

Методические указания
по выполнению расчетно-графической работы
по курсу «Электромагнитная совместимость в электроэнергетике»

Факультет Энергетики

Автор: к.т.н. Нестеров С.В.

Кафедра: Учебно-научная лаборатория
электротехнического материаловедения

Новосибирск 2011

Общие требования к выполнению работы и к оформлению отчета

1. Отчет по работе оформляется на листах формата А4, на одной стороне листа. На первом (титульном листе) указывается название университета, кафедры, предмета, название (тема) РГР, номер варианта и год выполнения работы. Также указывается Ф.И.О. преподавателя, специальность (группа), Ф.И.О. студента. Отчет может быть как рукописным, так и машинописным.

2. Отчет должен содержать:

- полный текст задания;
- описательную часть поставленной задачи;
- расчетные схемы (фильтра, расположения опор и т.п.);
- все промежуточные результаты расчетов с указанием единиц измерения;
- графические результаты расчетов (АЧХ, кривые распределения наведенных напряжений, напряженностей поля и т.п.);
- выводы по работе.

3. Расчет производится в комплексных величинах, обязательно указывать единицы измерений.

4. При использовании дополнительной литературы указать ссылки и привести список литературы.

Темы расчетно-графических работ:

- 1** - Анализ пассивных частотных фильтров
- 2** - Влияние ВЛ на смежные коммуникации
- 3** - Расчет электромагнитного поля ВЛ

1. Анализ пассивных частотных фильтров

1.1 Задание

Для анализа задан тип, порядок и структура пассивного частотного фильтра с определенными номиналами его элементов и сопротивлений генератора Z_Q и нагрузки Z_S .

Состав работы:

1. Объясните принцип работы частотных фильтров, области их применения.
2. Нарисуйте заданную схему фильтра и обозначьте на ней номиналы элементов.
3. Рассчитайте и постройте АЧХ фильтра в диапазоне частот 10 Гц..100 кГц. Масштаб по оси частот – логарифмический.
4. По графику АЧХ фильтра определите и укажите частоту среза, произведите расчет крутизны спада АЧХ в полосе подавления.
5. Определите частоты, на которых исходный синусоидальный сигнал будет ослаблен фильтром в 100 и 1000 раз.
6. Рассчитайте и постройте АЧХ при заданном изменении номиналов элементов фильтра - при заданном увеличении или уменьшении емкости C или индуктивности L .
7. Опишите влияние изменения номиналов элементов на характеристики фильтра.

Варианты заданий

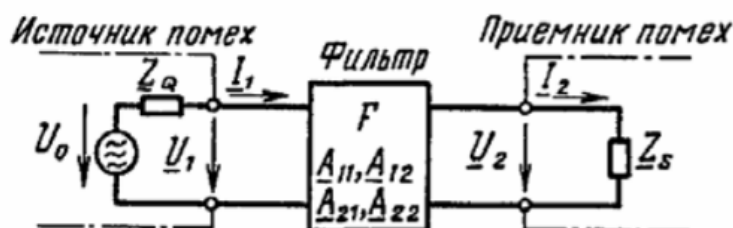
Вар.	Тип фильтра	Порядок/ Структура	Z_Q , Ом	Z_S , Ом	$L1$, мГн	$C1$, нФ	$L2$, мГн	$C2$, нФ	Изменение номиналов
1	ФНЧ	3 / Т	75	75	11,9	4244	11,9	-	0,1*L1
2	ФНЧ	3 / Т	100	100	7,96	1592	7,96	-	10*L1
3	ФНЧ	3 / П	750	750	-	70,7	79,6	70,7	0,1*C1
4	ФНЧ	3 / П	1000	1000	-	39,8	79,6	39,8	10*C1
5	ФНЧ	3 / Т	75	75	2,98	1061	2,98	-	0,2*L2
6	ФНЧ	3 / Т	100	100	5,3	1061	5,3	-	5*L2
7	ФНЧ	3 / П	750	750	-	106,1	119,4	106,1	0,2*C2
8	ФНЧ	3 / П	1000	1000	-	159,1	318,3	159,1	5*C2
9	ФНЧ	2 / Г	75	75	-	3000	16,9	-	0,25*C1
10	ФНЧ	2 / Г	750	750	84,4	150,1	-	-	0,25*L1
11	ФВЧ	3 / Т	75	75	-	707,4	1,99	707,4	0,1*C1
12	ФВЧ	3 / Т	100	100	-	397,8	1,99	397,8	10*C1
13	ФВЧ	3 / П	750	750	23,9	21,2	23,9	-	0,1*L2
14	ФВЧ	3 / П	1000	1000	26,5	13,3	26,5	-	10*L2
15	ФВЧ	3 / Т	75	75	-	356,7	0,995	353,7	0,2*C2
16	ФВЧ	3 / Т	100	100	-	318,3	1,59	318,3	5*C2
17	ФВЧ	3 / П	750	750	29,8	26,5	29,8	-	0,2*L1
18	ФВЧ	3 / П	1000	1000	53,1	26,5	53,1	-	5*L1
19	ФВЧ	2 / Г	75	75	4,22	750,3	-	-	5*C1
20	ФВЧ	2 / Г	750	750	-	150	84,4	-	5*C1
21	ФНЧ	3 / Т	75	75	15,9	5659	15,9	-	0,1*L1
22	ФНЧ	3 / Т	100	100	31,8	6366	31,8	-	10*L1
23	ФНЧ	3 / П	750	750	-	282,9	318,3	282,9	0,1*C1
24	ФНЧ	3 / П	1000	1000	-	159,1	318,3	159,1	10*C1
25	ФВЧ	3 / Т	75	75	-	1061	2,98	1061	0,1*L2
26	ФВЧ	3 / Т	100	100	-	530,5	2,65	530,5	10*L2
27	ФВЧ	3 / П	750	750	17,1	15,16	17,1	-	0,1*C1
28	ФВЧ	3 / П	1000	1000	26,5	13,3	26,5	-	10*C1
29	ФНЧ	2 / Г	75	75	1,69	300,1	-	-	0,1*L1
30	ФНЧ	2 / Г	750	750	-	37,5	21,1	-	10*L2

1.2 Указания к выполнению работы

1.2.1 Составление схемы фильтра.

