

Рассматриваемые задачи на практике

Расчёт годового числа грозových отключений воздушной линии электропередачи

Расчёт изоляции линии

Расчёт потерь на местную корону

Расчет тока однофазного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью

Расчет количества электронов в лавине

Расчёт годового числа грозовых отключений воздушной линии электропередачи

Линия характеризуется номинальным напряжением $U_{НОМ}$, типом, высотой $h_{ОП}$ и сопротивлением заземления $R_{И}$ опор, защитным углом α , числом тросов n .

- Грозовые отключения воздушных линий с тросами могут происходить по следующим причинам:
- Удар молнии в трос в середине пролёта и перекрытие воздушного промежутка трос-провод;
- Прорыв молнии через тросовую защиту, т.е. поражение провода;
- Удар молнии в опору и обратное перекрытие изоляции с опоры на провод.

- Для оценки грозоупорности воздушных линий электропередачи различного номинального напряжения и технического исполнения введено понятие удельного числа отключений линии длиной 100 км за 100 грозových часов в году.

Удельное число отключений линий с тросами вычисляется по формуле

$$n_{откл} = 4 \cdot h_{TP} \left\{ P_{\alpha} \cdot P_{ПР} \cdot \eta_1 + (1 - P_{\alpha}) \cdot \left[\frac{4 \cdot h_{ОП}}{l_{ПР}} \cdot P_{ОП} \cdot \eta_1 + \left(1 - \frac{4 \cdot h_{ОП}}{l_{ПР}} \right) \cdot P_{TP} \cdot \eta_2 \right] \right\}$$

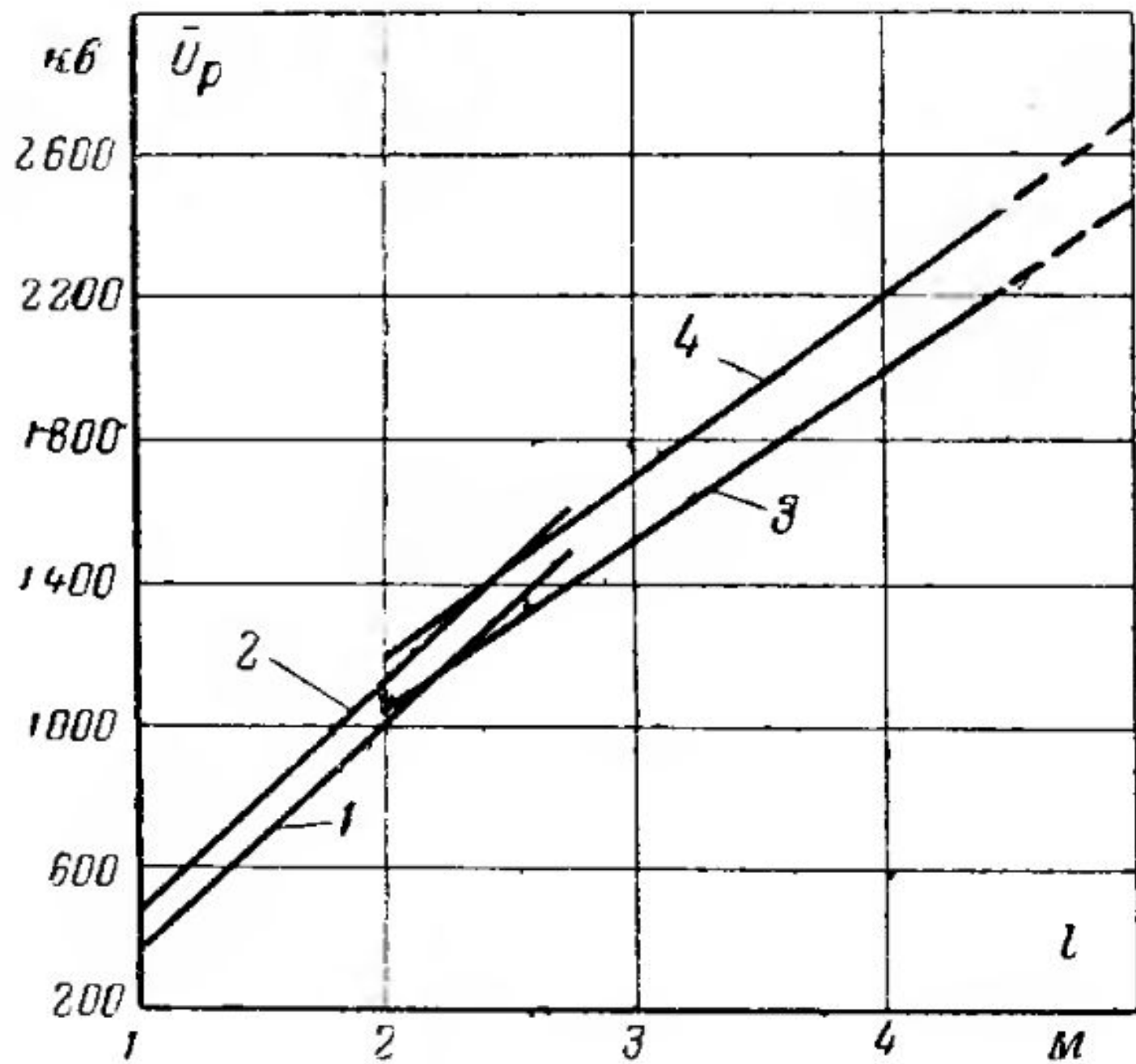
Вероятность прорыва молнии через тросовую защиту:

$$P_{\alpha} = 10^{\frac{\alpha \cdot \sqrt{h_{\text{ОП}}}}{90} - 4}$$

При ударе молнии в один из проводов на соседней фазе наводится потенциал и её перекрытие произойдёт, если критический ток

$$I_{KP} \geq \frac{2 \cdot U_{50\%}}{Z}$$

Импульсное напряжение гирлянды изоляторов



Вероятность появления тока величиной тока критического или большего, при котором изоляция перекрывается (вероятность перекрытия изоляции на опоре при ударе молнии в провод), определяется как:

