

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра электроснабжения

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
_____ О.Г. Локтионова
« ____ » _____ 2021 г.

ЭЛЕКТРОПИТАЮЩИЕ СЕТИ И СИСТЕМЫ. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Методические указания к практическим занятиям для студентов
направления подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и
электротехника»

Курск 2021

УДК 621.31

Составители: О.М. Ларин

Рецензент:

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение»
А.Н. Горлов

Электропитающие системы : методические указания к практическим занятиям / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: О.М. Ларин. – Курск, 2021. – 51 с.: ил. 3, табл. 13. – Библиогр.: с. 48.

Содержат методические указания для практических занятий по дисциплине «Электропитающие системы».

Методические указания соответствуют требованиям программы, для направления подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Предназначены для студентов направления подготовки 13.03.02 всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.

Усл.печ.л. . Уч.–изд.л . Тираж 100 экз. Заказ . Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г.Курск, ул.50 лет Октября, 94

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1

Расчет режима работы электрической сети

Задание 1. Рассчитаем рабочие режимы линий питающей сети (рис. 1).

Мощности нагрузок на стороне ВН трансформаторов

$$\underline{S}_2 = 22,13 + j18,35 \text{ МВ}\cdot\text{А}; \quad \underline{S}_3 = 17,11 + j14,45 \text{ МВ}\cdot\text{А};$$

$$\underline{S}_4 = 41,21 + j34,72 \text{ МВ}\cdot\text{А}.$$

Длины линий и марки использованных проводов указаны на схеме. Напряжение в ЦП поддерживается равным 117,7 кВ. По табл. находим удельные сопротивления проводов АС 240/32, АС 150/24, АС 120/19, удельные емкостные проводимости и определяем активные и реактивные сопротивления и проводимости двухцепных линий:

$$r_{12} = 0,5 \cdot 0,12 \cdot 22,5 = 1,35 \text{ Ом}; \quad x_{12} = 0,5 \cdot 0,405 \cdot 22,5 = 4,56 \text{ Ом};$$

$$b_{12} = 2 \cdot 2,81 \cdot 10^{-6} \cdot 22,5 = 1,26 \cdot 10^{-4} \text{ См};$$

$$r_{23} = 0,5 \cdot 0,198 \cdot 22,5 = 2,23 \text{ Ом}; \quad x_{23} = 0,5 \cdot 0,42 \cdot 22,5 = 4,72 \text{ Ом};$$

$$b_{23} = 2 \cdot 2,7 \cdot 10^{-6} \cdot 22,5 = 1,22 \cdot 10^{-4} \text{ См};$$

$$r_{34} = 0,5 \cdot 0,249 \cdot 30 = 3,74 \text{ Ом}; \quad x_{34} = 0,5 \cdot 0,427 \cdot 30 = 6,4 \text{ Ом};$$

$$b_{34} = 2 \cdot 2,66 \cdot 10^{-6} \cdot 30 = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ См}.$$

Составим схему замещения линии (рис. 2,3). Поскольку в местах подключения нагрузок напряжения неизвестны, а известно напряжение в начале линии, расчет проведем в два этапа.

1-й этап. Емкостные мощности, потери и потоки мощности определим по номинальному напряжению. Реактивная мощность, генерируемая линией 34,

$$Q_{C34} = \frac{1}{2} U_{ном}^2 b_{34} = \frac{1}{2} 110^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-4} = 0,97 \text{ Мвар}.$$

Мощность в конце линии 34

$$\underline{S}_{34}^k = \underline{S}_4 - jQ_{C34} = 41,21 + j34,72 - j0,97 = 41,21 + j33,75 \text{ МВ}\cdot\text{А}.$$

Потери мощности в линии 34:

$$\begin{aligned} \Delta \underline{S}_{34} &= \frac{(P_{34}^k)^2 + (Q_{34}^k)^2}{U_{ном}^2} (r_{34} + jx_{34}) = \\ &= \frac{41,21^2 + 33,75^2}{110^2} (3,74 + j6,4) = 0,88 + j1,5 \text{ МВ}\cdot\text{А}. \end{aligned}$$

Мощность в начале линии 34

$$\underline{S}_{34}^H = \underline{S}_{34}^k + \Delta \underline{S}_{34} = 41,21 + j33,75 + 0,88 + j1,5 = 42,09 + j35,25 \text{ МВ}\cdot\text{А}.$$

Аналогично проведем расчеты для линий 23 и 12:

$$Q_{C23} = \frac{1}{2} 110^2 \cdot 1,22 \cdot 10^{-4} = 0,74 \text{ Мвар};$$

$$\underline{S}_{23}^K = \underline{S}_{34}^H - jQ_{C34}^H + \underline{S}_3 - jQ_{C23}^K = 42,09 + j35,25 - j0,97 + 17,11 + \\ + j14,45 - j0,74 = 59,2 + j48 \text{ МВ}\cdot\text{А};$$

$$\Delta \underline{S}_{23} = \frac{(P_{23}^K)^2 + (Q_{23}^K)^2}{U_{ном}^2} (r_{23} + jx_{23}) = \\ = \frac{59,2^2 + 48^2}{110^2} (2,23 + j4,72) = 1,07 + j2,27 \text{ МВ}\cdot\text{А};$$

$$\underline{S}_{23}^H = \underline{S}_{23}^K + \Delta \underline{S}_{23} = 59,2 + j48 + 1,07 + j2,27 = 60,27 + j50,27 \text{ МВ}\cdot\text{А};$$

$$Q_{C12} = \frac{1}{2} 110^2 \cdot 1,264 \cdot 10^{-4} = 0,76 \text{ Мвар};$$

$$\underline{S}_{12}^K = \underline{S}_{23}^H - jQ_{C23}^H + \underline{S}_2 - jQ_{C12}^K = \\ = 60,27 + j50,27 - j0,74 + 22,13 + j18,35 - j0,76 = \\ = 82,4 + j67,12 \text{ МВ}\cdot\text{А};$$

$$\Delta \underline{S}_{12} = \frac{(P_{12}^K)^2 + (Q_{12}^K)^2}{U_{ном}^2} (r_{12} + jx_{12}) = \\ = \frac{82,4^2 + 67,12^2}{110^2} (1,35 + j4,56) = 1,26 + j4,26 \text{ МВ}\cdot\text{А}$$

$$\underline{S}_{12}^H = \underline{S}_{12}^K + \Delta \underline{S}_{12} = 82,4 + j67,12 + 1,26 + j4,25 = 83,66 + j71,37 \text{ МВ}\cdot\text{А}.$$

Мощность, текущая с шин ЦП в линию 12,

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_{12}^H - jQ_{C12} = 83,66 + j71,37 - j0,76 = 83,66 + j70,61 \text{ МВ}\cdot\text{А}.$$

2-й этап. Определим напряжения в узлах.

