Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Емельянов Сергей Геннадьевич
Должность: ректор
Дата подписания: 08.10.2022 20:47:46
Уникальный программный ключ:
9ba7d3e34c012eba476ffd2d064cf2781953be730df2374d16f3c0ce536f0fc6

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Кафедра электроснабжения

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
О.Г. Локтионова
«30» 09 2022 г.

Режимы работы электрооборудования электростанций и подстанций

Методические указания к практическим занятиям для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Курск 2022___

УДК 621.31

Составители: Д.В. Куделина

Рецензент:
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение»
В.И. Бирюлин

Режимы работы электрооборудования электростанций и подстанций: методические указания к практическим занятиям для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Д.В. Куделина – Курск, 2022. – 57 с.: ил. 12, табл. 2. – Библиогр.: с. 48.

Содержат методические указания для практических занятий по дисциплине «Режимы работы электрооборудования электростанций и подстанций».

Методические указания соответствуют требованиям программы для направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Предназначены для студентов направления подготовки 13.03.02 всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60х84 1/16.
Усл.печ.л. 1,69 . Уч.–изд.л 1,53 . Тираж 100 экз. Заказ 1966. Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г.Курск, ул.50 лет Октября, 94

СОДЕРЖАНИЕ

Практическое занятие №1. Расчет схем замещения элементов электрической сети..... 4
Практическое занятие №2. Расчет электрической сети с односторонним питанием..... 9
Практическое занятие №3. Расчет электрической сети с двухсторонним питанием..... 14
Практическое занятие №4. Расчет кольцевой электрической сети с односторонним питанием..... 16

Библиографический список..... 22
Приложения..... 23

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1

Расчет схем замещения элементов электрической сети

Задание 1. Определим удельные параметры воздушной и кабельной линий электропередачи напряжением 10 кВ, а также параметры схемы замещения этих линий при их длине 4 км. Воздушная линия выполнена проводами АС 50/8,0 при среднегеометрическом расстоянии между ними 1м, кабельная линия - кабелем ААБ 3х50 при среднегеометрическом расстоянии между жилами кабеля 1,3 см. Максимальная мощность, передаваемая по воздушной линии, составляет 1000 кВА, по кабельной -1600 кВ·А.

Для провода марки АС 50/8,0 $r_{0в}$=0,603 Ом/км; диаметр провода 9,6 мм. Для кабеля марки ААБ 3х50 $r_{0к}$=0,62 Ом/км; диаметр жилы кабеля 2$r_к$=6,4 мм.

Используя выражение (2.3), при подстановке в него значений $D_{ср}$ и $r_{пр}$ находим

$$x_{0B} = 0{,}144\, lg\frac{100}{0.48} + 0{,}0157 = 0{,}35 \text{ Ом/км;}$$

$$x_{0K} = 0{,}144\, lg\frac{1{,}3}{0{,}32} + 0{,}0157 = 0{,}103 \text{ Ом/км,}$$

где x_{0B}, x_{0K} - удельные реактивные сопротивления воздушной и кабельной линий.

Можно непосредственно найти x_{0B}=0,35 Ом/км и x_{0K}=0,09 Ом/км.

Покажем, что для линий 10 кВ можно не учитывать реактивную проводимость и емкостную мощность. Определим b_{0B} и b_{0K} - удельные емкостные проводимости воздушной и кабельной линий:

$$b_{0B} = 7{,}58 \cdot 10^{-6} \frac{1}{lg(100/0{,}48)} = 3{,}27 \cdot 10^{-6} \text{ См/км;}$$

$$b_{0K} = 7{,}58 \cdot 10^{-6} \frac{1}{lg(1{,}3/0{,}32)} = 12{,}45 \cdot 10^{-6} \text{ См/км.}$$

Половины реактивных мощностей, генерируемых воздушной и кабельной линиями, в соответствии с выражением (2.8) равны

$$Q_{Cв} = \frac{1}{2} 10^2 \cdot 3{,}27 \cdot 10^{-6} \cdot 4 = 0{,}654 \cdot 10^{-3} \text{ Мвар;}$$

$$Q_{Cк} = \frac{1}{2} 10^2 \cdot 12{,}45 \cdot 10^{-6} \cdot 4 = 2{,}49 \cdot 10^{-3} \text{ Мвар.}$$

Так как емкостные мощности линий 10 кВ практически очень малы в сравнении с передаваемыми максимальными мощностями 1000 кВ·А и 1600 кВ·А, то их можно не учитывать в расчетах и в схеме замещения (см. рис. 1, *в*).

Отношение удельного индуктивного к удельному активному сопротивлению воздушной линии составляет

$$\frac{x_{0B}}{r_{0B}} = \frac{0,35}{0,603} = 0,58 .$$

В случае кабельной линии это отношение меньше:

$$\frac{x_{0K}}{r_{0K}} = \frac{0,103}{0,62} = 0,167 .$$

Активная проводимость линий напряжением 10 кВ очень мала и не учитывается в схеме замещения.

Следовательно, схема замещения воздушной линии состоит из активного сопротивления $r_{л.в}$ и реактивного сопротивления $x_{л.в}$ (рис. 1, *в*). Найдем

$$r_{л.в} = 0,603 \cdot 4 = 2,41 \text{ Ом}; \qquad x_{л.в} = 0,35 \cdot 4 = 1,4 \text{ Ом}.$$

Поскольку индуктивное сопротивление кабеля намного меньше активного, им можно пренебречь и схема замещения кабельной линии будет состоять только из активного сопротивления $r_{л.к}$ (рис. 1, *г*), которое равно

$$r_{л.к} = 0,62 \cdot 4 = 2,48 \text{ Ом}.$$

Задание 2. Определим удельные параметры одноцепной воздушной линии 110 кВ с проводами марки АС 150/24, расположенными на П-образных деревянных опорах с расстоянием между проводами $D_{ab} = D_{bc} = D = 4$ м, и вычислим параметры схемы замещения двухцепной линии длиной 100 км.

Для провода марки АС 150/24 $r_0 = 0.198$ Ом/км; диаметр провода $2r_{пр} = 17,1$ мм.

Расстояние между фазами *a* и *c* $D_{ac} = 2D = 8$ м. Среднегеометрическое расстояние между проводами линий (рис. 2, *б)* составляет

$$D_{ср} = \sqrt[3]{D_{ab}D_{bc}D_{ca}} = \sqrt[3]{DD2D} = \sqrt[3]{2}D = 1.26 \cdot 4 = 5.04 \text{ м}.$$

Находим

$$x_0 = 0,144\, lg\frac{504}{0.855} + 0.0157 = 0.415 \text{ Ом/км};$$

$$b_0 = 7{,}58 \cdot 10^{-6} \frac{1}{lg(504/0{,}855)} = 2{,}74 \cdot 10^{-6}\ \text{См/км}.$$

Можно непосредственно найти для провода АС 150/24 искомые удельные параметры: $x_0 = 0{,}42$ Ом/км; $b_0 = 2{,}7 \cdot 10^{-6}$ См/км.

Отношение удельных активного и индуктивного сопротивлений в рассматриваемом случае равно

$$\frac{r_0}{x_0} = \frac{0{,}198}{0{,}42} = 0{,}471,$$

т. е. $r_0 < x_0$, что характерно для воздушных линий с $U_{ном} \geq 110$ кВ.

Определение x_0, b_0 по табл. проще, чем их расчет по формулам. В дальнейшем будем использовать значения x_0, b_0, определенные по табл.

Для двухцепной линии длиной 100 км найдем параметры схемы замещения:

$$r_л = 0{,}5 \cdot 0{,}198 \cdot 100 = 9{,}9\ \text{Ом}; \qquad x_л = 0{,}5 \cdot 0{,}42 \cdot 100 = 21\ \text{Ом};$$

$$b_л = 2 \cdot 2{,}7 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 540 \cdot 10^{-6}\ \text{См}.$$

Половина зарядной мощности линии (см. рис. 1, б), определяемая

$$Q_c = \frac{1}{2} U_{ном}^2 b_л = \frac{1}{2} 110^2 \cdot 540 \cdot 10^{-6} = 3{,}267\ \text{Мвар}.$$

По табл. для двухцепной линии можно найти $2Q_c = 2 \cdot 3{,}6 \times \times 10^{-6} \cdot 100 = 7{,}2$ Мвар. Такая мощность должна быть учтена в расчете режима линии, т.е. зарядная мощность воздушных линий 110 кВ должна учитываться в балансе реактивной мощности. Это заключение тем более справедливо для линий более высоких напряжений. Поэтому схема замещения рассматриваемой линии должна включать кроме активного и индуктивного сопротивления емкостную проводимость (см. рис. 1, *а*) или емкостную мощность (см. рис. 1,*б*).

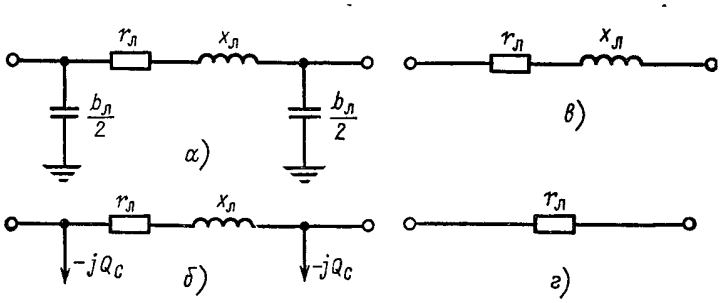


Рисунок 1. Схемы замещения линий электропередачи:

а ,*б*-воздушная линия 110-330 кВ с емкостной проводимостью и с реактивной мощностью, генерируемой емкостью линий; *в*-воздушная линия

$U_{ном} \le 35$ кВ;

г-кабельная линия $U_{ном} \le 10$ кВ

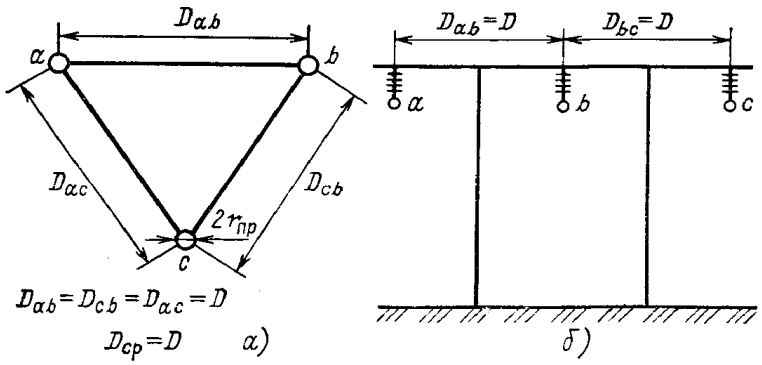


Рисунок 2. Расположение проводов линии электропередачи:

а - по углам равностороннего треугольника; *б* - при горизонтальном расположении фаз

Задание 3. Определим параметры схемы замещения двухобмоточного трансформатора типа ТМ-630/10, приведенные к номинальным напряжениям первичной и вторичной обмоток (рис. 3,*б* и *в*).

