



Образовательное учреждение высшего образования  
**«Южно-Уральский институт управления и экономики»**

---

Образовательное учреждение высшего образования  
«Южно-Уральский институт управления и экономики»  
переименован с 19 ноября 2019 года  
в Образовательное учреждение высшего образования  
«Южно-Уральский технологический университет»  
(приказ № 605 от 19.11.2019 г.)

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ**

**по выполнению домашней контрольной работы по дисциплине**

**Техника высоких напряжений**

**Направленность (профиль) образовательной программы**

**«Менеджмент в электроэнергетике и электротехнике»**

**Направление подготовки**

**13.03.02 Электроэнергетика и электротехника**

**Для обучающихся заочной формы обучения**

Челябинск, 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Методические рекомендации по выполнению контрольных заданий .....	4
Задания для домашней контрольной работы .....	5
Рекомендуемый список литературы .....	33

## **Введение**

Задания к контрольной работе составлены в соответствии с программой по курсу «Техника высоких напряжений». Целью работы является закрепление теоретических знаний, полученных при изучении курса, а также приобретение практических навыков.

Выполнение домашней контрольной работы является важной составляющей наряду с практическими и лекционными занятиями. Задачами выполнения контрольной работы является углубление и закрепление знаний, полученных студентами на лекциях и практических занятиях, развитие навыков самостоятельной работы с профессиональными источниками информации и практической работы по проведению необходимых расчетов и составлению заключения по результатам анализа.

Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине указан в рабочей программе дисциплины.

## Методические рекомендации по выполнению контрольных заданий

Контрольная работа составлена в 10 вариантах.

Контрольная работа оформляется в соответствии с требованиями «Общих методических указаний по выполнению и оформлению домашней контрольной работы студентами-заочниками»

Контрольные работы оформляются в отдельной тетради, на обложке которой указываются название дисциплины, номер контрольной работы, специальность, фамилия, инициалы и шифр студента.

Текст работ должен быть изложен аккуратно, четко, с обязательным приведением условий задач, исходных данных, необходимых формул, схем, единиц измерения физических величин. При оформлении контрольных работ оставляются поля шириной 3-4 см для замечаний преподавателя.

Перед решением каждой задачи необходимо ознакомиться с исходными данными, проработать соответствующий теоретический материал и методические указания к решению задачи. Исходные данные к каждой задаче приведены в соответствии с двумя последними цифрами шифра студента.

***Выбор варианта зависит от номера студенческого билета.***

Таблица 1 – Номера задач для решения контрольной работы

	Последняя цифра зачетной книжки обучающегося									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Номера решаемых задач	1,7	2,5	3,6	4,7	2,6	1,5	5,7	4,2	3,1	4,3

## Задания для домашней контрольной работы

### Задача 1

На генератор, подключенный к воздушной линии, набегают волна перенапряжения с длиной  $l_a = 5$  км и с амплитудой  $u=200$  кВ. Волновое сопротивление линии  $Z_1=400$  Ом, а волновое сопротивление генератора  $Z_2=1000$  Ом. Уровень главной изоляции генератора равен 50 кВ. Определить величину емкости  $C$ , которую нужно включить на зажимах генератора для того чтобы при воздействии волны на генератор не была бы нарушена его главная изоляция.

Таблица 2 – Исходные данные к задаче 1

	Предпоследняя цифра зачетной книжки обучающегося									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
l	5	4	3	6	7	4	5	6	7	3
u	300	250	330	280	250	300	220	210	290	300
Z1	380	390	400	410	430	380	390	400	400	400
Z2	1000	900	950	1100	1000	900	950	980	1000	1000

#### Методические рекомендации:

**Решение.** Определим время  $T$  действия волны

$$T = \frac{l_0}{v} = \frac{5 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^8} = 1,67 \cdot 10^{-5} \text{ с.}$$

Определим емкость  $C$ , при которой амплитуда волны будет равна уровню главной изоляции

$$C = \frac{T(Z + Z_2)}{Z_1 Z_2 \cdot \ln \left( \frac{2uZ_2}{2uZ_2 - u_{2\text{МАКС}}(Z_1 + Z_2)} \right)} =$$

$$= \frac{1,67 \cdot 10^{-5} (400 + 1000)}{400 \cdot 1000 \cdot \ln \left( \frac{2 \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot 1000}{2 \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot 1000 - 50 \cdot 10^3 (400 + 1000)} \right)} =$$

$$= 0,36 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 0,36 \text{ мкФ.}$$

Итак, для ограничения амплитуды напряжения необходимо включить на зажимы генератора конденсатор емкостью 0,36 мкФ.

## Задача 2

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

Таблица 3 – Исходные данные к задаче 2

	Предпоследняя цифра зачетной книжки обучающегося									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
t	21	22	23	20	24	25	23	21	23	22
p	780	750	760	740	770	780	760	780	770	770
E	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
x	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

### Методические рекомендации:

Дано:  $t = 21^\circ\text{C}$ ,  $P = 770\text{мм.рт.ст.}$ ,  $E = 32\text{ кВ/см}$ ,  $x = 1\text{ см}$ .

Найти:  $n = ?$

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

$$\partial n = \alpha_{\text{эф}} n \partial x \rightarrow \frac{\partial n}{n} = \alpha_{\text{эф}} \partial x \rightarrow \int_0^n \frac{\partial n}{n} = \int_0^x \alpha_{\text{эф}} \partial x$$

если электрическое поле однородное и напряжённость его всюду одинакова, то коэффициент свойства  $\alpha$  не зависит от координаты  $x$ , поэтому получаем  $\rightarrow n = e^{\alpha_{\text{эф}} x}$  [1]

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

$x$  – путь, пройденный лавиной.

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

- Величина  $\alpha_{эф}$  для воздуха рассчитывается по эмпирической формуле [2]

$$\alpha_{эф} = \frac{0,2}{\delta} (E - 24,5\delta)^2, [2]$$

$\delta$  - относительная плотность воздуха

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

- Относительная плотность воздуха рассчитывается:

$$\delta = \frac{P \cdot T_0}{P_0 \cdot T}, [3]$$

Где  $P_0$  и  $T_0$  давление и температура при нормальных атмосферных условиях:  $P_0 = 101,3 \text{ кПа} = 760 \text{ мм.рт.ст.}$ ;  $T_0 = (273 + 20) = 293 \text{ К}$

$P$  и  $T$  давление и температура воздуха в расчётных условиях.

