

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Электроснабжение»

А. О. Добродей

ДУГОВЫЕ И КОММУТАЦИОННЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

ПРАКТИКУМ

**по одноименному курсу для студентов
специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические
системы и сети» дневной формы обучения**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2015

УДК 621.311(075.8)
ББК 31.27я73
Д56

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 6 от 24.02.2015 г.)*

Рецензент: зав. каф. «Теоретические основы электротехники»
канд. техн. наук, доц. *В. В. Кротенок*

Добродей, А. О.

Д56 Дуговые и коммутационные перенапряжения в электрических сетях : практикум по одноим. курсу для студентов специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» днев. формы обучения / А. О. Добродей. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2015. – 48 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-535-278-6.

Содержит краткие теоретические сведения, примеры решения задач и задания для самостоятельного решения по курсу «Дуговые и коммутационные напряжения в электрических сетях».

Для студентов специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» дневной формы обучения.

УДК 621.311(075.8)
ББК 31.27я73

ISBN 978-985-535-278-6

© Добродей А. О., 2015
© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2015

Практическое занятие № 1

ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ

Сети напряжением 6, 10, 15, 20, 35 кВ выполняются с изолированной или заземленной через дугогасящий реактор нейтралью, или с нейтралью, заземленной через резистор. Упрощенная схема замещения сети представлена на рис. 1.1. Здесь не учитываются продольные активные и индуктивные сопротивления генераторов, трансформаторов, а также могут быть исключены из рассмотрения междуфазные проводимости (линий и нагрузок), которые включены на источники неизменных линейных напряжений и не влияют на напряжения относительно земли. Проводимости \dot{Y}_a , \dot{Y}_b , \dot{Y}_c можно считать чисто реактивными, вызванными собственными емкостями относительно земли кабелей, воздушных линий и другого оборудования сети. Рассмотрим некоторые важные расчетные режимы.

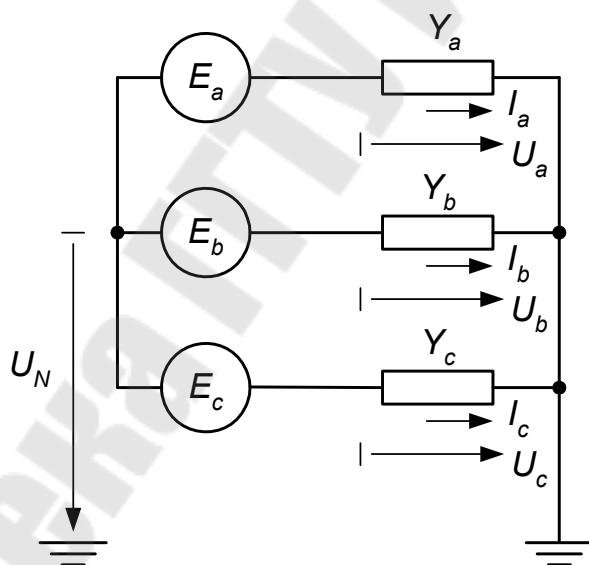


Рис. 1.1. Схема замещения сети

Для схемы (рис. 1.1) можно составить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \dot{E}_a = \dot{U}_a - \dot{U}_N; \\ \dot{E}_b = \dot{U}_b - \dot{U}_N; \\ \dot{E}_c = \dot{U}_c - \dot{U}_N. \end{cases} \quad (1.1)$$

$$\begin{cases} \dot{I}_a = \dot{Y}_a \dot{U}_a; \\ \dot{I}_b = \dot{Y}_b \dot{U}_b; \\ \dot{I}_c = \dot{Y}_c \dot{U}_c. \end{cases} \quad (1.2)$$

Для изолированной нейтрали по первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0. \quad (1.3)$$

Подставим в (1.3) токи из (1.2) и напряжения \dot{U}_a , \dot{U}_b , \dot{U}_c из (1.1). В результате получим напряжение на нейтрали:

$$U_N = -\frac{\dot{Y}_a \dot{U}_a + \dot{Y}_b \dot{U}_b + \dot{Y}_c \dot{U}_c}{\dot{Y}_a + \dot{Y}_b + \dot{Y}_c}. \quad (1.4)$$

Таким образом, получаем ненулевое напряжение на нейтрали (смещение нейтрали) в случае несимметрии сети даже при уравновешенной системе ЭДС $\dot{E}_a + \dot{E}_b + \dot{E}_c = 0$. Как следствие смещения нейтрали $\dot{U}_N \neq 0$ имеем из (1.1) повышение напряжений \dot{U}_a , \dot{U}_b , \dot{U}_c относительно земли.

Емкостная схема замещения сети представлена на рис. 1.2.

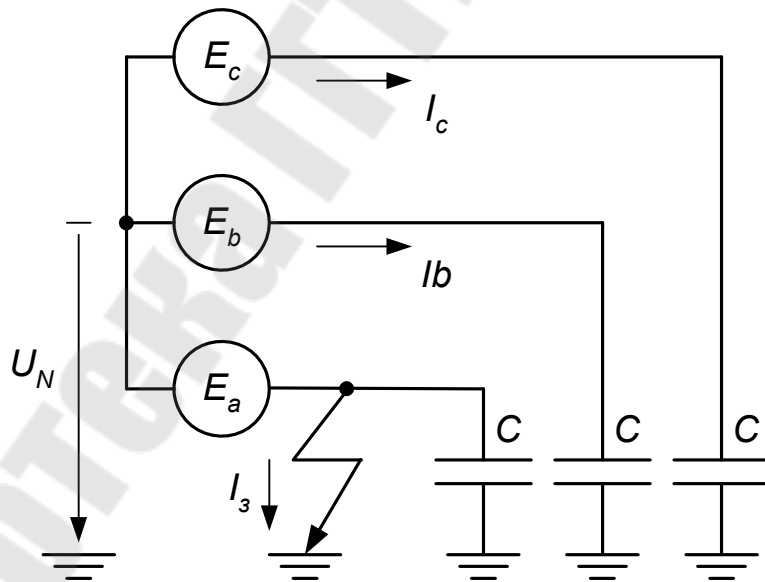


Рис. 1.2. Емкостная схема замещения сети

При замыкании фазы *A* на землю ($\dot{I}_a = 0$), вместо (1.3) получим:

$$\dot{I}_b + \dot{I}_c + \dot{I}_3 = 0. \quad (1.5)$$

Выразим из (1.5) ток замыкания \dot{I}_3 и подставим токи \dot{I}_b и \dot{I}_c из (1.2), а напряжения \dot{U}_b и \dot{U}_c из (1.1) ($\dot{U}_a = 0$). Получим:

$$\dot{I}_3 = -(\dot{I}_b + \dot{I}_c). \quad (1.6)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_b &= \dot{Y}_b(\dot{E}_b + \dot{U}_N); \\ \dot{I}_c &= \dot{Y}_c(\dot{E}_c + \dot{U}_N). \end{aligned} \quad (1.7)$$

Задание 1

Определить величину напряжения смещения нейтрали \dot{U}_N и ток замыкания на землю \dot{I}_3 при заданных параметрах сети в соответствии с заданным вариантом. Исходные данные приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Исходные данные к заданию 1

Номер варианта	Напряжение сети, кВ	Q_A , Мвар	Q_B , Мвар	Q_C , Мвар	Замкнутая фаза
1	6	0,1	0,2	0,1	A
2	10	0,2	0,2	0,1	B
3	35	0,2	0,4	0,3	C
4	6	0,2	0,1	0,3	A
5	10	0,3	0,4	0,2	B
6	35	1	0,7	0,8	C
7	6	0,4	0,3	0,3	A
8	10	0,5	0,2	0,4	B
9	35	0,7	0,5	0,8	C
10	6	0,3	0,4	0,4	A
11	10	0,7	0,4	0,7	B
12	35	0,8	0,9	0,7	C
13	6	0,3	0,3	0,5	A
14	10	0,6	0,4	0,5	B
15	35	1	1	0,8	C
16	6	0,5	0,2	0,4	A
17	10	0,4	0,3	0,5	B
18	35	0,4	0,5	0,6	C
19	6	0,1	0,4	0,2	A
20	10	0,3	0,4	0,3	B
21	35	0,4	0,7	0,5	C
22	6	0,3	0,3	0,2	A
23	10	0,3	0,2	0,4	B
24	35	0,4	0,2	0,5	C
25	6	0,5	0,2	0,4	A

Практическое занятие № 2

ИЗОЛЯЦИЯ КАБЕЛЕЙ И ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В электрических кабелях изоляция воспринимает на себя массу токоведущих жил, а также значительные усилия для изгибания жил при намотке или прокладке. От изоляции кабелей требуется сочетание достаточной гибкости с высокой механической прочностью.

При увеличении электрической прочности и соответственно при уменьшении толщины изоляции не только снижаются затраты на ее изготовление, но и улучшаются условия отвода тепла от жилы и увеличиваются допустимые рабочие токи.

Кабельные бумаги выпускаются из сульфатной целлюлозы с общим диапазоном толщин 0,08–0,24 мм. По назначению их можно разбить на группы: для кабелей на рабочее напряжение до 35 кВ однослойная и многослойная; для кабелей на 35 кВ и выше обычная, многослойная и уплотненная – с повышенной плотностью; для кабелей на 110 кВ и выше обычная и многослойная уплотненная.

Провода воздушных линий должны быть изолированы друг от друга и от земли. Для этого они с помощью изоляторов подвешиваются на опорах таким образом, чтобы соблюдались определенные расстояния между проводами и между каждым из проводов и землей.

Изоляторы во время эксплуатации загрязняются и увлажняются, что существенно снижает их разрядные напряжения. Надежная работа во многом определяется правильным выбором числа изоляторов в гирляндах и изоляционных расстояний между проводами и опорой.

Расчетные кратности внутренних перенапряжений (табл. 2.1) установлены в зависимости от номинального рабочего напряжения [2].

Таблица 2.1

Расчетные кратности внутренних перенапряжений

$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	3–10	15, 20	35	110–220	330	500	750	1150
K_p	4,5	4,0	3,5	3,0	2,7	2,5	2,1	1,8

Таблица 2.2

Характеристики линейных подвесных изоляторов

Тип изолятора	Строительная высота H , мм	Диаметр D , мм	Длина пути утечки L_y , мм	Коэффициент эффективности k	Мокроразрядная напряженность $E_{\text{мр}}$, кВ/см
ПФ6-В	140	270	324	1,1	2,5
ПФ16-А	173	280	365	1,2	2,4
ПФ20-А	194	350	420	1,1	2,4
ПС6-А	130	255	255	1,0	2,6
ПС12-А	140	260	325	1,2	2,3
ПС16-Б	170	280	387	1,2	2,3
ПС22-А	200	320	390	1,1	2,3
ПС30-А	190	320	425	1,1	2,0
ПС40-А	190	330	445	1,1	2,0

Таблица 2.3

Нормированные удельные эффективные длины пути утечки (высота до 1000 м)

Степень загрязненности атмосферы	$\lambda_{\text{эф}}$, см/кВ		
	Для воздушных линий напряжением, кВ		
	35	110–220	330–750
I	1,7	1,3	1,3
II	1,9	1,6	1,5
III	2,25	1,9	1,8
IV	2,6	2,25	2,25
V	3,5	3,0	3,0
VI	4	3,5	3,5

Примечание. При высотах 1000–2000 м над уровнем моря значения нормированной удельной длины пути утечки для гирлянд изоляторов должны быть увеличены на 5 %, при высотах 2000–3000 м – на 10 % и при высотах 3000–4000 м – на 15 % по сравнению со значениями, указанными в табл. 2.3.