По табл. находим каталожные данные трансформатора: $S_{ном} = 630 кВ \cdot А;\ U_{в.ном} = 10 кВ;\ U_{н.ном} = 0{,}4 кВ;\ \Delta P_к = 8{,}5 кВт;\ \Delta P_х = 1{,}65 кВт; u_к\,\% = 5{,}5\%; I_х\,\% = 3\%.$

При подстановке напряжения в киловольтах, а мощностей - в мегавольт-амперах (мегаваттах) значения сопротивлений получим в омах, а проводимостей - в сименсах, что учтено в дальнейшем расчете. Рассчитаем активные сопротивления трансформатора $r_т$ и $r_т^н$, отнесенные к номинальным напряжениям первичной обмотки (10 кВ) и вторичной обмотки (0,4 кВ). При расчете $r_т$, приведенного к стороне высшего напряжения, подставим $U_{в.ном} = 10$ кВ; при расчете $r_т^н$, приведенного к стороне низшего напряжения, подставим $U_{н.ном} = 0{,}4$ кВ:

$$r_т = \frac{\Delta P_к U^2_{в.ном}}{S^2_{ном}} = \frac{8{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^2}{0{,}63^2} = 2{,}14 Ом;$$

$$r_т^н = \frac{\Delta P_к U^2_{н.ном}}{S^2_{ном}} = \frac{8{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}4^2}{0{,}63^2} = 3{,}43 \cdot 10^{-3} Ом.$$

Для определения индуктивных сопротивлений обмоток для трансформаторов малой мощности надо использовать $u_к''\%$, которое

не равно $u_к\%$. Поэтому предварительно находим $u'_к\%$ и затем $u''_к\%$:

$$u'_к\% = \frac{\sqrt{3}I_{ном}r_T}{U_{ном}}100 = \frac{S_{ном}r_T}{U^2_{ном}}100 =$$

$$= \frac{\Delta P_к}{S_{ном}}100 = \frac{8{,}5\cdot 10^{-3}}{0{,}63}100 = 1{,}35\%.$$

В последнем выражении

$$u''_к\% = \sqrt{u^2_к\% - (u'_к\%)^2} = \sqrt{5{,}5^2 - 1{,}35^2} = 5{,}33\%.$$

Подставим $u''_к\%$ и найдем x_T, и $x^н_T$:

$$x_T = \frac{u''_к\% U^2_{в.ном}}{100 S_{ном}} = \frac{5{,}33\cdot 10^2}{100\cdot 0{,}63} = 8{,}46 \text{ Ом};$$

$$x^н_T = \frac{u''_к\% U^2_{н.ном}}{100 S_{ном}} = \frac{5{,}33\cdot 0{,}4^2}{100\cdot 0{,}63} = 1{,}35\cdot 10^{-2} \text{ Ом}.$$

Активные проводимости намагничивания

$$g_T = \frac{\Delta P_x}{U^2_{в.ном}} = \frac{1{,}65\cdot 10^{-3}}{10^2} = 1{,}65\cdot 10^{-5} \text{ См};$$

$$g^н_T = \frac{\Delta P_x}{U^2_{н.ном}} = \frac{1{,}65\cdot 10^{-3}}{0{,}4^2} = 1{,}03\cdot 10^{-2} \text{ См}.$$

Реактивные проводимости намагничивания:

$$b_T = \frac{I_x\% S_{ном}}{100 U^2_{в.ном}} = \frac{3\cdot 0{,}63}{100\cdot 10^2} = 1{,}89\cdot 10^{-4} \text{ См};$$

$$b^н_T = \frac{I_x\% S_{ном}}{100 U^2_{н.ном}} = \frac{3\cdot 0{,}63}{100\cdot 0{,}4^2} = 0{,}12 \text{ См}.$$

Для трансформаторов при напряжении менее или равном 220 кВ допустимо использование схемы замещения, где ветвь намагничивания замещена мощностью потерь холостого хода:

$$\Delta\underline{S}_x = \Delta P_x + j\Delta Q_x,$$

потери реактивной мощности определим по (2.11):

$$\Delta Q_x = \frac{3\cdot 0{,}63}{100} 0{,}0189 \text{ Мвар},$$

тогда

$$\Delta\underline{S}_x = (1{,}65 + j18{,}9)10^{-3} \text{ МВ.А}.$$

По табл. можно непосредственно найти r_T, x_T, приведенные к стороне ВН, и ΔQ_x:

$$r_T = 2{,}12 \text{ Ом}; \quad x_T = 8{,}5 \text{ Ом}; \quad \Delta Q_x = 0{,}0189 \text{ Мвар}.$$

Определение по таблице проще, чем расчет по формулам.

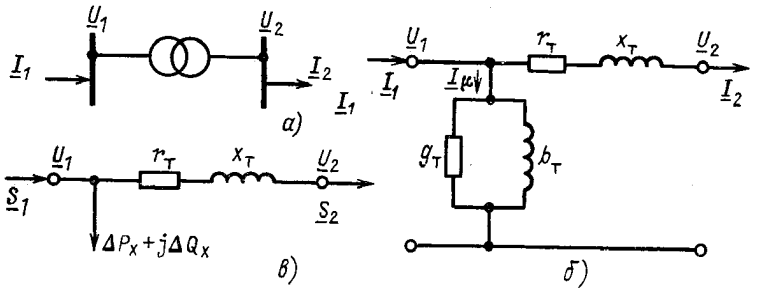


Рисунок 3. Двухобмоточный трансформатор
а-условное обозначение; *б*-Г-образная схема замещения; *в*-упрощенная схема замещения

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2

Расчет электрической сети с односторонним питанием

Задание 4. Рассчитаем рабочие режимы линий питающей сети (рис. 4).

Мощности нагрузок на стороне ВН трансформаторов

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

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

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. 5,*з*). 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

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

Потери мощности в линии 34:

$$\Delta \underline{S}_{34} = \frac{\left(P_{34}^{к}\right)^2 + \left(Q_{34}^{к}\right)^2}{U_{ном}^2} \left(r_{34} + jx_{34}\right) =$$

$$= \frac{41{,}21^2 + 33{,}75^2}{110^2} \left(3{,}74 + j6{,}4\right) = 0{,}88 + j1{,}5 \text{ МВ·А}.$$

Мощность в начале линии *34*

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

Аналогично проведем расчеты для линий *23* и *12:*

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

$$\underline{S}^{к}_{23} = \underline{S}^{н}_{34} - jQ^{н}_{C34} + \underline{S}_3 - jQ^{к}_{C23} = 42{,}09 + j35.25 - j0{,}97 + 17{,}11 +$$

$$+ j14{,}45 - j0{,}74 = 59{,}2 + j48 \text{ МВ·А};$$

$$\Delta\underline{S}_{23} = \frac{\left(P^{к}_{23}\right)^2 + \left(Q^{к}_{23}\right)^2}{U^2_{ном}}\left(r_{23} + jx_{23}\right) =$$

$$= \frac{59{,}2^2 + 48^2}{110^2}(2{,}23 + j4{,}72) = 1{,}07 + j2{,}27 \text{ МВ·А};$$

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

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

$$\underline{S}^{к}_{12} = \underline{S}^{н}_{23} - jQ^{н}_{C23} + \underline{S}_2 - jQ^{к}_{C12} =$$

$$= 60{,}27 + j50{,}27 - j0{,}74 + 22{,}13 + + j18{,}35 - j0{,}76 =$$

$$= 82{,}4 + j67{,}12 \text{ МВ·А};$$

$$\Delta\underline{S}_{12} = \frac{\left(P^{к}_{12}\right)^2 + \left(Q^{к}_{12}\right)^2}{U^2_{ном}}\left(r_{12} + jx_{12}\right) =$$

$$= \frac{82{,}4^2 + 67{,}12^2}{110^2}(1{,}35 + j4{,}56) = 1{,}26 + j4{,}26 \text{ МВ·А}$$

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

Мощность, текущая с шин ЦП в линию *12,*

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

2-й этап. Определим напряжения в узлах.

Напряжение $\underline{U}_2$ определим:

$$\Delta U^{н}_{12} = \frac{P^{н}_{12}r_{12} + Q^{н}_{12}x_{12}}{U_1} = \frac{83{,}66 \cdot 1{,}35 + 71{,}37 \cdot 4{,}56}{117{,}7} = 3{,}72 \text{ кВ};$$

$$\delta U^{н}_{12} = \frac{P^{н}_{12}x_{12} - Q^{н}_{12}r_{12}}{U_1} = \frac{83{,}66 \cdot 4{,}56 - 71{,}37 \cdot 1{,}35}{117{,}7} = 2{,}42 \text{ кВ};$$

