

# Схемы замещения элементов электрических сетей

## План

Теория .....	1
Задачи .....	5

## Теория

Основными элементами электроэнергетических систем являются:

- источники электроэнергии;
- повышающие и понижающие трансформаторы;
- воздушные и кабельные линии электропередачи;
- потребители электроэнергии.

Все элементы электроэнергетических систем работают взаимосвязанно и для анализа режимов их работы необходимо рассматривать схемы замещения каждого элемента. Под схемой замещения элемента электрической сети трехфазного переменного тока частотой 50 Гц понимается совокупность фазных сопротивлений и проводимостей, позволяющая достаточно точно моделировать элемент при расчетах установившихся режимов электрических сетей.

Далее рассмотрены схемы замещения элементов электроэнергетических систем, предназначенные для анализа установившихся режимов.

Трехфазная линия переменного тока напряжением  $U \leq 500$  кВ и длиной до 250—300 км может быть представлена Π-образной схемой замещения в однолинейном виде с сосредоточенными параметрами (рис. 1.1).

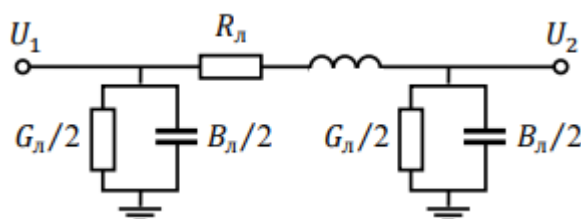


Рисунок 1.1 Схема замещения линии электропередачи

Полное продольное сопротивление схемы замещения (1.1)

$$Z = R + jX$$

В лекциях рассматриваются удельные (погонные) активные  $R_0$  и усредненные реактивные  $X_0$  сопротивления линий для стандартных сечений, Ом/км. Полные продольные активные и реактивные сопротивления определяются по формулам, Ом: (1.2) и (1.3)

$$R = R_0 l / n$$

$$X = X_0 l / n$$

где  $l$  — длина линий электропередачи;  $n$  — число параллельных линий.

Уточненное индуктивное сопротивление фазы одноцепной транспонированной линии, Ом/км, с проводами из цветных металлов (медь, алюминий, сталеалюминий) определяется с учетом взаимодействия фаз по соотношению (1.4) и (1.5)

$$X_0 = 0,1445 \lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_3} + \frac{0,0157}{m}$$

$$D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{D_{12} D_{13} D_{23}}$$

где  $D_{\text{ср}}$  — среднегеометрическое расстояние между фазами, м;  $r_3$  — эквивалентный радиус фазы, м;  $m$  — число проводов в фазе. Для линий, у которых каждая фаза имеет только один провод,  $r_3 = r$ ,  $r$  — радиус провода (1.6)

$$r_3 = \sqrt[m]{r \prod_{i=2}^m a_{1i}}$$

где  $a_{1i}$  — расстояние между 1-м и  $i$ -м проводами в фазе, м;  $\prod$  — знак произведения.

Полная (активная и емкостная) проводимость (шунты узлов 1 и 2, см. рис. 1.1) схемы замещения имеет вид: (1.7)

$$Y_1 = Y_2 = \frac{G}{2} + j \frac{B}{2}$$

В справочном материале приводятся максимальные и минимальные удельные (на 1 км длины ВЛ) потери активной мощности на корону ( $\Delta P_{\text{к.о}}$ ). По этой величине определяется удельная активная проводимость ВЛ, См/км: (1.8)

$$G_0 = \frac{\Delta P_{\text{к.о}}}{U_{\text{ном}}^2}$$

Эквивалентная активная проводимость  $\circ$  параллельных ВЛ длиной  $l$  определяется по формуле (1.9)

$$G = G_0 l n$$

Емкостная проводимость линии определяется токами смещения, обусловленными электростатическими полями линии (между фазами и по отношению к земле). Величина удельной емкостной проводимости, См/км, (1.10)

$$B_0 = \frac{7,58}{\lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_3}} \cdot 10^{-6}$$

а эквивалентная емкостная проводимость (1.11)

$$B = B_0 \ln$$

Трехфазный или однофазный трансформатор при расчетах установившихся режимов обычно представляют однолинейной Г-образной схемой замещения. На рис. 1.2 приведена схема замещения двухобмоточного трансформатора.

Активное сопротивление трансформатора определяется через каталожные параметры, Ом: (1.12)

$$R_T = \frac{\Delta P_{\text{к.з}} U_{\text{НОМ}}^2}{S_H^2}$$

где  $U_H$  — номинальное линейное (обычно высшее) напряжение обмотки, к которой приводится сопротивление;  $S_H$  — номинальная трехфазная мощность трансформатора;  $\Delta P_{\text{к.з}}$  — потери активной мощности в трех фазах трансформатора в режиме короткого замыкания.