Решение:

- Рассчитываем величину  $\delta$  
$$\delta = \frac{770 \cdot 293}{760 \cdot (273 + 21)} = 1,009$$

- Рассчитываем коэффициент  $\alpha_{эф}$  при напряжённости поля  $E = 32$  кВ/см

$$\alpha_{эф} = \frac{0,2}{1,009} \cdot (32 - 24,5 \cdot 1,009)^2 = 10,503 \frac{1}{\text{см}}$$

- Находим число электронов в лавине при  $x = 1$  см

$$n = e^{10,5031} = 36424,6$$

### Задача 3

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

Расстояние между электродами  $S$ . Вид прикладываемого прикладываемого напряжения – переменное  $-50\text{Гц}$ , форма электродов стержень-стержень и атмосферные условия  $t$ .

Примечание. Разрядные напряжение, определённое по формулам, таблицам и графикам, следует привести к реальным атмосферным условиям  $P$ .

Таблица 4 – Исходные данные к задаче 3

	Предпоследняя цифра зачетной книжки обучающегося									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$S$	50	51	52	49	53	48	49	55	53	52
$p$	1240	1250	1260	1270	1230	1220	1300	1320	1310	1250
$t$	22	21	20	25	24	23	20	23	24	26

### Методические рекомендации:

Дано:

$S = 50\text{см}$ , вид прикладываемого напряжения – переменное  $-50\text{Гц}$ ,

Стержень-стержень,  $P = 1240\text{ГПа}$ ,  $t = 22^\circ\text{C}$ .

Найти:

$U_{\text{ИР}} = ?$

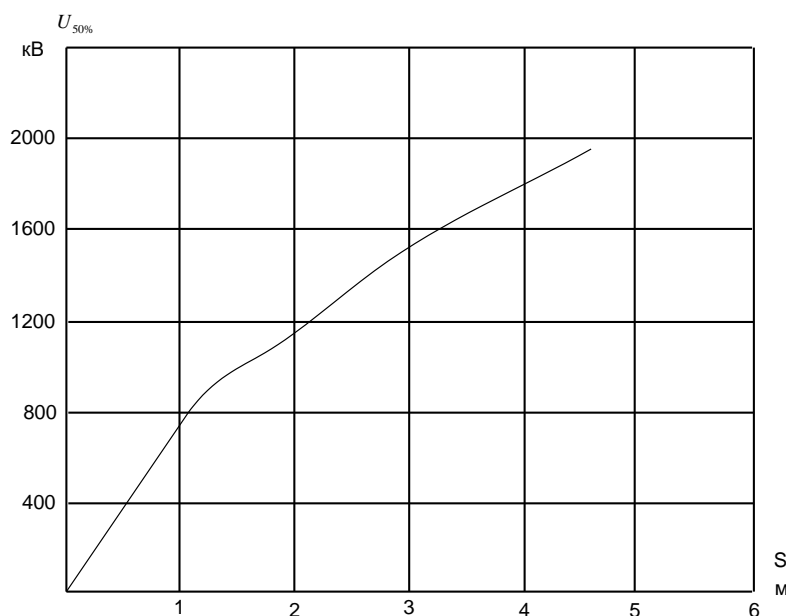


Рис. 2.1. Амплитуда разрядных напряжений воздушных промежутков при промышленной частоте промежутков стержень-стержень



Промежутки стержень-стержень, являются классическим примером симметричного резконеоднородного поля. Электрическая прочность промежутка между двумя проводами очень близка к прочности промежутка стержень-стержень.

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  $E_{л}$ , обусловленная этим зарядом, возрастает и условие образования стримера  $E_{л} \approx E_{в}$ . Соответственно снижается и разрядное напряжение.

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

- Из рис.1 определяем  $U_p = 400кВ$  амплитуда разрядного напряжения воздушного промежутка стержень-стержень, равного 50 см при переменном напряжении промышленной частоты и нормальных атмосферных условиях.

- Определяем разрядные напряжения для реальных условий.

$$U = U_p \cdot \delta$$

$\delta$  - относительная плотность воздуха.

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

где  $P, T$  - реальные давление и температура

где  $P_0, T_0$  - давление и температура при нормальных атмосферных

условиях  $P_0 = 101,308кПа$ ,  $T_0 = (273 + 20)K$

$$U = U_p \cdot \frac{P \cdot T_0}{P_0 \cdot T} = 450 \cdot \frac{124 \cdot (273 + 20)}{101,308 \cdot (273 + 22)} = 547,061 \text{ kV}$$

U - разрядное напряжение, приведённое к реальным атмосферным условиям.

#### Задача 4

Дать общую характеристику короны как одного из видов самостоятельного разряда. Объяснить природу потерь энергии на корону при переменном напряжении, существования радиопомех и акустических шумов.

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

Таблица 5 – Исходные данные к задаче 4

	Предпоследняя цифра зачетной книжки обучающегося									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
U	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750
n	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
r	1,655	1,655	1,655	1,655	1,655	1,655	1,655	1,655	1,655	1,655
D	45	50	45	50	45	50	45	50	45	50
a	16,5	16	16,5	16	16,5	16	16,5	16	16,5	16
h	15	16	17	15	16	17	15	16	17	15
hхп	7764	7780	7772	7768	7756	7788	7792	7758	7748	7768
hсс	315	320	310	325	315	320	310	325	315	320
hизм	410	408	406	404	410	408	406	404	410	408
hд	280	275	270	285	280	275	270	285	280	275
$\delta$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

#### Методические рекомендации:

Каждая фаза имеет n проводов радиусом  $r_0$  и шагом расщепления  $D_p$ . Средняя высота подвеса проводов  $h$ . 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  $h_{д}$ , относительной плотностью воздуха  $\delta$ .