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

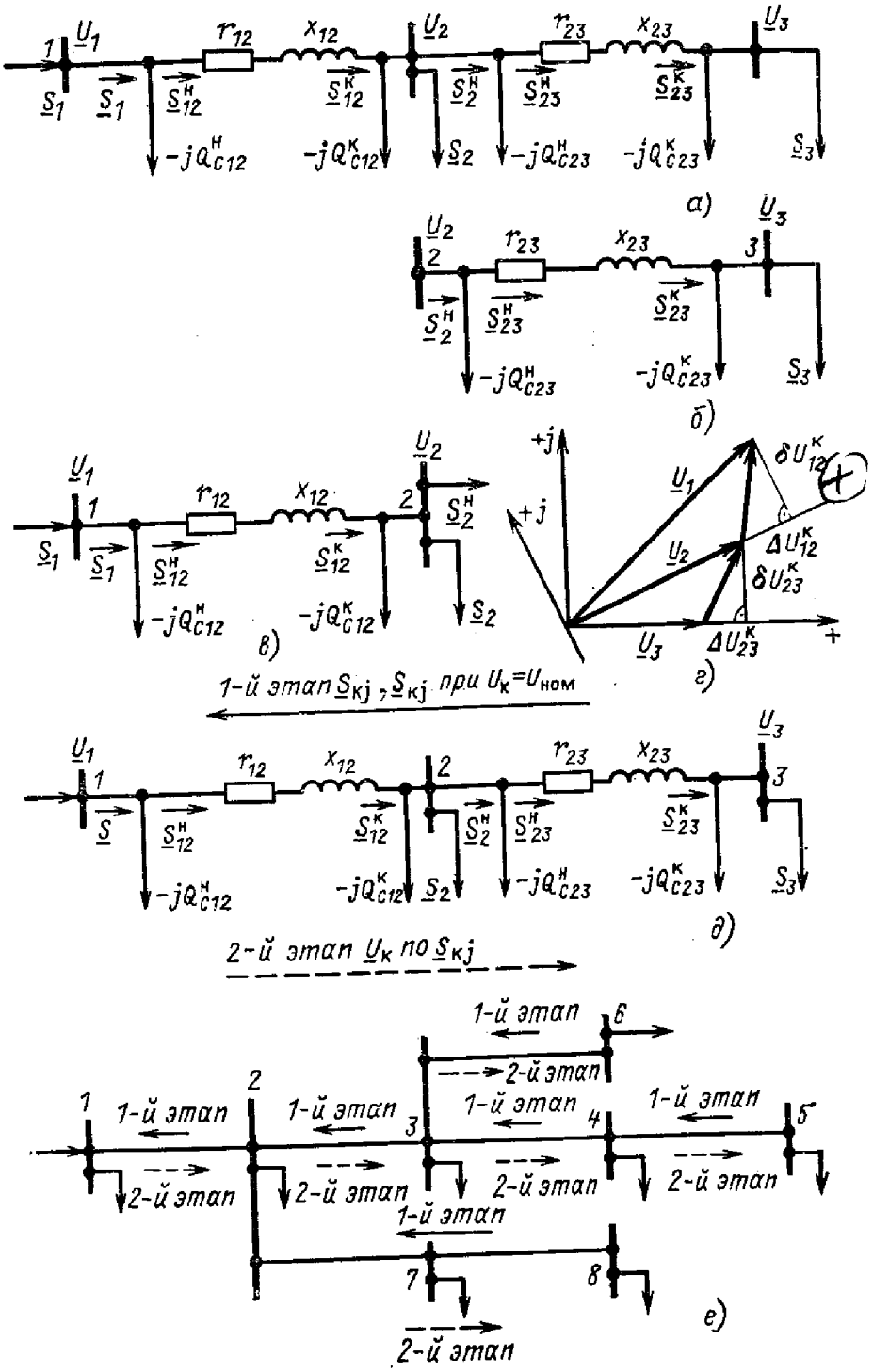
Определим модуль напряжения:

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

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

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

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



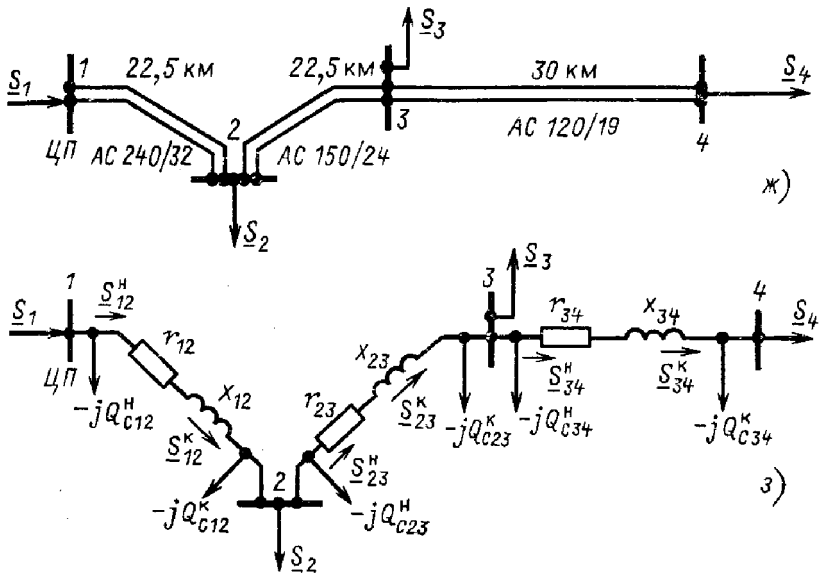


Рисунок 4. Расчет режима разомкнутой питающей сети:

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:*

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

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

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

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

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

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3

Расчет электрической сети с двухсторонним питанием

Задание 5. Сеть (рис. 5, *и)* напряжением 110 кВ связывает электростанцию *1* с понижающими подстанциями *2, 3,* имеющими расчетные нагрузки $\underline{S}_2 = 38{,}16 + j29{,}17$ МВ·А и $\underline{S}_3 = 39{,}2 + + j32{,}89$ МВ·А. Марки проводов, длины линий указаны на рисунке. Сопротивления их равны: $\underline{Z}_{12} = 3{,}6 + j12{,}15$ Ом; $Z_{23} = 9{,}84 + j10{,}21$ Ом; $\underline{Z}_{13} = = 8{,}1 + j20{,}65$ 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*.

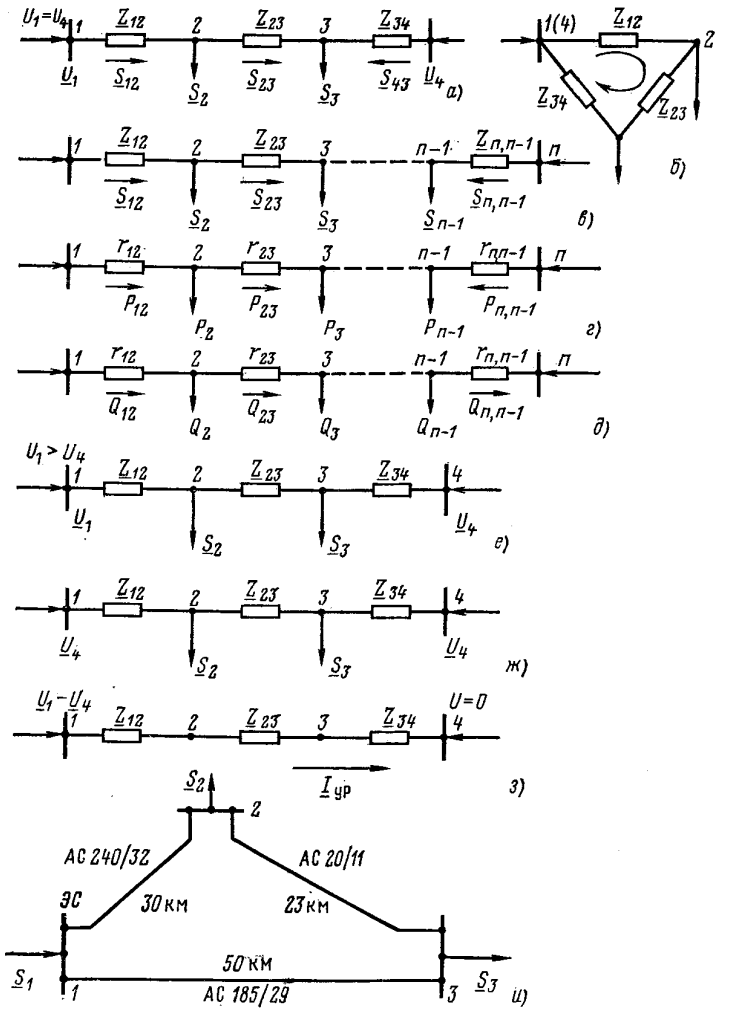


Рисунок 5. Распределение потоков мощности в линии с двухсторонним питанием без учета потерь мощности:

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:

$$\underline{S}_{12} = \frac{(36{,}18 + j29{,}17)(9{,}84 - j10{,}21 + 8{,}1 - j20{,}65) +}{3{,}6 - j12{,}15 + 9{,}84 - j10{,}21 +} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{+(39{,}2 + j32{,}89)(8{,}1 - j20{,}65)}{+8{,}1 - j20{,}65} = 44{,}82 + j36{,}75 \text{ МВ·А};$$

$$\underline{S}_{43} = \frac{(39{,}2 + j32{,}89)(9{,}84 - j10{,}21 + 3{,}6 - j12{,}15) +}{3{,}6 - j12{,}15 + 9{,}84 - j10{,}21 +} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{+(36{,}18 + j29{,}17)(3{,}6 - j12{,}15)}{+8{,}1 - j20{,}65} = 30{,}56 + j25{,}31 \text{ МВ·А}.$$

Проверим правильность определения потоков мощности на голов-

ных 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:

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

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

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

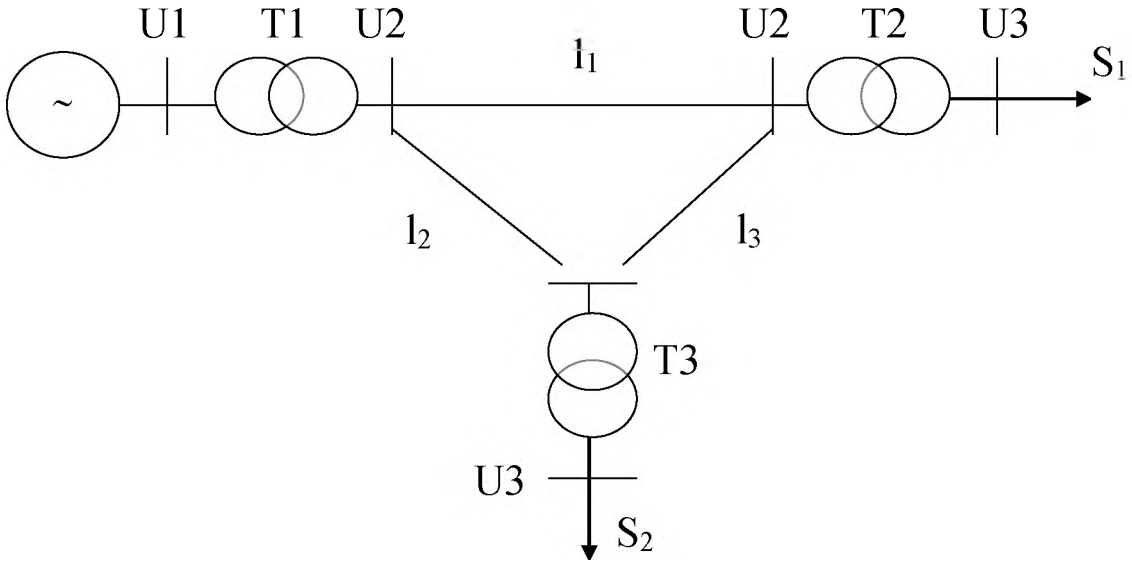
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 4

Расчет кольцевой электрической сети с односторонним питанием

Задание 6. Выполнить электрический расчет сети, изображенной на рисунке 6.

Параметры сети даны в таблицах 6.1 и 6.2.

Выбрать трансформаторы, провода воздушных линий, определить мощность источника питания, рассчитать потери мощности в трансформаторах и линиях электропередачи.



T1, T2, T3 - трансформаторные подстанции (двухтрансформаторные);

l1, l2, l3 - воздушные линии;

U1, U2, U3 - напряжения на шинах подстанций;

S1, S2 - мощности нагрузок

Рисунок 6 Схема электрической сети к задаче.

