и частоты.

Окончательно формула для определения магнитных потерь в сердечнике имеет вид

$$P = p_y \cdot V \cdot \lambda, \quad (1.19)$$

где λ – плотность материала сердечника.

Плотность стали рекомендуется взять в пределах 7870 – 8000 кг/м³.

ЗАДАЧА 6

Задан магнитотвердый материал, из которого изготовлен постоянный магнит.

Требуется:

1. Изучить свойства и основные характеристики магнитотвердых материалов. Привести числовые значения основных магнитных параметров заданного материала, указать область использования данного материала.

2. Графически построить кривую размагничивания для заданного материала $B = f(H)$. При построении учесть, что кривая размагничивания расположена во втором квадранте.

3. По кривой размагничивания определить остаточную индукцию и коэрцитивную силу.

4. Рассчитать и построить график зависимости удельной магнитной энергии в воздушном зазоре магнита от магнитной индукции $W = f(B)$.

5. Определить максимальную удельную энергию в воздушном зазоре и соответствующие ей индукции и напряженность магнитного поля.

6. Вычислить коэффициент выпуклости кривой размагничивания.

Данные кривой размагничивания по вариантам приведены в табл. 1.8, марка магнитотвердого материала для каждого варианта задана в табл. 1.9.

Таблица 1.8

Кривая размагничивания магнитотвердого материала

Последняя цифра шифра	Значения параметров H (кА/м) и B (Тл)							
		0	10	20	30	40	50	53
0	- H	0	10	20	30	40	50	53
	B	1,33	1,32	1,3	1,27	1,22	0,9	0
1	- H	0	10	20	30	40	50	62
	B	1,28	1,27	1,25	1,22	1,18	1,02	0
2	- H	0	10	20	25	30	40	45
	B	1,23	1,21	1,106	1,1	1,04	0,8	0
3	- H	0	10	20	25	30	40	51
	B	1,2	1,15	1,09	1,05	1,00	0,85	0
4	- H	0	10	20	30	40	50	59
	B	1,10	1,06	0,99	0,88	0,4	0,42	0
5	- H	0	10	20	30	40	50	56
	B	0,89	0,84	0,76	0,64	0,47	0,18	0
6	- H	0	20	40	60	70	80	87
	B	0,80	0,72	0,63	0,49	0,37	0,18	0
7	- H	0	10	20	25	30	40	48
	B	0,75	0,66	0,55	0,48	0,40	0,22	0
8	- H	0	10	20	25	30	40	45
	B	0,60	0,55	0,47	0,41	0,34	0,15	0
9	- H	0	10	20	30	40	50	53
	B	0,50	0,45	0,39	0,30	0,22	0,05	0

Таблица 1.9

Магнитотвердые материалы

Предпоследняя цифра шифра	Марка материала
0	ЮНД8
1	ЮНДК15
2	ЮНДК35Т5
3	07БИ
4	1БИС
5	ЗБА2
6	Викаллой 11
7	ЕХ3
8	ЕХ5К5
9	ММК

Методические указания к решению задачи 6

Магнитотвердыми называют материалы с большой коэрцитивной силой. Такие материалы обладают значительной остаточной индукцией и сравнительно малой магнитной проницаемостью. Основное применение магнитотвердые материалы нашли для изготовления постоянных магнитов.

Магнитотвердые материалы обычно характеризуются кривой размагничивания. Кривая размагничивания - зависимость $B = f(H)$, получаемая при размагничивании материала от индукции насыщения (второй квадрант петли гистерезиса).

Основными количественными характеристиками магнитотвердых материалов являются:

- коэрцитивная сила H_c ;
- остаточная индукция B_r ;
- максимальная удельная энергия, отдаваемая магнитом во внешнее пространство W_d .

Удельная магнитная энергия (энергия, приходящаяся на единицу объема материала магнита), заключенная в воздушном зазоре, определяется по формуле

$$W_d = \frac{B_d H_d}{2}, \quad (1.20)$$

где H_d – напряженность магнитного поля в данной точке, соответствующая магнитной индукции B_d .

При замкнутом магните магнитная индукция максимальна ($B_d = B_r$), а напряженность равна нулю ($H_d = 0$), вследствие чего и отдаваемая энергия равна нулю, при очень большом зазоре между полюсами, наоборот, напряженность максимальна ($H_d = H_c$), а индукция равна нулю ($B_d = 0$), соответственно энергия также стремится к нулю.

При определенной величине зазора между полюсами магнита энергия достигает максимального значения, равного

$$W_{\max} = \frac{(B'_d \cdot H'_d)}{2} = \frac{(B \cdot H)_{\max}}{2}, \quad (1.21)$$

где B'_d и H'_d – напряженность магнитного поля в данной точке, соответствующая оптимальному воздушному зазору.

Наиболее важной характеристикой магнитотвердых материалов является максимальная удельная энергия W_{\max} , измеряемая на практике в кДж/м³.

Также для характеристики магнитотвердых материалов применяется коэффициент выпуклости кривой размагничивания

$$\beta = \frac{(B \cdot H)_{\max}}{(B_r H_c)}. \quad (1.22)$$

Чем более выпуклую форму имеет кривая размагничивания при определенных значениях индукции насыщения и коэрцитивной силы, тем больше энергия, отдаваемая магнитом во внешнее пространство.

ЗАДАЧА 7

Прожекторная установка, состоящая из n числа прожекторов, служит для освещения площадки ОРУ. Питание установки осуществляется от трехфазной питающей сети по одножильному (или многожильному) кабелю длиной l . Каждый прожектор потребляет мощность P при номинальном напряжении U . Известна относительная потеря напряжения e .

Требуется:

1. Определить сечение жилы кабеля S .
2. Выбрать марку кабеля или провода.

Числовые данные для расчета по вариантам приведены в табл. 1.10.

Таблица 1.10

Параметры прожекторной установки

Вариант	Предпоследняя цифра шифра			Последняя цифра шифра		
	n	l , м	материал	U , В	e , %	P , кВт
0	6	100	Медь	127	2,5	600
1	4	80	Медь	220	3,0	750
2	3	120	Медь	127	2,0	1000
3	8	120	Алюминий	220	5,2	250
4	3	150	Алюминий	220	2,5	750
5	6	80	Алюминий	127	4,5	600
6	8	75	Медь	127	2,2	250
7	4	150	Медь	220	2,3	1000
8	3	120	Алюминий	127	5,0	750
9	6	75	Алюминий	220	2,8	600

Методические указания к решению задачи 7

Сечение жил кабелей и соединительных проводов S_n нормировано в зависимости от допустимых значений токовых нагрузок.

Расчетный ток для прожекторной установки следует находить из заданного значения мощности и количества светильников, то есть

$$I_p = \frac{nP}{U}. \quad (1.23)$$

Для предварительного расчета сечения жилы кабеля S_p , измеряемого в мм^2 , может быть использована формула

$$S_p = \frac{2l\rho}{\Delta U} I_p, \quad (1.24)$$

где ρ – удельное сопротивление проводникового материала при нормальной температуре ($\text{мкОм}\cdot\text{м}$); l – длина кабеля (м); ΔU – относительная потеря напряжения в кабеле или проводе (В); I_p – расчетный ток (А).

