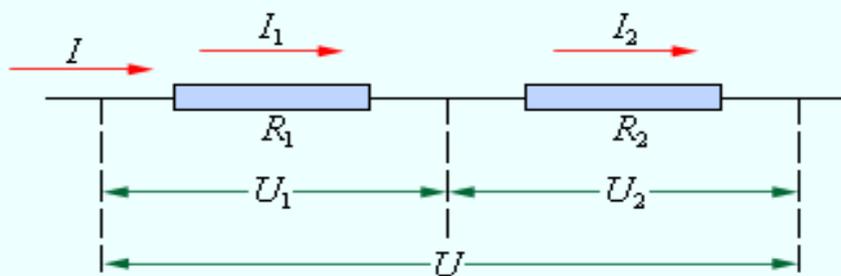


Н.В.Савина

Электрические сети в примерах и расчетах



ББК 31.2
С13

Н.В. Савина, Ю.В. Мясоедов, Л.Н. Дудченко. Электрические сети в примерах и расчетах: Учебное пособие. Благовещенск, Издательство АмГУ, 1999. 238 с.,ил.

В пособии изложены основные теоретические положения, методика и примеры решения задач по расчету режимов электрических сетей различных конфигураций и нескольких номинальных напряжений; по основам регулирования напряжения путем выбора ответвлений РПН трансформаторов и линейных регуляторов. Приведены задачи для самостоятельного решения.

Пособие предназначено для студентов электроэнергетических специальностей вузов. Может быть полезно инженерам, занятым в области проектирования и эксплуатации электрических сетей.

Рецензенты: докт. техн. наук, проф. Г.Е. Кувшинов,
канд. техн. наук, проф. А.Е. Серов

ПРЕДИСЛОВИЕ

Дисциплина “Передача и распределение электрической энергии” является базовой при подготовке инженеров по электроэнергетическим специальностям. Однако в учебниках и учебных пособиях по этой дисциплине, как правило, не удается дать достаточного количества примеров, охватывающих основные разделы курса. Между тем в подготовке студентов важную роль играют именно практические занятия, позволяющие глубже осмыслить и закрепить материал лекций, а также получить навыки инженерных расчетов на примерах решения конкретных электроэнергетических задач. Учитывая это, в данном учебном пособии, в отличие от других такого рода, приведены алгоритмы и показано подробное решение задач расчета режимов сетей сложных конфигураций, характерных для распределительных сетей энергосистем.

В пособии приводится около 140 примеров для самостоятельного разбора. Расчеты установившихся режимов электрических сетей трудоемки, поэтому целесообразно использовать пакет программ “MathCad 7.0” фирмы MathSoft. Данная система автоматизации математических расчетов выбрана потому, что позволяет дать необходимые пояснения в процессе решения, существенно сокращая длительность расчета.

По каждой рассмотренной в пособии теме показано решение нескольких характерных задач, что дает возможность преподавателям, ведущим занятия, варьировать изучаемый материал в зависимости от особенностей подготовки инженеров по различным электроэнергетическим специальностям, а также от учебного плана. Ограниченность времени, отводимого на практические занятия, не позволяет рассмотреть в процессе аудиторных занятий все характерные конфигурации электрических сетей. Часть решенных задач, приведенных в пособии, рекомендуется студентам для самостоятельного изучения.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
1. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ЛИНИЙ, ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ	5
1.1. Воздушные и кабельные линии электропередачи	5
1.2. Трансформаторы и автотрансформаторы	23
2. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ РАЗОМКНУТЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ	49
2.1. Приведенная и расчетная мощности нагрузок	49
2.2. Расчет разомкнутой сети	71
2.2.1. Понятия падения и потери напряжения. Векторные диаграммы	71
2.2.2. Расчет режима при известных нагрузках и напряжении в конце разомкнутой сети	74
2.2.3. Расчет режима разомкнутой сети при известных нагрузках и напряжении источника питания	77
3. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ПРОСТЫХ ЗАМКНУТЫХ СЕТЕЙ	108
3.1. Кольцевые сети	108
3.2. Особенности расчета режимов замкнутых сетей при двух точках потококораздела.....	112
3.3. Сети с двумя источниками питания	142
3.4. Порядок расчета различных комбинаций замкнутых и разветвленных разомкнутых сетей	143
4. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ СЕТЕЙ С РАЗНЫМИ НОМИНАЛЬНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ. РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ С ПОМОЩЬЮ ТРАНСФОРМАТОРОВ С РПН И ЛИНЕЙНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ	183
4.1. Определение напряжения на стороне низшего напряжения подстанций.....	183

1. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ЛИНИЙ, ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

1.1. Воздушные и кабельные линии электропередачи

Линии электропередачи обладают распределенными по длине погонными (на единицу длины) параметрами. Для линий сравнительно небольшой длины (до 400 км) распределенность параметров можно не учитывать и использовать сосредоточенные параметры: активное и индуктивное сопротивления линии r_l и x_l , активную и емкостную проводимость линии g_l и b_l .

Целью расчета параметров схемы замещения линий электропередачи (ЛЭП) является определение продольных активного и индуктивного сопротивлений, а также поперечных активной и емкостной проводимостей на землю для каждой из трех фаз ЛЭП.

Применяемые конструктивные исполнения ЛЭП таковы, что можно полагать параметры схем замещения каждой фазы электропередачи одинаковыми, что позволяет выполнять графическое изображение схемы замещения только для одной фазы ЛЭП.

Для воздушных ЛЭП напряжением 110 кВ и выше длиной до 400 км используется П-образная схема замещения (рис. 1).

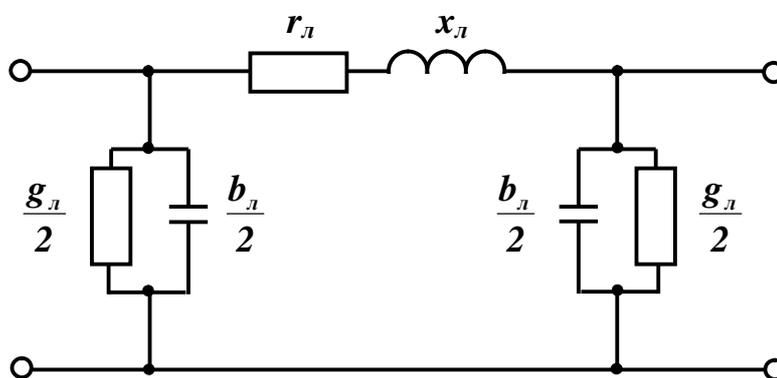


Рис. 1. П-образная схема замещения воздушной ЛЭП

Активное сопротивление линии определяется по формуле:

$$r_l = r_0 \cdot l, \text{ Ом}, \quad (1)$$

где r_l - погонное сопротивление, Ом/км, при температуре провода $+20^0$ С;

l - длина линии, км.

Активное сопротивление единицы длины провода (жилы кабеля) определяется материалом токоведущих проводников и площадью их сечения и при частоте переменного тока 50 Гц принимается равным омическому (явление поверхностного эффекта начинает сказываться при сечениях более 500 мм^2):

$$r_0 = \frac{r}{F}, \quad \text{Ом / км} \quad (2)$$

или

$$r_0 = \frac{1000}{g \times F}, \quad \text{Ом / км}, \quad (3)$$

где F - поперечное сечение провода или жилы кабеля, мм^2 ;

r - удельное сопротивление $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{км}$;

g - удельная проводимость, $\text{м} / \text{Ом} \cdot \text{мм}^2$.

Для алюминия $r = 28,9 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{км}$, $g = 34,6 \text{ м} / \text{Ом} \cdot \text{мм}^2$;

для меди $r = 18,8 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{км}$, $g = 53,0 \text{ м} / \text{Ом} \cdot \text{мм}^2$;

для сталеалюминиевых проводов $r = 31,5 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{км}$; $g = 31,7 \text{ м} / \text{Ом} \cdot \text{мм}^2$.

При температуре, отличной от 20^0 С, сопротивление линии уточняется по выражению:

$$r_{0,t} = r_0 \times [1 + a_T(t - 20)], \text{ Ом}, \quad (4)$$

где a_T - температурный коэффициент, $1/^\circ\text{C}$, равный **0,004** для сталеалюминиевых проводов;

$a_T = 0,0043 \text{ } 1/^\circ\text{C}$ для медных проводов;

t - температура провода, $^\circ\text{C}$.

Активное сопротивление стальных проводов зависит от тока и находится по таблицам, в зависимости от поперечного сечения.

Индуктивное сопротивление фазы линии определяется следующим образом:

$$x_l = x_0 \times l, \text{ Ом}, \quad (5)$$

где x_0 - погонное индуктивное сопротивление, Ом / км.

Погонные индуктивные сопротивления фаз воздушной линии электропередачи в общем случае различны. Они зависят от взаимного расположения проводников и их геометрических размеров.

Переменный ток, проходя по линии, образует вокруг проводников переменное магнитное поле, которое наводит в проводнике ЭДС. Сопротивление току, вызываемое противодействием ЭДС самоиндукции, называется индуктивным сопротивлением.

В проводе одной из фаз трехфазной линии токи соседних проводов наводят ЭДС взаимной индукции, которая приводит к уменьшению индуктивного сопротивления. Поэтому чем дальше друг от друга расположены фазные провода, тем меньше будет влияние соседних проводов и, следовательно, больше поток рассеяния между проводами и индуктивное сопротивление.

При расчетах симметричных режимов погонное индуктивное сопротивление определяется зависимостью:

$$x_0 = 0,1445 \times \lg \frac{\mu D_{cp}}{R} + 0,0157 m, \text{ Ом / км}, \quad (6)$$

где D_{cp} - среднегеометрическое расстояние между фазными проводами, мм;

R - радиус провода, мм;

μ - относительная магнитная проницаемость материала провода.

Для алюминиевых, сталеалюминиевых и медных проводов принимается $\mu = 1$.

Значения индуктивных сопротивлений единицы длины проводов различного сечения варьируются в зависимости от среднегеометрического расстояния между фазами.

Среднегеометрическое расстояние между фазами определяется зависимостью:

$$D_{cp} = \sqrt[3]{D_{AB} \times D_{BC} \times D_{CA}}, \text{ м}, \quad (7)$$

где D_{AB} ; D_{BC} ; D_{CA} - расстояние между проводами соответствующих фаз, м.

Например, при расположении фаз по вершинам равностороннего треугольника со стороной D среднегеометрическое расстояние равно D , а при горизонтальном расположении проводов $D_{cp} = \sqrt[3]{2D}$ (см. рис. 2).

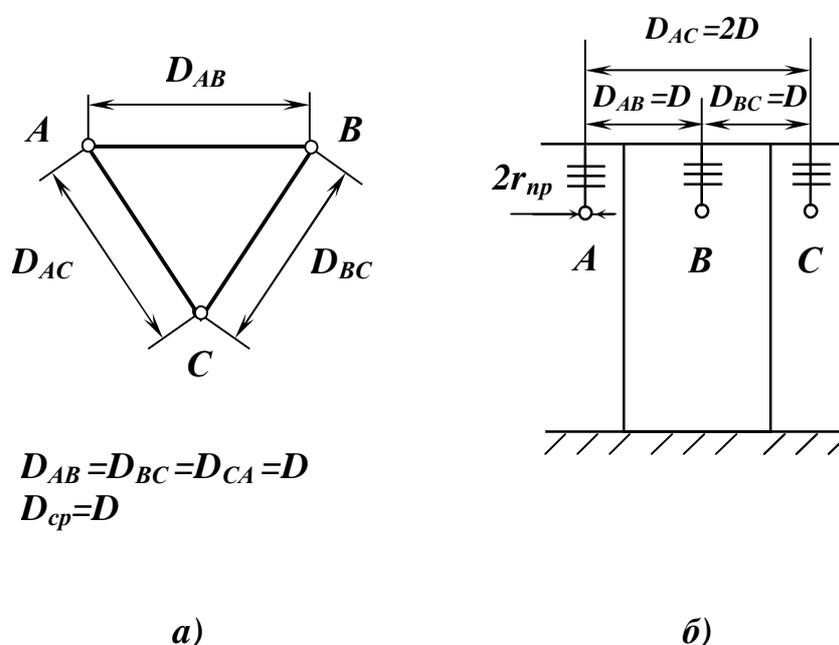


Рис. 2. Расположение проводов линии электропередачи:

- а) по вершинам равностороннего треугольника;
- б) при горизонтальном расположении фаз.

Расстояния между фазами определяются изоляционными промежутками в зависимости от класса напряжения (см. табл. 1).

Усредненные среднегеометрические расстояния между фазными проводами воздушных линий

Класс напряжения, кВ	35	110	150	220	330	500	750
Среднегеометрическое расстояние, м	3,5	5	6,5	8	11	14	19,5

При несимметричном расположении проводов ЭДС самоиндукции и взаимной индукции проводов отдельных фаз неодинаковы, что приводит к различию их сопротивлений. Для выравнивания сопротивлений отдельных фаз применяется способ взаимной перестановки мест проводов на опоре. Такая перестановка называется транспозицией.

Для уменьшения индуктивного сопротивления проводов, а также исключения явления “короны” при нормальных климатических условиях в линиях электропередачи напряжением выше 220 кВ применяют расщепление провода. Каждая фаза линии при этом содержит два и более провода, связанных дистанционными распорками длиной 30 - 60 см.

В формулу (6) в этом случае вводится не радиус провода R , а эквивалентный радиус провода, $R_{эк}$. При количестве проводов в расщеплении n он определяется по формуле:

$$R_{эк} = \sqrt[n]{R \times a^{n-1}}, \quad (8)$$

где n - число проводов в фазе;

a - расстояние между осями проводов в расщепленной фазе, мм.

Например, при расщеплении провода на 4:

$$R_{эк} = \sqrt[4]{R \times a^3}. \quad (9)$$

Погонное индуктивное сопротивление, Ом/км, при расщеплении провода в фазе определяется по формуле:

$$x_0 = 0,1445 \lg \frac{D_{cp}}{R_{эк}} + \frac{0,0157}{n}. \quad (10)$$

Для стальных проводов погонное индуктивное сопротивление, Ом/км, определяется в условиях, когда μ (см. выражение (6)) не равно единице. Первая составляющая, которую называют внешним индуктивным сопротивлением $x_0 \zeta$ равна

$$x_0 \zeta = 0,1445 \times l g \zeta \frac{\mu D_{cp} \ddot{o}}{R \frac{\ddot{o}}{\theta}}. \quad (11)$$

Вторая составляющая, называемая внутренним сопротивлением, зависит от тока, протекающего по проводу, и равна

$$x_0 \alpha = 0,0157 \times m. \quad (12)$$

Индуктивное сопротивление стальных проводов:

$$x_0 = x_0 \zeta + x_0 \alpha \quad (13)$$

Для кабельных линий погонное индуктивное сопротивление x_0 определяют из таблиц физико-химических данных.

В приближенных расчетах можно пользоваться средними значениями погонных индуктивностей, которые равны:

- для воздушных ЛЭП напряжением до 330 кВ $x_{0cp} = 0,4 \text{ Ом / км}$;
- напряжением до 1150 кВ $x_{0cp} = 0,3 \text{ Ом / км}$;
- для кабельных ЛЭП с бумажной изоляцией $x_{0cp} = 0,08 \text{ Ом / км}$.

Активная проводимость линии электропередачи g_0 определяется потерями активной мощности на “корону” и в незначительной степени активной проводимостью изоляции. Для кабелей активная проводимость определяется только потерями в диэлектрике изоляции от тока утечки через диэлектрик, т.к. “корона” отсутствует.

Коронирование проводов возникает при интенсивной ионизации окружающего провод воздуха. Особенно интенсивно коронируют провода в сырую погоду. “Корона” (фиолетовое свечение на поверхности провода и потрескивание электрических разрядов) возникает, когда на поверхности провода напряженность электрического поля (его градиент) превышает электрическую прочность воздуха, т.е.:

$$E_{нов} \approx E_{кор},$$

где $E_{кор} = 30 \dots 32 \text{ кВ/см}$.

Наиболее радикальным средством снижения потерь мощности на “корону” является увеличение диаметра (сечения) провода, т.к.:

$$E_{нов} = \frac{U}{F}. \quad (14)$$

Расчет погонной активной проводимости для воздушных линий производится по формуле:

$$g_0 = \frac{\alpha DP_0}{U_\phi^2} \times 10^{-3}, \text{ См/км}, \quad (15)$$

где DP_0 - потери активной мощности на “корону” на 1 км, кВт;

U_ϕ - напряжение фазы, кВ.

Потери на “корону” имеют место в том случае, когда рабочее напряжение линии превышает максимальное напряжение, при котором зажигается “корона”. Его называют критическим напряжением “короны” $U_{кф}$.

Для проводов, расположенных по вершинам треугольника:

$$U_{кф} = 48,9 \times m_0 \times m_n \times d \times R \times \lg \frac{\alpha D_{cp}}{R}, \text{ кВ}, \quad (16)$$

где m_0 - коэффициент, учитывающий состояние поверхности провода (для однопроволочных проводов $m_0 = 0,93 \dots 0,97$, для многопроволочных $m_0 = 0,83 \dots 0,87$);

m_n - коэффициент, учитывающий состояние погоды (при сухой погоде $m_n = 1$, при дожде, тумане или гололеде $m_n = 0,8$);

R - радиус провода или эквивалентный радиус провода (при расщеплении фазы), см;

d - коэффициент, учитывающий уровень барометрического давления и температуру окружающей среды.

Коэффициент d определяется выражением:

$$d = \frac{3,92 \times b}{273 + t}, \quad (17)$$

где b - атмосферное давление в см рт. ст.;

t - температура окружающей среды, °С.