Таблица 6.1. Исходные данные к задаче

№ варианта (последняя цифра шифра)	U1 кВ	U2 кВ	U3 кВ	S1 МВА	S2 МВА
0	11	110	10	25+j10	15+j5
1	13	220	10.5	40+j15	35+j20
2	11	121	6	17+j5	15+j8
3	24	330	6	70+j20	80+j35
4	11	115	10.5	10+j5	20+j5
5	13	121	11	15+ j8	18+j8
6	18	330	10.5	90+j30	85+j20
7	14	115	10	20+j8	25+j7
8	15	121	35	23+j9	30+j5
9	21	220	11	60+j15	55+j17

Таблица 6.2. Исходные данные к задаче

№ варианта (предпоследняя цифра шифра)	L1 км	L2 км	L3 км
0	60	40	50
I	150	200	100
2	40	10	20
3	200	100	150
4	20	60	15
5	50	50	50
6	150	250	200
7	35	70	25
8	90	40	20
9	70	110	40

1. Выбор трансформатора.

$$S_i = P_i + jQ_i;$$

$$|S_2| = \sqrt{P_2^{\,2} + Q_2^{\,2}} = \sqrt{4900 + 400} = 72{,}8;$$

$$|S_3| = \sqrt{P_3^2 + Q_3^2} = \sqrt{6400 + 1225} = 87{,}32;$$

$$S_{mpi} = \frac{|S_i|}{2};$$

$$S_{mp2} = \frac{|S_2|}{2} = \frac{72{,}8}{2} = 36{,}4;$$

$$S_{mp3} = \frac{|S_3|}{2} = \frac{87{,}32}{2} = 43{,}66;$$

$$\frac{|S_i|}{S_{інно}} \le 1{,}35 - 1{,}4;$$

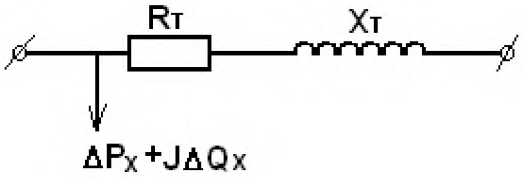
$$\frac{|S_2|}{S_{2ном}} = \frac{72{,}8}{63} = 1{,}16;$$

$$\frac{|S_3|}{S_{3ном}} = \frac{87{,}32}{63} = 1{,}39;$$

Исходя из расчётных параметров находим, трансформатор, который удовлетворяет исходным данным. Для обоих нагрузок подходит трансформатор ТРДЦН-63000/110.

2. Рассчитаем потери мощности в трансформаторах.

Схема замещения трансформатора.



где: □P – потеря активной мощности; □Q – потеря реактивной мощности.

$$\Delta P_{Ti} = \frac{P_{Hi}^2 + Q_{Hi}^2}{U_{вні}^2} * \frac{R_T}{n} + n * \Delta P_x;$$

$$\Delta Q_{Ti} = \frac{P_{Hi}^2 + Q_{Hi}^2}{U_{вні}^2} * \frac{X_T}{n} + n * \Delta Q_x;$$

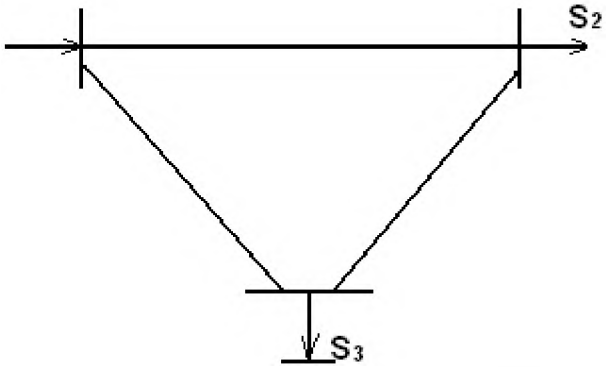
где: n – количество трансформаторов; P_H, Q_H – мощность нагрузки; $U_{вн}$ – напряжение высшего трансформатора.

$$\Delta P_{T2} = \frac{4900+400}{13225} * \frac{0{,}87}{2} + 2 * 0{,}059 = 0{,}29233;$$

$$\Delta P_{T3} = \frac{6400+1225}{13225} * \frac{0{,}87}{2} + 2 * 0{,}059 = 0{,}368803;$$

$$\Delta Q_{T2} = \frac{4900+400}{13225} * \frac{22}{2} + 2 * 0{,}41 = 5{,}22832;$$

$$\Delta Q_{T3} = \frac{6400+1225}{13225} * \frac{22}{2} + 2 * 0{,}41 = 7{,}162155;$$



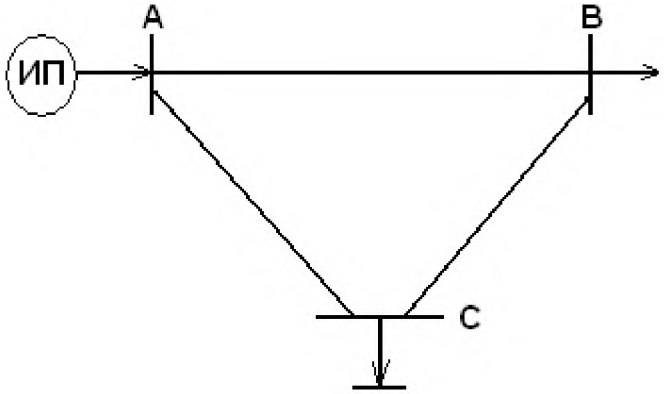
$$S_2 = P_{H2} + jQ_{H2} + \Delta P_{T3} + j\Delta Q_{T3} = P_2 + jQ_2;$$

$$S_3 = P_{H3} + jQ_{H3} + \Delta P_{T2} + j\Delta Q_{T2} = P_3 + jQ_3;$$

$$S_2 = 70{,}2923 + j25{,}2283;$$

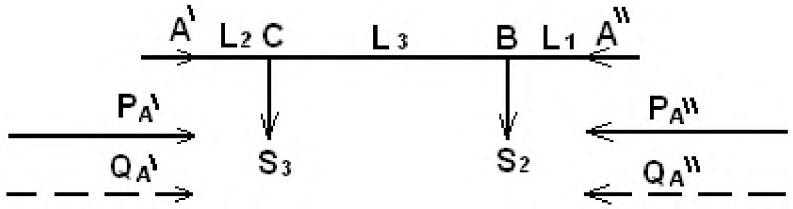
$$S_3 = 80{,}3688 + j42{,}1622$$

3. Расчёт замкнутых сетей. Расчёт потокораспределения мощностей.



где: ИП – источник питания.

Необходимо разрезать сеть в точке питания и развернуть её.



где: $P_{A`}$, $P_{A``}$ - поток активной мощности; $Q_{A`}$, $Q_{A``}$ - поток реактивной мощности.

$$P_{A`} = \frac{P_3(L_3 + L_1) + P_2 L_1}{L_1 + L_2 + L_3};$$

$$P_{A``} = \frac{P_2(L_2 + L_3) + P_3 L_2}{L_1 + L_2 + L_3};$$

$$Q_{A`} = \frac{Q_3(L_3 + L_1) + Q_2 L_1}{L_1 + L_2 + L_3};$$

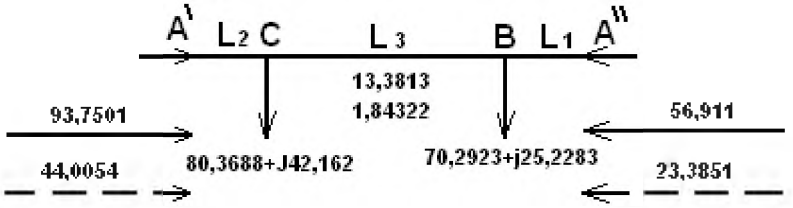
$$Q_{A``} = \frac{Q_2(L_2 + L_3) + Q_3 L_2}{L_1 + L_2 + L_3};$$

$$P_{A`} = \frac{80{,}3688*(150+200) + 70{,}2923*200}{200+100+150} = 93{,}7501;$$

$$P_{A``} = \frac{70{,}2923*(100+150) + 80{,}3688*100}{200+100+150} = 56{,}911;$$

$$Q_{A`} = \frac{42{,}1622*(150+200) + 25{,}2283*200}{200+100+150} = 44{,}0054;$$

$$Q_{A``} = \frac{25{,}2283*(100+150) + 42{,}1622*100}{200+100+150} = 23{,}3851;$$



4. Выбор сечения проводов производится по экономической плотности тока.

$$S_i = P_i + jQ_i;$$

$$|S_2| = \sqrt{P_2^{\,2} + Q_2^{\,2}} = \sqrt{4941{,}01 + 636{,}47} = 74{,}68;$$

$$|S_3| = \sqrt{P_3^2 + Q_3^2} = \sqrt{6459{,}14 + 1777{,}65} = 90{,}76;$$

$$|S_1| = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = \sqrt{93{,}7501^2 + 44{,}0054^2} = 103{,}564255$$

$$I_{pi} = \frac{|S_i|}{\sqrt{3} * U_2}; \qquad F_{pi} = \frac{I_{pi}}{J_{эк \approx 1,1}};$$

$$I_{p2} = \frac{74,68}{1,73 * 330} = 0,13066; \qquad F_{p2} = \frac{0,13066}{1,1} = 118,782;$$

$$I_{p3} = \frac{90,76}{\sqrt{3} * 330} = 0,15878; \qquad F_{p3} = \frac{0,15878}{1,1} = 144,348;$$

$$I_{p1} = \frac{103,56}{\sqrt{3} * 330} = 0,181190456; \quad F_{p1} = \frac{0,181191}{1,1} = 164,719;$$

$$F_{\max} = 164,719;$$

5. Расчёт потерь в воздушной линии (ВЛ) ЛЭП.

$$\Delta P_{лi} = \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_2^2} * R_{лi}; \quad где \ R_{лi} = R_0 * L_i$$

$$\Delta P_{л2} = \frac{70,2923^2 + 25,2283^2}{330^2} * 600 = 30,7299;$$

$$\Delta P_{л3} = \frac{80,3688^2 + 42,1622^2}{330^2} * 300 = 22,6909;$$

$$\Delta P_{л1} = \frac{93,7501^2 + 44,0054}{330^2} * 450 = 44,3205;$$

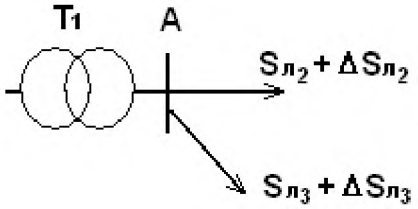
$$\Delta Q_{лi} = \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_2^2} * X_{лi}; \quad где \ X_{лi} = X_0 * L_i$$

$$\Delta Q_{л2} = \frac{70,2923^2 + 25,2283^2}{330^2} * 3310 = 169,527;$$

$$\Delta Q_{л3} = \frac{80,3688^2 + 42,1622^2}{330^2} * 1655 = 125,178;$$

$$\Delta Q_{л1} = \frac{93,7501^2 + 44,0054}{330^2} * 2482,5 = 244,501;$$

6. Расчёт трансформатора в точке «А».



$$S_{T1} = S_{л1} + S_{л2} + \Delta S_{л1} + \Delta S_{л2} = 204,082 + j352,095;$$

$$S_i = P_i + jQ_i;$$

$$|S_1| = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = 415{,}65;$$

$$S_{TP1} = \frac{|S_1|}{2} = \frac{415{,}65}{2} = 207{,}82;$$

$$\frac{|S_1|}{S_{1ном}} = \frac{415{,}65}{296{,}891} = 1{,}039;$$

Исходя из рассчитанных параметров определим трансформатор, который удовлетворяет полученным данным. Для данного узла подходит трансформатор ТДЦ-400000/110.