В табл. 1.11 приведен ряд нормированных значений сечений для медных и алюминиевых проводов S_n , которыми необходимо руководствоваться выборе жилы кабеля. По значению расчетного сечения S_p выбирается нормированное сечение S_n , при этом необходимо, проверить выполнение следующих условий:

$$S_n > S_p \text{ и } I_{доп} > I_p \quad (1.25)$$

Таблица 1.11

Допустимые длительные токовые нагрузки на провода и кабели

Сечение токопроводящей жилы S_n , мм ²	Медные провода			Алюминиевые провода		
	Допустимая токовая нагрузка в при прокладке, А					
	Открытая прокладка	2 одно- жильных в трубе	3 одно- жильные в трубе	Открытая прокладка	2 одно- жильных в трубе	3 одно- жильные в трубе
1	15	14	13	-	-	-
1,5	20	17	15	-	-	-
2,5	27	24	22	21	18	17
4,0	36	34	31	28	25	25
6,0	46	41	37	35	32	28
10	70	60	55	50	45	42
16	90	75	70	70	55	52
25	125	100	90	95	75	70
35	150	120	110	115	90	85
50	190	165	150	145	125	115
70	240	200	185	185	155	145

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В, Тареев Б.М. Электротехнические материалы. 7-е изд. – Л.: Энергоатомиздат, 1985.- 304 с.
2. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В. Корицкого. –М.: Энергия, 1985. Т.3. – 568 с.
3. Преображенский А.А. Магнитные материалы и элементы. – М.: Высшая школа, 1987. – 225 с.
4. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. – М.: Энергия, 1973. – 360 с.
5. И.И. Алиев, С.Г. Калганов. Электротехнические материалы и изделия. Справочник. – М.: ИП РадиоСофт. 2005. – 352 с.

2 ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

ЗАДАЧА 1

Для крепления и изоляции токоведущих частей электроустановки применена гирлянда подвесных изоляторов. По величине заданного номинального напряжения, назначению электроустановки и степени загрязненности атмосферы требуется:

1. Выбрать тип изолятора и обосновать его выбор.
2. Начертить эскиз конструкции выбранного изолятора и привести числовые значения его основных характеристик.
3. Определить необходимое количество изоляторов в гирлянде.
4. Рассчитать и построить график распределения падения напряжения вдоль гирлянды изоляторов.
5. Указать возможные пути выравнивания напряжения.

Числовые значения параметров электроустановки по вариантам приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Данные для расчета гирлянды изоляторов

Вариант	Последняя цифра шифра	Предпоследняя цифра шифра	
	$U_{\text{ном}}$, кВ	Степень загрязненности атмосферы	Вид токоведущих частей
0	6	VI	Провода ЛЭП
1	10	II	Шины РУ
2	15	III	Провода ЛЭП
3	20	IV	Шины РУ
4	27,5	V	Провода ЛЭП
5	35	VI	Шины РУ
6	110	III	Провода ЛЭП
7	220	IV	Шины РУ
8	500	II	Шины РУ
9	750	I	Провода ЛЭП

Методические указания к решению задачи 1

Изоляторами называют электротехнические изделия, предназначенные для разделения разнопотенциальных частей электроустановки, то есть для предотвращения протекания электрического тока между этими частями электроустановки, и для механического крепления токоведущих частей.

По расположению токоведущей части различают опорные, проходные и подвесные изоляторы, назначение которых прямо определяются их названиями.

По конструктивному исполнению изоляторы делятся на тарельчатые (изоляционная часть в форме тарелки), стержневые (изоляционная часть в виде стержня или цилиндра) и штыревые (изолятор имеет металлический штырь, несущий основную механическую нагрузку).

По месту установки различают линейные изоляторы, используемые для подвески проводов линий электропередачи и контактной сети, и стационарные изоляторы, используемые на электростанциях, подстанциях (в том числе и тяговых) и постах секционирования. В последнем плане одни и те же типы изоляторов, например, подвесные тарельчатые, могут быть и линейными и стационарными.

Электрическая прочность изоляторов зависит от состояния их поверхности и от вида воздействующего напряжения. Поскольку поверхности изоляторов загрязняются и увлажняются неравномерно, то напряжение перекрытия пропорционально не геометрической, а эффективной длине пути утечки, которая для гирлянд и колонок, состоящих из n изоляторов, равна

$$L_{\text{эф}} = n \cdot \frac{L_{1\text{ym}}}{k}, \quad (2.1)$$

где $L_{1\text{ym}}$ – геометрическая длина утечки одного изолятора, входящего в состав гирлянды или колонки; k – поправочный коэффициент, называемый коэффициентом формы изолятора.

Коэффициент k можно приближенно оценить по эмпирическим формулам:

- для изоляторов стержневого типа

$$k = 0,35 \cdot \left(1 - \frac{L_{1\text{ym}}}{H} \right), \quad (2.2)$$

- для изоляторов тарельчатого типа

$$k = 1 + 0,5 \cdot \left(\frac{L_{1\text{ym}}}{D} - 1 \right), \quad (2.3)$$

где H – длина тела изолятора стержневого типа, D – диаметр тарелки изолятора тарельчатого типа.

Установлены система классификации местностей по степени загрязненности атмосферы (табл. 2.3) и минимально допустимое значение удельной длины пути утечки, которым пользуются при расчете числа изоляторов в гирлянде, равное

$$\lambda_{\text{Э}} = L_{\text{эф}} / U_{\text{л.маx}}. \quad (2.4)$$

Отсюда число изоляторов в гирлянде может быть найдено из условия

$$n \geq \lambda_{\text{Э}} U_{\text{л.маx}} / L_{\text{эф}}, \quad (2.5)$$

где $U_{\text{л.маx}}$ – максимальное линейное рабочее напряжение электрической системы, указанное в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Максимальные рабочие напряжения электрических систем

U_n , кВ	3	6	10	20	35	110	150	220	330	500	750	1150
$U_{л.маx}$, кВ	3,5	6,9	10,5	23	40,5	125	172	252	363	525	787,5	1200

В связи с возможностью повреждения изоляторов в эксплуатации число n изоляторов должно быть увеличено: для линий 110 – 220 кВ – на один, для линий 330 – 500 кВ – на два изолятора.

В соответствии с условием (2.5) и параметрами стандартных подвесных изоляторов ПУЭ рекомендованы конкретные числа изоляторов разного типа для воздушных линий электропередачи и распределительных устройств (РУ). Выбранное количество изоляторов в гирлянде не должно быть меньше нормируемого.

Таблица 2.3

Нормированная удельная эффективная длина пути утечки

Степень загрязненности атмосферы	$\lambda_э$, см/кВ (не менее)			
	Для воздушных ЛЭП при номинальном напряжении, кВ		Для оборудования РУ при номинальном напряжении, кВ	
	6 – 35	110 – 750	6 – 35	110 – 750
I	1,7	1,3	1,7	1,5
II	1,9	1,9	1,7	1,5
III	2,25	1,6	2,25	1,8
IV	2,6	2,25	2,6	2,25
V	3,5	3,0	3,5	3,0
VI	4,0	3,5	4,0	3,5
VII	4,5	4,0	4,5	4,0

Для изоляции воздушных линий электропередачи, шин РУ и контактных проводов применяются тарельчатые, штыревые и стержневые изоляторы.

Гирлянда изоляторов, составленная из подвесных тарельчатых изоляторов, является одной из наиболее часто встречающихся видов изоляции проводов воздушных линий и контактной сети.

Напряжение, приложенное к гирлянде изоляторов, распределяется неравномерно, и на разные изоляторы приходятся разные доли напряжений, что снижает напряжение начала короны и напряжение перекрытия гирлянды. В наиболее неблагоприятной ситуации оказывается изолятор, ближайший к проводу.

На рис. 2.1 показана схема замещения гирлянды, состоящей из четырех тарельчатых изоляторов. На схеме обозначены: собственная емкость изолятора C_0 , равная 50 – 70 пФ, емкость изоляторов по отношению к земле C_1 , равная 4 – 5 пФ и емкость изоляторов по отношению к проводу C_2 , равная 0,5 – 1 пФ.

