

ИДЗ №2

по курсу «Техника Высоких Напряжений»

ИДЗ №2 представляет собой два расчётных задания и изучение основных электрофизических процессов и явлений, лежащих в основе этих заданий. Задания 1 и 2 – расчётные задачи практического плана, выполняемые на основе реальных инженерных расчётов. Методический путь решения заданий указан.

Задание 3 – защита выполненных заданий. Для защиты необходимо изучение теоретических основ разделов ТВН, по теме заданий, а именно: процессы возникновения короны, стадии её формирования, электрофизические процессы в результате протекания которых происходит формирование потерь передаваемой энергии, пути расчёта потерь на корону, происхождение и значения коэффициентов для расчёта потерь (коэффициенты погоды, усиления и гладкости провода), расщепление провода, особенности волновых процессов в обмотках высоковольтных трансформаторов, опасность волновых процессов при их развитии и интенсификации в зависимости от типа соединения обмотки, и ряда других практических аспектов. Нужно изучить вопросы по материалам лекций или любого учебника по курсу ТВН и быть готовыми ответить на них при защите ИДЗ.

Выбор варианта: номер варианта в таблице должен соответствовать номеру в списке группы в личном кабинете.

Не путать данные для разных вариантов.

- ИДЗ №2 представить в формате Word и прикрепить в электронный курс: «Техника высоких напряжений. А.В. Мытников». <https://stud.lms.tpu.ru/course/view.php?id=2332>, во вкладку с номером Вашей группы (в начале курса).
- защитить ИДЗ представив ответы на вопросы в электронном курсе или в ходе очной защиты.

ЗАДАНИЕ №1

Определить потери энергии на корону и среднегодовую мощность потерь для трехфазной линии переменного напряжения с горизонтальным расположением проводов.

Общий методический путь решения.

Для расчета потерь энергии на корону и среднегодовую мощность потерь на практике применяется метод предложенный профессором Левитовым В.И. В расчётах по указанному методу относительная плотность воздуха принимается равной 0,95 для всех вариантов. Данные по усредненной продолжительности различных групп погоды приведены в таблице 1.1.

Электрофизические процессы в короне и формирование потерь

Корона представляет интерес в связи с потерями энергии при коронировании ЛЭП. Например, на линиях сверхвысокого напряжения потери энергии при коронировании проводов ЛЭП в плохую погоду составляют 100–200 кВт на километр линии и более. Кроме этого, продукты ионизации воздуха разрушительно действуют на изоляцию и металлическую арматуру. Коронный разряд также является источником акустического шума и высокочастотного электромагнитного излучения (спектр частот 0,154–100 МГц), которое создает помехи радио- и телеприему.

При коронном разряде происходит ионизация воздуха и у поверхности провода образуется объемный заряд того же знака, что и полярность напряжения на проводе. Под действием сил электрического поля ионы, составляющие объемный заряд, движутся от провода. Для их передвижения необходимы затраты энергии, которые и определяют в основном потери энергии на корону, поскольку затраты энергии на ионизацию воздуха значительно меньше.

На постоянном напряжении различают униполярную и биполярную корону. Если коронирует один провод – униполярная корона. При униполярной короне генерируемые короной заряды, имеющие тот же знак, что и коронирующий провод, под действием электрического поля устремляются к земле, где происходит их нейтрализация. При биполярной короне объемные заряды проводов различной полярности движутся навстречу друг другу. При встрече происходит рекомбинация ионов разных знаков. Часть ионов проникает в пространство вблизи

противоположного провода, что приводит к усилению интенсивности коронирования. Это увеличивает потери на корону.

На переменном напряжении коронный разряд зажигается при достижении начального напряжения, равного напряжению зажигания короны U_H при времени t_1 (рис. 1.1, а). Вокруг провода образуется зона ионизации, называемая чехлом короны (рис. 1.1, в) Из чехла короны положительные заряды (как на рис. 1.1, в) выносятся в окружающее пространство и образуют внешний объемный заряд (ОЗ). Процесс коронирования продолжается до тех пор, пока напряжение не достигнет $U_{\text{макс}}$ при t_2 .