7. Рассчитаем потери мощности в трансформаторе.

$$\Delta P_{Ti} = \frac{P_{Hi}^2 + Q_{Hi}^2}{U_{внi}^2} * \frac{R_T}{n} + n * \Delta P_x;$$

$$\Delta Q_{Ti} = \frac{P_{Hi}^2 + Q_{Hi}^2}{U_{внi}^2} * \frac{X_T}{n} + n * \Delta Q_x;$$

где: n – количество трансформаторов; P_H, Q_H – мощность нагрузки; $U_{вн}$ – напряжение высшего трансформатора.

$$\Delta P_{T1} = 1{,}112;$$

$$\Delta Q_{T1} = 26{,}0198;$$

$$S_1 = P_{H1} + jQ_{H1} + \Delta P_{T1} + j\Delta Q_{T1} = P_1 + jQ_1;$$

$$S_1 = 205{,}194 + j388{,}1150438;$$

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 5

Расчет кольцевой электрической сети с двухсторонним питанием

Цель: Изучить правила расчета режима кольцевых электрических сетей

Наиболее простой замкнутой сетью является кольцевая сеть. Она имеет один замкнутый контур (рисунок 7 а). В качестве питательного пункта может быть либо электростанция, либо шины подстанции системы. Если такую сеть разрезать по источнику питания и развернуть, то она будет иметь вид как линии с двусторонним питанием, у которой напряжения по концам равны по величине и по фазе (см. Рисунок 4.4 б).

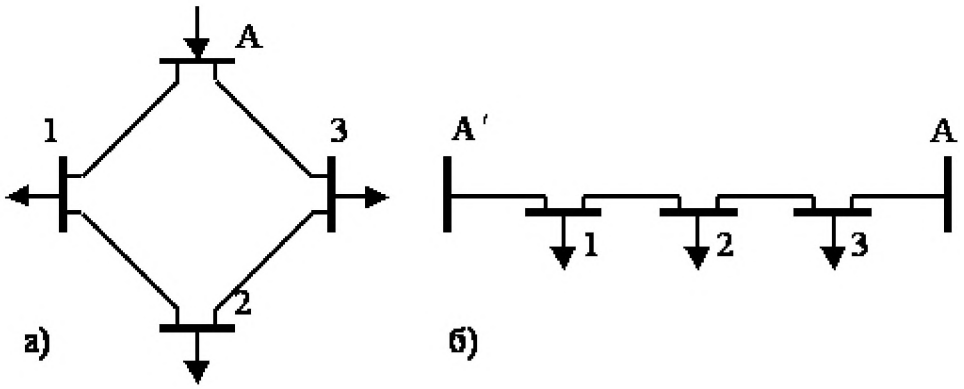


Рисунок 7 Кольцевая сеть

Для расчета сети возьмем схему, приведенную на рисунке 8. Здесь мощности $\dot{S}_1, \dot{S}_2, \dot{S}_3$ - расчетные нагрузки подстанций. Направление потоков мощности на участках сети принято условно. Действительное направление определяется в результате расчета.

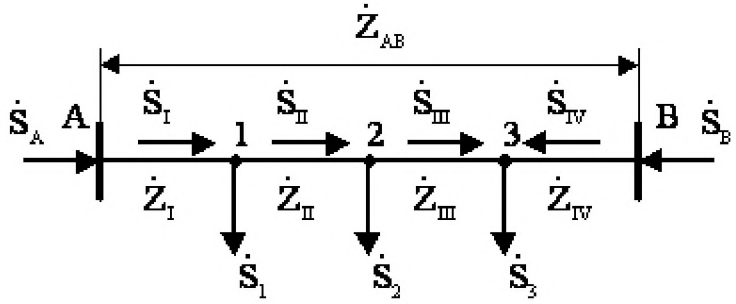


Рисунок 8. Направление потоков мощности на участках сети

Исходными данными для расчета сети являются напряжение в центре питания, мощности нагрузок, параметры сети.

Так как напряжения в узлах нагрузки неизвестны, то расчет должен выполняться с помощью метода последовательных приближений.

Так же, как и при расчете разомкнутых сетей принимают условие равенства напряжений вдоль линии. Это напряжение принимают равным номинальному. При этих допущениях ток на участках сети определяется

$$\dot{I}_n = \frac{\dot{S}_n}{\sqrt{3}U_{ном}}.$$

Условие равенства напряжений по концам линии означает равенство нулю падения напряжения в схеме (см. Рисунок 7).

На основании второго закона Кирхгофа запишем

$$\frac{\dot{S}_I}{\sqrt{3}U_{ном}}\dot{Z}_I + \frac{\dot{S}_{II}}{\sqrt{3}U_{ном}}\dot{Z}_{II} + \frac{\dot{S}_{III}}{\sqrt{3}U_{ном}}\dot{Z}_{III} - \frac{\dot{S}_{IV}}{\sqrt{3}U_{ном}}\dot{Z}_{IV} = 0$$

или

$$\dot{S}_I\dot{Z}_I + \dot{S}_{II}\dot{Z}_{II} + \dot{S}_{III}\dot{Z}_{III} - \dot{S}_{IV}\dot{Z}_{IV} = 0.$$

Выразим входящие в это уравнение мощности 2,3 и 4го участков линии через мощность $\dot{S}_I$ и известные мощности нагрузок $\dot{S}_1, \dot{S}_2, \dot{S}_3$.

При не учёте потерь мощности можно записать

$$\dot{S}_I + \dot{S}_{IV} = \dot{S}_1 + \dot{S}_2 + \dot{S}_3,$$

откуда

$$\dot{S}_I = \dot{S}_1 + \dot{S}_2 + \dot{S}_3 - \dot{S}_{IV}.$$

На основании первого закона Кирхгофа

$$\dot{S}_{II} = \dot{S}_I - \dot{S}_1,$$

$$\dot{S}_{III} = \dot{S}_I - \dot{S}_1 - \dot{S}_2.$$

Подставим в исходное уравнение и после преобразований получим

$$\dot{S}_I(\dot{Z}_I + \dot{Z}_{II} + \dot{Z}_{III} + \dot{Z}_{IV}) - \dot{S}_1(\dot{Z}_{II} + \dot{Z}_{III} + \dot{Z}_{IV}) - \dot{S}_2(\dot{Z}_{III} + \dot{Z}_{IV}) - \dot{S}_3\dot{Z}_{IV} = 0$$

откуда с учетом обозначений на схеме

$$\dot{S}_1 = \dot{S}_A = \frac{\dot{S}_1\dot{Z}_{1\text{-}B} + \dot{S}_2\dot{Z}_{2\text{-}B} + \dot{S}_3\dot{Z}_{3\text{-}B}}{\dot{Z}_{AB}}$$

Аналогично можно получить

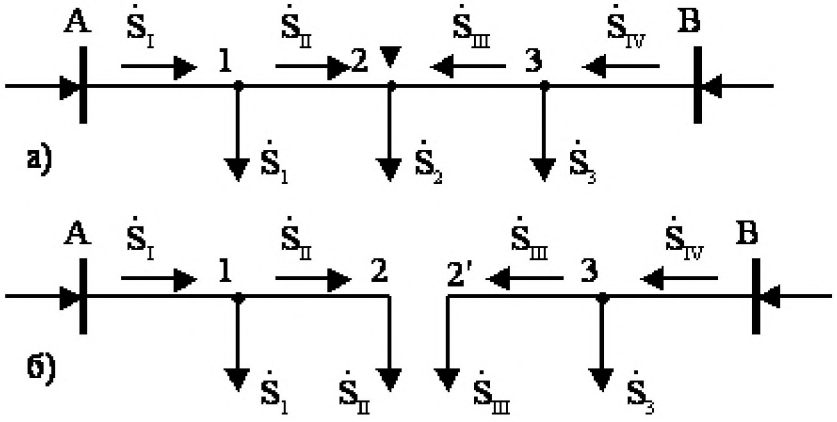
$$\dot{S}_{IV} = \dot{S}_B = \frac{\dot{S}_1\dot{Z}_{1\text{-}A} + \dot{S}_2\dot{Z}_{2\text{-}A} + \dot{S}_3\dot{Z}_{3\text{-}A}}{\dot{Z}_{AB}}.$$

В общем случае при n нагрузках на кольцевой сети

$$\left.\begin{aligned} \dot{S}_A &= \frac{\sum_{m=1}^{n} \dot{S}_m \dot{Z}_{mB}}{\dot{Z}_{AB}}; \\ \dot{S}_B &= \frac{\sum_{m=1}^{n} \dot{S}_m \dot{Z}_{mA}}{\dot{Z}_{AB}}. \end{aligned}\right\}$$

где $\dot{Z}_{mA}$ и $\dot{Z}_{mB}$ - сопротивления от точки m, в которой включена некоторая промежуточная нагрузка $\dot{S}_m$, до точек питания A и B соответственно.

После определения мощностей, протекающих по головным участкам сети, определяются мощности на остальных участках с помощью закона Кирхгофа. На этом заканчивается первый этап расчета режима этой линии. На втором этапе определяются потери мощности и напряжения в узловых точках сети. Допустим, что в результате первого этапа расчета найдено распределение мощностей, как показано на рисунке 9 а.



9. Распределение мощностей

К точке 2 мощность поступает с двух сторон. Эта точка называется точкой *потокораздела* и на рисунке отличается зачерненным треугольником.

Для расчета напряжений в узловых точках условно разрежем схему (см. Рисунок 9 а) по точке потокораздела (см. Рисунок 9 б).

Получим схему, состоящую из двух независимых частей, каждая из которых характеризует разомкнутую сеть с заданными нагрузками и напряжениями $U_A=U_B$ на шинах общего источника питания. Следовательно, дальнейший расчет кольцевой сети должен проводиться так же, как для разомкнутых сетей по данным начала. Для сетей 110-220 кВ учитываются потери мощности и определяются напряжения в узловых точках. Для сетей 35 кВ и ниже напряжения рассчитываются без учета потерь мощности.