Пример 2.1. Определить толщину первого и второго слоя градированной (использование диэлектриков с различающимися диэлектрическими проницаемостями) бумажно-масляной изоляции однофазного кабеля с сечением токоведущей жилы $s = 240 \text{ мм}^2$. Напряжение кабеля $U_{\text{ном}} = 110 \text{ кВ}$. Для изоляции использованы два типа бумаги с диэлектрическими проницаемостями $\epsilon_1 = 5,4$ и $\epsilon_2 = 3,5$ ($\epsilon_0 = 8,9 \cdot 10^{-14}$). Допустимая максимальная напряженность электри-

ческого поля $E_{\text{доп}} = 12 \text{ кВ/мм}$. Построить кривую распределения напряженности по толщине изоляции.

Решение. Внутренний радиус первого слоя изоляции

$$r_1 = \sqrt{\frac{s}{\pi}} = \sqrt{\frac{240}{3,14}} = 8,74 \text{ мм.} \quad (2.1)$$

Определяем внешний радиус первого слоя из условия равенства максимальных напряженностей в каждом слое:

$$r_2 = \frac{\varepsilon_1 r_1}{\varepsilon_2} = \frac{5,4 \cdot 8,74}{3,5} = 13,48 \text{ мм.} \quad (2.2)$$

Определяем внешний радиус второго слоя:

$$r_3 = r_2 e^{\frac{U - \left(\frac{r_2 \varepsilon_2}{\varepsilon_1} E_{\text{доп}} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \right)}{E_{\text{доп}} r_2}} \quad (2.3)$$

$$r_3 = 13,48 e^{\frac{110 - \left(\frac{13,48 \cdot 3,5}{5,4} \cdot 12 \cdot \ln \frac{13,48}{8,74} \right)}{12 \cdot 13,48}} = 20,09 \text{ мм.}$$

Толщина первого и второго слоя:

$$d_1 = r_2 - r_1 = 13,48 - 8,74 = 4,74 \text{ мм;} \quad (2.4)$$

$$d_2 = r_3 - r_2 = 20,09 - 13,48 = 6,61 \text{ мм.} \quad (2.5)$$

Емкости слоев:

$$C_1 = \frac{2\pi\varepsilon_1\varepsilon_0}{\ln \frac{r_2}{r_1}}; \quad (2.6)$$

$$C_1 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 5,4 \cdot 8,9 \cdot 10^{-14}}{\ln \frac{13,48}{8,74}} = 6,966 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/мм.}$$

$$C_2 = \frac{2\pi\varepsilon_2\varepsilon_0}{\ln \frac{r_3}{r_2}}; \quad (2.7)$$

$$C_2 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3,5 \cdot 8,9 \cdot 10^{-14}}{\ln \frac{20,09}{13,48}} = 4,9 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/мм.}$$

Значения напряженности в любой точке каждого слоя определяются по выражениям:

$$E_{1x} = \frac{U}{r_x \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot \frac{C_2}{C_1 + C_2}; \quad (2.8)$$

$$E_{1x} = \frac{110}{r_x \cdot \ln \frac{13,48}{8,74}} \cdot \frac{4,9 \cdot 10^{-12}}{6,966 \cdot 10^{-12} + 4,9 \cdot 10^{-12}} = \frac{104,8}{r_x}.$$

$$E_{2x} = \frac{U}{r_x \cdot \ln \frac{r_3}{r_2}} \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2}; \quad (2.9)$$

$$E_{2x} = \frac{110}{r_x \cdot \ln \frac{20,09}{13,48}} \cdot \frac{6,966 \cdot 10^{-12}}{6,966 \cdot 10^{-12} + 4,9 \cdot 10^{-12}} = \frac{169,9}{r_x}.$$

По этим выражениям строятся кривые распределения напряженности по толщине изоляции $E_x = f(r_x)$.

Пример 2.2. Определить число изоляторов в поддерживающей гирлянде изоляторов промежуточной опоры. Номинальное напряжение – 110 кВ. Степень загрязненности атмосферы – IV; средняя высота трассы ВЛ над уровнем моря – 1,1 км.

Решение. По табл. 2.2 принимаем изолятор ПС-40А со следующими характеристиками: строительная высота $H = 19,0$ см; длина пути утечки $L_{y1} = 44,5$ см; коэффициент эффективности изолятора $k = 1,1$; мокроразрядная напряженность $E_{\text{мр}} = 2,0$ кВ/см.

Определяем количество изоляторов в гирлянде по наибольшему рабочему напряжению:

$$n \geq \frac{k \lambda_{\text{эф}} U_{\text{нб.раб}}}{L_{y1}}, \quad (2.10)$$

где k – коэффициент эффективности изолятора (табл. 2.2); $\lambda_{\text{эф}}$ – удельная эффективная длина пути утечки (табл. 2.3), зависит от на-

пряжения линии и от степени загрязненности атмосферы, см/кВ;
 L_{y1} – длина пути утечки одного изолятора, см (табл. 2.2); $U_{\text{нб.раб}}$ –
 наибольшее рабочее междуфазное напряжение, кВ [2];

$$U_{\text{нб.раб}} = 1,15U_{\text{ном}} \text{ при } U_{\text{ном}} = 6\text{--}220 \text{ кВ,}$$

$$U_{\text{нб.раб}} = 1,1U_{\text{ном}} \text{ при } U_{\text{ном}} = 330 \text{ кВ,}$$

$$U_{\text{нб.раб}} = 1,05U_{\text{ном}} \text{ при } U_{\text{ном}} = 500\text{--}750 \text{ кВ.}$$

При $U_{\text{ном}} = 110$ кВ и IV степени загрязнения $\lambda_{\text{эф}} = 2,25$. Со-
 гласно примечанию к табл. 2.3 для ВЛ, проходящих на высоте от
 1000 до 2000 м, $\lambda_{\text{эф}}$ увеличивается на 5%. Следовательно,
 $\lambda_{\text{эф}} = 1,05 \cdot 2,25 = 2,36$ см/кВ.

Наибольшее рабочее междуфазное напряжение
 $U_{\text{нб.раб}} = 1,15 \cdot 110 = 126,5$ кВ.

$$n \geq \frac{1,1 \cdot 2,36 \cdot 126,5}{44,5} = 7,38, \text{ принимаем } n = 8.$$

Проверяем количество изоляторов по условию работы гирлян-
 ды под дождем при воздействии внутренних перенапряжений:

$$n \geq \frac{K_p U_{\text{нб.раб.ф}}}{E_{\text{мп}} H}, \quad (2.11)$$

где $U_{\text{нб.раб.ф}}$ – наибольшее рабочее фазное напряжение; K_p – расчет-
 ная кратность внутренних перенапряжений (табл. 2.1); $E_{\text{мп}}$ – мокро-
 разрядная напряженность электрического поля, кВ/см (табл. 2.2);
 H – строительная высота изолятора, см (табл. 2.2).

$$n \geq \frac{3,0 \cdot 126,5 / \sqrt{3}}{2 \cdot 44,5} = 2,47.$$

$$8 > 2,47.$$

Условие проверки выполняется, окончательно принимаем коли-
 чество изоляторов в гирлянде – 8.

Задание 2.1

Определить толщину первого и второго слоя градированной
 бумажно-масляной изоляции однофазного кабеля. Построить кривую
 распределения напряженности по толщине изоляции ($\epsilon_0 = 8,9 \cdot 10^{-14}$).
 Исходные данные приведены в табл. 2.4.

Исходные данные к заданию 2.1

Номер варианта	$s, \text{мм}^2$	$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	ε_1	ε_2	$E_{\text{доп}}, \text{кВ/мм}$
1	50	6	5,5	3,5	2
2	70	10	4,5	3	3
3	70	35	6	4	8
4	150	110	5,5	4	20
5	185	220	7	4,2	20
6	70	6	5,7	4,3	3
7	95	10	5,2	3,8	4
8	95	35	4	2,5	9
9	185	110	6	4	15
10	240	220	5	3	17
11	95	6	5,4	4,2	2
12	120	10	5,1	3,7	3,5
13	120	35	6,2	3,8	8
14	240	110	6,5	5	12
15	300	220	6,8	5	24
16	120	6	5,3	3,2	1
17	150	10	5,4	3,3	2,2
18	150	35	5,7	3,6	7
19	300	110	5,9	3,8	11
20	350	220	5	3	12
21	150	6	4,8	3,7	2
22	185	10	6	5	2,5
23	185	35	4,9	3,3	5
24	400	110	5,2	4,5	12
25	500	220	5,3	4	21

Задание 2.2

Определить число изоляторов в поддерживающей гирлянде изоляторов промежуточной опоры. Исходные данные приведены в табл. 2.5.

Исходные данные к заданию 2.2

Номер варианта	$U_{\text{ном}}$, кВ	Степень загрязненности атмосферы	Средняя высота трассы линии над уровнем моря, км
1	35	I	0,1
2	110	II	0,8
3	220	III	0,5
4	330	IV	1,1
5	500	V	0,9
6	750	VI	0,7
7	35	VI	1,5
8	110	V	2,4
9	220	IV	2,5
10	330	III	0,6
11	500	II	1,3
12	750	I	2,0
13	35	I	0,2
14	110	II	0,1
15	220	III	0,2
16	330	IV	0,5
17	500	V	1,7
18	750	VI	1,2
19	35	VI	0,4
20	110	V	0,5
21	220	IV	1,0
22	330	III	1,4
23	500	II	0,7
24	750	I	0,2
25	35	I	0,3

Практическое занятие № 3

ИСПЫТАНИЕ ИЗОЛЯЦИИ

Для выявления дефектов изоляции при эксплуатации служат профилактические испытания. Испытания делятся на разрушающие, при которых применяют повышенные напряжения, и неразрушающие, при которых определяются сопротивления изоляции, величина и характер изменения токов абсорбции, тангенс угла диэлектрических потерь, емкость изоляции, наличие частичных разрядов и т. д.

Методы неразрушающих испытаний изоляции: контроль изоляции по диэлектрическим потерям; измерение частичных разрядов в изоляции; измерение сопротивления изоляции, контроль изоляции по емкостным характеристикам; инфракрасная термография.

Если изоляция нормального качества, она выдержит испытания, если дефектная – пробьется. При испытаниях проверяется способность изоляции проработать без отказов до следующих испытаний. Основная задача таких испытаний – проверка отсутствия грубых сосредоточенных дефектов.

Пример 3.1. Определить испытательное напряжение промышленной частоты для внутренней изоляции реактора, предназначенного для работы в сети с номинальным напряжением 330 кВ.

Решение. Определяем наибольшее рабочее напряжение:

$$U_{\text{наиб.раб}} = 1,1U_{\text{ном}} = 1,1 \cdot 330 = 363 \text{ кВ.}$$

Из табл. 2.1 кратность перенапряжения для $U_{\text{ном}} = 330$ кВ, $K_p = 2,7$.

Расчетное значение внутренних перенапряжений в установках данного класса напряжения:

$$U_{\text{расч.вн}} = K_p U_{\text{наиб.раб}} = 2,7 \cdot 363 = 980,1 \text{ кВ.}$$

Испытательное напряжение:

$$U_{\text{исп}} = U_{\text{расч.вн}} \frac{K_{\text{кум}}}{K_{\text{имп}}} = 980,1 \frac{1,5}{1,35} = 1089 \text{ кВ,}$$

где $K_{\text{имп}}$ – коэффициент импульса, учитывающий повышение электрической прочности изоляции при кратковременных воздействиях; $K_{\text{имп}} = 1,3$ для 3–35 кВ и 1,35 для других классов; $K_{\text{кум}} = 1,1 \div 1,5$ – коэффициент кумулятивности, учитывающий кумулятивный эффект и старение изоляции в процессе эксплуатации.

