

**Типовой расчет по дисциплине «Техника высоких напряжений»**  
**«ЗАЩИТА ОТКРЫТОГО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА (ОРУ)**  
**ПОДСТАНЦИИ»**

**1. ЗАДАНИЕ НА РАСЧЕТ**

1.1. Определить параметры изолирующих подвесок для промежуточных опор воздушных линий (ВЛ), подходящих к ОРУ, и для порталов ОРУ. Расчеты выполнить для обоих классов напряжения. Определить импульсные напряжения перекрытия изоляционных конструкций для каждого расчетного случая.

1.2. Определить параметры контура заземления подстанции (длину и число вертикальных электродов, шаг сетки), обеспечивающие допустимую величину его стационарного сопротивления заземления.

1.3. Построить зависимость импульсного сопротивления контура заземления подстанции от тока молнии.

1.4. Рассчитать зависимость максимального напряжения на силовом автотрансформаторе от крутизны фронта набегающей волны, определить длину опасной зоны и защищенного подхода. Определить ожидаемое число повреждений изоляции оборудования на подстанции (ОРУ-1 и ОРУ-2, рис. 1) от ударов молнии в ЛЭП в пределах защищенного подхода.

1.5. Расставить на территории ОРУ молниеотводы для защиты электрооборудования от прямых ударов молнии, определив их минимально необходимое число и высоту.

1.6. Определить число повреждений в год изоляции электрооборудования ОРУ от прямых ударов молнии в молниеотводы и прорывов молнии в зону защиты.

1.7. Определить показатель грозоупорности подстанции.

1.8. Предложить методы повышения грозоупорности подстанции.