$$P_{I_{KP}} = P_{ПП} = e^{-0,04 \cdot I_{KP}}$$

Вероятность пробоя промежутка трос – провод при ударе молнии в трос в середине пролёта оценивается по формуле

$$P_{TP} = e^{-0.08 \cdot a}$$

Вероятность перекрытия изоляции при ударе в опору

$$P_{\text{ОП}} = e^{-0.04 \cdot I_{\text{КР}}}$$

$$I_{\text{КР}} = \frac{U_{50\%}}{R_u + \delta \cdot h_{\text{ОП}}}$$

Вероятность образования устойчивой дуги при перекрытии изоляции опоры, для линий до 220 кВ

$$\eta_1 = 0.7.$$

Вероятность образования устойчивой дуги
при пробое воздушной
изоляции в пролёте:

$$\eta_2 = (1,6 \cdot E_{CP} - 6) \cdot 10^{-2}$$



Расчет изоляции линии

Условие задачи

- Рассчитать изоляцию линии 330 кВ на железобетонной опоре с оттяжками. Предполагается применить гирлянды изоляторов П-8,5. Район загрязнения – первый. Высота трассы до 1000 м над уровнем моря.

Необходимо определить расчетное
значение коммутационных
перенапряжений

$$U_k = k \cdot U_\phi$$

$$U_k = k \cdot U_\phi$$

Необходимо определить среднее
микрократное напряжение гирлянды

$$U_k = k \cdot U_\phi$$

$$U_k = k \cdot U_\phi$$

Значения коэффициентов

$$U_K = k \cdot U_\Phi$$

$$U_K = k \cdot U_\Phi$$

Uн, кВ	110-154	220-330	500	750 и выше
k_τ	1,15	1,1	1,05	1

$$U_{\mathbf{k}} = k \cdot U_{\phi}$$

$$U_k = k \cdot U_{\phi}$$

По значению $U_{\text{мр}}$ определяем
необходимое число изоляторов

$$U_k = k \cdot U_{\phi}$$

Основные характеристики линейных изоляторов

Характеристика изолятора	Тип изолятора	Высота h , см	Диаметр D , см	Эффективная длина пути утечки $l_{\text{ут. действ.}}$ см	Мокрораз- рядный градиент в гирлянде $E_{\text{мр}}$ кв _{макс} /см
Фарфоровый для районов полевого загрязнения	П-4,5	17	27	25	} 2,95
	П-7	18,5	30	30	
	П-8,5	20,3	32	34	
	П-11	21,5	35	34	
То же с уменьшенной строительной высотой	ПМ-4,5	14	27	25	} 3,50
	ПМ-8,5	18,5	31,5	34,5	
Стекланный для полевого загрязнения	ПС-4,5	13	25,5	25	} 3,70
	ПС-8,5	15	29	28	
То же для линий 750 кв	ЛС-30	21,5	32	37	2,8
Фарфоровый усовершенствованный для районов полевого загрязнения	ПФЕ-4,5	14	27	28	3,70
	ПФЕ-11	18,3	32	34	3,50
	ПФЕ-16	19,4	35	38	3,30
Стекланный для загрязняемых районов	ПСГ-4,5	13	25,5	29	4,0
Фарфоровый для загрязняемых районов	НЗ-6	21,4	30	35	—
Стержневой фарфоровый	СП- $\frac{110}{4,5}$	127	7,5	185	3,60

Для учета возможности образования в поддерживающей гирлянде дефектных (нулевых) изоляторов вычисленное значение n увеличивается на один элемент для линий 35-330 кВ и на два элемента для линий 500-750 кВ

Найденное полное число изоляторов в гирлянде N проверяют на длину пути утечки при рабочем напряжении.

$$U_k = k \cdot U_\phi$$

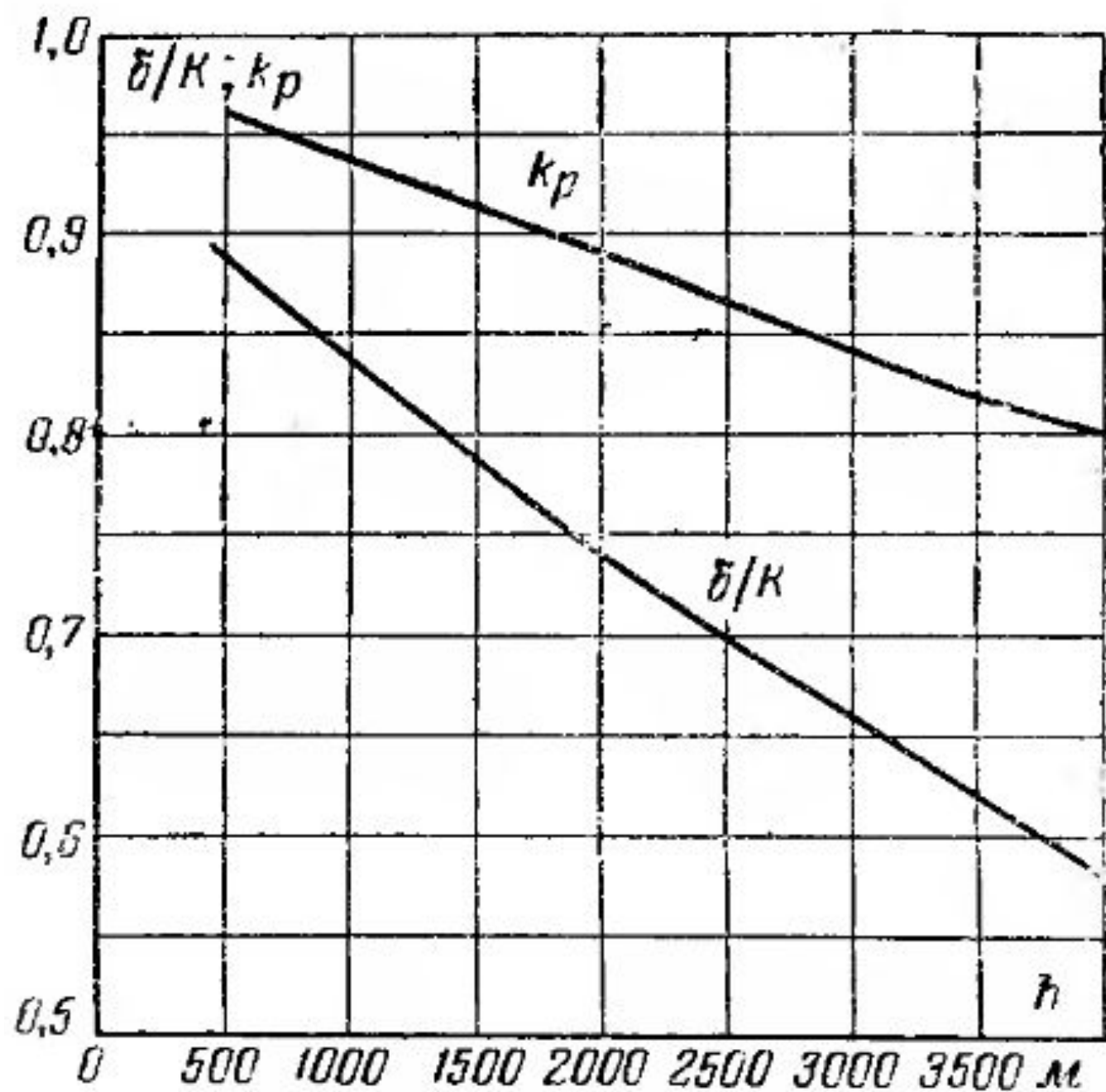
**Допустимая удельная длина пути утечки изоляторов по отношению
к наибольшему рабочему фазному напряжению**

