

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования**

**К Г Э У**

**«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»**

**(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)**

---

---

**Кафедра № ЭСиС**

Только для преподавателей

Экз. № \_\_\_\_\_

**УЧЕБНО - МЕТОДИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА**

**по учебной дисциплине**

**Б.1.В.ДВ.13. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Практическое занятие:**

**ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЕ СХЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ.**

**УТВЕРЖДАЮ**

**Заведующий кафедрой ЭСиС**

**Максимов В.В.**

« » \_\_\_\_\_ 201\_ г.

**УЧЕБНО - МЕТОДИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА**

**по учебной дисциплине «Физико-математическое моделирование  
электроэнергетических систем»**

**Практическое занятие:**

**ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЕ СХЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ.**

**Учебные и воспитательные цели:**

1. Дать систематизированные знания о физико-математическом моделировании электроэнергетических систем.
2. Освоить приёмы основных вероятностных расчётов в электроэнергетических задачах

**Вид занятия:** Практическое занятие.

**Продолжительность занятия:** 2 часа.

**Структура занятия и расчет времени.**

<b>№п/п</b>	<b>Структура занятия</b>	<b>Время, мин</b>
<b>1</b>	<b>Вводная часть</b>	<b>10-15</b>
<b>2</b>	<b>Основная часть</b> <b>1. Решение задач.</b>	<b>70-75</b>
<b>3</b>	<b>Заключительная часть</b>	<b>3-5</b>

**Вводная часть занятия:** проверить наличие и готовность обучающихся к занятию; провести опрос по пройденному материалу в соответствии с перечнем вопросов и подвести его итоги; объявить тему и учебные цели занятия; обратить внимание обучающихся на важность изучения учебных вопросов занятия, так как знание их может быть востребовано при выполнении курсовой работы и выпускной квалификационной работы.



Л <sub>1</sub>	АС- 240/32	220	80	2	0,11 8	0,43 5	0	2,604
Л <sub>2</sub>	АС- 240/32	220	40	2	0,11 8	0,43 5	0	2,604

Мощность нагрузки Н<sub>1</sub>:  $\underline{S}_{H1} = 80 + j36$  МВА.

Мощность нагрузки Н<sub>2</sub>:  $\underline{S}_{H2} = 120 + j50$  МВА. Напряжение на шинах нагрузки Н<sub>2</sub>:  $U_2 = 226$  кВ.

Расчет выполним в системе Mathcad: сопротивления – в омах, проводимости – в сименсах, коэффициент распространения волны – в радианах, напряжения – в киловольтах, токи – в килоамперах, передаваемая мощность – в мегавольт-амперах, потери холостого хода трансформаторов и потери в реакторах – в киловольт-амперах.

Системная переменная Mathcad номера начального индекса:

$$\underline{\text{ORIGIN}} := 1$$

Номинальное напряжение сети и погонные параметры линий Л<sub>1</sub> и Л<sub>2</sub>:

$$U_{\text{nom}} := 220 \quad r_0 := 0.118 \quad x_0 := 0.435 \quad b_0 := 2.604 \cdot 10^{-6}$$

Параметры четырехполюсника ЛЭП – Л<sub>1</sub>:

$$l_1 := 80 \quad z_0 := \frac{r_0 + j \cdot x_0}{2} \quad y_0 := 2 \cdot j \cdot b_0 \quad z_0 = 0.059 + 0.217i \quad y_0 = 5.208i \times 10^{-6}$$

$$L_1 := \begin{bmatrix} 1 + \frac{z_0 \cdot y_0 \cdot l_1^2}{2} & z_0 \cdot l_1 \\ y_0 \cdot l_1 \cdot \left( 1 + \frac{y_0 \cdot z_0 \cdot l_1^2}{4} \right) & 1 + \frac{z_0 \cdot y_0 \cdot l_1^2}{2} \end{bmatrix}$$

$$L_1 = \begin{pmatrix} 0.996 + 9.833i \times 10^{-4} & 4.72 + 17.4i \\ -2.048 \times 10^{-7} + 4.159i \times 10^{-4} & 0.996 + 9.833i \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