Напряжение \underline{U}_2 определим:

$$\Delta U_{12}^H = \frac{P_{12}^H r_{12} + Q_{12}^H x_{12}}{U_1} = \frac{83,66 \cdot 1,35 + 71,37 \cdot 4,56}{117,7} = 3,72 \text{ кВ};$$

$$\delta U_{12}^H = \frac{P_{12}^H x_{12} - Q_{12}^H r_{12}}{U_1} = \frac{83,66 \cdot 4,56 - 71,37 \cdot 1,35}{117,7} = 2,42 \text{ кВ};$$

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 - \Delta U_{12}^H - j\delta U_{12}^H = 117,7 - 3,72 - j2,42 \approx 114 - j2,42 \text{ кВ}.$$

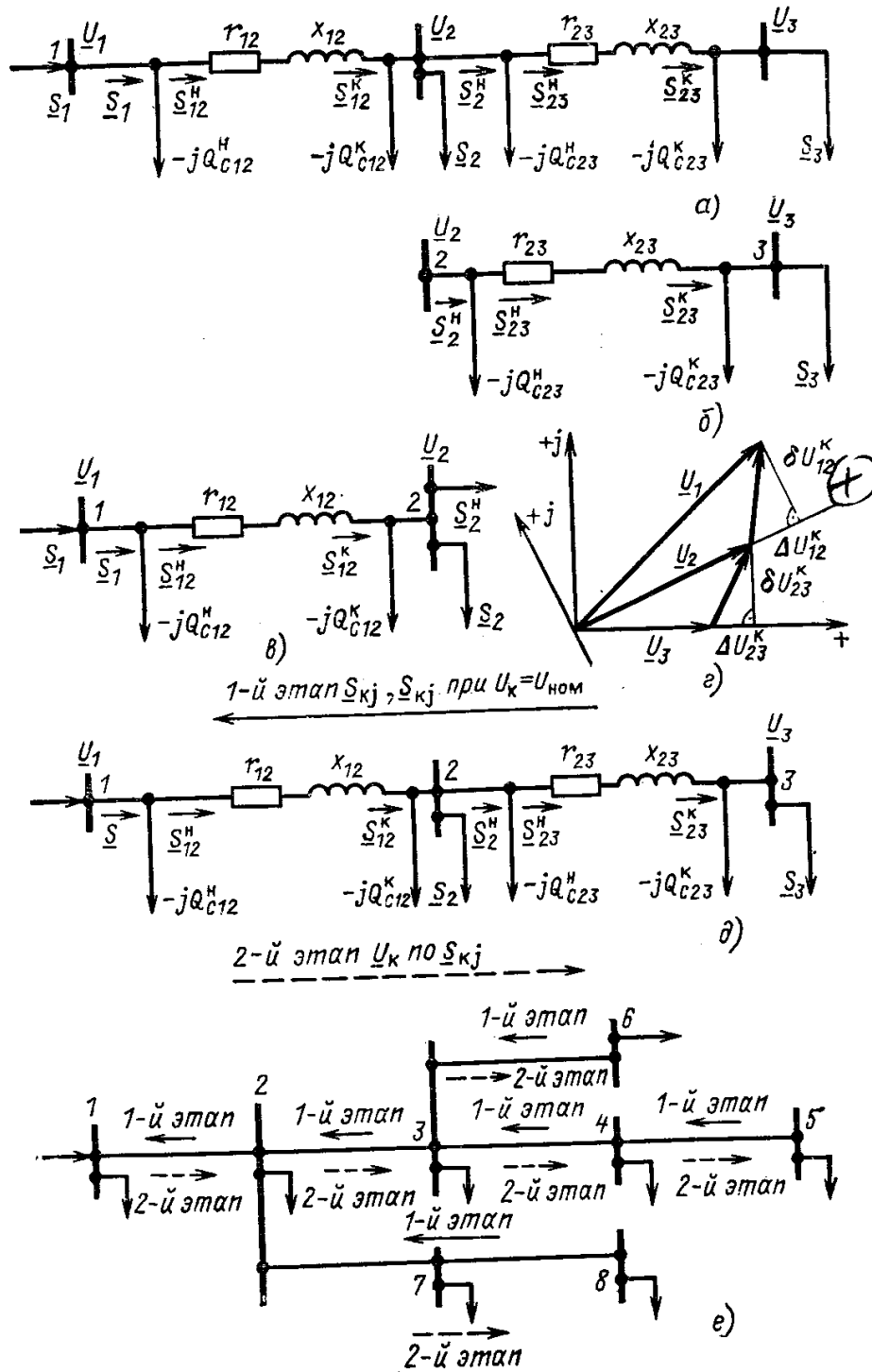
Определим модуль напряжения:

$$U_2 = \sqrt{114^2 + 2,42^2} = 114 \text{ кВ}.$$

В сетях с напряжением 110 кВ и ниже поперечной составляющей падения напряжения можно пренебречь. Ее учет заметно не сказывается на точности расчета режима сети. Так, в рассматриваемом примере, если учесть только продольную составляющую падения напряжения, напряжение в узле 2 будет

$$U_2 = U_1 - \Delta U_{12}^H = 117,7 - 3,72 \approx 114 \text{ кВ},$$

т. е. ошибка в определении U_2 не превышает погрешности округления. В дальнейшем поперечной составляющей падения напряжения пренебрегаем.



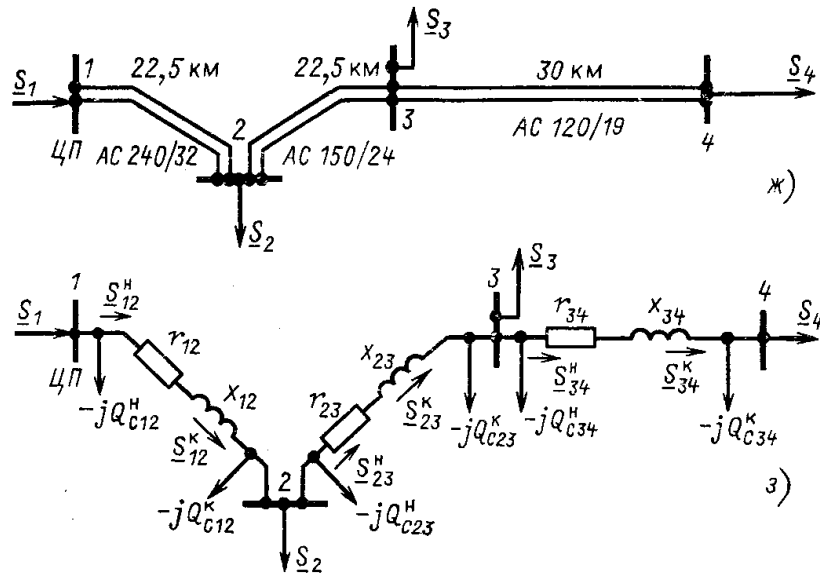


Рисунок 1. Расчет режима разомкнутой питающей сети:
а—схема замещения; *б*—схема замещения линии 23, *в*—схема замещения линии 12; *г*—векторная диаграмма напряжений; *д*—последовательность расчета в два этапа для двух линий; *е*—то же для разветвленной сети; *ж*—схема сети из трех линий; *з* — схема замещения сети из трех линий

Определим напряжения в узлах 3, 4:

$$\Delta U_{23}^H = \frac{P_{23}^H r_{23} + Q_{23}^H x_{23}}{U_2} = \frac{60,27 \cdot 2,23 + 50,27 \cdot 4,72}{114} = 3,26 \text{ кВ}$$

$$U_3 = 114 - 3,26 \approx 110,7 \text{ кВ};$$

$$\Delta U_{34}^H = \frac{P_{34}^H r_{34} + Q_{34}^H x_{34}}{U_3} = \frac{42,09 \cdot 3,74 + 35,25 \cdot 6,4}{110,7} = 3,45 \text{ кВ.}$$

$$U_4 = 110,7 - 3,45 \approx 107,2 \text{ кВ.}$$

Расчет окончен, проведение второй итерации не приводит к существенным уточнениям.

Задание 2. Кольцевая сеть (рис. 2, *и*) напряжением 110 кВ связывает электростанцию 1 с понижающими подстанциями 2, 3, имеющими расчетные нагрузки $\underline{S}_2 = 38,16 + j29,17 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ и $\underline{S}_3 = 39,2 + j32,89 \text{ МВ} \cdot \text{А}$. Марки проводов, длины линий указаны на рисунке. Сопротивления их равны: $\underline{Z}_{12} = 3,6 + j12,15 \text{ Ом}$; $\underline{Z}_{23} = 9,84 + j10,21 \text{ Ом}$; $\underline{Z}_{13} = 8,1 + j20,65 \text{ Ом}$. Напряжение на шинах электростанции равно 117,7 кВ. Определим мощность, которая поступает с шин электростанции. Расчет проведем без учета потерь мощности.