Вследствие ответвления тока на емкости C_1 , токи i_0 , проходящие через собственные емкости изоляторов C_0 , и падения напряжения на изоляторах будут тем меньше, чем дальше изолятор расположен по отношению к токоведущему проводу.

Влияние емкости C_2 носит противоположный характер, а именно: токи i_0 , проходящие через собственные емкости изоляторов C_0 , и падения напряжения на изоляторах будут меньше на изоляторах, которые находятся дальше от заземленного конца гирлянды.

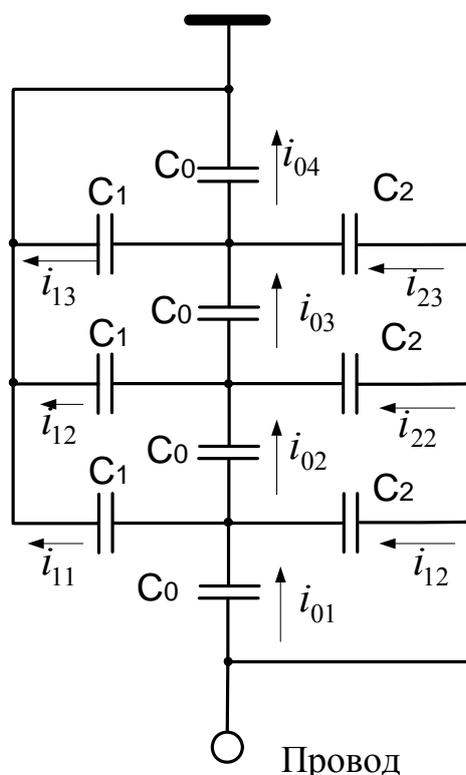


Рис. 2.1. Схема замещения гирлянды изоляторов

В реальных условиях наибольшее напряжение будет приложено к изолятору, расположенному около токоведущего провода, наименьшее – к изоляторам, находящимся в середине гирлянды, и несколько выше – к изоляторам у заземленного конца гирлянды.

Для расчета падения напряжения на каждом изоляторе следует воспользоваться усредненным графиком распределения напряжения на гирлянде изоляторов (рис. 2.2).

Для выравнивания напряжения по изоляторам гирлянды применяют экраны в виде тороидов, овалов, восьмерок, закрепляемых снизу гирлянды; на линиях с расщепленными фазами утапливают ближайшие изоляторы между проводами расщепленной фазы, расщепляют гирлянду около провода на

две. Все эти меры выравнивают распределение напряжения из-за увеличения емкости C_2 .



Рис. 2.2. Распределение напряжения на гирлянде изоляторов

ЗАДАЧА 2

В трехфазной системе с изолированной нейтралью произошло короткое замыкание одной фазы на землю. Известно: номинальное напряжение сети U_N , сечения проводов S (провод круглого сечения), средняя высота подвеса проводов над землей h , длине линии электропередачи l .

Требуется определить:

1. Величину тока однофазного короткого замыкания на землю.
2. Величину индуктивности дугогасящей катушки, выбираемой из условия идеальной компенсации тока замыкания на землю и пояснить достоинства и недостатки использования дугогасящих катушек.
3. Реактивную мощность дугогасящей катушки.
4. Величину возникшего перенапряжения на фазах трансформатора и его кратность по отношению к номинальному фазному напряжению, используя для этой цели векторную диаграмму при однофазном коротком замыкании на землю.

При расчете режим короткого замыкания следует считать установившимся.

Числовые данные исходных величин приведены в табл. 2.4.

Параметры линии электропередачи

Номер варианта	Последняя цифра шифра		Предпоследняя цифра шифра	
	h , м	S , мм ²	l , км	U_H , кВ
0	8	16	5	6
1	9	25	10	10
2	10	35	15	35
3	11	50	20	6
4	12	70	25	10
5	13	16	30	35
6	14	25	35	6
7	15	50	40	10
8	16	70	45	35
9	17	95	50	10

Методические указания к решению задачи 2

Система с изолированной нейтралью – это система, в которой нейтрали трансформаторов не имеют глухого соединения с землей. В России с таким режимом работают электроустановки напряжением 6, 10 и 35 кВ.

В случае нарушения изоляции между фазой и землей происходит замыкание на землю, сопровождающиеся изменением напряжением на фазах и нейтрали. Система при этом может продолжать работать, так как ток замыкания на землю в такой системе невелик и равен

$$I_3 = 3\omega C_0 l U_\phi, \quad (2.6)$$

где C_0 – емкость фазы линии на единицу длины по отношению к земле; l – длина линии.

При этом емкость C_0 фазы воздушной линии на единицу может быть определена по формуле

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2h}{r}}, \quad (2.7)$$

где h – высота провода над землей; r – радиус провода; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Горящая в месте замыкания дуга может перекинуться на соседние провода и перейти в межфазное короткое замыкание, при котором токи значительно превышают рабочие значения, и привести к пробоем ослабленной изоляции в любом месте системы.

Для гашения дуги однофазного замыкания на землю чаще всего применяется дугогасящая катушка, которую включают между нейтральной точкой трансформатора и землей (рис. 2.3).

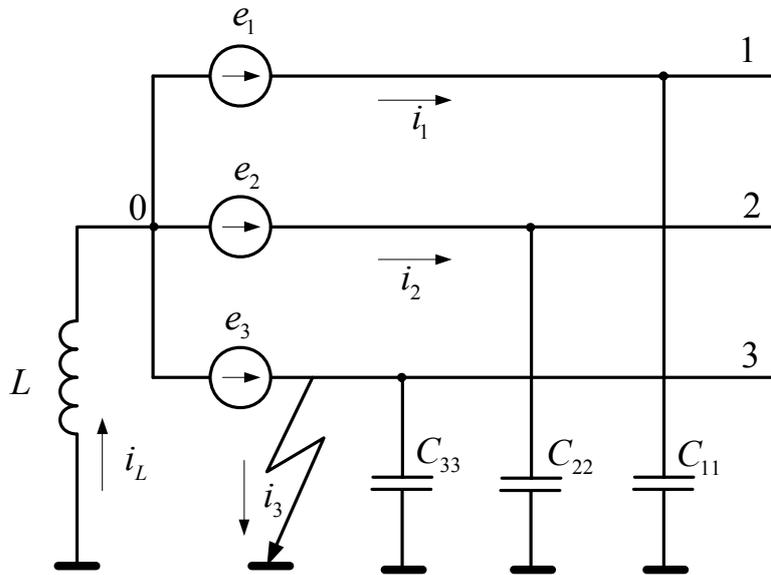


Рис. 2.3. Схема трехфазной системы с дугогасящим реактором

На рис. 2.3 показаны емкостные токи i_1 и i_2 , протекающие в фазах системы, ток короткого замыкания на землю i_3 и ток, проходящий по катушке i_L .

Из векторной диаграммы (рис. 2.4) видно, что ток замыкания на землю определяется суммой двух емкостных токов, сдвинутых по фазе на 60° . Для гашения дуги необходимо, чтобы ток в месте замыкания на землю был равен нулю. Этого можно достичь, если включить в нейтраль индуктивность такой величины, чтобы ток, протекающий через нее, был равен по модулю и сдвинут по фазе на 180° относительно тока, протекающего в месте замыкания на землю. Такой индуктивностью и является дугогасящая катушка.