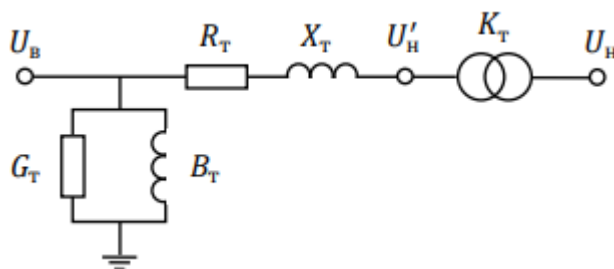


Рисунок 1.2 Схема замещения двухобмоточного трансформатора

Реактивное сопротивление трансформатора определяется через каталожные параметры, Ом: (1.13)

$$X_T = \frac{u_{\text{к}} \% U_{\text{НОМ}}^2}{100 S_H}$$

где  $u_{\text{к}} \%$  — напряжение короткого замыкания в % от высшего номинального линейного напряжения.

Активная проводимость трансформатора, См, обусловлена нагревом стали за счет вихревых токов и определяется по формуле: (1.14)

$$G = \Delta P_{\text{х.х}} / U_{\text{В.Н}}^2$$

где  $\Delta P_{\text{х.х}}$  — потери активной мощности в трех фазах трансформатора в режиме холостого хода.

Индуктивная проводимость трансформатора, См, обусловлена потерями на намагничивание и определяется как [\(1.15\)](#)

$$B_T = \sqrt{3} i_{x.x} / U_{B.H}$$

где  $i_{x.x}$  — ток холостого хода трансформатора.

Зачастую при расчетах пренебрегают изменением напряжения на шинах трансформатора и используют схему замещения с постоянными потерями в шунте трансформатора. Эти потери принимаются равными потерям холостого хода. Схема замещения имеет вид, показанный на [рис. 1.3](#).

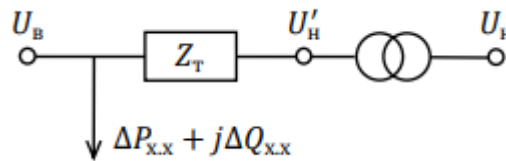


Рисунок 1.3 Схема замещения двухобмоточного трансформатора с постоянными потерями в стали

На [рис. 1.4](#) приведена схема замещения трехобмоточного трансформатора. Проводимости  $G_T$  и  $B_T$  определяются по тем же формулам, что и для двухобмоточного трансформатора.

Сопротивления обмоток среднего  $R'_c, X'_c$  и низшего  $R'_H, X'_H$  напряжений приведены к стороне высшего напряжения через коэффициент трансформации: [\(1.16\)](#)

$$R'_i = R_i \left( \frac{U_{B.H}}{U_{i.H}} \right)^2, \quad X'_i = X_i \left( \frac{U_{B.H}}{U_{i.H}} \right)^2, \quad i = H, c$$

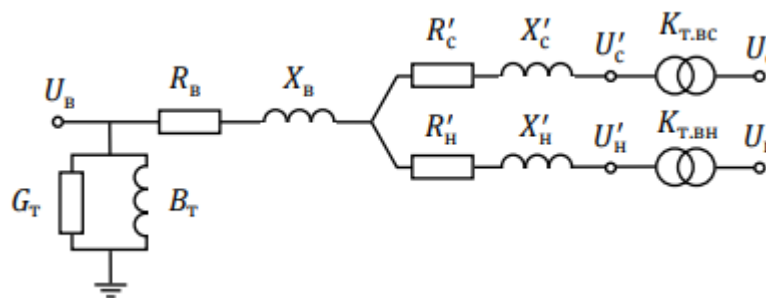


Рисунок 1.4 Схема замещения трехобмоточного трансформатора

Активные и индуктивные сопротивления обмоток: [\(1.17\)](#) и [\(1.18\)](#)

$$R_i = \frac{\Delta P_{i,K.З.} U_{B.H}^2}{2 S_H^2}$$

$$X'_i = \frac{u_{i,K} \% U_{B.H}^2}{100 S_H}$$

Схема замещения автотрансформатора не отличается от схемы замещения трехобмоточного трансформатора.