При $b = 76 \text{ см рт. ст.}$ и $t = 25^\circ \text{ С}$ коэффициент d равен 1.

Для проводов, расположенных горизонтально:

$$U_{\text{кф}} = 0,96U_{\text{кф}} - \text{для среднего провода};$$

$$U_{\text{кф}} = 1,06U_{\text{кф}} - \text{для крайнего провода.}$$

Потери мощности на “корону” определяются из выражения:

$$DP_0 = \frac{0,18}{d} \times \sqrt{\frac{R}{D_{\text{ср}}}} \times (U_{\text{ф}} - U_{\text{кф}})^2, \text{ кВт/км.} \quad (18)$$

Для исключения условий возникновения “короны” определены минимальные сечения и диаметры проводов для различных номинальных напряжений (см. табл. 2).

Таблица 2

Минимальные сечения и диаметры сталеалюминиевых проводов по условиям “короны”

Номинальное напряжение, кВ	Количество проводов в фазе	Диаметр провода, мм	Сечение провода, мм ²
110	1	11,3	70
150	1	15,2	120
220	1	21,6	240
330	2	23,5*	300
500	3	25,2*	300
750	4	29*	400

* При расстоянии между проводами в фазе 400 - 600 мм.

Активная проводимость кабельной линии рассчитывается по формуле:

$$g_0 = \frac{\pi DP'_0}{\epsilon U_\phi^2} \times 10^{-3}, \text{ См/км}, \quad (19)$$

где $DR_0\zeta$ - потери активной мощности в изоляции, отнесенные к одной фазе и определяемые зависимостью

$$DR_0\zeta = U_\phi^2 \times w \times C_0 \times \text{tg}d, \quad (20)$$

здесь C_0 - удельная рабочая емкость кабеля, Ф/км;

$\text{tg}d$ - тангенс угла диэлектрических потерь в изоляции при фазном напряжении.

Активная проводимость линии равна:

$$g_l = g_0 \times l. \quad (21)$$

Погонная емкостная проводимость b_0 , См/км, как воздушных линий, так и кабельных, обусловлена наличием емкостей между проводом и землей, а также между фазными проводами. Она рассчитывается по формуле:

$$b_0 = \frac{\pi}{\epsilon} \frac{7,58}{\lg \frac{D_{cp}}{R}} \times 10^{-6}. \quad (22)$$

Благодаря наличию емкостей линия становится источником реактивной мощности. Реактивная мощность, генерируемая линией (зарядная мощность), определяется зависимостью:

$$Q_c = \frac{1}{2} \times U^2 b_0 \times l, \text{ квар}, \quad (23)$$

где l - длина линии.

Комплекс полного сопротивления единицы длины линии содержит действительную часть в виде погонного активного сопротивления и мнимую - в виде погонного индуктивного сопротивления

$$\underline{z}_0 = r_0 + jx_0, \quad (24)$$

следовательно модуль полного сопротивления определяется как:

$$z_0 = \sqrt{r_0^2 + x_0^2}. \quad (25)$$

Комплекс полной поперечной проводимости единицы длины линии записывается следующим образом:

$$\underline{y}_0 = g_0 - jb_0, \quad (26)$$

а ее модуль

$$y_0 = \sqrt{g_0^2 + b_0^2}. \quad (27)$$

Для определения каждого сопротивления и проводимости в схеме замещения линии необходимо значение величин сопротивлений, отнесенных к единице длины линии, умножить на длину линии l , км.

При расчете установившихся режимов сетей до 220 кВ включительно активная проводимость практически не учитывается (см. рис. 3а). Для большинства расчетов в сетях 110 - 220 кВ линия электропередачи обычно представляется более простой схемой замещения, в которой активная проводимость не учитывается, а вместо емкостной проводимости учитывается реактивная мощность, генерируемая емкостью линий (см. рис. 3б).

В сетях с $U_{ном} \approx 330 \text{ кВ}$ при определении потерь мощности и при расчете оптимальных режимов необходимо учитывать потери на “корону”, т.е. ее активную проводимость.

Для воздушных линий $U_{ном} \leq 35 \text{ кВ}$ в схеме замещения присутствуют только активные и индуктивные сопротивления (см. рис. 3в).

Для двухцепных ЛЭП схема замещения такая же, как и для одноцепных, но сопротивления линии вдвое меньше, а проводимости вдвое больше.

Кабельные линии электропередачи представляют такой же П-образной схемой замещения, как и воздушные линии (рис. 1).

При расчетах режимов для кабельных сетей с $U_{ном} \leq 10 \text{ кВ}$ можно учитывать только активное сопротивление (см. рис. 3г). В схемах замещения кабельных линий высокого напряжения необходимо учитывать Q_c , и при напряжении $\geq 220 \text{ кВ}$ - активную проводимость g_l .

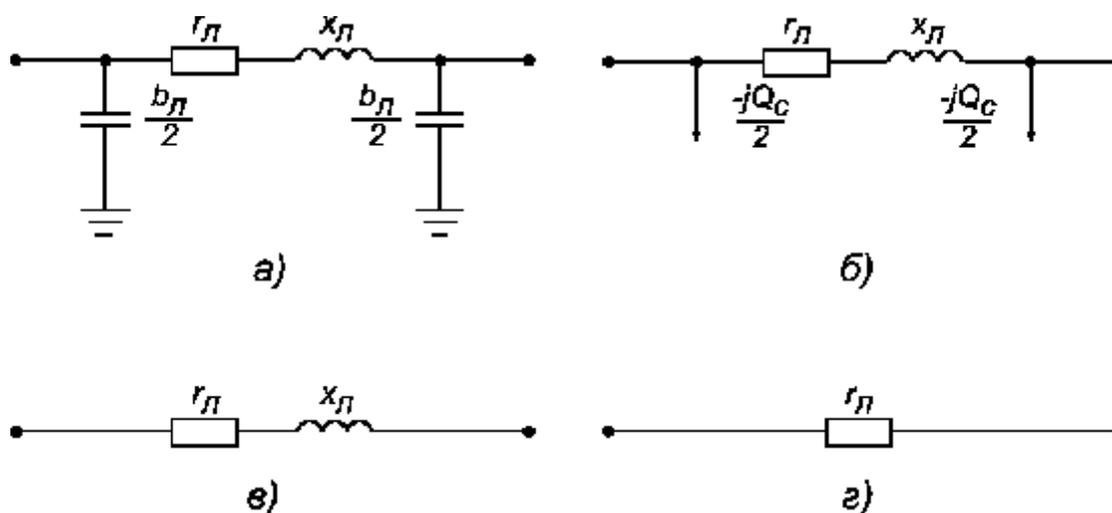


Рис. 3. Схемы замещения линий электропередачи:

- а), б) воздушная линия 110-220 кВ с емкостной проводимостью и с реактивной мощностью, генерируемой емкостью линии;***
- в) воздушная или кабельная линия напряжением $\leq 35 \text{ кВ}$;***
- г) кабельная линия напряжением $\leq 10 \text{ кВ}$.***

Примеры решения задач

Пример 1.1.

Линия электропередачи 110 кВ выполнена проводом АС-70/11 и имеет длину 40 км. Провода расположены в горизонтальной плоскости, расстояние между ними 4 м. В линии осуществлена транспозиция проводов. Определить параметры схемы замещения и реактивную мощность, генерируемую линией.

Решение.

Задача может быть решена двумя путями:

- а) решение с использованием справочных данных;
- б) аналитическое решение на основе расчетных формул.

Первый метод. Используя таблицы /4/, определяем активное сопротивление 1 км линии $r_0 = 0,428 \text{ Ом/км}$, индуктивное сопротивление $x_0 = 0,444 \text{ Ом/км}$ и емкостную проводимость $b_0 = 2,55 \times 10^{-6} \text{ См/км}$.

Активное сопротивление в схеме замещения определяется так:

$$r = r_0 \times l = 0,428 \times 40 = 17,12 \text{ Ом};$$

индуктивное: $x = x_0 \times l = 0,444 \times 40 = 17,76 \text{ Ом};$

емкостная проводимость:

$$B = b_0 \times l = 2,55 \times 10^{-6} \times 40 = 1,02 \times 10^{-4} \text{ См}.$$

Т. к. сечение провода 70 мм^2 , т.е. равно минимальному по условию исключения “короны”, то активная проводимость в схеме замещения не учитывается.

Второй метод. Сечение алюминиевой части провода АС-70/11 равно 68 мм^2 согласно /4/. Активное сопротивление единицы длины линии (2):

$$r_0 = r / F = 28,9 / 68 = 0,425 \text{ Ом/км}.$$

Активное сопротивление линии: $r = r_0 \times l = 0,425 \times 40 = 17 \text{ Ом}.$

Для расчета погонного индуктивного сопротивления определим среднегеометрическое расстояние между фазами:

$$D_{cp} = \sqrt[3]{D_{AB} \times D_{BC} \times D_{CA}} = \sqrt[3]{4 \times 4 \times 8 \times 10^6} = 504 \text{ см}$$

и по справочным данным /4/ найдем радиус провода $R = 5,7 \text{ см}$.

Тогда погонное индуктивное сопротивление (6):

$$x_0 = 0,1445 \lg \frac{D_{cp}}{R} + 0,0157 \text{ м} = 0,1445 \times \lg \frac{504}{0,57} + 0,0157 = 0,44 \text{ Ом / км}.$$

Индуктивное сопротивление линии: $x = x_0 \times l = 0,44 \times 40 = 17,6 \text{ Ом}$.

Емкостная проводимость (22): $b_0 = \frac{7,58}{\lg \frac{504}{0,57}} \times 10^{-6} = 2,57 \times 10^{-6} \text{ См / км}.$

$$\frac{B}{2} = \frac{b_0 l}{2} = \frac{2,57 \times 10^{-6} \times 40}{2} = 0,51 \times 10^{-4} \text{ См}.$$

Активная проводимость вводится в схему замещения, если есть потери на “корону”. Потери на “корону” имеют место в том случае, когда критическое напряжение “короны” превышает рабочее напряжение линии. При сухой погоде $m_n=1$, $d=1$, при плохой погоде $d=0,9$, $m_n=0,8$. Согласно формуле (16) критическое напряжение “короны” определяется так:

$$U_{кф} = 48,9 m_0 m_n d R \lg \frac{D_{cp}}{R} = 48,9 \times 0,85 \times 1 \times 1 \times 0,57 \times \lg \frac{5,04}{0,0057} = 69,8 \text{ кВ}$$

и для среднего провода равно $U_{кф}^c = 0,96 U_{кф} = 67 \text{ кВ}$.

Фазное напряжение линии равно $U_\phi = \frac{110}{\sqrt{3}} = 63,5 \text{ кВ}$.

Т.к. фазное напряжение линии меньше критического, то на всем протяжении линии "короны" не будет. Можно и по табл. 2. без расчета определить, что для провода марки АС - 70 /11 учитывать потери на “корону” при напряжении 110 кВ не нужно.

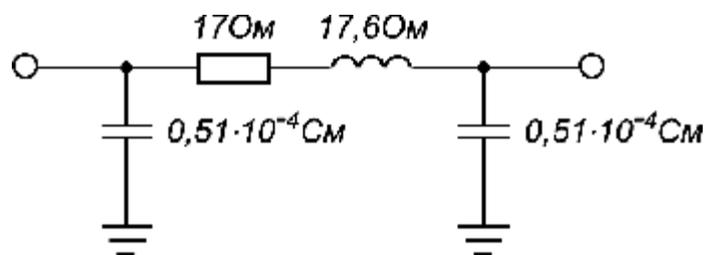


Рис. 4. Схема замещения линии

Пример 1.2.

Электроэнергия при напряжении 6 кВ передается от подстанции завода в цех по кабелю с алюминиевыми жилами сечением $F = 10 \text{ мм}^2$ длиной $l = 6 \text{ км}$. Определить, в каком соотношении находятся индуктивные и активные сопротивления, зарядная и полная мощность линии, если допустимый по нагреву ток кабеля равен $I_{\text{доп}} = 80 \text{ А}$.

Решение

Активное сопротивление кабельной линии по выражению (2):

$$R = \frac{r}{F} l = \frac{28,9}{10} \times 6 = 17,2 \text{ Ом.}$$

Погонное индуктивное сопротивление трехжильного кабеля с бумажной изоляцией сечением 10 мм^2 равно $x_0 = 0,11 \text{ Ом/км}$ [4]. Тогда индуктивное сопротивление линии согласно справочным данным:

$$X = x_0 \times l = 0,11 \times 6 = 0,66 \text{ Ом.}$$

Соотношение индуктивного и активного сопротивлений равно:

$$\frac{X}{R} = \frac{0,66}{17,2} \times 100\% = 3,85\%.$$

Зарядная мощность кабельных линий при погонной емкостной проводимости, равной согласно [4] $g_0 = 0,6 \times 10^{-4} \text{ См/км}$, составляет:

$$Q_c = U^2 \times g_0 \times l = 6^2 \times 0,6 \times 10^{-4} \times 6 = 13 \text{ квар.}$$

Предельная мощность, которая может быть передана по этой линии, равна: $S_{\text{пред}} = \sqrt{3} \times U_{\text{ном}} \times I_{\text{доп}} = \sqrt{3} \times 6 \times 80 = 831 \text{ кВА}$.

Соотношение зарядной и полной мощности равно:

$$\frac{Q_c}{S_{\text{пред}}} = \frac{13}{831} \times 100\% = 1,56\%.$$

Поскольку точность инженерных расчетов лежит в пределах 5 %, то, как видно из расчетов, индуктивное сопротивление и емкостную проводимость в кабельных линиях напряжением 6 - 10 кВ можно не учитывать.

Задачи для самостоятельного решения

№1

Линия 110 кВ выполнена проводом АС-70 /11. Расположение проводов на опоре горизонтальное. Расстояние между фазами 4 м. Длина линии 70 км. Определить, во сколько раз изменятся параметры схемы замещения линии при замене провода марки АС-70 /11 на АС-150 /24.

№2

ЛЭП выполнена проводом марки АСК-95 /16. Полное ее сопротивление равно 14 Ом. Среднегеометрическое расстояние между проводами фаз составляет 4,5 м. Определить длину линии. Параметры схемы замещения найти по справочным данным и рассчитать аналитически. Напряжение линии 110 кВ.

№3

Линия 110 кВ протяженностью 90 км выполнена проводом АС-95/16. Расстояние между фазами 4 м. Изменятся ли параметры схемы замещения, если горизонтальную подвеску проводов на опоре заменить на подвеску по вершинам равностороннего треугольника? Рассчитать параметры схемы замещения аналитически и сравнить со справочными данными.

№4

Одноцепная ЛЭП - 110 кВ протяженностью 60 км выполнена на металлических двухцепных опорах проводом марки АС-150 /24. Компоновка проводов на опоре - по вершинам равностороннего треугольника. Как изменятся параметры схемы замещения ЛЭП - 110 кВ, если будет подведена вторая цепь, аналогичная первой? Рассчитать параметры схемы замещения в обоих случаях. Расстояние между фазами - 5 м.

№5

Как изменится схема замещения линии и ее параметры, если первоначально была ЛЭП - 110 кВ, выполненная на металлических опорах с горизонтальной подвеской проводов, длиной 115 км, а затем ее изменили на ЛЭП -220 кВ с аналогичной подвеской проводов? Марка провода в обоих случаях - АСКП-240 /39. Расстояние между фазами при напряжении 110 кВ - 4 м, напряжении 220 кВ - 7 м.

№6

ЛЭП - 330 кВ выполнена проводом марки АС-400 /64 и имеет протяженность 180 км. Изменяются ли параметры схемы ее замещения, если каждую фазу выполнить двумя проводами марки АС-240 /39? Расстояние между проводами при расщеплении - 400 мм. Расстояние между фазами - 8 м.

№7

ЛЭП - 330 кВ выполнена проводами марки АСК-300 /48 с расщеплением фазы на два провода. Расстояние между проводами в расщеплении 400 мм, а длина линии - 340 км. Определить параметры схемы замещения. Расстояние между фазами - 8 м.

№8

ЛЭП - 500 кВ выполнена проводом марки АСК-400 /64 с расщеплением проводов в фазе на три. Расстояние между проводами в расщеплении - 600 мм. Длина линии 400 км. Составить схему замещения таким образом, чтобы можно было определить параметры режима ее работы в начале, конце и середине линии. Определить параметры схемы замещения с учетом “короны”. Подвеска проводов - горизонтальная. Расстояние между фазами-11 м.

№9

Как изменится схема замещения линии и параметры участка линии, если ЛЭП - 35 кВ заменить на ЛЭП - 110 кВ? Марка проводов в обоих случаях остается неизменной – АСК - 120 /19. Расстояние между фазами в ЛЭП - 35 кВ составляет 3,2 м, а у ЛЭП - 110 кВ – 4,5 м. Подвеска проводов на опоре - треугольником.

№10

Две линии 10 кВ связывают потребителя с источником. Длина линии равна 15 км. Одна из них выполнена проводом АС-50 /8, расстояние между фазами составляет 1,5 м, а расположение проводов на опоре - по вершинам равностороннего треугольника. Вторая линия выполнена кабелем с алюминиевыми жилами с бумажной изоляцией сечением 50 мм². Составить схемы замещения линий и рассчитать их параметры. Произвести анализ полученных результатов.

№11

ВЛ - 10 кВ, длина которой 10 км, выполнена проводом АС-35/6,2. Среднегеометрическое расстояние между фазами составляет 1,4 м. Как изменятся параметры схемы замещения линии, если провод марки АС-35/6,2 заменить на провод марки ПМС-35?