В ряде случаев оказывается, что после первого этапа расчета могут быть две точки потокораздела: одна по активной, другая по реактивной мощности.

Точка 2 – точка потокораздела для активной мощности, а точка 3 – для реактивной мощности. В этом случае кольцевая сеть также условно разрезается по точкам потокораздела и представляется двумя разомкнутыми линиями.

В этом случае определяются потери мощности на участке между точками потокораздела:

$$\Delta P_{III} = \frac{P_{III}^2 + Q_{III}^2}{U_{ном}^2} R_{III},$$

$$\Delta Q_{III} = \frac{P_{III}^2 + Q_{III}^2}{U_{ном}^2} X_{III}.$$

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 6

Расчет компенсирующих устройств

Содержание занятия

Показатели качества электроэнергии. Методы регулирования напряжения. Определение допустимой потери напряжения в распределительных сетях. Несимметрия и несинусоидальность в электрических сетях и мероприятия по их снижению.

Тематика индивидуальных и групповых заданий студентов (темы для обсуждения):

Показатели качества электроэнергии.

Методы регулирования напряжения.

Определение допустимой потери напряжения в распределительных сетях.

Несимметрия в электрических сетях и мероприятия по снижению.

Несинусоидальность в электрических сетях и мероприятия по снижению.

Определение потерь электрической энергии по графику нагрузки.

Определение потерь электрической энергии по времени наибольших потерь.

Задание 7. 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 $\underline{S}_{12}^{к}$, найдем продольную и поперечную составляющие падения напряжения по данным конца:

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

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

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

$$\underline{U}_1 = 109{,}8 - j2{,}65 + 6{,}11 + j2{,}8 \approx 115{,}9 + 0{,}15 \text{ кВ}.$$

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 8. Определим падение и потерю напряжения в линии по известным мощности в начале линии $\underline{S}_{12}^{н}$=15,61+*j*9,6 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:

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

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

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

Задание 9. 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:

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

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

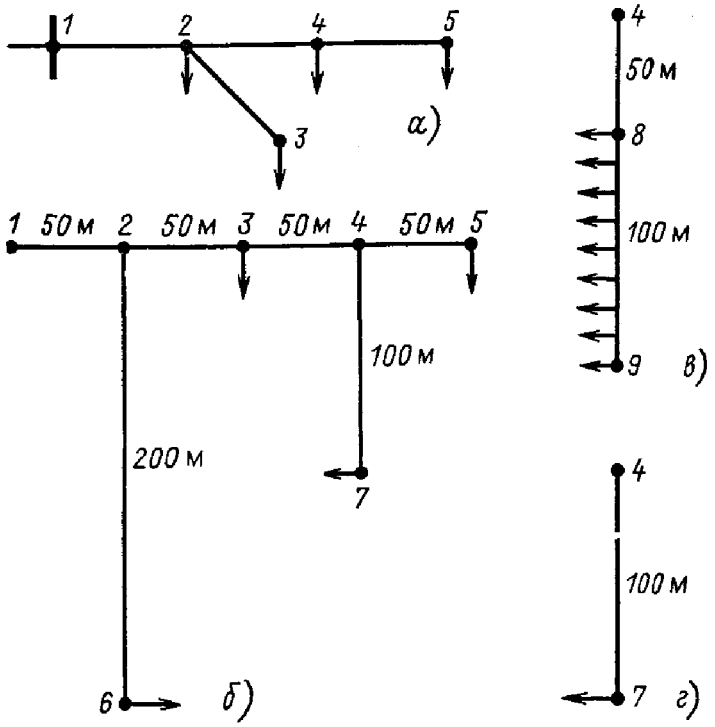


Рисунок 10. Конфигурации разветвленной распределительной сети:

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

Активные и реактивные сопротивления линий:

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

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

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

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

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

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

$P_{23} = P_3 = 1930$ кВт.

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

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

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

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

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

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 7

Регрессионный анализ режима электропотребления

Оптимизация распределения мощностей в замкнутом контуре - это частная задача оптимизации режима электрической сети. Будем считать, что в узлах сети заданы неизменные токи, т. е. уравнения установившегося режима линейны. Если в узлах заданы неизменные мощности, то будем определять их по номинальному напряжению:

$$\underline{S}_k = \sqrt{3}\underline{I}_k^* U_{ном},$$

где $\underline{S}_k, \underline{I}_k$ заданные комплексные мощность и ток в каждом узле; $U_{ном}$ - номинальное напряжение сети.

При этом ток в ветви kj определяется следующим образом:

$$\underline{I}_{kj} = \frac{S_{kj}^*}{\sqrt{3}U_{ном}}.$$

При выполнении условий или уравнения установившегося режима остаются линейными, т. е. вместо заданных комплексных токов в узлах можно использовать комплексные мощности в узлах, а вместо токов в ветвях - мощности в ветвях.

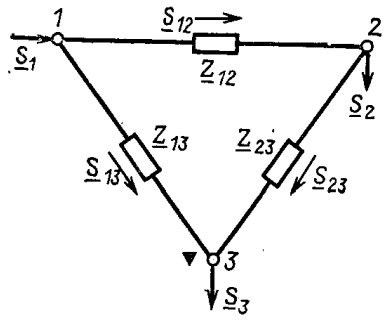


Рисунок 11. Схема замкнутой сети

Найдем распределение мощностей в сети, соответствующее наименьшим потерям активной мощности, при выполнении первого закона Кирхгофа для мощностей. Иными словами, определим такие значения мощностей S_{12}, S_{23}, S_{13} которые соответствуют минимуму потерь активной мощности в сети

$$\min \Delta P$$

при выполнении следующих ограничений-равенств первого закона Кирхгофа для узлов 2 и 3:

$$\left.\begin{aligned}\underline{S}_{12}-\underline{S}_{23}=\underline{S}_2;\\ \underline{S}_{13}+\underline{S}_{23}=\underline{S}_3.\end{aligned}\right\}$$

или для активных и реактивных мощностей:

$$\left.\begin{aligned}P_{12}-P_{23}=P_2;\\ P_{13}+P_{23}=P_3;\\ Q_{12}-Q_{23}=Q_2;\\ Q_{13}+Q_{23}=Q_3.\end{aligned}\right\}$$

Потери активной мощности в сети с учетом условия равны

$$\Delta P=\frac{S_{12}^2}{U_{ном}^2}r_{12}+\frac{S_{13}^2}{U_{ном}^2}r_{13}+\frac{S_{23}^2}{U_{ном}^2}r_{23}.$$

Условие минимума потерь запишем так:

$$\min\Delta P=\min\left(\frac{P_{12}^2+Q_{12}^2}{U_{ном}^2}r_{12}+\frac{P_{13}^2+Q_{13}^2}{U_{ном}^2}r_{13}+\right.$$

$$\left.+\frac{P_{23}^2+Q_{23}^2}{U_{ном}^2}r_{23}\right)=\min\Sigma\frac{P_{kj}^2+Q_{kj}^2}{U_{ном}^2}r_{kj}.$$

Потери мощности, это целевая функция задачи оптимизации режима сети, условия - это ограничения-равенства первого закона Кирхгофа. Задача (13.5), (13.6)- одна из простейших формулировок задачи оптимизации режима электрической сети.

Система ограничений (13.5) содержит четыре уравнения и шесть неизвестных активных и реактивных потоков мощности в ветвях $P_{12},P_{13},P_{23},Q_{12},Q_{13},Q_{23}$. Она имеет бесконечное множество решений. Можно задать любые значения, например, четырех потоков $P_{13},P_{23},Q_{13},Q_{23}$ и из (13.5) найти значения потоков P_{12},Q_{12}, удовлетворяющие первому закону Кирхгофа. Параметры режима имеют две степени свободы. Изменяя параметры режима, можно найти такие их значения, при которых потери мощности ΔP в сети минимальны.

Напомним, что в §3.13 установившийся режим простой замкнутой сети описывается не только двумя комплексными уравнениями первого закона Кирхгофа (13,4), но и од-ним комплексным уравнением второго закона Кирхгофа. При этом шесть действительных уравнений с шестью неизвестными имеют

единственное решение. Степени свободы у параметров режима отсутствуют. Осуществлять регулирование и уменьшать ΔP невозможно.

Определим потоки мощности, соответствующие минимуму потерь. Для этого выразим, $P_{12}, P_{23}, Q_{12}, Q_{23}$ через неизвестные потоки P_{13}, Q_{13} и заданные нагрузки в узлах:

$$\left.\begin{aligned} P_{23} &= P_{12} - P_2; \\ P_{13} &= -P_{12} + P_2 + P_3; \\ Q_{23} &= Q_{12} - Q_2; \\ Q_{13} &= -Q_{12} + Q_2 + Q_3. \end{aligned}\right\}$$

Подставим в целевую функцию и выразим потери через два неизвестных потока P_{12} и Q_{12}:

$$\Delta P = \frac{P_{12}^2 + Q_{12}^2}{U_{ном}^2} r_{12} + \frac{\left(P_{12}^2 - P_2\right)^2 + \left(Q_{12}^2 - Q_2\right)^2}{U_{ном}^2} r_{12} + \\ + \frac{(-P_{12} + P_2 + P_3)^2 + (-Q_{12} + Q_2 + Q_3)^2}{U_{ном}^2} r_{23}.$$

Получили целевую функцию, которая зависит только от двух неизвестных P_{12} и Q_{12}. При этом задача определения условного экстремума функции шести неизвестных сведена к отысканию безусловного экстремума функции двух переменных. Как известно, последний определяется из условия равенства нулю частных производных от ΔP по P_{12} и Q_{12}:

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{12}} &= \frac{1}{U_{ном}^2}\left[2P_{12}^2 r_{12} + 2(P_{12} - P_2) r_{23}\right] - \\ &\quad - 2(-P_{12} + P_2 + P_3) r_{23} = 0; \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial Q_{12}} &= \frac{1}{U_{ном}^2}\left[2Q_{12}^2 r_{12} + 2(Q_{12} - Q_2) r_{23}\right] - \\ &\quad - 2(-Q_{12} + Q_2 + Q_3) r_{23} = 0. \end{aligned}\right\}$$

Решив уравнения, получим следующие аналитические выражения для оптимальных (экономических) потоков мощности P_{12} и Q_{12}:

$$P_{12} = \frac{P_2(r_{23} + r_{13}) + P_3 r_{13}}{r_{12} + r_{23} + r_{13}};$$

$$Q_{12} = \frac{Q_2(r_{23} + r_{13}) + Q_3 r_{13}}{r_{12} + r_{23} + r_{13}}.$$

Из сравнения вытекает, что минимум потерь мощности при выполнении первого закона Кирхгофа соответствует распределению мощностей в простой замкнутой сети только с активными сопротивлениями. Это распределение мощностей называется экономическим.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 9
Расчет оптимальной конфигурации электрической сети

При технико-экономическом сравнении сопоставляются только допустимые по техническим требованиям варианты, т.е. такие, в которых потребитель получает нужную электроэнергию заданного качества при заданной степени надежности.