## Задачи

### Задача 1

Составить схему замещения электрической сети ([рис. 1.5](#)). Исходные данные: ЛЭП1 длиной 160 км выполнена проводом 2АС–300×2, номинальное напряжение 330 кВ; ЛЭП2 длиной 90 км выполнена проводом 4АС–300, номинальное напряжение 220 кВ; Т1 — автотрансформатор ЗАТДЦН–240000/330/220; мощности нагрузок  $P_4 = 400$  МВт,  $P_5 = 50$  МВт,  $\cos\varphi = 0,9$ .

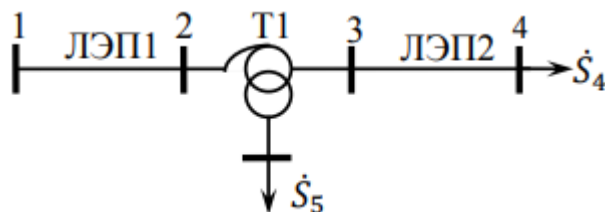


Рисунок 1.5 Исходная схема сети

### Решение задачи

Схема замещения электрической сети приведена на [рис. 1.6](#).

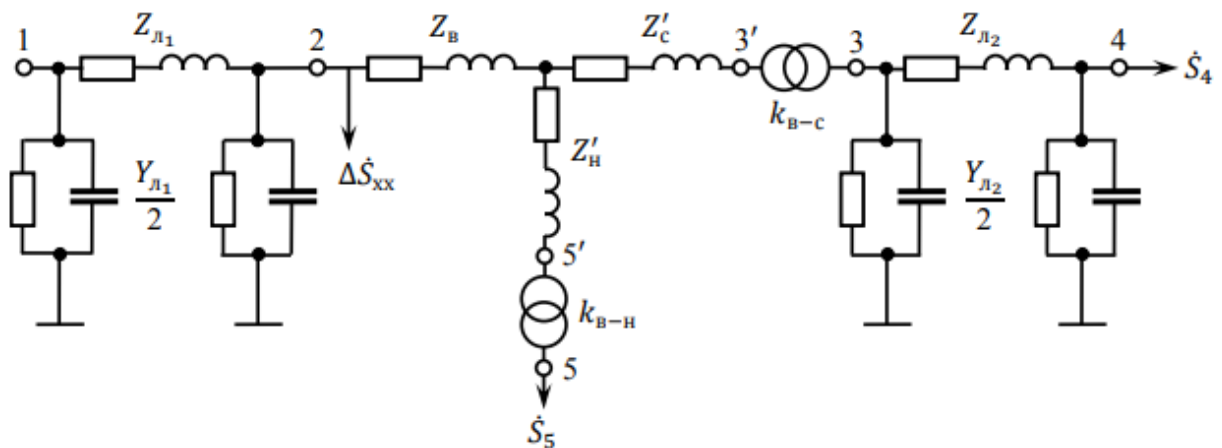


Рисунок 1.6 Схема замещения сети

При расчете параметров схемы замещения сети использованы удельные показатели линий Табл.1-3

Таблица 1

Напряже- ние ВЛ, кВ	Номинальное сечение, мм <sup>2</sup>	Коли- чество проводов в фазе	$\Delta W_{\text{к max}}$ тыс. кВтч/км	$\Delta W_{\text{к min}}$ тыс. кВтч/км	$\Delta P_{\text{к max}}$ кВт/км	$\Delta P_{\text{к min}}$ кВт/км
220	240/32	1	24	18	2,7	2,0
	300/39	1	22	16	2,5	1,8
	400/51	1	15	11	1,7	1,3
	500/64	1	13	9	1,5	1,0
330	240/32	2	38	28	4,3	3,2
	300/39	2	30	22	3,4	2,5
	400/51	2	23	16	2,6	1,8
	500/64	2	17	12	1,9	1,4
500	300/43	3	70	50	8,0	5,7
	400/51	3	60	44	6,2	5,0
	500/64	3	43	30	4,9	3,4
750	240/56	5	140		16,0	
	300/66	5	120		13,7	
	400/22	5	100		11,4	
	400/51	5	95		10,8	
	400/93	4	160		18,3	
	500/64	4	145		16,6	
1150	240/39	11	360		41,1	
	330/43	8	240		27,4	