В соответствии с заданием (заданы структура, порядок и тип фильтра) следует составить принципиальную схему фильтра и отметить на ней номиналы ее элементов. Общее правило при составлении схемы фильтра – в ФНЧ индуктивности включены последовательно с сигналом, емкости – на землю, в ФВЧ – наоборот. В качестве сопротивлений генератора и нагрузки используются чисто активные сопротивления. Порядок следования элементов в фильтре определен в задании наличием или отсутствием значений номиналов его элементов.

Для анализа и выполнения расчетов удобно представление фильтра в виде четырехполюсника F:



1.2.2 Расчет фильтра

Если представить фильтр в виде четырехполюсника, то его коэффициент пропускания, выраженный в дБ, определяется по выражению:

$$a_e = -20 \lg \left| \frac{Z_S}{Z_Q + Z_S} \dot{A}_{11} + \frac{1}{Z_Q + Z_S} \dot{A}_{12} + \frac{Z_Q Z_S}{Z_Q + Z_S} \dot{A}_{21} + \frac{Z_Q}{Z_Q + Z_S} \dot{A}_{22} \right|, \quad * (1.1)$$

где Z_Q – сопротивление источника (генератора) сигнала, Z_S – сопротивление нагрузки.

* под логарифмом – модуль комплексного числа.

Параметры четырехполюсников, соответствующие структура и порядок используемых в работе фильтров приведены в таблице:

Структура, порядок	Схема	Коэффициент			
		$\dot{A}_{11}$	$\dot{A}_{12}$	$\dot{A}_{21}$	$\dot{A}_{22}$
Г 2		$1 + \dot{Z}_1 / \dot{Z}_0$	$\dot{Z}_1$	$1 / \dot{Z}_0$	1
Г 2		1	$\dot{Z}_2$	$1 / \dot{Z}_0$	$1 + \dot{Z}_2 / \dot{Z}_0$
Т 3		$1 + \dot{Z}_1 / \dot{Z}_0$	$\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \frac{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2}{\dot{Z}_0}$	$1 / \dot{Z}_0$	$1 + \dot{Z}_2 / \dot{Z}_0$
П 3		$1 + \dot{Z}_0 / \dot{Z}_2$	$\dot{Z}_0$	$1 / \dot{Z}_1 + 1 / \dot{Z}_2 + \frac{\dot{Z}_0}{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2}$	$1 + \dot{Z}_0 / \dot{Z}_1$

По таблице и соответствующей схеме фильтра следует определить формулы для коэффициентов четырехполюсника A_{11} , A_{12} , A_{21} , A_{22} и подставить их в формулу (1.1).

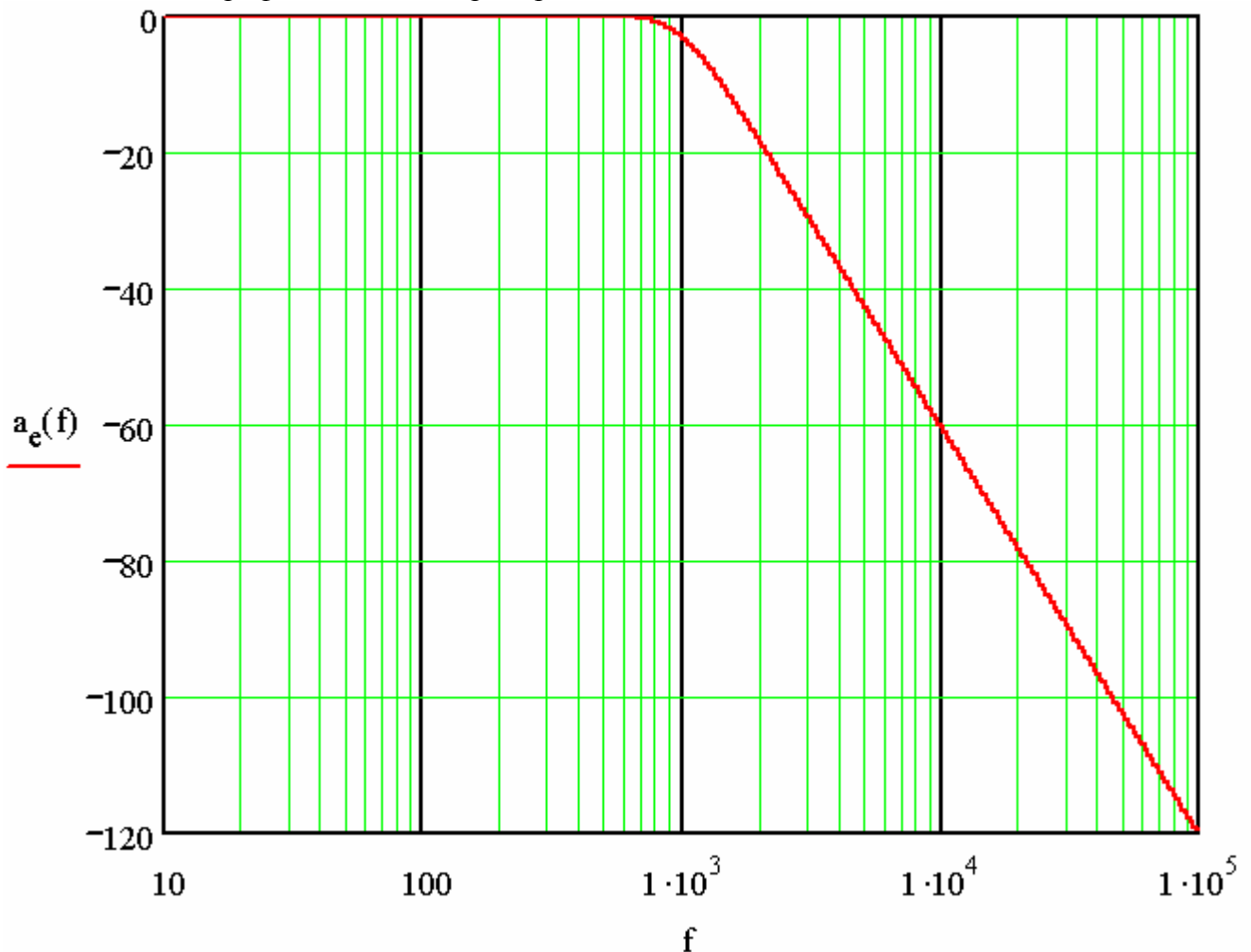
В качестве комплексных сопротивлений элементов фильтра Z_0 , Z_1 и Z_2 принимаются реактивные сопротивления соответствующих схеме элементов – индуктивностей и емкостей:

$$X_L = j\omega L, \quad X_C = \frac{1}{j\omega C}, \quad \omega = 2\pi f,$$

где f – частота, Гц.