Степень загрязнения	Характеристика района загрязнения	$\lambda_{ут}$, см/кВ действ			
		Линейная изоляция		Подстанционная изоляция	
		Сеть с эффективно заземленной нейтралью	Сеть с изолированной нейтралью	Сеть с эффективно заземленной нейтралью	Сеть с изолированной нейтралью
I	Особо чистые районы; полевое загрязнение (сельские, лесистые и горные местности при отсутствии солончаков, промышленное загрязнение отсутствует)	2,1	2,1	—	—
II	Слабое промышленное загрязнение (слабопроводящие промышленные загрязнения, характерные для городов и окраин больших промышленных районов)	2,25	2,95	2,6	2,95
III	Сильное промышленное загрязнение (районы с большой плотностью промышленных предприятий, дающих большое количество уносов), не содержащее солевых уносов	3,9	4,5	3,9	4,5
IV	Очень интенсивное промышленное загрязнение (зоны, непосредственно прилегающие к крупным тепловым электростанциям, химическим, металлургическим заводам), не содержащее солевой пыли	5,2	6,0	—	—

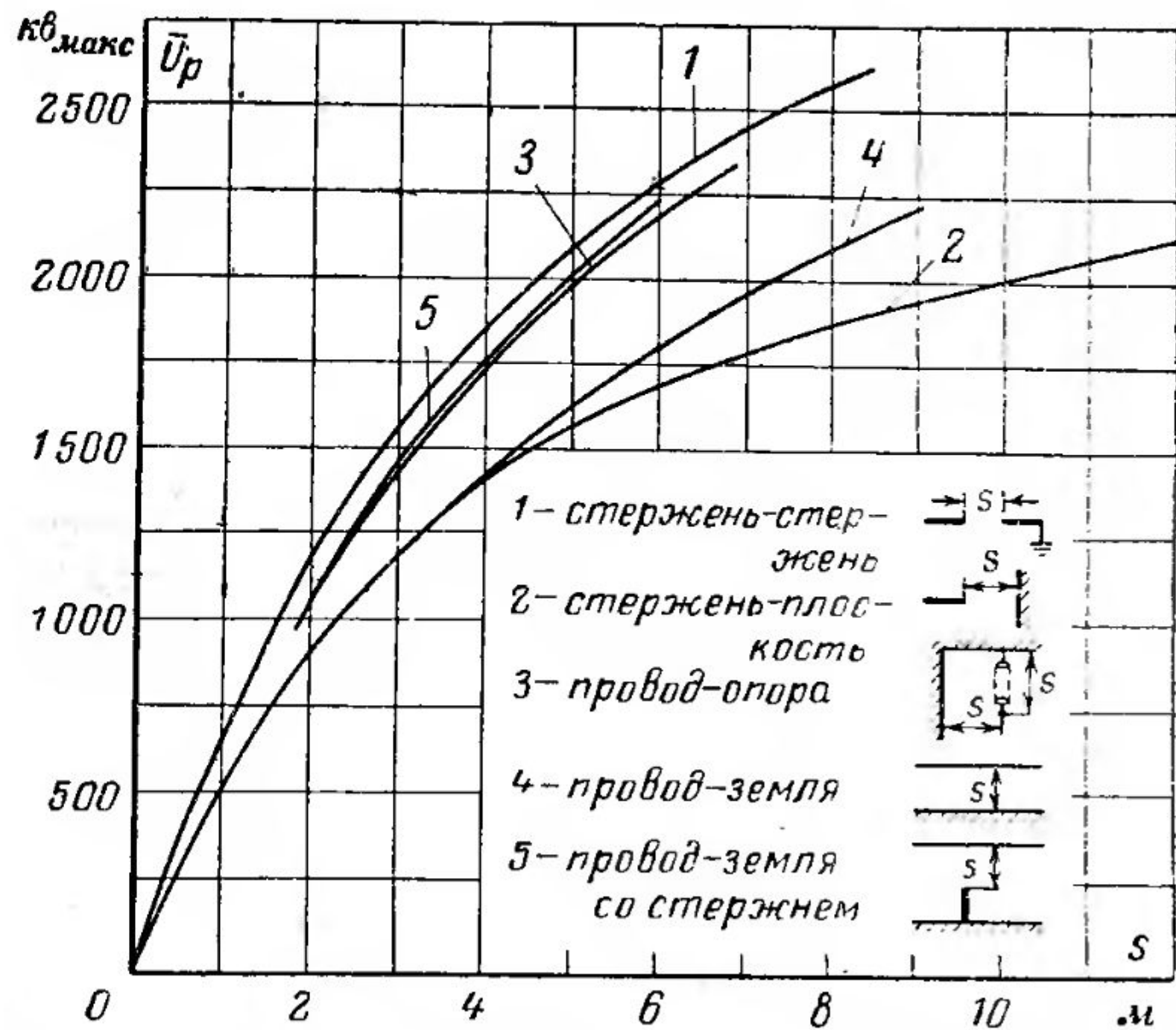
Необходимо определить расчетные значения разрядных напряжений, необходимых для определения промежутков s_1 и s_{1k}