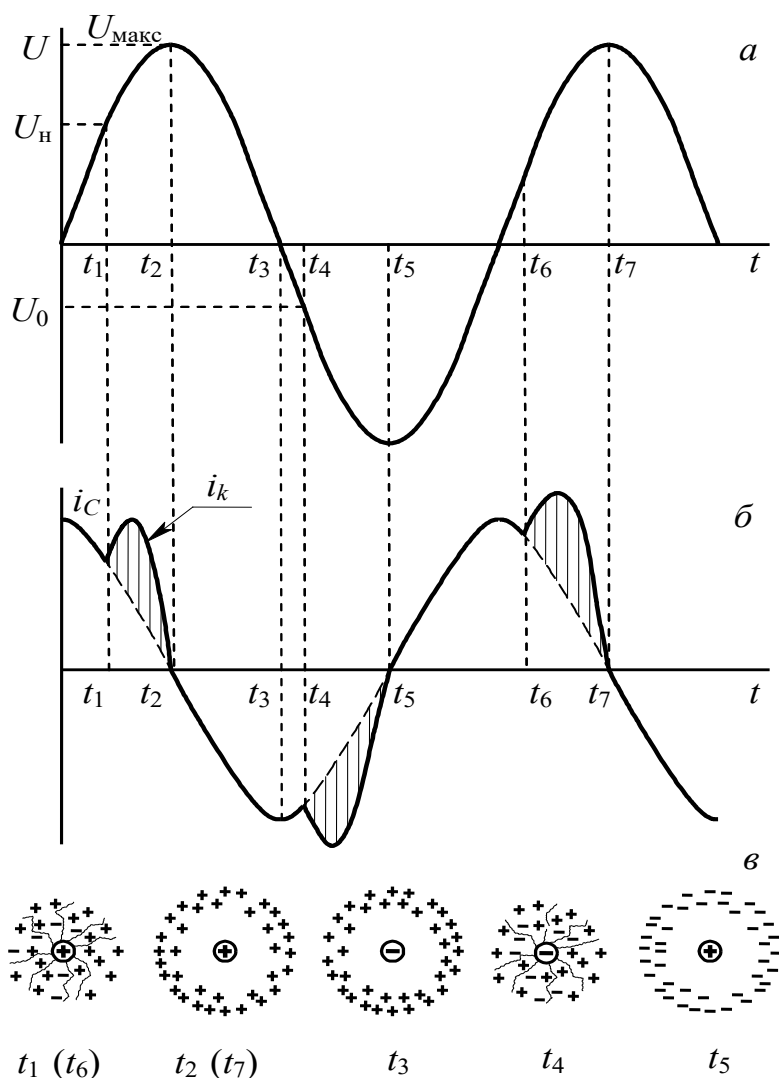


Рис. 1.1. Развитие короны при напряжении промышленной частоты

Несмотря на повышение напряжения до $U_{\text{макс}}$, напряженность на проводе остается постоянной и равной E_H из-за влияния объемного

заряда. Затем напряжение начинает снижаться. Синхронно снижается и напряженность на проводе, что приводит к погасанию короны. Но после погасания короны (после t_2) в пространстве вокруг провода остается положительный внешний объемный заряд, который еще удаляется от провода (рис. 1.1, в). Расстояние, на которое удаляется объемный заряд, зависит от напряжения на проводе и составляет $\sim 40\text{--}100$ см. Разность потенциалов между проводом и ОЗ увеличивается по мере уменьшения напряженности на проводе до времени t_3 . При t_4 (рис. 1.1, а, в), когда напряжение достигает U_0 , которое значительно меньше U_n , зажигается отрицательная корона. При этом отрицательно заряженные частицы начинают двигаться от провода во внешнюю область, а навстречу (к проводу) движутся положительно заряженные частицы из внешнего объемного заряда. Происходит рекомбинация заряженных частиц до полной компенсации положительного внешнего ОЗ. Затем накапливается отрицательный ОЗ во внешней области. Все это происходит за время от t_4 до t_5 (рис. 1.1, а, в). В момент времени t_5 (начало уменьшения напряжения) отрицательная корона гаснет. В дальнейшем все эти циклы повторяются и зажигание короны на обеих полярностях происходит при U_0 .