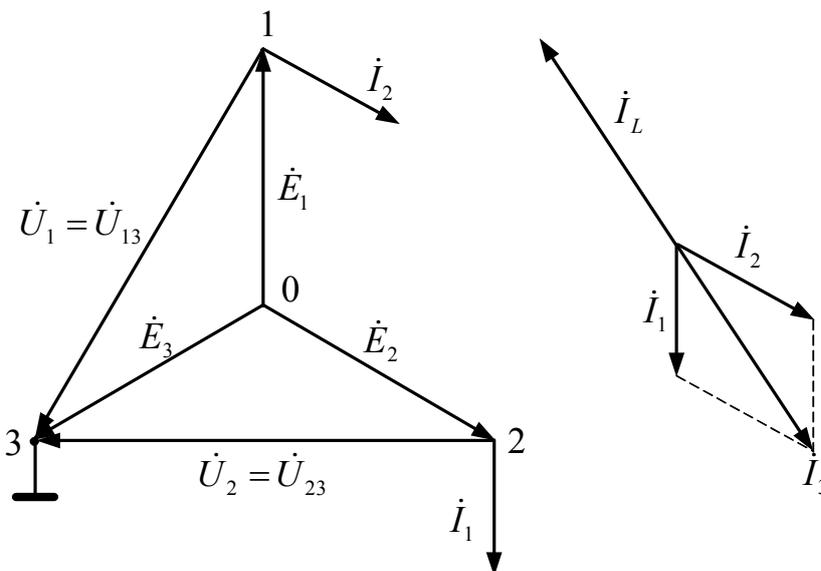


Рис. 2.4. Векторная диаграмма напряжений и токов

Если будет иметь место равенство

$$I_3 = I_L, \quad (2.8)$$

тогда

$$3\omega C_{11} U_{10} = \frac{U_{10}}{\omega L}, \quad (2.9)$$

где C_{11} – частичная емкость исправного (первого) провода; U_{10} – фазное напряжение; L – индуктивность дугогасящей катушки.

Таким образом, условие идеальной настройки катушки будет

$$\omega L = \frac{1}{3\omega C_{11}}. \quad (2.10)$$

Более подробно данная тема освещена в рекомендуемой литературе.

ЗАДАЧА 3

Грозовой разряд произошел в столб телеграфной линии, расположенной на расстоянии a , от высоковольтной линии электропередачи (ЛЭП) номинальным напряжением U_H . При этом зарегистрированная величина тока молнии была равна I_M . Высота подвеса проводов ЛЭП равна h , а стрела провеса ее проводов f . Требуется определить:

1. Величину индуктированного напряжения U_u на проводах высоковольтной ЛЭП.

2. Кратность перенапряжения.

Числовые значения заданных величин указаны в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Параметры разряда молнии и телеграфной линии

Вариант	Предпоследняя цифра шифра			Последняя цифра шифра	
	U_H , кВ	I_M , кА	h , м	f , м	a , м
0	6	5	10	4	5
1	10	10	12	4,5	7,5
2	20	15	14	5	10
3	35	20	16	5,5	12
4	110	25	18	6	13
5	154	30	20	6,5	14
6	27,5	35	22	7	15
7	20	40	10	7,5	18
8	35	45	12	8	19
9	220	50	15	9	20

Методические указания к решению задачи 3

При поражении молнией элементов воздушных линий электропередачи возникающее перенапряжение складывается из индуктированного напряжения на проводах линии и из потенциала на пораженном элементе, обусловленного протеканием по нему тока прямого разряда.

При разряде молнии в землю или в соседний объект на проводах возникает только индуктированное перенапряжение, величина которого будет равна

$$U_u = k_u \frac{h_{cp}}{a} I_M, \quad (2.11)$$

где h_{cp} – средняя высота подвеса проводов; a – расстояние от места разряда молнии до линии электропередачи; I_M – ток молнии; k_u – коэффициент равный 25 – 30 Ом.

Средняя высота подвеса проводов ВЛ в пролете определяется как

$$h_{cp} = h - \frac{2}{3} f, \quad (2.12)$$

где h – высота подвеса проводов; f – стрела провеса проводов.

Определяя кратность перенапряжения, следует иметь в виду, что индуктированное перенапряжение воздействует на изоляцию фазы и его можно считать одинаковым для всех трех фаз высоковольтной линии.

ЗАДАЧА 4

Для защиты здания подстанции (шириной a , длиной b и высотой h) от прямых ударов молнии установлен одиночный стержневой молниеотвод (рис. 2.6). Задана глубина нижнего конца фундамента молниеотвода от поверхности земли $h_\phi = 3,2$ м; ширина фундамента $a_\phi = 0,8$ м; коэффициент, учитывающий сопротивление бетона $k_\delta = 1,7$; удельное сопротивление грунта ρ и ток молнии I , кА. Требуется:

1. Определить импульсное сопротивление заземления естественного заземлителя (фундамента молниеотвода), сделать вывод об его защищающих свойствах.

2. Рассчитать сложный контур заземления, состоящий из вертикальных и горизонтальных электродов.

3. Определить импульсное сопротивление контура заземления молниеотвода R_u .

4. Начертить эскиз рассчитанного контура заземления.

5. Определить минимально допустимое расстояние от молниеотвода до защищаемого объекта l_{min} , радиус зоны защиты r на высоте h , высоту молниеотвода H .

6. Определить шаговое напряжение $U_{ш}$ между точками на поверхности земли, удаленными на расстояние x и $(x + a_{ш})$ от молниеотвода, где $a_{ш}$ – ширина шага, равная 0,8 м.

Числовые значения заданных величин указаны в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Параметры защищаемого объекта и разряда молнии

Вариант	Последняя цифра шифра			Предпоследняя цифра шифра		
	I_M , кА	ρ , Ом·м	x , м	a , м	b , м	h , м
0	15	100	1	3	10	12
1	20	150	1,5	3,5	12	11,5
2	25	200	2	4	15	11
3	30	250	2,5	4,5	10,5	10,5
4	35	300	3	5	12,5	9,5
5	40	400	3,5	5,5	14	9
6	45	450	4	6	9,5	8,5
7	50	500	5	6,6	9	8
8	55	550	4,5	7	8,5	7,5
9	60	600	5	7,5	8	7

Методические указания к решению задачи 4

Молниеотводы являются эффективным средством защиты от прямых ударов молнии. Заземление молниеотвода предназначено для безопасного отвода в землю токов молнии.

Основной величиной, характеризующей электрические свойства заземлителя, является сопротивление растеканию.

Стационарное сопротивление железобетонного фундамента R_ϕ определяется как

$$R_\phi = \frac{1,7\rho}{2\pi \cdot h_\phi} \ln \frac{4h_\phi}{a_\phi}, \quad (2.13)$$

где h_ϕ – глубина нижнего конца фундамента от поверхности земли; a_ϕ – ширина фундамента.

Прохождение больших импульсных токов (токов молнии) через заземлитель сопровождается специфическими особенностями, которые приводят к значительному изменению сопротивления растеканию.

Сопротивление растеканию импульсного тока одиночного заземлителя R_u называется импульсным сопротивлением и равно

$$R_u = \alpha_u R_{50}, \quad (2.14)$$

где R_{50} – стационарное сопротивление растеканию при токе промышленной частоты; α_u – импульсный коэффициент, зависящий от величины удельного сопротивления грунта и тока молнии (рис. 2.5).