Параметры четырехполюсника ЛЭП – Л<sub>2</sub>:

$$\underline{l}_2 := 40 \quad \underline{z}_0 := \frac{r_0 + j \cdot x_0}{2} \quad \underline{y}_0 := 2 \cdot (g_0 + j \cdot b_0)$$

$$z_0 = 0.059 + 0.217i \quad y_0 = 5.208i \times 10^{-6}$$

$$L_2 := \begin{bmatrix} 1 + \frac{z_0 \cdot y_0 \cdot l_1^2}{2} & z_0 \cdot l_1 \\ y_0 \cdot l_1 \cdot \left(1 + \frac{y_0 \cdot z_0 \cdot l_1^2}{4}\right) & 1 + \frac{z_0 \cdot y_0 \cdot l_1^2}{2} \end{bmatrix}$$

$$L_2 = \begin{pmatrix} 0.999 + 2.458i \times 10^{-4} & 2.36 + 8.7i \\ -2.56 \times 10^{-8} + 2.082i \times 10^{-4} & 0.999 + 2.458i \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

Параметры четырехполюсника нагрузки –  $H_1$ :

$$S_{H1} := 80 + j \cdot 36$$

$$Y_{H1} := \frac{\overline{S_{H1}}}{U_{nom}^2} \quad Y_{H1} = 1.653 \times 10^{-3} - 7.438i \times 10^{-4}$$

$$H_1 := \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ Y_{H1} & 1 \end{pmatrix} \quad H_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1.653 \times 10^{-3} - 7.438i \times 10^{-4} & 1 \end{pmatrix}$$

Параметры эквивалентного четырехполюсника:

$$\underline{\underline{A}} := L_1 \cdot H_1 \cdot L_2 \quad A = \begin{pmatrix} 1.013 + 0.027i & 6.884 + 26.296i \\ 1.646 \times 10^{-3} - 1.154i \times 10^{-4} & 1.002 + 0.015i \end{pmatrix}$$

Параметры эквивалентной П-образной схемы замещения:

$$Z := A_{1,2} \quad Y_1 := \frac{A_{2,2} - 1}{Z} \quad Y_2 := \frac{A_{1,1} - 1}{Z}$$

$$Z = 6.884 + 26.296i \quad Y_1 = 5.469 \times 10^{-4} + 6.043i \times 10^{-5}$$

$$Y_2 = 1.094 \times 10^{-3} - 1.916i \times 10^{-4}$$

Определение напряжения и мощности в начале схемы сети:

$$S_{H2} := 120 + j \cdot 50 \quad S_2 := S_{H2} \quad U_2 := 226$$

$$I_2 := \frac{\overline{S_2}}{U_2} \quad I_2 = 0.531 - 0.221i$$

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ I_1 \end{pmatrix} := A \cdot \begin{pmatrix} U_2 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} U_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 238.313 + 18.641i \\ 0.907 - 0.24i \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} |U_1| \\ |I_1| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 239.041 \\ 0.939 \end{pmatrix}$$

$$S_1 := U_1 \cdot \overline{I_1} \quad S_1 = 211.76 + 74.098i$$

В П-образной схеме замещения сети в проводимости  $\underline{Y}_1$  и  $\underline{Y}_2$  вошла проводимость нагрузки  $H_1$ .

**Пример 2.** Получим эквивалентную схему электропередачи, показанной на рис. 3.26. Преобразуем для этого элементы  $T_1$ ,  $P_1$ ,  $L$ ,  $P_2$  и  $T_2$  в

эквивалентную схему, представленную четырехполюсником и П-образной схемой замещения. Вычислим напряжение и мощность в начале электропередачи по известным напряжению и мощности в ее конце по уравнению эквивалентного четырехполюсника.

Схема имеет одноцепную ЛЭП и по одному трансформатору с обеих сторон.

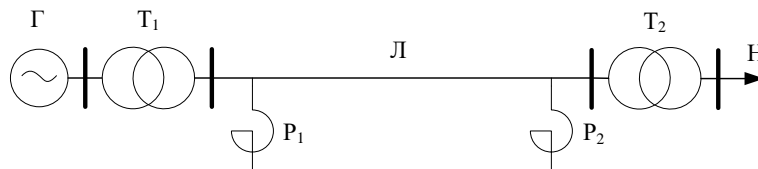


Рис. 3.26. Схема электропередачи

Параметры трансформаторов – Т<sub>1</sub> и Т<sub>2</sub> :

Элемент	Тип	$S_{ном},$ МВ·А	$U_{вн},$ кВ	$U_{нн},$ кВ	$R,$ Ом	$X,$ Ом	$P_x,$ кВт	$Q_x,$ квар
Т <sub>1</sub>	ТЦ-630000/500	630	525	15,75	0,9	61,3	500	2205
Т <sub>2</sub>	3хАОДЦТН-167000/500	3х167	500	230	1,0	61,1	3×125	3×2004

