

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МУРМАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Строительства,  
энергетики и транспорта

**Методические рекомендации к РГР**  
по дисциплине  
**«Техника высоких напряжений»**  
для всех форм обучения направления  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (профиль Электроснабжение)

**Мурманск**  
**2021**

# Расчетно-графическая работа №1

Исходные данные для решения задач контрольной работы выбираются по последним цифрам зачетной книжки

## Задача 1

Условие:

Рассчитать число электронов  $n$  в лавине, развивающейся в воздухе при различных атмосферных условиях (таблица 1) под действием однородного электрического поля с напряжённостью  $E$ , после прохождения лавиной пути  $x$  (таблица 2).

Таблица 1

	Последняя цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P$ , мм.рт.ст.	758	764	753	776	770	747	745	750	738	740
$t$ °C	-11	18	31	-7	5	0	9	23	13	-20

Таблица 2

	Предпоследняя цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$E$ , кВ/см	35	30	41	31	29	25	28	23	32	27
$x$ , см	2,9	1,6	2,3	1,9	1	0,9	1,3	3	2,2	1,5

### Методические указания к решению задачи 1

Допустим, что в лавине, прошедшей расстояние  $x$ , содержится  $n$  электронов. На пути  $\delta x$  каждый из них произведёт  $\alpha_{эф} \delta x$  ионизации, поэтому увеличение числа электронов в лавине на пути  $\delta x$ .

$$\delta n = \alpha_{эф} n \delta x; \quad \frac{\delta n}{n} = \alpha_{эф} \delta x; \quad \int \frac{\delta n}{n} = \int \alpha_{эф} dx;$$

если электрическое поле однородное и напряжённость его всюду одинакова, то коэффициент  $\alpha$  не зависит от координаты  $x$ , поэтому получаем

$$n = e^{\alpha_{эф} x}$$

Где:  $\alpha_{эф}$  - эффективный коэффициент ионизации;

$x$  - путь, пройденный лавиной.

Коэффициент  $\alpha_{эф}$  представляет собой разность между коэффициентом ударной ионизации  $\alpha$  и коэффициентом прилипания электронов  $\eta$ , равным числу актов захвата на пути в 1 см, т.е.  $\alpha_{эф} = \alpha - \eta$

Величина  $\alpha_{эф}$  для воздуха рассчитывается по эмпирической формуле

$$\alpha_{эф} = \frac{0,2}{\delta} (E - 24.5\delta)^2$$

$\delta$  - относительная плотность воздуха;

$E$  - напряжённость электрического поля, кВ/см.

Относительная плотность воздуха рассчитывается:

$$\delta = \frac{P \cdot T_0}{P_0 \cdot T}$$

Где  $P_0$  и  $T_0$  давление и температура при нормальных атмосферных условиях ( $P_0=101,308$  кПа,  $T_0=(273+20)K$ ),  $P$  и  $T$  давление и температура воздуха в расчётных условиях.

## Задача 2

Условие:

Определить пробивное напряжение воздушного промежутка между электродами различной конфигурации при подаче на промежуток переменного (промышленной частоты), импульсного (стандартного) напряжений обеих полярностей.

Расстояние между электродами указано в таблице 3. Вид прикладываемого напряжения, форма электродов и атмосферные условия приведены в таблице 4.

Примечание. Разрядные напряжение, определённое по формулам, таблицам и графикам, следует привести к реальным атмосферным условиям (указанным в таблице 4).

Таблица 3

	Последняя цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$S$ (м)	3	1.5	2.5	0.5	1.8	2.7	2	1.7	1	2.2

Таблица 4

	Вид прикладываемого напряжения	Форма электродов	$P$ , кПа	$t$ , °C
Предпоследняя цифра варианта	Разрядные 50% - ные импульсные напряжения	Стержень – стержень	230	11
	Разрядные напряжения 50 Гц	Стержень - плоскость	1100	16
	Разрядные 50% - ные импульсные напряжения	Стержень – стержень	950	-9
	Разрядные 50% - ные импульсные напряжения	Стержень – стержень	480	23
	Разрядные напряжения 50 Гц	Стержень - плоскость	700	18

Разрядные 50% - ные импульсные напряжения	Стержень - плоскость	290	29
Разрядные 50% - ные импульсные напряжения	Стержень – стержень	360	-13
Разрядные напряжения 50 Гц	Стержень - плоскость	540	32
Разрядные 50% - ные импульсные напряжения	Стержень – стержень	810	-5
Разрядные напряжения 50 Гц	Стержень - плоскость	620	10

### Методические указания к решению задачи 2

Промежутки стержень-стержень и стержень плоскость, являются классическим примером симметричного резконеоднородного поля.

Зависимость разрядного напряжения для промежутков с резконеоднородным полем от давления имеет своеобразный характер: с ростом давления разрядные напряжения увеличиваются, в случае положительного стержня происходит снижение разрядного напряжения. Это явление можно объяснить следующим образом. При увеличении давления газа уменьшается коэффициент диффузии электронов и ионов, и положительный объёмный заряд, созданный лавиной, располагается в меньшем объёме. Поэтому напряжённость  $E_l$ , обусловленная этим зарядом, возрастает и условие образования стримера  $E_l \approx E_0$ . Соответственно снижается и разрядное напряжение.

Очевидно, что в газе под давлением следует всячески избегать использование промежутков с резконеоднородным полем.

Выражение для определения разрядного напряжения для реальных условий.

$$U = U_p \cdot \delta$$

$\delta$  - относительная плотность воздуха

$U$  - разрядное напряжение, приведённое к реальным атмосферным условиям.

### Задача 3

Условие:

Рассчитать удельные потери энергии на корону для линии электропередачи переменного напряжения, характеризуемой следующими параметрами: номинальное напряжение линии  $U_{ном}$ ; расщеплённые фазы расположены горизонтально и расстояние между фазами равно  $a$ .