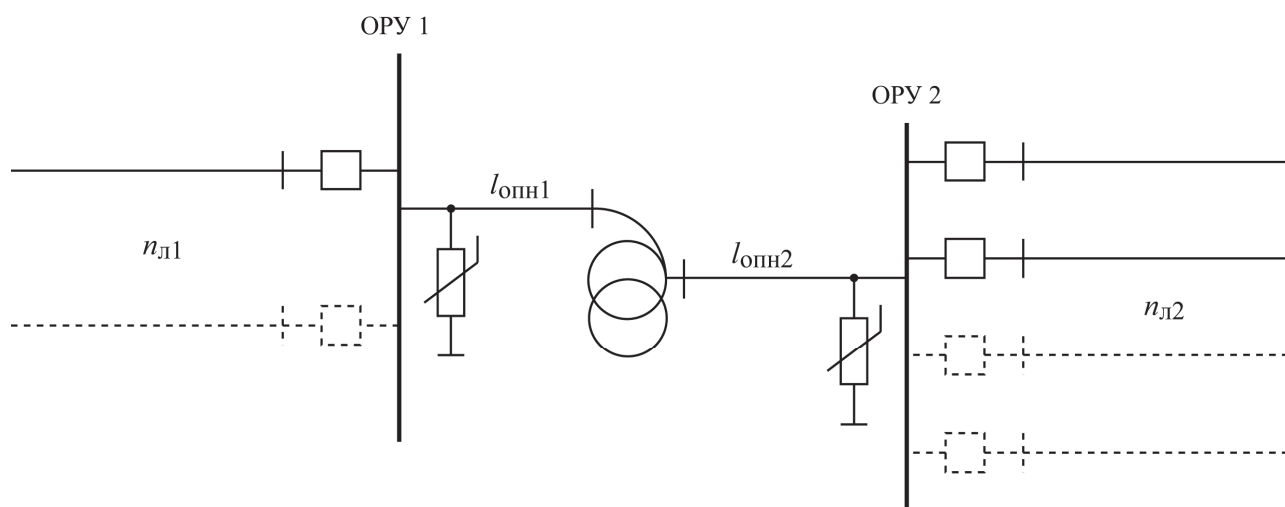


Рис. 1. Упрощенная схема подстанции

## 2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Исходные данные к типовому расчету сведены в таблицы 1 и 2.

Таблица 1

Исходные данные к типовому расчету

№ варианта	$U_{ном1}$ , кВ	$U_{ном2}$ , кВ	СЗА	$F_{мех1}$ , кН	$F_{мех2}$ , кН	$\rho$ , Ом·м	$D$ , ч/год	$a$ , м	$b$ , м	$l_{опн1}$ , м	$l_{опн2}$ , м	$n_{вл1}$	$n_{вл2}$	$k_1$	$k_2$
1	220	110	IV	80	50	70	55	50	80	40	20	1	2	2,75	3,2
2	330	110	II	110	60	90	40	70	90	35	25	1	3	2,8	3,0
3	330	150	III	130	80	110	50	60	80	30	30	1	4	2,5	3,0
4	330	220	I	90	80	70	40	60	90	20	40	2	3	2,6	2,8
5	500	110	II	180	60	60	40	70	80	15	45	1	4	2,5	3,5
6	500	220	I	200	100	120	40	70	90	40	20	1	3	2,75	2,9
7	500	330	II	150	90	90	35	70	100	35	25	2	3	3,0	3,0
8	750	220	II	220	90	120	30	80	100	30	30	1	4	2,8	2,9
9	750	330	I	250	130	90	50	80	120	20	40	2	4	2,8	2,8
10	750	500	I	200	150	110	60	90	120	15	45	2	3	2,5	2,8
11	220	110	II	90	60	50	30	50	60	40	20	1	3	3,0	3,2
12	330	110	I	130	80	140	55	50	70	35	25	1	4	2,5	3,3
13	330	150	II	90	50	130	35	50	80	30	30	2	4	2,4	2,7
14	330	220	III	110	90	120	30	50	90	20	40	2	4	2,6	2,6
15	500	110	I	200	80	130	25	60	100	15	45	1	4	2,9	3,2
16	500	220	II	150	80	90	20	70	100	40	20	1	3	2,8	2,9
17	500	330	I	180	110	110	30	70	110	35	25	2	3	2,7	2,75
18	750	220	I	250	100	110	45	70	120	30	30	1	3	2,9	3,0
19	750	330	I	200	90	100	50	90	100	20	40	2	4	2,9	3,0
20	750	500	II	220	180	80	45	100	120	15	45	1	2	2,5	2,8
21	220	110	III	100	80	70	30	50	70	40	20	2	4	2,9	3,6
22	330	110	I	90	50	100	55	50	80	35	25	1	4	2,5	3,4
23	330	150	III	110	60	70	45	50	100	30	30	1	4	2,8	3,0
24	330	220	II	130	100	130	50	60	100	20	40	2	4	2,6	2,8
25	500	110	II	150	50	150	40	60	120	15	45	1	4	2,6	3,0
26	500	220	I	180	90	50	35	60	80	40	20	1	3	2,7	2,8
27	500	330	II	200	180	100	45	60	110	35	25	2	4	2,8	2,9
28	750	220	I	200	80	60	50	70	120	30	30	1	3	2,5	2,9
29	750	330	II	200	90	130	55	80	120	20	40	1	2	2,6	2,7
30	750	500	I	220	180	80	40	80	120	15	45	2	3	2,5	2,7

$U_{ном1}$  и  $U_{ном2}$  – номинальные напряжения ОРУ 1 и ОРУ 2 соответственно;

СЗА – степень загрязнения в районе расположения подстанции и воздушных линий;

$F_{мех1}$  и  $F_{мех2}$  – механические нагрузки на гирлянды изоляторов классов напряжения  $U_{ном1}$  и  $U_{ном2}$  соответственно;

$\rho$  – расчетное удельное сопротивление грунта в районе расположения подстанции;

$D$  – число грозových часов в году в районе прохождения линии и расположения подстанции;

$a$  и  $b$  – габариты подстанции;

$l_{опн1}$  и  $l_{опн2}$  – расстояния от защищаемого объекта до ОПН в ОРУ 1 и ОРУ 2 соответственно;

$n_{вл1}$  и  $n_{вл2}$  – число воздушных линий электропередачи, подходящих к ОРУ 1 и ОРУ 2;

$k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты, равные максимально возможному отношению внутренних индуктивных сопротивлений сети по нулевой и прямой последовательности ( $x_0/x_1$ ) при однофазном КЗ на шинах ОРУ.