№12

Рассчитать параметры схемы замещения ВЛ - 10 кВ, выполненной проводом ПМС-35. Расстояние между фазами 1,5 м, провода расположены по вершинам равностороннего треугольника. Ток равен 30 А. Изменятся ли параметры схемы замещения, если ток станет равен 70 А?

№13

Промышленное предприятие получает питание от районной подстанции по воздушной и кабельной линиям 10 кВ. Длина обеих линий одинакова и составляет 10 км. ВЛ выполнена проводом АС-70 / 11 со среднегеометрическим расстоянием между проводами 1,2 м. Кабельная линия выполнена кабелем марки ААШВ-70. Определить параметры схемы замещения. Что произойдет с ними, если напряжение изменится и будет равным 35 кВ?

№14

Предприятие связано с источником электроэнергии воздушной линией 35 кВ, выполненной проводом марки АС-120/19, протяженностью 20 км. Во сколько раз изменится полное сопротивление линии, если ее заменить кабелем ОАБ с сечением жил 120 мм^2 ? Рассчитать аналитически параметры схемы замещения воздушной линии при расстоянии между фазами, равном 3,2 м.

№15

Воздушная двухцепная линия длиной 100 км питает районную электрическую сеть 220 кВ. Линия выполнена проводом марки АС - 400/51. Составить схему замещения линии и найти параметры схемы замещения. Как изменится схема замещения и ее параметры, если линию выполнить одноцепной? Расстояние между фазами - 7 м.

№16

Воздушная линия электропередачи напряжением 500 кВ длиной 220 км связывает две электростанции. Составить для нее схему замещения и определить ее параметры, если линия выполнена проводом АСК-500 /64, число проводов в фазе - три. Расстояние между проводами в расщеплении 500 мм. Расстояние между фазами - 11 м. Подвеска проводов горизонтальная.

1.2. Трансформаторы и автотрансформаторы

Силовые трансформаторы и автотрансформаторы являются основным электрическим оборудованием, обеспечивающим передачу электрической энергии от электростанций к потребителям и ее распределение.

С помощью трансформаторов и автотрансформаторов осуществляется повышение напряжения до значений 35; 110; 220; 330; 500; 750 кВ, необходимых для линий электропередачи, а также многократное ступенчатое понижение напряжения до значений, при которых работают электроприемники: 20; 10; 6; 0,66; 0,38; 0,22 кВ.

Силовые трансформаторы и автотрансформаторы, однофазные и трехфазные, выпускаются номинальной мощностью, кратной 10, 16, 25, 40, 63 кВА. Трансформаторы могут быть двух- и трехобмоточные, а также с расщепленной обмоткой низкого напряжения.

Параметры схемы замещения силовых трансформаторов и автотрансформаторов определяются на основе каталожных данных. Для двухобмоточных трансформаторов используются следующие каталожные данные:

номинальная мощность трансформатора, $S_{т ном}$;

напряжение обмотки высокого напряжения, $U_{вн}$;

напряжение обмотки низкого напряжения, $U_{инн}$;

потери активной мощности в режиме короткого замыкания, DP_K ;

напряжение короткого замыкания, u_K ;

потери активной мощности в режиме холостого хода, DP_x ;

ток холостого хода, I_x .

Номинальной называют мощность трансформатора, которой он может быть нагружен при номинальных температурных условиях охлаждающей среды.

Номинальные напряжения первичной и вторичной обмоток - это напряжения между выводами обмоток при холостом ходе трансформатора.

В режиме короткого замыкания (КЗ) одна из обмоток трансформатора замыкается накоротко, а по другой протекает ток, равный номинальному, при некотором приложенном напряжении u_k , которое и называется напряжением короткого замыкания. Оно меньше номинального и выражается в процентах от него отношением:

$$u_{k,\%} = \frac{u_k}{U_{\text{вн}}} 100\%. \quad (28)$$

Мощность, потребляемая трансформатором в режиме короткого замыкания, практически целиком расходуется на нагрев его обмоток, а потери в стали ничтожны из-за малого значения приложенного напряжения u_k , т.к. потери в стали пропорциональны квадрату приложенного напряжения. Поэтому приближенно считают, что все потери мощности в опыте КЗ DP_k идут на нагрев обмоток трансформатора, т.е.:

$$DP_k = 3I_{\text{ном}}^2 \times R_m = \frac{S_{\text{т ном}}^2}{U_{\text{вн}}^2 \times R_m}, \quad (29)$$

где R_m - активное сопротивление трансформатора.

В режиме холостого хода первичная обмотка включается на номинальное напряжение, а вторичная обмотка разомкнута. Потребляемый из сети ток называется током холостого хода. Он выражается в процентах от номинального тока первичной обмотки, $I_{\text{в ном}}$:

$$I_{x,\%} = \frac{I_x}{I_{\text{в ном}}} 100\%. \quad (30)$$

Мощность потерь в режиме холостого хода складывается из мощности потерь в магнитопроводе на вихревые токи и гистерезис, DP_x ; мощности, идущей на намагничивание стали, DQ_x ; мощности потерь в первичной обмотке, обусловленных током холостого хода. Но при холостом ходе $I_x \ll I_{\text{в ном}}$, - следовательно, мала мощность потерь в первичной обмотке по сравнению с потерями в магнитопроводе. Поэтому для трансформаторов с номинальной мощностью более 1 кВА учитываются только потери в стали:

1.2. Трансформаторы и автотрансформаторы

Силовые трансформаторы и автотрансформаторы являются основным электрическим оборудованием, обеспечивающим передачу электрической энергии от электростанций к потребителям и ее распределение.

С помощью трансформаторов и автотрансформаторов осуществляется повышение напряжения до значений 35; 110; 220; 330; 500; 750 кВ, необходимых для линий электропередачи, а также многократное ступенчатое понижение напряжения до значений, при которых работают электроприемники: 20; 10; 6; 0,66; 0,38; 0,22 кВ.

Силовые трансформаторы и автотрансформаторы, однофазные и трехфазные, выпускаются номинальной мощностью, кратной 10, 16, 25, 40, 63 кВА. Трансформаторы могут быть двух- и трехобмоточные, а также с расщепленной обмоткой низкого напряжения.

Параметры схемы замещения силовых трансформаторов и автотрансформаторов определяются на основе каталожных данных. Для двухобмоточных трансформаторов используются следующие каталожные данные:

номинальная мощность трансформатора, $S_{т ном}$;

напряжение обмотки высокого напряжения, $U_{вн}$;

напряжение обмотки низкого напряжения, $U_{нн}$;

потери активной мощности в режиме короткого замыкания, DP_K ;

напряжение короткого замыкания, u_K ;

потери активной мощности в режиме холостого хода, DP_x ;

ток холостого хода, I_x .

Номинальной называют мощность трансформатора, которой он может быть нагружен при номинальных температурных условиях охлаждающей среды.

Номинальные напряжения первичной и вторичной обмоток - это напряжения между выводами обмоток при холостом ходе трансформатора.

В режиме короткого замыкания (КЗ) одна из обмоток трансформатора замыкается накоротко, а по другой протекает ток, равный номинальному, при некотором приложенном напряжении u_k , которое и называется напряжением короткого замыкания. Оно меньше номинального и выражается в процентах от него отношением:

$$u_{k,\%} = \frac{u_k}{U_{\text{вн}}} 100\%. \quad (28)$$

Мощность, потребляемая трансформатором в режиме короткого замыкания, практически целиком расходуется на нагрев его обмоток, а потери в стали ничтожны из-за малого значения приложенного напряжения u_k , т.к. потери в стали пропорциональны квадрату приложенного напряжения. Поэтому приближенно считают, что все потери мощности в опыте КЗ DP_k идут на нагрев обмоток трансформатора, т.е.:

$$DP_k = 3I_{\text{ном}}^2 \times R_m = \frac{S_{\text{т ном}}^2}{U_{\text{вн}}^2 \times R_m}, \quad (29)$$

где R_m - активное сопротивление трансформатора.

В режиме холостого хода первичная обмотка включается на номинальное напряжение, а вторичная обмотка разомкнута. Потребляемый из сети ток называется током холостого хода. Он выражается в процентах от номинального тока первичной обмотки, $I_{\text{в ном}}$:

$$I_{x,\%} = \frac{I_x}{I_{\text{в ном}}} 100\%. \quad (30)$$

Мощность потерь в режиме холостого хода складывается из мощности потерь в магнитопроводе на вихревые токи и гистерезис, DP_x ; мощности, идущей на намагничивание стали, DQ_x ; мощности потерь в первичной обмотке, обусловленных током холостого хода. Но при холостом ходе $I_x \ll I_{\text{в ном}}$, - следовательно, мала мощность потерь в первичной обмотке по сравнению с потерями в магнитопроводе. Поэтому для трансформаторов с номинальной мощностью более 1 кВА учитываются только потери в стали:

$$\underline{DS}_x = DP_x + jDQ_x. \quad (31)$$

Состав каталожных данных для трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов имеет следующие отличия от перечисленных выше.

Для трехобмоточных трансформаторов указывают напряжения всех трех обмоток: высокого $U_{вн}$, среднего $U_{сн}$, низкого $U_{нн}$, а также соотношение мощностей обмоток в процентах от $S_{ном}$: **100/100/100 %**; **100/100/66,7 %** или **100/66,7/66,7 %**.

Если мощности обмоток неодинаковы, то даются три значения потерь мощности короткого замыкания: $DP_{к, в-н}$; $DP_{к, с-н}$; $DP_{к, в-с}$, %, каждое из которых соответствует опыту для двух обмоток (третья разомкнута), и при этом указанные значения отнесены к номинальной мощности менее мощной обмотки.

Указываются три относительных значения напряжения короткого замыкания: $u_{к, в-н}$; $u_{к, в-с}$; $u_{к, с-н}$, %, так как для трехобмоточных трансформаторов режим КЗ выполняется для всех возможных сочетаний обмоток. При этом если мощности обмоток не одинаковы, то приводимые значения отнесены к номинальному току менее мощной обмотки.

Паспортные данные трансформаторов с расщепленной обмоткой такие же, как и у двухобмоточных.

Автотрансформаторы изготавливаются на номинальное напряжение 150 ÷ 750 кВ и применяются для связи электрических сетей и их элементов, когда не требуется большой коэффициент трансформации, $K_{АТ}$. У большинства автотрансформаторов $K_{АТ} \leq 2$.

Все автотрансформаторы имеют соединение трех фаз обмоток ВН и СН в звезду и образуют общую для обоих напряжений нулевую точку, заземляемую наглухо (рис. 5). У автотрансформатора обмотки ВН (AX) и СН (aX) электрически связаны, а обмотка НН имеет с обмотками ВН и СН обычную трансформаторную связь. Часть фазной обмотки, заключенная

между выводами A и a (B и b , C и c), называется последовательной, а между выводами a и X (b и Y , c и Z) - общей. На рис. 5 показано распределение токов в одной фазе при работе автотрансформатора в понижающем режиме.

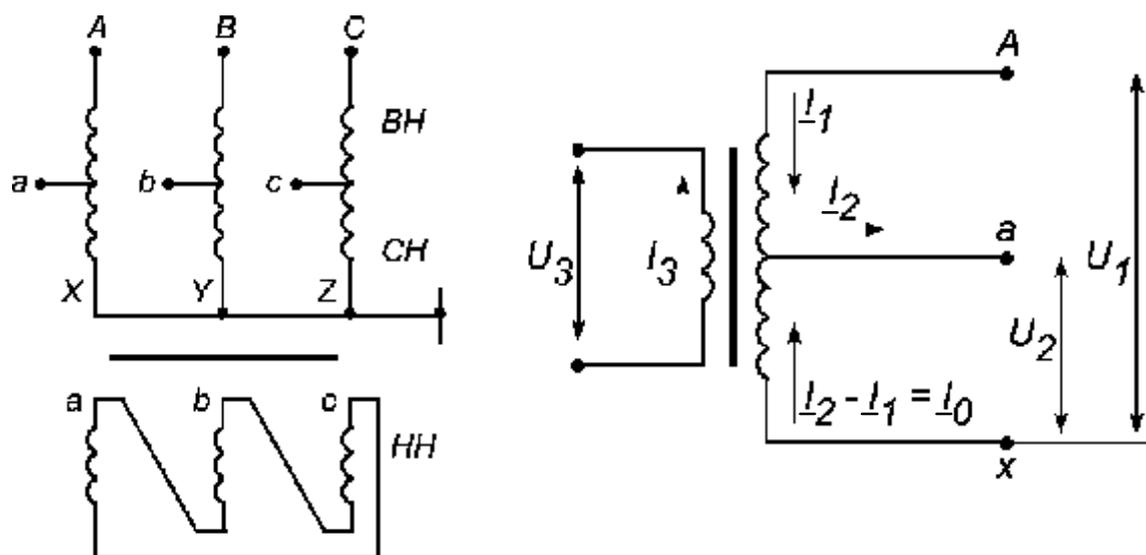


Рис. 5. Схема соединений обмоток автотрансформатора

Здесь \underline{I}_1 - ток последовательной обмотки, магнитный поток которого наводит в общей обмотке ток \underline{I}_0 , равный

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_2 - \underline{I}_1, \quad (32)$$

где \underline{I}_2 - ток вторичной цепи.

У понижающих автотрансформаторов мощность последовательной обмотки называется типовой S_m и равна мощности общей обмотки:

$$S_m = \sqrt{3} I_1 \times (U_1 - U_2) = \sqrt{3} (I_2 - I_1) \times U_2; \quad (33)$$

$$S_m = \sqrt{3} I_1 \times U_1 \frac{a}{e} \left(1 - \frac{U_2}{U_1} \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \right) = S_{AT \text{ ном}} \frac{a}{e} \left(1 - \frac{1}{K_{AT}} \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \right), \quad (34)$$

где $K_{AT} = U_1 / U_2$.

Очевидно, что $S_m < S_{AT \text{ ном}}$, поэтому выражение $(1 - 1/K_{AT})$ называют коэффициентом выгоды, a . Тогда $S_m = a \times S_{AT \text{ ном}}$.

Типовая мощность - это та часть мощности автотрансформатора, которая передается электромагнитным путем. Как известно, размеры, масса, расход активных материалов определяются главным образом электромагнитной мощностью, поэтому по сравнению с трансформаторами той же мощности у автотрансформаторов меньшие размеры, меньший расход металла, ниже стоимость, меньшие потери мощности.

В паспортных данных напряжение короткого замыкания и потери мощности в режиме КЗ для автотрансформатора даются заводами - изготовителями: между обмотками ВН и СН - $u_{к в-с}$, $DP_{к в-с}$ отнесенные к номинальной мощности, а между обмотками ВН и НН - $u_{к в-н}$, $DP_{к в-н}$, и СН-НН - $u_{к с-н}$, $DP_{к с-н}$ - отнесенные к типовой мощности.

В схемах замещения электрических сетей двухобмоточные трансформаторы и автотрансформаторы при ненагруженной обмотке низкого напряжения представляются в виде Г-образной схемы замещения, где ветвь намагничивания включена со стороны выводов обмотки высокого напряжения - в отличие от курса электрических машин, где схема замещения Т-образная. Схема замещения двухобмоточного трансформатора приведена на рис. 6.

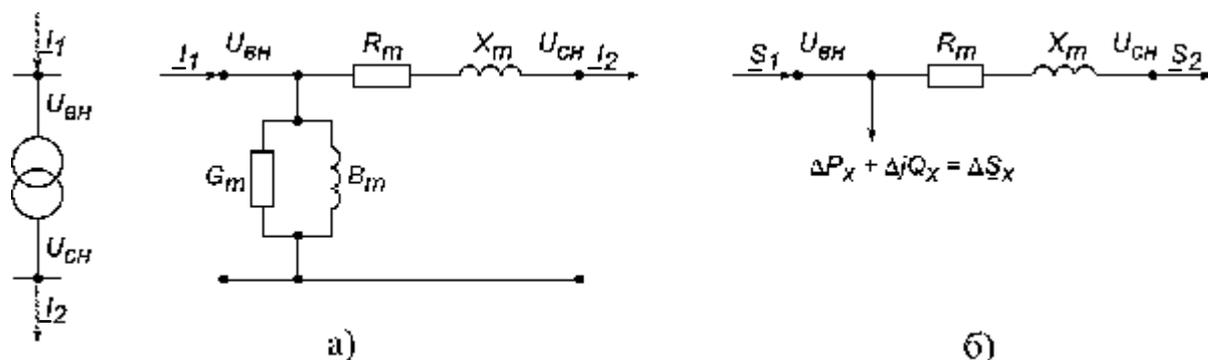


Рис. 6. Г-образная схема замещения трансформатора.

На рис. 6 поперечная ветвь проводимостей представлена:

- а) ветвью проводимостей;
- б) потерями мощности XX.

При номинальном напряжении первичной обмотки $U_{вн} \approx 330 \text{ кВ}$ используется схема, показанная на рис. 6а, а при номинальном напряжении $U_{вн} \approx 220 \text{ кВ}$ ветвь намагничивания в схеме замещения заменяется посто-

янным отбором мощности, равным суммарным потерям холостого хода (см. рис. 6б).