Между проводом и землей имеет место емкость C , которая заряжается и разряжается с частотой переменного тока. При этом между проводом и землей протекает емкостной ток i_C (рис. 1.1, б):

$$i_C = C \frac{du}{dt}.$$

Возникновение коронного разряда в момент t_1 приводит к появлению тока короны i_k , который накладывается на емкостный ток линии и искажает синусоиду тока (рис. 1.1, б). Длительность пиков тока короны равна длительности ее горения, т.е. от t_1 до t_2 (или $t_4\text{--}t_5$, $t_6\text{--}t_7$).

При переменном напряжении коронирование проводов более интенсивное, чем при постоянном напряжении, и при прочих равных условиях потери энергии на корону существенно больше.

На характеристики коронного, разряда – начальное напряжение, потери энергии, радиопомехи, шум – значительное влияние оказывают погодные условия. ***Атмосферные осадки резко снижают начальное напряжение возникновения короны.***

При проектировании ЛЭП пользуются расчетными зависимостями потерь энергии при коронировании.

Распространенной формулой для расчета потерь на корону на переменном напряжении является эмпирическая формула Пика для одиночного провода

$$P = \frac{24,1}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r_0}{S}} (U_{\phi} - U_{\kappa})^2 \cdot 10^{-5}, \text{ кВт/км}\cdot\text{фаза}$$

где: δ – относительная плотность воздуха; f – частота, Гц; r_0 – радиус одиночного провода, см; S – расстояние между проводами, см; U_{ϕ} – действующее значение фазного напряжения, кВ; U_{κ} – напряжение возникновения короны, кВ.

$$U_{\kappa} = 21,2 \cdot \delta \cdot \ln \frac{S}{r_0} \cdot m_1 \cdot m_2, \text{ кВ,}$$

где: m_1 – коэффициент гладкости провода;

m_2 – коэффициент погоды.

Для идеально гладкого провода $m_1 = 1$, для реального витого провода $m_1 = 0,85 \div 0,92$ (зависит от конфигурации провода).

Как правило, принимают $m_1 \times m_2 = 0,8$ – при плохой погоде.

На линиях электропередачи сверхвысокого напряжения для снижения потерь на корону используют расщепленные провода в фазах. Для определения потерь при коронировании для расщепленных проводов используют формулу Майра:

$$P_{\kappa} = k \cdot n \cdot f \cdot r_0^2 \cdot E_{\text{э}} (E_{\text{э}} - E_{\kappa}) \cdot \left(2,31 \lg \frac{1350 E_{\text{э}}}{f \cdot r_0} - 1 \right) \cdot 10^{-5},$$

где:

n – число проводов в фазе;

f – частота, Гц;

r_0 – радиус одиночного провода, см;

E_{κ} – напряженность возникновения короны, кВ/см;

$E_{\text{э}}$ – эквивалентная напряженность, кВ/см;

k – коэффициент погоды.

$$E_{\text{э}} = \frac{E_{\text{макс}} + E_{\text{ср}}}{2}.$$

Средняя напряженность для расщепленного провода:

$$E_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{ср}}}{n \cdot r_0 \cdot \ln \frac{S}{r_{\text{экв}}}}.$$

Максимальная напряженность:

$$E_{\text{макс}} = k_{\text{у}} \cdot E_{\text{ср}},$$

где:

$$k_y = 1 + (n - 1) \cdot \frac{r_{\text{ЭКВ}}}{r_p};$$

$r_{\text{ЭКВ}} = \sqrt[n]{n \cdot r_0 \cdot r_p^{n-1}}$ – эквивалентный радиус одиночного провода, имеющего ту же емкость, что и расщепленная фаза;
 r_p – радиус расщепления фазы.

Недостатком формулы Майра является то, что все многообразие погодных условий сводится к только к двум группам погоды: «хорошая» погода и «плохая» погода.

Метод, предложенный профессором Левитовым учитывает многообразие погодных условий и позволяет более точно выполнять расчёты потерь на корону.

Для оценочного подсчета среднегодовых потерь все погодные условия разбивают на 4 группы:

- 1) хорошая погода;
- 2) дождь (включая мокрый снег и морось);
- 3) сухой снег;
- 4) изморозь (включая гололед и иней).

Наибольшие потери в единицу времени возникают при изморози. Усредненная продолжительность различных групп погоды для средней полосы европейской части России и Западной Сибири приведены в таблице 1.1.

Этапы практического расчёта.