Исходные данные, зависящие от класса напряжения

$U_{\text{ном}}$ , кВ	110	150	220	330	500	750
$Z_c$ , Ом	420	400	370	330	300	280
$l_{\text{пр}}$ , м	200	225	250	300	350	400
$h_x$ , м	12	14	17	20	24	30
$C_{\text{тр}}$ , пФ	1600	1800	2000	3000	4200	4600
$U_{\text{исп.пги}}$ , кВ	480	550	750	950	1300	1800

$Z_c$  – волновое сопротивление воздушной линии и ошиновки ОРУ;

$l_{\text{пр}}$  – длина пролета воздушных линий;

$h_x$  – высота портала ОРУ;

$C_{\text{тр}}$  – входная емкость защищаемого оборудования (силового автотрансформатора);

$U_{\text{исп.пги}}$  – нормированные значения испытательного напряжения полного грозового импульса для силовых трансформаторов и автотрансформаторов.

### 3. УКАЗАНИЯ К ТИПОВОМУ РАСЧЕТУ

#### 3.1 Пункт 1 типового расчета

Для ВЛ и ОРУ большего класса напряжения применить гирлянды стеклянных подвесных изоляторов, для ВЛ и ОРУ меньшего класса напряжения – длинностержневые полимерные изоляторы.

Изоляторы выбираются из таблиц 3 и 5 в соответствии с требованиями п. 7-9, 11 [4.7]. Пояснения к таблице 3 даны в таблице 4.

Удельная нормированная длина пути утечки выбирается в соответствии с таблицей 19 [4.7].

Наибольшее рабочее напряжение сети определяется по таблице 4.1 [4.8].

Класс изолятора выбирается по заданной механической нагрузке.

Конфигурация изолятора выбирается в соответствии с п. 11.15 [4.7]<sup>1</sup>.

Высота расположения подстанции и воздушных линий над уровнем моря – меньше 1000 м.

Для расчета 50%-ных импульсных разрядных напряжений гирлянд тарельчатых изоляторов воспользоваться следующей формулой:

$$U_{50\%} = E_{\text{ср.р}} H_{\text{изл}} n_{\text{г}}, \text{ кВ}$$

где  $E_{\text{ср.р}}$  – средняя разрядная напряженность, которую в расчетах следует принимать равной  $E_{\text{ср.р}} = 5$  кВ/см;  $H_{\text{изл}}$  – строительная высота одного изолятора, см;  $n_{\text{г}}$  – число изоляторов в гирлянде.

<sup>1</sup> Наличие в районе размещения подстанции засоленных почв, промышленных загрязнений или ее близость к морю — по указанию преподавателя.

Для полимерных изоляторов 50%-ные разрядные напряжения указаны в таблице 5, поэтому рассчитывать их не нужно.

Таблица 3 – Характеристики стеклянных подвесных линейных изоляторов

Тип изолятора	Механическая разрушающая сила (класс изолятора), кН, не менее	Диаметр тарелки, мм	Строительная высота, мм	Длина пути утечки, мм
ПС 70Е	70	255	127; 146	320
ПС 70И		255	146	407
ПСВ 70А		280	146	445
ПСД 70Е		270	127; 146	411
ПСС 70А		310	127; 170	310
ПС 80А	80	255	140	320
ПС 120Б	120	255	127; 146; 170	320
ПС 120В		255	146	407
ПСВ 120Б		280	127; 146	445
U 120ВР1		320	146	555
ПСС 120Б		330	127; 146	330
ПС 160Д	160	280	146; 170	385
ПС160К		280	170	460
ПСВ 160А		320	146; 170	545
ПСД 160А		350	146	440
ПС 190А	190	280	170; 190	428
ПСВ 190А		340	196	617
ПС 210В	210	280	170; 190	380
ПС 210Д		280	170	482
ПСВ 210А		330	170; 195	555
ПСК 210А		410	155	410
ПСС 210Б		410	156	410
ПС 240А	240	280	170; 190	428
ПСВ 240А		340	170; 195	617
ПС 300Б	300	320	195	385
ПС 300В		320	195	390
ПС 300Г		320	195	485
ПСВ 300А		360	195	617
ПСК 300А		450	180	460
ПСК 300К		450	175	457