По полученному выражению следует произвести расчет коэффициента пропускания в заданном диапазоне частот. Рекомендуемые для расчета значения частот: 10, 100, 200, 500 Гц, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 кГц.

По рассчитанным значениям коэффициента пропускания строится АЧХ фильтра (масштаб по оси частот – логарифмический), например АЧХ ФНЧ:



На полученном графике АЧХ отмечается частота среза, определяемая при отклонении АЧХ на -3 дБ от максимального значения коэффициента пропускания фильтра. Крутизна спада АЧХ определяется на линейном участке АЧХ в полосе подавления в децибелах (дБ) при двойном изменении частоты (одна октава). Следует соотнести полученную крутизну спада АЧХ с порядком фильтра.

Затем аналогично следует провести расчет АЧХ фильтра при изменении номиналов элементов фильтра – изменении заданной емкости или индуктивности. Полученную при этом АЧХ следует построить на том же графике, где построена исходная АЧХ и описать различия этих АЧХ.

2. Влияние ВЛ на смежные коммуникации

2.1 Задание

Дан участок параллельного следования ВЛ и линии связи (ЛС). Линия связи полностью изолирована от земли, длина участка параллельного следования (сближения) задана. Габариты опор определяются по чертежу для соответствующего класса напряжения ВЛ. Грозотрос ВЛ при расчете не учитывать. Токи нагрузки и ток КЗ в аварийном режиме ВЛ заданы.

Состав работы:

1. Объясните причины и последствия появления напряжения, наводимого на смежные коммуникации при емкостном и индуктивном влиянии ВЛ.

2. Рассчитайте напряжение, наводимое электрическим полем ВЛ на ЛС при изменении расстояния между осями ВЛ и ЛС от -100 м до 100 м.

3. Рассчитайте напряжение, наведенное магнитным полем ВЛ на ЛС при изменении расстояния между осями ВЛ и ЛС от -100 м до 100 м.

4. Расчет в каждом случае произведите для нормального и аварийного режима работы ВЛ. Для индуктивного влияния расчетный аварийный режим - однофазное КЗ на ближней к ЛС фазе, для емкостного влияния аварийный режим ВЛ – обесточивание (обрыв) двух дальних от ЛС фаз.

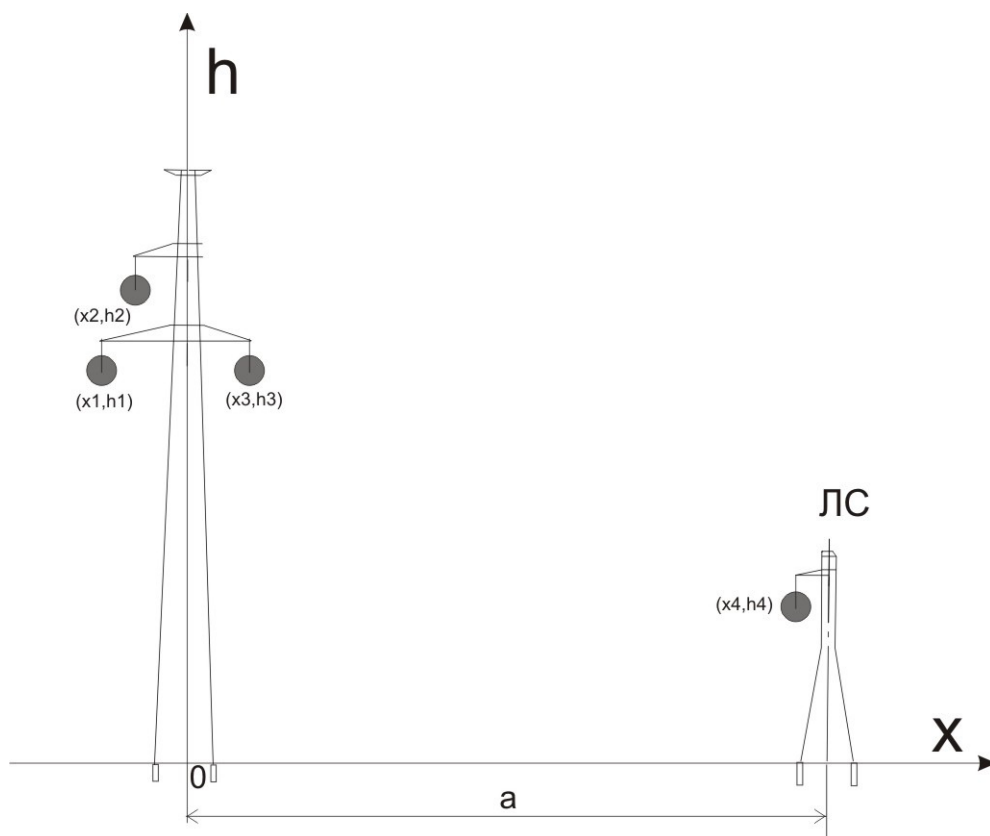
Варианты заданий

Вар.	Класс напряжения ВЛ	Средняя высота провода ЛС, м	Ток нагрузки, А	Ток КЗ, кА	Эквивалентный радиус провода фазы ВЛ, м	Длина участка сближения, км	Удельное сопротивление грунта, Ом
1	35 кВ	3,0	100	1,0	0,005	20,0	100
2	110 кВ	3,0	150	1,5	0,0095	20,0	150
3	220 кВ	3,0	200	2,0	0,012	20,0	200
4	330 кВ	3,0	250	2,5	0,09	10,0	250
5	500 кВ	3,0	300	3,0	0,15	10,0	300
6	750 кВ	3,0	350	3,5	0,22	10,0	350
7	1150 кВ	3,0	500	5,0	0,7	5,0	400
8	35 кВ	4,0	50	2,0	0,005	40,0	450
9	110 кВ	4,0	75	3,0	0,0095	40,0	500
10	220 кВ	4,0	100	4,0	0,012	40,0	550
11	330 кВ	4,0	125	5,0	0,09	20,0	600
12	500 кВ	4,0	150	6,0	0,15	20,0	650
13	750 кВ	4,0	175	7,0	0,22	20,0	700
14	1150 кВ	4,0	250	8,0	0,7	10,0	750
15	35 кВ	3,5	75	3,0	0,01	15,0	700
16	110 кВ	3,5	100	4,0	0,02	15,0	650
17	220 кВ	3,5	150	5,0	0,024	15,0	600
18	330 кВ	3,5	200	6,0	0,12	7,5	550
19	500 кВ	3,5	250	7,0	0,18	7,5	500
20	750 кВ	3,5	300	8,0	0,25	7,5	450
21	1150 кВ	3,5	350	9,0	0,8	7,5	400
22	35 кВ	4,5	150	0,5	0,01	100,0	350
23	110 кВ	4,5	200	1,0	0,02	100,0	300
24	220 кВ	4,5	250	2,0	0,024	100,0	250
25	330 кВ	4,5	300	3,0	0,12	100,0	200
26	500 кВ	4,5	350	4,0	0,18	50,0	150
27	750 кВ	4,5	400	5,0	0,25	40,0	100
28	1150 кВ	4,5	450	6,0	0,8	30,0	50