Каждая фаза имеет  $n$  проводов радиусом  $r_0$  и диаметром расщепления  $D_p$ . (таблица 5). Трасса ЛЭП проходит в регионе, метеорологические условия которого характеризуются продолжительностью (в часах) хорошей погоды  $h_{хп}$ , сухого снега  $h_{сс}$ , изморози  $h_{изм}$ , дождя и мокрого снега  $h_0$ , относительной плотностью воздуха  $\delta$  (таблица 6)

Таблица 5

	Последняя цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{ном}$	500	750	1150	220	330	500	1150	220	750	330
$a$	15	17	26.5	10	13	16	28	12	19	14
$n$	6	8	4	6	4	8	5	6	4	8
$r_0$	1.1	1.5	2.3	1.3	1.9	1.8	1.4	1.6	1.7	1.5
$D_p$	50	40	45	65	70	85	35	90	55	75

Таблица 6

	Предпоследняя цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$h_{ХП}$	7968	6187	7129	6515	7831	7441	6802	6384	7557	6270
$h_C$	345	943	304	971	156	428	881	1036	552	1294
$h_{ИЗМ}$	123	721	818	681	182	327	473	547	257	579
$h_D$	324	909	509	593	591	564	604	793	394	617
$\delta$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

### Методические указания к решению задачи 3

Коронный разряд, или корона, - это самостоятельный разряд, возникающий в резконеоднородных полях, в которых ионизационные процессы могут происходить только в узкой области вблизи электродов. К такого рода полям относится и электрическое поле проводов воздушных линий электропередачи.

Начальная напряжённость коронного разряда

$$E_{н} = 24.5m\delta \left( 1 + \frac{0.65}{(r \cdot \delta)^{0.38}} \right)$$

которая справедлива при отрицательной полярности провода, однако может использоваться и при положительной полярности, поскольку влияние полярности невелико.

При малых радиусов проводов ( $r < 1 \text{ см}$ ) можно использовать Ф. Пика

$$E_{н} = 30.3m\delta \left( 1 + \frac{0.3}{r} \right)$$

$m$  - коэффициент гладкости провода.

На линиях электропередачи применяются провода, витые из большого числа проволок. Витые провода не имеют гладкой поверхности, поэтому при одинаковых с гладкими проводами напряжениях и внешних диаметрах напряжённость электрического поля вблизи их поверхности бывает выше и корона возникает при меньшем напряжении. При определении начальной напряжённости коэффициент гладкости  $m$  учитывает форму поверхности витого провода. Для проводов различных марок коэффициент гладкости  $m = (0,82 \div 0,94)$

При коронном разряде в результате ионизации воздуха у поверхности провода образуется объёмный заряд того же знака, что и полярность напряжения на проводе.

Напряжённость поля у поверхности провода во время коронирования остаётся равной  $E_n$ . Увеличение напряжения на проводе приводит к усилению ионизационных процессов, росту объёмного заряда и снижению напряжённости до  $E_n$ . Вследствие увеличения объёмного заряда потери энергии на корону растут тем в большей степени, чем больше напряжение на проводе превосходит начальное напряжение

$$U_n = E_n \cdot r \cdot \ln \frac{2H}{r}$$

$H$  - высота одиночного провода над землёй.

Так как объёмный заряд при любой полярности провода перемещается от провода к земле, напряжённость поля у поверхности провода стремится увеличиться. Однако из-за усиления при этом ионизации воздуха объёмный заряд вблизи провода пополняется и напряжённость поля в итоге сохраняется равной  $E_n$ . Таким образом, вследствие непрерывного удаления объёмного заряда от провода коронный разряд может поддерживаться неограниченно долго.

При больших диаметрах проводов напряжённость электрического поля в окрестности провода уменьшается значительно медленнее, чем вблизи проводов малого диаметра. Поэтому зона ионизации – “чехол” короны - имеет большие размеры, и даже при начальном напряжении лавины могут достигать критической длины. Корона в этом случае возникает сразу в стримерной форме; структура зоны ионизации дискретна, светятся многочисленные стримерные каналы.

На проводах малых диаметров (до 1 см) корона возникает в лавинной форме. Зона ионизации достаточно однородна, свечение сосредоточено в узком чехле. Однако при увеличении напряжения сверх начального размеры зоны ионизации возрастут и корона из лавинной переходит в стримерную.

Ток стримерной короны состоит из отдельных импульсов с очень крутым фронтом (длительность фронта - порядка десятков наносекунд). Это высокочастотная составляющая тока корона является источником интенсивного электромагнитного излучения с широким спектром частот, которое создаёт помехи радио - телевизионному приёму. При коронировании проводов линий сверхвысокого напряжений может также возникать звуковой эффект, особенно сильный при дожде.

Объёмный заряд короны, образовавшийся в один из полупериодов переменного напряжения, за время до изменения полярности провода может переместиться на несколько десятков сантиметров. Вследствие этого объёмные заряды обоих знаков совершают возвратно-поступательное движение вблизи провода, медленно удаляясь от него в область слабого поля, и там рекомбинируют. Только незначительная часть объёмного заряда может дойти до проводов соседних фаз. Вследствие этого процессы коронирования каждой из фаз трёхфазной линии не влияют друг на друга (эффект биполярности отсутствует), и каждая фаза может рассматриваться изолированно от других.

Для того чтобы исключить потери энергии на корону, а также и радиопомехи, начальное напряжение короны должно быть не ниже наибольшего рабочего напряжения линии относительно земли. Обеспечить это соотношение

надлежащим выбором диаметра проводов можно только для условий сухой погоды. При атмосферных осадках исключить коронирование проводов невозможно.

Условие исключения короны:

$$30.3m \cdot \delta \cdot r \cdot \ln \frac{S}{r} \geq \frac{U_{ном} \sqrt{2}}{r}$$

принимая  $m = 0.8$ ;  $\delta = 1$  и  $\ln \frac{S}{r} \approx 6.2$  (характерное значение для линий 110 - 220кВ), получаем  $d \geq 0,011U_{ном}$

Для линий электропередач 110кВ наименьшие диаметры проводов, при которых исключается корона в хорошую погоду, оставляют 1,2 см.