Таблица 4 – Аббревиатуры конфигурации изоляционной детали

Аббревиатура	Расшифровка
ПС	подвесной стеклянный нормального исполнения
<b>Специальные исполнения</b>	
ПСВ (ВР)	подвесной стеклянный с увеличенным вылетом ребра
ПСД	подвесной стеклянный двукрылый
ПСС	подвесной стеклянный сферический
ПСК	подвесной стеклянный конусный

Таблица 5 – Характеристики полимерных линейных подвесных стержневых изоляторов

Тип изолятора <sup>2</sup>	Ном. напр., кВ	Механическая разрушающая сила, кН, не менее	Строительная высота, мм	Высота изоляционной части, мм	Длина пути утечки, мм	$U_{50\%}$ , кВ	
ЛК-70/110-2	110	70	1203	1015	2700	630	
ЛК-70/110-3					3140		
ЛК-70/110-4			1333	1145	3545	700	
ЛК-120/110-2		120	120	1316	1085	2790	630
ЛК-120/110-3						3340	630
ЛК-120/110-4				1446	1215	3745	700
ЛК-120/110-4				1252	1021	3850	550
ЛК-160/110-4				160	1273	1021	3850
ЛК-70/150-2	150	70	1525	1330	3480	885	
ЛК-70/150-3			1525	1330	4080	885	
ЛК-70/150-4			1675	1480	4520	885	
ЛК-120/150-2		120	1555	1330	3480	885	
ЛК-120/150-3			1555	1330	4080	885	
ЛК-120/150-4			1705	1480	4520	885	
ЛК-70/220-2	220	70	2143	1955	5200	960	
ЛК-70/220-3			2048	1676	5770	920	
ЛК-70/220-4			2308	1936	6580	1050	
ЛК-120/220-3		120	2096	1755	5770	980	
ЛК-120/220-4			2226	1854	6170	1050	
ЛК-120/220-4			2097	1866	7100	950	
ЛК-160/220-3			160	2117	1755	5770	980
ЛК-160/220-4			160	2118	1866	7100	950
ЛК-120/330-3	330	120	3136	2590	9000	1470	
ЛК-120/330-4			3461	2884	10015	1540	
ЛК-120/330-4			3657	3426	13150	1540	
ЛК-160/330-3		160	3157	2590	9000	1470	
ЛК-160/330-4			3482	2915	10015	1540	
ЛК-210/330-3		210	3505	3231	10500	1540	
ЛК-210/330-4			3536	3231	13500	1540	
ЛК-300/330-3		300	3555	3231	10500	1540	
ЛК-300/330-4			3586	3231	13500	1540	
ЛК-120/500-4	500	120	4762	4531	17400	1740	
ЛК-160/500-3		160	4457	3890	13150	1740	
ЛК-160/500-4		160	4795	4531	17400	1740	
ЛК-210/500-3		210	4836	4531	14700	1740	
ЛК-210/500-4		210	4836	4531	18200	1740	
ЛК-300/500-3		300	4886	4531	14700	1740	
ЛК-300/500-4		300	4886	4531	18200	1740	
ЛК-160/750-4	750	160	8162	7595	24700	2700	
ЛК-210/750-4		210	6851	6546	27000	2700	
ЛК-300/750-4		300	6901				

<sup>2</sup> Эквивалентный диаметр любого полимерного изолятора из таблицы 5 менее 300 мм.

3.2. Шаг сетки и длину вертикальных стержней контура заземления подстанции принимать в диапазоне  $3 \div 10$  м. Для расчета воспользоваться рекомендациями § 21.3 учебника [4.1]. Необходимо подобрать такие параметры, чтобы стационарное сопротивление контура заземления не превышало 0,5 Ом. При невозможности выполнения этого условия предложить мероприятия, направленные на снижение стационарного сопротивления до требуемого уровня.

3.3. Расчет импульсного сопротивления контура заземления выполнить для диапазона значений тока молнии  $I_m$  от 1 до 150 кА. Для расчета импульсного сопротивления воспользоваться рекомендациями § 21.3 учебника [4.1].

3.4. Из справочника [4.4] необходимо выбрать типы опор, марки проводов и молние-защитных тросов для воздушных линий обоих классов напряжения.

Расчет критической крутизны фронта набегающей волны выполнить для случая, когда ОПН установлен до защищаемого оборудования (силового трансформатора или автотрансформатора) по ходу движения волны. Для расчета максимального значения напряжения на трансформаторе воспользоваться схемой замещения рис. 2 (см. также стр. 244, [4.2]).