Вар.	Класс напряжения ВЛ	Средняя высота провода ЛС, м	Ток нагрузки, А	Ток КЗ, кА	Эквивалентный радиус провода фазы ВЛ, м	Длина участка сближения, км	Удельное сопротивление грунта, Ом/м
29	35 кВ	2,5	200	4,0	0,005	75,0	75
30	110 кВ	2,5	300	5,0	0,0095	75,0	150
31	220 кВ	2,5	400	6,0	0,012	150,0	300
32	330 кВ	2,5	100	5,0	0,09	150,0	350
33	500 кВ	2,5	100	4,0	0,15	300,0	450
34	750 кВ	2,5	200	3,0	0,22	200,0	650
35	1150 кВ	2,5	200	2,0	0,7	100,0	800

2.2 Указания к выполнению работы

2.2.1 Составление расчетной схемы. По заданному классу напряжения выберите соответствующий чертеж опоры (приложение 1). Учитывая длину гирлянды изоляторов (приложение 2), определите высоты подвеса проводов фаз на опоре. Отложить ось X вдоль поверхности земли, на которой отметить координату x каждого фазного провода ВЛ и диапазон изменения координаты x , соответствующий различным расстояниям между осью ВЛ и проводом ЛС. Нуль оси X соответствует оси ВЛ. Отложить вертикальную ось h , на которой отметить координату h каждого фазного провода ВЛ и провода ЛС. Указать номера фаз (принять по чертежу опоры - приложение 1).



Стрела провеса провода ВЛ $f_{ПР}$ принимается равной 35% от высоты подвеса проводов на опоре. Средняя высота провода ВЛ над землей равняется $h = h_{оп} - \frac{2}{3} f_{ПР}$, где $h_{оп}$ – высота подвеса провода на опоре.

2.2.2 Расчет потенциала, наводимого электрическим полем ВЛ на линию связи

2.2.2.1 Определение собственных и взаимных потенциальных коэффициентов.

Связь между потенциалом U_1 тела O_1 и зарядами τ двух тел определяется отношением:

$$U_1 = \alpha_{11}\tau_1 + \alpha_{12}\tau_2,$$

где α_{11} и α_{12} – собственный и взаимный потенциальный коэффициенты, зависящие от геометрических характеристик тела.

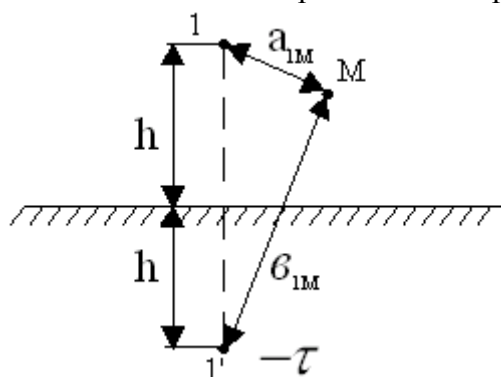
Аналогично можно записать для второго тела (объекта O_2)

$$U_2 = \alpha_{21}\tau_1 + \alpha_{22}\tau_2.$$

В системе заряженных n тел имеет место аналогичное взаимное влияние, поэтому в общем случае можно записать в матричной форме

$$U = \alpha \tau.$$

Потенциальные коэффициенты определяются на основе метода зеркальных отражений, в котором помимо источника поля 1 вводится еще его зеркальное изображение 1':



Для расчета требуется определить собственные и взаимные потенциальные коэффициенты проводов фаз ВЛ и провода ЛС, используя следующие выражения:

$$\alpha_{nn} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_n}{r_n},$$

где r_n – радиус провода или эквивалентный радиус для расщепленной фазы, м, h_n – средняя высота подвеса провода n над землей, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

$$\alpha_{nm} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{b_{nm}}{a_{nm}},$$

где a_{nm} – расстояние от фазного провода ВЛ или провода ЛС m до провода фазы n , b_{nm} – расстояние от провода фазы ВЛ или провода ЛС m до зеркального изображения фазы n .

Определение расстояний производится по выражениям:

$$a_{nm} = \sqrt{(h_n - h_m)^2 + (x_n - x_m)^2}$$

$b_{nm} = \sqrt{(h_n + h_m)^2 + (x_n - x_m)^2}$, где h – средняя высота провода над землей, x – координата провода по оси X .

2.2.2.2 Расчет зарядов проводов фаз ВЛ. Для определения зарядов τ на проводах фаз ВЛ требуется найти решение системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) следующего вида:

$$\begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{12} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{13} & \alpha_{23} & \alpha_{33} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \dot{\tau}_1 \\ \dot{\tau}_2 \\ \dot{\tau}_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3 \end{vmatrix}$$

Здесь индексами 1,2 и 3 обозначены фазы ВЛ, коэффициенты $\alpha_{11} - \alpha_{33}$ – собственные и взаимные потенциальные коэффициенты проводов фаз ВЛ. U_1, U_2, U_3 – фазные напряжения проводов ВЛ, равные:

$$\dot{U}_1 = -\frac{U_{ном}}{\sqrt{3}}; \quad \dot{U}_2 = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}}(0,5 + j0,87); \quad \dot{U}_3 = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}}(0,5 - j0,87).$$

* Расчет ведется в комплексной форме, величины зарядов проводов фаз – комплексные.