При номинальных напряжениях 330 кВ и выше необходимы провода ещё большего диаметра, во многих случаях превышающий диаметр, выбранный из условия передачи по линии заданной мощности. В таких случаях целесообразно иметь провода, площадь поперечного сечения которых по проводящему материалу и диаметру независимы. Это так называемые расширенные провода. Они имеют диаметр, при котором обеспечивается необходимое снижение напряжённости поля на их поверхности, а для сокращения площади поперечного сечения делаются полыми или со стеклопластиковой сердцевиной.

Другое решение, получившее в настоящее время широкое распространение, было предложено ещё в 1910 г. академиком. В.Ф. Миткевичем и состоит в применении расщепленных проводов фаз. В этом случае каждая фаза линии состоит вместо одного провода большого диаметра из нескольких параллельных проводов относительно малого диаметра. В такой конструкции фазы удаётся при требуемом суммарном сечении проводов существенно уменьшить максимальную напряжённость поля на их поверхности.

При переменном напряжении корона зажигается в момент, когда напряжённость поля у провода достигнет значения  $E_n$ , и горит, пока напряжение не достигнет максимума. После этого напряжённость поля у провода становится ниже  $E_n$ , и корона потухает.

Годовые потери на корону измеряются в  $\left(\frac{\text{кВ} \cdot \text{ч}}{\text{км}}\right)$

$$A = n^2 \cdot r^2 \cdot (P_{хп} \cdot h_{хп} + P_{сс} \cdot h_{сс} + P_{и} \cdot h_{и} + P_{д} \cdot h_{д})$$

Среднегодовая мощность потерь,  $\left(\frac{\text{кВ}}{\text{км}}\right)$

$$P_{ср} = \frac{A}{8760}$$

где  $n$  - число проводов во всех трёх фазах с учётом расщепления;

$r$  - радиус провода в расщеплённой фазе;

$P$  - потери мощности при различных погодных условиях, км;

$h$  - продолжительность отдельных видов погоды, час.

Одним из способов оценки потерь энергии на корону является расчёт с использованием обобщённых характеристик потерь для разных погодных условий.

Они представлены в координатах:

$$\frac{P}{n^2 \cdot r^2} = f\left(\frac{E_{max}}{E_n}\right)$$

где  $E_n$  - начальная напряжённость поля,  $\left(\frac{\text{кВ}}{\text{см}}\right)$

$E_{max}$  - максимальная напряжённость на поверхности провода, учитывающая влияние заряда соседних проводов расщеплённой фазы,  $\left(\frac{\text{кВ}}{\text{см}}\right)$

Для расщеплённых проводов при радиусах проводов ( $r > 1\text{см}$ ) начальная напряжённость поля определяется по формуле:

$$E_n = 24.5m\delta \left(1 + \frac{0.65}{(r - 1) \cdot 0.38}\right)$$

Максимальная напряженность

$$E_{max} = k_y \cdot E_{cp}$$

где  $k_y$  - коэффициент, учитывающий усиление напряжённости поля вследствие влияния зарядов на соседних проводах расщеплённой фазы,

$$k_y = 1 + (n-1)$$

В этих формулах:

$E_{cp}$  - средняя рабочая напряжённость электрического поля на поверхности проводов расщеплённой фазы, (—)

$$E_{cp} = \frac{U_{cp}}{n \cdot r \cdot \ln \frac{S}{r_{\text{экв}}}}$$

$U_{cp}$  - фазное напряжение провода, кВ;

$r$  - радиус провода расщеплённой фазы, см;

$r_p$  - радиус расщепления, см,

$r_{\text{э}}$  - эквивалентный радиус расщеплённой фазы, см

$$r_{\text{экв}} = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot r_p^{n-1}}$$

$S$  - среднегеометрическое расстояние между фазами, м. Для горизонтального расположения фаз с расстоянием между фазами  $a$ , величина  $S = 1.26 \cdot a$

При расчете номинальных напряжённостей электрического поля на поверхности проводов для различных погодных условий принимают следующие значения коэффициента гладкости проводов  $m$  и относительной влажности воздуха  $\delta$ :

Таблица 7

Погодные условия	гладкости проводов $m$	относительной влажности воздуха $\delta$
При хорошей погоде	0,8	1
При сухом снеге	0,57-0.73	1,06
При изморози, инее, гололеде	0,6	1,05
При дожде и мокром снеге	0,57-0.73	0,93

Экономически приемлемые потери на корону имеют место при  $\frac{E_{max}}{E_H} \leq 0.9$