При расчете погонных параметров  $L'$  и  $C'$  ошиновки между ОПН и трансформатором принять, что скорость распространения волны по ошиновке –  $v = 300$  м/мкс.

Для схемы рис. 2 расчетная зависимость отношения максимального напряжения на изоляции трансформатора к остающемуся напряжению ОПН  $U_{ост}$  приведена на рис. 3, где пунктирной линией показана кривая максимальных значений, а сплошной – огибающая максимальных значений, которую и следует использовать в расчетах.

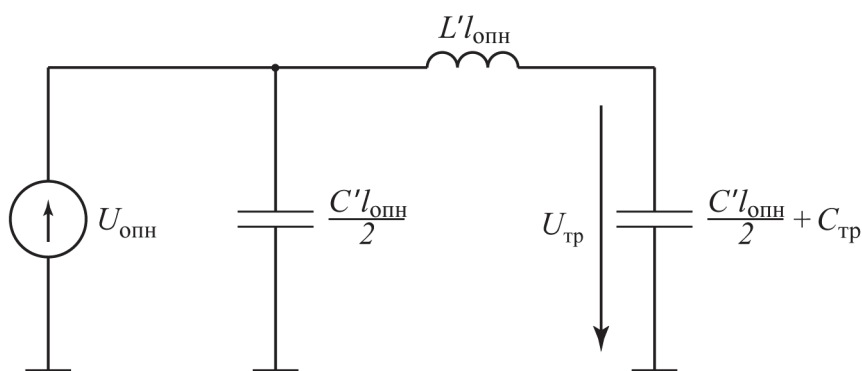


Рис. 2. Схема замещения для расчета напряжения на трансформаторе

$U_{опн}$  – напряжение на ОПН;  $L'$  и  $C'$  – погонные индуктивность и емкость ошиновки;  $l_{опн}$  – длина ошиновки между ОПН и автотрансформатором;  $C_{тр}$  – входная емкость трансформатора

ОПН следует выбирать по наибольшему длительно допустимому рабочему напряжению аппарата  $U_{нр}$ . Оно должно быть как минимум на 2% выше наибольшего рабочего фазного напряжения сети  $U_{нрс,ф}$ . Характеристики ОПН 110–750 кВ приведены в таблице 6. Остающееся напряжение ОПН  $U_{ост}$  выбирается по току координации, который следует принять равным 5 кА для ПС 110–220 кВ и 10 кА – для ПС 330–750 кВ.

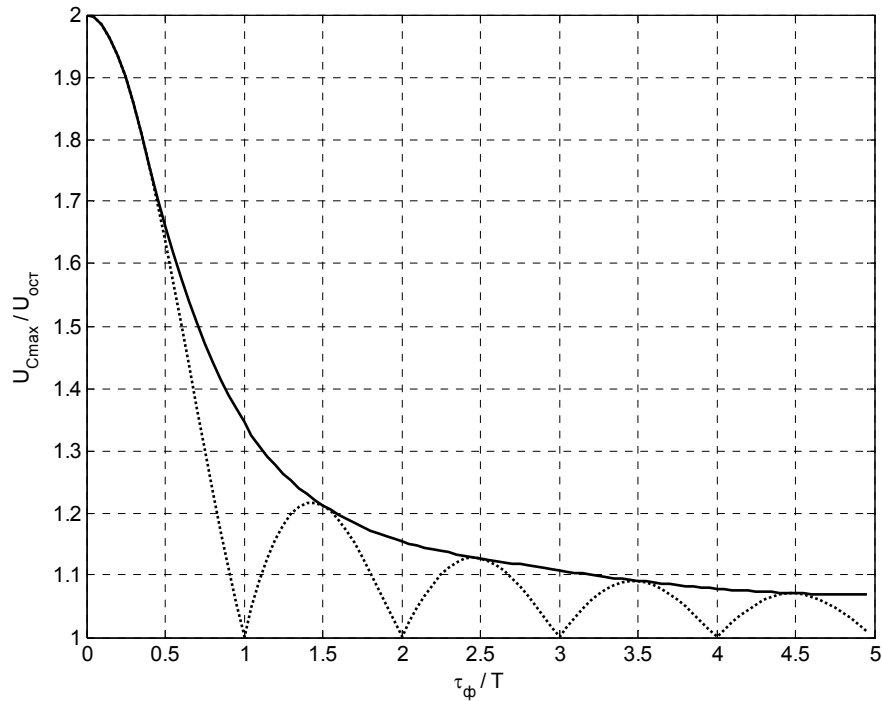


Рис. 3. Зависимость максимального напряжения на емкости в схеме рис. 2 от отношения  $\tau_\phi/T$  при импульсе с косоугольным фронтом