На первом этапе расчёта значение мощности определяется по формуле:

$$P = 350 \times \omega \cdot \frac{C^2}{C_{\text{Э}} - C} \cdot U_{\text{К}}^2 \cdot F(U_{\text{Ф}}/U_{\text{К}}), \quad (1)$$

где: $U_{\text{К}}$ - критическое напряжение возникновения короны на фазе для каждого вида погоды, **кВ**.

$$U_{\text{К}} = \frac{2 \times \pi \times \epsilon \times \epsilon_0 \cdot n \cdot \eta \cdot E_{\text{К}}}{K_y \cdot C}$$

где n - количество проводов в фазе;

K_y - коэффициент усиления. Этот параметр связан с **необходимостью расщепления проводов в фазе**, как способ снижения потерь на корону.

$$K_y = 7 + (n-1) - \frac{n_0}{r_p},$$

где r_0 - радиус одиночного провода, см.

r_p - радиус расщепления, см. Определяется по таблице 1.2.

E_k - критическая напряженность, при которой на фазе зажигается коронный разряд, кВ/см. E_k зависит от количества составляющих проводов в фазе и определяется как:

$$E_k = 23,3 \cdot m \times \delta \cdot \left[1 + \frac{0,62}{(r \cdot \delta)^{0,38}} \right]$$

где: для одиночного провода вместо r подставляется радиус одиночного провода r_0 ;

в то время как, для расщепленных проводов вместо r подставляется эквивалентный радиус $r_{\text{э}}$;

m - коэффициент гладкости провода. Данный параметр учитывает атмосферные условия и их влияние на возникновение короны.

Для хорошей погоды $m = 0,85$.

Для тумана $m = 0,7$.

Для инея, гололеда, изморози $m = 0,6$.

Для дождя $m = 0,5$ и мокрого снега $m = 0,1 - 0,3$

На практике m определяется с помощью графика, приведенного на рис. 1.2.

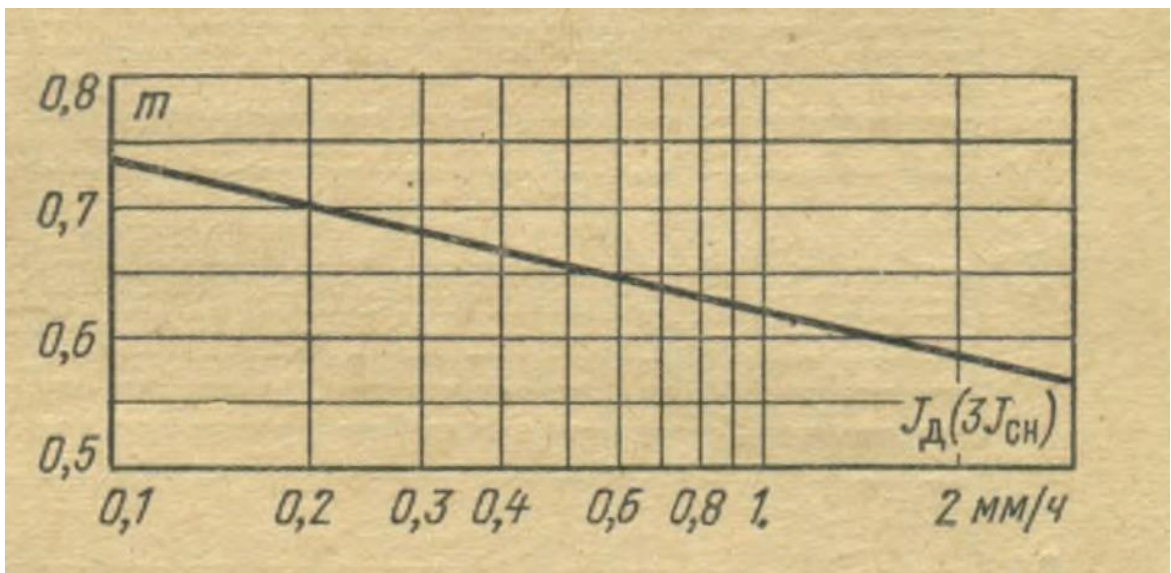


Рис. 1.2. Зависимость коэффициента гладкости m от средней интенсивности дождя или сухого снега.

$F(U_0/U_K)$ - функция, определяемая для каждого вида погоды по рисунку 1.3.