Приложение 1

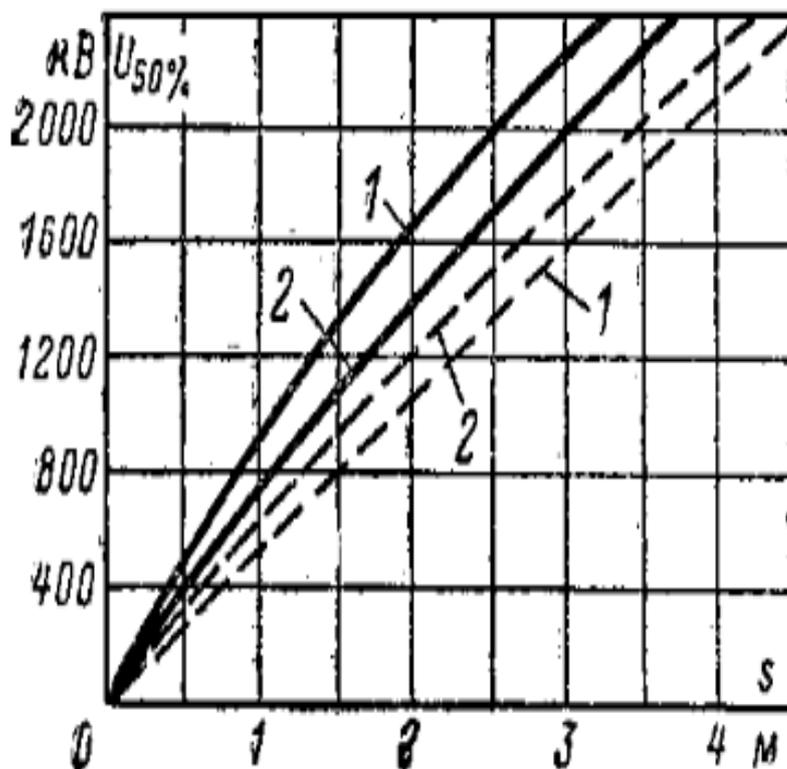


Рис. 1. Минимальные импульсные разрядные напряжения типовых воздушных промежутков. Сплошные линии - отрицательная полярность; пунктир - положительная полярность; 1 - промежутки стержень-плоскость и провод-плоскость; 2 - промежуток стержень-стержень

Приложение 2

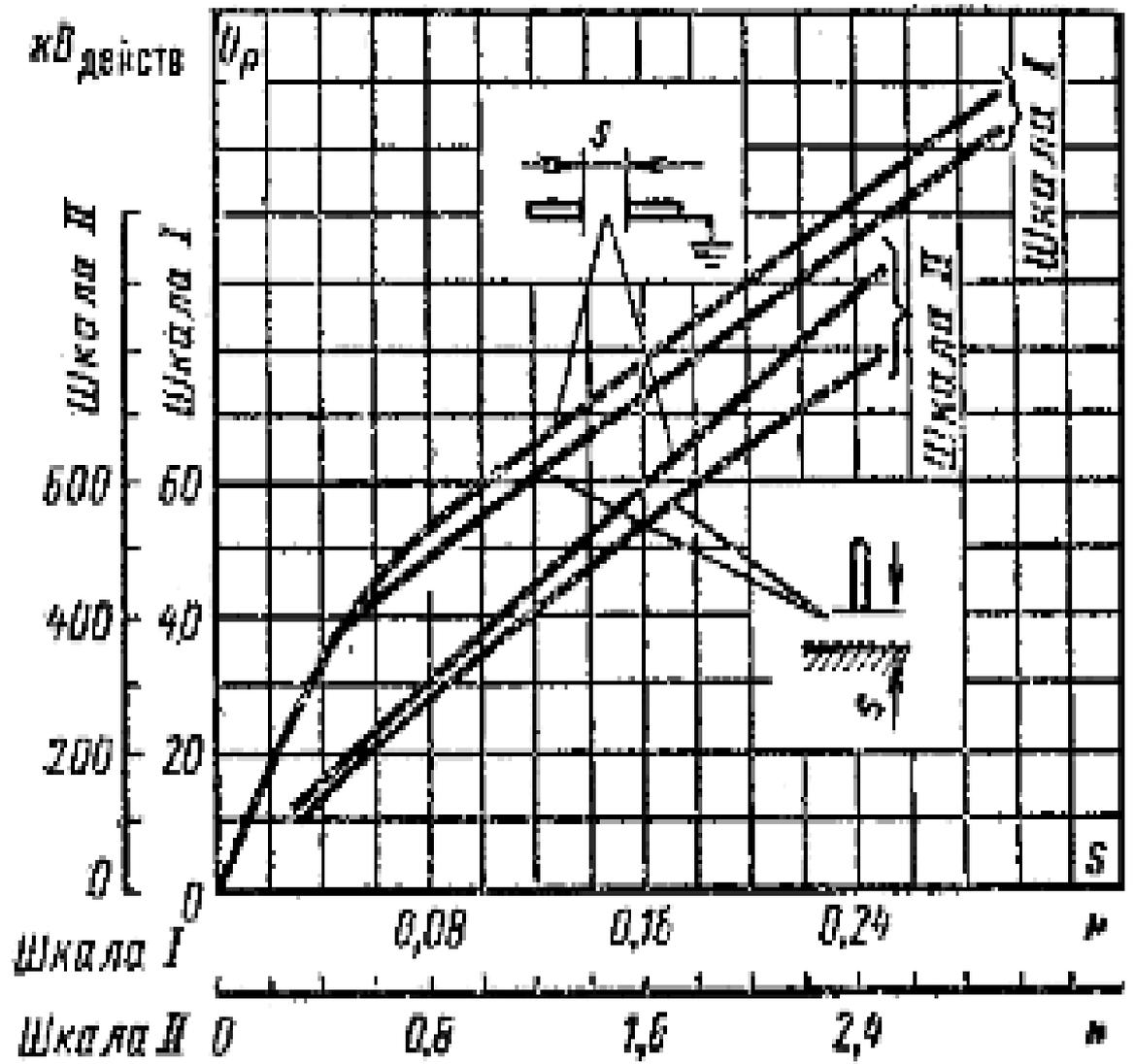


Рис. 2. Разрядные напряжения для воздушных промежутков стержень - стержень и стержень - плоскость при 50 Гц