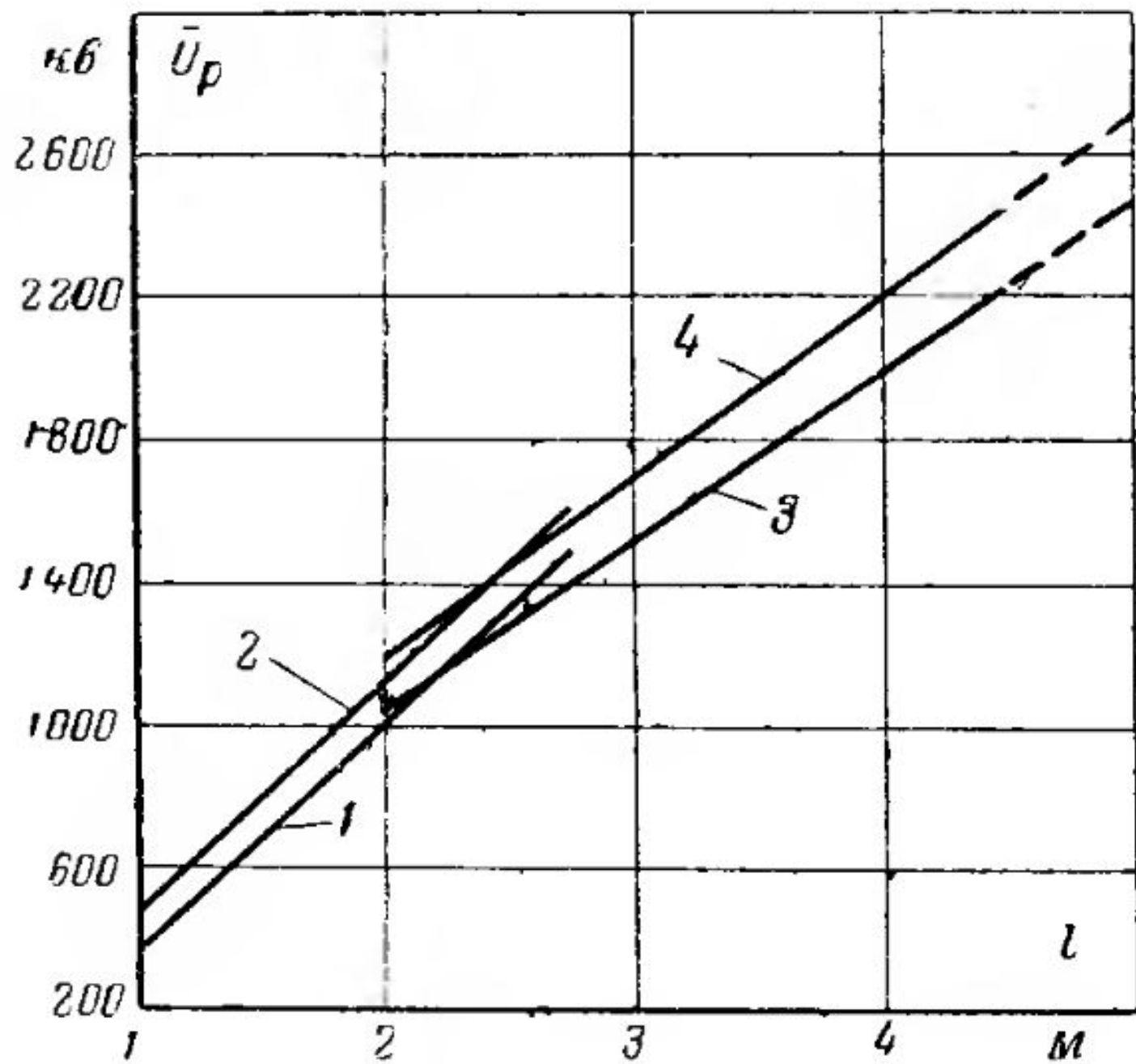
$$U_k = k \cdot U_\phi$$

$$U_k = k \cdot U_\phi$$



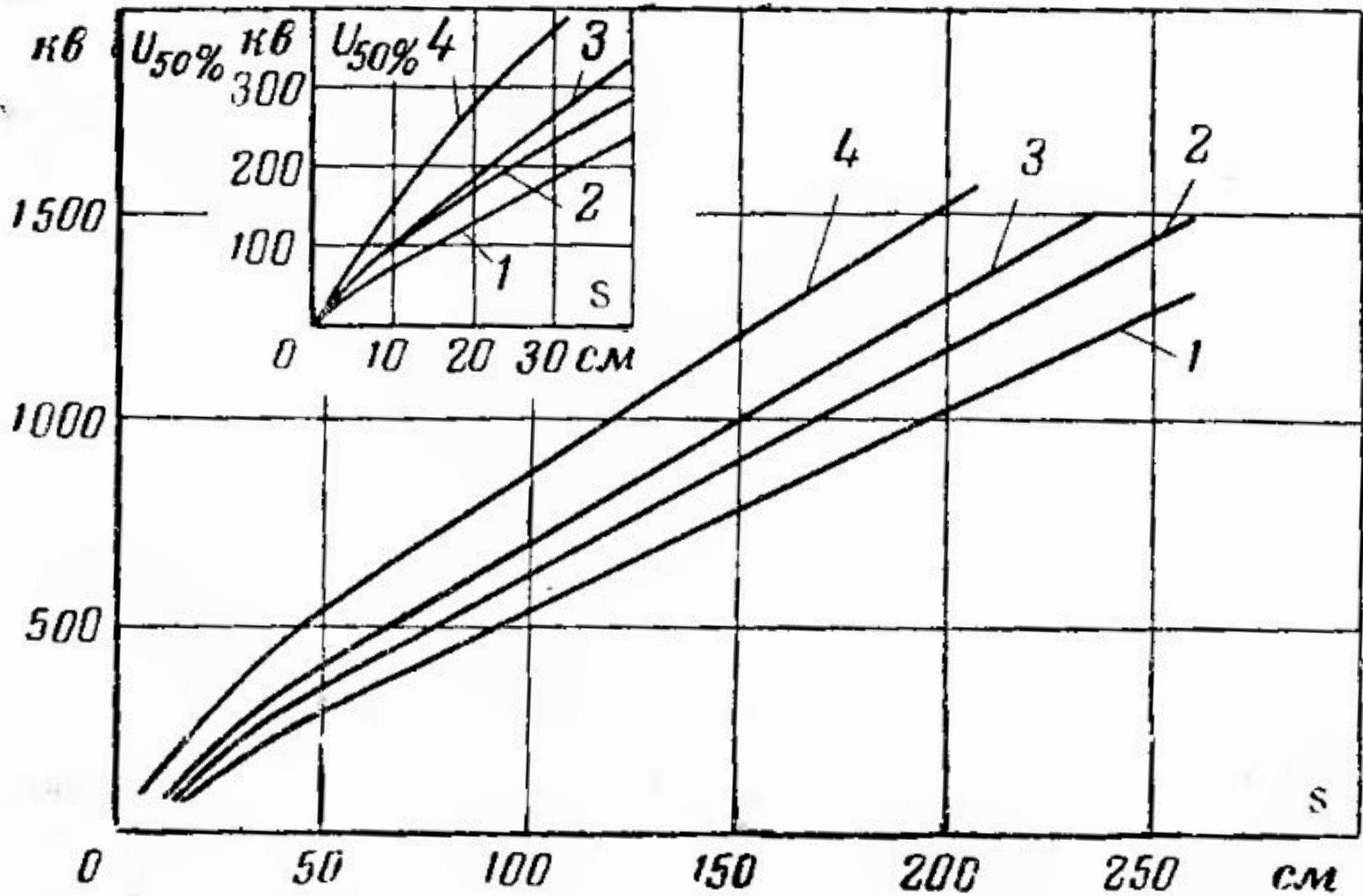
Кривые средних разрядных напряжений воздушных промежутков на линиях





50%-ные значения минимально-
импульсных разрядных напряжений
стержневых промежутков
при волне 1,5/40 мксек

- 1-стержень-плоскость при положительной полярности стержня
- 2-стержень-стержень при положительной полярности незаземленного стержня
- 3-стержень-стержень при отрицательной полярности незаземленного стержня
- 4-стержень-плоскость при отрицательной полярности стержня



Расчет потерь на местную корону

- Рассчитать потери на корону на линии выполненной проводом АСО-500.
- Линия расположена в средней полосе на высоте $H=800$ м над уровнем моря. Среднегодовая температура $t = +5$ °С.
- Средние напряженности поля принять $E_{1cp} = 22.6$ кВ/см,
 $E_{2cp} = E_{3cp} = 20.9$ кВ/см

Параметры провода АСО-500

- в фазе 3
провода
- $r = 1,51$ см
- $a = 40$ см

Число проводов в фазе n

Коэффициент β

Коэффициент k

Эквивалентный радиус r_0

2	3	4
2	$2\sqrt{3}$	$3\sqrt{2}$
$1+2\frac{r_0}{a}$	$1+2\sqrt{3}\frac{r_0}{a}$	$1+3\sqrt{2}\frac{r_0}{a}$
$\sqrt{r_0 a}$	$\sqrt[3]{r_0 a^2}$	$\sqrt[4]{\sqrt{2} r_0 a^3}$

