

ШИФР:	
Задача 1	15 баллов

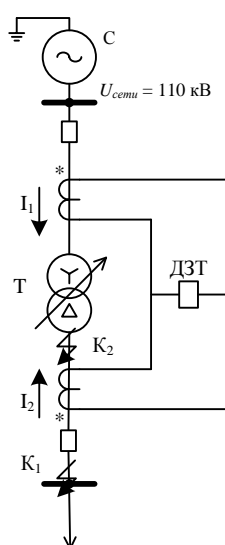


Рис.1

На трансформаторе установлена дифференциальная токовая защита с торможением (рис.1). Характеристика срабатывания защиты представлена на рис.2.

Рассчитать коэффициент торможения характеристики срабатывания и оценить чувствительность защиты.

Исходные данные:

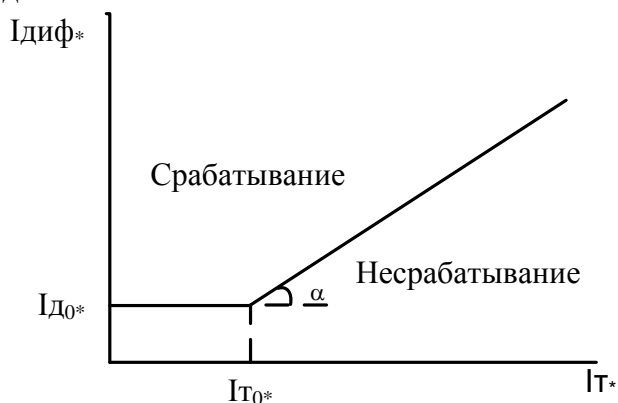


Рис.2

$$I_{диф} = |\dot{I}_1 + \dot{I}_2|, \quad I_T = 0,5 \cdot (|\dot{I}_1| + |\dot{I}_2|)$$

Минимальный ток срабатывания $I_{Д0*} = 0,3$ о.е.

Ток начала торможения $I_{Т0*} = 1$ о.е.

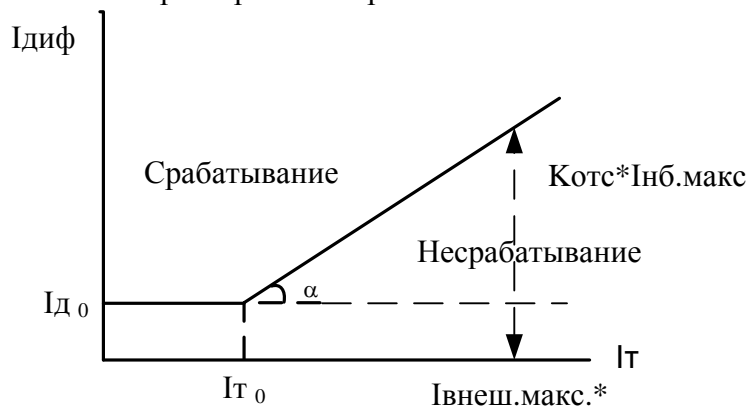
Максимальный сквозной ток внешнего КЗ $I_{внеш.макс*} = 3,5$ о.е.

Минимальный ток внутреннего КЗ $I_{внутр.мин*} = 2,5$ о.е.

Коэффициент отстройки $K_{отс} = 1,3$, коэффициент, учитывающий переходный процесс $K_{пер} = 2$, погрешность ТТ $\varepsilon = 0,1$, коэффициент однотипности ТТ $K_{одн} = 1$, погрешность регулирования под напряжением $\Delta U^* = 0,16$ о.е., погрешность выравнивания $\Delta f_{выр} = 0,02$.
 $K_{ч.мин.доп} = 2$.

Решение

1. Анализ характеристики срабатывания 10%



$$I_{диф} = |\dot{I}_1 + \dot{I}_2| = |I_1 - I_2| = I_{нб.макс}$$

$$I_T = 0,5 \cdot (|\dot{I}_1| + |\dot{I}_2|) = 0,5 \cdot (I_{внеш.макс} + I_{внеш.макс}) = I_{внеш.макс}$$

**Ивановский государственный энергетический университет
Международная олимпиада «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА - 2013»**

2. Расчетное выражение коэффициента торможения **30%**

Из рис. 1:

$$K_T \geq \operatorname{tg} \alpha = \frac{K_{отс} \cdot I_{нб.макс*} - I_{До*}}{I_{внеш.макс*} - I_{То*}} ;$$

3. Определение тока небаланса 30%

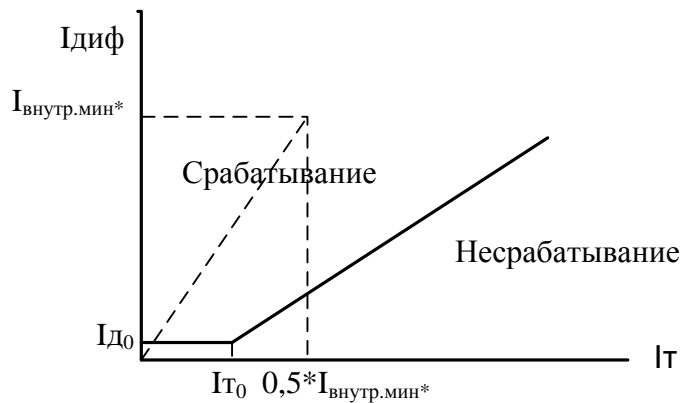
$$I_{нб.макс*} = (K_{пер} \cdot \varepsilon \cdot K_{одн} + \Delta U_* + \Delta f_{выр*}) \cdot I_{внеш.макс*}$$

$$I_{нб.макс*} = (2 \cdot 0,1 \cdot 1 + 0,16 + 0,02) \cdot 3,5 = 1,33$$

4. Определение коэффициента торможения **15%**

$$K_T \geq \frac{1,3 \cdot 1,33 - 0,3}{3,5 - 1} = 0,57$$

5. Оценка чувствительности защиты **15%**



$$I_{диф} = |\dot{I}_1 + \dot{I}_2| = |I_1 - 0| = I_{внутр.мин}$$

$$I_T = 0,5 \cdot (|\dot{I}_1| + |\dot{I}_2|) = 0,5 \cdot (I_{внутр.мин} + 0) = 0,5 \cdot I_{внутр.мин}$$

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{внутр.мин*}}{I_{До*}} \geq K_{\text{ч.мин.доп}}$$

$$K_{\text{ч}} = \frac{2}{0,3} = 6,67 \geq 2$$

ШИФР:	
Задача 2	35 баллов

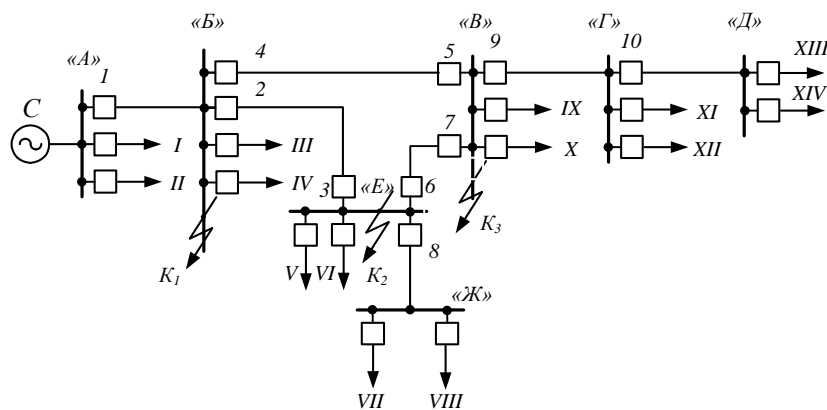


Рис. 2

На линиях сети 35 кВ (рис.2) установлены направленные и ненаправленные токовые ступенчатые защиты с независимой характеристикой выдержки времени.

1. Определить, какие защиты принять направленными.
2. Выбрать выдержки времени максимальных токовых защит 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 в сети.
3. Выбрать $I_{с\text{з}ТО1}$ и $I_{с\text{з}МТЗ1}$. Привести методику выбора уставок.
4. Оценить чувствительность МТЗ защиты 1.