Расчёт производить согласно [1, стр.155–167]; [2, стр.51–61]

Дано:  $U_{НОМ} = 750кВ$ ,  $n = 4$ ,  $r_0 = 1,655см$ ,  $D_p = 45см$ ,  $a = 16,5м$ ,  $h = 15м$ ,

$h_{хп} = 7764часов$ ,  $h_{сс} = 315часов$ ,  $h_{изм} = 406часов$ ,  $h_{д} = 275часов$ ,  $\delta = 1$

Теория:

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

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

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

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

$$E_H = 30,3 \cdot m \cdot \delta \cdot \left( 1 + \frac{0,3}{\sqrt{\delta \cdot r}} \right)$$

$m$  - 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  $E_H$ . Увеличение напряжения на проводе приводит к усилению ионизационных процессов, росту объёмного заряда и снижению напряжённости до  $E_H$ . Вследствие увеличения объёмного заряда потери энергии на корону растут тем в большей степени, чем больше напряжение на проводе превосходит начальное напряжение

$$U_H = E_H \cdot r \cdot \ln \frac{2H}{r}$$

$H$  - 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  $E_H$ . 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: 
$$30,3 \cdot m \cdot \delta \cdot r \cdot \ln \frac{S}{r} \geq \frac{U_{НОМ} \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad \text{принимая } m = 0,8,$$

$\delta = 1$  и  $\ln \frac{S}{r} \approx 6,2$  (характерное значение для линий 110–220кВ), получаем 
$$d \geq 0,011 U_{НОМ}$$

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

При номинальных напряжениях 330 кВ и выше необходимы провода ещё большего диаметра, во многих случаях превышающий диаметр, выбранный из условия передачи по линий 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 сердцевинной.

Другое решение, получившее в настоящее время широкое распространение, было предложено ещё в 1910 г. Акад. 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  $E_H$ , и горит, пока напряжение не достигнет максимума. После этого напряжённость поля у провода становится ниже  $E_H$ , и корона потухает.

- Годовые потери на корону,  $\left[ \frac{кВ \cdot ч}{км} \right]$

$$A = n^2 \cdot r^2 \cdot (P_{ХП} \cdot h_{ХП} + P_{СС} \cdot h_{СС} + P_{И} \cdot h_{И} + P_{Д} \cdot h_{Д})$$

- Среднегодовая мощность потерь,  $\left[ \frac{кВ}{км} \right]$

$$P_{ср} = \frac{A}{8760}$$

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 [1].

Они представлены в координатах:

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

где  $E_H$  – начальная напряжённость поля,  $\left[\frac{kB}{cm}\right]$ ;

$E_{\max}$  – максимальная напряжённость на поверхности провода, учитывающая влияние заряда соседних проводов расщеплённой

фазы,  $\left[\frac{kB}{cm}\right]$ .

• Для расщеплённых проводов при радиусах проводов ( $r_{1cm}$ ) начальная напряжённость поля определяется по формуле:

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

$m = (0,82 \div 0,94)$  – коэффициент гладкости провода

а максимальная – по соотношению

$$E_{\max} = k_v \cdot E_{CP},$$

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

$$k_v = 1 + (n-1) \cdot \frac{r}{r_p}.$$

В этих формулах:

$E_{CP}$  – средняя рабочая напряжённость электрического поля на поверхности

проводов расщеплённой фазы,  $\left[ \frac{\text{кВ}}{\text{см}} \right]$ ,

$$E_{CP} = \frac{U_{\Phi}}{n \cdot r_0 \cdot \ln \frac{S}{r_{\text{Э}}}} ;$$

$U_{\Phi}$  – фазное напряжение провода, кВ;

$r_0$  – радиус провода расщеплённой фазы, см;

$r_p$  – радиус расщепления, см,

$$r_p = \frac{D_p}{2} = \frac{30}{2} = 15 \text{ см} ;$$

$S$  – среднегеометрическое расстояние между фазами, м.

Для горизонтального расположения фаз с расстоянием между фазами  $a$ , величина  $S = 1,26 \cdot a = 1,26 \cdot 16,5 = 2079 \text{ см}$ .

$r_{\text{Э}}$  – эквивалентный радиус расщеплённой фазы, см.

При расщеплении фазы на 4 провода радиус

$$r_{\text{Э}} = \sqrt[8]{2} \cdot \sqrt[4]{r_0 \cdot D_p^3} = \sqrt[8]{2} \cdot \sqrt[4]{1,655 \cdot 45^3} = 21,47 \text{ см}.$$

Средняя напряжённость электрического поля

$$E_{CP} = \frac{750}{\sqrt{3} \cdot 4 \cdot 1,655 \cdot \ln \frac{2079}{21,47}} = 14,3 \left[ \frac{\text{кВ}}{\text{см}} \right]$$

Коэффициент усиления

$$k_y = 1 + 3\sqrt{2} \cdot \frac{r_0}{D_p} = 1 + 3\sqrt{2} \cdot \frac{1,655}{45} = 1,15$$

Максимальная напряжённость электрического поля

$$E_{\text{max}} = k_y \cdot E_{CP} = 1,15 \cdot 14,3 = 16,44 \left[ \frac{\text{кВ}}{\text{см}} \right]$$

Номинальные напряжённости электрического поля на поверхности проводов для различных погодных условий составляют:



При хорошей погоде (принимаются  $m = 0,8$  ;  $\delta = 1$ .)

$$E_H = 24,5m\delta \left[ 1 + \frac{0,65}{(\delta \cdot r)^{0,38}} \right] = 24,5 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot \left( 1 + \frac{0,65}{(1 \cdot 1,655)^{0,38}} \right) = 30,1 \left[ \frac{\text{кВ}}{\text{см}} \right]$$

при сухом снеге  $m = 0,75$  ;  $\delta = 1,06$

$$E_H = 24,5m\delta \left[ 1 + \frac{0,65}{(\delta \cdot r)^{0,38}} \right] = 24,5 \cdot 0,75 \cdot 1,06 \cdot \left( 1 + \frac{0,65}{(1,06 \cdot 1,655)^{0,38}} \right) = 29,7 \left[ \frac{\text{кВ}}{\text{см}} \right]$$

при изморози, инее, гололёде ( $m = 0,6$  ;  $\delta = 1,05$ .)