Активное сопротивление в схеме замещения равно сумме сопротивления первичной обмотки R_I и сопротивления вторичной обмотки R_{ζ} , приведенного к первичной, т.е.

$$R_m = R_I + R_{\zeta} \quad (35)$$

и для одной фазы определяется по выражению:

$$R_m = \frac{DP_{\kappa} \times U_{\text{вн}}^2}{S_{\text{ном}}^2}. \quad (36)$$

Индуктивное сопротивление трансформатора равно сумме индуктивного сопротивления рассеяния первичной обмотки X_I и приведенного к ней индуктивного сопротивления вторичной обмотки X_{ζ} , т.е.

$$X_m = X_I + X_{\zeta}. \quad (37)$$

Оно определяется по формуле:

$$X_m = \frac{u_{p,\%} \times U_{\text{вн}}^2}{100 \times S_{\text{ном}}}, \quad (38)$$

где $u_p = \sqrt{u_{\kappa}^2 - u_a^2}$ - индуктивная составляющая напряжения КЗ, равная падению напряжения на индуктивном сопротивлении трансформатора;

u_a - активная составляющая напряжения КЗ, равная:

$$u_{a,\%} = \frac{\sqrt{3} I_{\text{вн}} R_m}{U_{\text{вн}}} \times 100\% = \frac{DP_{\kappa}}{S_{\text{ном}}} \times 100\%, \quad (39)$$

где $I_{\text{вн}}$ - номинальный ток первичной обмотки трансформатора.

Для современных мощных трансформаторов $R_m \ll X_m$ и $u_p \gg u_{\kappa}$.

Следовательно:
$$X_m = \frac{u_{\kappa,\%} \times U_{\text{вн}}^2}{100 \times S_{\text{ном}}}. \quad (40)$$

Активная проводимость обусловлена потерями активной мощности в стали трансформатора на гистерезис и вихревые токи и определяется (для одной фазы) как

$$G_m = \frac{DP_x}{U_{вн}^2}. \quad (41)$$

Индуктивная проводимость обусловлена основным магнитным потоком и учитывает потери реактивной мощности, расходуемые на намагничивание сердечника трансформатора. Она определяется по выражению:

$$B_m = \frac{DQ_x}{U_{вн}^2}, \quad (42)$$

где DQ_x - потери реактивной мощности, определяемые реактивной составляющей вектора тока холостого хода, т.е.

$$I_{x,p} = \sqrt{I_x^2 - I_{x,a}^2}. \quad (43)$$

Но ввиду малости составляющей $I_{x,a} \ll I_x$ принимают $I_{x,p}$ равным модулю вектора тока холостого хода, т.е.

$$DQ_x = \frac{I_{x,\%}}{100} \times S_{mном}. \quad (44)$$

При параллельной работе двух или более одинаковых трансформаторов ($n_m \geq 2$) параметры схемы замещения определяются выражениями:

$$\underline{Z}_{mS} = \frac{R_m + jX_m}{n_m}, \quad (45)$$

$$\underline{Y}_{mS} = n_m (G_m + jB_m) \quad (46)$$

или

$$\underline{DS}_x = n_m (DP_x + jDQ_x). \quad (47)$$

Трехобмоточные трансформаторы в схемах замещения электрических сетей представляются трехлучевой звездой; в зависимости от номинального напряжения (как и для двухобмоточных трансформаторов) либо с ветвью намагничивания (рис. 7а), либо с заменой ее постоянным отбором мощности в режиме холостого хода (рис. 7б).

Согласно действующему стандарту соотношение между мощностями отдельных обмоток ВН / СН / НН в современных трехобмоточных трансформаторах одинаково, поэтому в паспортных данных приводятся общие потери короткого замыкания, по которым определяется общее активное сопротивление трансформатора:

$$R_m = \frac{DP_k \times U_n^2}{S_{\text{тиом}}^2}, \quad (48)$$

где U_n - номинальное напряжение той обмотки, к которой приводят сопротивление трансформатора. В основном это напряжение обмотки ВН.

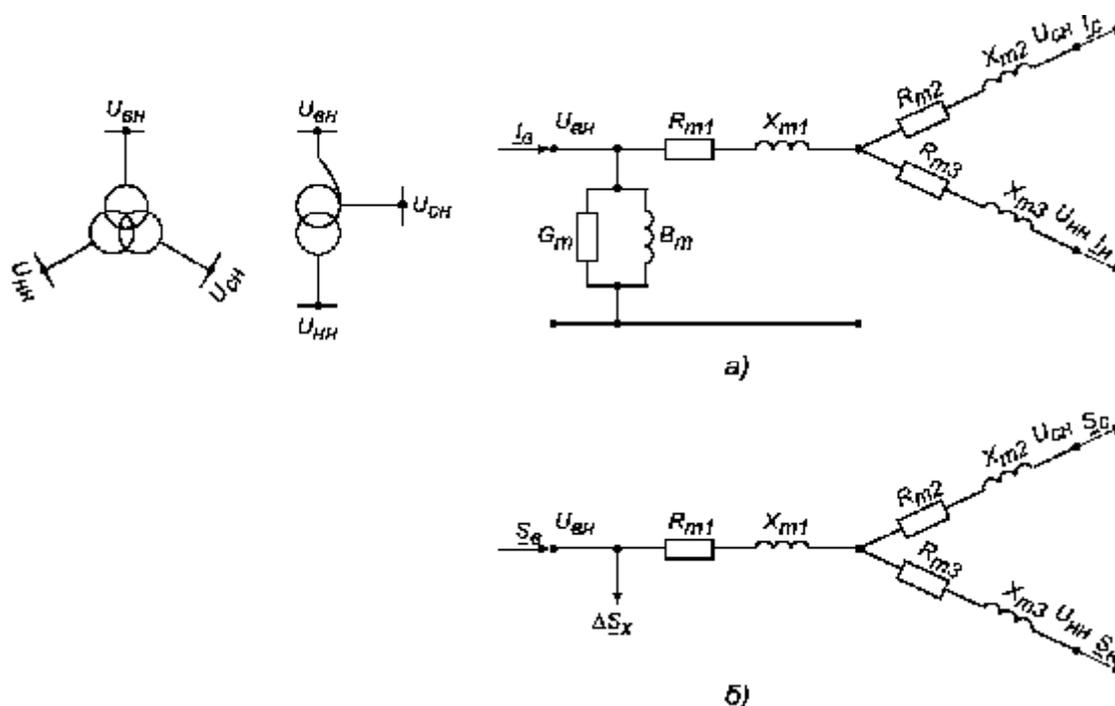


Рис. 7. Схема замещения трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов.

На рис. 7 поперечная ветвь проводимостей представлена:

- а) ветвью проводимостей;
- б) потерями мощности XX.

Тогда активное сопротивление каждой обмотки трансформатора при равенстве их мощностей составляет:

$$R_{m1} = R_{m2} = R_{m3} = 0,5 R_{\text{общ}}. \quad (49)$$

Однако эксплуатируются и трехобмоточные трансформаторы с разными мощностями обмоток. В таком случае активные сопротивления лучей звезды в схеме замещения определяются по потерям мощности короткого замыкания, отнесенным к соответствующим лучам:

$$\left. \begin{aligned} DP_{к1} = DP_{к, в} &= 0,5 (DP_{к, в-с} + DP_{к, в-н} - DP_{к, с-н}) \\ DP_{к2} = DP_{к, с} &= 0,5 (DP_{к, в-с} + DP_{к, с-н} - DP_{к, в-н}) \\ DP_{к3} = DP_{к, н} &= 0,5 (DP_{к, в-н} + DP_{к, с-н} - DP_{к, в-с}) \end{aligned} \right\}, \quad (50)$$

$$R_{m1} = \frac{DP_{к1} \times U_{вн}^2}{S_{т ном}^2}, \quad (51)$$

$$R_{m2} = \frac{DP_{к2} \times U_{вн}^2}{S_{т ном}^2}, \quad (52)$$

$$R_{m3} = \frac{DP_{к3} \times U_{вн}^2}{S_{т ном}^2}. \quad (53)$$

Индуктивные сопротивления обмоток или лучей эквивалентной звезды схемы замещения находят по соответствующим значениям напряжения короткого замыкания обмоток, определяемым по каталожным данным:

$$\left. \begin{aligned} u_{к1} = u_{к, в} &= 0,5 (u_{к, в-с} + u_{к, в-н} - u_{к, с-н}) \\ u_{к2} = u_{к, с} &= 0,5 (u_{к, в-с} + u_{к, с-н} - u_{к, в-н}) \\ u_{к3} = u_{к, н} &= 0,5 (u_{к, в-н} + u_{к, с-н} - u_{к, в-с}) \end{aligned} \right\}. \quad (54)$$

Учитывая, что в трехобмоточных трансформаторах $u_{ки} \ll u_{кр}$ можно принять $u_{кр} \gg u_{к}$, получаем:

$$X_{m1} = \frac{u_{к1} \times U_{вн}^2}{S_{т ном}}, \quad (55)$$

$$X_{m2} = \frac{u_{к2} \times U_{вн}^2}{S_{т ном}}, \quad (56)$$

$$X_{m3} = \frac{u_{к3} \times U_{вн}^2}{S_{т ном}}, \quad (57)$$

где $u_{ки}$ задано в относительных единицах.

Как правило, индуктивное сопротивление обмотки среднего напряжения X_{m2} благодаря взаимному влиянию соседних обмоток близко к нулю или имеет небольшое отрицательное значение, соответствующее емкостному сопротивлению, поэтому оно принимается равным нулю.

Активная и индуктивная проводимости трехобмоточного трансформатора рассчитываются, как и двухобмоточного, по выражениям (41), (42), а при их замене постоянным отбором мощности потери в стали $D\underline{S}_x$ определяются по выражению (47), где $n_m=1$.

В отличие от трехобмоточных трансформаторов трансформаторы с расщепленной обмоткой низкого напряжения имеют соотношение мощностей обмоток 100/50/50 %, т.е. суммарная мощность обмоток низкого напряжения равна мощности обмотки высшего напряжения. Эти трансформаторы могут работать как с параллельным соединением обмоток, так и с отдельным их включением. В первом случае трансформатор с расщепленной обмоткой работает как обычный двухобмоточный трансформатор и параметры его схемы замещения определяются по выражениям, справедливым для двухобмоточных трансформаторов.

При отдельном включении расщепленных обмоток схема замещения трансформатора соответствует рис. 7, причем активные сопротивления лучей звезды, а также проводимости цепи намагничивания или потери в стали определяются по соответствующим выражениям для трехобмоточного трансформатора.

Индуктивные сопротивления обмоток определяются потоками рассеяния и зависят от взаимного расположения обмоток. Поскольку обмотка высокого напряжения располагается между обмотками низкого напряжения, ее индуктивное сопротивление можно считать равным нулю, а индуктивные сопротивления ветвей расщепленной обмотки X_{2m}^c и X_{2m}^{α} равны двойному значению общего сопротивления трансформатора:

$$X_{2m}^c = X_{2m}^{\alpha} = 2X_m \text{ или } X_m = 0,5 X_{2m}^c = 0,5 X_{2m}^{\alpha}. \quad (58)$$

Общее индуктивное сопротивление трансформатора определяется по выражению для двухобмоточного трансформатора.

Исходя из сказанного, схему замещения трансформатора с расщепленной обмоткой можно представить в виде:

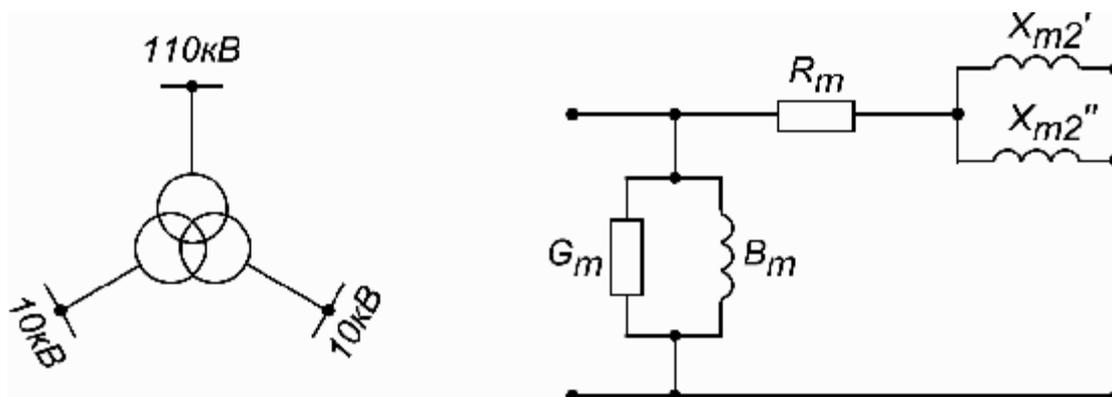


Рис. 8. Схема замещения трансформатора с расщепленной обмоткой

Схема замещения автотрансформатора также представляется трехлучевой звездой (рис. 7). В отличие от трехобмоточного трансформатора автотрансформатор характеризуется номинальной и типовой мощностью, на которую рассчитана последовательная обмотка.

Общее активное сопротивление автотрансформатора определяется по потерям мощности $DP_{к, в-с}$ в режиме короткого замыкания в обмотках высокого и среднего напряжения, имеющих электрическую связь:

$$R_{общ} = \frac{DP_{к12} \times U_{вн}^2}{S_{1ном}^2} = \frac{DP_{к, в-с} \times U_{вн}^2}{S_{АТ ном}^2}. \quad (59)$$

Активные сопротивления обмоток ВН и СН будут равны, если мощности потерь DP_k для них одинаковы. Тогда:

$$R_{m1} = R_{m2} = 0,5 R_{общ}. \quad (60)$$

Активное сопротивление обмотки низкого напряжения зависит от ее мощности и определяется из соотношения:

$$\frac{R_{m3}}{R_{m1}} = \frac{S_{ATном}}{S_{нн}}. \quad (61)$$

Оно равно:

$$R_{m3} = \frac{R_{m1} \times S_{ATном}}{S_{нн}}. \quad (62)$$

Если в каталоге приводятся потери мощности короткого замыкания между парами обмоток ($DP_{кв-н}^c$; $DP_{кс-н}^c$; $DP_{кв-с}$), то $DP_{кв-с}$ приведены к номинальной мощности автотрансформатора, а $DP_{кв-н}^c$ и $DP_{кс-н}^c$ – к типовой мощности (мощности обмотки НН).

При определении активных сопротивлений обмоток потери короткого замыкания должны быть приведены к номинальной мощности:

$$DP_{кв-н} = \frac{DP_{кв-н}^c}{a^2}; \quad (63)$$

$$DP_{кс-н} = \frac{DP_{кс-н}^c}{a^2}, \quad (64)$$

где $a = \frac{S_{ATном}}{S_{тип}} = \frac{U_{вн} - U_{сн}}{U_{вн}}$. (65)

И уже по ним определяют потери мощности короткого замыкания для каждой из обмоток по выражению (50).

Тогда активные сопротивления обмоток равны:

$$R_{m1} = \frac{DP_{к1} \times U_{вн}^2}{S_{ATном}^2}, \quad (66)$$

$$R_{m2} = \frac{DP_{к2} \times U_{вн}^2}{S_{ATном}^2}, \quad (67)$$

$$R_{m3} = \frac{DP_{к3} \times U_{вн}^2}{S_{ATном}^2}. \quad (68)$$

Индуктивные сопротивления лучей эквивалентной звезды определяются так же, как для трехобмоточного трансформатора, с использованием выражений (55)-(57). Если в каталоге или справочных данных указаны напряжения короткого замыкания пар обмоток ($u_{\zeta_{к, в-н}}, u_{\zeta_{к, с-н}}$), приведенные к типовой мощности, то их приведение к единому энергетическому уровню осуществляется по выражениям:

$$u_{к, в-н} = u_{\zeta_{к, в-н}} / a, \quad (69)$$

$$u_{к, с-н} = u_{\zeta_{к, с-н}} / a. \quad (70)$$

Проводимости автотрансформатора рассчитываются по выражениям (41) и (42), а потери мощности в стали - по выражению (47), где $n_m=1$.

Сопротивления и проводимости трансформаторов и автотрансформаторов могут быть отнесены не только к номинальному напряжению обмотки высокого напряжения $U_{вн}$, но и к напряжению других обмоток, если оно принимается за расчетное напряжение сети.

Примеры решения задач

Пример 1.3.

Определить параметры схемы замещения трансформатора типа ТМН– 2500/110.

Решение.

По каталожным данным, например /5/, определяем характеристики трансформатора: $U_{вн} = 110 \text{ кВ}$; $u_k = 10,5 \%$; $DP_k = 22 \text{ кВт}$; $DP_x = 5 \text{ кВт}$; $I_x = 1,5 \%$; $DQ_x = 37,5 \text{ квар}$.

Трансформатор типа ТМН - трехфазный двухобмоточный, с номинальным напряжением обмотки высокого напряжения меньше 220 кВ, – следовательно, схема замещения такого трансформатора Г-образная с постоянным отбором мощности.

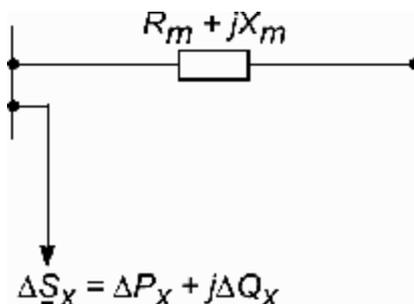


Рис. 9. Г-образная схема замещения трансформатора

Активное сопротивление трансформатора определяется по выражению (36):

$$R_m = \frac{DP_k \times U_{вн}^2}{S_{ном}^2} = \frac{22 \times 110^2 \times 10^3}{2500^2} = 42,6 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление находится по формуле (40):

$$X_m = \frac{u_{к,\%} \times U_{вн}^2}{100 \times S_{ном}} = \frac{10,5 \times 110^2 \times 10^6}{100 \times 2500 \times 10^3} = 508 \text{ Ом.}$$

Активная проводимость определяется по данным опыта холостого хода согласно выражению (41):

$$G_m = \frac{DP_x}{U_{вн}^2} = \frac{5}{110^2 \times 10^3} = 4,13 \times 10^{-7} \text{ См},$$

а индуктивная проводимость - согласно выражению (42):

$$B_m = \frac{DQ_x}{U_{вн}^2} = \frac{37,5}{110^2 \times 10^3} = 3,1 \times 10^{-6} \text{ См}.$$

Индуктивная проводимость может быть определена и через ток холостого хода трансформатора:

$$B_m = \frac{I_{x,\%} \times S_{тном}}{100 U_{вн}^2} = \frac{1,5 \times 2500}{100 \times 110^2 \times 10^3} = 3,1 \times 10^{-6} \text{ См}.$$

Потери в стали или потери холостого хода равны: $D\underline{S}_x = 5 + j37,5 \text{ кВА}$.