Составим схему замещения сети в виде линии с двухсторонним питанием,

разрезая кольцо в узле 1.

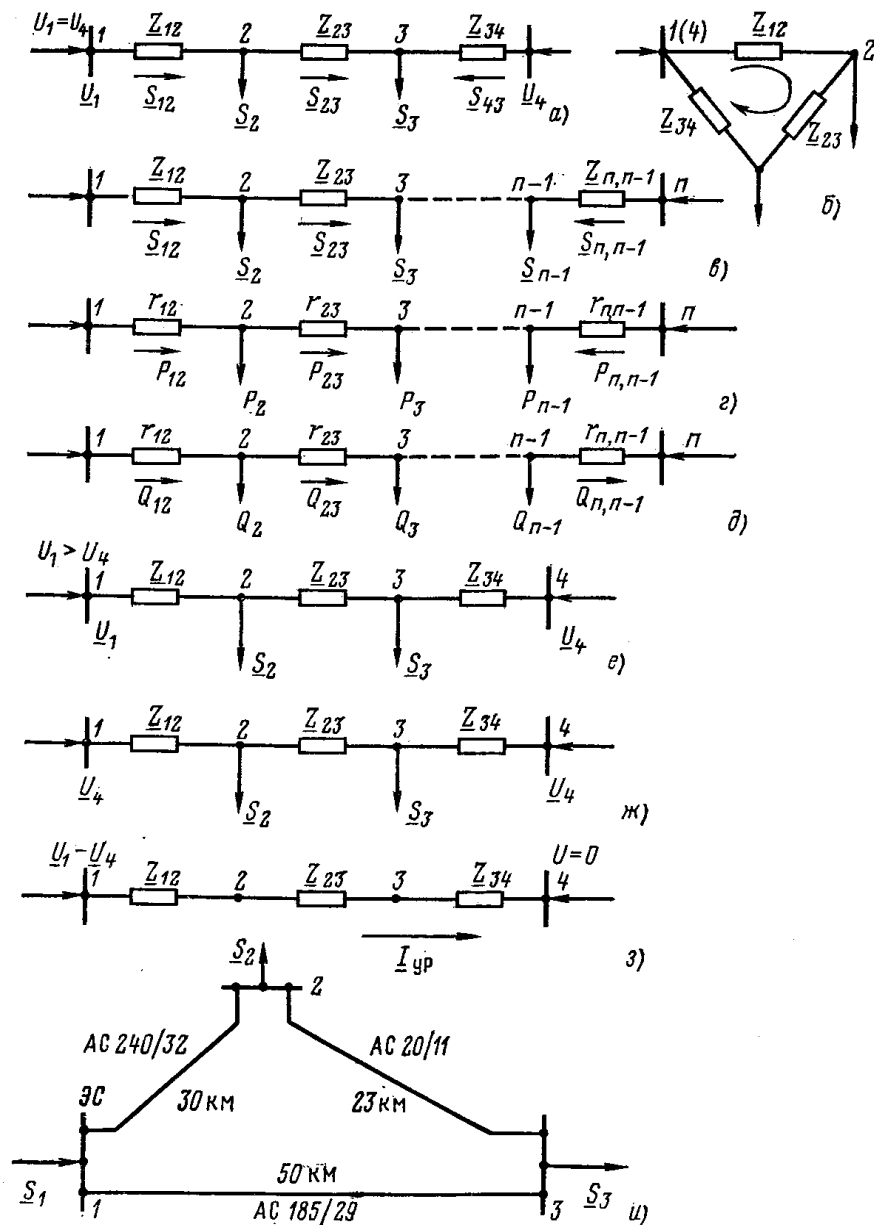


Рисунок 2. Распределение потоков мощности в линии с двухсторонним питанием без учета потерь мощности:

а—схема замещения линии с четырьмя узлами; *б*—иллюстрация второго закона Кирхгофа; *в*—линия с *n* узлами; *г*, *д*—распределение *P* и *Q* в однородной линии; *е*—линия с четырьмя узлами при $U_1 > U_4$; *ж*, *з*—эквивалентное представление линии на рис. *е*; *и*—схема кольцевой сети 110 кВ.

Определим приближенное потокораспределение в кольце с целью выявления точки потокораздела:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{12} &= \frac{(36,18 + j29,17)(9,84 - j10,21 + 8,1 - j20,65) +}{3,6 - j12,15 + 9,84 - j10,21 +} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{+(39,2 + j32,89)(8,1 - j20,65)}{+ 8,1 - j20,65} = 44,82 + j36,75 \text{ МВ}\cdot\text{А}; \\ \underline{S}_{43} &= \frac{(39,2 + j32,89)(9,84 - j10,21 + 3,6 - j12,15) +}{3,6 - j12,15 + 9,84 - j10,21 +} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{+(36,18 + j29,17)(3,6 - j12,15)}{+ 8,1 - j20,65} = 30,56 + j25,31 \text{ МВ}\cdot\text{А}. \end{aligned}$$

Проверим правильность определения потоков мощности на головных линиях кольца по условию $\underline{S}_{12} + \underline{S}_{43} = \underline{S}_2 + \underline{S}_3$:

$$44,82 + j36,75 + 30,56 + j25,31 = 75,38 + j62,06 .$$

Значения \underline{S}_{12} и \underline{S}_{43} определены верно. Находим поток мощности в линии 23 по первому закону Кирхгофа для узла 2:

$$\underline{S}_{23} = \underline{S}_{12} - \underline{S}_2 = 44,82 + j36,75 - (36,18 + j29,17) = 8,64 + j7,58 \text{ МВ}\cdot\text{А}.$$

Узел 3 — точка потоко раздела активной и реактивной мощности. Мощность, поступающая с шин электростанции и определенная без учета потерь мощности, равна

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_{12} + \underline{S}_{43} = 75,38 + j62,06 \text{ МВ}\cdot\text{А}.$$

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2

Расчет падения и потери напряжения в электрической сети

Задание 3. Определим падение и потерю напряжения в линии по известным мощности нагрузки $\underline{S}_2 = 15 + j10$ МВ·А и напряжению в конце линии $\underline{U}_2 = 109,8 - j2,65$ кВ.

Используя параметры линии, а также мощность в конце линии \underline{S}_{12}^k , найдем продольную и поперечную составляющие падения напряжения по данным конца:

$$\Delta U_{12}^k = \frac{15 \cdot 24,48 + 8,74 \cdot 34,72}{109,8} = 6,11 \text{ кВ};$$

$$\delta U_{12}^k = \frac{15 \cdot 34,72 - 8,74 \cdot 24,48}{109,8} = 2,8 \text{ кВ}.$$

Напряжения \underline{U}_1 и \underline{U}_2 приведены на рис. 3, з. В большем масштабе продольная и поперечная составляющие падения напряжения изображены на рис 3, и.

Напряжение в начале линии равно

$$\underline{U}_1 = 109,8 - j2,65 + 6,11 + j2,8 \approx 115,9 + j0,15 \text{ кВ}.$$

Модуль напряжения в начале линии

$$U_1 = \sqrt{115,9^2 + 0,15^2} = 115,9 \text{ кВ}.$$

Потеря напряжения

$$U_1 - U_2 = 115,9 - 109,8 = 6,1 \text{ кВ}.$$

Задание 4. Определим падение и потерю напряжения в линии по известным мощности в начале линии $\underline{S}_{12}^n = 15,61 + j9,6$ МВ·А и напряжению в начале линии $\underline{U} = 115,9 + j0,15$ кВ; $U_1 = 115,9$ кВ.