2.2.2.3 Потенциал на проводе ЛС, наводимый всеми тремя фазами (в нормальном режиме работы ВЛ) определяется по выражению:

$$\dot{\phi}_M = \alpha_{1M} \dot{\tau}_1 + \alpha_{2M} \dot{\tau}_2 + \alpha_{3M} \dot{\tau}_3,$$

2.2.2.4 Потенциал на проводе ЛС, наводимый одной фазой в аварийном режиме:

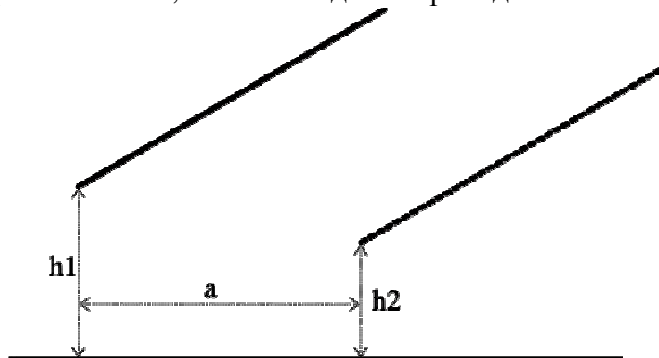
$$\dot{\phi}_M = \alpha_{nM} \dot{\tau}_n,$$

где n – номер фазы, оставшейся под напряжением.

2.2.2.5 Расчет наведенного потенциала на проводе ЛС следует произвести для всего заданного диапазона изменения расстояния между осью ВЛ и осью ЛС. При этом изменяются соответствующие расстояния в выражении для определения взаимного потенциального коэффициента провод фазы ВЛ – провод ЛС α_{nM} . Полученные значения наведенного потенциала следует построить на графике в виде кривой зависимости модуля наведенного потенциала от расстояния между осями ВЛ и ЛС.

2.2.3 Расчет напряжения, наводимого магнитным полем ВЛ на линию связи

2.2.3.1 Определение взаимных индуктивностей. Пусть даны два провода, расположенные параллельно друг другу на расстоянии a , высоты подвеса проводов – $h1$ и $h2$:



Расчет взаимной индуктивности между этими двумя проводами при условии возврата обратного тока во влияющем проводе через землю производится по выражению:

$$M = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{\sqrt{a^2 + (h_1 + h_2 + 800 \sqrt{\frac{\rho}{f}})^2}}{\sqrt{a^2 + (h_1 - h_2)^2}}, \text{ Гн/м} \quad (2.1)$$

где:

- $h1$ – средняя высота подвеса влияющего провода, м
- $h2$ – средняя высота подвеса провода, подверженного влиянию, м
- a – расстояние между проводами по горизонтали, м

- ρ – удельное сопротивление грунта, Омм
- f – частота тока, Гц

По выражению (2.1) следует рассчитать взаимную индуктивность между каждым из фазных проводов ВЛ и проводом ЛС.

2.2.3.2. Расчет ЭДС, наводимой ВЛ на ЛС в нормальном режиме:

$$\dot{E}_{3\phi} = L \cdot (\dot{I}_A \cdot j\omega M_A + \dot{I}_B \cdot j\omega M_B + \dot{I}_C \cdot j\omega M_C),$$

где

I_A, I_B, I_C – токи нагрузки в фазных проводах ВЛ, А:

$$\dot{I}_1 = -I_H; \quad \dot{I}_2 = I_H(0,5 + j0,87); \quad \dot{I}_3 = I_H(0,5 - j0,87)$$

M_A, M_B, M_C – взаимные индуктивности между каждой из фаз и однопроводной линией, Гн/м,
 L – длина участка сближения, м.

2.2.32.3. Расчет наведенной ЭДС в аварийном режиме:

$$E_{K3} = L \cdot I_{K3} \cdot j\omega M_1,$$

где

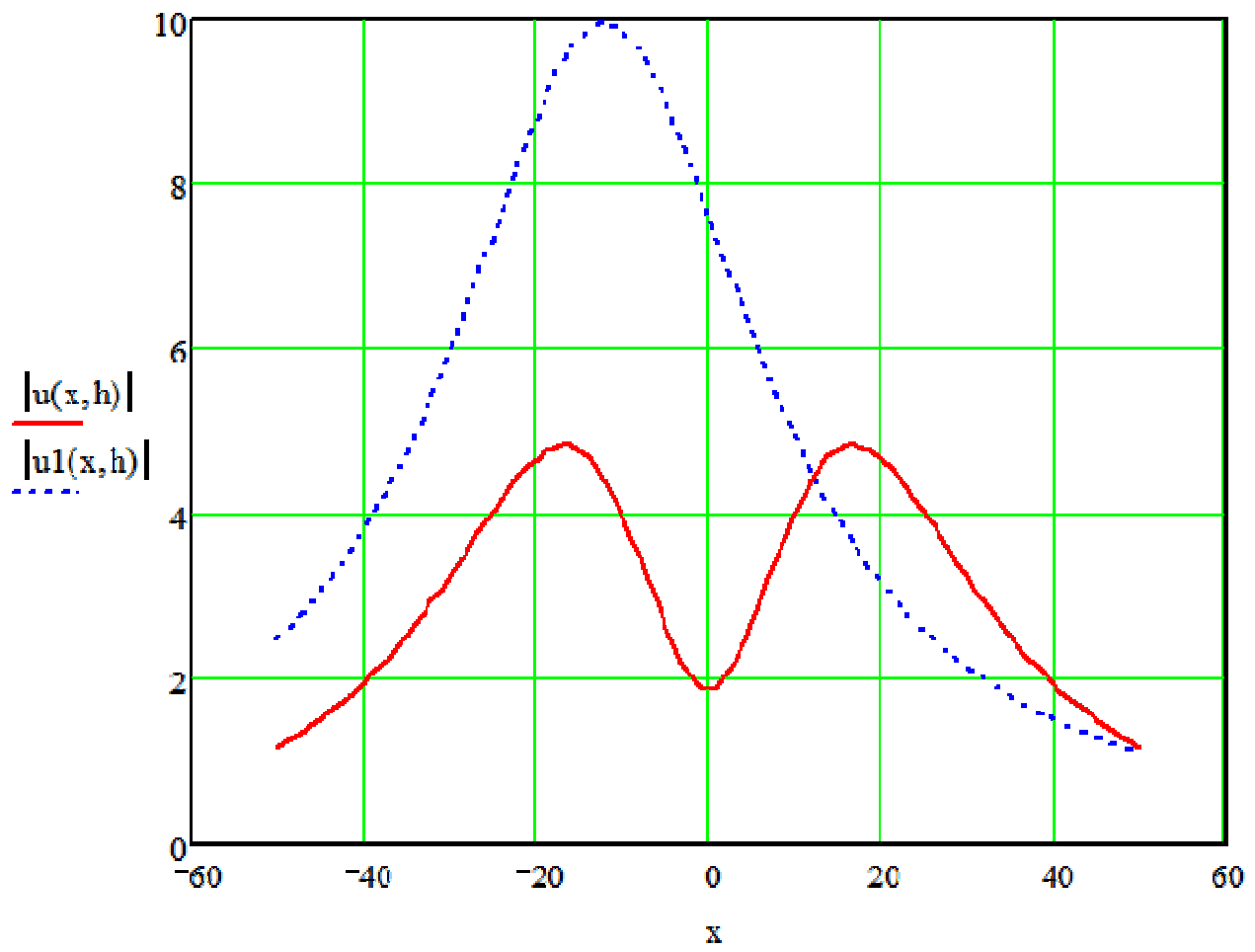
I_{K3} – ток КЗ в поврежденном фазном проводе ВЛ, А