Параметры ЛЭП – Л:

Элемент	Конструкция фазы	$U_{ном},$ кВ	$L,$ км	$r_0,$ Ом/км	$x_0,$ Ом/км	$g_0,$ мкСм/км	$b_0,$ мкСм/км
Л	3хАС-500/64	500	525	0,2	0,304	0,08	3,64

Параметры реакторов – Р<sub>1</sub> и Р<sub>2</sub> :

Элемент	Тип	$S_{ном},$ МВ·А	$U_{ном},$ кВ	$\Delta P,$ кВт
Р <sub>1</sub> и Р <sub>2</sub>	3хРОДЦ-60	3×60	525	3×150

Мощность нагрузки – Н:  $\underline{S}_H = 350 + j140$  МВА. Напряжение на шинах нагрузки 220 кВ.

Расчет выполним в системе Mathcad: сопротивления – в омах, проводимости – в сименсах, коэффициент распространения волны – в радианах, напряжения – в киловольтах, токи – в килоамперах, передаваемая

мощность – в мегавольт-амперах, потери холостого хода трансформаторов и потери в реакторах – в киловольт-амперах.

Системная переменная Mathcad номера начального индекса:

$$\text{ORIGIN} := 1$$

Параметры четырехполюсника ЛЭП – Л:

$$U_{Lnom} := 500 \quad L := 600 \quad r_0 := 0.02 \quad x_0 := 0.304 \quad g_0 := 0.08 \cdot 10^{-6} \quad b_0 := 3.64 \cdot 10^{-6}$$

$$z_0 := r_0 + j \cdot x_0 \quad y_0 := g_0 + j \cdot b_0 \quad Z_c := \sqrt{\frac{z_0}{y_0}} \quad \gamma_0 := \sqrt{z_0 \cdot y_0}$$

$$z_0 = 0.02 + 0.304i \quad y_0 = 8 \times 10^{-8} + 3.64i \times 10^{-6}$$

$$Z_c = 289.2 - 6.323i \quad \gamma_0 = 4.615 \times 10^{-5} + 1.052i \times 10^{-3}$$

$$L := \begin{pmatrix} \cosh(\gamma_0 \cdot L) & Z_c \cdot \sinh(\gamma_0 \cdot L) \\ \frac{1}{Z_c} \cdot \sinh(\gamma_0 \cdot L) & \cosh(\gamma_0 \cdot L) \end{pmatrix}$$

$$L = \begin{pmatrix} 0.808 + 0.016i & 10.199 + 170.611i \\ 3.265 \times 10^{-5} + 2.042i \times 10^{-3} & 0.808 + 0.016i \end{pmatrix}$$

Параметры четырехполюсника повышающего трансформатора – T<sub>1</sub>:

$$U_{BH\_T1} := 525 \quad U_{HH\_T1} := 15.75 \quad n_{T1} := \frac{U_{BH\_T1}}{U_{HH\_T1}} \quad n_{T1} = 33.333$$

$$R_{T1} := 0.9 \quad X_{T1} := 61.3 \quad G_{\mu\_T1} := \frac{500}{U_{BH\_T1}^2} \cdot 10^{-3} \quad B_{\mu\_T1} := \frac{2250}{U_{BH\_T1}^2} \cdot 10^{-3}$$

$$Z_{T1} := R_{T1} + j \cdot X_{T1} \quad Y_{\mu\_T1} := G_{\mu\_T1} + j \cdot B_{\mu\_T1}$$

$$Z_{T1} = 0.9 + 61.3i \quad Y_{\mu\_T1} = 1.814 \times 10^{-6} + 8.163i \times 10^{-6}$$

$$T_1 := \begin{bmatrix} \frac{1}{n_{T1}} & \frac{Z_{T1}}{n_{T1}} \\ n_{T1} \cdot Y_{\mu\_T1} & (1 + Z_{T1} \cdot Y_{\mu\_T1}) \cdot n_{T1} \end{bmatrix}$$

$$T_1 = \begin{pmatrix} 0.03 & 0.027 + 1.839i \\ 6.047 \times 10^{-5} + 2.721i \times 10^{-4} & 33.317 + 3.952i \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