Исходные данные: $I_{К1\text{макс}}^{(3)} = 2,8 \text{ кА}$; $I_{защ.К1\text{мин}}^{(2)} = 1,8 \text{ кА}$;
 $I_{защ.К2\text{мин}}^{(2)} = 1,2 \text{ кА}$; $I_{защ.К3\text{мин}}^{(2)} = 0,63 \text{ кА}$; $I_{раб.\text{макс}} = 0,2 \text{ кА}$.
Для защиты: $\Delta t = 0,5 \text{ с}$; $K_{зан} = 1,5$; $K_{\epsilon} = 0,95$; $K_{отс\text{МТЗ}} = 1,2$;
 $K_{отс\text{ТО}} = 1,3$.

Время срабатывания защит отходящих линий I - XIV указано в таблице.

t_I	t_{II}	t_{III}	t_{IV}	t_V	t_{VI}	t_{VII}	t_{VIII}	t_{IX}	t_X	t_{XI}	t_{XII}	t_{XIII}	t_{XIV}	
1	1,1	0,9	2,7	0	5	2,1	0	0,5	2,2	1,5	1,8	0,8	1,5	1

Решение

Направленными необходимо принять защиты: 3, 5, 6, 7 **5%**

2. Выбор выдержек времени МТЗ защит 1, 2, 3, 4, 5, 6. **45%**

Поскольку максимальная токовая защита осуществляет функцию дальнего резервирования, время срабатывания каждой защиты рассчитывается как сумма времени срабатывания смежного (предыдущего) элемента и ступени селективности Δt . При наличии нескольких смежных элементов из всех вариантов времени срабатывания выбирается наибольшее.

Задаваемая функция	Расчетное условие	Расчетное выражение	Расчет	Принятое значение
				$t_3 = 0$
				$t_5 = 0$
Несрабатывание	Отстройка от	$t_{10} = t_{XIII} + \Delta t$	$1,5 + 0,5 = 2$	$t_{10} = 2 \text{ (5\%)}$
		$t_{10} = t_{XIV} + \Delta t$	$1 + 0,5 = 1,5$	

**Ивановский государственный энергетический университет
Международная олимпиада «ЭЛЕКТРОЭНЕРGETИКА - 2013»**

при внешних КЗ	времени срабатывания	$t_9 = t_{XII} + \Delta t$	$0,8+0,5=1,3$	$t_9=2,5(5\%)$
		$t_9 = t_{XI} + \Delta t$	$1,8+0,5=2,3$	
	$t_9 = t_{10} + \Delta t$	$2+0,5=2,5$		
	защит смежных элементов	$t_8 = t_{VIII} + \Delta t$	$0,5+0,5=1$	$t_8=1(5\%)$
		$t_8 = t_{VII} + \Delta t$	$0+0,5=0,5$	
		$t_7 = t_{VI} + \Delta t$	$2,1+0,5=2,6$	$t_7=2,6(5\%)$
		$t_7 = t_V + \Delta t$	$0,5+0,5=1$	
		$t_7 = t_3 + \Delta t$	$0+0,5=0,5$	
		$t_7 = t_8 + \Delta t$	$1+0,5=1,5$	$t_6=3,0(5\%)$
		$t_6 = t_X + \Delta t$	$1,5+0,5=2$	
		$t_6 = t_{IX} + \Delta t$	$2,2+0,5=2,7$	
		$t_6 = t_5 + \Delta t$	$0+0,5=0,5$	$t_4=3,1(5\%)$
		$t_6 = t_9 + \Delta t$	$2,5+0,5=3$	
		$t_4 = t_X + \Delta t$	$1,5+0,5=2$	
		$t_4 = t_{IX} + \Delta t$	$2,2+0,5=2,7$	$t_2=3,5(5\%)$
		$t_4 = t_7 + \Delta t$	$2,6+0,5=3,1$	
		$t_4 = t_9 + \Delta t$	$2,5+0,5=3$	
		$t_2 = t_{VI} + \Delta t$	$2,1+0,5=2,6$	$t_1=4(10\%)$
		$t_2 = t_V + \Delta t$	$0,5+0,5=1$	
		$t_2 = t_6 + \Delta t$	$3+0,5=3,5$	
	$t_2 = t_8 + \Delta t$	$1+0,5=1$		
	$t_1 = t_{IV} + \Delta t$	$2,7+0,5=3,2$		
	$t_1 = t_{III} + \Delta t$	$0,9+0,5=1,4$		
		$t_1 = t_4 + \Delta t$	$3,1+0,5=3,6$	
		$t_1 = t_2 + \Delta t$	$3,5+0,5=4$	

2. Выбор $I_{сзТО1}$ и $I_{сзМТЗ1}$ 30%

Ток срабатывания токовой отсечки рассчитывается с целью несрабатывания при внешних КЗ, поэтому отстраивается от максимального тока через защиту при КЗ на шинах противоположной подстанции:

$$I_{сзТО1} \geq K_{отс} \cdot I_{K1 макс}^{(3)} \quad (1)$$

$$I_{сзТО1} \geq 1,3 \cdot 2,8 = 3,64 \text{ кА} \quad (10\%)$$

С целью несрабатывания в режимах без КЗ ток срабатывания МТЗ выбирается из условия немедленного устойчивого возврата защиты в исходное состояние после отключения внешнего КЗ защитой предыдущей линии:

$$I_{сзМТЗ1} \geq \frac{K_{отс} \cdot K_{зап}}{K_B} \cdot I_{РАБ.МАХ} \quad (2)$$

$$I_{сзМТЗ1} \geq \frac{1,2 \cdot 1,5}{0,95} \cdot 0,2 = 0,379 \text{ кА} \quad (20\%)$$

3. Оценка чувствительности МТЗ защиты 1 **20%**

3.1. Оценка чувствительности при ближнем резервировании производится при минимальном токе через защиту при КЗ на шинах противоположной подстанции:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{К1}_{\text{мин}}}^{(2)}}{I_{\text{СЗ}}} \geq K_{\text{ч}_{\text{мин.доп}}} \quad (3)$$

$$K_{\text{ч}_{\text{мин.доп}}} = 1,5$$

$$K_{\text{ч}} = \frac{1,8}{0,379} = 4,75 > 1,5 \quad (6\%)$$

3.2. Оценка чувствительности при дальнем резервировании производится при минимальном токе через защиту при КЗ на шинах противоположной подстанции смежного элемента, т.е. в данном случае при КЗ в точках К2 и К3:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{К2}_{\text{мин}}}^{(2)}}{I_{\text{СЗ}}} \geq K_{\text{ч}_{\text{мин.доп}}} \quad (4)$$

$$K_{\text{ч}_{\text{мин.доп}}} = 1,2$$

$$\hat{E}_{\times} = \frac{1,2}{0,375} = 3,2 > 1,2 \quad (7\%)$$

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{К3}_{\text{мин}}}^{(2)}}{I_{\text{СЗ}}} \geq K_{\text{ч}_{\text{мин.доп}}} \quad (5)$$

$$K_{\text{ч}_{\text{мин.доп}}} = 1,2$$

$$K_{\text{ч}} = \frac{0,63}{0,375} = 1,68 > 1,2 \quad (7\%)$$

Расчеты показали, что требуемая чувствительность МТЗ защиты 1 обеспечивается.

Ивановский государственный энергетический университет
Международная олимпиада «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА - 2013»

ШИФР:	
Задача 3	15 баллов

Подстанция получает питание по воздушной ЛЭП 10 кВ, выполненной проводом АС–50/8 ($r_0 = 0,603$ Ом/км; $x_0 = 0,388$ Ом/км) протяженностью 5 км. Передаваемая по ЛЭП мощность составляет $1200 + j \cdot 1050$ кВ·А.

Требуется: определить мощность конденсаторной батареи, которую необходимо установить на стороне 10 кВ подстанции, чтобы потери напряжения снизились до значения 5 % от $U_{ном}$.

Решение

1. Потери напряжения в линии без установки БК:

$$\Delta U_{л} = \frac{P_{л} \cdot R_{л} + Q_{л} \cdot X_{л}}{U_1} = \frac{1200 \cdot 0,603 \cdot 5 + 1050 \cdot 0,388 \cdot 5}{10} = 565,5 \text{ В.}$$

В процентах от номинального значения напряжения они составляют:

$$\Delta U_{л\%} = \frac{\Delta U_{л}}{U_{ном}} \cdot 100\% = \frac{565,5}{10000} \cdot 100\% = 5,65\% > 5\%.$$

2. Желаемые потери напряжения составляют:

$$\Delta U^{жел} = 0,05 \cdot U_{ном}^{сети} = 0,05 \cdot 10000 = 500 \text{ В.}$$

3. Мощность конденсаторной батареи для обеспечения желаемой потери напряжения составит:

$$Q_{БК} = \frac{(\Delta U_{л} - \Delta U^{жел}) \cdot U_{ном}}{X_{л}} = \frac{(565,5 - 500) \cdot 10}{0,388 \cdot 5} = 337,6 \text{ квар.}$$

Выбираем конденсаторные батареи типа УКЛ56-10,5-450 с $Q_{БК} = 450$ квар.