Приложение 3

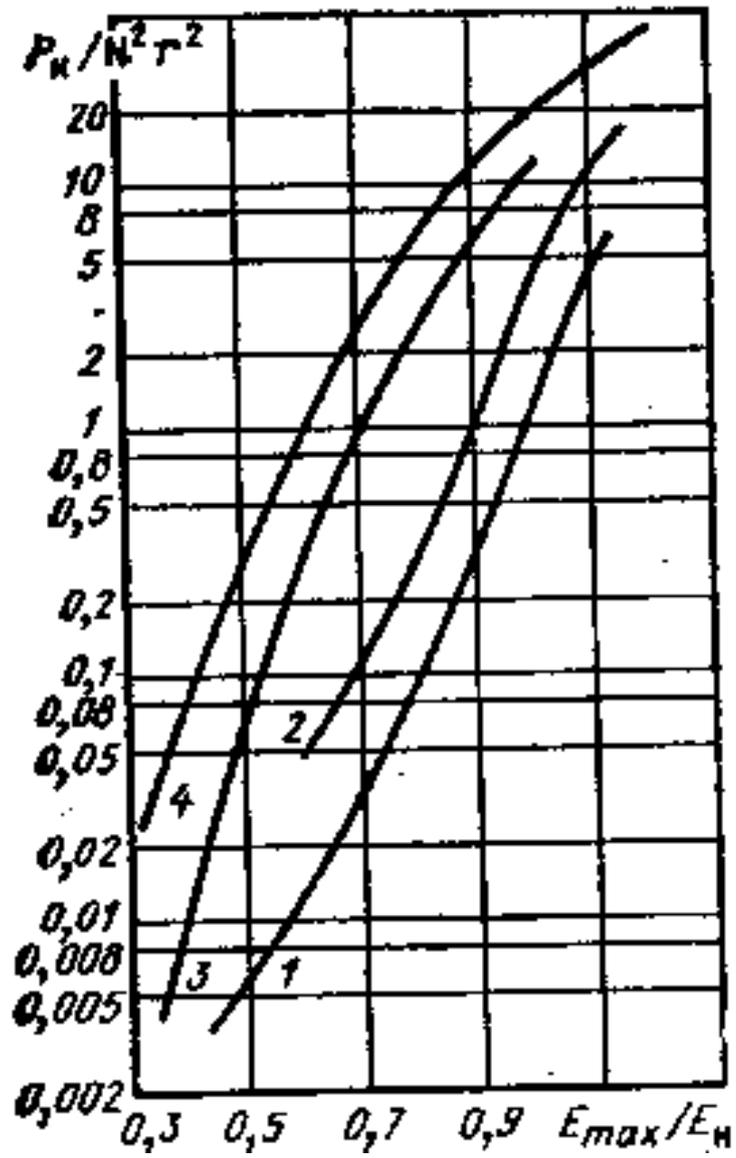


Рис. 3. Обобщенные характеристики потерь мощности на корону 1 – хорошая погода, 2 – снег, 3 – дождь, 4 - изморозь

## Расчетно-графическая работа №2

### Задача 1

В трехфазной системе с изолированной нейтралью произошло короткое замыкание одной фазы на землю.

Известно: номинальное напряжение сети  $U_n$ , сечение проводов  $S$  (провод круглого сечения), средняя высота подвеса проводов над землей  $h$ , длина 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.

Исходные данные приведены в табл. 8.

Таблица 8- Параметры линии электропередачи

Номер варианта	Последняя цифра		Предпоследняя цифра	
	$h$ м	$S$ мм <sup>2</sup>	$l$ км	$U_n$ 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 1

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

$$I_3 = 3\omega C_0 l U_\Phi$$

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

$$C_0 = 2\pi\epsilon_0 / (\ln(2h/r))$$

где  $h$  - высота провода над землей;

$r$  - радиус провода;

$\epsilon_0$  - 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. 4).

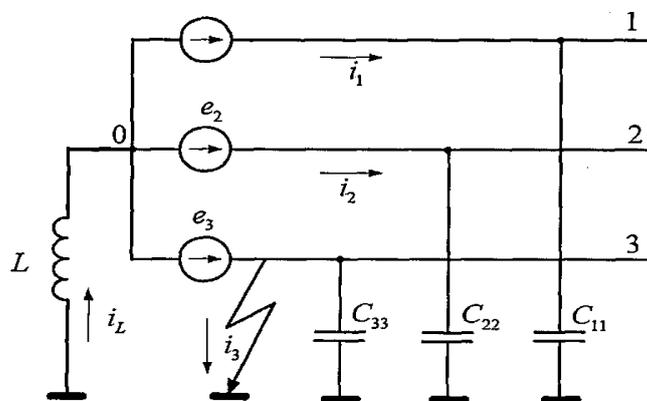


Рис. 4 Схема трехфазной системы с дугогасящим реактором

На рис. 1 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. 5) видно, что ток замыкания на землю определяется суммой двух емкостных токов, сдвинутых по фазе на  $60^\circ$ . 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  $180^\circ$  относительно тока,

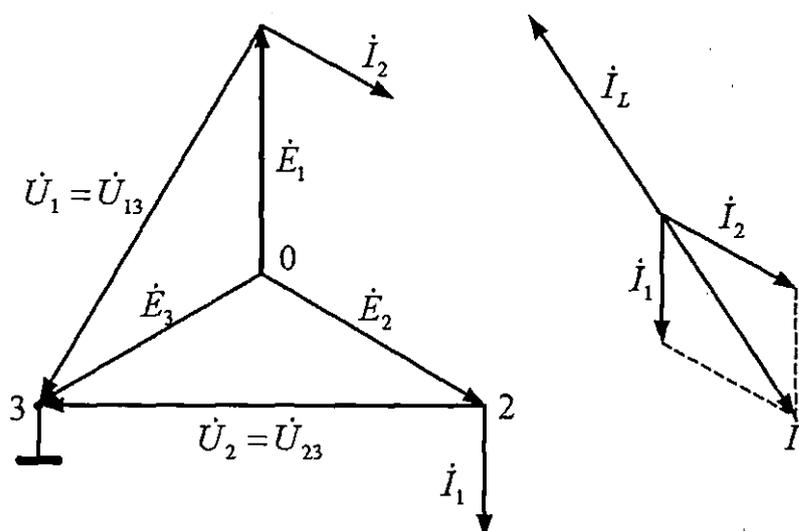


Рис. 5. Векторная диаграмма напряжений и токов

протекающего в месте замыкания на землю. Такой индуктивностью и является дугогасящая катушка.

Если будет иметь место равенство

$$I_3 = I_L$$

тогда

$$3\omega C_{11} U_{10} = \frac{U_{10}}{\omega L}$$

где  $C_{11}$  - частичная емкость исправного (первого) провода;

$U_{10}$  - фазное напряжение;

$L$  - индуктивность дугогасящей катушки.