Таблица 2

Напряжение, кВ	Тип опор	Материал опор	Район по гололеду	Предельная экономическая нагрузка на одну цепь, А, при сечении, мм <sup>2</sup>								
				70	95	120	150	185	240	300	400	500
35	Одноцепные	Железобетон	I-II	-	100	155	200	-	-	-	-	-
			III-IV	-	95	140	200	-	-	-	-	-
		Сталь	I-II	70	125	135	200	-	-	-	-	-
			III-IV	-	115	125	200	-	-	-	-	-
	Двухцепные	Железобетон	I-II	80	115	170	180	-	-	-	-	-
			III-IV	65	90	165	180	-	-	-	-	-
		Сталь	I-II	75	125	140	180	-	-	-	-	-
			III-IV	55	100	120	180	-	-	-	-	-
110	Одноцепные	Железобетон	I-II	55	-	135	185	220	370	-	-	-
			III-IV	-	-	125	150	230	370	-	-	-
		Сталь	I-II	55	115	-	185	215	370	-	-	-
			III-IV	-	85	110	165	200	370	-	-	-
	Двухцепные	Железобетон	I-II	65	105	150	190	215	340	-	-	-
			III-IV	55	80	150	170	210	340	-	-	-
		Сталь	I-II	60	115	-	205	220	340	-	-	-
			III-IV	45	90	110	180	210	340	-	-	-
220	Одноцепные	Железобетон, сталь	I-IV	-	-	-	-	-	280	385	480	-
	Двухцепные	То же	I-IV	-	-	-	-	-	305	375	460	-
330	Одноцепные	« «	I-IV	-	-	-	-	-	500	800	940	1350
500	«	« «	II-IV	-	-	-	-	-	-	1120	1545	2000
750	«	Сталь	II-IV	-	-	-	-	-	-	1620	Свыше 1620	-

Таблица 3

Напряжение, кВ	Тип опор	Материал опор	Район по гололеду	Предельная экономическая нагрузка на одну цепь, А, при сечении, мм <sup>2</sup>								
				70	95	120	150	185	240	300	400	500
35	Одноцепные	Железобетон	I-II	-	110	170	220	-	-	-	-	-
			III-IV	-	90	160	220	-	-	-	-	-
		Сталь	I-II	85	130	150	220	-	-	-	-	-
			III-IV	-	110	140	220	-	-	-	-	-
	Двухцепные	Железобетон	I-II	100	130	185	200	-	-	-	-	-
			III-IV	85	95	180	200	-	-	-	-	-
		Сталь	I-II	95	145	150	200	-	-	-	-	-
			III-IV	70	100	135	200	-	-	-	-	-
110	Одноцепные	Железобетон	I-II	55	-	150	200	235	400	-	-	-
			III-IV	-	-	140	160	250	400	-	-	-
		Сталь	I-II	55	120	-	200	230	400	-	-	-
			III-IV	-	95	115	175	215	400	-	-	-
	Двухцепные	Железобетон	I-II	65	110	165	205	230	380	-	-	-
			III-IV	55	85	160	190	225	380	-	-	-
		Сталь	I-II	65	125	-	225	240	380	-	-	-
			III-IV	45	100	120	195	230	380	-	-	-
220	Одноцепные	Железобетон, сталь	I-IV	-	-	-	-	-	305	420	520	-
	Двухцепные	То же	I-IV	-	-	-	-	-	330	405	495	-
330	Одноцепные	« «	I-IV	-	-	-	-	-	-	-	-	-
500	«	« «	II-IV	-	-	-	-	-	-	1190	1640	2150
750	«	Сталь	II-IV	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Параметры схемы замещения воздушных линий электропередачи определяются по соотношениям, приведенным в [теоретическом разделе](#):

$$R_{\text{л}} = \frac{R_0 l}{n}$$

$$X_{\text{л}} = \frac{X_0 l}{n}$$

$$B_{\text{л}} = B_0 l n$$

$$G_{\text{л}} = G_0 l n$$

где  $G_0 = \Delta P_{\text{кор.ср}} / U_{\text{ном}}^2$  и  $\Delta P_{\text{кор.ср}} = (\Delta P_{\text{кор.мах}} + \Delta P_{\text{кор.мин}}) / 2$ .

Параметры ЛЭП1 – 2АС–300×2:

$$R_0 = 0,048 \text{ Ом/км}, \quad X_0 = 0,328 \text{ Ом/км}, \quad B_0 = 3,14 \cdot 10^{-6} \text{ См/км},$$

$$\Delta P_{\text{кор.мах}} = 3,4 \text{ кВт/км}, \quad \Delta P_{\text{кор.мин}} = 2,5 \text{ кВт/км}.$$

$$\text{Тогда: } R_{\text{л1}} = 0,048 \cdot 160 / 2 = 3,84 \text{ Ом};$$

$$X_{\text{л1}} = 0,328 \cdot 160 / 2 = 2,24 \text{ Ом};$$

$$B_{\text{л1}} = 3,41 \cdot 10^{-6} \cdot 160 \cdot 2 = 10,9 \cdot 10^{-4} \text{ См};$$