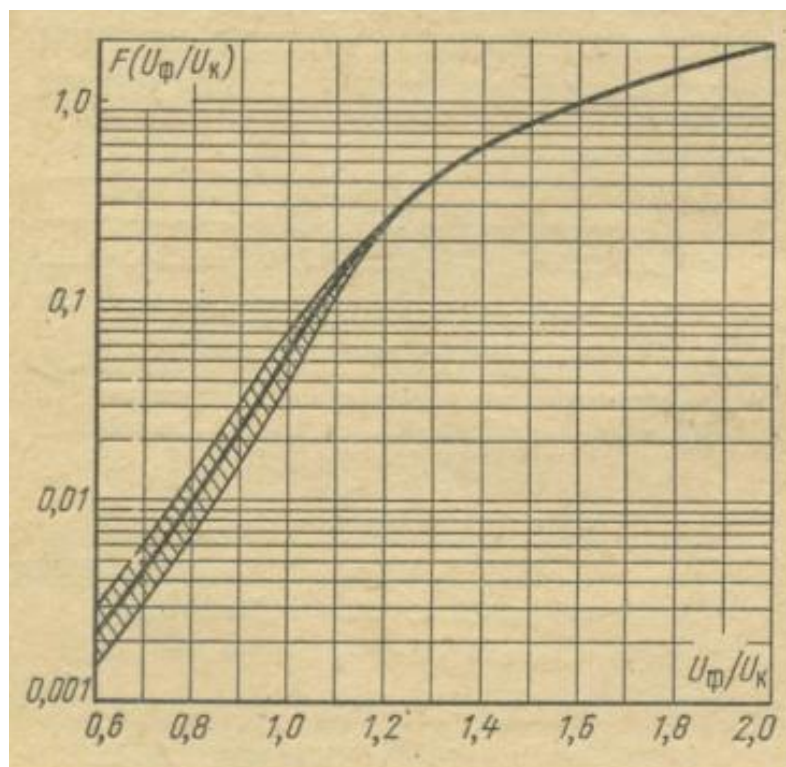


Рис. 1.3. Функция $F(U_0/U_K)$ в формуле (1) для определения потерь на корону.

$$U_{\Phi} = \frac{U_{\text{НОМ}} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} - \text{амплитуда фазного напряжения, кВ.}$$

C – рабочая емкость той фазы, на которой определяются потери:

$$C = \frac{2 \cdot \pi \times \epsilon \times \epsilon_0}{\ln \frac{d}{r_3}},$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-9}$ Ф/км - диэлектрическая проницаемость воздуха,
 d – среднее геометрическое расстояние между фазами, определяемое как:

$$d = \sqrt[3]{2 \cdot a^3} \approx 1,26 \cdot a,$$

где a – расстояние между соседними фазами в метрах.

Понять смысл параметров, используемых при расчёте, помогут диаграммы на рис. 1.4 и 1.5.

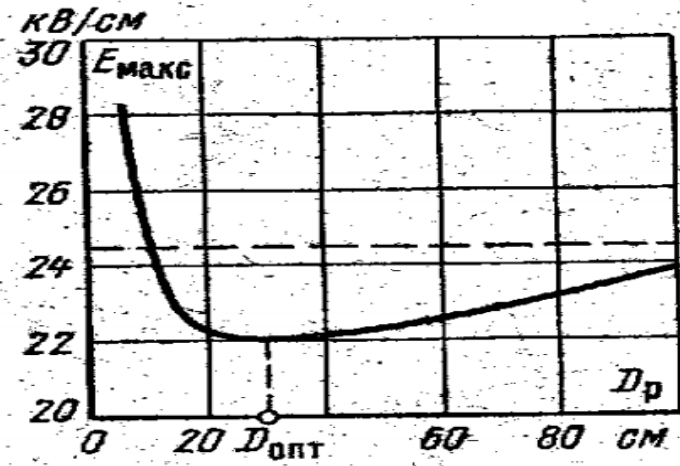


Рис. 1.4. Зависимость амплитуды максимальной напряженности поля от расстояния между проводами расщепленной фазы для линии 500 кВ (провод 3*АСО-480).