Пример 1.4.

Определить параметры схемы замещения трехфазного трехобмоточного трансформатора типа ТДЦТН-63000/220, отнесенные к высокому напряжению.

Решение.

Из каталожных данных, например /12/, записываем технические характеристики трансформатора: $U_{вн} = 230 \text{ кВ}$; $S_{тном} = 63000 \text{ кВА}$; $u_{к, в-с} = 12,5 \%$; $u_{к, в-н} = 24 \%$; $u_{к, с-н} = 10,5 \%$; $DP_k = 320 \text{ кВт}$; $DP_x = 91 \text{ кВт}$; $I_x = 1 \%$. **Отношение между мощностями обмоток 100/100/100 %.**

Т.к. потери мощности КЗ заданы одной величиной для всего трансформатора, определим общее активное сопротивление трансформатора:

$$R_{общ} = \frac{DP_k \times U_{вн}^2}{S_{тном}^2} = \frac{320 \times 230^2 \times 10^3}{63000^2} = 4,26 \text{ Ом}.$$

Тогда активное сопротивление любой обмотки равно

$$R_{m1} = R_{m2} = R_{m3} = 0,5 R_{общ} = 2,13 \text{ Ом}.$$

Напряжения короткого замыкания для лучей трехфазной схемы замещения равны

$$u_{к1} = 0,5(u_{к в-с} + u_{к в-н} - u_{к с-н}) = 0,5(12,5 + 24 - 10,5) = 13\%,$$

$$u_{к2} = 0,5(u_{кв-с} + u_{кс-н} - u_{кв-н}) = 0,5(12,5 + 10,5 - 24) = 0\%,$$

$$u_{к3} = 0,5(u_{кв-н} + u_{кс-н} - u_{кв-с}) = 0,5(24 + 10,5 - 12,5) = 11\%.$$

Определим индуктивные сопротивления лучей эквивалентной звезды:

$$X_{m1} = \frac{u_{к1} \times U_{вн}^2}{S_{т ном}} = \frac{13 \times 230^2 \times 10}{63000} = 120,84 \text{ Ом},$$

$$X_{m2} = \frac{u_{к2} \times U_{вн}^2}{S_{т ном}} = \frac{0 \times 230^2 \times 10}{63000} = 0 \text{ Ом},$$

$$X_{m3} = \frac{u_{к3} \times U_{вн}^2}{S_{т ном}} = \frac{11 \times 230^2 \times 10}{63000} = 102,25 \text{ Ом}.$$

Из расчета видно, что в трансформаторах активное сопротивление мало по сравнению с индуктивным и им можно пренебречь.

Активная проводимость трансформатора

$$G_m = \frac{DP_x}{U_{вн}^2} = \frac{91}{230^2 \times 10^3} = 1,55 \times 10^{-6} \text{ См}.$$

Реактивная проводимость

$$B_m = \frac{DQ_x}{U_{вн}^2} = \frac{I_x \times S_{т ном}}{U_{вн}^2} = \frac{1,1 \times 63000}{100 \times 230^2 \times 10^3} = 1,85 \times 10^{-5} \text{ См}.$$

Схема замещения трансформатора представлена на рис. 7.

Пример 1.5.

Определить параметры схемы замещения трансформатора типа ТРДЦН-63000/330 с расщепленной обмоткой низкого напряжения, приведенные к стороне ВН (обмотка ВН расположена между обмотками НН). Обмотки НН включены параллельно.

Решение.

Из /5/ определим каталожные данные трансформатора:

$$S_{ном} = 63000 \text{ кВА}; U_{1 ном} = 330 \text{ кВ}; U_{2 ном} = 10,5/10,5 \text{ кВ}; \Delta P_k = 265 \text{ кВт};$$

$$u_k = 11\%; \Delta P_x = 120 \text{ кВт}; I_x = 0,7\%.$$

Схема замещения этого трансформатора соответствует рис. 8.

Определим активное сопротивление обмоток

$$R_m = \frac{DP_k \times U_{I \text{ ном}}^2}{S_m^2 \text{ ном}} = \frac{265 \times 10^3 \times 330^2}{63000^2} = 7,35 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление трансформатора находим по u_k , т.к. это трансформатор большой мощности

$$X_m = \frac{u_{k, \%} \times U_{I \text{ ном}}^2}{100 \times S_m \text{ ном}} = \frac{11 \times 330^2 \times 10^3}{100 \times 63000} = 190 \text{ Ом.}$$

Для трансформатора с расщепленной обмоткой низкого напряжения индуктивные сопротивления обмоток равны:

$$X_2' = X_2'' = 2 \times X_m = 380 \text{ Ом.}$$

Активная проводимость трансформатора

$$G_m = \frac{DP_x}{U_{I \text{ ном}}^2} = \frac{120}{330^2 \times 10^3} = 1,1 \times 10^{-6} \text{ См.}$$

Индуктивная проводимость трансформатора

$$B_m = \frac{DQ_x}{U_{I \text{ ном}}^2} = \frac{I_{x, \%} \times S_m \text{ ном}}{100 \times U_{I \text{ ном}}^2} = \frac{0,7 \times 63000}{100 \times 330^2 \times 10^3} = 4,07 \times 10^{-6} \text{ См.}$$

Полные потери мощности в стали трансформатора

$$DS_x = DP_x + jDQ_x = DP_x + j \frac{I_{x, \%} \times S_m \text{ ном}}{100} = 120 + j441 \text{ кВА.}$$

Пример 1.6.

Определить параметры схемы замещения трехфазного трехобмоточного автотрансформатора типа АТДЦТН-200000/220/110. Составить схему замещения и определить ее параметры при условии установки на подстанции двух автотрансформаторов.

Решение.

Каталожные данные автотрансформатора: $S_m \text{ ном} = 200000 \text{ кВА}$;
 $U_{1 \text{ ном}} = 230 \text{ кВ}$; $U_{2 \text{ ном}} = 121 \text{ кВ}$; $U_{3 \text{ ном}} = 11 \text{ кВ}$; $u_{k, \text{ в-с}} = 11 \%$; $u_{k, \text{ в-н}} = 32 \%$; $u_{k, \text{ с-н}} = 20 \%$;

$\Delta P_{к, в-с} = 430 \text{ кВт}; \Delta P_{к, в-н} = 360 \text{ кВт}; \Delta P_{к, с-н} = 320 \text{ кВт}; \Delta P_x = 125 \text{ кВт};$
 $I_x = 0,5 \%$. Соотношение мощностей обмоток 100/100/50 % /14/.

Приведем каталожные данные, отнесенные к мощности обмотки низкого напряжения $\Delta P_{к, в-н}$, $\Delta P_{к, с-н}$, к номинальной мощности автотрансформатора:

$$DP_{к, в-н} = \frac{DP'_{к, в-н}}{a^2} = \frac{360}{0,5^2} = 1440 \text{ кВт},$$

$$DP_{к, с-н} = \frac{DP'_{к, с-н}}{a^2} = \frac{320}{0,5^2} = 1280 \text{ кВт},$$

$$\text{где } a = \frac{S_{\text{тип, \%}}}{S_{\text{ат ном, \%}}} = \frac{50}{100} = 0,5.$$

Определим по выражениям (54) и (50) напряжения и потери активной мощности короткого замыкания, соответствующие лучам схемы замещения данного автотрансформатора

$$u_{к1} = 0,5(11 + 32 - 20) = 11,5\%,$$

$$u_{к2} = 0,5(11 + 20 - 32) = 0\%,$$

$$u_{к3} = 0,5(32 + 20 - 11) = 20,5\%,$$

$$DP_{к1} = 0,5(430 + 1440 - 1280) = 295 \text{ кВт},$$

$$DP_{к2} = 0,5(430 + 1280 - 1440) = 135 \text{ кВт},$$

$$DP_{к3} = 0,5(1440 + 1280 - 430) = 1145 \text{ кВт}.$$

По значениям u_k и ΔP_k определим активные и индуктивные сопротивления автотрансформатора по выражениям (51-53) и (55-57).

$$R_{AT1} = \frac{DP_{к1} \times U_{вн}^2}{S_{AT \text{ ном}}^2} = \frac{295 \times 230^2 \times 10^3}{200000^2} = 0,39 \text{ Ом},$$

$$R_{AT2} = \frac{DP_{к2} \times U_{вн}^2}{S_{AT \text{ ном}}^2} = \frac{135 \times 230^2 \times 10^3}{200000^2} = 0,179 \text{ Ом},$$

$$R_{AT3} = \frac{DP_{к3} \times U_{вн}^2}{S_{AT \text{ ном}}^2} = \frac{1145 \times 230^2 \times 10^3}{200000^2} = 1,51 \text{ Ом},$$

$$X_{AT1} = \frac{u_{к1} \times U_{вн}^2}{S_{AT ном}} = \frac{11,5 \times 230^2 \times 10}{200000} = 30,41 \text{ Ом},$$

$$X_{AT2} = \frac{u_{к2} \times U_{вн}^2}{S_{AT ном}} = 0 \text{ Ом},$$

$$X_{AT3} = \frac{u_{к3} \times U_{вн}^2}{S_{AT ном}} = \frac{20,5 \times 230^2 \times 10}{200000} = 54,2 \text{ Ом}.$$

Потери реактивной мощности одного автотрансформатора составляют

$$DQ_x = \frac{I_{x,\%} \times S_{AT ном}}{100\%} = \frac{0,5 \times 200000}{100} = 1000 \text{ квар}.$$

Суммарные потери холостого хода равны

$$DS_x = DP_x + jDQ_x = 125 + j1000 \text{ кВА}.$$

Активная и индуктивная проводимости определяются по выражениям (41-42):

$$G_{AT} = \frac{DP_x}{U_{I ном}^2} = \frac{125}{230^2 \times 10^3} = 2,36 \times 10^{-6} \text{ См},$$

$$B_{AT} = \frac{DQ_x}{U_{I ном}^2} = \frac{1000}{230^2 \times 10^3} = 18,9 \times 10^{-6} \text{ См}.$$

При условии установки на подстанции двух автотрансформаторов схема включения и схема замещения приведены на рис. 10.

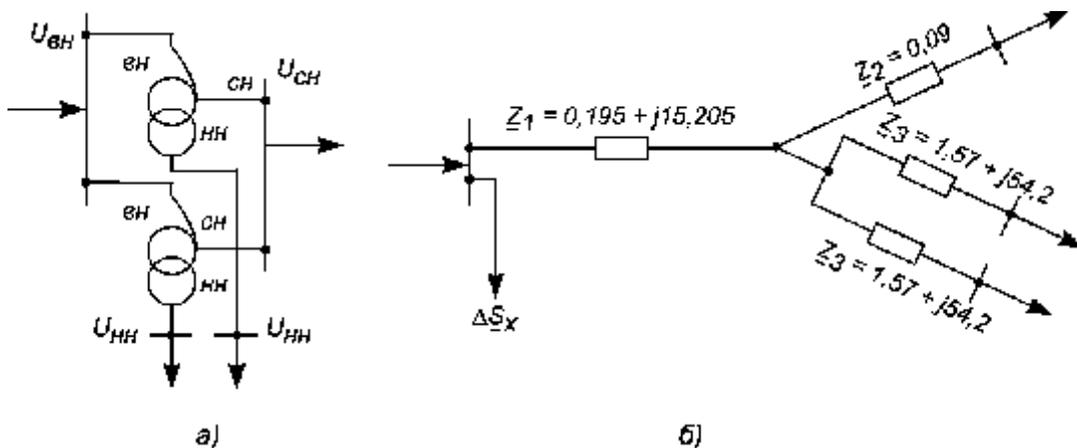


Рис. 10. Схемы автотрансформаторов:

а) схема включения двух трансформаторов,

б) схема замещения.

Учитывая параллельное включение обмоток ВН и СН, определим их эквивалентные сопротивления

$$Z_1 = \frac{Z_{AT1}}{2} = \frac{(0,39 + j30,41)}{2} = 0,195 + j15,205 \text{ Ом},$$

$$Z_2 = \frac{Z_{AT2}}{2} = \frac{0,179 + j0}{2} = 0,09 \text{ Ом}.$$

Т.к. обмотки НН автотрансформаторов работают каждая на свою нагрузку, то $Z_3 = Z_{AT3} = 1,51 + j54,2 \text{ Ом}$.

Суммарные потери холостого хода обоих автотрансформаторов равны

$$\underline{DS}_x = 2(DP_x + jDQ_x) = 2(125 + j1000) = 250 + j2000 \text{ кВА}.$$

Пример 1.7.

Определить параметры схемы замещения трансформатора типа ТДЦ-80000/220, приведенные к уровню высокого и низкого напряжения.

Решение.

Трансформатор типа ТДЦ-80000/220 двухобмоточный. Его характеристики определяются из /5/ и равны: $U_{вн} = 242 \text{ кВ}$; $U_{нн} = 10,5 \text{ кВ}$; $u_k = 11\%$; $\Delta P_k = 320 \text{ кВт}$; $\Delta P_x = 105 \text{ кВт}$; $I_x = 0,6 \%$.

Активное сопротивление обмоток:

$$\text{приведенное к высокой стороне } R_m = \frac{\Delta P_k \times U_{вн}^2}{S_{m \text{ ном}}^2} = \frac{320 \times 242^2 \times 10^3}{80000^2} = 2,93 \text{ Ом},$$

$$\text{приведенное к низкой стороне } R_m' = \frac{\Delta P_k \times U_{нн}^2}{S_{m \text{ ном}}^2} = \frac{320 \times 10,5^2 \times 10^3}{80000^2} = 0,0055 \text{ Ом}.$$

Индуктивное сопротивление обмоток:

$$\text{приведенное к высокой стороне } X_m = \frac{u_k \times U_{вн}^2}{S_{m \text{ ном}}} = \frac{11 \times 242^2 \times 10}{80000} = 80,5 \text{ Ом},$$

приведенное к низкой стороне $X'_m = \frac{u_k \times U_{нн}^2}{S_{m \text{ ном}}} = \frac{11 \times 10,5^2 \times 10}{80000} = 0,15 \text{ Ом.}$

Поперечные проводимости, приведенные к высокой стороне

$$G_m = \frac{DP_x}{U_{вн}^2} = \frac{105}{242^2 \times 10^3} = 1,79 \times 10^{-5} \text{ См,}$$

$$B_m = \frac{I_{x,\%} \times S_{m \text{ ном}}}{U_{вн}^2} = \frac{0,6 \times 80000}{242^2 \times 10^3} = 8,19 \times 10^{-5} \text{ См,}$$

приведенные к низкой стороне

$$G'_m = \frac{DP_x}{U_{нн}^2} = \frac{105}{10,5^2 \times 10^3} = 9,5 \times 10^{-4} \text{ См,}$$

$$B'_m = \frac{I_{x,\%} \times S_{m \text{ ном}}}{U_{нн}^2} = \frac{0,6 \times 80000}{10,5^2 \times 10^5} = 4,35 \times 10^{-3} \text{ См.}$$

Пример 1.8.

Рассчитать параметры схемы замещения трехфазной группы из однофазных автотрансформаторов типа АОДЦТН - 417000/750/500 при номинальных параметрах одной фазы: $S_{ном \text{ ф}} = 417 \text{ МВА}$; $U_{вн} = 750 / \sqrt{3} \text{ кВ}$; $U_{сн} = 500 / \sqrt{3} \text{ кВ}$; $U_{нн} = 10,65 \text{ кВ}$. Номинальные мощности обмоток относятся как 100/100/25 %. Напряжения КЗ равны: $u_{к, в-с} = 9,65 \%$; $u_{к, в-н} = 63 \%$; $u_{к, с-н} = 51 \%$. $\Delta P_{к, в-с} = 920 \text{ кВт}$; $\Delta P_x = 330 \text{ кВт}$; $I_x = 0,5 \%$.

Решение.

Т.к. рассматривается группа из однофазных автотрансформаторов, активные и индуктивные сопротивления обмоток ВН, СН и НН определим при рассмотрении только одной фазной группы; аналогично поступим и с поперечными проводимостями. В этом случае в выражениях для сопротивлений и проводимостей автотрансформаторов используется фазные, а не линейные напряжения.