4. Потери напряжения в линии после установки БК:

$$\Delta U_{л} = \frac{P_{л} \cdot R_{л} + (Q_{л} - Q_{БК}) \cdot X_{л}}{U_1} = \frac{1200 \cdot 0,603 \cdot 5 + (1050 - 450) \cdot 0,388 \cdot 5}{10} = 478,2 \text{ В.}$$

В процентах от номинального значения напряжения они составляют:

$$\Delta U_{л\%} = \frac{\Delta U_{л}}{U_{ном}} \cdot 100\% = \frac{478,2}{10000} \cdot 100\% = 4,782\% < 5\%.$$

ОТВЕТ: после установки БК типа УКЛ56-10,5-450 мощностью 450 квар потери напряжения составят менее 5% от номинального напряжения.

Трудоемкость:

- 1) 30 %
- 2) 10 %
- 3) 30 %
- 4) 30 %

ШИФР:	
Задача 4	35 баллов

На подстанции установлены два трансформатора ТДН-16000/110 ($\Delta P_{кз} = 85$ кВт, $\Delta P_{xx} = 19$ кВт), работающие параллельно. График изменения нагрузки в течение года приведен на рис. 1. Наибольшая нагрузка подстанции $P_1 = 20$ МВт. В течение года наименьшая нагрузка $P_2 = \alpha \cdot P_1$, значение α изменяется в диапазоне $0,3 \div 0,6$. Коэффициент мощности не изменяется в течение года и равен $0,9$.

Требуется:

1. Определить при каких значениях α экономически целесообразно отключение одного из трансформаторов при наименьшей нагрузке.
2. Определить потери активной мощности и электроэнергии в трансформаторах за год при отключении одного из трансформаторов в режиме наименьшей нагрузки (при $\alpha = 0,3$).

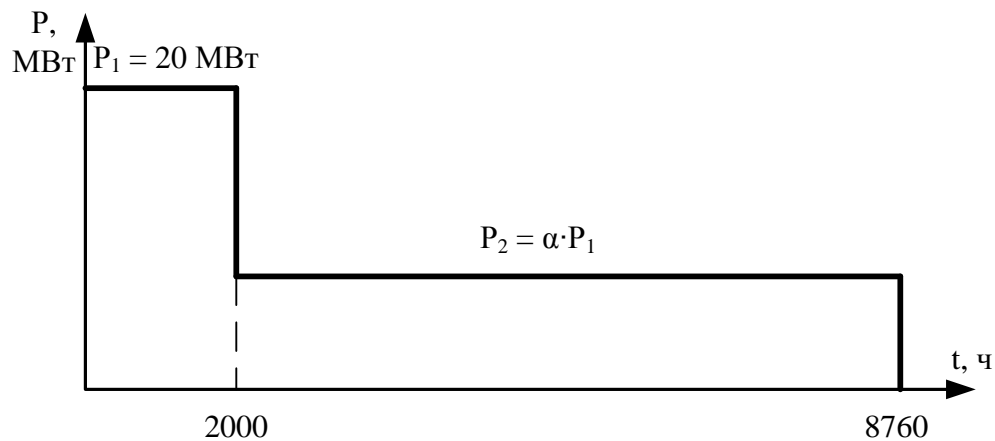


Рис.1. График изменения активной нагрузки

Решение

1. Нагрузка ($S_{кр}$), при которой потери мощности одинаковы как при работе подстанции с двумя, так и с одним трансформатором, определяется по формуле:

$$S_{нагр} = S_{кр} = S_{ном} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_{xx}}{\Delta P_{кз}}} = 16 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 19}{85}} = 10,7 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Тогда активная нагрузка, при которой потери мощности одинаковы как при работе подстанции с двумя, так и с одним трансформатором составит:

$$P_{нагр} = P_{кр} = S_{кр} \cdot \cos \varphi = 10,7 \cdot 0,9 = 9,63 \text{ МВт}.$$

Значение коэффициента α тогда будет равно:

$$\alpha = \frac{P_{кр}}{P_1} = \frac{9,63}{20} = 0,48.$$

Т.е. при α от $0,3$ до $0,48$ экономически целесообразно отключение одного из трансформаторов, т.к. потери мощности будут меньше.

2. Определить потери активной мощности в трансформаторах:

- потери активной мощности в одном трансформаторе определяются по выражению:

Ивановский государственный энергетический университет
Международная олимпиада «ЭЛЕКТРОЭНЕРGETИКА - 2013»

$$\Delta P_T = \Delta P_{XX} + \Delta P_K \cdot \left(\frac{S_{\text{нагр}}}{S_{\text{ном}}} \right)^2 ;$$

- потери активной мощности в двух трансформаторах при параллельной работе определяются по выражению:

$$\Delta P_T = 2 \cdot \Delta P_{XX} + \frac{1}{2} \cdot \Delta P_K \cdot \left(\frac{S_{\text{нагр}}}{S_{\text{ном}}} \right)^2 .$$

В режиме наибольших нагрузок потери активной мощности в трансформаторах составят:

$$\Delta P_T = 2 \cdot 0,019 + \frac{1}{2} \cdot 0,085 \cdot \left(\frac{20/0,9}{16} \right)^2 = 0,12 \text{ МВт. } (\Delta P_{\text{пер}} = 0,082 \text{ МВт})$$

В режиме наименьших нагрузок (при $\alpha = 0,3$) потери активной мощности в трансформаторах составят:

$$\Delta P_T = 0,019 + 0,085 \cdot \left(\frac{0,3 \cdot 20/0,9}{16} \right)^2 = 0,034 \text{ МВт. } (\Delta P_{\text{пер}} = 0,015 \text{ МВт})$$

3. Определить потери электроэнергии в электрической сети:

- постоянные потери электроэнергии

$$\Delta W_{\text{пост}} = \Delta P_{\text{пост}} \cdot t_p = \Delta P_{XX} \cdot t_p + 2 \cdot \Delta P_{XX} \cdot t_p = 0,019 \cdot 6760 + 2 \cdot 0,019 \cdot 2000 = 204,44 \text{ МВт} \cdot \text{ч};$$

- переменные потери электроэнергии

$$\Delta W_{\text{пер}} = \Delta P \cdot \Delta t = \Delta P_{\text{пер}(2 \text{ тр})} \cdot \Delta t + \Delta P_{\text{пер}(1 \text{ тр})} \cdot \Delta t = 0,082 \cdot 2000 + 0,015 \cdot 6760 = 265,4 \text{ МВт} \cdot \text{ч};$$

- суммарные потери электроэнергии

$$\Delta W_{\text{сум}} = \Delta W_{\text{пер}} + \Delta W_{\text{пост}} = 265,4 + 204,44 = 469,84 \text{ МВт} \cdot \text{ч}.$$

ОТВЕТ: 1) при значениях α от 0,3 до 0,48 экономически целесообразно отключение одного из трансформаторов, т.к. потери мощности будут меньше;

2) потери активной мощности в режиме наибольших нагрузок 0,12 МВт;

3) потери активной мощности в режиме наименьших нагрузок 0,034 МВт;

4) потери электроэнергии составят 469,84 МВт·ч.

Трудоемкость:

1) 40 %

2) 20 %

3) 40 %

ШИФР:	
Задача 5	15 баллов

К шинам 10 кВ ГПП (рис.1) подключена нагрузка группы цехов предприятия с $\dot{S}_p = 12365 + j8084 \text{ кВ} \cdot \text{А}$. К этим же шинам подключены два синхронных двигателя типа СТД, мощностью каждый $P_H = 800 \text{ кВт}$, работающие с опережающим $\cos \varphi_H = 0,9$ и коэффициентом загрузки по активной мощности $\beta = 0,85$.

Определить тип и необходимую мощность БСК 10 кВ, исходя из условия, что значение $\text{tg } \varphi_\Sigma$ на шинах 10 кВ не должно превышать 0,3.