На первом этапе технико-экономического сравнения выбирают допустимые по техническим требованиям варианты, а на втором этапе из них выбирают оптимальный по технико-экономическим показателям. Допустим, что надо сравнить варианты сети на рис. 6.2. Самый простой путь– это определить капитальные вложения и издержки по вариантам и сравнить их. Если $K_1 > K_2$ и $И_1 > И_2$, то выбирают второй вариант. Наиболее часто встречается более сложный для сравнения вариантов случай, когда $K_1 > K_2$,

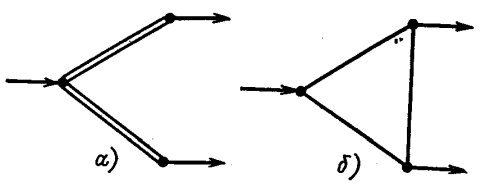


Рисунок 11 а-радиальная; б–замкнутая

а $И_1 < И_2$ (или наоборот). Как же сравнить такие варианты?

Сопоставление вариантов схемы сети осуществляют в результате расчетов сравнительной экономической эффективности капитальных вложений. Экономическим критерием, по которому определяют наивыгоднейший вариант, является минимум приведенных затрат, руб/год, вычисляемых по следующей формуле:

$$З = p_н \cdot К + И,$$

где К–капитальные вложения, руб., необходимые для сооружения сети, причем предполагается, что строительство ее продолжается не более одного года; И–ежегодные эксплуатационные расходы, руб/год, предполагаемые неизменными в течение всего рассматриваемого периода

эксплуатации; $p_н$–нормативный коэффициент сравнительной эффективности капитальных вложений, $p_н$=0,12 1/год.

Вариант с наименьшими приведенными затратами называется наивыгоднейшим, или экономически целесообразным, т. е. это вариант сети. Для которого имеет место

$$\min_i З_i = \min_i (p_н \cdot К_i + И_i),$$

где i– номер варианта.

Если строительство ведется в течение нескольких лет, а ежегодные эксплуатационные расходы неодинаковы для разных лет, то приведенные к первому году затраты определяются так:

$$З = \sum_{t=1}^{T} \frac{p_н \cdot К_t + \delta И_t}{(1 + p_{н.п})^{t-1}}.$$

где Т– расчетный период сооружения сети, за его пределами капитальные вложения не производятся, а эксплуатационные расходы не изменяются по годам и равны $И_T$; Kt , Иt–капитальные вложения и эксплуатационные расходы за i-й год расчетного периода; $p_{н.п}$==0,08 –норматив при-ведения разновременных затрат; $\delta И_t = И_t - И_{t-1}$ – изменение эксплуатационных расходов t-го года по сравнению с годом (t–1)-м.

Если варианты существенно различаются по надежности электроснабжения, в состав приведенных затрат надо включить ущерб от ожидаемого недоотпуска электроэнергии (см. § 6.4). При сравнении небольших сетей или отдельных объектов варианты считаются равноэкономичными, если разница между их приведенными затратами меньше 5 %. При этом надо обязательно исключить затраты на одинаковые элементы в сравниваемых вариантах. Выбор вариантов из числа равноэкономичных осуществляется в результате инженерной оценки таких свойств, которые не могут быть представлены в виде экономического эквивалента и включены в приведенные затраты. Здесь надо учитывать перспективы развития сети, удобство эксплуатации, дефицитность материалов, серийность применяемого оборудования и другие факторы.

Для понимания сути приведенных затрат используем нормативный срок окупаемости капиталовложений tок.н. Из-за ряда недостатков tок.н не применяется при сравнении вариантов сети, но понятие «срок окупаемости» полезно для пояснения выражения. Предположим, что нормативный коэффициент

окупаемости капитальных вложений равен величине, обратной нормативному сроку окупаемости, т. е.

$$p_н = 1/t_{ок.н}.$$

Получим затраты на сооружение и эксплуатацию сети в течение одного года:

$$З = K/t_{ок.н} + И.$$

Суммарные затраты на сооружение и эксплуатацию сети в течение времени, равного нормативному сроку окупаемости, равны

$$З_{\Sigma} = K + t_{ок.н} \cdot И.$$

Экономичнее тот вариант, для которого меньше суммарные затраты на сооружение и эксплуатацию электрической системы за время $t_{ок.н}$. При выполнении условия использование приведенных затрат, т.е. затрат за год, или суммарных затрат за время $t_{ок.н}$, дают тождественные результаты. Формула обосновывалась с помощью попарного сравнения вариантов.

Рассмотрим сравнение двух вариантов, причем $K_1 > K_2, И_1 < И_2$, с помощью срока окупаемости. Разность $K_1 - - K_2 = \Delta K$ есть увеличение капитальных вложений, т.е. дополнительные капитальные вложения при выборе первого варианта. Экономия эксплуатационных расходов при выборе первого варианта равна $И_2 - И_1 = \Delta И$. Срок окупаемости $t_{ок}$ – время, за которое окупятся дополнительные капитальные вложения при выборе первого варианта за счет экономии эксплуатационных расходов,– определяется так:

$$t_{ок} = \frac{K_1 - K_2}{И_2 - И_1} = \frac{\Delta K}{\Delta И}$$

Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений должен быть меньше, чем нормативный срок окупаемости $t_{ок.н}$. Если подсчитанное по формуле значение срока окупаемости $t_{ок} < t_{ок.н}$, то экономичнее первый вариант с большими капиталовложениями и меньшими годовыми эксплуатационными расходами. При $t_{ок} > t_{ок.н}$ экономичнее вариант с меньшими капиталовложениями и большими годовыми эксплуатационными расходами. Если $t_{ок} = t_{ок.н}$, сравниваемые варианты считаются экономически равно-ценными. Таким образом, технико-экономическое сравнение двух вариантов отвечает условиям

$$t_{ок} \begin{matrix} < \\ > \end{matrix} t_{ок.н}.$$

или

$$\frac{K_1 - K_2}{И_2 - И_1} \lessgtr t_{ок.н}.$$

Легко убедиться, что эквивалентно использованию. Действительно следует, что сравнение вариантов определяется условием

$$K_1 + t_{ок.н} \cdot И_1 \lessgtr K_2 + t_{ок.н} \cdot И_2 .$$

В выражении сравниваются $З_\Sigma$, т.е. выбирается вариант, у которого суммарные затраты за время $t_{ок.н}$ меньше.

В технико-экономических расчетах $t_{ок.н}$ начали применять несколько десятилетий тому назад, что послужило на-чалом развития теории приведенных затрат. В настоящее $t_{ок.н}$ время не применяется из-за следующих недостатков: отсутствует строгое обоснование и соответственно; срок окупаемости может использоваться только для попарного сравнения вариантов. Кроме того, с помощью $t_{ок.н}$ нельзя учесть неодновременность капитальных вложений (т.е. динамику развития электрической сети) аналогично и ряд других факторов. Поэтому технико-экономическое сравнение вариантов надо проводить по приведенным затратам.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 9
Основы расчета послеаварийных режимов в электрических сетях

Линейные уравнения узловых напряжений

Общие закономерности формирования уравнений узловых напряжений рассмотрим сначала на примере электрической цепи постоянного тока, приведенной на рисунке12 и состоящей из четырех узлов и шести ветвей. 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.

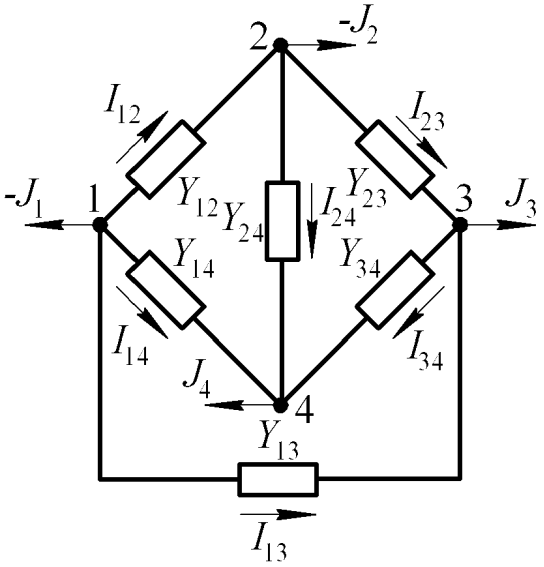


Рисунок 12. Схема сложнозамкнутой сети

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 искомых 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 $U_б$.

Поскольку напряжение $U_1 = U_б$ 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 «*б*». В результате получим систему

$$(-Y_{21} - Y_{23} - Y_{24})U_2 + Y_{23}U_3 + Y_{24}U_4 = J_2 - Y_{2б}U_б;$$
$$Y_{32}U_2 + (-Y_{31} - Y_{32} - Y_{34})U_{23} + Y_{34}U_4 = J_3 - Y_{3б}U_б;$$
$$Y_{42}U_2 + Y_{43}U_3 + (-Y_{41} - Y_{42} - Y_{43})U_4 = J_4 - Y_{4б}U_б.$$

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:

$$Y_{22}U_2 + Y_{23}U_3 + Y_{24}U_4 = -J_1 - Y_{2б}U_б;$$
$$Y_{32}U_2 + Y_{33}U_3 + Y_{34}U_4 = J_3 - Y_{3б}U_б;$$
$$Y_{42}U_2 + Y_{43}U_3 + Y_{44}U_4 = J_4 - Y_{4б}U_б.$$

Ввидно, 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

$$YU = J - Y_б U_б,$$

где Y – матрица собственных и взаимных проводимостей;

U – вектор-столбец напряжений в узлах;

J – вектор-столбец токов в узлах;

$Y_б U_б$ – 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

$$\underline{Y}\,\underline{U} = \underline{J} - \underline{Y}_б U_б.$$

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

$$\underline{Y} = G - jB;$$
$$\underline{U} = U' + jU";$$
$$\underline{J} = J' + jJ";$$
$$\underline{Y}_б = G_б - jB_б.$$