Пример 3.2. Определить величину испытательного напряжения грозвым импульсом трансформатора с номинальным напряжением $U_{\text{ном}}$, кВ, если он будет защищен ОПН с $U_{\text{ост}}$, кВ.

Решение. Остающееся напряжение ОПН:

$$U_{\text{ост}} = U_{\text{доп}} - \Delta U_k,$$

где ΔU_k – координационный интервал, $\Delta U_k = (0,2 \div 0,5)U_{\text{ном}}$.

Из приведенного соотношения находим допустимое напряжение для внутренней изоляции $U_{\text{доп}}$.

Испытательное напряжение находим из соотношения

$$U_{\text{доп}} = 1,1(U_{\text{исп}} - 0,5U_{\text{ном}}).$$

Пример 3.3. Определить напряжение возникновения коронного разряда в воздушном промежутке «провод–плоскость» длиной H , м, при давлении P , мм рт. ст., и температуре T , °С, если радиус провода r , см, а коэффициент гладкости поверхности m .

Решение. Относительная плотность воздуха

$$\delta = \frac{PT_0}{P_0T},$$

где P_0 – нормальное атмосферное давление, мм рт. ст. Нормальное атмосферное давление равно давлению столба ртути высотой 760 мм при температуре $T_0 = 273$ К (0 °С).

Начальная напряженность коронного разряда (около 30 кВ/см):

$$E_{\text{н}} = 24,5m\delta \left[1 + \frac{0,65}{(\delta r)^{0,38}} \right].$$

При малых радиусах провода ($r \leq 1$ см):

$$E_{\text{н}} = 30,3m\delta \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{\delta r}} \right).$$

Начальное напряжение, кВ:

$$U_{\text{н}} = E_{\text{н}}r \ln \frac{2H}{r}.$$

Задание 3.1

Определить испытательное напряжение промышленной частоты для внутренней изоляции реактора, предназначенного для работы в сети с номинальным напряжением $U_{\text{ном}}$, кВ.

Исходные данные приведены в табл. 3.2 в соответствии с заданным вариантом.

Таблица 3.2

Исходные данные к заданию 3.1

Номер варианта	$U_{\text{ном}}$, кВ	Номер варианта	$U_{\text{ном}}$, кВ	Номер варианта	$U_{\text{ном}}$, кВ
1	6	10	500	19	220
2	10	11	750	20	330
3	15	12	6	21	500
4	20	13	10	22	750
5	35	14	15	23	6
6	110	15	20	24	10
7	150	16	35	25	35
8	220	17	110	–	–
9	330	18	150	–	–

Задание 3.2

Определить величину испытательного напряжения грозовым импульсом трансформатора с номинальным напряжением $U_{\text{ном}}$, кВ, если он будет защищен ОПН с $U_{\text{ост}}$, кВ.

Исходные данные приведены в табл. 3.3 в соответствии с заданным вариантом.

Таблица 3.3

Исходные данные к заданию 3.2

Номер варианта	$U_{\text{ном}}$, кВ	$U_{\text{ост}}$, кВ
1	6,3	19,5
2	10,5	31
3	37	109
4	115	217
5	230	436
6	347	627
7	6,3	20,4
8	10,5	34
9	37	120
10	115	231
11	230	466
12	347	656
13	6,3	21,3
14	10,5	35,5
15	37	121

Номер варианта	$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	$U_{\text{ост}}, \text{кВ}$
16	115	245
17	230	526
18	347	687
19	6,3	22,5
20	10,5	37,5
21	37	130
22	115	261
23	230	433
24	347	639
25	6,3	19,7

Задание 3.3

Определить напряжение возникновения коронного разряда в воздушном промежутке «провод–плоскость» длиной H , м, при давлении P , мм рт. ст., и температуре T , °С если диаметр провода d , см, а коэффициент гладкости поверхности m .

Исходные данные приведены в табл. 3.4 в соответствии с заданным вариантом. Температуру необходимо перевести в Кельвины.

Таблица 3.4

Исходные данные к заданию 3.3

Номер варианта	H , м	P , мм рт. ст.	T , °С	d , см	m
1	7	650	-10	1,14	0,82
2	8	660	-5	1,54	0,83
3	9	670	0	1,35	0,84
4	10	680	5	1,98	0,85
5	11	690	10	1,52	0,86
6	12	700	20	1,54	0,87
7	13	710	30	1,68	0,88
8	14	720	40	1,71	0,89
9	15	730	30	1,75	0,9
10	16	740	20	1,89	0,91
11	17	750	10	1,88	0,92
12	18	770	5	1,96	0,93
13	19	780	0	2,31	0,94
14	20	800	-5	1,98	0,93
15	19	650	-10	2,16	0,92

Номер варианта	H , м	P , мм рт. ст.	T , °С	d , см	m
16	18	660	-15	2,24	0,91
17	17	670	-20	2,4	0,9
18	16	680	15	2,45	0,89
19	15	690	10	2,92	0,88
20	14	700	20	1,98	0,87
21	13	710	-10	2,16	0,86
22	12	720	30	2,24	0,85
23	11	730	5	2,4	0,84
24	10	740	-20	2,45	0,83
25	9	750	20	2,92	0,82

Практическое занятие № 4

ГРОЗОЗАЩИТА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

Степень грозоупорности линий характеризуется удельным числом отключений, т. е. числом отключений за год линии длиной 100 км вследствие грозových перенапряжений при определенном числе грозových дней в году. В приближенных расчетах удельное число отключений определяется с помощью защитного уровня линии, т. е. минимального значения амплитуды тока молнии, вызывающего перекрытие изоляции линии.

Грозозащита линий имеет целью уменьшить число отключений линии. Это достигается:

- а) защитой линии от прямых ударов молнии тросовыми молниеотводами с целью уменьшить число перекрытий изоляции;
- б) удлинением пути перекрытия путем применения деревянных опор или траверс;
- в) защитой отдельных точек линии с ослабленной изоляцией;
- г) применением АПВ.

Пример 4.1. Определить среднегодовое число грозových отключений ВЛ 110 кВ на железобетонных опорах с грозозащитным тросом.

Исходные данные:

- длина линии $L_{\text{вл}} = 120$ км;
- длина пролета $l_{\text{пр}} = 240$ м;
- стрелы провесов троса и провода $f_{\text{тр}} = 2,5$ м и $f_{\text{пр}} = 3$ м;
- длины траверс: $L_a = 2$ м, $L_b = 2$ м, $L_c = 3,5$ м;
- длина гирлянд изоляторов $l_r = 1,4$ м;

- высота опоры $h_{\text{оп}} = 20,5$ м;
- высота до траверсы фазы A $h_1 = 17,5$ м;
- высота до траверсы фазы B и C $h_2 = 14,5$ м;
- разрядное напряжение гирлянды изоляторов $U_{50\%} = 700$ кВ;
- Импульсное сопротивление заземления опор $R_{\text{и}} = 15$ Ом;
- волновые сопротивления троса и провода $Z_{\text{тр}} = 300$ Ом и $Z_{\text{пр}} = 300$ Ом;
- Число грозных часов $D_{\text{г}} = 40$ ч/год.
- Геометрия опоры и размещение проводов показано на рис. 4.1.

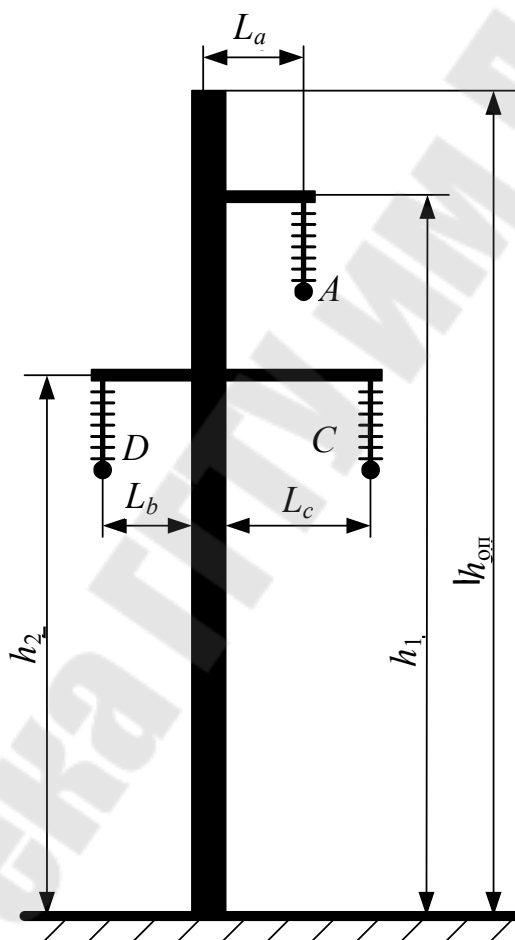


Рис. 4.1. Геометрия железобетонной опоры 110 кВ

Решение

1. Удар молнии в провод

Определим защитные углы троса для каждого из фазных проводов:

$$\alpha_A = \arctg\left(\frac{L_a}{h_{\text{оп}} - (h_1 - l_r)}\right) = \arctg\left(\frac{2}{20,5 - (17,5 - 1,4)}\right) = 24,44^\circ;$$

$$\alpha_B = \arctg\left(\frac{L_b}{h_{\text{оп}} - (h_2 - l_r)}\right) = \arctg\left(\frac{2}{20,5 - (14,5 - 1,4)}\right) = 15,12^\circ;$$

$$\alpha_C = \arctg\left(\frac{L_c}{h_{\text{оп}} - (h_1 - l_r)}\right) = \arctg\left(\frac{3,5}{20,5 - (17,5 - 1,4)}\right) = 25,31^\circ.$$

Вероятность прорыва молнии через тросовую защиту к проводам P_α :

$$\lg P_{\alpha A} = \frac{\alpha_A \sqrt{h_{\text{оп}}}}{90} - 4, \text{ тогда } P_{\alpha A} = 10^{\left(\frac{24,44 \sqrt{20,5}}{90} - 4\right)} = 0,0017;$$

$$P_{\alpha B} = 10^{\left(\frac{15,12 \sqrt{20,5}}{90} - 4\right)} = 0,00058, \quad P_{\alpha C} = 10^{\left(\frac{25,31 \sqrt{20,5}}{90} - 4\right)} = 0,0019.$$

Вероятность прорыва молнии сквозь тросовую защиту:

– с левой стороны $P_{\alpha \text{лев}} = P_{\alpha B} = 0,00058$;

– с правой стороны $P_{\alpha \text{прав}} = P_{\alpha A} + P_{\alpha C} = 0,0017 + 0,0019 = 0,0036$;

– среднее значение $P_\alpha = \frac{P_{\alpha \text{лев}} + P_{\alpha \text{прав}}}{2} = 0,0021$.