Таким образом, условие идеальной настройки катушки будет

$$\omega L = \frac{1}{3\omega C_{11}}$$

## Задача 2

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.

Исходные данные указаны в табл. 9.

Таблица 9 - Параметры разряда молнии и телеграфной линии

Вариант	Предпоследняя цифра			Последняя цифра	
	$U_H$ 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 2

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

$$U_u = k_u \frac{h_{cp}}{a} I_M$$

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

$$h_{cp} = h - \frac{2}{3}f$$

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 3

Для защиты здания подстанции (шириной  $a$ , длиной  $b$  и высотой  $h$ ) от прямых ударов молнии установлен одиночный стержневой молниеотвод (рис. 3). 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  $\kappa_{\phi} = 1,7$ ; удельное сопротивление грунта  $\rho$  ток молнии  $I$ , кА.

Требуется определить:

1. 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  $U_{sh}$  между точками на поверхности земли, удаленными на расстояние  $x$  и  $(x + a_{sh})$  от молниеотвода, где  $a_{sh}$  - ширина шага, равная 0,8 м.

Исходные данные указаны в табл.10

Таблица 10 - Параметры защищаемого объекта и разряда молнии

Вариант	Последняя цифра			Предпоследняя цифра		
	$I_M$ кА	$\rho$ 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 3

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  $R_{\phi}$  определяется как

$$R_{\phi} = \frac{1,7\rho}{2\pi h_{\phi}} \ln \frac{4h_{\phi}}{a_{\phi}}$$

где  $h_{\phi}$  - глубина нижнего конца фундамента от поверхности земли;  
 $a_{\phi}$  - 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

$$R_u = \alpha_u R_{50}$$

где  $R_{50}$  - стационарное сопротивление растеканию при токе промышленной частоты;

$\alpha_u$  - импульсный коэффициент, зависящий от величины удельного сопротивления грунта и тока молнии (рис. 6).

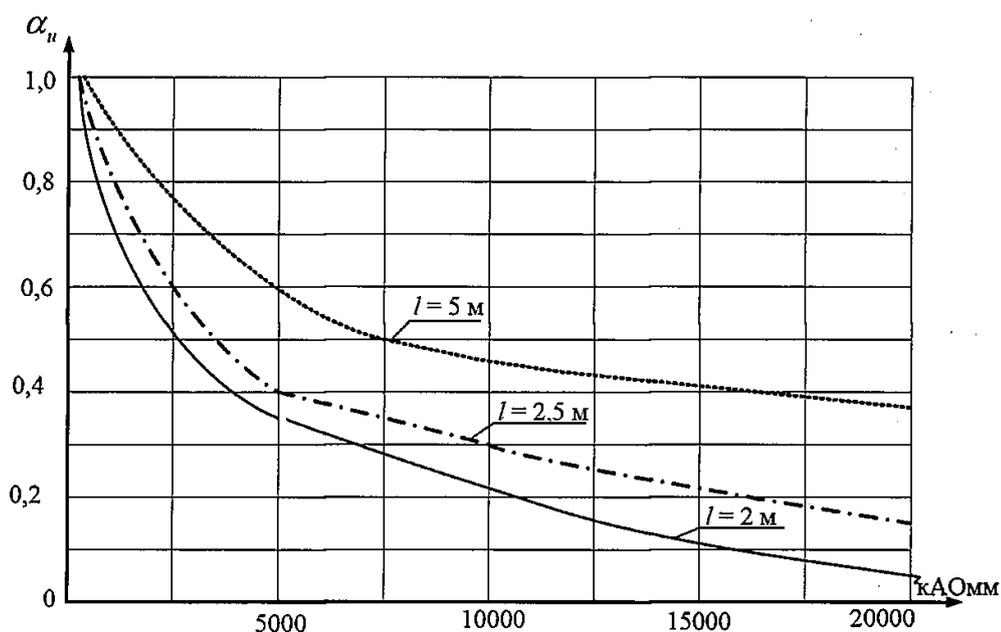


Рис. 6. График зависимости импульсных коэффициентов  $\alpha_u$  вертикальных заземлителей различной длины от величины  $I_M \rho$

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

$$R_{50} = \frac{R_1 R_2}{\eta_{и} R_2 + \eta_{и} n R_1} \cdot \frac{1}{\eta_{и}}$$

где  $R_{B0}$  - стационарное сопротивление вертикального электрода;

$R_0$  - стационарное сопротивление горизонтального электрода,

$n$  - число вертикальных электродов;

$\eta_{и}$  - импульсный коэффициент использования, учитывающий взаимное влияние всех электродов.

В качестве одиночных заземлителей обычно выбираются трубы, полосовая или угольная 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. 11.

Таблица 11 - Расчетные формулы для вычисления стационарных сопротивлений

Заземлитель	Укладка	Сечение	
		Круглое	Прямоугольное
Горизонтальный	$t \neq 0$	$R_0 = \rho / (2\pi l) * \ln(l^2/dt)$	$R_0 = \rho / (2\pi l) * \ln(l^2/tb)$
	$t = 0$	$R_0 = \rho / (2\pi l) * \ln(l/dt)$	$R_0 = \rho / (\pi l) * \ln(4l/b)$
Вертикальный	$t \neq 0$	$R_{в0} = \rho / (2\pi l) * [\ln(2l/0.95b) + 0.5 * \ln((4t+1)/(4t-1))]$	—
	$t = 0$	$R_{в0} = \rho / (2\pi l) * \ln(4l/t)$	—

Примечание:  $\rho$  - 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  $\eta_{и}$  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  $R_{и}$  рассчитывается по формуле

$$R_{и} = \alpha_{и} R_{50},$$

при этом допускается пользоваться графиком рис. 3.

Минимальное расстояние от молниеотвода до защищаемого объекта высотой  $h$  будет равно

$$l_{min} = 0.3R_{и} + 0.1h$$

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. 7). Радиус зоны защиты на высоте  $h$  равен

$$r_x = \sqrt{(l_{min} + a)^2 + (b/2)^2},$$

где  $a$  и  $b$  — соответственно ширина и длина защищаемого объекта.