$$E_H = 24,5m\delta \left[ 1 + \frac{0,65}{(\delta \cdot r)^{0,38}} \right] = 24,5 \cdot 0,6 \cdot 1,05 \cdot \left( 1 + \frac{0,65}{(1,05 \cdot 1,655)^{0,38}} \right) = 23,57 \left[ \frac{\text{кВ}}{\text{см}} \right]$$

при дожде и мокром снеге ( $m = 0,65$  ;  $\delta = 0,93$ )

$$E_H = 24,5m\delta \left[ 1 + \frac{0,65}{(\delta \cdot r)^{0,38}} \right] = 24,5 \cdot 0,65 \cdot 0,93 \cdot \left( 1 + \frac{0,65}{(0,93 \cdot 1,655)^{0,38}} \right) = 22,9 \left[ \frac{\text{кВ}}{\text{см}} \right]$$

Рассчитываются отношения  $\frac{E_{\max}}{E_H}$  при различных погодных условиях и по обобщённым характеристикам определяются величинами  $\frac{P}{n^2 \cdot r^2}$ .

Умножая эти величины на  $n^2 r^2 = 12^2 \cdot (1,655)^2 = 146,7$ , получаем потери мощности для соответствующих погодных условий.

**при хорошей погоде**

$$\frac{E_{\max}}{E_H} = \frac{16,44}{30,1} = 0,54 ; \frac{P_{\text{ХП}}}{n^2 \cdot r^2} = 0,008 ; P_{\text{ХП}} = 1,17 \text{кВт}$$

при сухом снеге

$$\frac{E_{\max}}{E_H} = \frac{16,44}{29,7} = 0,553 ; \frac{P_{\text{СС}}}{n^2 \cdot r^2} = 0,35 ; P_{\text{СС}} = 51,34 \text{кВт}$$

при изморози

$$\frac{E_{\max}}{E_H} = \frac{16,44}{23,57} = 0,697 ; \frac{P_{\text{И}}}{n^2 \cdot r^2} = 2 ; P_{\text{И}} = 293,4 \text{кВт} ;$$

при дожде и мокром снеге

$$\frac{E_{\max}}{E_H} = \frac{16,44}{22,9} = 0,717 ; \frac{P_{\text{Д}}}{n^2 \cdot r^2} = 0,9 ; P_{\text{Д}} = 132,12 \text{кВт}$$

Годовые потери энергии на корону составляют

$$A = 4^2 \cdot (1,655 \cdot 10^{-2})^2 \cdot (1,17 \cdot 7764 + 51,34 \cdot 315 + 293,4 \cdot 406 + 132,12 \cdot 275) = 791,948 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{км}}$$

Среднегодовые потери мощности будут равны

$$P_{ст} = \frac{791,948}{8760} = 0,09 \frac{\text{кВт}}{\text{км}}$$

В материалах на проектирование электрических сетей указывается, что экономически приемлемые потери мощности на корону имеет место при

$$\frac{E_{\max}}{E_H} \leq 0,9$$

В представленной задаче при всех условиях это отношение меньше указанной величины. Это говорит о том, что технические параметры линий выбраны правильно.

### Задача 5

Рассчитать и построить кривые относительного распределения начального и максимального напряжений по обмотке трансформатора при падении импульсной волны напряжения с амплитудой  $U_0$ .

Расчёты и построения провести для трансформатора с заземлённой и изолированной нейтралью.

Обмотка трансформатора состоит из N катушек; ёмкость каждой из них относительно земли ΔС и ёмкость между катушками ΔК.

Таблица 6 – Исходные данные к задаче 5

	Предпоследняя цифра зачетной книжки обучающегося									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
U,кВ	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220
I,кА	3	4	2	5	4	3	2	5	3	4
N	70	75	80	70	75	80	70	75	80	70
СпФ	13	14	15	12	13	14	15	12	13	14
КпФ	945	950	955	940	945	950	955	940	945	950

## Методические рекомендации:

За амплитуду  $U_0$  принимается остающееся напряжение  $U_{ост}$  на вентильном разряднике в зависимости от тока координации  $I_K$ . Номинальное напряжение трансформатора  $U_{ном}$ .

Дано:

$$U_{ном} = 220кВ, I_K = 3кА, N = 70, \Delta C = 13нФ, \Delta K = 950нФ.$$

Теория:

Так как провод высоковольтной обмотки трансформатора имеет очень большую длину (сотни метров и даже километры), переходной процесс в обмотке, так же как и переходной процесс в длинной линии, должен иметь волновой характер. Схема замещения обмотки трансформатора рис. 1. в отличии от линии может бать представлена цепочкой, число звеньев которой равно числу витков обмотки. По сравнению с отрезком линии в этой схеме появляются два новых параметра – взаимная индуктивность между отдельными соседними витками; цепочечные схемы при теоретическом анализе часто заменяют цепями с распределёнными параметрами, что при большом числе звеньев не приводит к существенным погрешностям.

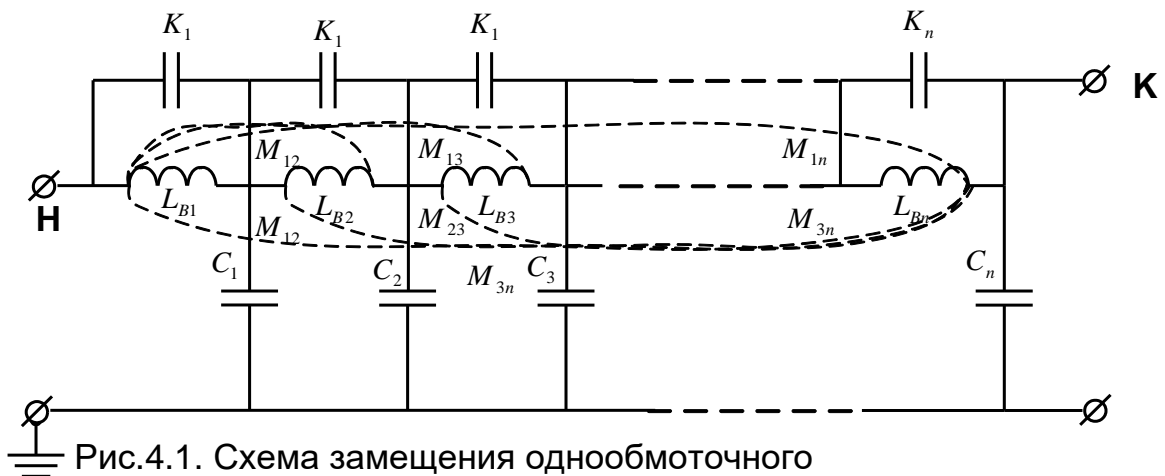


Рис.4.1. Схема замещения однообмоточного трансформатора.