Вероятность перекрытия гирлянды изоляторов при ударе молнии в провод $P_{\text{пр}}$ определяется по критическому току молнии $I_{\text{кр1}}$, при котором амплитуда напряжения волны, вызванной ударом молнии в провод, станет равной разрядному напряжению гирлянды изоляторов $U_{50\%}$:

$$I_{\text{кр1}} = \frac{2U_{50\%}}{Z_{\text{пр}}} = \frac{2 \cdot 700}{300} = 4,67 \text{ кА};$$

$$P_{\text{пр}} = e^{-0,04 I_{\text{кр1}}} = 0,83.$$

2. Удар в опору

Для определения вероятности перекрытия гирлянды изоляторов при ударе молнии в опору и трос вблизи опоры $P_{\text{оп}}$ необходимо знать напряжение, приложенное к гирлянде изоляторов $U_{\text{из}}$, равное разности напряжений на опоре $U_{\text{оп}}$ и на проводе $U_{\text{пр}}$:

$$U_{\text{из}} = U_{\text{оп}} - U_{\text{пр}} = f(I_M, a_M).$$

Для линии с тросами $P_{оп}$ упрощенно можно оценить, используя условный критический ток молнии (для ВЛ с одним тросом $\delta = 0,3$):

$$I_{кр2} = \frac{U_{50\%}}{R_{и} + \delta h_{оп}} = \frac{700}{15 + 0,3 \cdot 20,5} = 33,1 \text{ кА};$$

$$P_{оп} = e^{-0,04 I_{кр2}} = 0,266.$$

3. Удар молнии в середину пролета

Расчет вероятности пробоя промежутка «трос-провод» основывается на следующих допущениях:

1) трос заземлен, т. е. $R \ll Z_{тр}$;

2) для учета импульсной короны используется скорость распространения электромагнитной волны по тросу, равной $v = (0,8 \div 0,9)c$, где c – скорость света. Также пренебрегаем удлинением фронта и деформацией волны под действием импульсной короны;

3) для расчета напряжения между тросом и проводом в точке удара принимается косоугольная форма тока молнии.

Тогда максимальное напряжение на тросе после прихода в точку удара молнии волн, отраженных от соседних опор, определяется как

$$U_{тр\max} = \frac{a_m \tau Z_{тр}}{2} = \frac{a_m l_{пр} Z_{тр}}{2v},$$

а напряжение между тросом и проводом $U_{тр-пр} = U_{тр\max} (1 - k_{св})$, где $k_{св}$ – коэффициент электромагнитной связи троса и провода, $k_{св} = 0,15$.

Импульсное разрядное напряжение промежутка «трос-провод»:

$$U_{р.имп} = E_{р.ср} l_{тр-пр},$$

где $l_{тр-пр}$ – расстояние между тросом и ближайшим проводом в середине пролета, м; $E_{р.ср}$ – средняя пробивная напряженность для воздушного промежутка «трос-провод», $E_{р.ср} = 500 \left(1 + \frac{2,4}{t_{возд}} \right)$, кВ/м;

$t_{возд}$ – время воздействия импульса, мкс. Для случая удара в трос в середине пролета может быть принято $t_{возд} \approx 3\tau = 3l_{пр} / v$, где

$v = 0,8c = 240$ м/мкс.

$$E_{р.ср} = 500 \left(1 + \frac{2,4}{3 \frac{l_{пр}}{v}} \right) = 500 \left(1 + \frac{2,4}{3 \cdot 240 / 240} \right) = 900 \text{ кВ/м.}$$

В данной задаче ближайшим проводом является провод фазы А и расстояние от троса до провода по горизонтали составляет $dx = 2$ м, а расстояние по вертикали:

$$dy = h_{\text{тр.в.середине_пролета}} - h_{\text{пр.в.середине_пролета}} =$$

$$= (h_{\text{оп}} - f_{\text{тр}}) - (h_1 - l_{\text{Г}} - f_{\text{пр}}) = 20,5 - 2,5 - 17,5 + 1,4 + 3 = 4,9 \text{ м,}$$

отсюда $l_{\text{тр-пр}} = \sqrt{dx^2 + dy^2} = 5,3$ м.

Из условия превышения напряжения между тросом и проводом $U_{\text{тр-пр}}$ импульсного разрядного напряжения $U_{\text{р.имп}}$ найдем критическую крутизну тока молнии, при котором имеет место пробой промежутка «трос–провод» в случае удара молнии в трос:

$$a_{\text{м.кр}} \geq \frac{2E_{\text{р.ср}} l_{\text{тр-пр}} v}{l_{\text{пр}} Z_{\text{тр}} (1 - k_{\text{св}})} = \frac{2 \cdot 900 \cdot 5,3 \cdot 240}{240 \cdot 300 (1 - 0,15)} = 37,41 \text{ кА/мкс.}$$

Тогда

$$P_{\text{тр}} = e^{-0,08 a_{\text{м.кр}}} = 0,05.$$

4. Доля ударов в опоры и трос составляют:

$$\Delta_{\text{оп}} = \frac{4h_{\text{оп}}}{l_{\text{пр}}} = \frac{4 \cdot 20,5}{240} = 0,34 \text{ и } \Delta_{\text{тр}} = 1 - \Delta_{\text{оп}} = 0,66.$$

5. Вероятность перехода импульсного перекрытия в устойчивую дугу:

$$\eta_{\text{Г}} = 0,7 \text{ для } U_{\text{ном}} \leq 220 \text{ кВ и } \eta_{\text{Г}} = 1,0 \text{ для } U_{\text{ном}} \leq 330 \text{ кВ.}$$

6. Вероятность перехода импульсного перекрытия в устойчивую дугу для воздушных промежутков:

$$\eta_{\text{в}} = \left(1,6 \frac{U_{\text{фаз.н.р}}}{l_{\text{тр-пр}}} - 6 \right) 10^{-2} = \left(1,6 \frac{110 \cdot 1,15}{\sqrt{3} \cdot 5,3} - 6 \right) 10^{-2} = 0,161.$$

7. Удельное число отключений:

$$\begin{aligned}n_{\text{откл}} &= 4h_{\text{тр.ср}} \left[P_{\alpha} P_{\text{пр}} \eta_{\Gamma} + (1 - P_{\alpha}) (\Delta_{\text{оп}} P_{\text{оп}} \eta_{\Gamma} + \Delta_{\text{тр}} P_{\text{тр}} \eta_{\text{в}}) \right] = \\ &= 4 \cdot 18,83 [0,0021 \cdot 0,83 \cdot 0,7 + (1 - 0,0021)(0,34 \cdot 0,266 \cdot 0,7 + 0,66 \cdot 0,05 \cdot 0,161)] = \\ &= 5,28 \text{ откл./}(\text{год} \cdot 100 \text{ км} \cdot 100 \text{ ч}),\end{aligned}$$

где $h_{\text{тр.ср}} = h_{\text{оп}} - \frac{2}{3} f_{\text{тр}}$.

8. Число грозových отключений ВЛ:

$$N_{\text{откл}} = 5,28 \frac{L_{\text{вл}}}{100} \cdot \frac{D_{\Gamma}}{100} = 2,53 \text{ откл./год.}$$

9. Если ВЛ снабжена АПВ, то число перерывов в электроснабжении:

$$N_{\text{перер}} = N_{\text{откл}} (1 - \beta_{\text{АПВ}}) = 2,53(1 - 0,8) = 0,51,$$

где $\beta_{\text{АПВ}}$ – коэффициент успешности АПВ.

Пример 4.2. Определить среднегодовое число грозových отключений ВЛ 110 кВ на железобетонных опорах без молниезащитных тросов. Исходные данные по ВЛ те же, что и в предыдущей задаче.

Решение. Для ВЛ на металлических и железобетонных опорах без тросов принимается, что удары молнии распределяются между проводами линии и опорами поровну, т. е. $\Delta_{\text{пр}} = \Delta_{\text{оп}} = 0,5$.

1. Удар молнии в провод

Для воздушных линий на металлических и железобетонных опорах в системах с заземленной нейтралью ($U_{\text{ном}} \geq 110$ кВ) вероятность перекрытия гирлянды изоляторов при ударе молнии в фазный провод определяется аналогично ВЛ с тросами:

$$I_{\text{кр1}} = \frac{2U_{50\%}}{Z_{\text{пр}}} = \frac{2 \cdot 700}{300} = 4,67 \text{ кА};$$

$$P_{\text{пр}} = e^{-0,04 I_{\text{кр1}}} = 0,83.$$

2. Удар в опору

Для определения вероятности перекрытия гирлянды изоляторов при ударе молнии в вершину опоры $P_{\text{оп}}$ в системах с заземленной нейтралью необходимо рассчитать максимальное напряжение в точке

крепления гирлянды изоляторов, т. е. на вершине опоры $U_{\text{оп.макс}}$, которое упрощенно определяется как $U_{\text{оп.макс}} = R_{\text{и}} I_{\text{м}} + a_{\text{м}} L_0 h_{\text{оп}}$.

В этой задаче для простоты сделаем упрощение и пренебрежем индуктивностью петли «опора–провод» $L_{\text{оп}}$. Найдем критический ток молнии $I_{\text{кр2}}$, при превышении которого будет происходить обратное перекрытие с опоры на провод:

$$I_{\text{кр2}} = \frac{U_{50\%}}{R_{\text{и}}} = \frac{700}{15} = 46,7 \text{ кА.}$$

Тогда

$$P_{\text{оп}} = e^{-0,04 I_{\text{кр2}}} = 0,16.$$

3. Удельное число отключений

При отсутствии молниезащитного троса в выражении удельного числа отключений будет фигурировать средняя высота подвеса верхнего фазного провода $h_{\text{пр.ср}} = h_1 - l_{\text{г}} - \frac{2}{3} f_{\text{пр}} = 17,5 - 1,4 - \frac{2}{3} \cdot 3 = 14,1 \text{ м}$, а само выражение для удельного числа отключений упрощается:

$$n_{\text{откл}} = 4h_{\text{пр.ср}} [\Delta_{\text{пр}} P_{\text{пр}} + \Delta_{\text{оп}} P_{\text{оп}}] \eta_{\text{г}} =$$

$$= 4 \cdot 14,1 [0,5 \cdot 0,83 + 0,5 \cdot 0,16] 0,7 = 19,4 \text{ откл}/(\text{год} \cdot 100 \text{ км} \cdot 100 \text{ ч}).$$

4. Число грозových отключений ВЛ

$$N_{\text{откл}} = 19,4 \frac{L_{\text{ВЛ}}}{100} \cdot \frac{D_{\text{г}}}{100} = 9,33 \text{ откл}/\text{год.}$$

5. Если ВЛ снабжена АПВ, то число перерывов в электроснабжении по ВЛ:

$$N_{\text{перер}} = N_{\text{откл}} (1 - \beta_{\text{АПВ}}) = 9,33(1 - 0,8) = 1,87 \text{ откл}/\text{год.}$$

Из сравнения результатов примеров 4.1 и 4.2 следует, что применение грозозащитных тросов позволяет значительно снизить число грозových отключений ВЛ, выполненных на железобетонных опорах.

Задание 4

Определить среднегодовое число грозových отключений воздушной линии 110 кВ на железобетонных опорах:

4.1) с молниезащитным тросом;

4.2) без молниезащитного троса.