Используя параметры линии, приведенные в примере 1, найдем продольную и поперечную составляющие падения напряжения по данным начала:

$$\Delta U_{12}^n = \frac{15,61 \cdot 24,48 + 9,6 \cdot 34,72}{115,9} = 6,17 \text{ кВ};$$

$$\delta U_{12}^n = \frac{15,61 \cdot 34,72 - 9,6 \cdot 24,48}{115,9} = 2,65 \text{ кВ}.$$

Напряжение в конце линии

$$\underline{U}_2 = 115,9 + j0,15 - 6,17 - j2,65 \approx 109,7 - j2,5 \text{ кВ}.$$

Модуль напряжения в конце линии

$$U_2 = \sqrt{109,7^2 + 2,5^2} = 109,7 \text{ кВ.}$$

Потеря напряжения $U_1 - U_2 = 115,9 - 109,7 = 6,2 \text{ кВ.}$

Задание 5. Электрическая сеть 10 кВ выполнена кабельными линиями (рис. 4,б). Коэффициенты мощности нагрузок $\cos \varphi = 0,96$.

Найдем наибольшую потерю напряжения в сети. По табл. найдем удельные параметры кабелей:

$$\text{ААБ 95: } r_0 = 0,323 \text{ Ом/км, } x_0 = 0,083 \text{ Ом/км;}$$

$$\text{ААБ 50: } r_0 = 0,62 \text{ Ом/км, } x_0 = 0,09 \text{ Ом/км.}$$

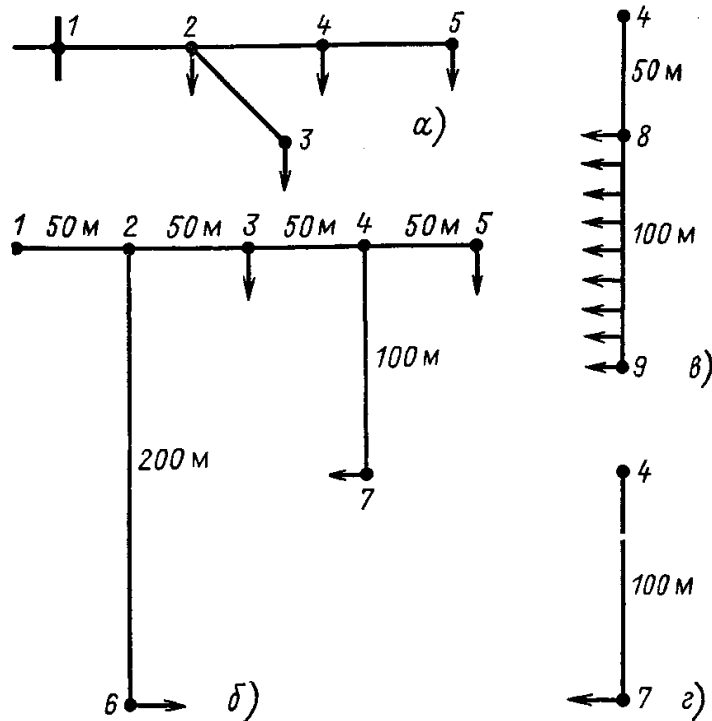


Рисунок 3. Конфигурации разветвленной распределительной сети:

a — к определению наибольшей потери напряжения; *б* — схема сети для примера 3.8; *в* — участок с равномерно распределенной нагрузкой для примера 3.8; *г* — тот же участок после замены распределенной нагрузки на сосредоточенную

Активные и реактивные сопротивления линий:

$$r_{12} = 0,5 \cdot 0,326 \cdot 0,64 = 0,104 \text{ Ом;}$$

$$x_{12} = 0,5 \cdot 0,083 \cdot 0,64 = 0,027 \text{ Ом;}$$

$$r_{23} = 0,5 \cdot 0,62 \cdot 0,5 = 0,155 \text{ Ом;}$$

$$x_{23} = 0,5 \cdot 0,09 \cdot 0,5 = 0,022 \text{ Ом.}$$

По первому закону Кирхгофа найдем активные мощности, передаваемые по линиям:

$$P_{12} = P_2 + P_3 = 1880 + 1930 = 3810 \text{ кВт};$$

$$P_{23} = P_3 = 1930 \text{ кВт}.$$

По активным мощностям и коэффициенту мощности находим реактивные мощности в линиях:

$$Q_{12} = P_{12} \operatorname{tg} \varphi = 3810 \cdot 0,292 = 1113 \text{ квар};$$

$$Q_{23} = P_{23} \operatorname{tg} \varphi = 1930 \cdot 0,292 = 564 \text{ квар}.$$

Потери напряжения в линиях 23 и 12

$$\Delta U_{23} = \frac{1930 \cdot 0,155 + 564 \cdot 0,022}{10} = 31,2 \text{ В};$$

$$\Delta U_{12} = \frac{(1880 + 1930)0,104 + (1113 + 564)0,027}{10} = 44,2 \text{ В}.$$

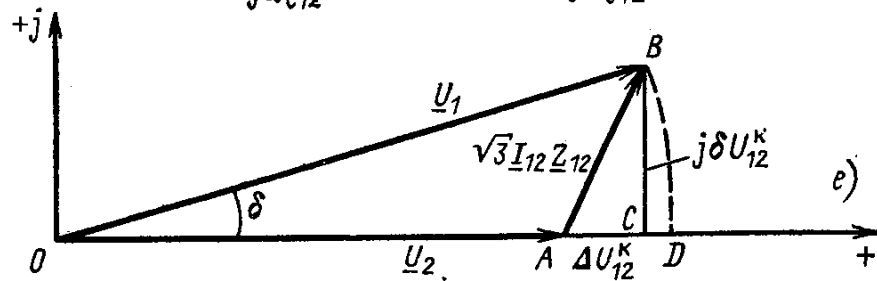
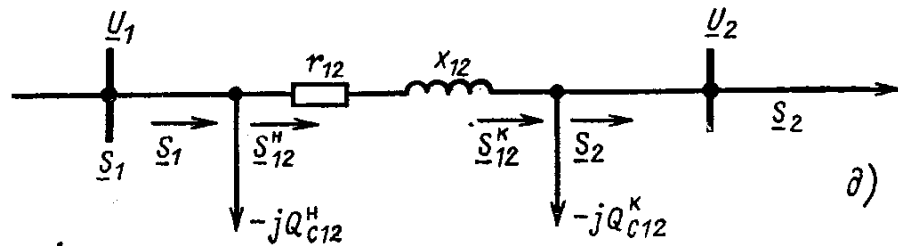
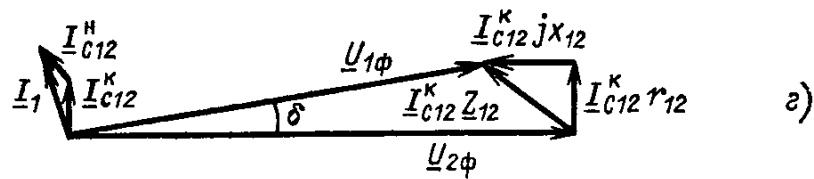
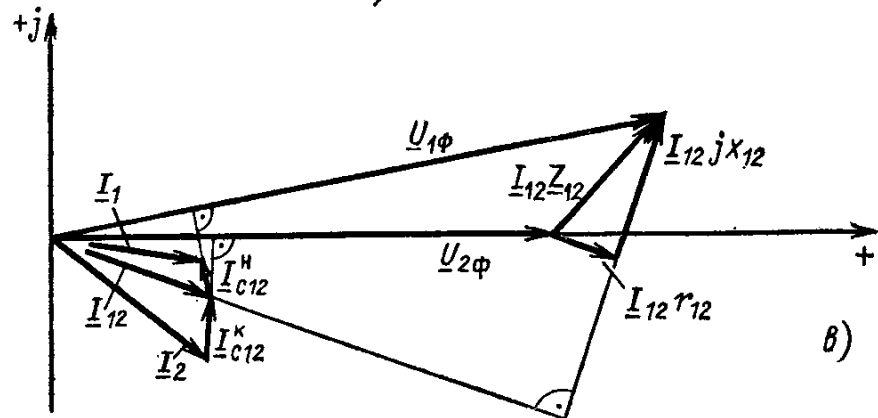
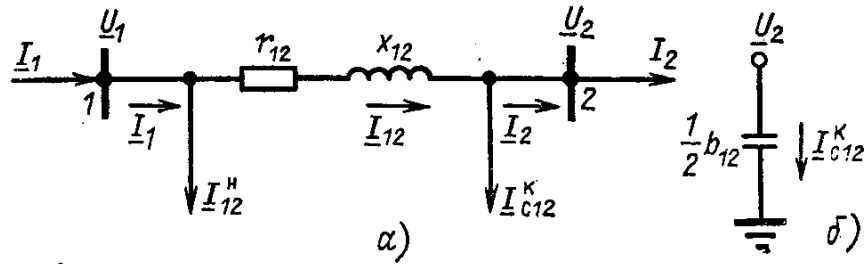
Наибольшая потеря напряжения в сети