$C_1 \dots C_n$  - ёмкости витков относительно земли;

$K_1 \dots K_n$  - ёмкости между соседними витками;

$L_1 \dots L_n$  – собственные индуктивности витков;

$M_{ik}$  – взаимоиндуктивность между витками  $i$  и  $k$ .

Разрядник вентильного типа .

Основными элементами вентильного разрядника являются многократный искровой промежуток и соединённый последовательно с ним резистор с нелинейной

вольт-амперной характеристикой. При воздействии на разрядник импульс грозового перенапряжения пробивается искровой промежуток и через разрядник проходит импульсный ток, создающий падение напряжения на сопротивлении разрядника. Благодаря нелинейной вольт-амперной характеристики материала, из которого выполнено сопротивление, это напряжение мало меняется при существенном изменении импульсного тока и незначительно отличается от импульсного пробивного напряжения искрового промежутка разрядника  $U_{пр.и.}$ . Одной из основных характеристик разрядника являются оставшееся напряжение разрядника  $U_{ост}$ , т.е. напряжение при определённом токе (5-14 кА для разных  $U_{ном}$ ), который называется током координации. Импульсное пробивное напряжение искрового промежутка разрядника и близкое к нему напряжение  $U_{ост}$  должны быть на 20 ÷ 25% ниже разрядного напряжения изоляции (координационный интервал).

После окончания процесса ограничения перенапряжения через разрядник продолжает проходить ток, определяемый рабочим напряжением промышленной частоты. Этот ток (так же, как и у трубчатых разрядников) называется сопровождающим током. Сопротивление нелинейного резистора разрядника резко возрастает при малых по сравнению с перенапряжениями рабочих напряжениях, Сопровождающий ток существенно ограничивается, и при переходе тока через нулевое значение дуга в искровом промежутке гаснет. Наибольшее напряжение промышленной частоты на вентильном разряднике, при котором надёжно обрывается проходящий через него сопровождающий ток, называется напряжением гашения  $U_{гаш}$ , а соответствующий ток – током гашения  $I_{гаш}$ . Гашение дуги сопровождающего тока должно осуществиться в

условиях однофазного замыкания на землю, так как во время одной и той же грозы могут произойти перекрытие изоляции на одной фазе и срабатывание разрядника в двух других фазах при однофазном замыкании на землю.

Решение.

В начале обмотки ( $x = 0$ ) напряжение равно приложенному ( $u = U_0$ ). В конце обмотки ( $x = l$ ) при заземлённой нейтрали напряжение равно нулю ( $u = 0$ ), а при изолированной нейтрали нулю равен ток.

Закон начального распределения напряжения вдоль обмотки:

для заземлённой нейтрали

$$U_{нач(x)} = U_0 \cdot \frac{sh \alpha \cdot (l - x)}{sh \alpha \cdot l} \quad [1]$$

для изолированной нейтрали

$$U_{нач(x)} = U_0 \cdot \frac{ch \alpha \cdot (l - x)}{ch \alpha \cdot l} \quad [2]$$

Для разрядника РВС–220 максимальное значение остающегося напряжения при импульсном токе с длительностью фронта 10 мкс, при максимальном значении тока импульса 3 кА составляет не более 630 кВ.

При больших значениях аргумента гиперболические синус и косинус приблизительно равны друг другу. Таким образом, для значительной обмотки ( $x/l < 0,8$ ) начальные распределения при изолированной и заземлённой нейтралях практически совпадают и могут быть выражены общей приближённой формулой:

$$U_{нач(x)} \approx U_0 \cdot e^{-\frac{\alpha \cdot x}{l}} = U_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x}$$

где  $\alpha = \sqrt{\frac{\Delta C}{\Delta K}} = \sqrt{\frac{13}{950}} = 0,117$ .

Максимальный продольный градиент напряжения равен:

$$\left( \frac{du}{dx} \right)_{\max} = \frac{U_0}{l} \cdot \alpha \cdot l = U_0 \cdot \alpha$$

Определив  $U_{нач}$  по катушкам обмотки, составим следующую таблицу:

$$U_{HAЧ(x)} \approx U_0 \cdot e^{-\frac{\alpha \cdot x}{l}} = U_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x},$$

где  $\alpha = \sqrt{\frac{\Delta C}{\Delta K}} = \sqrt{\frac{13}{950}} = 0,117$ .

Таблица 4.1.

№ катушки	$U_{HAЧ(x)} \approx U_0 \cdot e^{-\frac{\alpha \cdot x}{l}}$ [кВ]	$\frac{U}{U_0}$
0	630	1
1	560,438	0,889
2	498,557	0,791
4	394,539	0,626
6	312,223	0,495
8	247,081	0,392
10	195,53	0,310
15	108,931	0,172
20	60,686	0,096
30	18,835	0,0298
40	5,845	0,0092
50	1,814	0,0028
60	0,563	0,00089
70	0,174	0,000276

$$U_{HAЧ(1)} = U_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x} = 630 \cdot e^{-0,117 \cdot 1} = 560,438 \text{ кВ}$$

$$U_{HAЧ(2)} = U_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x} = 630 \cdot e^{-0,117 \cdot 2} = 498,557 \text{ кВ}$$