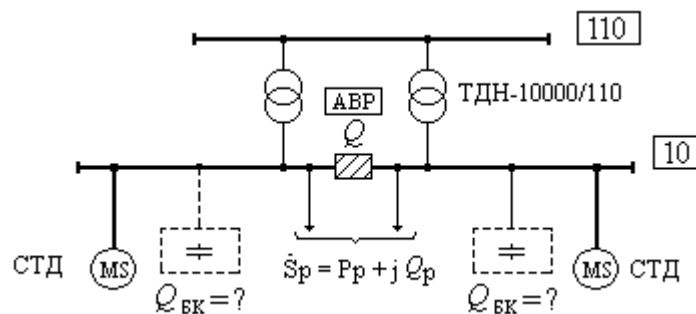


Рис. 1

Решение

1. Определение расчетных нагрузок:

- расчетная активная нагрузка СД

$$P_{p\text{СД}} = n \cdot P_H \cdot \beta = 2 \cdot 800 \cdot 0,85 = 1360 \text{ кВт};$$

- компенсирующая способность СД (расчетная реактивная нагрузка СД)

$$\cos \varphi_H = 0,9; \text{tg } \varphi_H = 0,48;$$

$$Q_{\text{СД}} = n \cdot P_H \cdot \text{tg } \varphi_H = 2 \cdot 800 \cdot 0,48 = 768 \text{ квар};$$

- расчетная нагрузка шин 10 кВ ГПП

$$P_{p\Sigma} = P_p + P_{p\text{СД}} = 12365 + 1360 = 13725 \text{ кВт};$$

$$Q_{p\Sigma} = Q_p - Q_{\text{СД}} = 8084 - 768 = 7316 \text{ квар}.$$

2. Коэффициент реактивной мощности на шинах 10 кВ ГПП без БК:

$$\text{tg } \varphi_{\text{факт}} = \frac{Q_{p\Sigma}}{P_{p\Sigma}} = \frac{7316}{13725} = 0,533.$$

3. (1 метод) Реактивная мощность, передаваемая в сеть предприятия:

$$Q_{\text{сист}} = P_{p\Sigma} \cdot \text{tg } \varphi_{\text{зад}} = 13725 \cdot 0,3 = 4117,5 \text{ квар}.$$

Уравнение баланса реактивной мощности:

$$Q_{\text{сист}} + Q_{\text{БК}} = Q_{p\Sigma}.$$

Тогда мощность БК:

$$Q_{\text{БК}} = Q_{p\Sigma} - Q_{\text{сист}} = 7316 - 4117,5 = 3198,5 \text{ квар}.$$

Приняты к установке две БК, мощностью каждая 1800 квар (на каждую секцию шин 10 кВ) типа УКЛ(П)56-10,5-1800 УЗ.

Ивановский государственный энергетический университет
Международная олимпиада «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА - 2013»

3. (2 метод) Мощность БК определяется по выражению:

$$Q_{БК} = P_{р\Sigma} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\text{факт}} - P_{р\Sigma} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\text{зад}} = 13725 \cdot 0,533 - 13725 \cdot 0,3 = 3198,5 \text{ квар.}$$

Приняты к установке две БК, мощностью каждая 1800 квар (на каждую секцию шин 10 кВ) типа УКЛ(П)56-10,5-1800 УЗ.

Ответ: На каждую секцию шин 10 кВ ГПП устанавливается БК типа УКЛ(П)56-10,5-1800 УЗ.

Трудоемкость:

- 1) 40 %
- 2) 20 %
- 3) 40 % или 4) 40%

ШИФР:	
Задача 6	35 баллов

К шинам 10 кВ существующей ГПП (рис.1) подключается новая дуговая сталеплавильная печь ДСП-5.

Требуется:

- определить размах изменения напряжения в точке подключения ДСП-5 (секция шин 10 кВ) для режима работы трансформаторов Т₁ и Т₂, указанного на рис.1;
- сделать вывод о допустимости колебаний напряжения, приняв длительность периода расплава 10 мин, а частоту колебаний напряжения 0,3 с⁻¹.

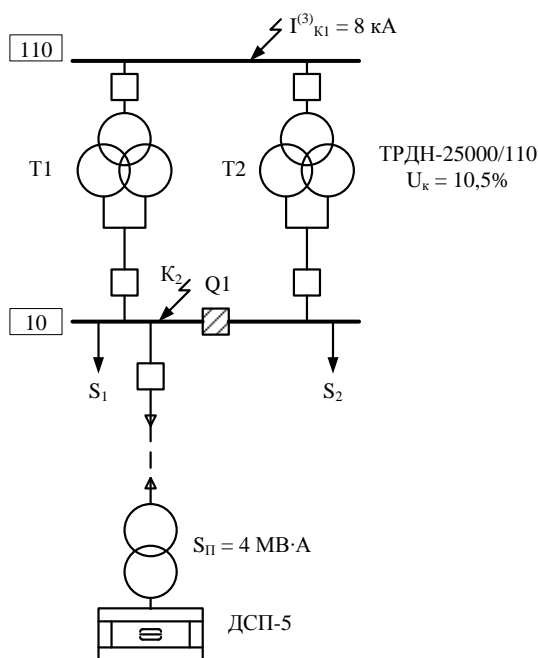


Рис. 1.

Решение

1. Схема замещения для расчета тока КЗ на секции шин 10 кВ ГПП в точке К₂:

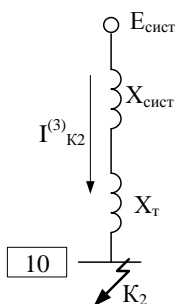


Рис. 2.

Параметры схемы замещения в именованных единицах ($U_{\text{баз}} = 10,5 \text{ кВ}$):

$$E_{\text{сист}} = 10,5 \text{ кВ};$$

$$X_{\text{сист}} = \frac{U_{\text{баз}}^2}{S_{\text{кз}}} = \frac{U_{\text{баз}}^2}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{к1}} \cdot U_{\text{сист}}} = \frac{10,5^2}{\sqrt{3} \cdot 8 \cdot 115} = 0,069 \text{ Ом};$$

$$X_{\text{T}} = \frac{U_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{баз}}^2}{S_{\text{ном}}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{10,5^2}{25} = 0,463 \text{ Ом}.$$

Ивановский государственный энергетический университет
Международная олимпиада «ЭЛЕКТРОЭНЕРGETИКА - 2013»

Параметры схемы замещения в относительных единицах ($S_{\text{баз}} = 1000 \text{ МВ}\cdot\text{А}$; $U_{\text{баз}} = 10,5 \text{ кВ}$):

$$E_{\text{сист}} = 1 \text{ о.е.};$$

$$X_{\text{сист}} = \frac{S_{\text{баз}}}{S_{\text{кз}}} = \frac{S_{\text{баз}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{к1}} \cdot U_{\text{сист}}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 8 \cdot 115} = 0,628 \text{ Ом};$$

$$X_{\text{т}} = \frac{U_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S_{\text{баз}}}{S_{\text{ном}}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{1000}{25} = 4,2 \text{ Ом}.$$

2. Расчет тока КЗ на шинах 10 кВ ГПП:

$$I_{\text{к2}} = \frac{E_{\text{сист}}}{\sqrt{3} \cdot X_{\Sigma}} = \frac{E_{\text{сист}}}{\sqrt{3} \cdot (X_{\text{сист}} + X_{\text{т}})} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot (0,069 + 0,463)} = 11,4 \text{ кА}$$

или

$$I_{\text{к2}} = \frac{E_{\text{сист}}}{X_{\Sigma}} \cdot I_{\text{баз}} = \frac{E_{\text{сист}}}{(X_{\text{сист}} + X_{\text{т}})} \cdot \frac{S_{\text{баз}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{баз}}} = \frac{1}{(0,069 + 0,463)} \cdot \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 11,4 \text{ кА}.$$

Мощность КЗ тогда равна

$$S_{\text{кз2}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{баз}} \cdot I_{\text{к2}} = \sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 11,4 = 207,326 \text{ МВ}\cdot\text{А}.$$

3. Расчетный размах колебаний напряжения:

$$\delta U_{\text{тп}} = \frac{S_{\text{н}}}{S_{\text{кз2}}} \cdot 100\% = \frac{4}{207,326} \cdot 100\% = 1,93 \text{ \%}.$$

Частота колебаний напряжения составила

$$F = 0,3 \cdot 60 = 18 \text{ мин}^{-1}.$$

4. Допустимый размах изменения напряжения определяется по ГОСТ 13109-97. Допустимый размах изменений напряжения в зависимости от частоты повторения изменений напряжения по рис. 3:

$$\delta U_{\text{тдоп}} = 1,6 \text{ \%}.$$

5. Оценка допустимости колебаний напряжения в сети:

$$\delta U_{\text{тдоп}} > \delta U_{\text{тп}}, (1,6 \text{ \%} < 1,93 \text{ \%} - \text{колебания не допустимы}).$$

Ответ: Т.к. $\delta U_{\text{тдоп}} < \delta U_{\text{тп}}$, ($1,6 \text{ \%} < 1,93 \text{ \%}$) колебания напряжения не допустимы.