Выбранный ОПН нужно проверить по условию обеспечения термической устойчивости аппарата при однофазных коротких замыканиях на шинах. Для этого  $U_{нр}$  должно удовлетворять следующему условию:

$$U_{нр} \geq \frac{1}{K_t} \sqrt{(U_{нрс,ф} + 0,5\Delta U)^2 + \frac{3}{4}\Delta U^2}$$

где  $K_t = \frac{U_{доп}(t)}{U_{нр}}$  – коэффициент, определяемый

по зависимости «напряжение–время» (рис. 4) для случая с предварительным нагружением нормируемым импульсом энергии;  $U_{доп}(t)$  – допустимое напряжение ОПН в течение времени  $t$  (для проверки ОПН по условиям работы при квазистационарных перенапряжениях, вызванных однофазными короткими замыканиями на землю, время  $t$  принимают равным времени срабатывания последней ступени релейной защиты  $t_{рз}$ ; в расчетах принять  $t_{рз} = 1с$ );

$\Delta U$  – приращение напряжения на здоровых фазах, определяемое по сопротивлениям системы по прямой и нулевой последовательностям (соответственно  $x_1$  и  $x_0$ ):

$$\Delta U = U_{нрс,ф} \frac{k-1}{k+2}, \text{ где } k = \frac{x_0}{x_1}.$$

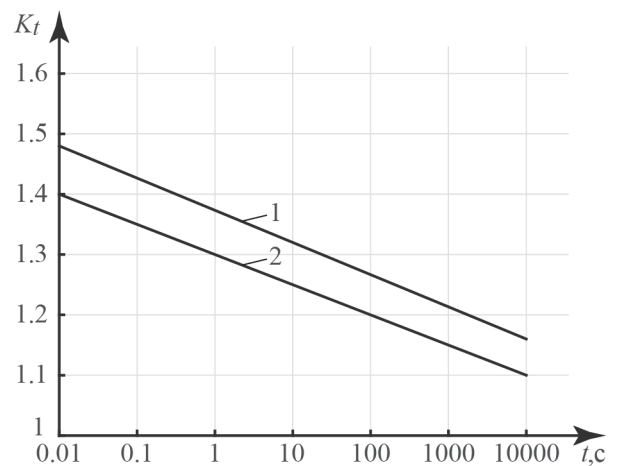


Рис. 4. Характеристики «напряжение–время»  
1 – без предварительного нагружения  
2 – с предварительным нагружением

Таблица 6 – Электрические характеристики ОПН

Тип ОПН	$U_{нр}$ , кВ	Остающиеся напряжения $U_{ост}$ [кВ] при максимальных значениях импульсных токов 8/20 мкс			
		5 кА	10 кА	20 кА	40 кА
ОПН-П-110/56/10/680	56	164	179	201	–
ОПН-П-110/77/10/680	77	225	246	276	–
ОПН-П-110/84/10/680	84	246	269	302	–
ОПН-П-110/88/10/680	88	257	282	316	–
ОПН-П-150/110/10/680	110	322	352	395	–
ОПН-П-150/120/10/680	120	351	384	431	–
ОПН-П-220/154/10/680	154	450	493	553	–
ОПН-П-220/163/10/680	163	477	522	585	–
ОПН-П-220/176/10/680	176	515	563	632	–
ОПН-П-330/210/20/1450	210	–	609	671	739
ОПН-П-330/230/10/1000	230	670	736	810	–
ОПН-П-330/230/20/1450	230	–	667	735	809
ОПН-П-500/303/20/1800	303	–	879	966	1080
ОПН-П-500/318/20/1450	318	–	922	1020	1120
ОПН-П-500/318/20/2100	318	–	922	999	1100
ОПН-П-500/333/20/1450	333	–	966	1070	1170
ОПН-П-750/455/20/2100	455	–	1320	1430	1560
ОПН-П-750/465/20/2100	465	–	1350	1460	1610
ОПН-П-750/475/20/2100	475	–	1380	1490	1640