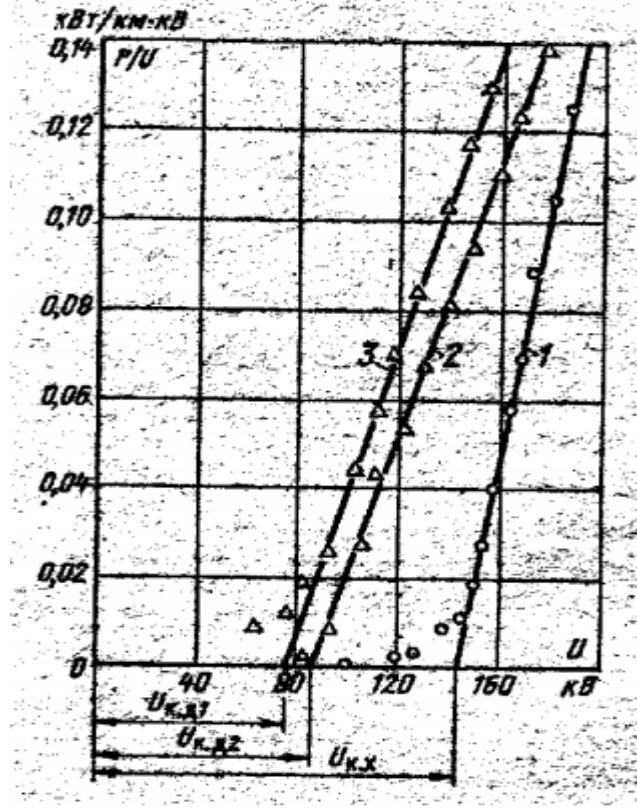


Рис. 1.5. Зависимость потерь на корону от действующего напряжения.

1 – хорошая погода, 2 – дождь с интенсивностью 1 мм/час, 3 – дождь с интенсивностью 36 мм/час.

Номер варианта	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$U_{НОМ}, КВ$	220	330	110	330	500	500	500	750	750	750
Число и марка	2, АС-240	2, АС-300	2, АС-100	2, АС-400	2, АС-480	2, АС-500	2, АС-480	2, АС-400	2, АС-700	2, АС-500
$r_0, см$	1,08	1,175	0,853	1,32	1,36	1,55	1,855	1,36	1,71	1,675
$D_p, см$	18	20	16	24	40	48	40	60	60	60
$a, м$	6	8	5	7,5	10	12	11	18	16	18
$h_{х.п.}, час$	7236	6565	3600	5000	7236	6581	3750	5400	7236	6500
$h_m, час$	370	410	520	475	372	425	520	475	385	420
$h_u, час$	220	280	375	300	220	280	370	320	220	280
$h_d, час$	410	660	1850	1040	415	750	2700	1240	360	630
$h_{СН}, час$	525	810	2060	1750	505	720	1560	1700	575	840
$J_d, мм/ч$	0,2	0,3	0,8	0,5	0,25	0,4	0,9	0,75	0,2	0,3
$3J_{СН}, мм/ч$	0,8	0,2	0,3	0,2	0,7	0,3	0,2	0,1	0,8	0,3
Номер варианта	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$U_{НОМ}, КВ$	220	330	330	330	500	500	500	750	750	750

Число и марка	2, AC-150	2, AC-240	2, AC-300	2, AC-400	2, AC-480	2, AC-500	2, AC-480	2, AC-400	2, AC-500	2, AC-700
r_0, см	1,02	1,05	1,08	1,35	1,36	1,51	1,855	1,36	1,51	1,855
D_p, см	18	20	20	20	40	40	40	60	60	60
a, м	6,0	7,5	7,5	7,5	10,5	10,5	10,5	16,5	16,5	16,5
$h_{х.п.}$, час	7235	6580	3800	5100	7235	6580	3800	5100	7235	6580
h_m, час	375	420	530	485	375	440	530	485	375	450
h_u, час	225	290	380	330	225	270	380	330	225	260
h_d, час	400	630	2016	1045	425	777	2500	1245	360	630
$h_{сн}$, час	525	840	2034	1800	500	693	1550	1600	565	840
J_d, мм/ч	0,3	0,3	0,9	0,5	0,2	0,4	0,9	0,55	0,7	0,4
$3J_{сн}$, мм/ч	0,7	0,4	0,1	0,2	0,8	0,3	0,1	0,2	0,3	0,3





$h_{х.п.}$, h_m , h_u , h_d , $h_{сн}$ - продолжительность хорошей погоды, тумана, инея, дождя, сухого снега, соответственно, выраженная в **часах**.