$$\Delta U_{нб} = \Delta U_{12} + \Delta U_{23} = 31,2 + 44,2 = 75,4 \text{ В};$$

$$\Delta U_{нб} \% = \frac{0,0754}{10} 100 = 0,75\% .$$

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3

Расчет электрической сети «по данным начала» и «по данным конца»



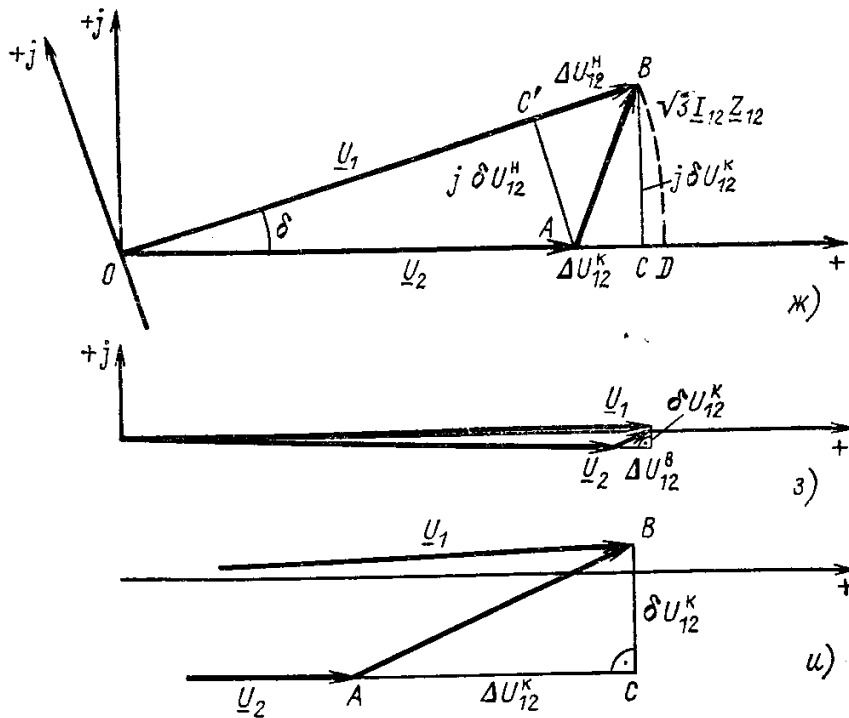


Рисунок 4. Расчет режима линии электропередач:

a—схема замещения; *б*—определение емкостного тока; *в*—векторная диаграмма для линии с нагрузкой; *г* — векторная диаграмма для линии на холостом ходу; *д*—схема замещения линии для расчета при заданной мощности нагрузки; *е*— векторная диаграмма напряжений в начале и в конце линии при расчете по данным конца; *ж*—векторная диаграмма линейных напряжений в начале и в конце линии при расчете по данным начала; *з*— векторная диаграмма к примеру; *и*—увеличенное изображение составляющих падения напряжения для диаграммы *з*

Задание 6. Нагрузка $\underline{S}_2 = 15 + j10$ МВ·А питается от шин электростанции по одноцепной линии 110 кВ длиной 80 км. Схема замещения линии показана на рис. 1 *д*, ее параметры $r_{12} = 24,48$ Ом, $x_{12} = 34,72$ Ом, $b_{12} = 208,8 \cdot 10^{-6}$ См. Напряжение на шинах электростанции $U_1 = 116$ кВ.

Определим мощность \underline{S}_1 , вырабатываемую электростанцией, и напряжение в конце линии U_2 . Расчет проведем в два этапа.

1-й этап. Емкостную мощность линии, потери и потоки мощности в ней найдем по номинальному напряжению. При этом

$$Q_{C12}^K = \frac{1}{2} 110^2 \cdot 208,8 \cdot 10^{-6} = 1,26 \text{ Мвар.}$$

Мощность в конце линии

$$\underline{S}_{12}^K = \underline{S}_2 - jQ_{C12}^K = 15 + j10 - j1,26 = 15 + j8,74 \text{ МВ·А.}$$

Потери мощности в линии

$$\Delta P_{12} = \frac{15^2 + 8,74^2}{110^2} 24,48 = 0,61 \text{ МВт};$$

$$\Delta Q_{12} = \frac{15^2 + 8,74^2}{110^2} 34,72 = 0,86 \text{ Мвар.}$$

Мощность в начале линии

$$\underline{S}_{12}^n = \underline{S}_{12}^k + \Delta P_{12} + j\Delta Q_{12} = 15 + j8,74 + 0,61 + j0,86 = 15,61 + j9,6 \text{ МВ}\cdot\text{А.}$$

Мощность с шин электростанции

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_{12}^n - jQ_{C12} = 15,61 + j9,6 - j1,26 = 15,61 + j8,34 \text{ МВ}\cdot\text{А.}$$

2-й этап. Напряжение в конце линии определим из уравнения (3.25):

$$\underline{U}_2 = 116 - \frac{15,61 - j9,6}{116} (24,48 + j34,72) = 109,8 - j2,65 \text{ кВ.}$$

Модуль напряжения

$$U_2 = \sqrt{109,8^2 + 2,65^2} = 109,8 \text{ кВ.}$$

Практическое занятие № 4

Моделирование режимов сложных электрических сетей.

Линейные уравнения узловых напряжений

Общие закономерности формирования уравнений узловых напряжений рассмотрим сначала на примере электрической цепи постоянного тока, приведенной на рисунке 11.1 и состоящей из четырех узлов и шести ветвей [29]. Узлы 1 и 4 – генерирующие, узлы 2 и 3 – нагрузочные. Источники и нагрузки представлены неизменными задающими токами $-J_1, -J_2, J_3, J_4$. Токи в нагрузочных и генерирующих узлах имеют разные знаки. Токи в ветвях I_{ij} и взаимные проводимости ветвей Y_{ij} обозначены в соответствии с номерами узлов, которые эти ветви связывают. Направления токов в ветвях предварительно выбраны произвольно.

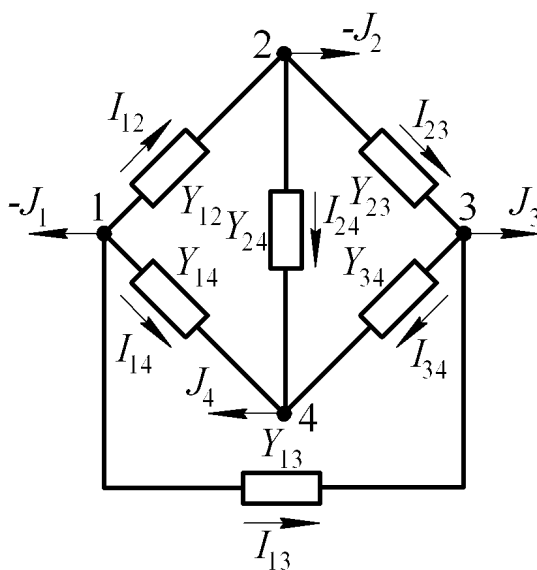


Рисунок 5. Схема сложнотамкнутой сети

Из теоретической электротехники известно, что для схемы, содержащей N узлов, количество независимых уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа, составляет $N - 1$. Следовательно, для одного любого узла схемы не требуется запись уравнения по первому закону Кирхгофа. Такой узел называется *балансирующим по току*. В качестве балансирующего узла может быть принят любой узел. В рассматриваемой схеме в качестве балансирующего узла примем узел 1.