Определим напряжения короткого замыкания каждой обмотки по выражениям (54):

$$u_{к1} = 0,5(u_{кв-с} + u_{кв-н} - u_{кс-н}) = 0,5(9,65 + 63 - 51) = 10,83\%,$$

$$u_{к2} = 0,5(u_{кв-с} + u_{кс-н} - u_{кв-н}) = 0,5(9,65 + 51 - 63) = 0\%,$$

$$u_{к3} = 0,5(u_{кв-н} + u_{кс-н} - u_{кв-с}) = 0,5(63 + 51 - 9,65) = 52,175\%.$$

Индуктивные сопротивления обмоток равны:

$$X_1 = \frac{u_{к1} \frac{\sqrt{3} U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}}}{S_{\text{ф ном}}} = \frac{10,83 \frac{750}{\sqrt{3}}}{417000} 10 = 48,7 \text{ Ом},$$

$$X_2=0; \quad X_3 = \frac{u_{к3} \frac{\sqrt{3} U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}}}{S_{\text{ф ном}}} = \frac{52,175 \frac{750}{\sqrt{3}}}{417000} 10 = 234,61 \text{ Ом}.$$

Общее активное сопротивление трехфазной группы однофазных автотрансформаторов равно:

$$R_{\text{общ}} = \frac{DP_{к,в-с} \frac{\sqrt{3} U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}}}{S_{\text{ф ном}}^2} = \frac{920 \frac{750}{\sqrt{3}}}{417^2} 10^{-3} = 0,99 \text{ Ом}.$$

Поскольку номинальные мощности обмоток ВН и СН одинаковы, то

$$R_1 = R_2 = \frac{R_{\text{общ}}}{2} = 0,495 \text{ Ом}.$$

Номинальная мощность обмотки НН составляет 25% от номинальной мощности обмотки ВН, поэтому из выражения (62) следует: $R_3 = 4R_1 = 0,99 \cdot 4 = 3,96 \text{ Ом}$.

Поперечная проводимость для одной фазы равна:

$$\text{активная} \quad - G = \frac{DP_x}{\frac{\sqrt{3} U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} \times 10^3} = \frac{330}{\frac{750}{\sqrt{3}} \times 10^3} = 1,76 \times 10^{-6} \text{ См},$$

$$\text{реактивная} \quad - B = \frac{I_x \times S_{\text{ф ном}}}{\frac{\sqrt{3} U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} \times 10^5} = \frac{0,5 \times 412000}{\frac{750}{\sqrt{3}} \times 10^5} = 11 \times 10^{-6} \text{ См}.$$

Задачи для самостоятельного решения

№1

Трансформатор типа ТМ – 6300 /110 имеет потери реактивной мощности в режиме холостого хода (х.х.) $\Delta Q_x = 63$ квар. Чему равна реактивная составляющая тока холостого хода? Определить параметры схемы замещения трансформатора.

№2

При испытаниях трансформатора типа ТМ – 2500 /110 оказалось, что потери реактивной мощности в опыте холостого хода составили 37,5 квар, а ток холостого хода - 1,5 %. Определить параметры схемы замещения трансформатора, а также активную составляющую тока холостого хода. Сравнить со справочными данными.

№3

Рассчитать параметры схемы замещения трансформатора типа ТМН - 1600/35. Определить, сколько процентов реактивной составляющей напряжения короткого замыкания приходится на долю активной составляющей.

№4

Определить, во сколько раз активная составляющая напряжения короткого замыкания меньше реактивной у трансформатора ТМ-4000/10. Определить параметры схемы замещения двух отдельно работающих трансформаторов.

№5

Во сколько раз реактивная составляющая тока холостого хода трансформатора типа ТД - 10000 /110 больше активной, если ток холостого хода $I_x = 1 \%$, а $\Delta Q_x = 100$ квар. Определить параметры схемы замещения трансформатора.

№6

Определить параметры схемы замещения трансформатора типа ТД-10000/35 и долю активной составляющей тока холостого хода в процентах от его величины по данным опыта холостого хода: $I_x = 0,8\%$; $\Delta Q_x = 80$ квар, $\Delta P_x = 14,5$ кВт.

№7

Построить схемы замещения трансформаторов типа ТДНС-16000/35 и ТРДНС-25000/35 и рассчитать их параметры. В чем отличие схем замещения?

№8

Построить схемы замещения трансформаторов типа ТДН-25000/110 и ТРДН 25000/110 и рассчитать их параметры. Обмотки низкого напряжения трансформатора типа ТРДН - 25000 /110 включены отдельно.

№9

Построить схему замещения и определить ее параметры для силового трансформатора типа ТРДЦНК - 80000 /110 при параллельной работе обмоток низкого напряжения (НН). Как изменятся параметры схемы замещения трансформатора при отдельной работе обмоток НН ?

№10

На подстанции установлены два трансформатора типа ТМТН-6300/110, работающие на общую нагрузку. Построить эквивалентную схему замещения подстанции и рассчитать ее параметры.

№11

Для связи потребителя с источником на подстанции установлен трансформатор типа ТДТН – 10000 / 110, у которого $U_{\text{ВН}} = 115$ кВ; $U_{\text{СН}} = 38,5$ кВ; $U_{\text{НН}} = 11$ кВ. Определить параметры его схемы замещения, приведенные к стороне высокого напряжения, а затем - к стороне низкого напряжения.

№12

Привести схему замещения и рассчитать ее параметры для двух параллельно работающих трансформаторов типа ТДЦТН - 80000/110/35/10.

№13

Рассчитать параметры схемы замещения трансформатора типа ТДТН – 40000/220/35/6 кВ, приведенные к высокой стороне и к средней стороне трансформатора.

№14

Рассчитать параметры схемы замещения двух параллельно работающих автотрансформаторов АТДЦТН - 250000 /220 /110.

№15

Начертить схему замещения и определить ее параметры для силового трансформатора типа ТДТН - 25000 /220 при соотношении мощностей его обмоток 100 /100 /67 %. Как изменятся параметры схемы замещения, если соотношение мощностей обмоток трансформатора составит 100 /100 /100 %?

№16

Привести схему замещения для двух параллельно работающих автотрансформаторов типа АДЦТН - 250000 /330 /150 и определить ее параметры.

№17

Определить параметры схемы замещения двух параллельно работающих трансформаторов типа ТДЦ - 125000 /220 и показать их значения на схеме замещения.

№18

Составить схему замещения и определить ее параметры для автотрансформатора АДЦТН - 200000 /220 /110, принимая за базисное высшее напряжение автотрансформатора.

№19

Как изменятся параметры схемы замещения, если в качестве базисного значения сначала принять высшее напряжение трансформатора, а затем – низшее? Показать на примере трансформатора ТРДНС – 63000/220.

№20

Рассчитать параметры схемы замещения трехфазной группы из однофазных автотрансформаторов типа АОДЦТН - 167000 /500 /220.

Примечание: во всех задачах расшифровать тип трансформаторов и автотрансформаторов.

2. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ РАЗОМКНУТЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

2.1. Приведенная и расчетная мощности нагрузок

Для количественной характеристики работы электрической сети рассчитывают ее рабочие режимы. С этой целью составляется расчетная схема замещения, в которой каждый элемент сети представляется своей схемой замещения. Покажем на примере участка сети, состоящего из двух линий и трансформатора, как составляется схема замещения (рис. 11).

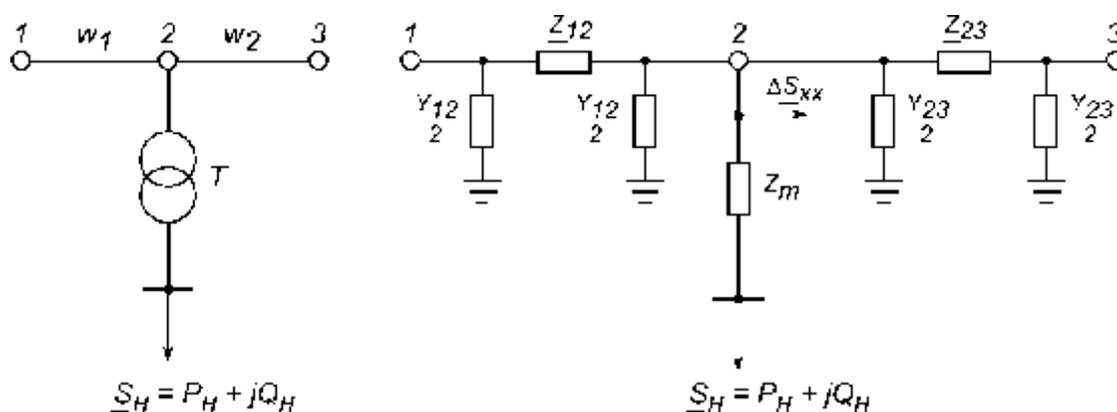


Рис. 11. Схема замещения участка сети с двухобмоточным трансформатором

Так как электрические сети имеют большое количество линий и трансформаторов, то для упрощения конфигурации схемы замещения сети вначале определяют приведенные и расчетные мощности нагрузок подстанций.

Под приведенной мощностью нагрузки подстанции понимается мощность подстанции, приведенная к высокой стороне трансформатора, т.е. мощность нагрузки с учетом потерь мощности в силовом трансформаторе:

$$\underline{S}_n = \underline{S}_n + D\underline{S}_m = P_n + DP_m + j(Q_n + DQ_m), \quad (71)$$

где $D\underline{S}_m$ - потери мощности в силовом трансформаторе.

Потери мощности в силовом трансформаторе состоят из нагрузочных потерь (потери в меди) и потерь холостого хода (потери в стали).

В двухобмоточном силовом трансформаторе нагрузочные потери мощности трансформатора рассчитываются по выражениям:

активные потери мощности

$$DP_m = \frac{P_n^2 + Q_n^2}{U_{вн}^2} \times R_m + DP_x \quad (72)$$

или

$$DP_m = \frac{DP_k \times S_n^2}{S_{т ном}^2} + DP_x = DP_k \times K_z^2 + DP_x, \quad (73)$$

где K_z – коэффициент загрузки трансформатора, равный $K_z = \frac{S_n}{S_{т ном}}$;

реактивные потери мощности

$$DQ_m = \frac{P_n^2 + Q_n^2}{U_{вн}^2} \times X_m + DQ_x \quad (74)$$

или

$$DQ_m = \frac{u_{к, \%} \times S_n^2}{100 \times S_{т ном}} + \frac{I_{х, \%} \times S_{т ном}}{100}. \quad (75)$$

При использовании для определения потерь номинального напряжения трансформатора в их расчет вводится погрешность, связанная с заменой реального уровня напряжения на его номинальное значение. Однако при ручных расчетах эта погрешность допустима. При расчетах на ПЭВМ пользуются нагрузкой подстанций без приведения ее к высокой стороне.

В трехобмоточном трансформаторе или в автотрансформаторе потери мощности рассчитываются по следующим выражениям:

$$DP_m = \frac{DP_{кв} \times S_{вн}^2}{S_{т ном}^2} + \frac{DP_{кс} \times S_{сн}^2}{S_{т ном}^2} + \frac{DP_{кн} \times S_{нн}^2}{S_{т ном}^2} + DP_x \quad (76)$$

или

$$DP_m = \frac{S_{нн}^2}{U_6^2} R_{m3} + \frac{S_{сн}^2}{U_6^2} R_{m2} + \frac{S_{вн}^2}{U_6^2} R_{m1} + DP_x, \quad (77)$$

$$DQ_m = \frac{u_{кв, \%} \times S_{вн}^2}{100 \times S_{т ном}} + \frac{u_{кс, \%} \times S_{сн}^2}{100 \times S_{т ном}} + \frac{u_{кн, \%} \times S_{нн}^2}{100 \times S_{т ном}} + \frac{I_{x, \%} \times S_{т ном}}{100} \quad (78)$$

или

$$DQ_m = \frac{S_{нн}^2}{U_6^2} X_{m3} + \frac{S_{сн}^2}{U_6^2} X_{m2} + \frac{S_{вн}^2}{U_6^2} X_{m1} + DQ_x, \quad (79)$$

где U_6 - напряжение высокой стороны трансформатора.

Здесь мощность нагрузки на высокой стороне трансформатора определяется следующим образом:

$$\underline{S}_{вн} = \underline{S}_{нн} + D\underline{S}_{mn} + \underline{S}_{сн} + D\underline{S}_{mc}, \quad (80)$$

где $D\underline{S}_{mn}$ и $D\underline{S}_{mc}$ - соответственно потери мощности в обмотке низкого и среднего напряжения

$$D\underline{S}_{mc} = \frac{S_{сн}^2}{U_6^2} (R_{m2} + jX_{m2}); \quad D\underline{S}_{mn} = \frac{S_{нн}^2}{U_6^2} (R_{m3} + jX_{m3}).$$

Расчетная нагрузка подстанции включает в себя приведенную мощность нагрузки и сумму реактивных мощностей, генерируемых линиями, подходящими к подстанции. Например, для рис. 11 расчетная нагрузка подстанции равна:

$$\underline{S}_p = \underline{S}_н + D\underline{S}_m - jQ_{c12}^к - jQ_{c23}^н, \quad (81)$$

где $jQ_{c12}^к$; $jQ_{c23}^н$ - соответственно реактивные мощности, генерируемые в конце линии 12 и начале линии 23.

Эти мощности также называются зарядными и определяются по выражениям:

$$Q_{c12}^k = \frac{U_2^2 \times b_{12}}{2}; \quad Q_{c23}^h = \frac{U_2^2 \times b_{23}}{2}, \quad (82)$$

где b_{12} и b_{23} - емкостные проводимости линий.

В ручных расчетах при определении зарядных мощностей вместо реального значения напряжения допускается использовать его номинальное значение.

Таким образом, при использовании приведенных и расчетных нагрузок подстанции упрощенные схемы замещения для участка сети имеют вид:

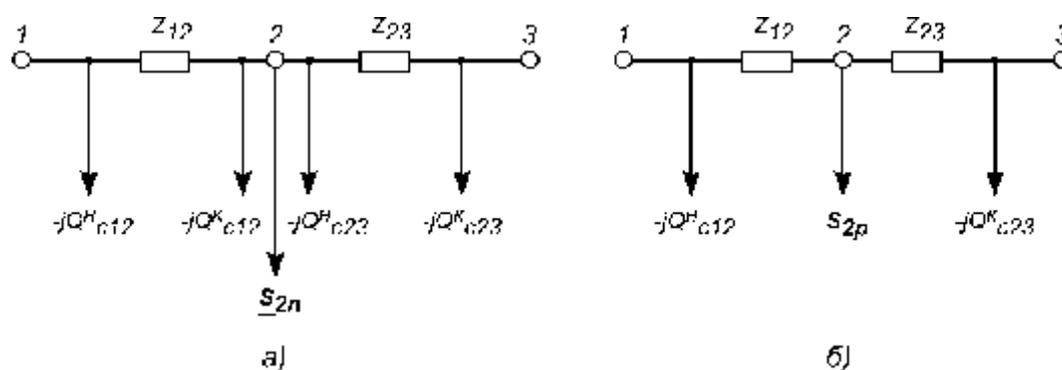


Рис. 12. Упрощенные схемы замещения:

а – при использовании приведенной нагрузки узла, \underline{S}_{2n}

б – при использовании расчетной нагрузки узла, \underline{S}_{2p} .

Если неизвестна номинальная мощность силового трансформатора, то ее можно определить следующим образом.

Двухобмоточный трансформатор

Сначала находят расчетную мощность трансформатора

$$S_{m \text{ расч}} = \frac{\sqrt{P_n^2 + Q_3^2}}{N_T \times K_3},$$

где Q_3 – реактивная мощность, передаваемая через трансформатор в сеть низкого напряжения (переток реактивной мощности из сети высокого напряжения);

N_T – число трансформаторов на подстанции;

K_3 – коэффициент загрузки трансформатора (для двухтрансформаторных подстанций $K_3=0,7$; для однострансформаторных $K_3=0,8, 0,85$).

$$Q_3 = P_n \cdot \text{tg} j_n,$$

где $\text{tg} j_n$ – нормативный базовый коэффициент мощности, задаваемый энергосистемой потребителям в часы максимальных нагрузок, определяется согласно /16/.

Затем по справочным данным выбирается трансформатор с номинальной мощностью, удовлетворяющей условию

$$S_{m \text{ ном}} \geq S_{m \text{ расч}}.$$

Трехобмоточный трансформатор и автотрансформатор

Определяется суммарная нагрузка трансформатора

$$S_{mS} = P_{nn} + P_{cn} + j(Q_3 + Q_{cn}),$$

где P_{nn}, P_{cn} – соответственно активная нагрузка низкой и средней сторон трехобмоточного трансформатора или автотрансформатора;

Q_3 – реактивная мощность, передаваемая через трехобмоточный трансформатор (автотрансформатор) в сеть низкого напряжения;

Q_{cn} – реактивная мощность, передаваемая через трехобмоточный трансформатор (автотрансформатор) в сеть среднего напряжения.

В целях снижения потерь мощности в распределительных сетях энергосистем Q_{cn} определяется, исходя из оптимизации режима по реактивной мощности /11/.

Расчетная мощность трехобмоточного трансформатора или автотрансформатора равна

$$S_{m(at) \text{ расч}} \geq \frac{\sqrt{(P_{nn} + P_{cn})^2 + (Q_3 + Q_{cn})^2}}{N_T \times K_3}.$$

Номинальная мощность трехобмоточного трансформатора или автотрансформатора выбирается по справочным данным так же, как и двухобмоточного трансформатора, т.е. по условию

$$S_{m(at) \text{ ном}} \geq S_{m(at) \text{ расч}}.$$

Примеры решения задач

Пример 2.1.

Для участка сети, схема замещения которого приведена на рис. 11, составить расчетную схему замещения и определить приведенную и расчетную мощности нагрузки в узле 2. Линия W1 протяженностью 70 км выполнена проводом марки АСК-95, вторая, W2 - АСК-120, имеет протяженность 50 км. Номинальное напряжение сети - 110 кВ. На подстанции, подключенной к узлу 2, установлен трансформатор типа ТРДН-40000 /110. Мощность нагрузки составляет $24 + j18$ МВА.

Решение.