Трудоемкость:

- 1) 20 %
- 2) 20 %
- 3) 20 %
- 4) 30 %
- 5) 10 %

ШИФР:	
Задача 7	15 баллов

Высоковольтные вводы трехфазной электротехнической установки номинальным напряжением 35 кВ выполнены в виде коаксиальной цилиндрической системы с двухслойной изоляцией. Первый слой – бакелит ($\epsilon=3,5$), второй слой – кремнийорганическая резина ($\epsilon=7$). Рассчитайте значения напряженностей электрического поля на границах изоляционных слоев и в серединах слоев изоляции высоковольтных вводов при воздействии номинального напряжения промышленной частоты.

Исходные данные:

- радиус токоведущего стержня – 4 мм;
- внешний радиус первого слоя – 14 мм;
- внешний радиус второго слоя – 20 мм.

Решение

Для многослойного цилиндрического конденсатора напряженность в i -том слое определяется выражением:

$$E_{ri} = \frac{U_{раб}}{r \cdot \ln \frac{r_{2i}}{r_{1i}} \sum_{k=1}^n \frac{C_i}{C_k}} \quad \text{или} \quad E_{ri} = \frac{U_{раб}}{\epsilon_i \cdot r \sum_{k=1}^n \frac{\ln \frac{r_{2k}}{r_{1k}}}{\epsilon_k}} \quad (33 \%)$$

где r_{2i} , r_{2k} – внешние радиусы слоев, r_{1i} , r_{1k} – внутренние радиусы слоев, ϵ_i , ϵ_k – диэлектрические проницаемости слоев, $U_{раб}$ – напряжение, воздействующее на изоляцию.

В установках номинальным напряжением 35 кВ на изоляцию вводов воздействует фазное напряжение

$$U_{раб} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}} = \frac{35}{\sqrt{3}} = 20,2 \text{ (кВ)} \quad (33 \%)$$

Таким образом, для первого слоя:

$$E_{r1} = \frac{20,2}{3,5 \cdot r \left(\frac{\ln \frac{14}{4}}{3,5} + \frac{\ln \frac{20}{14}}{7} \right)} = \frac{14,12}{r}$$

Для второго слоя:

$$E_{r2} = \frac{20,2}{7 \cdot r \left(\frac{\ln \frac{14}{4}}{3,5} + \frac{\ln \frac{20}{14}}{7} \right)} = \frac{7,06}{r}$$

	1 слой			2 слой		
$r, \text{мм}$	4	9	14	14	17	20
$E_r, \text{кВ/мм}$	3,53	1,57	1,01	0,5	0,42	0,35

(34 %)

ШИФР:	
Задача 8	35 баллов

После удара молнии в воздушную ЛЭП по ней распространяется волна напряжения с амплитудой 600 кВ. На расстоянии 1 км от места удара ВЛЭП переходит в кабельную линию. В месте перехода установлен ВЧ заградитель с индуктивностью 2 мГн. Рассчитайте и постройте преломленную $U_{пр}(t)$ и отраженную $U_{отр}(t)$ волны. Постройте распределение потенциала по длине линий через 5 мкс после удара молнии.

В расчетах принять, что волна перенапряжения имеет бесконечную длительность и прямоугольный фронт. Погонные параметры линий: $L_{0в\lambda\pi}=1,33$ мкГн/м, $C_{0в\lambda\pi}=8,33 \times 10^{-12}$ Ф/м, $L_{0к\lambda\pi}=0,67$ мкГн/м, $C_{0к\lambda\pi}=67 \times 10^{-12}$ Ф/м.