Расчетная плотность воздуха

$$U_k = k \cdot U_\phi$$

Начальная напряженность поля

$$U_k = k \cdot U_\phi$$

Эквивалентная напряженность поля

$$U_k = k \cdot U_\phi$$

Необходимо определить функции потерь от короны при различных группах погоды

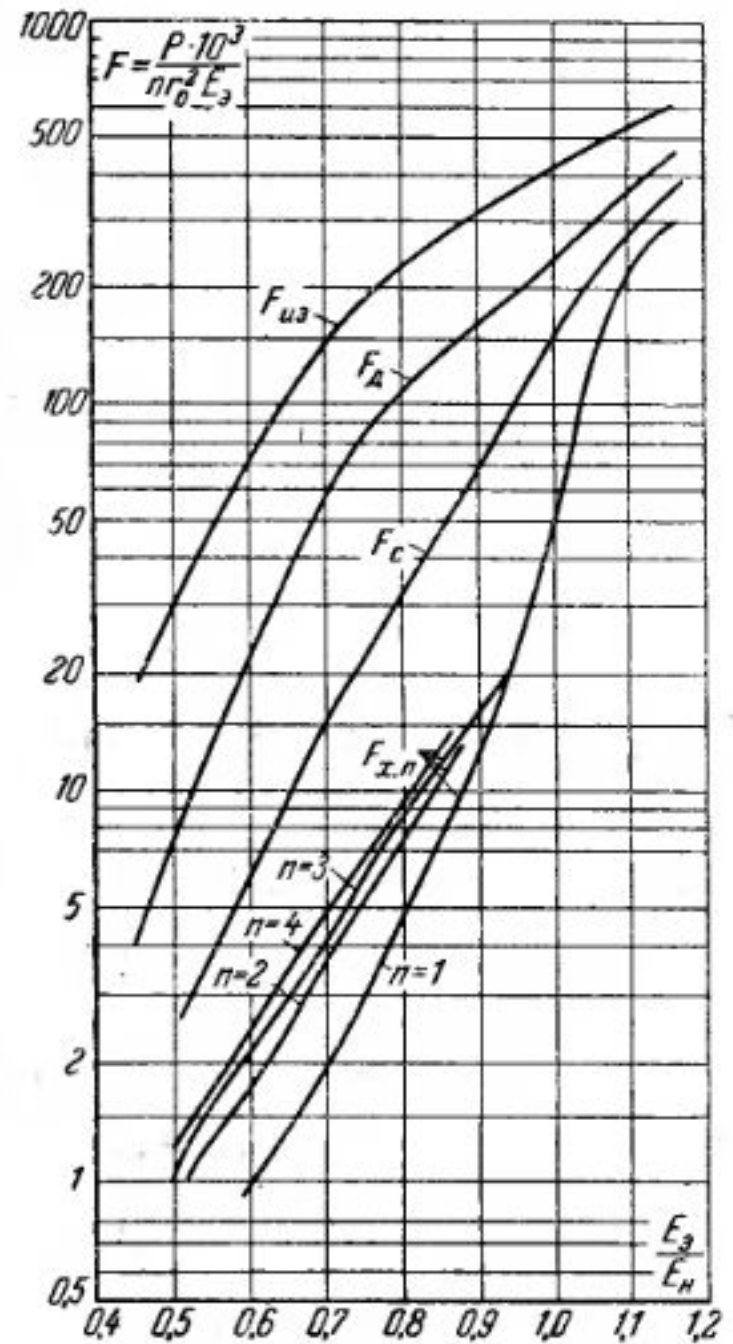
$$U_k = k \cdot U_{\phi}$$

$$U_k = k \cdot U_{\phi}$$

$$U_k = k \cdot U_{\phi}$$

$$U_k = k \cdot U_{\phi}$$

Функции потерь мощности на корону при различной погоде



Среднегодовые потери мощности на корону трехфазной линии

$$U_k = k \cdot U_\phi$$

$$U_k = k \cdot U_\phi$$



Расчет тока однофазного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью

Условие

- Рассчитать ток однофазного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью и выполненной из участков воздушной и кабельной линий. Обосновать необходимость подключения дугогасящего реактора. Определить, следует ли подключать дугогасящий реактор, и если это необходимо выполнить, то определить мощность и тип реактора.

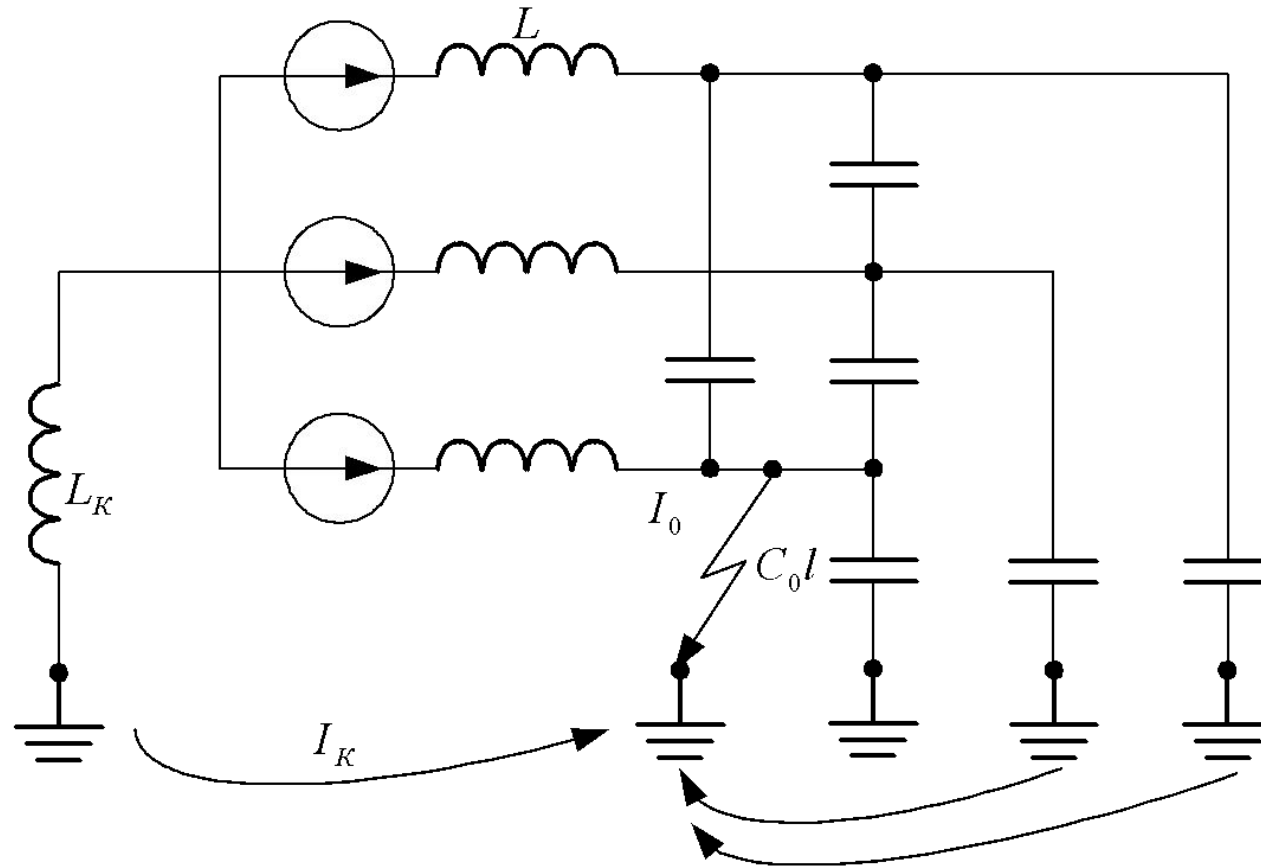
- Линии характеризуются номинальным напряжением U_n , суммарной длиной воздушных и кабельных линий $L_{вл}$ и $L_{кл}$ соответственно, удельным током замыкания на землю $I_{вл}$ и $I_{кл}$.

- Компенсация тока замыкания на землю.
- Одним из наиболее распространённых средств уменьшения (компенсации) тока замыкания на землю является включение в нейтраль регулируемого реактора, который называют так же дугогасящей катушкой, катушкой Петерсена, настроенной индуктивностью.