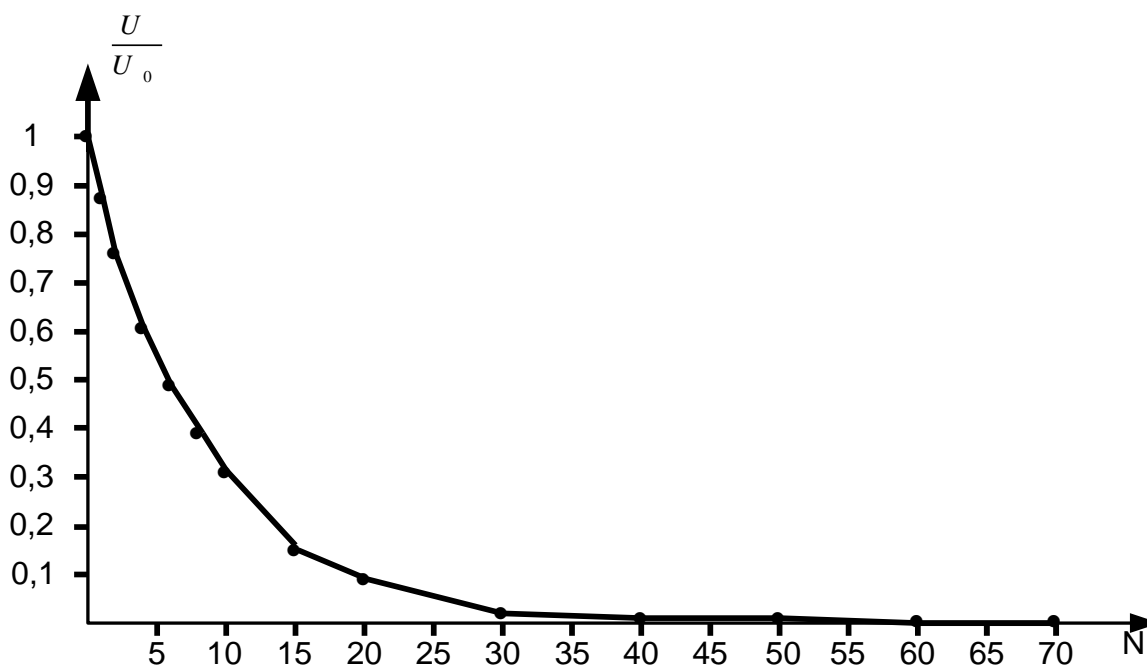
$$\left(\frac{du}{dx}\right) = U_0 \cdot \alpha = U_0 \cdot \alpha = 630 \cdot 0,117 = 73,71 \text{ кВ}$$

Распределение напряжения в установившемся режиме зависит от способа заземления нейтрали. При заземлённой нейтрали в силу однородности обмотки установившееся распределение напряжения определяется наклонной прямой. При изолированной нейтрали в установившемся режиме вся обмотка принимает одинаковый потенциал относительно земли и  $u_{уст(x)}$  представляет собой горизонтальную прямую линию.

Таким образом, в обоих случаях нетрудно определить сумму амплитуд отдельных гармоник в любой точке обмотки. В процессе развития собственных колебаний напряжение будет превосходить установившееся, стремясь к нему по мере затухания этих колебаний. Максимальное значение напряжения в каждой точке обмотки приближённо равно:

$$U_{\max(x)} \approx U_{уст(x)} + \sum_{k=1}^{k=\infty} U_k(x)$$

При изолированной нейтрали наибольшее напряжение наблюдается на конце обмотки и может в 1,5 ÷ 1,8 раза превышать напряжение в начале (при бесконечно длинном импульсе с вертикальным фронтом). При заземлённой нейтрали наибольшее напряжение возникает в конце первой трети обмотки и составляет (1.2 ÷ 1.3)  $U_0$ . Следовательно, в обоих случаях на главную изоляцию может воздействовать напряжение, существенно превышающее напряжение источника.



**Начальное распределение напряжения по обмотке**

## Задача 6

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  $U_{НОМ}$ , суммарной длиной воздушных и кабельных линий  $L_{ВЛ}$  и  $L_{КЛ}$  соответственно, удельным током замыкания на землю  $I_{ВЛ}$  и  $I_{КЛ}$ .

Таблица 7 – Исходные данные к задаче 6

	Предпоследняя цифра зачетной книжки обучающегося									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
U,кВ	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
L <sub>ВЛ</sub> ,км	130	132	128	126	136	130	132	128	126	136
L <sub>КЛ</sub> ,км	30	28	26	32	34	32	30	28	26	32
I <sub>ВЛ</sub> ,А/км	0,03	0,04	0,025	0,035	0,03	0,04	0,025	0,035	0,03	0,04
I <sub>КЛ</sub> ,А/км	1,2	1,3	1,4	1,2	1,3	1,4	1,2	1,3	1,4	1,2

### Методические рекомендации:

Дано:

$$U_{НОМ} = 10\text{кВ}, L_{ВЛ} = 128\text{км}, L_{КЛ} = 28\text{км}, I_{ВЛ} = 0,03 \frac{\text{А}}{\text{км}}, I_{КЛ} = 1,3 \frac{\text{А}}{\text{км}}$$

Теория:

Компенсация тока замыкания на землю.

Одним из наиболее распространённых средств уменьшения (компенсации) тока замыкания на землю является включение в нейтраль регулируемого реактора (рис.5.1.), 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  $U_\phi$ , и в катушке возникает ток.

$$I_K = \frac{\dot{U}_\phi}{r_0 + j\omega L_0} = \dot{U}_\phi \left[ \frac{r_0}{(\omega L_0)^2} - j \frac{1}{\omega L_0} \right] \quad [5.1]$$