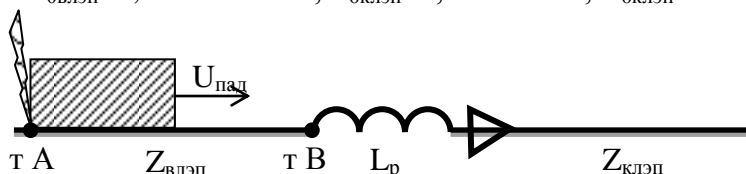


Рис. 1. Схема сети с реактором

Решение

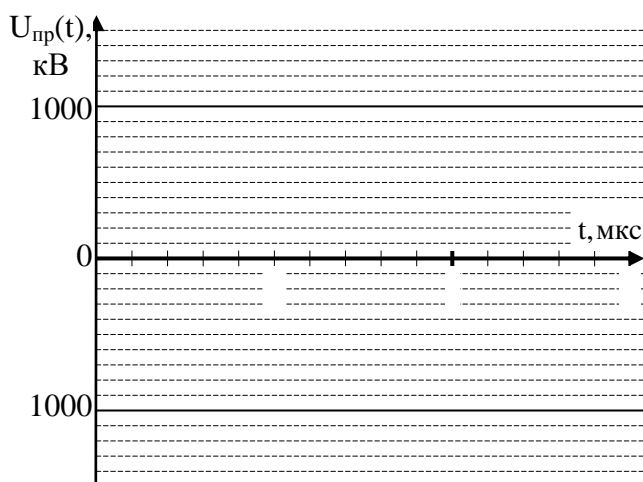


Рис. 2. Преломленная волна $U_{пр}(t)$

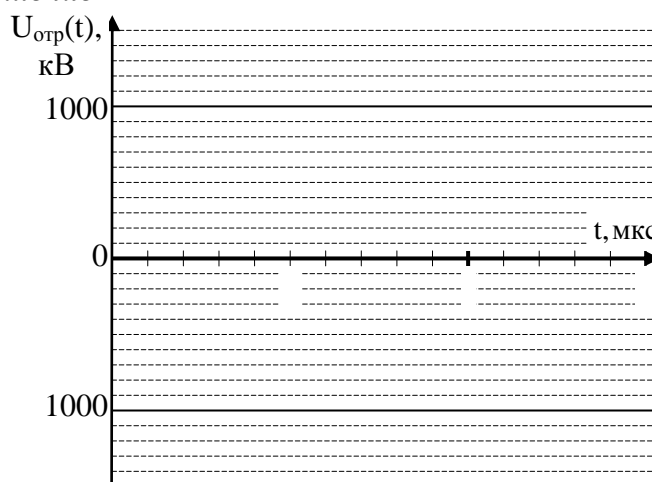


Рис. 3. Отраженная волна $U_{отр}(t)$

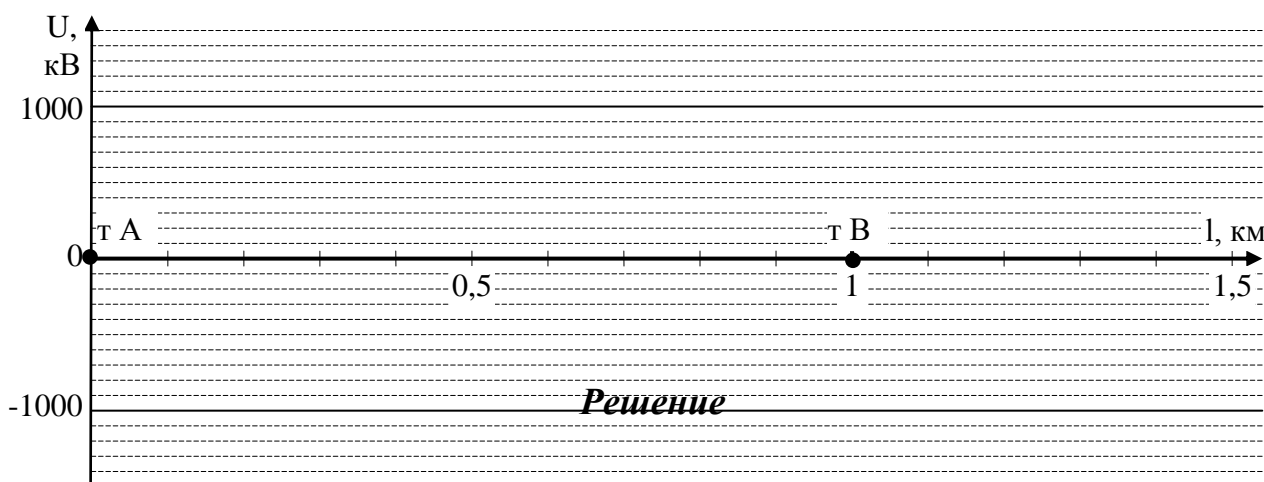


Рис. 4. Распределение потенциала по длине ЛЭП при $t=5$ мкс

Решение

**Ивановский государственный энергетический университет
Международная олимпиада «ЭЛЕКТРОЭНЕРGETИКА - 2013»**

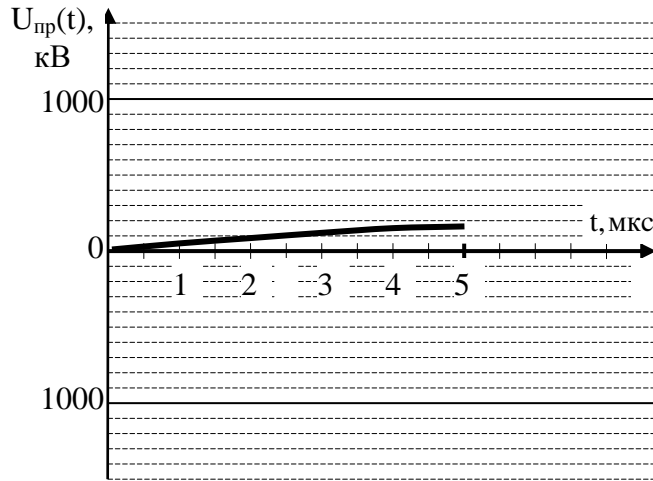


Рис. 3. Отраженная волна $U_{отр}(t)$

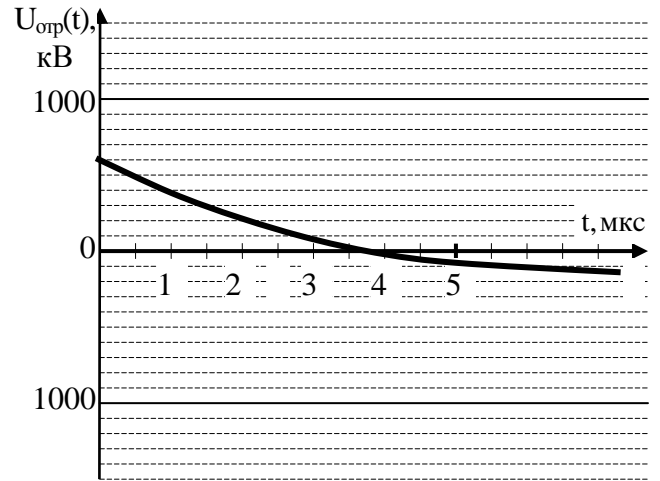


Рис. 2. Преломленная волна $U_{пр}(t)$

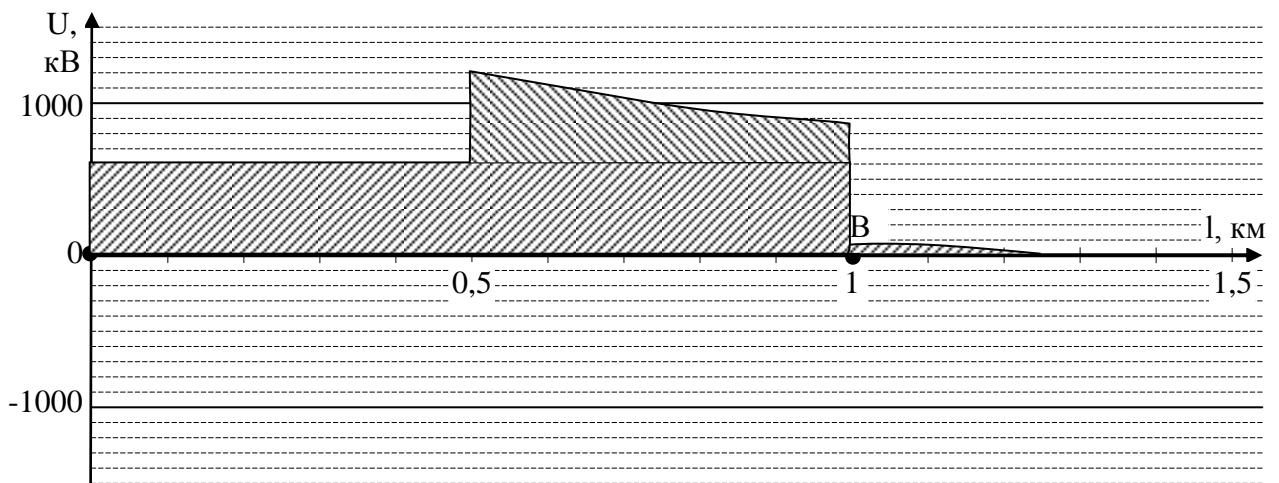


Рис. 4. Распределение потенциала по длине ЛЭП при $t=5$ мкс

Определим волновые сопротивления линий:

$$Z_{влэн} = \sqrt{\frac{L_{влэн}}{C_{влэн}}} = \sqrt{\frac{1,33 \cdot 10^{-6}}{8,33 \cdot 10^{-12}}} = 400 \text{ (Ом)},$$

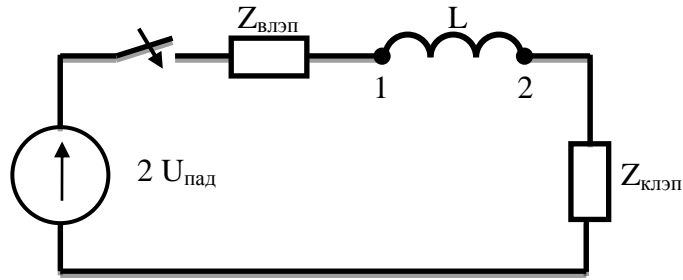
$$Z_{клэн} = \sqrt{\frac{L_{клэн}}{C_{клэн}}} = \sqrt{\frac{0,67 \cdot 10^{-6}}{67 \cdot 10^{-12}}} = 100 \text{ (Ом)} \quad (14 \%)$$

Скорости распространения волн по линиям:

$$V_{влэн} = \frac{1}{\sqrt{L_{влэн} C_{влэн}}} = \frac{1}{\sqrt{1,33 \cdot 10^{-6} \cdot 8,33 \cdot 10^{-12}}} = 300 \cdot 10^6 \text{ (м/с)}$$

$$V_{клэн} = \frac{1}{\sqrt{L_{клэн} C_{клэн}}} = \frac{1}{\sqrt{0,67 \cdot 10^{-6} \cdot 67 \cdot 10^{-12}}} = 149 \cdot 10^6 \text{ (м/с)} \quad (14 \%)$$

**Ивановский государственный энергетический университет
Международная олимпиада «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА - 2013»**



Расчетная схема замещения

При прохождении электромагнитной волны бесконечной длительности с прямоугольным фронтом через индуктивность значения преломленной волны до и после индуктивности будут определяться соответственно выражениями:

$$U_{np} = U_2 = \alpha_{12} \cdot U_{над} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right),$$

$$U_1 = U_2 + L \frac{di}{dt} = U_2 + \frac{L}{Z_{клэп}} \cdot \frac{dU_2}{dt} = U_{над} \left(\alpha_{12} + \alpha_{21} e^{-\frac{t}{T}} \right),$$

где $\alpha_{12} = \frac{2Z_{клэп}}{Z_{влэп} + Z_{клэп}} = \frac{2 \cdot 100}{400 + 100} = 0,4$, $\alpha_{21} = \frac{2Z_{влэп}}{Z_{влэп} + Z_{клэп}} = \frac{2 \cdot 400}{400 + 100} = 1,6$,

$$T = \frac{L}{Z_{влэп} + Z_{клэп}} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{400 + 100} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ (с)} \quad (15 \%)$$