J_d и $J_{сн}$ – интенсивность дождя и снега соответственно в **мм/ч**

При горизонтальном расположении проводов емкость первой и третьей фаз равны, а емкость средней фазы на 5 % больше.

Параметр $r_{\text{э}}$ – эквивалентный радиус расщепленного провода в см. Определяется из таблицы 1.3.

Таблица 1.3.
Эквивалентные радиусы и коэффициент усиления поля для
расщепленных проводов различных типов

Характеристика провода	Эскиз расщепленного провода			
				
Число проводов в фазе	2	3	4	6
Радиус расщепления r_p	$\frac{D_p}{2}$	$\frac{D_p}{\sqrt{3}}$	$\frac{\sqrt{2}}{2} D_p$	D_p
Эквивалентный радиус $r_э$	$\sqrt{r D_p}$	$\sqrt[3]{r D_p^2}$	$\sqrt[4]{2} \sqrt[4]{r D_p^3}$	$\sqrt[6]{6} \sqrt[4]{r D_p^3}$
$k_y = \frac{E_{\max}}{E_{\text{ср}}}$	$1 + 2 \frac{r}{D_p}$	$1 + 2\sqrt{3} \frac{r}{D_p}$	$1 + 3\sqrt{2} \frac{r}{D_p}$	$1 + 5 \frac{r}{D_p}$

При решении Задачи №1 допускается выбор числа проводов в фазе для снижения уровня потерь на корону.

Ограничений – нет.

Однако, необходимо обязательно обосновать выбор числа проводов в фазе независимо от класса напряжения линии и стандартных указаний.

C_{Σ} – эквивалентная емкость объемного заряда короны, Ф/км.

$$C_{\Sigma} = \frac{2 \cdot \pi \times \epsilon \times \epsilon_0}{\ln \frac{\sqrt{r_p^2 + 2,5 \cdot K \cdot C \cdot U_K / \delta \times \epsilon \times \epsilon_0 \times \omega}}{r_{\Sigma}}},$$

где r_p – радиус расщепления в см. Определяется из таблицы 1.3.

K – подвижность ионов.

Для тумана, дождя, мокрого и сухого снега $K = 1100 \text{ см}^2/\text{кВс}$.

Для хорошей погоды, инея, гололеда, изморози $K = 2200 \text{ см}^2/\text{кВс}$.

δ – относительная плотность воздуха;

ω – круговая частота.

Расчет потерь на корону на 1 км линии за 1 год обозначаемый как A выраженный в кВт час/км, проводится по формуле:

$$A = P_{\text{Х.П.}} \cdot h_{\text{Х.П.}} + P_{\text{Т}} \cdot h_{\text{Т}} + P_{\text{И}} \cdot P_{\text{И}} + P_{\text{Д}} \cdot h_{\text{Д}} + P_{\text{СН}} \cdot h_{\text{СН}}$$

Средняя мощность потерь на корону за год в кВт/км определяется как:

$$P_{\text{СР}} = A / 8760.$$

ЗАДАНИЕ 2

Рассчитать и представить графически структуру волнового процесса в обмотках высоковольтного силового трансформатора.

А именно: кривую емкостного (начального) распределения напряжения (U_C), кривую максимальных потенциалов ($U_{\text{МАКС}}$) вдоль обмотки трансформатора, при воздействии прямоугольной (длительность фронта = 0) бесконечно длинной волны напряжения с амплитудой U_0 . Общее число элементов схемы замещения обмотки трансформатора – N , число элементов, для которых определяются величины U_C и $U_{\text{МАКС}}$ равно n . Емкость одного элемента на землю – ΔC , собственная емкость каждого элемента вдоль обмотки трансформатора – ΔK .

Значения основных параметров и режим нейтрали трансформатора приведены в таблице 2.1.

Методический путь решения.

Начальное распределение напряжения вдоль обмотки трансформатора определяется как:

$$U_{C(n)} = U_0 \cdot e^{-\alpha n / N},$$

где:

$$\alpha N = N \cdot \sqrt{\frac{\Delta C}{\Delta K}},$$

где: $N=10; n=0,1,2...10$.