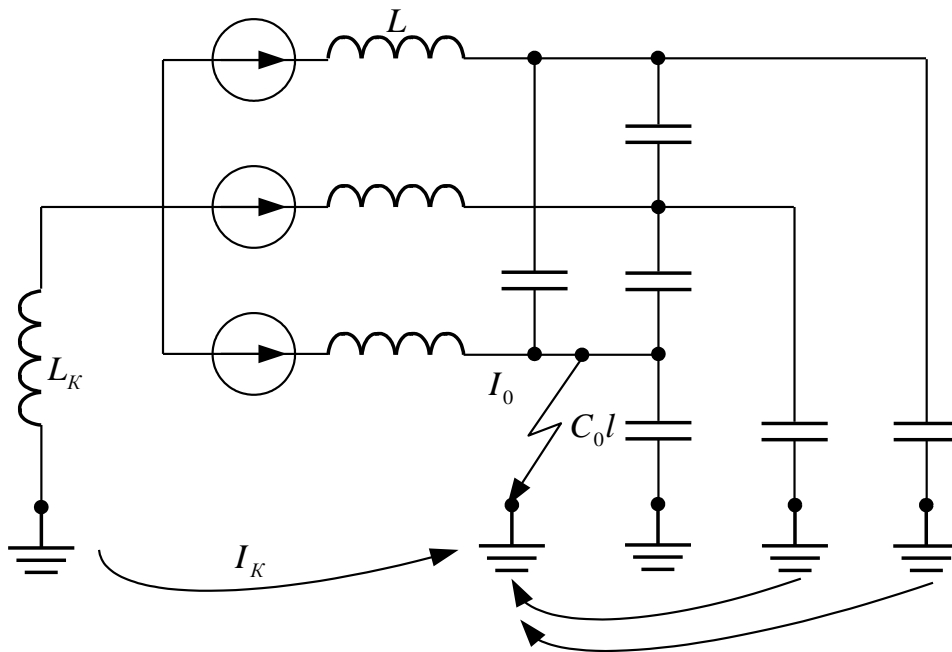


Рис.5.1. Схема замещения сети с дугогасящей катушкой

$$L_0 = L_K + \frac{L}{3} \text{ - суммарная индуктивность;}$$

$r_0$  - активное сопротивление

$L_0 \approx L_K$ ,  $r_0 \approx r_K$ , причём  $r_0 \ll \omega L_0$ . 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 (остаточный ток  $I_0$ ) равен:

$$I_0 \sqrt{I_a^2 + (I_c - I_L)^2} \quad [5.2.]$$

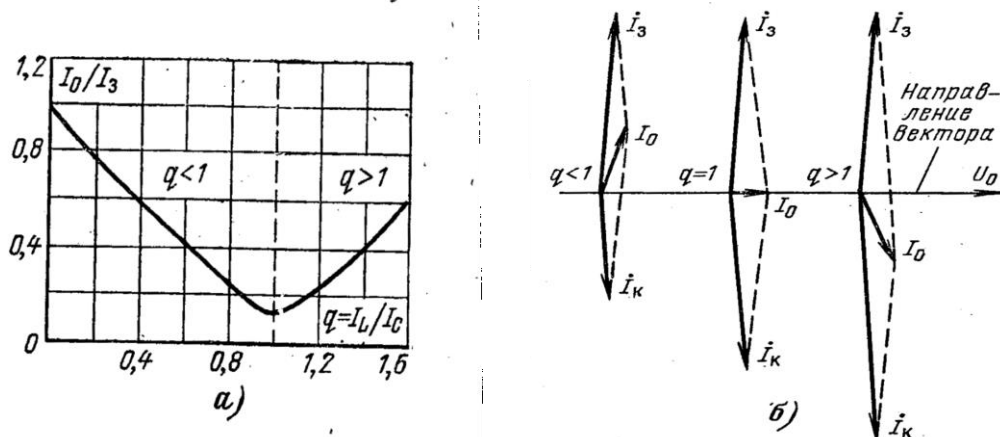


Рис. 5.2. Кривая зависимости тока через место замыкания от индуктивного тока катушки (а) и векторные диаграммы для различной степени компенсации ёмкостного тока (б).

На рис. 5.2. приведены зависимость остаточного тока от индуктивного тока катушки и векторные диаграммы для типичных случаев. Область слева от точки минимума, где  $I_L < I_C$  - точкой компенсации, или идеальной настройкой, точка  $I_L = I_C$  - точкой компенсации или идеальной настройки, а область  $I_L > I_C$  - область перекомпенсации. Минимальное значение тока при идеальной настройке определяется его активной составляющей, а так же высшими гармоническими, которые могут появиться, благодаря небольшому отклонению характеристики катушки от линейной и наличию высших гармоник в кривой ЭДС источника.

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 зажигается 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:

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

$Y_1, Y_2, Y_3$  - проводимости фаз относительно земли.

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  $C_0$  приблизительно на 10% ниже, чем ёмкости крайних фаз.

При идеальной настройке смещение нейтрали достигает наибольшего значения  $U_{\kappa} = \frac{U_0}{\delta}$ . Например, при  $U_0 = 0,035U_{\phi}$  и  $\delta = 0,05$  смещение нейтрали при точной настройке достигает  $0,7U_{\phi}$ . Одновременно искажается и векторная диаграмма напряжений относительно земли; на одной фазе напряжение падает до  $0,3U_{\phi}$ , а на других фазах поднимается почти до повышения напряжения не представляют опасности для изоляции, однако они не допустимы из-за увеличения потерь на корону, влияние на линии слабого тока. Отклонение от условий настройки в пределах 0,1 уменьшает смещение нейтрали до  $0,3U_{\phi}$ , но это недостаточно. Поэтому в сети с дугогасящей катушкой в нейтрали необходимо особенно тщательно выполнять транспозицию.

Решение.

Ток замыкания на землю определяется из соотношения

$$I_{\text{СУММАРНЫЙ}} = I_{\text{ВЛ}} \cdot L_{\text{ВЛ}} + I_{\text{КЛ}} \cdot L_{\text{КЛ}} = 0,013 \cdot 90 + 0,82 \cdot 70 = 58,57 \text{ А},$$

где  $I_{\text{ВЛ}}$  – удельный ток замыкания на землю в воздушной линии, А/км;

$L_{\text{ВЛ}}$  – длина воздушной линии, км.

$I_{\text{КЛ}}$  – удельный ток замыкания на землю кабельной линии, А/км;

$L_{\text{КЛ}}$  – длина кабельной линии, км.

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.

Так как полученное значение тока превышает допустимый ток замыкания на землю 30 А в сетях 6 кВ [2, стр. 460], в нейтраль трансформатора системы необходимо включить дугогасящий реактор.

Выбор дугогасящего реактора выполняется в следующем порядке:

1) определяют максимальный ёмкостной ток замыкания на землю  $I_C$ , который равен

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

где  $I_C$  – ёмкостной ток;

$I_{ac}$  – ток ёмкостной асимметрии;

$I_G$  – активный ток.