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

$$r_x = \frac{1.6}{1 + \frac{h}{H}} (H - h)$$

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

Отсюда формула для расчета высоты молниеотвода будет иметь вид

$$H = \frac{r_x + 1.6h}{2 \cdot 1.6} + \sqrt{\left(\frac{r_x + 1.6h}{2 \cdot 1.6}\right)^2 + \frac{r_x h}{1.6}}$$

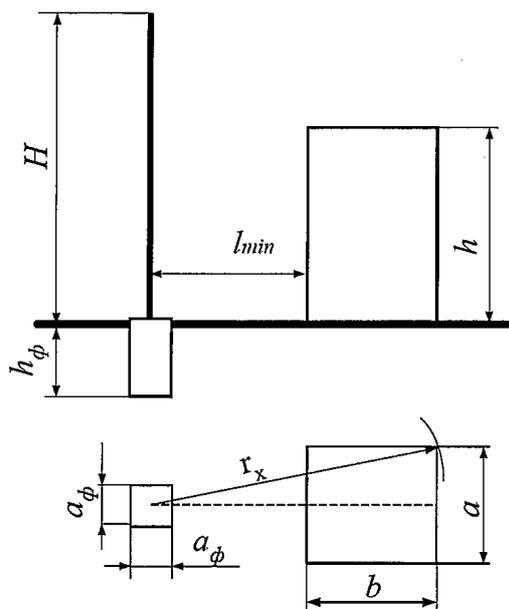


Рис.7 Схема расположения молниеотвода и защищаемого объекта

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

$$\varphi_x = I \int_x^{\infty} dR_u = I\rho / (2\pi x)$$

Тогда шаговое напряжение может быть определено из выражения

$$U_{ш} = \varphi_x - \varphi_{x+a}$$

подставляя значения потенциала, получим окончательную формулу для расчета шагового напряжения

$$U_{ш} = (I\rho a) / (2\pi x(x+a))$$

#### Задача 4

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 приходящей волны определяется уравнением

$$u_0 = U(e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2})$$

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  $\tau_f$  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.

Исходные данные приведены в табл. 12, вольтамперная характеристика вентильного разрядника задана в табл. 13.

Таблица 12 -Параметры волны перенапряжения и высоковольтного оборудования

Вариант	Последняя цифра				Предпоследняя цифра	
	$Z_1$ 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

Таблица 13 - Вольтамперная характеристика вентильного разрядника

<b>I<sub>р</sub></b> кА	0,2	0,3	0,4	0,6	1,0	2,0	3,0	5,0	10
<b>U<sub>р</sub></b> кВ	44	50	54	60	72	86	88	94	98

#### Методические указания к решению задачи 4

Вентильные разрядники устанавливаются для защиты оборудования и устройств 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. 8 а) после срабатывания разрядника будет иметь вид, представленный на рис. 8 б.

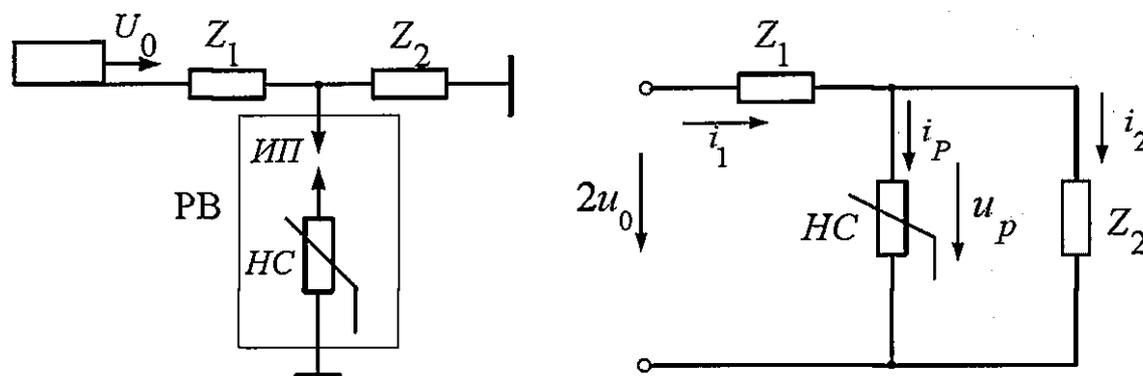


Рис. 8 (а,б) Схема замещения до и после срабатывания разрядника

Уравнение по второму закону Кирхгофа имеет вид (рис. 5 б)

$$2u_0 = i_1 z_1 + u_p$$

После преобразований получается расчетное уравнение

$$(2Z_2 / (Z_1 + Z_2)) u_0 = u_p + i_p (Z_1 Z_2) / (Z_1 + Z_2),$$

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

$$ku_0 = u_p + i_p z_{ab}$$

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

На рис. 9 показан пример графического решения уравнения  $ku_0 = u_p + i_p z_{ab}$ .

Для этого в осях координат  $u, t$  (справа от оси  $u$ ) строится график  $ku_0(t)$  и откладывается импульсное пробивное напряжение разрядника  $U_{имп}$ . 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  $u = U_{имп}$  определяет время начала работы разрядника и соответствует решению расчетного уравнения  $ku_0 = u_p + i_p z_{ab}$ .

Падение напряжения на разряднике в любой момент времени после срабатывания определяется, как показано на рис. 9.