M_1 – взаимная индуктивность между поврежденной фазой и однопроводной линией, Гн/м,

L – длина участка сближения, м.

2.2.3.4. Расчет наведенной ЭДС на проводе ЛС следует произвести для всего заданного диапазона изменения расстояния между осью ВЛ и осью ЛС. При этом изменяются соответствующие расстояния в выражении для определения взаимной индуктивности провод фазы ВЛ – провод ЛС. Полученные значения модуля наведенной ЭДС на участке сближения следует построить на графике в виде кривой зависимости ЭДС от расстояния между осями ВЛ и ЛС.

В качестве примера на рисунке приведены результаты расчета наведенного напряжения при емкостном влиянии ВЛ, определенные при перемещении ЛС в диапазоне -50 до 50 м от оси ВЛ:



3. Расчет электромагнитного поля ВЛ

3.1 Задание

Задан класс напряжения, тип опор ВЛ, токи нагрузки и токи аварийного режима ВЛ. Следует рассчитать электрическое и магнитное поле промышленной частоты поперек оси ВЛ на заданной высоте у опоры или в пролете ВЛ.

Состав работы:

1. Опишите электромагнитное поле промышленной частоты, его источники и последствия.
2. Рассчитайте и постройте кривую изменения напряженности электрического поля E в нормальном и аварийном режиме ВЛ на заданной высоте. Область расчета поля от -100 м до 100 м от оси ВЛ по горизонтали. Влияние грозотроса и опоры ВЛ на конфигурацию поля не учитывать.
3. Рассчитайте и постройте кривые изменения магнитного поля H в нормальном и аварийном режиме ВЛ на заданной высоте. Область расчета поля от -100 м до 100 м от оси ВЛ.
4. Для расчета электрического поля аварийный режим ВЛ - обесточивание (обрыв) двух дальних от области расчета поля фаз, для расчета магнитного поля аварийный режим – однофазное КЗ на фазе, ближней к области расчета поля.
5. Сравните полученные значения напряженности электрического и магнитного поля ВЛ с нормами СанПиН 2.2.4.1191-03 «Электромагнитные поля в производственных условиях».

Варианты заданий

Вар.	Класс напряжения ВЛ Уном	Ток нагрузки, А	Ток КЗ, кА	Эквивалентный радиус провода фазы ВЛ, м	Высота определения напряженности ЭМП, м	Место расчета поля
1	35 кВ	100	1,0	0,005	1,8	у опоры
2	110 кВ	150	1,5	0,0095	1,8	у опоры
3	220 кВ	200	2,0	0,012	1,8	у опоры
4	330 кВ	250	2,5	0,09	1,8	у опоры
5	500 кВ	300	3,0	0,15	1,8	у опоры
6	750 кВ	350	3,5	0,22	1,8	у опоры
7	1150 кВ	500	5,0	0,7	1,8	у опоры
8	35 кВ	50	2,0	0,005	1,8	в пролете
9	110 кВ	75	3,0	0,0095	1,8	в пролете
10	220 кВ	100	4,0	0,012	1,8	в пролете
11	330 кВ	125	5,0	0,09	1,8	в пролете
12	500 кВ	150	6,0	0,15	1,8	в пролете
13	750 кВ	175	7,0	0,22	1,8	в пролете
14	1150 кВ	250	8,0	0,7	1,8	в пролете
15	35 кВ	75	3,0	0,01	5,0	у опоры
16	110 кВ	100	4,0	0,02	5,0	у опоры
17	220 кВ	150	5,0	0,024	5,0	у опоры
18	330 кВ	200	6,0	0,12	5,0	у опоры
19	500 кВ	250	7,0	0,18	5,0	у опоры
20	750 кВ	300	8,0	0,25	5,0	у опоры
21	1150 кВ	350	9,0	0,8	5,0	у опоры
22	35 кВ	150	0,5	0,01	5,0	в пролете
23	110 кВ	200	1,0	0,02	5,0	в пролете
24	220 кВ	250	2,0	0,024	5,0	в пролете
25	330 кВ	300	3,0	0,12	5,0	в пролете
26	500 кВ	350	4,0	0,18	5,0	в пролете
27	750 кВ	400	5,0	0,25	5,0	в пролете
28	1150 кВ	450	6,0	0,8	5,0	в пролете

Вар.	Класс напряжения ВЛ Uном	Ток нагрузки, А	Ток КЗ, кА	Эквивалентный радиус провода фазы ВЛ, м	Высота определения напряженности ЭМП, м	Место расчета поля
29	35 кВ	200	4,0	0,005	3,0	у опоры
30	110 кВ	300	5,0	0,0095	3,0	у опоры
31	220 кВ	400	6,0	0,012	3,0	у опоры
32	330 кВ	100	5,0	0,09	3,0	у опоры
33	500 кВ	100	4,0	0,15	3,0	у опоры
34	750 кВ	200	3,0	0,22	3,0	у опоры
35	1150 кВ	200	2,0	0,7	3,0	у опоры

3.2 Указания к выполнению работы

3.2.1 Составление расчетной схемы

По заданному классу напряжения выберите соответствующий чертеж опоры (приложение 1). Учитывая длину гирлянды изоляторов (приложение 2), определите высоты подвеса проводов фаз на опоре. Расчет поля производится в направлении, перпендикулярном оси ВЛ. Отложить ось X вдоль поверхности земли, на которой отметить координату x каждого фазного провода ВЛ и диапазон изменения координаты x , соответствующий области расчета напряженности поля ВЛ. Нуль оси X соответствует оси ВЛ. Указать номера фаз (принять по чертежу опоры - приложение 1).