Максимальное напряжение в любой точке трансформатора определяется как:

$$U_{\text{МАКС}}\left(\frac{n}{N}\right) = U_{\text{УСТ}}\left(\frac{n}{N}\right) + \left[\sum U_K \cdot \left(\frac{n}{N}\right) \right].$$

Амплитуда гармоник при заземленной нейтрали трансформатора определяется по формуле:

$$U_{K\text{МАКС}} = \frac{2 \cdot U_0}{K \cdot \pi \cdot \left[1 + \left(\frac{K \cdot \pi}{\alpha \cdot N} \right)^2 \right]},$$

где: $K = 1,2,3$.

Амплитуда гармоник в случае изолированной нейтрали трансформатора определяется по формуле:

$$U_{K\text{МАКС}} = \frac{4 \cdot U_0}{\pi \cdot (2k - 2) \left\{ 1 + \left[\frac{\pi \cdot (2k - 1)}{\alpha \cdot N} \right]^2 \right\}},$$

где: $k = 1,3,5$.

Далее рассчитывается амплитуда гармоник и строится график.

При построении кривой максимальных потенциалов для случая трансформатора с заземленной нейтралью строят 1,2,3 гармоники таким образом, чтобы в начале ($n/N=0$) и в конце ($n/N=1$) обмотки определяются их нулевые значения, т.е. на длине обмотки трансформатора укладывается целое число полувольт (полупериодов), равное номеру соответствующей гармоники.

Для случая трансформатора с изолированной нейтралью строят 1,3 и 5 гармоники таким образом, чтобы в начале обмотки ($n/N=0$) определяются их нулевые значения, а в конце обмотки ($n/N=1$) определяются их максимальные значения, т.е. на длине обмотки трансформатора укладывается целое нечетное число четвертей периода, равное номеру соответствующей гармоники. В каждой точке обмотки (n/N) суммируются ординаты всех гармоник, и затем эта сумма складывается с обратным знаком с $U_{\text{УСТ}}$ в данной точке обмотки.

Таблица 2.1.

Значения основных параметров и режим нейтрали для расчета параметров волнового процесса в обмотках трансформатора.

№ варианта	U_0 , %	N , шт	ΔC , пФ	ΔK , пФ	Режим нейтрали
1	100	30	225	2500	заземлена
2	100	30	275	1100	изолирована
3	100	10	275	1100	изолирована
4	100	20	275	1100	заземлена
5	100	10	540	1500	заземлена
6	100	30	168	1050	изолирована
7	100	10	980	2000	изолирована
8	100	20	980	2000	заземлена
9	100	20	168	1050	изолирована
10	100	10	168	1050	заземлена
11	100	10	225	1100	заземлена
12	100	20	360	1200	заземлена
13	100	10	540	1800	заземлена
14	100	20	216	1500	изолирована
15	100	10	900	2000	заземлена
16	100	20	275	1600	заземлена
17	100	30	540	2200	изолирована
18	100	20	324	1050	заземлена
19	100	10	168	1800	заземлена
20	100	10	480	1100	заземлена
21	100	10	216	2100	заземлена
22	100	20	980	2500	изолирована
23	100	10	360	2000	изолирована
24	100	20	275	1100	заземлена
25	100	10	225	1050	заземлена
26	100	20	500	1200	изолирована
27	100	10	360	2500	заземлена
28	100	10	216	2800	заземлена
29	100	10	324	2700	изолирована
30	100	10	360	3000	изолирована

Основная литература:

1. Важов В.Ф., Кузнецов Ю.И., Куртенков Г.Е., Лавринович В.А., Лопатин В.В., Мытников А.В. Техника высоких напряжений. Учебное пособие. Томск, Изд-во ТПУ, 2013. – 232 с.
2. Техника высоких напряжений / Под ред. Д.В. Разевига.- М.: Энергия, 1976.-488с.
3. Техника высоких напряжений / Под ред. М.В. Костенко. - М.: Высшая школа, 1973.- 528 с.

4. Мирдель Г. Электрофизика. – М.: Мир, 1972. – 608 с.
5. Байер М., Бек В. и др. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 555с.
6. Ларионов В.П., Базуткин В.В., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений. - Энергоатомиздат, 1986. - 464с.