- При равенстве частичных ёмкостей относительно земли для всех фаз потенциал нейтрали в нормальном режиме равен нулю и ток фаз в катушке отсутствует. При однофазном замыкании на землю на нейтрали появляется напряжение нулевой последовательности, равное фазному напряжению и в катушке возникает ток.

$$I_K = \frac{\dot{U}_\Phi}{r_0 + j\omega L_0} = \dot{U}_\Phi \left[\frac{r_0}{(\omega L_0)^2} - j \frac{1}{\omega L_0} \right]$$

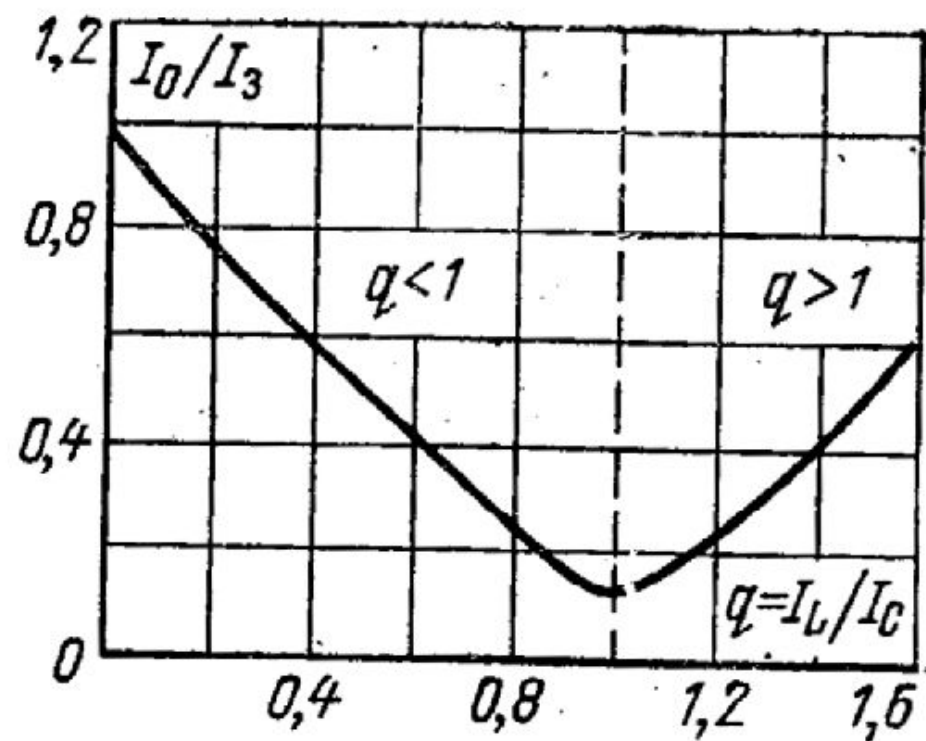
Схема замещения сети с дугогасящей катушкой



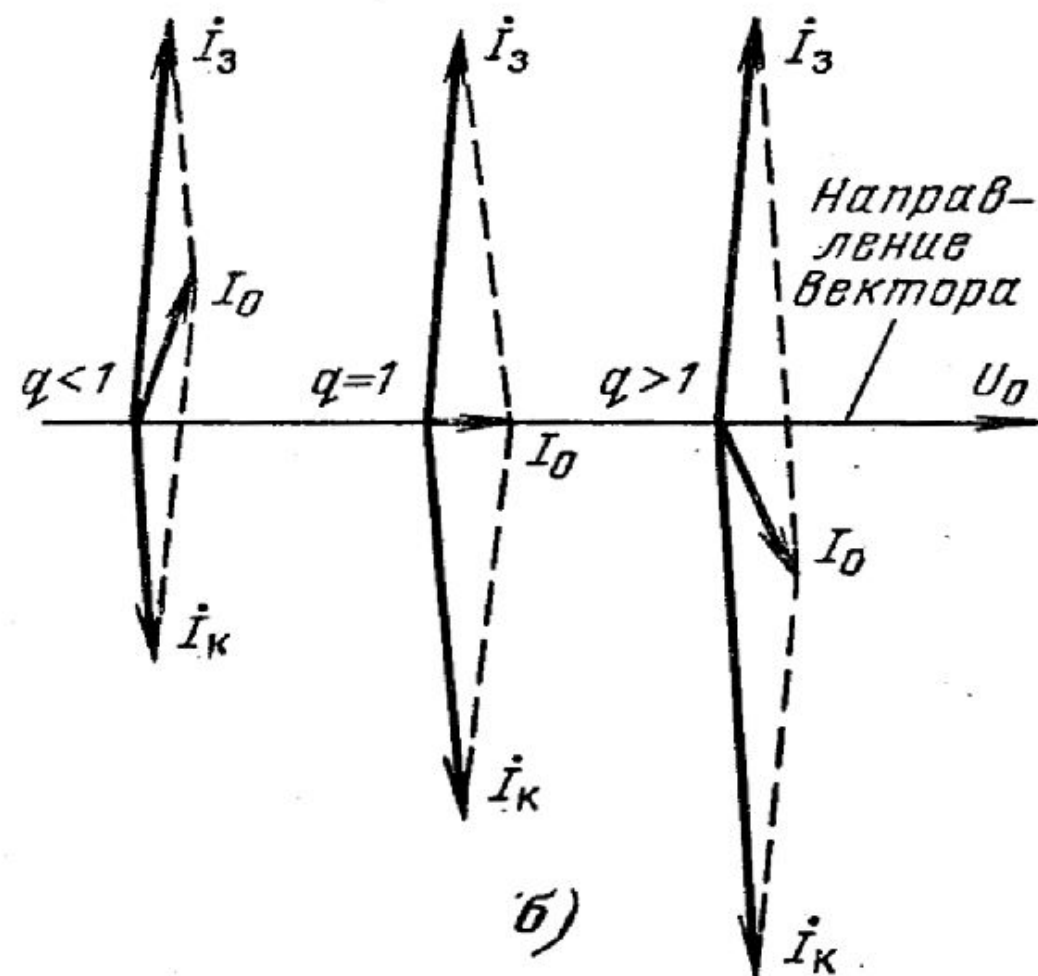
-
- $L_0 = L_K + \frac{L}{3}$ – суммарная индуктивность
- r_0 – активное сопротивление
- $L_0 \approx L_K$, $r_0 \approx r_K$, причем $r_0 \ll \omega L_0$. Через место замыкания на землю проходят ток катушки и ток замыкания на землю, который складывается из ёмкостного тока линий и активной составляющей $3U_\phi g' l$, обусловленной утечками по изоляторам и потерям на корону в воздушных линиях, диэлектрическими потерями в кабельных линиях.
-