$$\Delta P_{\text{кор.ср}} = \frac{3,4+2,5}{2} = 2,95 \text{ кВт/км};$$

$$G_0 = \frac{2,95 \cdot 10^3}{330^2 \cdot 10^6} = 2,7 \cdot 10^{-8} \text{ См/км};$$

$$G_{\text{л1}} = 2,7 \cdot 10^{-8} \cdot 160 \cdot 2 = 8,6 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

$$Z_{л1} = (3,84 + j26,24) \text{ Ом};$$

$$Y_{л1} = (0,86 + j10,9) \cdot 10^{-4} \text{ См.}$$

Параметры ЛЭП2 – 4АС–300:  $R_0 = 0,098 \text{ Ом/км}$ ,  $X_0 = 0,429 \text{ Ом/км}$ ,  
 $B_0 = 2,64 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}$ ,  $\Delta P_{\text{кор. max}} = 2,5 \text{ кВт/км}$ ,  $\Delta P_{\text{кор. min}} = 1,8 \text{ кВт/км}$ .

$$\text{Тогда: } R_{л2} = 0,098 \cdot 90/4 = 2,21 \text{ Ом};$$

$$X_{л2} = 0,429 \cdot 90/4 = 9,65 \text{ Ом};$$

$$B_{л2} = 2,64 \cdot 10^{-6} \cdot 90 \cdot 4 = 9,5 \cdot 10^{-4} \text{ См};$$

$$\Delta P_{\text{кор. ср}} = \frac{2,5+1,8}{2} = 2,15 \text{ кВт/км};$$

$$G_0 = \frac{2,15 \cdot 10^3}{220^2 \cdot 10^6} = 4,44 \cdot 10^{-8} \text{ См/км};$$

$$G_{л2} = 4,44 \cdot 10^{-8} \cdot 90 \cdot 4 = 0,16 \cdot 10^{-4} \text{ См};$$

$$Z_{л2} = (2,21 + j9,65) \text{ Ом};$$

$$Y_{л1} = (0,16 + j9,5) \cdot 10^{-4} \text{ См.}$$

Параметры автотрансформатора ЗАТДЦТН–240000/330/220  
определены на основе таблицы 4:

$$R_{\text{BH}} = 0,4 \text{ Ом}, R'_{\text{CH}} = 0,4 \text{ Ом}, R'_{\text{HH}} = 7,3 \text{ Ом}, X_{\text{BH}} = 39,2 \text{ Ом}, X'_{\text{CH}} = 0, \\ X'_{\text{HH}} = 278,4 \text{ Ом}, \Delta P_{\text{ххТ}} = 130 \text{ кВт}, \Delta Q_{\text{ххТ}} = 1200 \text{ квар.}$$

Все параметры автотрансформатора ЗАТДЦТН–240000/330/220  
приведены к номинальному напряжению высшей обмотки.

Потери в стали трансформаторов можно считать неизменными,  
независимыми от колебаний напряжения на шинах высшего напряжения  
трансформатора, в этом случае  $\Delta \dot{S}_{\text{ст}} = \Delta \dot{S}_{\text{хх}}$ .

Теперь:

$$\Delta \dot{S}_{\text{хх}} = n(\Delta P_{\text{ххТ}} + j\Delta Q_{\text{ххТ}}) = 3 \cdot (0,13 + j1,2) = (0,39 + \\ j3,6) \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$R'_c = R_B = R_{\text{BH}} \frac{1}{n} = 0,4 \cdot \frac{1}{3} = 0,13 \text{ Ом};$$

$$R'_H = R'_{\text{HH}} \frac{1}{n} = 7,3 \cdot \frac{1}{3} = 2,43 \text{ Ом};$$

$$X_c = 0;$$

$$X_B = X_{\text{BH}} \frac{1}{n} = 39,2 \cdot \frac{1}{3} = 13,06 \text{ Ом};$$

$$X'_H = X'_{\text{HH}} \frac{1}{n} = 278,4 \cdot \frac{1}{3} = 92,6 \text{ Ом};$$



$$Z_B = (0,13 + j13) \text{ Ом};$$

$$Z'_C = 0,13 \text{ Ом};$$

$$Z'_H = (2,43 + j92,6) \text{ Ом}.$$

Для завершения схемы замещения следует найти реактивные мощности нагрузок,  $Q = P \cdot \operatorname{tg} \varphi$ , по известным активным мощностям и  $\cos \varphi$ ,  $\dot{S}_4 = (400 + j192) \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ,  $\dot{S}_5 = (50 + j24,2) \text{ МВ} \cdot \text{А}$ .