По табл. /12, 4/ определяем погонные параметры линий.

Провод АСК-95: $r_{01} = 0,314$ Ом /км; $x_{01} = 0,429$ Ом /км;

$$b_{01} = 2,65 \times 10^{-6} \text{ См /км}; q_1 = 3,5 \times 10^{-2} \text{ Мвар /км.}$$

Провод АСК-120: $r_{02} = 0,249$ Ом /км; $x_{02} = 0,423$ Ом /км;

$$b_{02} = 2,69 \times 10^{-6} \text{ См /км}; q_2 = 3,6 \times 10^{-2} \text{ Мвар /км.}$$

Трансформатор типа ТРДН - 40000 /110 согласно /14/ имеет следующие технические данные:

$$U_{\text{ном}} = 115 \text{ кВ}; u_k = 10,5 \%; DP_k = 175 \text{ кВт}; DP_x = 42 \text{ кВт}; I_x = 0,7 \%.$$

Определим параметры схемы замещения воздушных линий:

$$R_1 = r_{01} \lambda_1 = 0,314 \times 70 = 22 \text{ Ом},$$

$$X_1 = x_{01} \lambda_1 = 0,429 \times 70 = 30 \text{ Ом},$$

$$R_2 = r_{02} \lambda_2 = 0,249 \times 50 = 12,45 \text{ Ом},$$

$$X_2 = x_{02} \lambda_2 = 0,423 \times 50 = 21,15 \text{ Ом}.$$

Зарядные мощности половины длины каждой линии:

$$Q_{c12}^H = Q_{c12}^K = \frac{q_{01} \times l_1}{2} = \frac{3,5 \times 10^{-2} \times 70}{2} = 1125 \text{ квар},$$

$$Q_{c23}^H = Q_{c23}^K = \frac{q_{02} \times l_2}{2} = \frac{3,6 \times 10^{-2} \times 50}{2} = 900 \text{ квар}.$$

Трансформатор типа ТРДН - 40000 /110 - двухобмоточный с расщепленной обмоткой, однако он работает как двухобмоточный, т.к. расщепленные обмотки соединены параллельно.

Потери активной мощности в трансформаторе

$$DP_m = \frac{DP_k \times S_n^2}{S_{\text{ном}}^2} + DP_x = \frac{175(24^2 + 18^2)}{40^2} + 42 = 140,4 \text{ кВт}.$$

Потери реактивной мощности в трансформаторе:

$$DQ_m = \frac{u_{k,\%} \times S_{\text{ном}}^2}{100 \times S_{\text{ном}}} + \frac{I_{x,\%} \times S_{\text{ном}}}{100} = \frac{10,5(24^2 + 18^2) \times 10^3}{100 \times 40} + \frac{0,7 \times 40 \times 10^3}{100} = 2642 \text{ квар}.$$

Т.о., приведенная нагрузка подстанции к высокой стороне будет равна: $\underline{S}_{np} = P_n + DP_m + j(Q_n + DQ_m) =$

$$= 24000 + 140,4 + j(18000 + 2642) = 24140,4 + j20642 \text{ кВА}.$$

Расчетная нагрузка узла включает в себя, кроме приведенной, половины зарядных мощностей примыкающих к узлу линий:

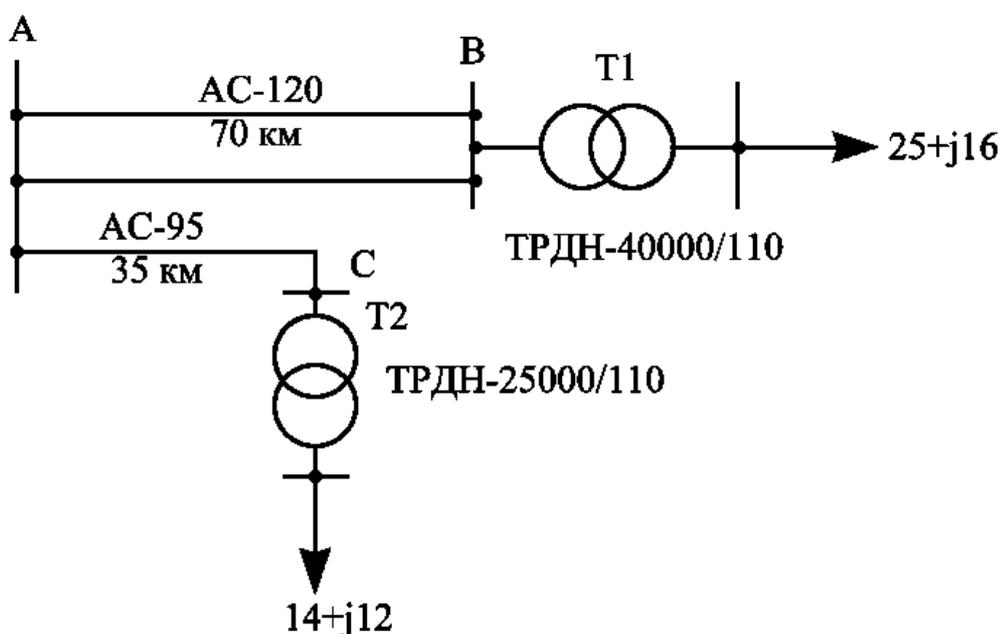
$$\underline{S}_p = \underline{S}_{np} - j(Q_{c12}^K + Q_{c23}^H) = 24140,4 + j20642 - j(1125 + 900) = 24140,4 + j18517 \text{ кВА}.$$

Схема замещения участка сети показана на рис.12.

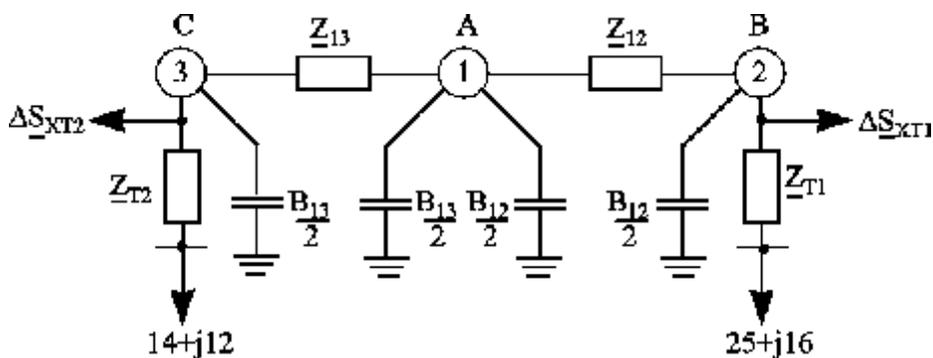
Листинг
примеров решения задач по разделу 2.1
в программе MathCad фирмы MathSoft

Пример 2.2.

Разомкнутая сеть 110 кВ связывает подстанции В и С с источником питания А. Составить схему замещения, рассчитать ее параметры и определить расчетную нагрузку в узлах. Мощность нагрузки приведена в МВА.



Составляем схему замещения



Определяем параметры схемы замещения.

По справочным данным находим погонные активные сопротивления линий, а индуктивные сопротивления и емкостные проводимости рассчитываем аналитически по выражениям (6), (22)

$$Z_{12} := \left[0.27 \cdot 70 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{7.65} \right) + 0.0157 \right) \cdot 70 \right] \right] \cdot \frac{1}{2}$$

$$Z_{12} = 9.45 + 14.788i \quad \text{Ом}$$

$$Z_{23} := 0.33 \cdot 35 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{6.95} \right) + 0.0157 \right) \cdot 35 \right]$$

$$Z_{23} = 11.55 + 14.999i \quad \text{Ом}$$

$$b_{012} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{5000}{7.65} \right)} \cdot 10^{-6} \cdot 2$$

$$b_{012} = 5.385 \cdot 10^{-6} \quad \text{См}$$

$$b_{013} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{5000}{6.95} \right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{013} = 2.653 \cdot 10^{-6} \quad \text{См}$$

Находим потери мощности в силовых трансформаторах по выражениям (72), (74), определив по справочным данным /14/ сопротивления трансформаторов $R_{T1}=1,44 \text{ Ом}$, $X_{T1}=34,8 \text{ Ом}$, $R_{T2}=2,54 \text{ Ом}$, $X_{T2}=55,90 \text{ Ом}$, а также потери мощности холостого хода: $DP_{xT1}=42 \text{ кВт}$, $DP_{xT2}=29 \text{ кВт}$, $DQ_{xT1}=280 \text{ квар}$, $DQ_{xT2}=200 \text{ квар}$.

$$DP_{t1} := \frac{25^2 + 16^2}{110^2} \cdot 1.44 + 0.042$$

$$DP_{t1} = 0.147 \quad \text{МВт}$$

$$DQ_{t1} := \frac{25^2 + 16^2}{110^2} \cdot 34.8 + 0.280$$

$$DQ_{t1} = 2.814 \quad \text{Мвар}$$

$$DP_{t2} := \frac{14^2 + 12^2}{110^2} \cdot 2.54 + 0.029$$

$$DP_{t2} = 0.1 \quad \text{МВт}$$

$$D Q_{t2} := \frac{14^2 + 12^2}{110^2} \cdot 55.9 + 0.200$$

$$D Q_{t2} = 1.771 \text{ Мвар}$$

Находим приведенную нагрузку узлов 2 и 3

$$S_{pr2} := 25 + D P_{t1} + j \cdot (16 + D Q_{t1}) \quad S_{pr2} = 25.147 + 18.814i \text{ МВА}$$

$$S_{pr3} := 14 + D P_{t2} + j \cdot (12 + D Q_{t2}) \quad S_{pr3} = 14.1 + 13.771i \text{ МВА}$$

Находим значения зарядных мощностей

$$Q_{c12} := \frac{1}{2} \cdot 110^2 \cdot b_{012} \cdot 70 \quad Q_{c12} = 2.28 \text{ Мвар}$$

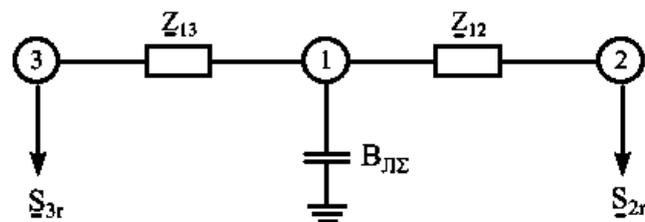
$$Q_{c13} := \frac{1}{2} \cdot 110^2 \cdot b_{012} \cdot 35 \quad Q_{c13} = 1.14 \text{ Мвар}$$

Находим расчетную нагрузку узлов 2 и 3

$$S_{r2} := S_{pr2} - j \cdot Q_{c12} \quad S_{r2} = 25.147 + 16.533i \text{ МВА}$$

$$S_{r3} := S_{pr3} - j \cdot Q_{c13} \quad S_{r3} = 14.1 + 12.631i \text{ МВА}$$

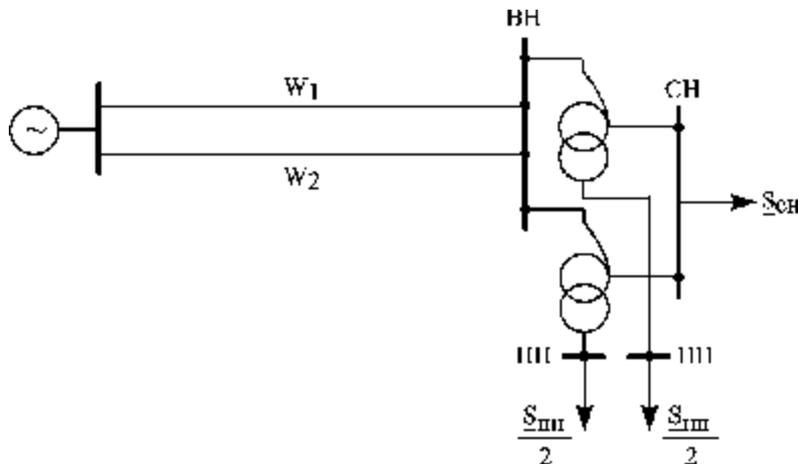
Окончательная схема замещения сети имеет вид:



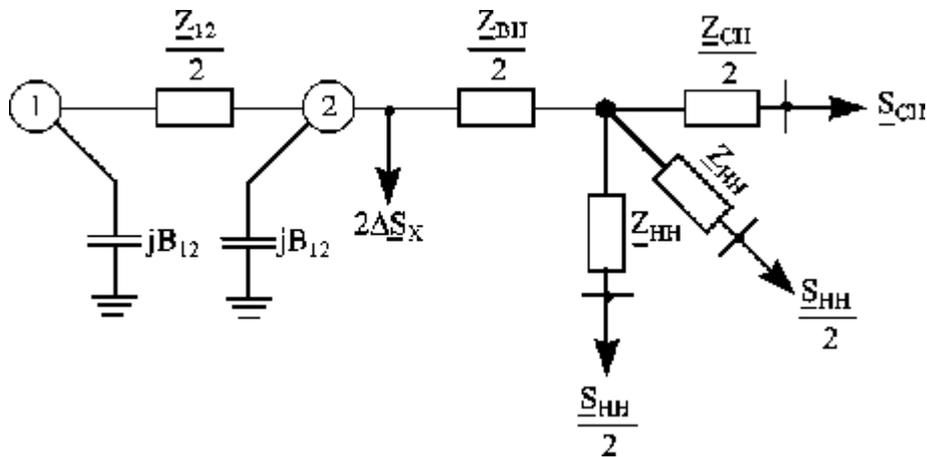
Пример 2.3.

От электростанции по линиям W1 и W2 получает питание районная подстанция, на которой установлены два автотрансформатора типа АТДЦТН-125000/220/110, работающих на общую нагрузку по стороне среднего напряжения. Линии W1 и W2 выполнены проводом АС-300/39 длиной 150 км, нагрузка средней стороны составляет $100+j40$ МВА, низкой стороны - $50+j15$ МВА. Определить расчетную нагрузку узла и составить схему замещения участка сети.

Однолинейная схема участка сети будет иметь вид



Составляем схему замещения участка сети.



Определяем по справочным данным /2/ погонные активное и индуктивное сопротивление ($r_0=0,098$ Ом/км, $x_0=0,429$ Ом/км), емкостную проводимость линий ($b_{0w} := 2.64 \cdot 10^{-6}$ См). Тогда полное сопротивление линий

$$z_w := (0.098 \cdot 150 + j \cdot 0.429 \cdot 150) \cdot \frac{1}{2} \qquad z_w = 7.35 + 32.175i \text{ Ом.}$$

Каталожные данные автотрансформатора находим по /5/:

$$\begin{aligned} U_{vn} &:= 230 \text{ кВ}; & U_{cn} &:= 121 \text{ кВ}; & U_{nn} &:= 11 \text{ кВ}; \\ U_{kvncn\%} &:= 11 \%; & U_{kvnnn\%} &:= 31 \%; & U_{kcnnn\%} &:= 19 \%; \\ DP_k &:= 0.29 \text{ МВт}; & I_{x\%} &:= 0.5 \%; & DQ_x &:= 0.625 \text{ Мвар}; & DP_x &:= 0.085 \text{ МВт}. \end{aligned}$$

Сопротивления автотрансформатора согласно /5/ равны

$$R_{tvn} := 0.5 \text{ Ом}; \qquad R_{tcn} := 0.5 \text{ Ом}; \qquad R_{tnn} := 1 \text{ Ом};$$

$$X_{tvn} := 48.6 \text{ Ом}; \quad X_{tcn} := 0 \text{ Ом}; \quad X_{tnn} := 82.5 \text{ Ом}.$$

Рассчитываем потери мощности в обмотке среднего напряжения

$$D S_{ts} := \frac{100^2 + 40^2}{220^2} \cdot \left(\frac{R_{tcn} + j \cdot X_{tcn}}{2} \right) \quad D S_{ts} = 0.06 \text{ МВА}.$$

Определяем потери мощности в обмотке низкого напряжения при условии, что каждая обмотка питает половину нагрузки

$$D S_{tn} := \frac{25^2 + 7.5^2}{220^2} \cdot (R_{tnn} + j \cdot X_{tnn}) \quad D S_{tn} = 0.014 + 1.161i \text{ МВА}.$$

Тогда мощность обмотки высокого напряжения равна

$$S_{vn} := 2 \cdot (25 + j \cdot 7.5 + D S_{tn}) + 100 + j \cdot 40 + D S_{ts} \\ S_{vn} = 150.088 + 57.322i \text{ МВА}.$$

Определяем суммарные потери мощности в автотрансформаторе

$$D P_t := 2 \cdot \frac{25^2 + 7.5^2}{220^2} \cdot R_{tnn} + \frac{100^2 + 40^2}{220^2} \cdot \left(\frac{R_{tcn}}{2} \right) + \frac{\text{Re}(S_{vn})^2 + \text{Im}(S_{vn})^2}{220^2} \cdot \frac{R_{tvn}}{2} + 2 \cdot D P_x \\ D P_t = 0.391 \text{ МВт},$$

$$D Q_t := 2 \cdot \frac{25^2 + 7.5^2}{220^2} \cdot X_{tnn} + \frac{100^2 + 40^2}{220^2} \cdot \left(\frac{X_{tcn}}{2} \right) + \frac{\text{Re}(S_{vn})^2 + \text{Im}(S_{vn})^2}{220^2} \cdot \frac{X_{tvn}}{2} + 2 \cdot D Q_x \\ D Q_t = 15.452 \text{ Мвар}.$$

Приведенная нагрузка автотрансформатора

$$S_{pr} := 100 + j \cdot 40 + 50 + j \cdot 15 + D P_t + D Q_t \quad S_{pr} = 165.843 + 55i \text{ МВА}.$$

Зарядная мощность линии равна

$$Q_{cw} := 220^2 \cdot b_{0w} \cdot 150 \quad Q_{cw} = 19.166 \text{ Мвар}.$$

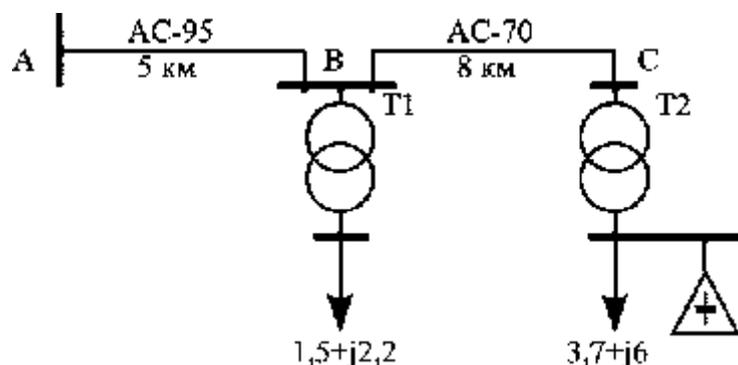
Расчетная нагрузка автотрансформатора

$$S_r := S_{pr} - j \cdot Q_{cw} \quad S_r = 165.843 + 35.834i \text{ МВА}.$$

Задачи для самостоятельного решения

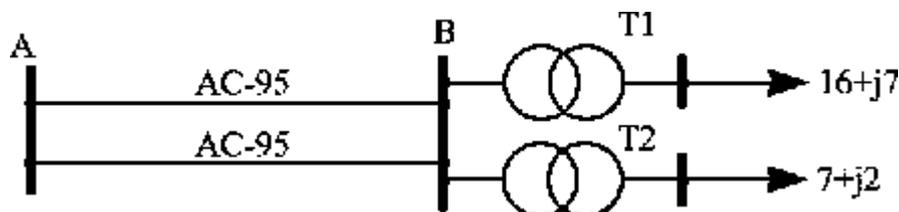
№1

Схема сети 35 кВ приведена на рисунке. На подстанции В установлен трансформатор типа ТМН-4000/35. Нагрузка в МВА показана на рисунке. На подстанции С установлен трансформатор типа ТМН-6300/35. Длины участков линий указаны в километрах, марки проводов приведены на схеме. На подстанции С установлена батарея конденсаторов $Q_{\text{БК}}=4,5$ Мвар. Построить схему замещения сети, определить ее параметры и расчетную мощность в узлах нагрузки.