Исходные данные приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Исходные данные к заданию 4

Номер варианта	Длина ВЛ $L_{ВЛ}$, км	Длина пролета $l_{пр}$, м	Стрелы провесов		Длины траверс			Длина гирлянды изоляторов $l_{г}$, м	Высота опоры $h_{оп}$, м	Высоты до траверс		$U_{50\%}$, кВ	$R_{ш}$, Ом	$Z_{тр}$, Ом	$Z_{пр}$, Ом	$D_{г}$, ч/год
			троса $f_{тр}$, м	провода $f_{пр}$, м	L_a , м	L_b , м	L_c , м			фазы А h_1 , м	фаз В и С h_2 , м					
1	50	255	2,5	3	2	2	3,5	1,1	19,5	17,5	14,5	570	10	300	350	20
2	55	175	3	4	2	2	3,5	1,2	20,5	17,5	14,5	600	15	350	400	30
3	60	235	2,5	3	2	2	3,5	1,3	22,2	16,5	13,5	620	20	400	450	40
4	65	205	3	4	2	2	3,5	1,4	23,5	20,5	17,5	650	10	300	350	50
5	70	190	2,5	3	2	2	3,5	1,5	24,5	18,5	15,5	700	15	350	400	60
6	75	270	3	4	2	2	3,5	1,1	19,5	17,5	14,5	715	20	400	450	70
7	80	180	2,5	3	2	2	3,5	1,2	20,5	17,5	14,5	770	10	300	350	80
8	85	240	3	4	2	2	3,5	1,3	22,2	16,5	13,5	570	15	350	400	20
9	90	230	2,5	3	2	2	3,5	1,4	23,5	20,5	17,5	600	20	400	450	30
10	95	210	3	4	2	2	3,5	1,5	24,5	18,5	15,5	620	10	300	350	40
11	100	280	2,5	3	2	2	3,5	1,1	19,5	17,5	14,5	650	15	350	400	50
12	105	200	3	4	2	2	3,5	1,2	20,5	17,5	14,5	700	20	400	450	60
13	110	250	2,5	3	2	2	3,5	1,3	22,2	16,5	13,5	715	10	300	350	70
14	115	280	3	4	2	2	3,5	1,4	23,5	20,5	17,5	770	15	350	400	80
15	120	250	2,5	3	2	2	3,5	1,5	24,5	18,5	15,5	570	20	400	450	20
16	125	300	3	4	2	2	3,5	1,1	19,5	17,5	14,5	600	10	300	350	30
17	130	220	2,5	3	2	2	3,5	1,2	20,5	17,5	14,5	620	15	350	400	40
18	135	255	3	4	2	2	3,5	1,3	22,2	16,5	13,5	650	20	400	450	50
19	140	300	2,5	3	2	2	3,5	1,4	23,5	20,5	17,5	700	10	300	350	60
20	145	285	3	4	2	2	3,5	1,5	24,5	18,5	15,5	715	15	350	400	70
21	150	330	2,5	3	2	2	3,5	1,1	19,5	17,5	14,5	770	20	400	450	80
22	50	240	3	4	2	2	3,5	1,2	20,5	17,5	14,5	570	10	300	350	20
23	55	260	2,5	3	2	2	3,5	1,3	22,2	16,5	13,5	600	15	350	400	30
24	60	320	3	4	2	2	3,5	1,4	23,5	20,5	17,5	620	20	400	450	40
25	65	310	2,5	3	2	2	3,5	1,5	24,5	18,5	15,5	650	10	300	350	50

Практическое занятие № 5 ГРОЗОУПОРНОСТЬ ПОДСТАНЦИЙ

Основным средством защиты подстанционного оборудования от непосредственного воздействия атмосферного перенапряжения является установка на территории подстанции молниеотводов.

На рис. 5.1 представлена зона защиты одиночного стержневого молниеотвода. Зона защиты имеет форму «шатра» высотой h .

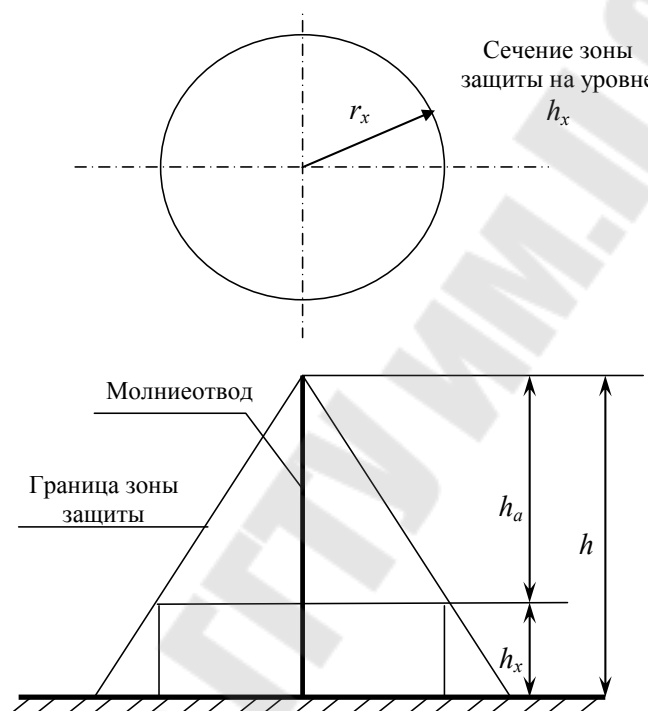


Рис. 5.1. Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода

Высота h_a определяемая как разница между высотой молниеотвода h и высотой защищаемого объекта h_x называется активной высотой молниеотвода. Радиус защитного «шатра» на уровне высоты h_x определяется соотношением

$$r_x = h_a \frac{1,6}{1 + \frac{h_x}{h}} p, \text{ м}, \quad (5.1)$$

где коэффициент $p = 1$ для молниеотвода высотой менее 30 м в остальных случаях определяется по выражению

$$p = \frac{5,5}{\sqrt{h}}. \quad (5.2)$$

Пример 5.1. Определить высоту и место расположения молниеотвода для защиты здания подстанции шириной $a = 10$ м, длиной $b = 20$ м, высотой $h_x = 6$ м с учетом его допустимого приближения к объекту защиты. Если индуктивность молниеотвода $1,5$ мкГн/м, ток молнии 150 кА, крутизна фронта волны тока 30 кА/мкс, сопротивление заземления молниеотвода в импульсном режиме 20 Ом.

Решение. Расчет высоты молниеотвода производится так, чтобы с одной стороны его общая высота и радиус защиты на высоте объекта были наименьшими, а с другой стороны исключалась вероятность вторичных перекрытий с молниеотвода на объект.

Схема установки молниеотвода приведена на рис. 5.2.

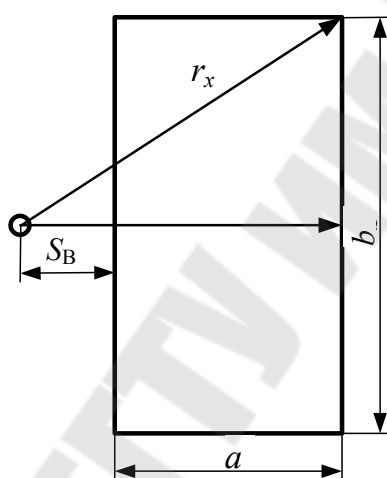


Рис. 5.2. Схему установки молниеотвода

Определим потенциал на молниеотводе в момент разряда на уровне высоты объекта:

$$U = I_M R_{з.и} + L_0 \alpha h_x = 150 \cdot 20 + 1,5 \cdot 30 \cdot 6 = 3270 \text{ кВ.}$$

Приняв рекомендованную допустимую напряженность по воздуху $E_B = 500$ кВ/м, определим удаление молниеотвода от объекта:

$$S_B = \frac{U}{E_B} = \frac{3270}{500} = 6,54 \text{ м.}$$

Это же расстояние определим по другой зависимости:

$$S_B \geq 0,3R_{з.и} + 0,1h_x = 0,3 \cdot 20 + 0,1 \cdot 6 = 6,6 \text{ м.}$$

То расстояние, которое оказалось наибольшим, принимается за расчетное, т. е. $6,6$ м.

Радиус защитной зоны определится выражением

$$r_x = \sqrt{(S_B + a)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} = \sqrt{16,6^2 + 10^2} = 19,35 \text{ м.}$$

Предположив, что высота молниеотвода будет меньше 30 м, $p = 1$, имеем:

$$r_x = \frac{1,6(h - h_x)h}{h + h_x} = 19,35 \text{ м.}$$

Откуда, согласно исходным данным, приняв $h_x = 6$ м,

$$h^2 - 18,1h - 73 = 0;$$

$$h = 9 \pm \sqrt{81 + 73} = 21,4 \text{ м.}$$

Пример 5.2. Найти крутизну волны напряжения, падающей на подстанцию 220 кВ, если средняя высота подвеса проводов ЛЭП $h_{\text{ср}} = 15$ м, $U_{50\%} = 700$ кВ, а длина пути пробега волны $l_{\text{пр}} = 1,5$ км.

Решение

$$a = \frac{U_{50\%}}{\Delta\tau_{\phi} l_{\text{пр}}},$$

где $\Delta\tau_{\phi}$ – удлинение фронта импульса:

$$\Delta\tau_{\phi} = \left(0,5 + \frac{0,008U_{50\%}}{h_{\text{ср}}} \right) \frac{1}{k},$$

где k – коэффициент, зависящий от количества проводов в фазе n :

$U_{\text{ном}}$, кВ	110–220	330	500	750
n	1	2	3	4–5
k	1	1,1	1,45	1,55

$$\Delta\tau_{\phi} = \left(0,5 + \frac{0,008 \cdot 700}{15} \right) = 0,873 \text{ мкс/км};$$

$$a = \frac{700}{0,873 \cdot 1,5} = 534,6 \text{ кВ/мкс.}$$

Задание 5.1

Определить высоту и место расположения молниеотвода для защиты здания подстанции шириной a , длиной b , высотой h_x с учетом его допустимого приближения к объекту защиты.

Схему установки молниеотвода принять в соответствии с рис. 5.2. Исходные данные приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Исходные данные к заданию 5.1

Номер варианта	Ширина п/ст a , м	Длина п/ст b , м	Высота п/ст h_x , м	Ток молнии I_m , кА	Индуктивность молниеотвода L_0 , мкГн/м	Крутизна фронта волны тока α , кА/мкс	Сопротивление заземления молниеотвода $R_{з.п.}$, Ом
1	10	20	5	100	1,7	30	18
2	12	24	6	150	1,5	32	20
3	10	20	6	120	1,4	25	17
4	12	24	7	140	1,2	28	21
5	8	18	5	100	2,0	40	25
6	25	40	8	150	2,0	38	20
7	15	30	7	80	3,0	25	15
8	20	40	7	90	2,5	34	16
9	12	20	6	100	1,8	22	24
10	8	16	4	110	1,1	27	10
11	10	20	6	120	1,5	34	12
12	20	50	10	130	2,2	42	22
13	15	40	8	140	2,4	35	20
14	12	30	7	150	1,6	28	21
15	10	30	6	100	1,7	31	18
16	12	20	5	90	1,2	29	12
17	14	24	7	80	1,3	27	14
18	8	18	5	85	1,4	28	15
19	10	24	6	90	1,5	29	16
20	11	22	7	95	1,6	30	17
21	12	18	5	100	1,7	31	18
22	13	20	6	105	1,8	32	19
23	14	22	8	110	1,9	33	20
24	15	25	7	115	2,0	34	21
25	12	17	5	120	2,1	35	22

Задание 5.2

Для защиты открытой подстанции на дымовой трубе предприятия проложен молниеотвод (рис. 5.3). Необходимо установить обеспечивает ли молниеотвод защиту подстанции. Исходные данные к расчету приведены в табл. 5.3.