После расчета критических крутиз  $U'_{кр}$  волн напряжения, набегающих по линиям на ОРУ-1 и ОРУ-2, их необходимо скорректировать в соответствии с числом  $n$  ВЛ, подключенных к ОРУ:

$$U'_{кр}(n) = K_n U'_{кр}$$

Значения коэффициента  $K_n$  принять в соответствии с таблицей 7.

Таблица 7 – Поправочные коэффициенты  $K_n$  на число отходящих ВЛ

$n$	1	2	3	4
$K_n$	1,0	2,0	4,0	8,0



Для полученных значений критических крутизн волн напряжения  $U'_{кр}(n)$  рассчитать длины опасных зон, а затем с учетом длины пролета определить длины защищенных тросами подходов  $l_{зп1}$  и  $l_{зп2}$  (см. стр. 205, [4.3]).

Значение импульсного сопротивления заземлителя опоры ВЛ (необходимо при расчете вероятности перекрытия гирлянды изоляторов в случае удара молнии в вершину опоры) принимается *по указанию преподавателя*.

3.5. При расчете зон защиты молниеотводов использовать рекомендации РД 34.21.122-87 «Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений». Высоту вершины молниеприемника принять равной  $h = h_x + (10 \div 18)$  м, где  $h_x$  – высота порталов ОРУ большего класса напряжения  $U_{ном1}$  (табл. 2).

3.6. При расчете кривой опасных параметров использовать импульсную прочность изоляционных подвесок  $U_{50\%}$ , примененных в ОРУ меньшего класса напряжения  $U_{ном2}$ . Следует также учесть зависимость импульсного сопротивления контура заземления от тока молнии  $I_m$ , которая была получена в п. 1.3. Для расчета вероятности обратных перекрытий воспользоваться методом трапеций или другим методом численного интегрирования.

3.7. Среднее число лет безаварийной работы подстанции определяется по формуле:

$$M = \frac{1}{\beta_1 + \beta_2 + \beta_{3,1} + \beta_{3,2}},$$

где  $\beta_1$  – среднее число перекрытий изоляции подстанции из-за прорывов молнии в зону защиты молниеотвода (из п. 1.6);  $\beta_2$  – среднее число перекрытий изоляции подстанции при ударах молнии в молниеотводы (из п. 1.6);  $\beta_{3,1}$  и  $\beta_{3,2}$  – средние числа перекрытий изоляции подстанции вследствие набегания по линиям опасных волн напряжения на ОРУ-1 и ОРУ-2, соответственно (из п. 1.4).

3.8. В п. 1.8 требуется привести не общие слова и цитаты из литературы, а действенные методы повышения грозоупорности подстанции, основанные на результатах выполненного типового расчета, для чего необходимо проанализировать полученные результаты и выявить наиболее влияющие на показатель грозоупорности величины.

#### 4. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

4.1 В.В. Базуткин, В.П. Ларионов, Ю.С. Пинталь. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах // М.: Энергоатомиздат, 1986.

4.2 Техника высоких напряжений. Учебник для студентов электротехнических и электроэнергетических специальностей вузов / под общей ред. Д.В. Разевига. Изд. 2-е, перераб. и доп. // М.: Энергия, 1976.

4.3 Лабораторные работы по технике высоких напряжений / М.А. Аронов и др. // М.: Энергоатомиздат, 1982.

4.4 Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / под ред. И.А. Баумштейна, С.А. Бажанова. 3-е изд., перераб. и доп. // М.: Энергоатомиздат, 1989.

4.5 РД 34.21.122-87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений // Минэнерго СССР, 1987.

4.6 РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозных и внутренних перенапряжений // РАО «ЕЭС России», 1999.

4.7 СТО 56947007-29.240.059-2010. Инструкция по выбору изоляции электроустановок // ОАО «ФСК ЕЭС», 2010.

4.8 ГОСТ Р 55195-2012. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции // М.: Стандартинформ, 2014.