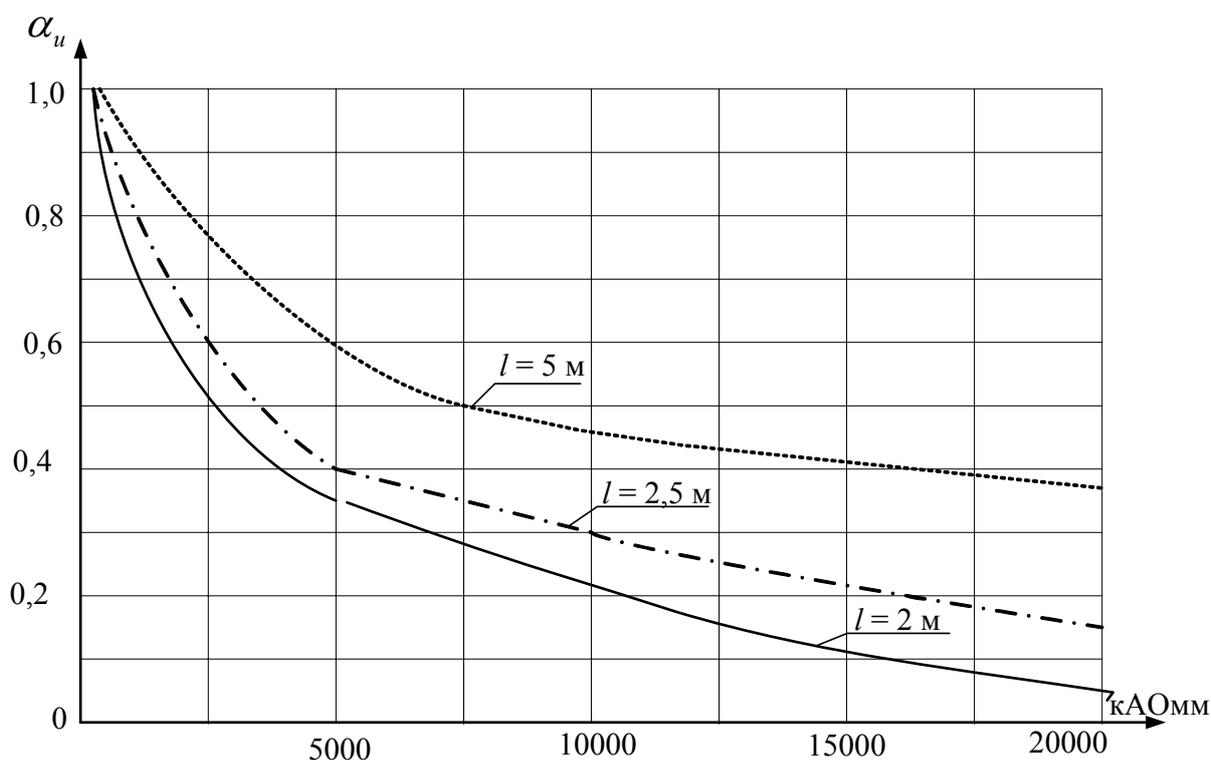


Рис. 2.5. График зависимости импульсных коэффициентов α_u вертикальных заземлителей различной длины от величины $I_M \rho$

Для обеспечения грозоупорности линий электропередачи и подстанций 6 – 500 кВ импульсные сопротивления заземляющих устройств не должны превышать 10 – 15 Ом.

Если импульсное сопротивление естественного заземлителя (фундамента) больше допустимого значения, требуется рассчитать искусственный заземлитель, который обычно представляет собой контур, состоящий из нескольких вертикальных электродов, объединенных горизонтальной полосой. Эквивалентное стационарное сопротивление сложного заземлителя может быть определено по формуле

$$R_{50} = \frac{R_{BO} R_O}{R_{BO} + n R_O} \cdot \frac{1}{\eta_u}, \quad (2.15)$$

где R_{BO} – стационарное сопротивление вертикального электрода; R_O – стационарное сопротивление горизонтального электрода, n – число вертикальных электродов; η_u – импульсный коэффициент использования, учитывающий взаимное влияние всех электродов.

В качестве одиночных заземлителей обычно выбираются трубы, полосовая или уголкового сталь. Существуют эмпирические формулы для расчета сопротивлений простых вертикальных и горизонтальных заземлителей, учитывающие их форму, геометрические размеры, глубину залегания в земле и удельное сопротивление грунта.

Формулы для расчета сопротивлений одиночных заземлителей наиболее распространенных форм электродов приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Расчетные формулы для вычисления стационарных сопротивлений

Заземлитель	укладка	Сечение	
		Круглое	Прямоугольное
Горизонтальный	$t \neq 0$	$R_0 = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{dt}$	$R_0 = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l^2}{tb}$
	$t = 0$	$R_0 = \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{2l}{d}$	$R_0 = \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{4l}{b}$
Вертикальный	$t \neq 0$	$R_{BO} = \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \frac{2l}{0.95b} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right]$	–
	$t = 0$	$R_{BO} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{t}$	–

Примечание: ρ – удельное сопротивление грунта; t – глубина укладки контура заземления; l – длина (высота) заземлителя; d – диаметр заземлителя круглого сечения (трос, труба), b – ширина полки заземлителя прямоугольного сечения.

Импульсный коэффициент использования η_u зависит от формы заземлителей, их числа и взаимного расположения, его величина определяется из таблиц, построенных на основе расчета, и обычно изменяется в пределах от 0,6 до 0,8.

Импульсное сопротивление сложного заземлителя R_u рассчитывается по формуле (2.14), при этом допускается пользоваться графиком рис. 2.5.

Минимальное расстояние от молниеотвода до защищаемого объекта высотой h будет равно

$$l_{\min} = 0,3R_u + 0,1h. \quad (2.16)$$

Следует иметь в виду, что не допускается принимать это расстояние менее 5 м.

Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода образует поверхность вращения радиусом r_x (рис. 2.6). Радиус зоны защиты на высоте h равен

$$r_x = \sqrt{(l_{\min} + a)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2}, \quad (2.17)$$

где a и b – соответственно ширина и длина защищаемого объекта.

Высота молниеотвода, обеспечивающая значение r_h , может быть вычислена из выражения

$$r_x = \frac{1,6}{1 + \frac{h}{H}} (H - h), \quad (2.19)$$

где H – высота молниеотвода ($H < 30$ м).

Отсюда формула для расчета высоты молниеотвода будет иметь вид

$$H = \frac{r_x + 1,6h}{2 \cdot 1,6} + \sqrt{\left(\frac{r_x + 1,6h}{2 \cdot 1,6}\right)^2 + \frac{r_x h}{1,6}}. \quad (2.20)$$

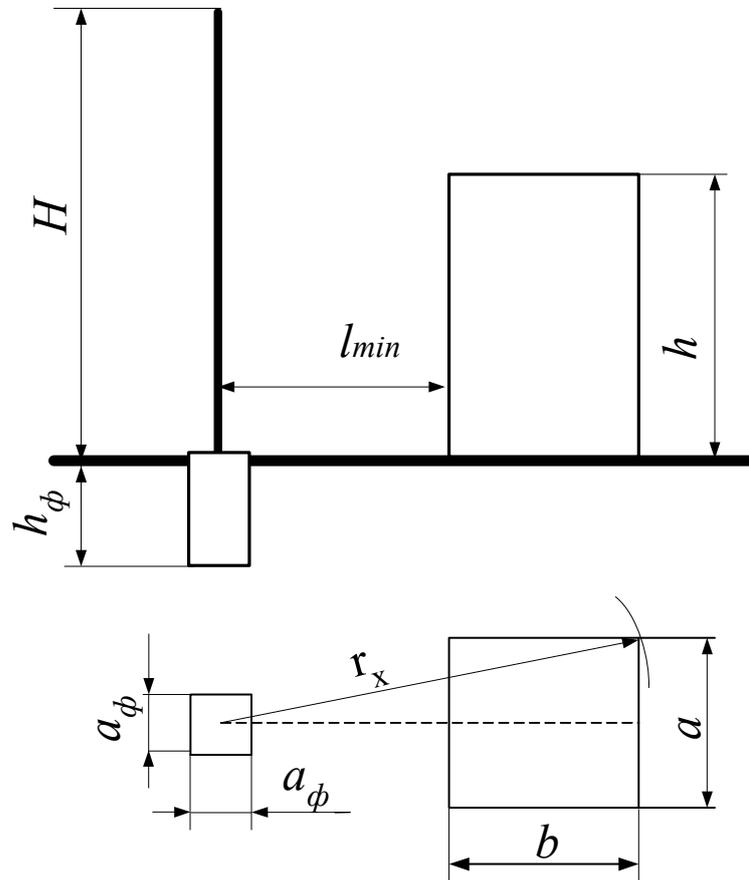


Рис. 2.6. Схема расположения молниеотвода и защищаемого объекта

При ударе молнии потенциал точки земли на расстоянии x от центра заземлителя равен