Общий ток через место замыкания

$$I_0 \sqrt{I_a^2 + (I_C - I_L)^2}$$



а)



б)

Кривая зависимости тока через место замыкания от индуктивного тока катушки (а) и векторные диаграммы для различной степени компенсации ёмкостного тока (б).

- В условиях эксплуатации не всегда можно добиться точной настройки, но при небольших отклонениях абсолютная величина некомпенсированного тока мало отличается от активной составляющей, поскольку активная и реактивная составляющая складываются в квадратуре.
- Ограничение тока через дуговой промежуток облегчает условия деионизации дуги и повышает вероятность её быстрого гашения.

- Ограничения скорости восстановления напряжения на дуговом промежутке. Первое зажигание дуги в сети с катушкой происходит так же, как и в сети с изолированной нейтралью, т.е. сопровождается колебательным процессом, частота и амплитуда которого мало зависят от наличия катушки вследствие её большого индуктивного сопротивления для токов высокой частоты. По этой же причине катушка не влияет на высокочастотную составляющую переходного процесса, который возникает после попытки гашения дуги при переходе через нуль тока высокочастотных колебаний.

- В сети с изолированной нейтралью напряжение смещения нейтрали остаётся постоянным, а напряжение на повреждённой фазе возрастает, изменяясь с частотой сети, что может привести к повторному зажиганию дуги. В сети с дугогасящей катушкой в нейтрали напряжение с частотой источника восстанавливается медленно, поскольку фазное напряжение источника восстанавливается медленно, поскольку фазное напряжение источника и составляющая свободных колебаний противоположны по фазе. Если дуга не загорается под влиянием пика гашения непосредственно после обрыва тока высокочастотных колебаний, то вероятность её последующего зажигания при воздействии восстанавливающегося напряжения промышленной частоты уменьшается.

- При заземлении нейтрали через дугогасящую катушку возможны повышения напряжения не только при замыкании на землю, но и при нормальном режиме, если сеть обладает хотя бы небольшой несимметрией. Напряжение на изолированной нейтрали равно:

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_1 \cdot Y_1 + \dot{U}_2 \cdot Y_2 + \dot{U}_3 \cdot Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3} = \frac{\dot{U}_\Phi \cdot Y + a^2 \cdot \dot{U}_\Phi + a \cdot \dot{U}_\Phi}{Y_1 + Y_2 + Y_3}$$

- В нормальном режиме возможно незначительное смещение нейтрали, так как при любом встречающемся на практике расположении проводов воздушных линий их ёмкости относительно земли неодинаковы. В частности, при горизонтальном расположении проводов ёмкость средней фазы приблизительно на 10% ниже, чем ёмкости крайних фаз.

Ток замыкания на землю определяется
из соотношения

$$I_{\text{СУММАРНЫЙ}} = I_{\text{ВЛ}} \cdot L_{\text{ВЛ}} + I_{\text{КЛ}} \cdot L_{\text{КЛ}}$$

- Линии 6 кВ выполнены с изолированной нейтралью. В незаземлённых сетях ток однофазного замыкания на землю относительно мал. Однако при продолжительном протекании этого тока в месте замыкания выделяется значительная энергия, увеличивающая повреждение, что может привести к переходу замыкания на землю в междуфазное КЗ. Поэтому на основании многолетнего опыта эксплуатации незаземлённых сетей установлены допустимые (критические) значения токов замыкания на землю, при которых ещё возможно сохранение в работе повреждённого участка сети в течение нескольких часов, необходимых для отыскания и отключения места повреждения без нарушения электроснабжения.

Допустимые токи замыкания на землю

Номинальное напряжение сети, кВ	6	10	30
Ток I_3 , А	30	20	10

Выбор дугогасящего реактора

- определяют максимальный ёмкостной ток замыкания на землю I_C , который равен

$$I_3 = I_C + I_{ac} + I_G$$

- определяют суммарную мощность реакторов из условия полной компенсации ёмкостного тока замыкания на землю (резонансная настройка)

$$S = \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3}} \cdot I_C$$

- определяют число реакторов. Если ёмкостной ток превышает максимальный ток компенсации реактора, то исходя из соображений гибкости и надёжности компенсации рекомендуется применять не менее двух реакторов;
- выбирают место включения реакторов. Реакторы рекомендуется устанавливать на узловых подстанциях сети. В этом случае вероятность сохранения в работе реактора при аварийных отключениях в сети максимальна.

- выбирают трансформаторы для подключения реакторов. Для подключения дугогасящих реакторов на подстанциях применяют нейтралы трансформаторов СН или нейтралы трансформаторов, предназначенных для этой цели.



Расчет количества электронов в лавине

Условие

- Рассчитать число электронов в лавине, развивающейся в воздухе при различных атмосферных условиях под действием однородного электрического поля с напряжённостью E , после прохождения лавиной пути x .

$$\partial n = \alpha_{\exists\Phi} n \partial x \rightarrow \frac{\partial n}{n} = \alpha_{\exists\Phi} \partial x \rightarrow \int_0^n \frac{\partial n}{n} = \int_0^x \alpha_{\exists\Phi} \partial x$$

$$n = e^{\alpha_{\exists\Phi} x}$$

$$\alpha_{\exists\Phi} = \alpha - \eta$$

$$\alpha_{\exists\Phi} = \frac{0,2}{\delta} (E - 24,5\delta)^2$$

Относительная плотность воздуха
рассчитывается:

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