Ток ёмкостной асимметрии составляет не более 2% ёмкостного тока, соответствующего максимальному потенциалу нейтрали  $U_N = U_\phi$ , а активный ток не превышает 6% указанного значения ёмкостного тока. Поэтому можно принять

$$I_3 = I_C .$$

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

$$S = \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3}} \cdot I_C = \frac{10}{\sqrt{3}} \cdot 40,24 = 232,3 \text{ кВА};$$

2) определяют число реакторов. Если ёмкостной ток превышает 50 А, то исходя из соображений гибкости и надёжности компенсации рекомендуется применять не менее двух реакторов;

3) 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.

4) выбирают трансформаторы для подключения реакторов. Для подключения дугогасящих реакторов на подстанциях применяют нейтрали

трансформаторов СН или нейтрали трансформаторов, предназначенных для этой цели.

Выбираем реактор; типа РЗДСОМ – 380/10. Пределы регулирования у выбранных реакторов 25 – 50 А.

### Задача 7

Рассчитать годовое число грозовых отключений воздушной линии электропередачи, проходящей по территории Молдовы.

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

Таблица 8 – Исходные данные к задаче 7

	Предпоследняя цифра зачетной книжки обучающегося									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
U,кВ	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220
h <sub>оп</sub> ,м	35	40	45	50	35	40	45	50	35	40
n	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
R <sub>и</sub> ,	18	19	20	21	22	18	19	20	21	22
$\alpha = 21^\circ$	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21

#### Методические рекомендации:

Дано:

$U_{НОМ} = 220кВ$ , тип опоры – металлические,  $h_{ОП} = 35м$ ,  $n = 1$ ,  $R_{И} = 20\Omega$ ,  $\alpha = 21^\circ$ .

Теория:

Грозовые отключения воздушных линий с тросами могут происходить по следующим причинам:

1. Удар молнии в трос в середине пролёта и перекрытие воздушного промежутка трос-провод;
2. Прорыв молнии через тросовую защиту, т.е. поражение провода;

3. Удар молнии в опору и обратное перекрытие изоляции с опоры на провод.

Решение.

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

- Удельное число отключений линий с тросами вычисляется по формуле

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

где  $h_{ТР}$  – средняя высота подвеса тросов, м;

$h_{ОП}$  – высота опоры, м;

$l_{ПР}$  – длина пролёта, м;

$P_a$  – вероятность прорыва молнии через тросовую защиту:

- Вероятность прорыва молнии через тросовую защиту:

$$P_a = 10^{\frac{\alpha \cdot \sqrt{h_{ОП}}}{90} - 4} = 10^{\frac{21 \cdot \sqrt{35}}{90} - 4} = 0,002;$$

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

$$I_{кр} \geq \frac{2 \cdot U_{50\%}}{z} = \frac{2 \cdot 1300}{300} = 8,667 \text{ кА},$$

где  $I_{кр}$  – ток молнии в поражённом проводе, кА;

$U_{50\%}$  – импульсная прочность гирлянды [4, стр. 39],

при  $n = 2$ ,  $U_{50\%} = 1300$  - импульсная прочность гирлянды (рассчитанной на 220кВ),  $z$  – волновое сопротивление провода ( $z = 300$  Ом);

для ВЛ на металлических и железобетонных опорах

- Вероятность появления тока величиной  $I_{кр}$  или большего, при котором изоляция перекрывается

$$P_{I_{KP}} = P_{ПЕР} = e^{-0,04I_{KP}} = e^{-0,04 \cdot 8,667} = 0,709$$

$P_{ПЕР}$  – вероятность перекрытия изоляции на опоре при ударе молнии в провод;

• Находим  $P_{тр}$  – вероятность пробоя промежутка трос – провод при ударе молнии в трос в середине пролёта; она оценивается по формуле

$$P_{тр} = P_a = e^{-0,08a} = e^{-0,08 \cdot 3000 \frac{S}{I_{тр}}} = e^{-0,08 \cdot 3000 \frac{6}{300}} = 0,009$$

(при ударе молнии в трос напряжение между тросом и проводом зависит только от крутизны тока  $a$  и не зависит от его амплитуды; расстояние между тросом и проводом  $S$  принимается равным  $0,02 \cdot I_{тр} = 0,02 \cdot 300 = 6$  м).

• Находим  $P_{оп}$  – вероятность перекрытия изоляции при ударе в опору;

$$P_{оп} = e^{-0,04I_{KP}} = e^{-0,04 \cdot 8,667} = 0,709$$

$$I_{KP} = \frac{U_{50\%}}{R_u + \delta \cdot h_{оп}} = \frac{1300}{21 + 0,15 \cdot 35} = 49,52 \text{ кА};$$

при  $n = 2$ ,  $\delta = 0.15$ .

$\eta_1$  – вероятность образования устойчивой дуги при перекрытии изоляции

опоры, для линий до 220 кВ  $\eta_1 = 0.7$ .

$\eta_2$  – вероятность образования устойчивой дуги при пробое воздушной изоляции в пролёте:

$$\eta_2 = (1,6 \cdot E_{ср} - 6) \cdot 10^{-2} = \left(1,6 \cdot \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot S} - 6\right) \cdot 10^{-2} = \left(1,6 \cdot \frac{220}{\sqrt{3} \cdot 6} - 6\right) \cdot 10^{-2} = 0,28$$

где  $E_{ср}$  – средняя напряжённость.

Подставляя полученные значения, определяем удельное число отключений линии

$$n_{откл} = 4 \cdot 17 \cdot \left\{ 0,002 \cdot 0,709 \cdot 0,7 + (1 - 0,002) \cdot \left[ \frac{4 \cdot 35}{300} \cdot 0,709 \cdot 0,7 + \left(1 - \frac{4 \cdot 35}{300}\right) \cdot 0,009 \cdot 0,28 \right] \right\} = 15,88$$

Число отключений линий равно 15,88 раза для линии длиной 100 км за 100 грозových часов в году.



## **Рекомендуемый список литературы**

Список литературы представлен в рабочей программе дисциплины.