Если место расчета поля задано у опоры, то высота подвеса проводов фаз $h_{оп}$ определяется как высота траверсы минус длина гирлянды изоляторов. Если расчет задан в пролете, то следует учесть провес проводов. Стрела провеса провода $f_{пр}$ принимается равной 35% от высоты подвеса

проводов на опоре. Средняя высота провода над землей равняется $h = h_{оп} - \frac{2}{3} f_{пр}$, где $h_{оп}$ – высота подвеса провода на опоре.

3.2.2 Расчет электрического поля ВЛ

3.2.2.1 Определение собственных и взаимных потенциальных коэффициентов.

Связь между потенциалом U_1 тела O_1 и зарядами τ двух тел определяется отношением:

$$U_1 = \alpha_{11}\tau_1 + \alpha_{12}\tau_2,$$

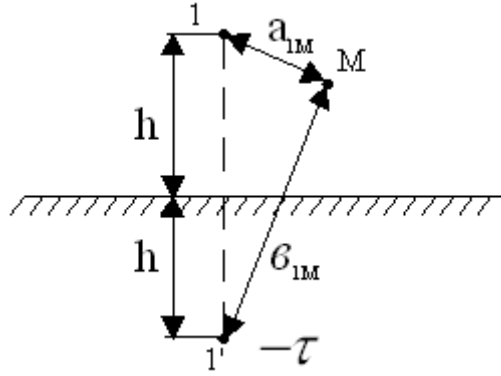
где α_{11} и α_{12} – собственный и взаимный потенциальный коэффициенты, зависящие от геометрических характеристик тела. Аналогично можно записать для второго тела (объекта O_2)

$$U_2 = \alpha_{21}\tau_1 + \alpha_{22}\tau_2.$$

В системе заряженных n тел имеет место аналогичное взаимное влияние, поэтому в общем случае можно записать в матричной форме

$$U = \alpha \tau.$$

Потенциальные коэффициенты определяются на основе метода зеркальных отражений, в котором помимо источника поля 1 вводится еще его зеркальное изображение 1':



Для расчета требуется определить собственные и взаимные потенциальные коэффициенты проводов фаз ВЛ и провода ЛС, используя следующие выражения:

$$\alpha_{nn} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_n}{r_n},$$

где r_n – радиус провода или эквивалентный радиус для расщепленной фазы, м, h_n – средняя высота подвеса провода n над землей, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

$$\alpha_{nm} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{b_{nm}}{a_{nm}},$$

где a_{nm} – расстояние от фазного провода ВЛ или провода ЛС m до провода фазы n , b_{nm} – расстояние от провода фазы ВЛ или провода ЛС m до зеркального изображения фазы n .

Определение расстояний:

$$a_{nm} = \sqrt{(h_n - h_m)^2 + (x_n - x_m)^2}$$

$b_{nm} = \sqrt{(h_n + h_m)^2 + (x_n - x_m)^2}$, где h – средняя высота провода над землей, x – координата провода по оси X .

3.2.2.2 Расчет зарядов проводов фаз ВЛ. Для определения зарядов τ на проводах фаз ВЛ требуется найти решение системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) следующего вида:

$$\begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{12} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{13} & \alpha_{23} & \alpha_{33} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \dot{\tau}_1 \\ \dot{\tau}_2 \\ \dot{\tau}_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3 \end{vmatrix}$$

здесь индексами 1,2 и 3 обозначены фазы ВЛ, коэффициенты $\alpha_{11} - \alpha_{33}$ – собственные и взаимные потенциальные коэффициенты проводов фаз ВЛ. U_1, U_2, U_3 – фазные напряжения проводов ВЛ, равные:

$$\dot{U}_1 = -\frac{U_{ном}}{\sqrt{3}}; \quad \dot{U}_2 = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}} (0,5 + j0,87); \quad \dot{U}_3 = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}} (0,5 - j0,87).$$

* Расчет ведется в комплексной форме, величины зарядов проводов фаз – комплексные.

3.2.2.3 Расчет напряженности электрического поля

*Вблизи поверхности грунта горизонтальная составляющая вектора напряженности электрического поля E_x мала и ею можно пренебречь. Следовательно, рассчитывается только вертикальная компонента поля E_y . Для нормального режима работы ВЛ:

$$\dot{E}_y = \delta_{1M} \dot{\tau}_1 + \delta_{2M} \dot{\tau}_2 + \delta_{3M} \dot{\tau}_3,$$

где δ – коэффициенты, определяемые по производным потенциальных коэффициентов в вертикальном направлении и равные:

$$\delta_{nm} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{h_n + h_m}{(h_n + h_m)^2 + (x_n - x_m)^2} + \frac{h_n - h_m}{(h_n - h_m)^2 + (x_n - x_m)^2} \right]$$

Данные коэффициенты определяются для каждой пары «провод фазы ВЛ – точка расчета поля», при этом принимается фактическая высота провода над землей в месте расчета.

3.2.2.4 Расчет аварийного режима работы ВЛ. При расчете аварийного режима заряды поврежденных фаз принимаются равными нулю. Расчет производится только для одной пары «провод фазы ВЛ – точка расчета».

3.2.2.5 На графике отображается кривая изменения значения модуля напряженности электрического поля $|E_y|$ в зависимости от координаты x (расстояния от оси ВЛ) в нормальном и аварийном режиме работы ВЛ.

3.2.3 Расчет магнитного поля ВЛ

3.2.3.1 Напряженность магнитного поля ВЛ находится как суперпозиция (сумма) магнитных полей от каждого фазного провода ВЛ.

Напряженность магнитного поля в некоторой точке M , создаваемого одним фазным проводом ВЛ на расстоянии a от него, определяется по выражению:

$$\dot{H}_{nm} = \frac{\dot{I}_n}{2\pi a_{nm}} = \frac{\dot{I}_n}{2\pi \sqrt{(h_n - h_m)^2 + (x_n - x_m)^2}}$$

I_1, I_2, I_3 – токи в проводах ВЛ, равные:

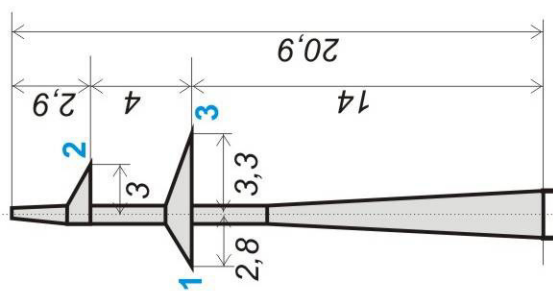
$$\dot{I}_1 = -I_H; \quad \dot{I}_2 = I_H (0,5 + j0,87); \quad \dot{I}_3 = I_H (0,5 - j0,87),$$

где I_H – заданный ток нагрузки ВЛ, А, высота провода над землей принимается равной фактической высоте провода в места расчета.