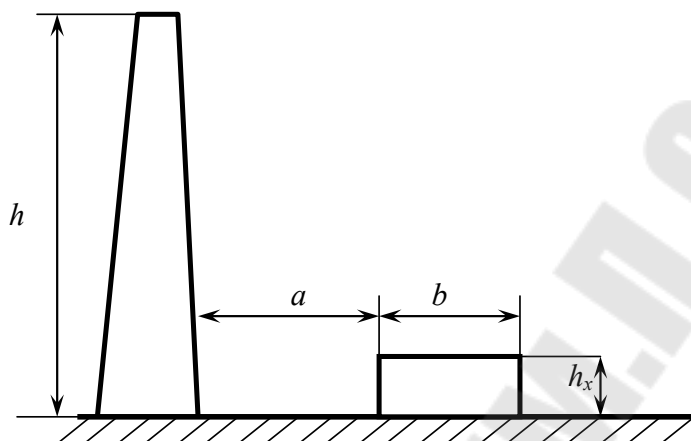


Рис. 5.3. Схема расположения трубы и открытой подстанции

Таблица 5.2

Исходные данные к заданию 5.2

Номер варианта	Высота трубы h , м	Высота подстанции h_x , м	Расстояние от трубы до подстанции a , м	Длина подстанции b , м
1	80	6	60	24
2	80	8	50	12
3	80	10	40	24
4	100	12	80	12
5	100	6	70	24
6	100	8	60	12
7	120	10	80	24
8	120	12	70	12
9	120	6	50	24
10	60	8	30	12
11	60	10	40	24
12	60	12	50	12
13	90	6	70	24
14	90	8	60	12
15	90	10	50	24
16	70	5	55	15
17	70	7	60	17

Окончание табл. 5.2

Номер варианта	Высота трубы h , м	Высота подстанции h_x , м	Расстояние от трубы до подстанции a , м	Длина подстанции b , м
18	70	9	65	18
19	75	5	30	10
20	80	6	35	12
21	85	7	40	14
22	90	8	45	16
23	95	9	50	18
24	100	10	55	20
25	105	12	60	22

Задание 5.3

Найти крутизну падающей на подстанцию волны напряжения. Исходные данные приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Исходные данные к заданию 5.3

Номер варианта	Номинальное напряжение подстанции $U_{ном}$, кВ	Количество проводов в фазе n , шт.	Средняя высота подвеса проводов ЛЭП $h_{ср}$, м	$U_{50\%}$, кВ	Длина пути пробега волны $l_{пр}$, км
1	110	1	10	500	1,2
2	220	1	14	750	1,3
3	330	2	15	1200	1,4
4	500	3	17	1300	1,5
5	750	4	19	1500	1,6
6	110	1	11	600	1,4
7	220	1	15	800	1,5
8	330	2	16	1300	1,6
9	500	3	18	1400	1,7
10	750	4	20	1550	1,8
11	110	1	10	550	1,6
12	220	1	14	900	1,7
13	330	2	15	1400	1,8
14	500	3	17	1450	1,9
15	750	4	19	1600	2,0
16	110	1	11	650	1,8
17	220	1	15	1000	1,9
18	330	2	16	1250	2,0

Номер варианта	Номинальное напряжение подстанции $U_{ном}$, кВ	Количество проводов в фазе n , шт.	Средняя высота подвеса проводов ЛЭП $h_{ср}$, м	$U_{50\%}$, кВ	Длина пути пробега волны $l_{пр}$, км
19	500	3	18	1500	2,1
20	750	4	20	1650	2,2
21	110	1	10	700	2,0
22	220	1	14	1100	2,1
23	330	2	15	1350	2,2
24	500	3	17	1550	2,3
25	750	4	19	1700	2,4

Практическое занятие № 6

КОММУТАЦИОННЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

После любой коммутации (плановой или аварийной) возникают коммутационные перенапряжения. Они образуются при резком изменении параметров и структуры сети из-за заряда и перезаряда ее емкостей в процессе перехода системы от одного состояния к другому.

Наиболее возможные виды коммутационных перенапряжений возникают при:

- плановых включениях и отключениях нагруженных линий;
- ненагруженных силовых трансформаторов и автотрансформаторов, реакторов;
- аварийных разрывах электропередачи в процессе ликвидации КЗ или асинхронного хода;
- работе АВР;
- включении или отключении разъединителями участков холостых шин ОРУ, ЗРУ.

Величина максимального перенапряжения, которое может иметь место при отключении масляного трансформатора определяется:

$$U_{\max} = I_{ср} \sqrt{\frac{L_{\mu}}{C_{\mu}}}, \quad (6.1)$$

где $I_{ср}$ – ток среза, А; L_{μ} – индуктивность трансформатора, Гн; C_{μ} – емкость фазы трансформатора, Ф.

$$L_{\mu} = \frac{\Phi^{\text{амп}}}{I_{\text{хх}}^{\text{амп}}}, \text{ Гн}, \quad (6.2)$$

где $\Phi^{\text{амп}}$ – амплитуда потокораспределения, Вб; $I_{\text{хх}}^{\text{амп}}$ – амплитуда тока холостого хода, А.

$$\Phi^{\text{амп}} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot 4,44 f}, \quad (6.3)$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение, В; f – частота сети, Гц.

Выключатели высокого напряжения за счет интенсивного дугогашения могут отключить ток раньше его прохождения через нулевое значение. Это явление называется срезом тока. В момент обрыва тока в индуктивности запасается энергия, пропорциональная U^2 , под действием которой возникают колебания напряжения. Наиболее опасны перенапряжения при срезах тока при отключении заторможенного электродвигателя (процесс неуспешного пуска), так как при этом энергия, обусловленная срезом тока, запасается магнитным полем в немагнитных материалах (воздух), имеющих малые потери.

Максимальные перенапряжения оцениваются по формуле

$$U_{\text{max}} = \sqrt{i_0^2 z_{\text{дв}}^2 + U_0^2}, \quad (6.4)$$

где $z_{\text{дв}} = \sqrt{\frac{L''_{\text{дв}}}{C_{\text{дв}}}}$ – сопротивление заторможенного электродвигателя;

$L''_{\text{дв}}$ – сверхпереходная индуктивность машины; $C_{\text{дв}}$ – эквивалентная емкость коммутируемого присоединения; $i_0 = I_{\text{откл.т}} \cdot \sin \varphi_0$ – ток среза; $U_0 = U_{\text{ф.т}} \cdot \cos \varphi_0$ – мгновенное значение напряжения в момент среза.

Для этого необходимо вычислить сверхпереходную индуктивность машины:

$$L''_{\text{дв}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{I_n^* \omega P_{\text{дв}} / \cos \varphi_{\text{ном}}}. \quad (6.5)$$

Амплитуда тока отключения:

$$I_{\text{откл.т}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_{\text{ном}}}{\omega L''_{\text{дв}}}. \quad (6.6)$$

Пример 6.1. Определить величину максимального перенапряжения, которое может иметь место при отключении холостого хода масляного трансформатора с $U_{\text{ном}} = 10$ кВ, если ток холостого хода трансформатора 0,15 А, емкость фазы трансформатора 0,5 нФ, а ток среза равен 0,5 амплитуды тока холостого хода.

Решение

1. Амплитуда тока холостого хода:

$$I_{\text{xx}}^{\text{амп}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{xx}} = \sqrt{2} \cdot 0,15 = 0,212 \text{ А.}$$

2. Амплитуда тока среза:

$$I_{\text{ср}} = 0,5 I_{\text{xx}}^{\text{амп}} = 0,5 \cdot 0,212 = 0,106 \text{ А.}$$

3. Амплитуда потокораспределения по (6.3):

$$\Phi^{\text{амп}} = \frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot 50} = 26 \text{ Вб.}$$

4. Индуктивность трансформатора по (6.2):

$$L_{\mu} = \frac{26}{0,212} = 122,64 \text{ Гн.}$$

5. Максимальное перенапряжение по (6.1):

$$U_{\text{max}} = 0,106 \sqrt{\frac{122,64}{0,5 \cdot 10^{-9}}} = 52497 \text{ В.}$$

Пример 6.2. Определить максимальное перенапряжение при срезе тока в выключателе при отключении заторможенного электродвигателя мощностью $P_{\text{дв}} = 315$ кВт, напряжением $U_{\text{ном}} = 6$ кВ. Ток среза $i_0 = 12$ А, кратность пускового тока $I_n^* = 6,2$, эквивалентная емкость двигателя $C_{\text{дв}} = 30$ нФ, $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,87$.

Решение. Сверхпереходная индуктивность машины по (6.5):

$$L_{\text{дв}}'' = \frac{6000^2}{6,2 \cdot 314 \cdot 315000 / 0,87} = 51 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Амплитуда тока отключения по (6.6):

$$I_{\text{откл.т}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{6000}{314 \cdot 51 \cdot 10^{-3}} = 306 \text{ А.}$$

Характеристическое сопротивление заторможенного электродвигателя:

$$z_{\text{дв}} = \sqrt{\frac{51 \cdot 10^{-3}}{30 \cdot 10^{-9}}} = 1304 \text{ Ом.}$$

Найдем $\cos \varphi_0$:

$$\sin \varphi_0 = \frac{i_0}{I_{\text{откл.т}}} = \frac{12}{306} = 0,04;$$

$$\cos \varphi_0 = \sqrt{1 - 0,04^2} = 0,99.$$

Мгновенное значение напряжения в момент среза U_0 :

$$U_0 = 6000 \cdot 0,99 = 5940 \text{ В.}$$

Максимальные перенапряжения по (6.4):

$$U_{\text{max}} = \sqrt{12^2 \cdot 1304^2 + 5940^2} = 16737 \text{ В.}$$

Для ограничения данного перенапряжения необходимо установить параллельно контактам выключателя электродвигателя ОПН.

Задание 6.1

Определить величину максимального перенапряжения, которое может иметь место при отключении холостого хода масляного трансформатора. Исходные данные к расчету приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Исходные данные к заданию 6.1

Номер варианта	$U_{\text{ном}}$, кВ	$S_{\text{ном}}$, кВ · А	$I_{\text{хх}}$, %	C_{μ} , пФ	$I_{\text{ср}}$, о. е.
1	10	160	2,4	500	0,3
2	35	1000	1,5	600	0,4
3	110	6300	0,8	700	0,5
4	220	25000	1,2	900	0,3
5	330	40000	1,4	1000	0,4
6	10	250	23	600	0,5
7	35	1600	1,4	700	0,3
8	110	10000	0,7	800	0,4
9	220	40000	1,1	1000	0,5
10	330	63000	0,7	1100	0,3

Окончание табл. 6.1

Номер варианта	$U_{\text{ном}}$, кВ	$S_{\text{ном}}$, кВ · А	I_{xx} , %	C_{μ} , пФ	$I_{\text{ср}}$, о. е.
11	10	400	2,1	500	0,4
12	35	2500	1,1	600	0,5
13	110	16000	0,7	700	0,3
14	220	40000	0,9	1100	0,4
15	330	125000	0,5	1200	0,5
16	10	630	2,0	600	0,3
17	35	4000	1,0	700	0,4
18	110	25000	0,7	800	0,5
19	220	63000	0,8	1200	0,3
20	330	200000	0,5	1300	0,4
21	10	1000	2,8	500	0,5
22	35	6300	0,9	600	0,3
23	110	40000	0,65	700	0,4
24	220	100000	0,7	1300	0,5
25	330	240000	0,5	1300	0,3

Задание 6.2

Определить максимальное перенапряжение при срезе тока в выключателе при отключении заторможенного электродвигателя. Исходные данные к расчету приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Исходные данные к заданию 6.2

Номер варианта	$U_{\text{ном}}$, кВ	$P_{\text{дв}}$, кВт	i_0 , А	I_n^* , о. е.	$C_{\text{дв}}$, нФ	$\cos \varphi_{\text{ном}}$
1	6	1000	14	5,0	10	0,89
2	10	1000	10	6,0	11	0,88
3	6	1250	12	5,5	13	0,89
4	10	1200	14	6,0	13	0,88
5	6	1600	10	5,5	16	0,9
6	10	1600	18	6,0	17	0,89
7	6	2000	15	4,8	20	0,91
8	10	1000	9	5,7	11	0,88
9	6	2500	17	5,3	25	0,92
10	10	1250	19	6,0	14	0,88
11	6	315	5	7,0	4	0,9
12	10	1600	19	5,2	17	0,89

Номер варианта	$U_{ном}$, кВ	$P_{дв}$, кВт	i_0 , А	I_n^* , о. е.	$C_{дв}$, нФ	$\cos \varphi_{ном}$
13	6	3200	27	6,3	32	0,91
14	10	800	11	5,5	9	0,86
15	6	400	7	7,0	4	0,91
16	10	1000	13	6,0	11	0,85
17	6	4000	30	6,3	40	0,92
18	10	1250	18	5,4	14	0,86
19	6	500	6	6,0	5	0,92
20	10	630	5	5,5	8	0,78
21	6	5000	40	6,5	50	0,92
22	10	800	4	5,4	10	0,8
23	6	630	8	5,2	7	0,9
24	10	1000	8	6,0	12	0,8
25	6	800	9	5,2	8	0,9

Практическое занятие № 7

НЕЛИНЕЙНЫЕ ОГРАНИЧИТЕЛИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Ограничители перенапряжений (ОПН) предназначены для защиты изоляции электрооборудования от атмосферных и коммутационных перенапряжений. В отличие от разрядников с искровыми промежутками и карборундовыми резисторами ОПН не содержат искровых промежутков и состоят из колонок металлооксидных нелинейных резисторов (варисторов) на основе оксида цинка, помещенных в полимерный или фарфоровый корпус.