$$\varphi_x = I \int_x^{\infty} dR_u = \frac{I\rho}{2\pi x}. \quad (2.21)$$

Тогда шаговое напряжение может быть определено из выражения

$$U_{III} = \varphi_x - \varphi_{x+a}, \quad (2.22)$$

подставляя значения потенциала, получим окончательную формулу для расчета шагового напряжения

$$U_{III} = \frac{I\rho a}{2\pi(x+a)x}. \quad (2.23)$$

Более подробно данный вопрос рассмотрен в рекомендуемой литературе.

ЗАДАЧА 5

Волна перенапряжения $u_0 = f(t)$ приходит с линии с волновым сопротивлением z_1 на высоковольтное оборудование с волновым сопротивлением z_2 и минимальным разрядным напряжением U_{min} . Форма проходящей волны определяется уравнением

$$u_0 = U \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right). \quad (2.24)$$

Для защиты оборудования установлен вентильный разрядник РВ, с импульсным пробивным напряжением $U_{имп}$ равным 100 кВ.

Требуется:

1. Построить график падающей на вентильный разрядник волны перенапряжения $u_0 = f(t)$.
2. Определить время фронта τ_ϕ и время импульса $\tau_{имп}$ падающей волны перенапряжения.
3. Построить вольт-секундную характеристику вентильного разрядника.
4. Сделать вывод об эффективности применения разрядника с данной вольтамперной характеристикой.

Числовые данные для каждого варианта приведены в табл. 2.8, вольтамперная характеристика вентильного разрядника задана в табл. 2.9.

Таблица 2. 8

Параметры волны перенапряжения и высоковольтного оборудования

Вариант	Последняя цифра шифра				Предпоследняя цифра шифра	
	Z_1 , Ом	Z_2 , Ом	T_1 , мкс	T_2 , мкс	U , кВ	U_{min} , кВ
0	100	400	53,0	0,65	550	180
1	150	450	54,0	0,72	500	175
2	200	500	50,0	0,78	450	160
3	120	480	48,0	0,55	400	170
4	160	440	52,5	0,85	475	175
5	180	320	45,0	0,58	375	150
6	110	290	58,0	0,46	380	140
7	130	270	67,0	0,65	425	145
8	170	330	70,0	0,61	450	125
9	190	410	65,0	0,73	525	120

Вольтамперная характеристика вентильного разрядника

I_P , кА	0,2	0,3	0,4	0,6	1,0	2,0	3,0	5,0	10
U_P , кВ	44	50	54	60	72	86	88	94	98

Методические указания к решению задачи 5

Вентильные разрядники устанавливаются для защиты оборудования устройств электрической тяги от приходящих волн перенапряжений. При установке вентильного разрядника нужно согласовывать импульсные характеристики изоляции оборудования с защитными характеристиками разрядников, то есть осуществлять координацию изоляции. Остающееся на разряднике напряжение должно быть ниже разрядного напряжения изоляции U_{min} .

Схема замещения заданной цепи (рис. 2.7, а) после срабатывания разрядника будет иметь вид, представленный на рис. 2.7, б.

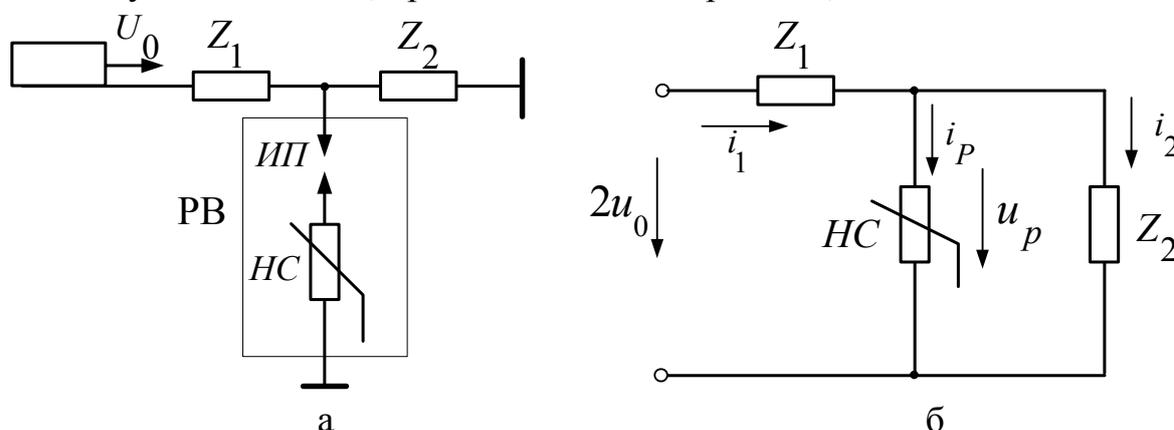


Рис. 2.7. Схема замещения до и после срабатывания разрядника

Уравнение по второму закону Кирхгофа имеет вид (рис. 2.7, б)

$$2u_0 = i_1 z_1 + u_P. \quad (2.25)$$

После несложных преобразований получается расчетное уравнение

$$\frac{2z_2}{z_1 + z_2} u_0 = u_P + i_P \frac{z_1 z_2}{z_1 + z_2}, \quad (2.26)$$

которое после упрощений (введем коэффициенты k и z_{ab}) будет иметь вид

$$ku_0 = u_P + i_P z_{ab}. \quad (2.27)$$

В связи с нелинейностью вольт-амперной характеристики разрядника $u_P = f(i_P)$ для построения вольт-секундной характеристики разрядника применяется графический метод.

На рис. 2.8 показан пример графического решения уравнения (2.27). Для этого в осях координат u, t (справа от оси u) строится график $ku_0(t)$ и откладывается импульсное пробивное напряжение разрядника U_{umm} . Далее в осях координат u, i (слева от оси u) строится вольтамперная характеристика

разрядника $u_p = f(i_p)$, прямая $i_p z_{ab}$ и их суммарная функция. Точка пересечения кривой ku_0 и прямой $u = U_{umm}$ определяет время начала работы разрядника и соответствует решению расчетного уравнения (2.27).

Падение напряжения на разряднике в любой момент времени после срабатывания определяется, как показано на рис. 2.8.

Обычно построение выполняется до напряжения, равного половине напряжения падающей волны.