В соответствии с первым законом Кирхгофа для узлов 2, 3 и 4 запишем уравнения

$$I_{12} - I_{23} - I_{24} = -J_2;$$

$$I_{13} + I_{23} - I_{34} = J_3;$$

$$I_{14} + I_{24} + I_{34} = J_4.$$

В соответствии с законом Ома ток в ветви между двумя любыми узлами i и j равен

$$I_{ij} = (U_i - U_j)Y_{ij},$$

где U_i и U_j — напряжения в узлах i и j ;

Y_{ij} — взаимная проводимость ветви между узлами i и j .

После подстановки и алгебраических преобразований получим уравнения узловых напряжений для 4-узловой сети постоянного тока

$$Y_{12}U_1 + (-Y_{21} - Y_{23} - Y_{24})U_2 + Y_{32}U_3 + Y_{42}U_4 = -J_2;$$

$$Y_{13}U_1 + Y_{23}U_2 + (-Y_{31} - Y_{32} - Y_{34})U_3 + Y_{43}U_4 = J_3;$$

$$Y_{14}U_1 + Y_{24}U_2 + Y_{34}U_3 + (-Y_{41} - Y_{42} - Y_{43})U_4 = J_4.$$

Система с $(N - 1)$ уравнениями содержит N искомым напряжений в узлах и, следовательно, имеет бесконечное количество решений. Для однозначного определения напряжений в узлах сети необходимо задаться величиной напряжения в одном из узлов. Такой узел называется *базисным по напряжению*. В качестве базисного узла может быть принят любой узел, однако с целью упрощения вычислительной процедуры целесообразно базисный узел совместить с балансирующим. Поэтому в качестве базисного узла примем узел 1. Заданное напряжение в этом узле обозначим $U_{\bar{6}}$.

Поскольку напряжение $U_1 = U_{\bar{6}}$ является заданным, перенесем составляющие $Y_{12}U_1$, $Y_{13}U_1$ и $Y_{14}U_1$ в правые части уравнений и примем для базисного и балансирующего узла 1 индекс « $\bar{6}$ ». В результате получим систему

$$(-Y_{21} - Y_{23} - Y_{24})U_2 + Y_{23}U_3 + Y_{24}U_4 = J_2 - Y_{2\bar{6}}U_{\bar{6}};$$

$$Y_{32}U_2 + (-Y_{31} - Y_{32} - Y_{34})U_3 + Y_{34}U_4 = J_3 - Y_{3\bar{6}}U_{\bar{6}};$$

$$Y_{42}U_2 + Y_{43}U_3 + (-Y_{41} - Y_{42} - Y_{43})U_4 = J_4 - Y_{4\bar{6}}U_{\bar{6}}.$$

Введем следующие обозначения:

$$Y_{22} = -Y_{21} - Y_{23} - Y_{24};$$

$$Y_{33} = -Y_{31} - Y_{32} - Y_{34};$$

$$Y_{44} = -Y_{41} - Y_{42} - Y_{43}.$$

Назовем Y_{22}, Y_{33} и Y_{44} собственными проводимостями узлов 2, 3 и 4. Собственная проводимость узла i равна сумме взятых с противоположным знаком взаимных проводимостей ветвей, сходящихся в узле i .

С учетом обозначений уравнения узловых напряжений запишем в более компактном виде:

$$Y_{22}U_2 + Y_{23}U_3 + Y_{24}U_4 = -J_1 - Y_{2\sigma}U_\sigma;$$

$$Y_{32}U_2 + Y_{33}U_3 + Y_{34}U_4 = J_3 - Y_{3\sigma}U_\sigma;$$

$$Y_{42}U_2 + Y_{43}U_3 + Y_{44}U_4 = J_4 - Y_{4\sigma}U_\sigma.$$

Видно, что для сети постоянного тока при представлении активных элементов сети неизменными токами система уравнений узловых напряжений является *линейной системой* алгебраических уравнений.

В матричной форме записи система будет иметь вид

$$YU = J - Y_\sigma U_\sigma,$$

где Y – матрица собственных и взаимных проводимостей;

U – вектор-столбец напряжений в узлах;

J – вектор-столбец токов в узлах;

$Y_\sigma U_\sigma$ – вектор-столбец произведений базисного напряжения на взаимные проводимости между базисным узлом и другими узлами.

Для электрической сети, состоящей из N узлов, матрица собственных и взаимных проводимостей имеет следующие свойства:

- матрица Y квадратная размерности $(N - 1)$;
- матрица Y симметрична относительно главной диагонали, поскольку для каждой ветви $Y_{ij} = Y_{ji}$;
- каждый недиагональный элемент матрицы Y_{ij} равен взаимной проводимости ветви, связывающей узлы i и j ;
- каждый диагональный элемент матрицы Y_{ij} равен собственной проводимости узла i ;
- если в схеме между узлами i и j отсутствует ветвь, то соответствующий элемент матрицы Y равен нулю ($Y_{ij} = 0$).

Для сети *переменного тока* проводимости всех ветвей, задающие токи источников и нагрузок, искомые напряжения и токи ветвей будут величинами *комплексными*. Матрицы, состоящие из комплексных величин, будем *обозначать подчеркиванием*.

Напряжение в базисном узле задается, как правило, действительным числом. Кроме того, для трехфазной сети переменного тока необходимо учесть, что искомые напряжения являются междуфазными (линейными). Для упрощения записи системы уравнений токи в узлах будем задавать тоже междуфазными значениями.

С учетом сказанного система уравнений узловых напряжений для сети переменного тока в матричной форме записи будет иметь вид

$$\underline{Y}\underline{U} = \underline{J} - \underline{Y}_{\bar{0}}U_{\bar{0}}.$$

Таким образом, для сети переменного тока при представлении активных элементов сети задающими токами система уравнений узловых напряжений является линейной системой алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами и комплексными искомыми переменными.

Система линейных уравнений с комплексными элементами сводится к системе линейных уравнений удвоенного порядка $2(N - 1)$ с действительными элементами. Для этого матрица \underline{Y} и вектор-столбцы \underline{U} и \underline{J} с комплексными элементами представляют в виде

$$\begin{aligned}\underline{Y} &= G - jB; \\ \underline{U} &= U' + jU''; \\ \underline{J} &= J' + jJ''; \\ \underline{Y}_{\bar{0}} &= G_{\bar{0}} - jB_{\bar{0}}.\end{aligned}$$

Подставляя получим

$$(G - jB) \cdot (U' + jU'') = (J' + jJ'') - (G_{\bar{a}} - jB_{\bar{a}})U_{\bar{a}}.$$

Разделив в последнем матричном уравнении действительные и мнимые части, получим систему линейных алгебраических уравнений порядка $2(N - 1)$ с действительными элементами:

$$\begin{aligned}GU' + BU'' &= J' - G_{\bar{0}}U_{\bar{0}}; \\ -BU' + GU'' &= J'' - B_{\bar{0}}U_{\bar{0}}.\end{aligned}$$

Система содержит $2(N - 1)$ искомым напряжений.