Количество резисторов в колонке зависит от максимального рабочего напряжения ОПН. В нормальном режиме ток через варистор носит емкостной характер и составляет десятые доли миллиампера. При возникновении волн перенапряжений варисторы ОПН переходят в проводящее состояние и ограничивают дальнейшее нарастание напряжения на выводах. Когда напряжение снижается, ОПН возвращается в непроводящее состояние.

Преимущества ОПН по сравнению с вентильными разрядниками:

- глубокий уровень ограничений для всех видов волн перенапряжений;
- отсутствие сопровождающего тока после затухания волны перенапряжений;

- простота конструкции и высокая надежность при эксплуатации;
- стабильность характеристик и устойчивость к старению;
- способность к рассеиванию больших энергий;
- непрерывное подключение к защищаемой сети;
- стойкость к атмосферным перенапряжениям;
- малые габариты, вес и стоимость.

На рис. 7.1–7.3 приведены вольтсекундные характеристики ОПН.

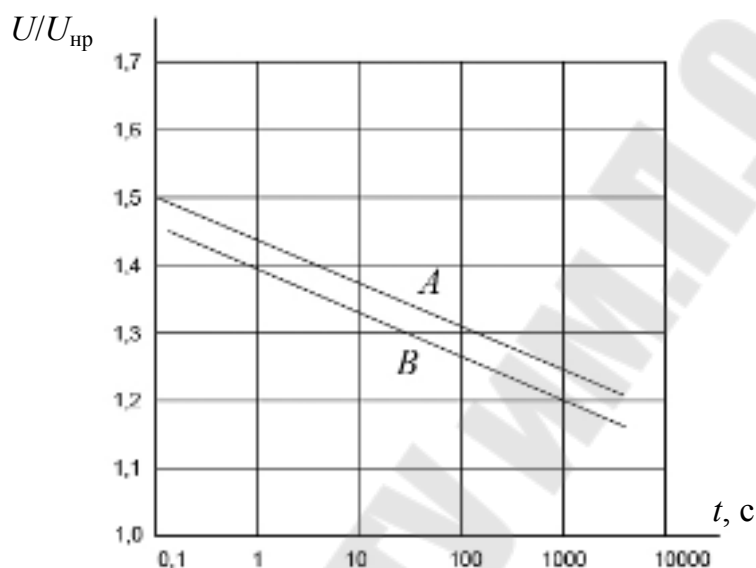


Рис. 7.1. Вольтсекундная характеристика ОПН-110:
1 – ОПН в исходном состоянии; 2 – ОПН при предварительном
воздействии двух нормированных импульсов тока

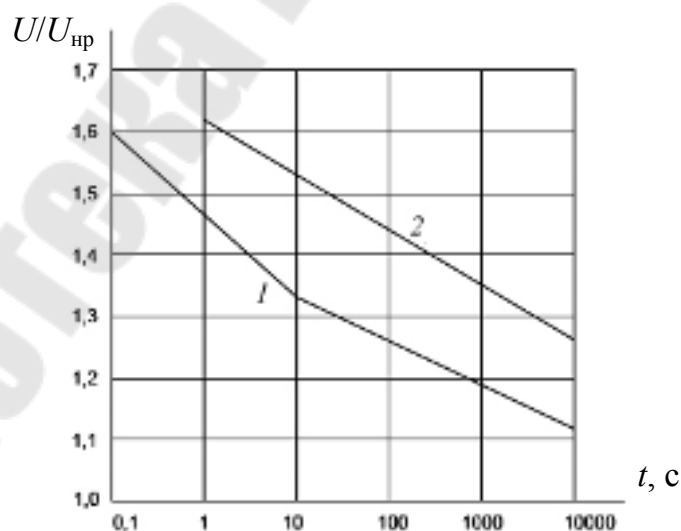


Рис. 7.2. Вольтсекундная характеристика ОПН-220:
1 – ОПН в исходном состоянии; 2 – ОПН при предварительном
воздействии двух нормированных импульсов тока

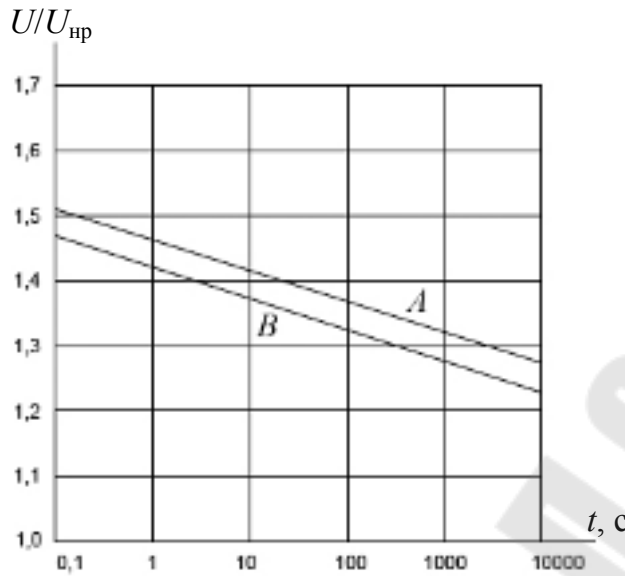


Рис. 7.3. Вольтсекундная характеристика ОПН-330:
 А – ОПН в исходном состоянии; В – ОПН при предварительном
 воздействии двух нормированных импульсов тока

Пример 7.1. Определить расчетную величину длительно допустимого напряжения на ОПН 330 кВ устанавливаемого в разомкнутом конце линии 330 кВ длиной 250 км. Волновое сопротивление линии $Z_B = 300$ Ом, предвключенное сопротивление питающей подстанции $X_{II} = 100$ Ом, время холостого хода линии 20 мин, $E^* = 1,05$.

Решение

$$\lambda = 0,06 \cdot L = 0,06 \cdot 250 = 15^\circ.$$

$$U_{HP} = E^* \frac{U_{НОМ} \cdot 1,1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{X_{II}}{Z_B} \operatorname{tg} \lambda} \cdot \frac{1}{\cos \lambda} =$$

$$= 1,05 \frac{330 \cdot 1,1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{100}{330} \operatorname{tg} 15} \cdot \frac{1}{\cos 15} = 249 \text{ кВ.}$$

Из рис. 7.3 при $t = 1200$ с $K_B = 1,25$, $U_{PHP} = \frac{249}{1,25} = 199,2$ кВ. Из каталога выбираем ОПН-330 с $U_{HP} = 210$ кВ.

Пример 7.2. Выбрать ОПН для установки на узловой подстанции 110 кВ и в нейтрали трансформаторов, если $E^* = 1,05$.

Решение. Для выбора ОПН определим $U_{\text{НР}}$ и $U_{\text{РНР}}$.

$$U_{\text{НР}} = E^* \cdot 1,15 \frac{110}{\sqrt{3}} = 76,6 \text{ кВ.}$$

В первом приближении $U_{\text{РНР}} = U_{\text{НР}} = 76,6 \text{ кВ}$. В нейтрали трансформатора в нормальном режиме напряжение частотой 50 Гц ближе к нулю. Однако при несимметричных КЗ в течение $0,15 \div 0,2 \text{ с}$ напряжение может повышаться до фазного, то есть до 76,6 кВ. Из рис. 7.1 для $t = 0,2 \text{ с}$ $K_{\text{в}} = 1,43$, поэтому для ОПН, устанавливаемого в нейтрали $U_{\text{РНР}} = 76,6 / 1,43 = 53,6 \text{ кВ}$. Из каталога выбираем ОПН-110/78/10/500 (II, III, IV)–ХЛ1 и ОПН-110/56/10/500 (II, III)–УХ1.

Задание 7.1

Определить расчетную величину длительно допустимого напряжения на ОПН устанавливаемого в разомкнутом конце линии U , кВ, длиной L , км. Волновое сопротивление линии $Z_{\text{в}}$, Ом, предвключенное сопротивление питающей подстанции $X_{\text{п}}$, Ом, время холостого хода линии $t_{\text{хх}}$, мин, E^* .

Исходные данные к расчету приведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Исходные данные к заданию 7.1

Номер варианта	U , кВ	L , км	$Z_{\text{в}}$, Ом	$X_{\text{п}}$, Ом	$t_{\text{хх}}$, мин	E^* , о. е.
1	330	200	250	50	10	1
2	330	250	270	60	12	1,05
3	330	300	280	70	14	1
4	330	350	300	80	16	1,05
5	330	400	310	90	18	1
6	220	70	300	100	20	1,05
7	220	100	320	110	18	1
8	220	130	340	120	16	1,05
9	220	160	360	130	14	1
10	220	190	380	140	12	1,05
11	110	50	350	150	10	1
12	110	70	370	160	18	1,05

Таблица 7.1

Номер варианта	U , кВ	L , км	Z_B , Ом	X_{II} , Ом	t_{XX} , мин	E^* , о. е.
13	110	90	390	170	11	1
14	110	120	410	180	15	1,05
15	110	150	430	190	17	1
16	330	100	240	180	15	1,05
17	330	90	260	170	17	1
18	330	80	280	160	19	1,05
19	220	80	290	150	14	1
20	220	70	280	140	15	1,05
21	220	60	270	130	16	1
22	110	50	280	120	5	1,05
23	110	40	290	110	6	1
24	110	30	300	100	7	1,05
25	110	20	310	90	8	1

Задание 7.2

Выбрать ОПН для установки на узловой подстанции и в нейтрал-ли трансформаторов. Исходные данные приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Исходные данные к заданию 7.2

Номер варианта	U , кВ	E^* , о. е.
1	110	1,1
2	220	1,05
3	330	1,05
4	110	1,1
5	220	1,05
6	330	1,05
7	110	1,1
8	220	1,05
9	330	1,05
10	110	1,1
11	220	1,05
12	330	1,05
13	110	1,1
14	220	1,05
15	330	1,05
16	110	1,1

Номер варианта	U , кВ	E^* , о. е.
17	220	1,05
18	330	1,05
19	110	1,1
20	220	1,05
21	330	1,05
22	110	1,1
23	220	1,05
24	330	1,05
25	110	1,1

Практическое занятие № 8

РЕЗИСТИВНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ НЕЙТРАЛИ

Резисторы предназначены для заземления нейтрали синхронных генераторов и трансформаторов. Устройства для резисторного заземления нейтрали различаются по номинальному току, сопротивлению, количеству выводов, ступеней, степени защиты, габаритам и массе.

Большинство резисторных блоков представляет собой многоэтажную колонку установленных друг над другом резисторов.