Параметры четырехполюсника понижающего трансформатора – T<sub>2</sub>:

$$U_{BH\_T2} := 500 \quad U_{HH\_T2} := 230 \quad n_{T2} := \frac{U_{BH\_T2}}{U_{HH\_T2}} \quad n_{T2} = 2.174$$

$$R_{T2} := 1 \quad X_{T2} := 61.1 \quad G_{\mu T2} := \frac{375}{U_{BH\_T2}^2} \cdot 10^{-3} \quad B_{\mu T2} := \frac{6012}{U_{BH\_T2}^2} \cdot 10^{-3}$$

$$Z_{T2} := R_{T2} + j \cdot X_{T2} \quad Y_{\mu T2} := G_{\mu T2} + j \cdot B_{\mu T2}$$

$$Z_{T2} = 1 + 61.1i \quad Y_{\mu T2} = 1.5 \times 10^{-6} + 2.405i \times 10^{-5}$$

$$T_2 := \begin{bmatrix} n_{T2} & \frac{Z_{T2}}{n_{T2}} \\ n_{T2} \cdot Y_{\mu T2} & \frac{(1 + Z_{T2} \cdot Y_{\mu T2})}{n_{T2}} \end{bmatrix}$$

$$T_2 = \begin{pmatrix} 2.174 & 0.46 + 28.106i \\ 3.261 \times 10^{-6} + 5.228i \times 10^{-5} & 0.459 + 5.322i \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

Параметры четырехполюсников реакторов – P<sub>1</sub> и P<sub>2</sub>:

$$U_{nom\_R} := 525 \quad S_{nom\_R} := 180 \quad P_{x\_R} := 450$$

$$Y_R := \frac{(P_{x\_R} \cdot 10^{-3} - j \cdot S_{nom\_R})}{U_{nom\_R}^2} \quad Y_R = 1.633 \times 10^{-6} - 6.531i \times 10^{-4} \quad R_1 := \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ Y_R & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_2 := R_1$$

Параметры эквивалентного четырехполюсника – A:

$$A := T_1 \cdot R_1 \cdot L \cdot R_2 \cdot T_2 \quad A = \begin{pmatrix} 0.056 + 9.525i \times 10^{-4} & 0.143 + 3.855i \\ 4.002 \times 10^{-3} + 0.068i & 13.18 + 0.227i \end{pmatrix}$$

Параметры эквивалентной П-образной схемы замещения:

$$Z := A_{1,2} \quad Y_1 := \frac{A_{2,2} - 1}{Z} \quad Y_2 := \frac{A_{1,1} - 1}{Z}$$

$$Z = 0.143 + 3.855i \quad Y_1 = 0.176 - 3.153i \quad Y_2 = -8.84 \times 10^{-3} + 0.245i$$

Определение напряжения и мощности в начале электропередачи:

$$S_H := 350 + j \cdot 140 \quad S_2 := S_H \quad U_2 := 220$$

$$I_2 := \frac{\overline{S_2}}{U_2} \quad I_2 = 1.591 - 0.636i$$

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ I_1 \end{pmatrix} := A \cdot \begin{pmatrix} U_2 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} U_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 14.985 + 6.252i \\ 21.992 + 7.022i \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} |U_1| \\ |I_1| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 16.237 \\ 23.086 \end{pmatrix}$$

$$S_{L1} := U_1 \cdot \overline{I_1} \quad S_1 = 373.451 + 32.271i$$



В первом примере для эквивалентирования потребовалось представление нагрузки схемой замещения в виде проводимости. Для этого были использованы номинальное напряжение и заданная мощность нагрузки. Отличие действительного напряжения на шинах нагрузки  $N_1$  от значения, которое было использовано в формуле для получения проводимости нагрузки, при использовании эквивалентной схемы в расчетах режимов приводит к погрешности, которая тем больше, чем сильнее различие в напряжениях: принятом при эквивалентировании и действительным, которое получилось бы при расчете не преобразованной схемы. Это связано с тем, что мощность нагрузки принята постоянной величиной.

Во втором примере погрешности при эквивалентировании нет. Проводимость реактора получена при его номинальном напряжении и с изменением действительного напряжения мощность, потребляемая реактором, меняется, что отражает действительную картину работы реактора.

**Заключительная часть занятия:** Ответить на вопросы, обратить их внимание на необходимость знания изученного материала.

Проверить качество усвоения учебного материала занятия.

Подвести итог занятия, оценить знания и действия.

Выдать задание на самостоятельную работу.

Объявить тему и место проведения очередного занятия, дать команду о наведении порядка в классе и об окончании занятия.

**Доцент кафедры к.т.н. доцент:**

Максимов В.В

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201 г.

Обсуждено на заседании кафедры « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201 г.,

протокол № \_\_\_\_