Полная запись системы для электрической сети переменного тока, приведенной на рисунке 5, будет иметь вид

$$\begin{aligned}
 g_{22}U_2' + g_{23}U_3' + g_{24}U_4' + b_{22}U_2'' + b_{23}U_3'' + b_{24}U_4'' &= -J_2' - g_{26}U_6; \\
 g_{32}U_2' + g_{33}U_3' + g_{34}U_4' + b_{32}U_2'' + b_{33}U_3'' + b_{34}U_4'' &= J_3' - g_{36}U_6; \\
 g_{42}U_2' + g_{43}U_3' + g_{44}U_4' + b_{42}U_2'' + b_{43}U_3'' + b_{44}U_4'' &= J_4' - g_{46}U_6; \\
 -b_{22}U_2' - b_{23}U_3' - b_{24}U_4' + g_{22}U_2'' + g_{23}U_3'' + g_{24}U_4'' &= -J_2'' - b_{26}U_6; \\
 -b_{32}U_2' - b_{33}U_3' - b_{34}U_4' + g_{32}U_2'' + g_{33}U_3'' + g_{34}U_4'' &= J_3'' - b_{36}U_6; \\
 -b_{42}U_2' - b_{43}U_3' - b_{44}U_4' + g_{42}U_2'' + g_{43}U_3'' + g_{44}U_4'' &= J_4'' - b_{46}U_6.
 \end{aligned}$$

В результате решения этой системы линейных уравнений определяются искомые напряжения в узлах $U_2', U_2'', U_3', U_3'', U_4', U_4''$,

По полученным напряжениям рассчитываются линейные токи в ветвях:

$$\begin{aligned}
 I_{ij} &= (U_i - U_j) \cdot Y_{ij} = [(U_i' + jU_i'') - (U_j' + jU_j'')] \cdot (g_{ij} - jb_{ij}) = \\
 &= [(U_i' - U_j') + j(U_i'' - U_j'')] \cdot (g_{ij} - jb_{ij}) = \\
 &= [(U_i' - U_j') \cdot g_{ij} + (U_i'' - U_j'') \cdot b_{ij}] + \\
 &+ j[(U_i' - U_j') \cdot (-b_{ij}) + (U_i'' - U_j'') \cdot g_{ij}] = I_{ij}' + jI_{ij}''.
 \end{aligned}$$

Следует отметить, что при представлении источников питания и нагрузок сети не токами, а мощностями система уравнений узловых напряжений будет уже нелинейной.

Методы решения уравнений узловых напряжений

Методы решения линейных уравнений делятся на две группы:

– точные или прямые методы, которые позволяют получить точные значения искомых переменных в результате конечного числа вычислительных операций;

– итерационные методы или методы последовательных приближений, которые позволяют получить значения искомых переменных с заданной точностью в результате повторяющейся вычислительной процедуры.

Метод последовательного исключения переменных (метод Гаусса) является одним из наиболее распространенных точных методов решения линейных систем алгебраических уравнений. Идею метода рассмотрим на примере следующей системы линейных уравнений:

$$\begin{aligned} Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2 + Y_{13}U_3 &= J_1; \\ Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2 + Y_{23}U_3 &= J_2; \\ Y_{31}U_1 + Y_{32}U_2 + Y_{33}U_3 &= J_3. \end{aligned}$$

Поделив первое уравнение на коэффициент Y_{11} , получим

$$U_1 + Y_{12}'U_2 + Y_{13}'U_3 = J_1',$$

где $Y_{12}' = Y_{12}/Y_{11}$, $Y_{13}' = Y_{13}/Y_{11}$, $J_1' = J_1/Y_{11}$.

Здесь и далее штрихами (одним, двумя и т.д.) будут обозначаться пересчитанные проводимости и токи исходной системы.

Пользуясь уравнением можно исключить неизвестное напряжение U_1 из второго и третьего уравнений системы. Для этого умножим уравнение сначала на Y_{21} , а затем на Y_{31} и вычтем полученные результаты соответственно из второго и третьего уравнений системы. В результате получим систему двух уравнений с двумя неизвестными:

$$\begin{aligned} Y_{22}''U_2 + Y_{23}''U_3 &= J_2''; \\ Y_{32}''U_2 + Y_{33}''U_3 &= J_3''. \end{aligned}$$

Поделив первое уравнение системы на коэффициент Y_{22}'' , получим

$$U_2 + Y_{23}'''U_3 = J_2'''.$$

Пользуясь уравнением, можно исключить неизвестное напряжение U_2 из второго уравнения системы. Для этого умножим уравнение на Y_{32}''' и вычтем полученный результат из второго уравнения системы. В результате получим

$$Y_{33}''''U_3 = J_3''''.$$

Таким образом, исходная система свелась к эквивалентной системе, состоящей из уравнений

$$\begin{aligned} U_1 + Y_{12}'U_2 + Y_{13}'U_3 &= J_1'; \\ U_2 + Y_{23}'''U_3 &= J_2'''; \\ Y_{33}''''U_3 &= J_3''''. \end{aligned}$$

Ход дальнейшего решения очевиден. Из третьего уравнения системы вычисляется напряжение $U_3 = J_3''''/Y_{33}''''$ и подставляется во второе и

первое уравнения, из второго уравнения вычисляется напряжение U_2 и подставляется в первое уравнение, наконец, из первого уравнения вычисляется напряжение U_1 .

При большем, чем четыре количестве узлов в электрической сети объем вычислений возрастает, но вычислительный алгоритм сохраняется.

Метод простой итерации является одним из наиболее простых итерационных методов решения линейных систем алгебраических уравнений. Идею метода рассмотрим так же, как и метод Гаусса, на примере системы линейных уравнений.

Решим первое уравнение системы относительно напряжения U_1 , второе – относительно U_2 , третье – относительно U_3 . В результате получим

$$U_1 = -Y_{12}U_2 / Y_{11} - Y_{13}U_3 / Y_{11} + J_1 / Y_{11} = Y_{12}'U_2 + Y_{13}'U_3 + J_1';$$

$$U_2 = -Y_{21}U_1 / Y_{22} - Y_{23}U_3 / Y_{22} + J_2 / Y_{22} = Y_{21}'U_1 + Y_{23}'U_3 + J_2';$$

$$U_3 = -Y_{31}U_1 / Y_{33} - Y_{32}U_2 / Y_{33} + J_3 / Y_{33} = Y_{31}'U_1 + Y_{32}'U_2 + J_3'.$$

Дадим начальные приближения искомым напряжениям $U_1 = U_{1,0}, U_2 = U_{2,0}, U_3 = U_{3,0}$. Подставив эти начальные приближения в правые части системы (11.20), вычислим первые приближения искомых напряжений $U_{1,1}, U_{2,1}, U_{3,1}$. Прделанное вычисление соответствует первому шагу итерационного процесса. Далее вычислительная процедура повторяется: первые приближения напряжений $U_{1,1}, U_{2,1}, U_{3,1}$ подставляются в правые части системы (11.20) и вычисляются вторые приближения напряжений $U_{1,2}, U_{2,2}, U_{3,2}$. Таким образом, используя значения напряжений, полученные на предыдущем i -м шаге $U_{1,i}, U_{2,i}, U_{3,i}$, вычисляются новые приближения напряжений $U_{1,i+1}, U_{2,i+1}, U_{3,i+1}$ на $(i + 1)$ -м шаге:

$$U_{1,i+1} = Y_{12}'U_{2,i} + Y_{13}'U_{3,i} + J_1';$$

$$U_{2,i+1} = Y_{21}'U_{1,i} + Y_{23}'U_{3,i} + J_2';$$

$$U_{3,i+1} = Y_{31}'U_{1,i} + Y_{32}'U_{2,i} + J_3'.$$

Вычислительный процесс заканчивается при достижении требуемой точности.