Выбор резисторов при низкоомном заземлении нейтрали

Активное сопротивление, с одной стороны, должно ограничить величину тока, который дает минимум повреждения при аварии, с другой – величина тока должна быть такой, чтобы обеспечить удовлетворительную работу релейной защиты. В большинстве случаев ток замыкания на землю может быть ограничен резистором в нейтрали до величины соответствующей 5–20 % от тока трехфазного короткого замыкания. Минимум тока, создаваемого резистором, зависит от используемых схем релейной защиты от замыканий на землю.

В большинстве случаев использования низкоомного заземления нейтрали при однофазном замыкании в сети напряжение, появляющееся на резисторе, близко к нормальному фазному напряжению сети. Ток через резистор практически равен току в месте повреждения. Таким образом, этот ток определяется фазным напряжением, деленным на сопротивление резистора.

Выбор резисторов при высокоомном заземлении нейтрали

Заземляющий резистор и трансформатор выбираются исходя из режима длительного протекания тока. Номинальное напряжение за-

земляющего резистора в нейтрали земляющего трансформатора равно номинальному фазному напряжению сети. Номинальное напряжение земляющего трансформатора равно номинальному линейному напряжению сети.

Земляющий резистор выбирается по току, который имеет место при длительном приложении номинального напряжения. При использовании земляющего трансформатора со схемой соединения обмоток звезда-треугольник с нейтралью, земляенной через резистор, номинальный ток земляющего трансформатора определяется номинальным током резистора.

Оптимальное значение резистора R_N , через который земляется нейтраль сети, определяется формулой

$$R_N = \frac{T}{3C} = \frac{0,01}{3 \cdot 3C} = \frac{1}{900C}, \quad (8.1)$$

где C – емкость фазы сети на землю, Ф; $T = 0,01/3$ – постоянная времени разряда емкости нулевой последовательности на резистор R_N , обеспечивающая практически полный разряд емкости за половину периода промышленной частоты после очередного погасания дуги.

Высокоомное сопротивление нейтрали можно выполнить как с помощью высоковольтного резистора R_N в нейтрали земляющего трансформатора (рис. 8.1, а), так и с помощью низковольтного резистора R_Δ – в разомкнутом треугольнике при пятистержневой конструкции земляющего трансформатора (рис. 8.1, б).

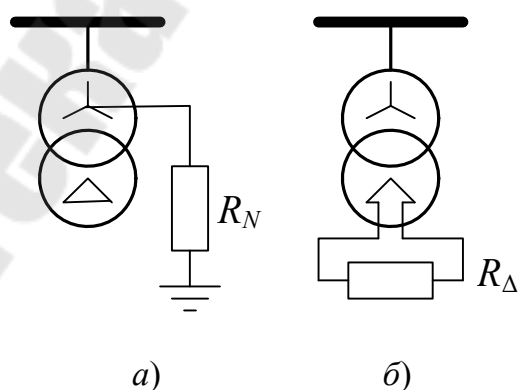


Рис. 8.1. Способы подключения резистора

Ток замыкания на землю I_3 определяется суммарной емкостью сети на землю C , параметрами трансформатора R_K , X_K и резистора в нейтрали или треугольнике и находится с помощью соответствен-

ной схемы замещения сети и трансформатора. При однофазном замыкании ток в месте повреждения I_3 равен утроенному току нулевой последовательности I_0 . Таким образом, для схемы с резистором, включенным в нейтраль, имеем:

$$I_3 = 3I_0 = U_\phi \left(3j\omega C + \frac{3}{3R_N + R_K + jX_K} \right), \text{ Ом.} \quad (8.2)$$

Для схемы с резистором, включенным в разомкнутый треугольник, вместо слагаемого $3R_N$ следует подставить $R_\Delta/3$.

В этом выражении R_K и X_K приведены к схеме обмотки, соединенной в звезду, R'_Δ – активное сопротивление, приведенное к той же стороне с помощью коэффициента приведения:

$$R'_\Delta = R_\Delta \left(\frac{K}{\sqrt{3}} \right)^2, \quad (8.3)$$

где K – коэффициент трансформации, равный отношению линейных напряжений сторон трансформатора $K = U_{\text{лY}} / U_{\text{лД}}$.

Пример 8.1. Выбрать оптимальную величину резистора и определить максимальную рассеиваемую в нем мощность для сети 10 кВ с емкостью $C = 0,18$ мкФ при включении его в нейтраль заземляющего трансформатора 10/0,4 кВ.

Решение. Согласно (8.1) величина резистора R_N равна:

$$R_N = \frac{1}{900C} = \frac{1}{900 \cdot 0,18 \cdot 10^{-6}} = 6173 \text{ Ом.}$$

Резистор, выбранный такой величиной, создает в месте повреждения ток, примерно равный емкостному, увеличивая таким образом суммарный ток замыкания примерно в $\sqrt{2}$ раз. Действительно, ток замыкания при изолированной нейтрали равен (8.2):

$$I_3 = 3U_\phi j\omega C = 3 \frac{10000}{\sqrt{3}} 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,18 \cdot 10^{-6} = 0,979 \text{ А.}$$

При включении резистора R_N ток замыкания равен:

$$I_3 = \frac{10000}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(3 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,18 \cdot 10^{-6} \right)^2 + \left(\frac{1}{6173} \right)^2} = 1,354 \text{ А.}$$

Мощность, выделяемая в резисторе при длительном однофазном замыкании на землю, равна:

$$P_{R_N} = (3I_{0R_N})^2 R_N = \left(3 \frac{U_\Phi}{3R_N}\right)^2 R_N = \left(\frac{10000}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot \frac{1}{6173} = 5400 \text{ Вт},$$

где I_{0R_N} – ток нулевой последовательности, протекающий в фазе трансформатора, а ток в нейтрали (в резисторе) равен утроенному току нулевой последовательности.

Приведенные расчеты сделаны без учета сопротивлений КЗ заземляющего трансформатора, так как это дает незначительную поправку. Так, в данном случае параметры трансформатора 10/0,4 кВ $S_T = 6,3 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ имеют следующие числовые значения: $R_K = 37 \text{ Ом}$, $X_K = 71 \text{ Ом}$ и их учет при последовательном соединении в первом приближении можно не проводить.

Пример 8.2. Для сети из примера 8.1 определим величину и мощность резистора R_Δ , включаемого в разомкнутый треугольник заземляющего трансформатора.

Для того чтобы создать в месте повреждения активную составляющую тока примерно равную емкостному току замыкания при изолированной нейтрали, активное сопротивление $R_\Delta/3$ должно быть равно $3R_N$, т. е.

$$R_\Delta/3 = 3R_N = 3 \cdot 6173 = 18519 \text{ Ом}.$$

Истинное (неприведенное) значение этого сопротивления равно:

$$R_\Delta = \frac{R'_\Delta}{(K/\sqrt{3})^2} = \frac{3 \cdot 3 \cdot 6173}{\left(\frac{10000}{400\sqrt{3}}\right)^2} = 267 \text{ Ом}.$$

Ток в резисторе равен:

$$I_\Delta = I'_\Delta \frac{10000}{400\sqrt{3}} \cong \frac{U_\Phi}{R'_\Delta/3} \cdot \frac{10000}{400\sqrt{3}} = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 3 \cdot 6173} \cdot \frac{10000}{400 \cdot \sqrt{3}} = 4,5 \text{ А}.$$

Мощность, выделяемая в резисторе:

$$P_{R_\Delta} = I_\Delta^2 R_\Delta = 4,5^2 \cdot 267 = 5400 \text{ Вт},$$

т. е. равна мощности, выделяющейся в резисторе R_N .

Задание 8.1

Выбрать оптимальную величину резистора для заданной сети. Определить на сколько изменится ток замыкания на землю при подключении резистора в нейтраль заземляющего трансформатора и величину рассеиваемой в резисторе мощности. Исходные данные к расчету приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Исходные данные к заданию 8.1.

Номер варианта	$U_{\text{сети}}$, кВ	C , мкФ
1	6	1,1
2	10	0,7
3	35	0,5
4	6	1,5
5	10	0,8
6	35	0,4
7	6	1,2
8	10	0,6
9	35	0,3
10	6	1,3
11	10	0,5
12	35	0,2
13	6	1,4
14	10	0,4
15	35	0,6
16	6	0,9
17	10	0,3
18	35	0,1
19	6	0,8
20	10	0,9
21	35	0,7
22	6	0,7
23	10	0,2
24	35	0,8
25	6	0,6

Задание 8.2

Выбрать оптимальную величину резистора для заданной сети. Определить на сколько изменится ток замыкания на землю при под-

ключении резистора в разомкнутый треугольник заземляющего трансформатора и величину рассеиваемой в нем мощности. Исходные данные к расчету приведены в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Исходные данные к заданию 8.2

Номер варианта	$U_{\text{сети}}$, кВ	C , мкФ
1	35	0,15
2	6	0,25
3	10	0,22
4	35	0,17
5	6	0,32
6	10	0,28
7	35	0,27
8	6	0,35
9	10	0,52
10	35	0,43
11	6	0,88
12	10	0,74
13	35	0,54
14	6	0,92
15	10	0,37
16	35	0,32
17	6	0,56
18	10	0,43
19	35	0,27
20	6	1,15
21	10	0,78
22	35	0,38
23	6	0,75
24	10	0,55
25	35	0,18

ЛИТЕРАТУРА

1. Защита сетей 6–35 кВ от перенапряжений / Ф. Х. Халилов [и др.] / под ред. Ф. Х. Халилова, Г. А. Евдокунина, А. И. Таджибаева. – СПб., 2002. – 260 с. : ил.

2. Базуткин, В. В. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах : учеб. для вузов / В. В. Базуткин, В. П. Ларионов, Ю. С. Пинталь ; под общ. ред. В. П. Ларионова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 464 с. : ил.

3. Кравцов, А. Справочник по строительству и реконструкции линий электропередачи напряжением 0,4–750 кВ / А. Кравцов, Б. Узелков, Е. Гологорский ; под ред. Е. Г. Гологорского. – М. : ЭНАС, 2007. – 560 с. : ил.

4. Мороз, Д. Р. Практическое руководство к лабораторным работам по курсу «Дуговые и коммутационные перенапряжения в электрических сетях» для студентов дневного отделения специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» / Д. Р. Мороз. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2010. – 23 с.

5. Халилов, Ф. Х. Выбор нелинейных ограничителей напряжения для установки в сетях 110–750 кВ / Ф. Х. Халилов. – СПб., 2005. – 44 с. : ил.

Содержание

<i>Практическое занятие № 1. Перенапряжения в квазистационарных режимах</i>	3
<i>Практическое занятие № 2. Изоляция кабелей и воздушных линий высокого напряжения</i>	6
<i>Практическое занятие № 3. Испытание изоляции</i>	12
<i>Практическое занятие № 4. Грозозащита воздушных линий</i>	17
<i>Практическое занятие № 5. Грозоупорность подстанций</i>	25
<i>Практическое занятие № 6. Коммутационные перенапряжения</i>	31
<i>Практическое занятие № 7. Нелинейные ограничители перенапряжений</i>	36
<i>Практическое занятие № 8. Резистивное заземление нейтрали</i>	41
<i>Литература</i>	47

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

Добродей Александр Олегович

**ДУГОВЫЕ И КОММУТАЦИОННЫЕ
ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СЕТЯХ**

**Практикум
по одноименному курсу для студентов
специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические
системы и сети» дневной формы обучения**

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Редактор
Компьютерная верстка

Н. Г. Мансурова
Н. Б. Козловская

Подписано в печать 29.10.15.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 2,79. Уч.-изд. л. 3,02.

Изд. № 23.

<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение
Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого.
Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя
печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48