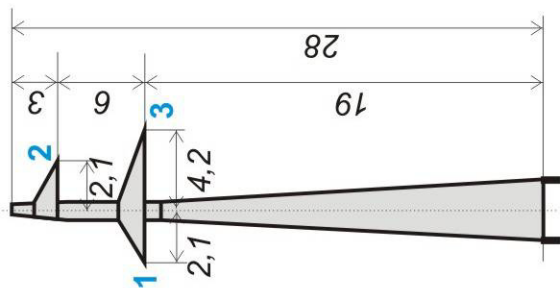
Суммарная напряженность магнитного поля определится как векторная сумма напряженностей магнитного поля от каждого фазного провода ВЛ (при этом геометрические направления векторов H принимаем в данной задаче равными).

3.2.3.2. Расчет аварийного режима работы ВЛ. При расчете аварийного режима токи в здоровых фазах принимаются равными нулю. Расчет производится только от тока, протекающего в поврежденной фазе.

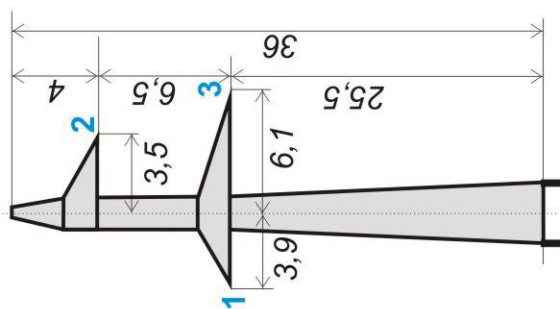
3.2.3.3 На графике отображается кривая изменения значения модуля напряженности магнитного поля $|H|$ в зависимости от координаты x (расстояния от оси ВЛ) в нормальном и аварийном режиме работы ВЛ.



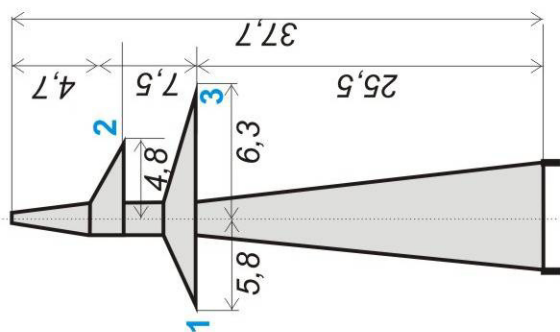
ВЛ 35 кВ опора П35-1Т



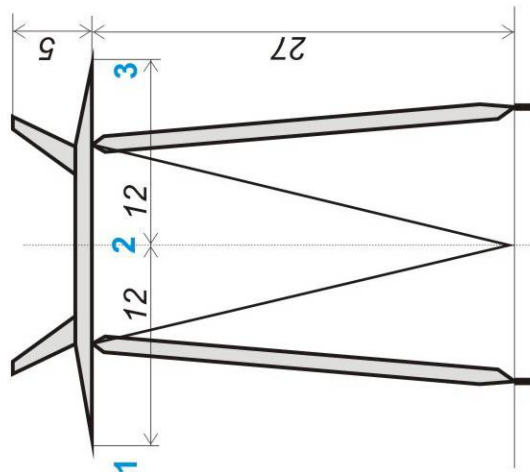
ВЛ 110 кВ опора П110-5В



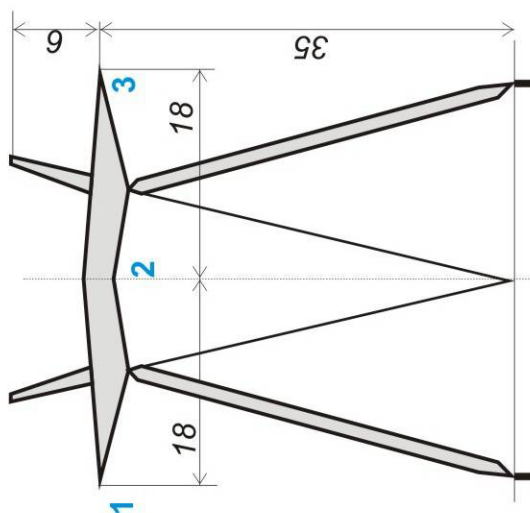
ВЛ 220 кВ опора П220-3



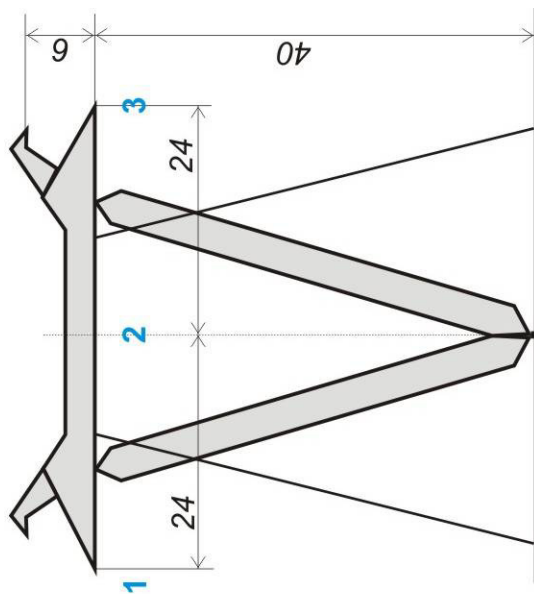
ВЛ 330 кВ опора П330-3



ВЛ 500 кВ опора ПБ-1



ВЛ 750 кВ опора ПП750-1



ВЛ 1150 кВ опора ПОГ1150-1

Габариты промежуточных опор ВЛ 35-1150 кВ

Длины гирлянд изоляторов ВЛ

<i>U_{ном}</i> , кВ	35	110	220	330	500	750	1150
Длина гирлянды, м	0,6	1,55	2,4	3,2	4,4	6,2	9,0