Метод Зейделя является модификацией метода простой итерации. Как и в методе простой итерации, дадим начальные приближения искомым

напряжениям $U_1 = U_{1,0}, U_2 = U_{2,0}, U_3 = U_{3,0}$. Идея метода заключается в том, что найденное по первому уравнению системы первое приближение напряжения $U_{1,1}$ используется во втором уравнении при вычислении первого приближения напряжения $U_{2,1}$. Далее первые приближения напряжений $U_{1,1}$ и $U_{2,1}$ используются в третьем уравнении при вычислении первого приближения $U_{3,1}$.

Вычислительную процедуру метода Зейделя на произвольном $(i + 1)$ -м шаге можно записать системой уравнений

$$\begin{aligned} U_{1,i+1} &= Y_{12} U_{2,i} + Y_{13} U_{3,i} + J_1'; \\ U_{2,i+1} &= Y_{21} U_{1,i+1} + Y_{23} U_{3,i} + J_2'; \\ U_{3,i+1} &= Y_{31} U_{1,i+1} + Y_{32} U_{2,i+1} + J_3'. \end{aligned}$$

Вычислительный процесс заканчивается при достижении требуемой точности. Метод Зейделя, как правило, надежнее и быстрее сходится до требуемой точности, чем метод простой итерации. Простота алгоритма метода Зейделя обусловила его преимущественное использование при практических расчетах установившихся режимов.

Сборник задач

Задача 1

Определить параметры схемы замещения линии 110 кВ, выполненной проводом АС-120, протяженностью 12 км.

Подвеска проводов – горизонтальная, расстояние между соседними фазами 2 м.

Задача 2

Определить параметры схемы замещения линии 35 кВ, выполненной проводом АС-70, протяженностью 7 км.

Подвеска проводов – горизонтальная, расстояние между соседними фазами 1,1 м.

Задача 3

Определить параметры схемы замещения линии 220 кВ, выполненной проводом АС-240, протяженностью 25 км.

Подвеска проводов – горизонтальная, расстояние между соседними фазами 2,2 м.

Задача 4

Определить как изменится X линии, напряжением 110 кВ, провод АС-95, с горизонтальным расположением проводов на расстоянии 2 м, если провода расположить равносторонним треугольником.

Задача 5

Определить как изменится X линии, напряжением 220 кВ, провод АС-300, с горизонтальным расположением проводов на расстоянии 3 м, если провода расположить равносторонним треугольником.

Задача 6

Определить как изменится X линии, напряжением 35 кВ, провод АС-70, с горизонтальным расположением проводов на расстоянии 1,5 м, если провода расположить равносторонним треугольником.

Задача 7

Определить параметры схемы замещения трехфазного двухобмоточного трансформатора ТМ- 1000/10.

Задача 8

Определить параметры схемы замещения трехфазного двухобмоточного трансформатора ТДН – 10000/35.

Задача 9

Определить параметры схемы замещения трехфазного двухобмоточного трансформатора ТРДН – 25000/110.

Задача 10

Машиностроительный завод, потребляющий мощность $56+j44$ МВА, питается при напряжении 110 кВ. Линия электропередачи выполнена проводом АС-120, протяженность 11 км. Напряжение в конце линии равно 108,5 кВ. Определить потери мощности в линии.

Задача 11

Машиностроительный завод, потребляющий мощность $40+j30$ МВА, питается при напряжении 220 кВ. Линия электропередачи выполнена проводом АС-240, протяженность 120 км. Напряжение в конце линии равно 214 кВ. Определить потери мощности в линии.

Задача 12

Машиностроительный завод, потребляющий мощность $10+j15$ МВА, питается при напряжении 35 кВ. Линия электропередачи выполнена проводом АС-70, протяженность 16 км. Напряжение в конце линии равно 33 кВ. Определить потери мощности в линии.

Задача 13

Машиностроительный завод, потребляющий мощность $10+j8$ МВА, питается при напряжении 110 кВ. Линия электропередачи выполнена проводом АС-120, протяженность 100 км. Напряжение в конце линии равно 109 кВ. Определить напряжение в начале линии.

Задача 14

Машиностроительный завод, потребляющий мощность $55+j65$ МВА, питается при напряжении 220 кВ. Линия электропередачи выполнена проводом АС-300, протяженность 160 км. Напряжение в конце линии равно 218 кВ. Определить напряжение в начале линии.

Задача 15

Машиностроительный завод, потребляющий мощность $25+j30$ МВА, питается при напряжении 115 кВ. Линия электропередачи выполнена проводом АС-95, протяженность 22 км. Напряжение в конце линии равно 109 кВ. Определить напряжение в начале линии.

Задача 16

Станкостроительный завод получает питание от районной сети 110 кВ. На ГПП завода установлен трансформатор ТДН-10000/110. Максимальная мощность, потребляемая заводом, равна 8500 кВА, коэфф. мощности 0,88. Определить потери активной и реактивной мощности в трансформаторе.

Задача 17

Станкостроительный завод получает питание от районной сети 110 кВ. На ГПП завода установлен трансформатор ТМН-6300/110. Максимальная мощность, потребляемая заводом, равна 5000 кВА, коэфф. мощности 0,9. Определить потери активной и реактивной мощности в трансформаторе.

Задача 18

Станкостроительный завод получает питание от районной сети 35 кВ. На ГПП завода установлен трансформатор ТРДН-25000/35. Максимальная мощность, потребляемая заводом, равна 18000 кВА, коэфф. мощности 0,75. Определить потери активной и реактивной мощности в трансформаторе.

Задача 19

Определить параметры схемы замещения трехфазного трехобмоточного трансформатора ТДТН-40000/220.

Задача 20

Воздушная линия 10 кВ протяженностью 5 км выполнена проводом АС-70 и питает нагрузку мощностью $500+j420$ кВА. Определить потери мощности в линии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лыкин А.В. Электрические системы и сети [Текст] Учебное пособие / А.В. Лыкин. – М.: Логос, 2007 – 254 с. (Новая университетская библиотека).
2. Электропитающие системы и электрические сети [Текст] Учебное пособие / Н.В. Хорошилов, А.В. Пилюгин [и др.]. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 352 с.
3. Баркан Я.Д. Эксплуатация электрических систем [Текст] Учеб. пособие для электроэнергетич. спец. вузов / Я.Д. Баркан. – М.: Высшая школа, 1990.
4. Блок В.М. Электрические сети и системы [Текст] Учебник для вузов / В.М. Блок. – М.: Высшая школа, 1986.
5. Идельчик В.И. Электрические сети и системы [Текст] Учебник для вузов / В.И. Идельчик. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
6. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4-35 кВ и 110-1150 кВ. Т.1-Т.4 [Текст] / Е.Ф. Макаров; ред. И.Т. Горюнов, А.А. Любимов. – М.: Папирус Про, 1999-2005.
7. Мельников Н.А. Электрические сети и системы [Текст] Учебник для вузов / Н.А. Мельников. – М.: Энергия, 1975.
8. Справочник по проектированию электрических сетей [Текст] / Под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: НЦ ЭНАС, 2005.
9. Электрические системы и сети в примерах и иллюстрациях [Текст] Учебное пособие для студ. вузов / Под ред. В.А. Строева. – М.: Высшая школа, 1999.
10. Основы современной энергетики [Текст]: учебник / в 2 т. Т. 2: Современная электроэнергетика / под общ. ред. Е. В. Аметистова; под ред. А. П. Бурмана и В. А. Строева. 4-е изд., перераб. и доп. М.: МЭИ, 2008. 632 с.: ил. ISBN 978-5-383-00163-9.
11. Ополева Г. Н. Схемы и подстанции электроснабжения [Текст]: справочник: учебное пособие / Галина Николаевна Ополева. М.: ИНФРА-М, 2008. - 480 с.
12. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий [Текст]: учебник для студентов вузов / Б. И. Кудрин. - М.: Интернет Инжиниринг, 2005.
13. Правила устройства электроустановок [Текст]: 7-е издания. М.: Госэнергонадзор, 2002, 278с.