С рассчитанными параметрами построим преломленную волну, действующую на КЛЭП

$$U_{np} = 0,4 \cdot 600 \left(1 - e^{-\frac{t}{4 \cdot 10^{-6}}} \right)$$

<i>t</i> , мкс	0	1	2	3	4	5
<i>U</i> _{пр} , кВ	0	53,1	94,4	126,6	151,7	171,2

(14 %)

Отраженную волну определим из выражения:

$$U_{над} + U_{отр} = U_1$$

$$U_{отр} = U_1 - U_{над} = U_{над} \left(\alpha_{12} + \alpha_{21} e^{-\frac{t}{T}} \right) - U_{над} = U_{над} \left(\alpha_{12} + \alpha_{21} e^{-\frac{t}{T}} - 1 \right) =$$

(14 %)

$$= U_{над} \left(\beta_{12} + \alpha_{21} e^{-\frac{t}{T}} \right) = 600 \left(-0,6 + 1,6 \cdot e^{-\frac{t}{4 \cdot 10^{-6}}} \right)$$

$$\beta_{12} = \frac{Z_{клэп} - Z_{влэп}}{Z_{влэп} + Z_{клэп}} = \frac{100 - 400}{400 + 100} = -0,6$$

<i>t</i> , мкс	0	1	2	3	4	5
<i>U</i> _{отр} , кВ	600	387,6	222,3	93,5	-6,8	-85

(14 %)

Ивановский государственный энергетический университет
Международная олимпиада «ЭЛЕКТРОЭНЕРGETИКА - 2013»

Для построения распределения потенциала по длине линий определим, где будет начало отраженной и преломленной волн через 5 мкс после удара молнии.

По ВЛЭП за 5 мкс волна пройдет расстояние

$$S_{влэн} = V_{влэн} \cdot t = 300 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-6} = 1500 \text{ (м)}$$

т.е. волна отразится и удалится от точки сопряжения линий на 0,5 км.

До точки сопряжения волна будет двигаться

$$t_1 = \frac{1000}{V_{влэн}} = \frac{1000}{300 \cdot 10^6} = 3.333 \cdot 10^{-6} \text{ с,}$$

т.е. по длине кабельной линии волна будет двигаться

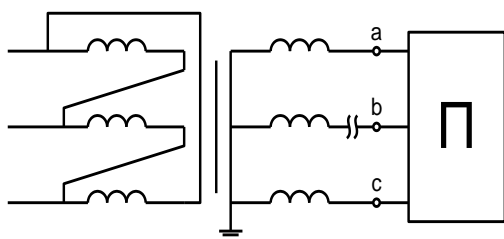
$$t_2 = 5 \cdot 10^{-6} - 3.333 \cdot 10^{-6} = 1,67 \cdot 10^{-6} \text{ (с)}$$

и пройдет расстояние

$$S_{клэн} = V_{клэн} \cdot t_2 = 149 \cdot 10^6 \cdot 1,67 \cdot 10^{-6} = 248,8 \text{ (м)}$$

Распределение потенциала представим на рисунке, при этом учтем, что на ВЛЭП после отметки 0,5 км падающая и отраженная волны складываются.

ШИФР:	
Задача 9	15 баллов



Ко вторичной обмотке трансформатора (Δ/Y) 6,0/0,38 кВ подключен симметричный трехфазный резистивный приемник, фазы которого соединены по схеме “треугольник”. $P_{пр}=6\text{кВт}$.

Определить значения потенциалов точек a, b и c приемника относительно земли при обрыве линейного провода, подходящего к точке b.

Решение

При обрыве линейного провода фазы В величина ЭДС в фазах вторичной обмотки трансформатора не изменится. На основании этого составим схему замещения вторичной цепи трансформатора (рис. 1). (+6 баллов)

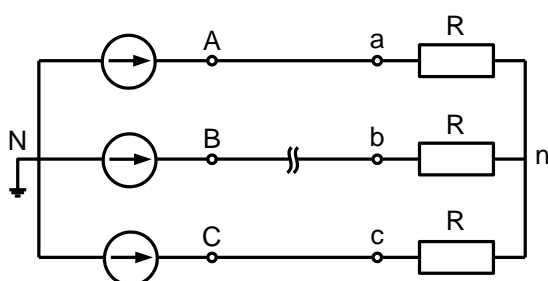


Рис. 1.

После обрыва активные сопротивления в фазах приемника А и С окажутся включенными на линейное напряжение, что соответствует перемещению потенциала точки n на середину вектора \dot{U}_{CA} на топографической диаграмме напряжений (рис. 2). (+7 баллов)

Тогда, если $\dot{\varphi}_N = 0$, то

$$\dot{\varphi}_a = \dot{E}_A = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ (В)};$$

$$\dot{\varphi}_c = \dot{E}_C = \frac{380}{\sqrt{3}} e^{j120^\circ} = 220 e^{j120^\circ} \text{ (В)}; \text{ (+7 б.)}$$

$$\dot{\varphi}_b = \dot{U}_{nN} = \frac{1}{2} E_A e^{j60^\circ} = 110 e^{j60^\circ} \text{ (В)}.$$

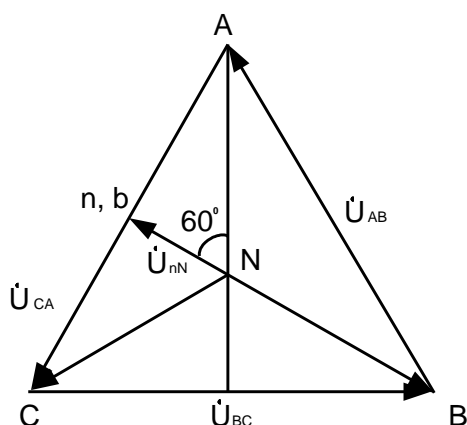


Рис. 2.

Ответ: $\dot{\varphi}_a = 220 \text{ (В)}; \dot{\varphi}_c = 220 e^{j120^\circ} \text{ (В)}; \dot{\varphi}_b = 110 e^{j60^\circ} \text{ (В)}$.

ШИФР:	
Задача 10	35 баллов

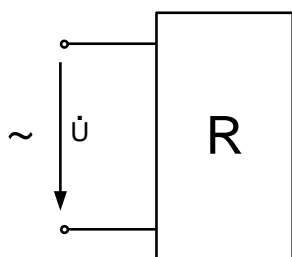


Рис. 1.

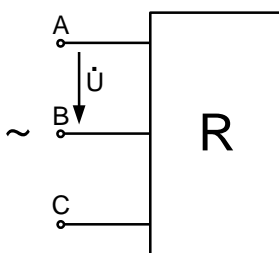


Рис. 2.

На рис. 1 представлен резистивный приёмник, включённый в однофазную цепь с напряжением U . На рис. 2 симметричный резистивный трёхфазный приёмник, включённый в трёхфазную цепь, линейное напряжение которой равно напряжению однофазной цепи. Длины проводов, материал, и плотности тока в проводе однофазной и трёхфазной цепях

одинаковы. Определить соотношение между массами проводов электроснабжения однофазной и трёхфазной цепей, если мощности однофазного и трёхфазного приёмников равны.

Решение

Массу одного провода сечением S , длиной l , и плотностью материала ρ можно определить по формуле: $m = lS \cdot \rho$.

Тогда для проводов электроснабжения рассматриваемых приёмников массы будут соответственно равны:

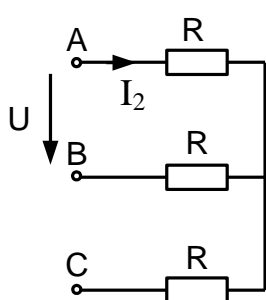
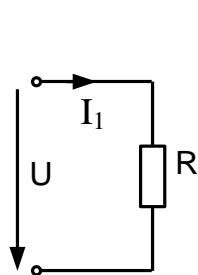
$$m_1 = 2 \cdot lS_1 \cdot \rho;$$

$$m_2 = 3 \cdot lS_2 \cdot \rho. \text{ (+7 баллов)}$$

Так как, по условию плотности тока в проводах приёмников равны ($\delta_1 = \delta_2 = \delta$), то:

$$\frac{I_1}{S_1} = \frac{I_2}{S_2} = \delta \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{S_1}{S_2}, \text{ (+5 балла)}$$

Для того, чтобы найти отношение токов составим схемы замещения и определим мощности, потребляемые приёмниками.



$$P_1 = I_1^2 R_1 = \frac{U^2}{R_1} = P_2 = 3I_2^2 R_2 = 3 \frac{U^2}{3R_2}.$$

Откуда:

$$R_1 = R_2 \Rightarrow I_1 = \sqrt{3} I_2,$$

Значит отношение

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{S_1}{S_2} = \sqrt{3}. \text{ (+13 баллов)}$$

Откуда находим отношение масс проводов:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{2 \cdot lS_1 \cdot \rho}{3 \cdot lS_2 \cdot \rho} = \frac{2\sqrt{3}}{3} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,155. \text{ (+5 баллов)}$$

Ответ: $\frac{m_1}{m_2} = 1,155.$

ШИФР:	
Задача 11	15 баллов

Выбрать токоведущую часть в цепи блока между генератором и блочным трансформатором. Схема блока представлена на рис. 1.