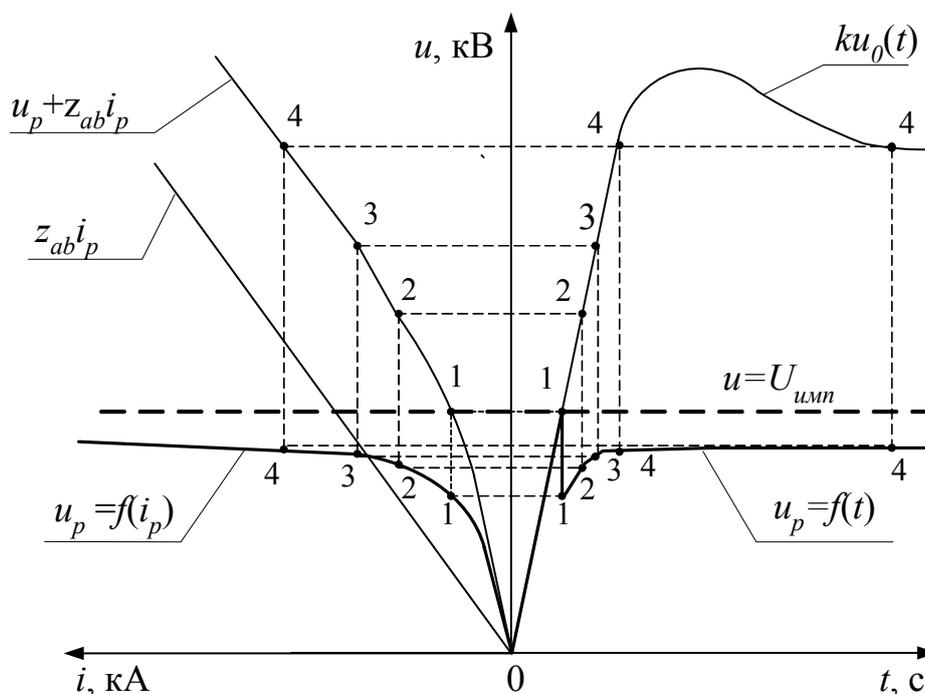


Рис. 2.8. Построение вольт-секундной характеристики разрядника

Определение времени фронта τ_ϕ и времени импульса τ_u падающей волны перенапряжений следует производить на отдельном чертеже.

Пример построения графика импульса $u_0 = f(t)$ показан на рис. 2.9.

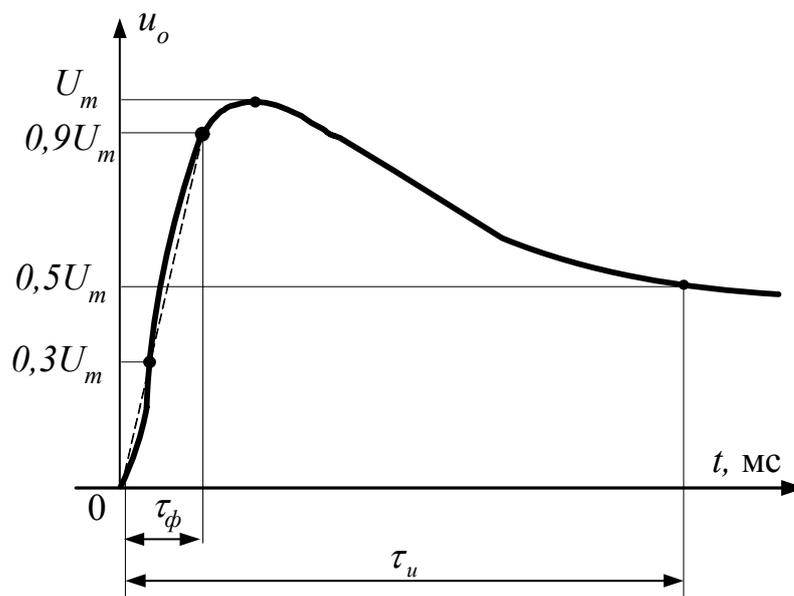


Рис. 2.9. Форма импульса волны перенапряжения

ЗАДАЧА 6

Задан одножильный маслонаполненный кабель с заземленной свинцовой оболочкой. Длина кабеля равна l , радиус токоведущей жилы r и радиус оболочки R . Изоляция кабеля имеет диэлектрическую проницаемость ε_r . Кабель рассчитан на напряжение U .

Требуется:

1. Рассчитать емкость кабеля.
2. Определить характер изменения напряженности электрического поля у поверхности токоведущей жилы при увеличении ее радиуса от r до R .
3. Определить распределение потенциала в толще изоляции при неизменном радиусе внутренней жилы r .
4. Построить рассчитанные зависимости $E = f(x)$, $\varphi = f(x)$.

Числовые данные для каждого варианта приведены в табл. 2.10.

Таблица 2.10

Параметры одножильного маслонаполненного кабеля

Вариант	Предпоследняя цифра шифра				Последняя цифра шифра
	U , кВ	R , мм	r , мм	l , м	ε_r
0	27,5	10	2	1000	2,5
1	40	12,5	2,5	1200	2,75
2	110	36	6	1500	3,5
3	220	54	18	1300	4,5
4	35	24	3	1100	2,3
5	115	18	2	1400	1,75
6	154	42	7	2000	3,75
7	400	60	20	1800	5,2
8	75	32	4	1600	4,2
9	525	72	24	2100	5,75

Методические указания к решению задачи 6

Коаксиальный кабель можно рассматривать как цилиндрический конденсатор. Известно, что поле цилиндрического конденсатора плоскопараллельное и характеризуется осевой симметрией, причем эквипотенциальные поверхности представляют собой коаксиальные цилиндры.

По теореме Гаусса напряженность электрического поля цилиндрического конденсатора в слое с радиусом r_x равна

$$E_x = \frac{Q}{\varepsilon_0 \varepsilon_r 2\pi r_x l}, \quad (2.28)$$

где Q – заряд, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции, r_x – расстояние от токоведущей жилы до точки x , l – длина конденсатора.

Емкость цилиндрического конденсатора определяется по формуле

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r l}{\ln \frac{R}{r}}, \quad (2.29)$$

где R – радиус оболочки; r – радиус токоведущей жилы; l – длина кабеля; ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции кабеля; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Учитывая, что заряд равен произведению емкости на напряжения, и подставив выражение для емкости в теорему Гаусса, получаем расчетную формулу для напряженности электрического поля на расстоянии r_x от поверхности токоведущей жилы

$$E_x = \frac{U}{2,3 r_x \lg \frac{R}{r}}. \quad (2.30)$$

Для построения зависимости изменения потенциала электрического поля от толщины слоя изоляции $\varphi = f(x)$ следует рассчитать значение потенциала в каждой точке изоляции от 0 до R

Для расчета потенциала следует воспользоваться формулой

$$\varphi_x = -\int_R^x E_x dx. \quad (2.31)$$

Более подробно данный вопрос следует изучить по рекомендованной литературе.

ЗАДАЧА 7

Для линии электропередачи напряжением U и протяженностью равной l , выполненной из проводов радиусом r , расположенных равносторонним треугольником с расстоянием D между ними при температуре воздуха t °С, давлении P мм рт. ст., считая коэффициент негладкости провода равным m_1 .

Требуется:

1. Определить потери активной мощности на корону для данной линии при ясной погоде ($m_2 = 1$).
2. Выбрать тип провода допустимый для данной линии.
3. Определить во сколько раз изменятся потери на корону при неясной погоде, считая коэффициент ненастной погоды m_2 равным 0,8.

Числовые данные для каждого варианта приведены в табл. 2.11.

Параметры линии электропередачи и атмосферные условия

Вариант	Предпоследняя цифра шифра					Последняя цифра шифра	
	U , кВ	l , км	D , см	r , мм	m_1	t , °С	P , мм рт ст
0	110	100	300	3,4	0,85	12	710
1	115	130	350	3,8	0,84	15	720
2	154	140	380	4,8	0,86	5	730
3	220	200	430	5,6	0,87	10	735
4	230	170	450	6,8	0,88	0	740
5	330	210	600	9,5	0,89	18	715
6	110	150	350	4,2	0,9	25	725
7	115	250	400	4,8	0,91	5	760
8	550	200	650	15,4	0,83	8	745
9	525	150	520	11,2	0,87	16	710

Корона является одним из видов самостоятельного разряда и возникает в резко неоднородных полях, к которым относится и электрическое поле в окрестности проводов линии электропередачи. Появление коронного разряда на проводах линии электропередачи сопровождается потерями энергии и радиопомехами.