Подставляя получим

$$(G - jB)\cdot(U' + jU") = (J' + jJ") - (G_á - jB_á)U_á.$$

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

$$GU' + BU" = J' - G_б U_б;$$
$$-BU' + GU" = J" - B_б U_б.$$

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

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

$$g_{22}U_2' + g_{23}U_3' + g_{24}U_4' + b_{22}U_2" + b_{23}U_3" + b_{24}U_4" = -J_2' - g_{2б}U_б;$$
$$g_{32}U_2' + g_{33}U_3' + g_{34}U_4' + b_{32}U_2" + b_{33}U_3" + b_{34}U_4" = J_3' - g_{3б}U_б;$$
$$g_{42}U_2' + g_{43}U_3' + g_{44}U_4' + b_{42}U_2" + b_{43}U_3" + b_{44}U_4" = J_4' - g_{4б}U_б;$$
$$-b_{22}U_2' - b_{23}U_3' - b_{24}U_4' + g_{22}U_2" + g_{23}U_3" + g_{24}U_4" = -J_2'' - b_{2б}U_б;$$
$$-b_{32}U_2' - b_{33}U_3' - b_{34}U_4' + g_{32}U_2" + g_{33}U_3" + g_{34}U_4" = J_3'' - b_{3б}U_б;$$
$$-b_{42}U_2' - b_{43}U_3' - b_{44}U_4' + g_{42}U_2" + g_{43}U_3" + g_{44}U_4" = J_4'' - b_{4б}U_б.$$

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:

$$I_{ij} = (U_i - U_j)\cdot Y_{ij} = [(U'_i + jU''_i) - (U'_j + jU''_j)]\cdot(g_{ij} - jb_{ij}) =$$
$$= [(U'_i - U'_j) + j(U''_i - U''_j)]\cdot(g_{ij} - jb_{ij}) =$$
$$= [(U'_i - U'_j)\cdot g_{ij} + (U''_i - U''_j)\cdot b_{ij}] +$$
$$+ j[(U'_i - U'_j)\cdot(-b_{ij}) + (U''_i - U''_j)\cdot g_{ij}] = I_{ij}' + jI_{ij}''.$$

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:

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

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:

$$Y_{22}''U_2 + Y_{23}''U_3 = J_2'';$$
$$Y_{32}''U_2 + Y_{33}''U_3 = J_3''.$$

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

$$U_1 + Y_{12}'U_2 + Y_{13}'U_3 = J_1';$$
$$U_2 + Y_{23}'''U_3 = J_2''';$$
$$Y_{33}''''U_3 = J_3''''.$$

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

$$U_1 = -Y_{12}U_2 / Y_{11} - Y_{13}U_3 / Y_{11} + J_1 / Y_{11} = Y_{12}'U_2 + Y_{13}'U_3 + J_1';$$
$$U_2 = -Y_{21}U_1 / Y_{22} - Y_{23}U_3 / Y_{22} + J_2 / Y_{22} = Y_{21}'U_1 + Y_{23}'U_3 + J_2';$$
$$U_3 = -Y_{31}U_1 / Y_{33} - Y_{32}U_2 / Y_{33} + J_1 / Y_{33} = Y_{31}'U_1 + Y_{32}'U_2 + J_3'.$$

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 $U_{1,1}, U_{2,1}, U_{3,1}$. Проделанное 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

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

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.

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.: Интермет Инжиниринг, 2005.

13. Правила устройства электроустановок [Текст]: 7-е издания. М.: Госэнергонадзор, 2002, 278с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Сборник задач

Задача 1

Определить параметры схемы замещения линии 110 кВ, выполненной проводом АС-120, протяженностью 10 км.

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

Задача 2

Определить параметры схемы замещения линии 35 кВ, выполненной проводом АС-70, протяженностью 8 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 28 км.

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

Задача 4

Определить как изменится Х линии, напряжением 110 кВ, провод АС-70, с горизонтальным расположением проводов на расстоянии 2 м, если провода расположить равносторонним треугольником.

Задача 5

Определить как изменится Х 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 Х линии, напряжением 35 кВ, провод АС-95, с горизонтальным расположением проводов на

расстоянии 1,5 м, если провода расположить равносторонним треугольником.

Задача 7

Определить параметры схемы замещения трехфазного двухобмоточного трансформатора ТМГ- 1600/10.

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 140 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 18 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 108 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 150 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 20 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 8700 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 5200 кВА, коэфф. мощности 0,9. Определить потери активной и реактивной мощности в трансформаторе.

Задача 18

Цементный завод получает питание от районной сети 35 кВ. На ГПП завода установлен трансформатор ТРДН-25000/35. Максимальная мощность, потребляемая заводом, равна 18300 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Данные сталеалюминиевых проводов воздушных линий 110 – 220 кВ

Марка провода	Сечение алюминия, мм^2	Диаметр провода, мм	r_0, Ом/км	x_0, Ом/км	b_0 10^{-6}, См/км	$\Delta P_к$, кВт/км	Длительно допустимый ток, А	$К_0$, тыс.руб/км	
								110 кВ	220 кВ
Напряжение 110 кВ									
70/11	68,0	11,4	0,428	0,444	2,55	–	265	19,4	–
95/16	95,4	13,5	0,306	0,434	2,61	–	330	19,1	–
120/19	118,0	15,2	0,249	0,427	2,66	–	390	19,0	–
120/27	114,0	15,4	0,253	0,425	2,67	–	375	19,1	–
150/19	148,0	16,8	0,199	0,421	2,69	–	450	18,9	–
150/24	149,0	17,1	0,198	0,420	2,70	–	450	19,0	–
150/34	147,0	17,5	0,201	0,423	2,71	–	450	19,1	–
185/29	181,0	18,8	0,162	0,413	2,75	–	510	19,7	–
185/43	185,0	19,6	0,158	0,410	2,78	–	515	19,8	–
240/32	244,0	21,6	0,121	0,405	2,81	–	605	20,0	–
Напряжение 220 кВ									
240/32	244,0	21,6	0,121	0,435	2,60	2,7	605	–	22,9
240/39	236,0	21,6	0,124	0,438	2,61	2,5	610	–	23,0
300/39	301,0	24,0	0,098	0,429	2,64	2,5	710	–	24,1
400/51	394,0	27,5	0,075	0,420	2,70	1,7	825	–	25,0
500/64	490,0	30,6	0,060	0,413	2,74	1,5	945	–	26,0

Данные сталеалюминиевых проводов воздушных линий 330 – 500 кВ

Марка провода	Для одного провода			Количество проводов в фазе	330 кВ				500 кВ			
	Сечение алюминия, мм^2	Диаметр, мм	Длительно допустимый ток, А		r_0, Ом/км	x_0, Ом/км	$b_0 \times 10^{-6}$, См/км	$\Delta P_к$ кВт/км	r_0, Ом/км	x_0, Ом/км	$b_0 \times 10^{-6}$, См/км	ΔP_0 кВт/км
2×240/32	244,0	21,6	605	2	0,060	0,331	3,38	4,3				
2×300/39	288,3	22,1	710	2	0,048	0,328	3,41	3,4				
2×400/51	394,0	27,5	825	2	0,375	0,323	3,46	2,6				
3×300/66	288,5	24,5	680	3					0,034	0,310	3,97	7,9
3×400/51	394,0	27,5	825	3					0,025	0,306	3,62	6,2
3×500/64	490,0	30,6	945	3					0,020	0,304	3,64	4,9

Данные алюминиевых проводов

Номинальное сечение, мм^2	Сечение, мм^2	Диаметр провода, мм	r_0, Ом/км	x_0, Ом/км при напряжении, кВ			Длительно допустимый ток, А
				0,38	6	10	
25	24,7	6,4	1,15	0,319	0,389	0,402	135
35	34,5	7,5	0,835	0,308	0,380	0,391	170
50	49,5	9,0	0,578	0,297	0,369	0,380	215
70	69,3	10,7	0,413	0,283	0,355	0,366	265
95	92,4	12,3	0,311	0,274	0,346	0,347	325
120	117,0	14,0	0,246	–	0,338	0,349	375

Данные двухобмоточных трансформаторов

Тип трансформатора	Номинальная мощность, МВ·А	Каталожные данные						Расчетные данные			$К_0$, тыс.руб
		$U_{ном}$ обмоток, кВ		$U_к$,%	$\Delta P_к$, кВт	$\Delta P_х$, кВт	$I_х$, %	$R_т$, Ом	$X_т$, Ом	$\Delta Q_х$, квар	
		ВН	НН								
ТМН-2500/35	2,5	35	6,3; 11	6,5	23,5	5,1	1,1	4,6	31,9	27,5	21,2
ТМН-4000/35	4,0	35	6,3; 11	7,5	33,5	6,7	1,0	2,6	23,0	40,0	25,7
ТДН-10000/35	10,0	36,75	6,3;10,5	8,0	60,0	12,5	0,6	0,81	10,8	60,0	41,8
ТМН-6300/110	6,3	115	6,6; 11	10,5	44,0	11,5	0,8	14,7	220,4	50,4	49,0
ТДН-10000/110	10,0	115	6,6; 11	10,5	60,0	14,0	0,7	7,95	139,0	70,0	54,0
ТДН-16000/110	16,0	115	6,6; 11	10,5	85,0	19,0	0,7	4,38	86,7	122,0	63,0
ТРДН-25000/110	25,0	115	6,3;10,5	10,5	120,0	27,0	0,7	2,54	55,9	175,0	84,0
ТРДН-40000/110	40,0	115	6,3;10,5	10,5	172,0	36,0	0,65	1,4	34,7	260,0	109,0
ТРДЦН-63000/110	63,0	115	6,3;10,5	10,5	260,0	59,0	0,6	0,87	22,0	410,0	136,0
ТРДН-40000/220	40,0	230	6,6; 11	12,0	170,0	50,0	0,9	5,6	158,7	360,0	169,0

Данные трехобмоточных трансформаторов (автотрансформаторов)

Тип трансформатора	Номинальная мощность, МВ·А	Каталожные данные									ΔQ_x, квар
		$U_{ном}$ обмоток, кВ			$U_К$, %			$\Delta P_к$, кВт	$\Delta P_х$, кВт	$I_х$, %	
		ВН	СН	НН	В-С	В-Н	С-Н				
ТМТН-6300/110	6,3	115	38,5	6,6; 11	10,5	17	6	58	14	1,2	75,6
ТДТН-10000/110	10	115	38,5	6,6; 11	10,5	17	6	76	17	1,1	110
ТДТН-16000/110	16	115	38,5	6,6; 11	10,5	17	6	100	23	1,0	160
ТДТН-25000/110	25	115	38,5	6,6; 11	10,5	17,5	6,5	140	31	0,7	175
ТДТН-40000/110	40	115	38,5	6,6; 11	10,5	17	6	200	43	0,6	240
ТДТН-25000/220	25	230	38,5	6,6; 11	12,5	20	6,5	135	50	1,2	300
ТДТН-40000/220	40	230	38,5	6,6; 11	12,5	22	9,5	220	55	1,1	440
АТДЦТН-125000/220/110	125	230	121	6,6; 11; 38,5	11	45	28	305	65	0,5	625