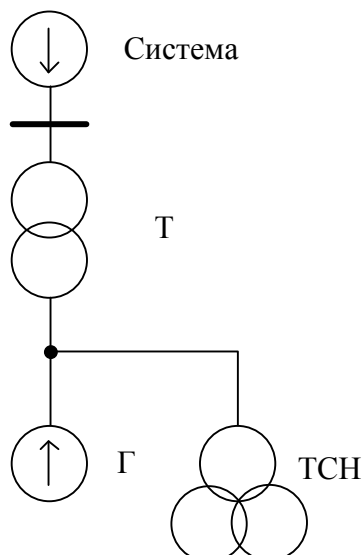


Рис. 1. Схема блока

Примечание: 1) мощность блока 300 МВт; 2) мощность короткого замыкания системы – 6500 МВА; 3) мощность ТСН 25 МВА.

Решение

Ток КЗ от генератор $I_{п0г}^{(3)} = \frac{E_{г}}{X_{дг}} I_{б} = \frac{1,13}{0,2} \frac{376}{\sqrt{3}20} = 61 \text{ кА}$.

Ток КЗ от системы $I_{п0с}^{(3)} = \frac{E_{с}}{X_{рез}} I_{б} = \frac{1,0}{0,44} 28,9 = 65,7 \text{ кА}$.

Сопротивление $X_{рез} = X_{с} + X_{т} = \frac{1000}{6500} + \frac{11,5}{100} \frac{100}{400} = 0,44 \text{ о.е.}$

Номинальный ток генератора – 11 кА.

Ударный ток $i_{у} = \sqrt{2} K_{у} I_{п0с}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,9 \cdot 65,7 = 176 \text{ кА}$.

Тепловой импульс $В_{к} = \left(I_{п0с}^{(3)} \right)^2 4 = 17266 \text{ кА}^2\text{с}$.

Токопровод ТЭКНЕ 20-12500-400 У1 , $В_{к} = 76800 \text{ кА}^2\text{с}$.

Шкала оценок:

3 балла – рассчитаны токи КЗ от генератора и системы;

7 баллов – рассчитаны токи КЗ от генератора и системы, рассчитан тепловой импульс по току КЗ от генератора с временем протекания тока 4 секунды;

11 баллов – рассчитаны токи КЗ от генератора и системы, рассчитан тепловой импульс по току КЗ от генератора с временем протекания тока 4 секунды, рассчитан ударный ток от генератора;

15 баллов – произведён выбор пофазно-экранированного токопровода.

ШИФР:	
Задача 12	35 баллов

На рис.1 представлена схема питания электродвигателя М.

Исходные данные:

1. Начальное действующее значение периодической составляющей трехфазного тока короткого замыкания в расчетной точке $I_{n,0}^{(3)} = 15$ кА.
2. Постоянная времени затухания апериодической составляющей трехфазного тока короткого замыкания в расчетной точке $T_a = 0,06$ с.
3. По условиям длительного режима выбран кабель с алюминиевыми жилами с бумажно-масляной пропитанной изоляцией без брони сечением $q = 95$ мм².
4. Время срабатывания основной релейной защиты – 0,1 с., резервной – 0,8 с.
Полное время отключения установленного выключателя $t_{OB} = 0,07$ с.

Дополнительные данные:

1. Величина, обратная температурному коэффициенту сопротивления, $a = 228$ °С.
2. Постоянная, характеризующая теплофизические свойства алюминия,
 $b = 45,25 \left(\frac{\text{мм}^4}{\text{кА}^2 \cdot \text{с}} \right)$.
3. Начальная температура кабеля (предварительная загрузка) $\Theta_n = 65$ °С.

Задание: проверить предварительно выбранный кабель по термической стойкости и условию невозгораемости.

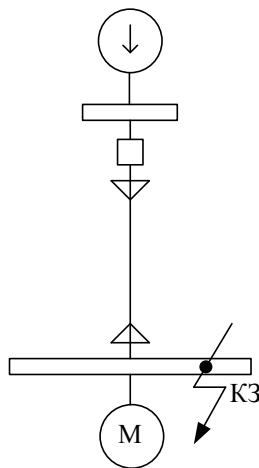


Рис. 1. Схема выдачи мощности электростанции

Решение:

Критерии проверки кабелей по термической стойкости и условию невозгорания в режиме КЗ:

$$\Theta_{Kдоп} \geq \Theta_K,$$

где Θ_K – температура жилы в момент отключения КЗ;

$\Theta_{Kдоп}$ – предельное значение температуры по условиям термической стойкости, либо по условию невозгорания.

1. Проверка по термической стойкости.

Решение может быть выполнено двумя способами.

Ивановский государственный энергетический университет
Международная олимпиада «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА - 2013»
Первый способ.

Определение $q_{мин}$ – минимального термически стойкого сечения.

$$q_{мин} = \frac{\sqrt{B_{\kappa}}}{C},$$

где B_{κ} – интеграл Джоуля, определенный при срабатывании основной релейной защиты;

C – параметр, зависящий от теплофизических свойств проводников.

Для кабелей с бумажной изоляцией и алюминиевыми жилами $C = 90 \frac{A \cdot c^{0.5}}{мм^2}$, а

$$B_{\kappa} = I_{n,0}^2 \cdot (t_{отк} + T_a);$$

$$B_{\kappa} = 15^2 \cdot (0,1 + 0,07 + 0,06) = 51,75 \text{ кА}^2\text{с}.$$

$$q_{мин} = \frac{\sqrt{51,75 \cdot 10^6}}{90} = 80 \text{ мм}^2.$$

$q_{мин} < q$, – кабель термически стоек.

Второй способ.

$$\Theta_K = \Theta_H \cdot e^k + a \cdot (e^k - 1).$$

$$k = \frac{b \cdot B_{\kappa}}{q^2}.$$

B_{κ} определяется при срабатывании основной релейной защиты.

$$B_{\kappa} = 51,75 \text{ кА}^2\text{с}.$$

$$k = \frac{45,65 \cdot 51,75}{95^2} = 0,26.$$

$$\Theta_K = 65 \cdot e^{0,26} + 228 \cdot (e^{0,26} - 1) = 152,9 \text{ } (^{\circ}\text{C}).$$

$200 > 152,9$, $\Theta_{Кдоп} > \Theta_K$ – кабель термически стоек.

2. Проверка кабеля по условиям невозгорания.

Интеграл Джоуля B_{κ} определяется при срабатывании резервной релейной защиты.

$$B_{\kappa} = 15^2 (0,8 + 0,07 + 0,06) = 209,25 \text{ кА}^2\text{с}.$$

$$k = \frac{b \cdot B_{\kappa}}{q^2} = \frac{45,65 \cdot 209,25}{95^2} = 1,06.$$

$$\Theta_K = 65 \cdot e^{1,06} + 228 \cdot (e^{1,06} - 1) = 615,8^{\circ}\text{C}.$$

$\Theta_K > \Theta_{Кдоп}$, $615,8 > 350$ – кабель не обладает стойкостью к возгоранию.

Шкала оценок:

Ивановский государственный энергетический университет
Международная олимпиада «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА - 2013»

2 баллов – сформулирован правильно критерий проверки кабеля по термической стойкости либо по невозгораемости;

3 баллов – сформулированы правильно критерии проверки кабеля по термической стойкости и по невозгораемости;

17 баллов – сформулирован правильно критерий проверки кабеля по термической стойкости и проведена проверка кабеля по данному условию;

18 баллов – сформулирован правильно критерий проверки кабеля по невозгораемости и проведена проверка кабеля по данному условию;

35 баллов – сформулированы правильно критерии проверки кабеля по термической стойкости и по невозгораемости и проведены проверки кабеля по данным условиям.