Потери на корону не должны превышать 2 – 5 % активных потерь в самом проводе. Для расчета этих потерь на единицу длины трехфазной линии с симметрично расположенными проводами применяется формула Пика

$$\Delta P_K = \frac{241}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{D}} (U_\phi - U_0)^2 \cdot 10^{-5}, \text{ кВт/км на фазу} \quad (2.32)$$

где δ – относительная плотность воздуха; f – частота тока; r – радиус провода (см); D – расстояние между проводами (см); U_ϕ – фазное напряжение (кВ); U_0 – фазное критическое напряжение (кВ).

Минимальное напряжение, при котором возникает корона, называется фазным критическим, определяется по формуле

$$U_0 = 21,1 \delta m_1 m_2 r \ln \frac{D}{r}, \quad (2.33)$$

где m_1 – коэффициент негладкости провода; m_2 – коэффициент ненастной погоды, равный 0,8.

Относительная плотность воздуха определяется как отношение

$$\delta = \frac{P T_0}{P_0 T} \quad (2.34)$$

где P_0 и T_0 – давление и температура, соответствующие нормальным усло-

виям ($P_0 = 765$ мм рт ст, $T_0 = 273$ °С); P и T – давление и температура, соответствующие реальным атмосферным условиям ($T = T_0 + t$).

Потери на корону наступают при равенстве линейного или фазного напряжения линии соответствующему критическому линейному или фазному напряжению и возрастают при увеличении действительного напряжения над критическим. Расчет проводов линии на корону сводится к определению критического напряжения и установлению наличия или отсутствия короны из соотношения между напряжениями U_ϕ и U_0 .

При $U_\phi > U_0$ потери на корону имеют место, а при $U_\phi < U_0$ потерь на корону нет.

После чего по формуле Пика (2.32) производят расчет потерь на корону на единицу длины и для всей линии. Для уменьшения потерь на корону вместо одного провода в фазе обычно применяется пучок проводов, расположенных на расстоянии нескольких сантиметров друг от друга. Такой пучок параллельно соединенных проводников называется расщепленным проводом. Эквивалентный радиус расщепленного провода равен

$$r_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{r_0 a^{n-1}}, \quad (2.35)$$

где r_0 – радиус одиночного провода, n – число проводов в расщепленной фазе, a – расстояние между проводами.

Более подробно данный расчет рассмотрен в рекомендуемой литературе.

Задача 8

Волна атмосферного перенапряжения амплитудой U_0 с прямоугольным фронтом распространяется по одному из проводов трехфазной линии электропередачи (рис. 2.10) с расчетным диаметром провода d_1 и средней высотой подвески h_1 , встречая на своем пути реактор с индуктивностью L , переходит на провод другой линии электропередачи с расчетным диаметром провода d_2 и высотой подвески h_2 .

Требуется:

1. Рассчитать волновые сопротивления каждой линии.
2. Определить коэффициенты отражения и преломления падающей волны атмосферного перенапряжения при переходе с первой линии на вторую (без учета реактора).
3. Начертить схему замещения.
4. Вычислить постоянную времени и построить графики преломленной и отраженной волны тока и напряжения через время t после прохождения ей реактора.

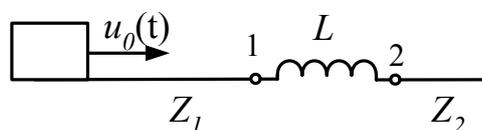


Рис. 2.10. Прохождение волны через индуктивность

Числовые данные для каждого варианта приведены в табл. 2.12.

Таблица 2.12

Параметры трехфазной линии электропередачи

Вариант	Предпоследняя цифра шифра					Последняя цифра шифра	
	U , кВ	d_1 , см	h_1 , см	d_2 , см	h_2 , см	L , мГн	t , мкс
0	500	1,7	400	1,9	500	12	5
1	550	1,9	450	2,2	400	15	6
2	600	2,1	500	2,8	550	5	7
3	650	2,3	550	2,5	450	10	3
4	700	2,5	600	2,8	500	7	8
5	750	2,8	650	3,2	570	18	10
6	800	2,9	680	3,5	650	6	12
7	850	3,2	700	3,7	530	20	15
8	900	3,5	720	2,7	600	8	2
9	950	3,7	750	2,9	650	25	16

Волновое сопротивление провода без учета влияния импульсной короны и электромагнитной связи с остальными проводами определяется по следующей зависимости:

$$Z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = 138 \lg \frac{2h}{r}, \quad (2.36)$$

где L_0 – удельная индуктивность одиночного провода относительно земли; C_0 – удельная емкость провода; h – средняя высота подвески провода; r – расчетный радиус провода.

Для расчета преломленной и отраженной волны напряжения и тока следует заменить схему с распределенными параметрами (рис. 2.10) операторной схемой замещения (рис. 2.11).

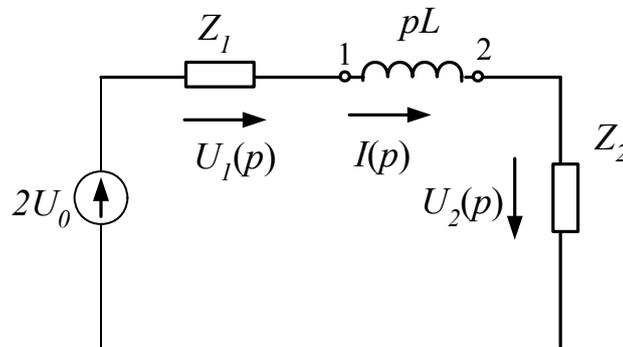


Рис. 2.10. Операторная схема замещения

Расчет изображений тока $I(p)$, напряжений $U_1(p)$ и $U_2(p)$ выполняется по общим законам расчета электрических цепей, известных из курса ТОЭ.

Например, полученный закон изменения $u_2(t)$, соответствует графику изменения преломленной волны и имеет вид

$$u_2(t) = U_0 \alpha \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right), \quad (2.37)$$

где U_0 – амплитуда падающей волны перенапряжения; α – коэффициент преломления волны; T – постоянная времени.

Отраженная волна напряжения, т.е. волна напряжения, двигающаяся от узла 1 в обратном направлении равна разности падающей и преломленной волн. По выражению преломленной и отраженной волн напряжения может быть найдена преломленная и отраженная волна тока.

Коэффициенты преломления α и отражения β , постоянная времени T зависят от волновых сопротивлений линий и индуктивности катушки и определяются по следующим формулам:

$$\alpha = \frac{2z_2}{z_1 + z_2}, \quad T = \frac{L}{z_1 + z_2}, \quad \beta = \frac{z_2 - z_1}{z_1 + z_2}. \quad (3.38)$$

Более подробно данный вопрос рассмотрен в рекомендуемой литературе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Техника высоких напряжений./Под общей ред. Д.В. Разевига. Изд.2-е, перераб. и доп., – М.: Энергия, 1976. – 488 с.
2. В.Д. Радченко. Техника высоких напряжений устройств электрической тяги. – М.: Транспорт, 1975. – 360 с.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Энергия, 1996. – 425 с.

Гелий Борисович Дурандин
Евгения Петровна Никитина
Елена Петровна Санникова

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
И ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ**

Задание на контрольные работы с методическими указаниями
для студентов заочного обучения

С.В. Пилюгина

620034, г. Екатеринбург, Колмогорова, 66, УрГУПС
Редакционно-издательский отдел

	Подписано в печать		
Бумага писчая № 1	Формат 60X84 1/16	Усл. п.л 2,7.	Уч.-изд. л. 2,3
Тираж 250 экз	Цена договорная	Заказ	