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

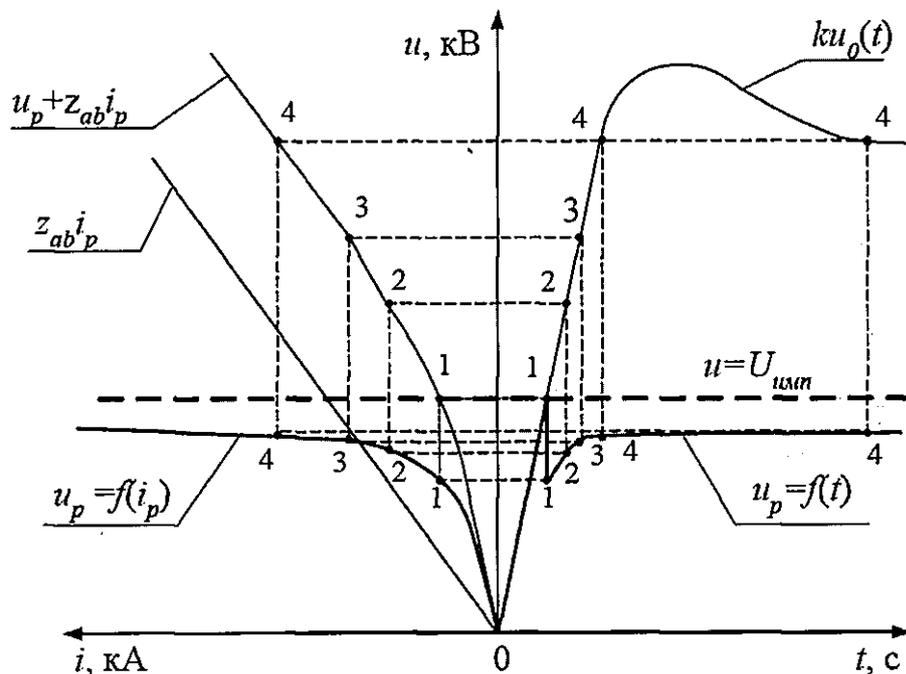


Рис.9 Построение вольт-секундной характеристики разрядника

Определение времени фронта  $\tau_f$  и времени импульса  $\tau_{имп}$  падающей волны перенапряжений следует производить на отдельном чертеже.

Пример построения графика импульса  $u_0 = f(t)$  показан на рис. 10

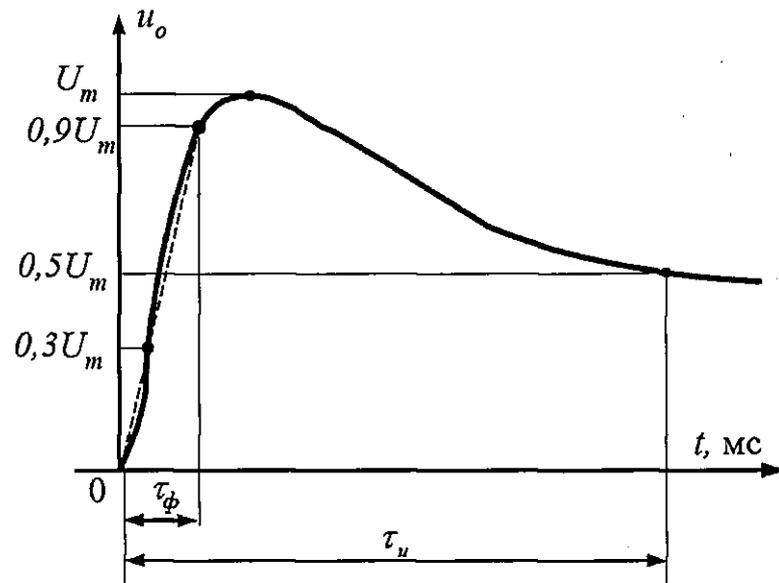


Рис.10 Форма импульса волны перенапряжения

## *Литература*

1. Быстрицкий Г.Ф. Основы энергетики. – М.: КноРус, 2013. – 278 с. ил.
2. Герасименко А.А. Передача и распределение электрической энергии. – М.: КноРус, 2015. – 724 с. ил.
3. Кудрин Б.И. Электроснабжение. – М.: Академия, 2013. – 672 с. ил.
4. Кудрин Б.И. Электроснабжение. – М.: Академия, 2013. – 672 с. ил.
5. Шаров Ю.В. Электроэнергетика. – М.: Инфра-М, 2015. – 384 с. ил.
6. Кудинов А.А. Тепловые электрические станции. Схемы и оборудование: Учебное пособие. – М.: Инфра-М, 2015. – 376 с. ил.
7. Грунтович Н.В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования. – М.: Инфра-М, 2013. – 271 с. ил.
8. Анчарова Т.В. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений: Учебник. – М.: Инфра-М, 2015. – 416 с. ил.
9. Сибикин Ю.Д. Технология энергоснабжения: Учебник – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Форум, 2015. – 352 с. ил.
10. Сибикин Ю.Д. Электрические подстанции. – М.: РадиоСофт, 2014. – 141 с. ил.
11. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии/ под ред. В.В. Денисова. – М.: Феникс, 2015. – 382 с. ил.
12. Шабад В.К. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах. – М.: Академия, 2013. – 193 с. ил.
13. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. – М.: КноРус, 2015. – 240 с. ил.
14. Важов В.Ф. Техника высоких напряжений: Учебник. – М.: Инфра-М, 2015. – 264 с. ил.
15. Ушаков В.Я. Электроэнергетические системы и сети. – М.: Юрайт, 2015. – 446 с. ил.
16. Климова Г.Н. Электроэнергетические системы и сети. Энергосбережение. 2-е изд. – М.: Юрайт, 2015. – 179 с. ил.
17. Бачаров Ю.Н. Техника высоких напряжений. – М.: Юрайт, 2015. – 264 с. ил.
18. Хрущев Ю.В. Электроэнергетические системы и сети. Электрические переходные процессы. – М.: Юрайт, 2015. – 153 с. ил.
19. Исмагилов Ф.Р. Основные вопросы проектирования воздушных линий электропередач: Учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2015. – 211 с. ил.
20. Фролов Ю.М., Шелякин В.П. Основы электроснабжения. – СПб.: Лань, 2013. – 432 с. ил.
21. Почаевец В.С. Электрические подстанции: Учебник. – М.: Маршрут, 2012. – 492 с. ил.