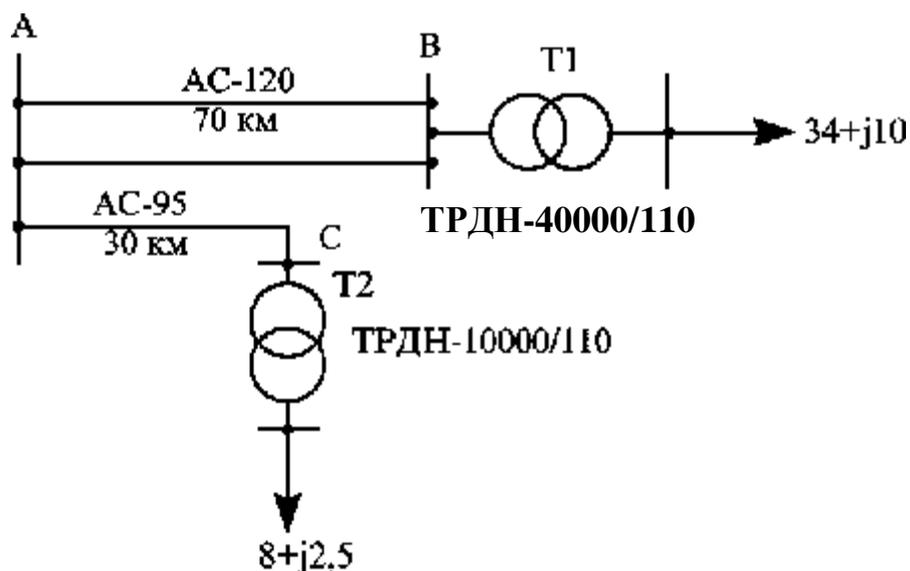
№2

Подстанция, на которой установлены трансформаторы типа ТРДН-25000/35 (Т1) и типа ТДН-10000/35 (Т2), получает питание по двухцепной ЛЭП протяженностью 7 км. Нагрузка в МВА показана на рисунке. Построить схему замещения сети 35 кВ и рассчитать ее параметры, а также рассчитать мощность нагрузок в узлах.



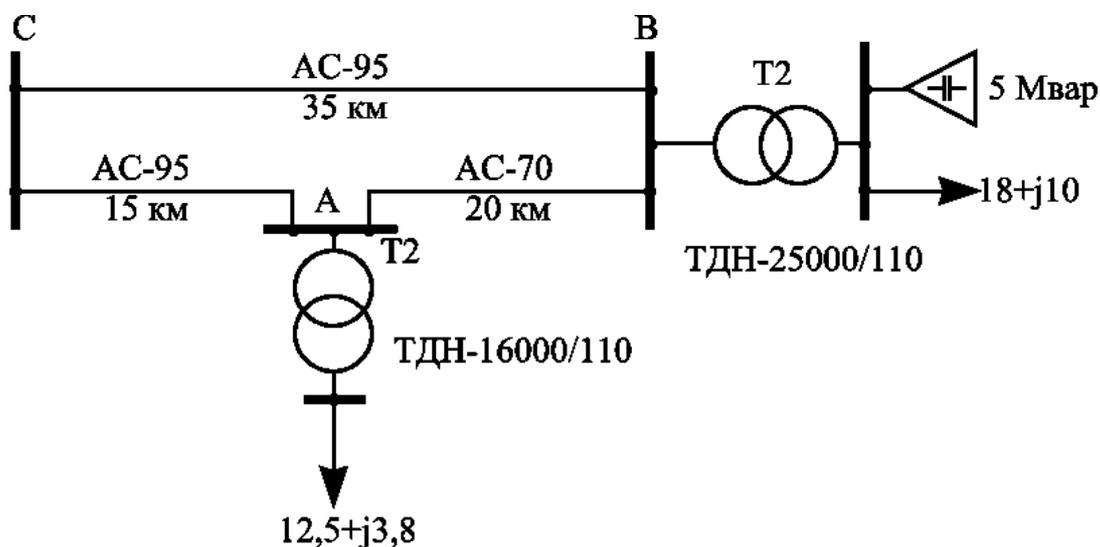
№3

Разомкнутая сеть 110 кВ связывает подстанции В и С с источником питания А. Составить схему замещения, рассчитать ее параметры и определить расчетную нагрузку в узлах.



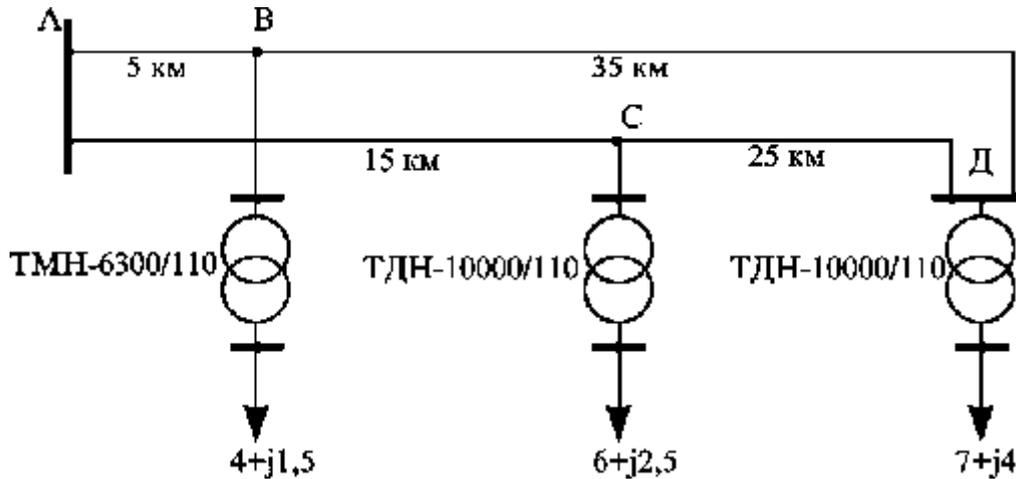
№4

Две подстанции получают энергию от источника питания С по кольцевой сети 110 кВ. На подстанции В установлена батарея конденсаторов мощностью 5 Мвар. Построить схему замещения сети, определить ее параметры и расчетные мощности нагрузок.



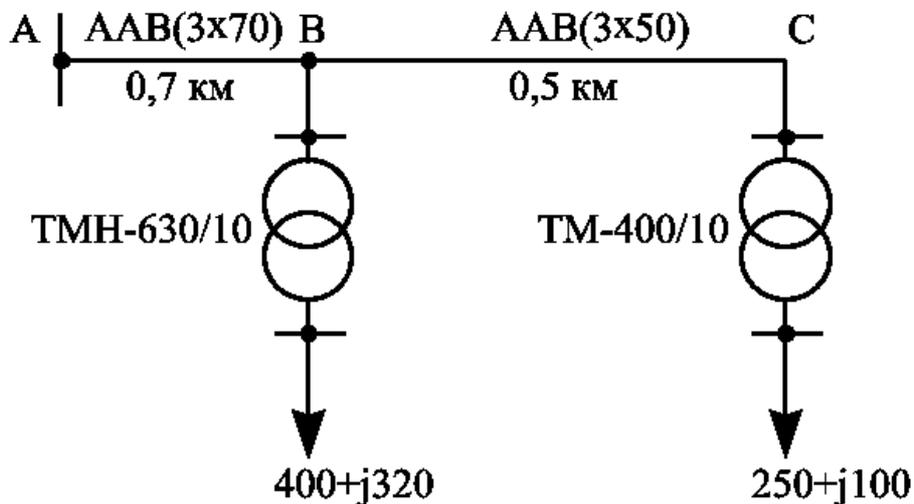
№5

Магистральная двухцепная линия 110 кВ связывает источник питания с подстанцией Д. К этой линии подключены подстанции В и С. Составить схему замещения, определить ее параметры и расчетные мощности нагрузок в узлах. Марка и сечение провода АС-120 заданы до точек В и С, АС-95 – от точек В и С до точки Д. Нагрузка в МВА показана на рисунке.



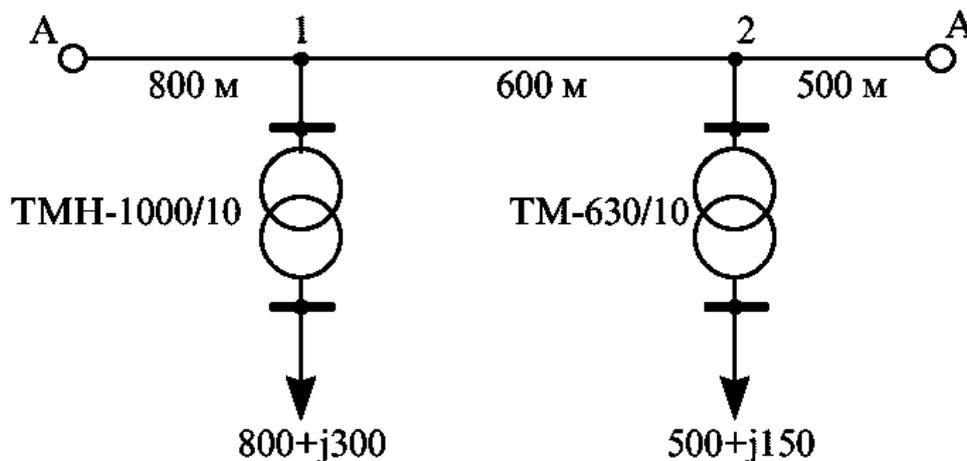
№6

Сеть 10 кВ выполнена кабелями с алюминиевыми жилами с бумажной изоляцией. Длины участков указаны в километрах, нагрузка - в кВА. Составить расчетную схему замещения, определить ее параметры и расчетную нагрузку в узлах.



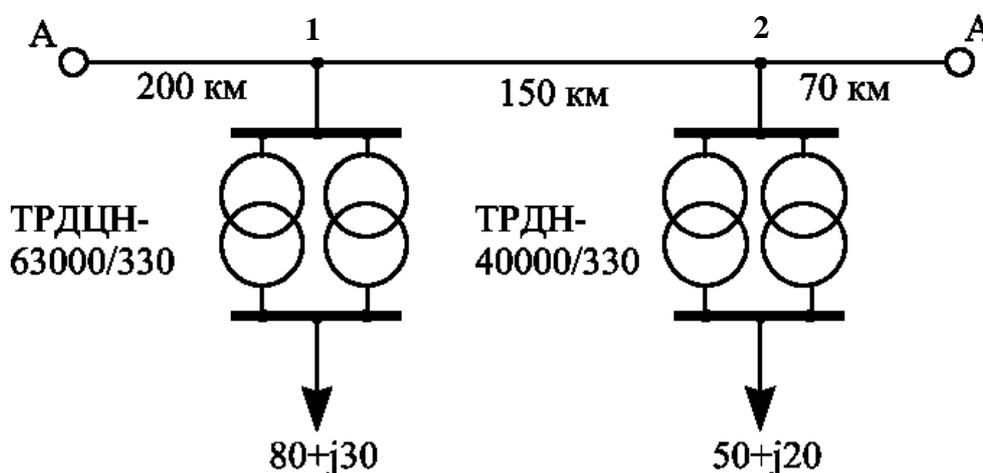
№7

Кольцевая сеть 10 кВ выполнена кабельными линиями с алюминиевыми жилами сечением 50 мм^2 и связывает подстанции 1 и 2 с источником питания А. Построить схему замещения, определить ее параметры, а также расчетную нагрузку узлов. Нагрузка подстанций дана в кВА.



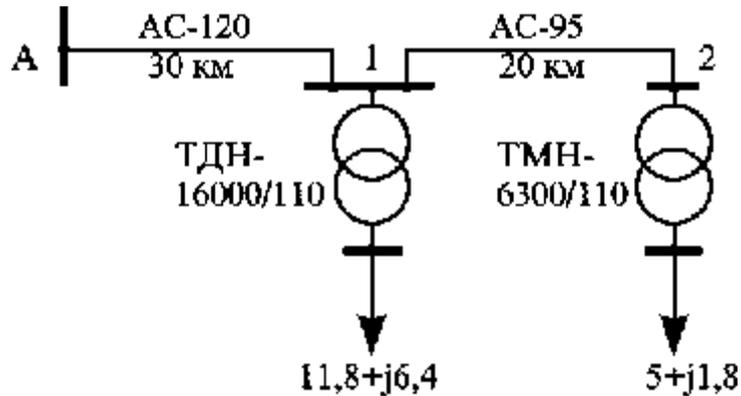
№8

Сеть 330 кВ обеспечивает электроэнергией подстанции 1 и 2. Сеть выполнена проводом марки АСКП-240 с расщеплением проводов в фазе на два. Среднегеометрическое расстояние между фазами 8 м, между проводами в фазах - 40 см. Построить схему замещения, определить ее параметры и расчетную нагрузку узлов.



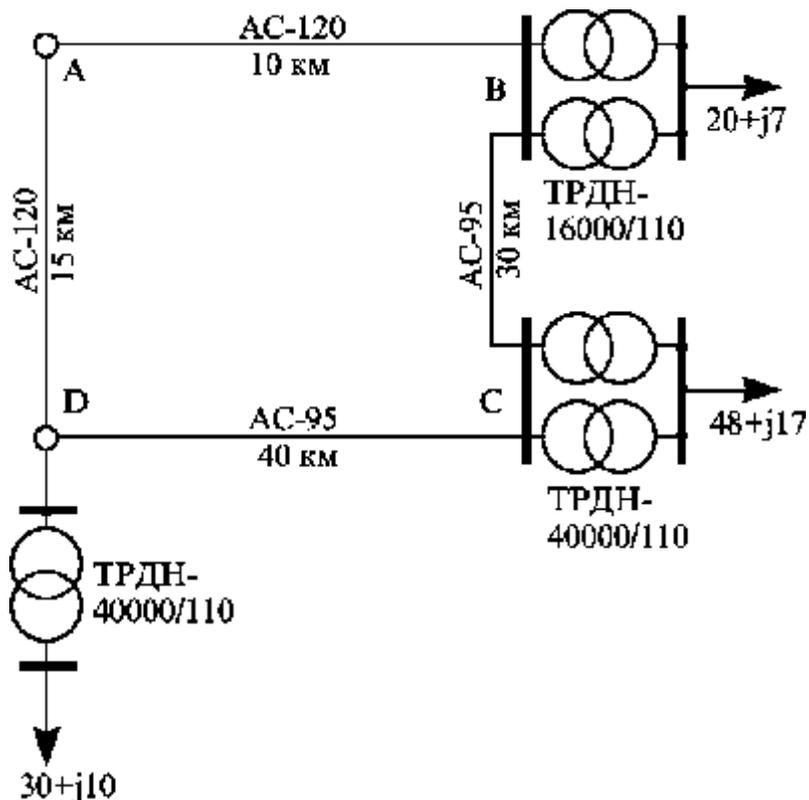
№9

В связи с увеличением нагрузки в узле 2 вдвое, однотрансформаторная подстанция стала двухтрансформаторной. Необходимо определить, насколько изменится мощность, отбираемая от источника. Составить схему замещения и определить ее параметры, расчетную нагрузку узлов.



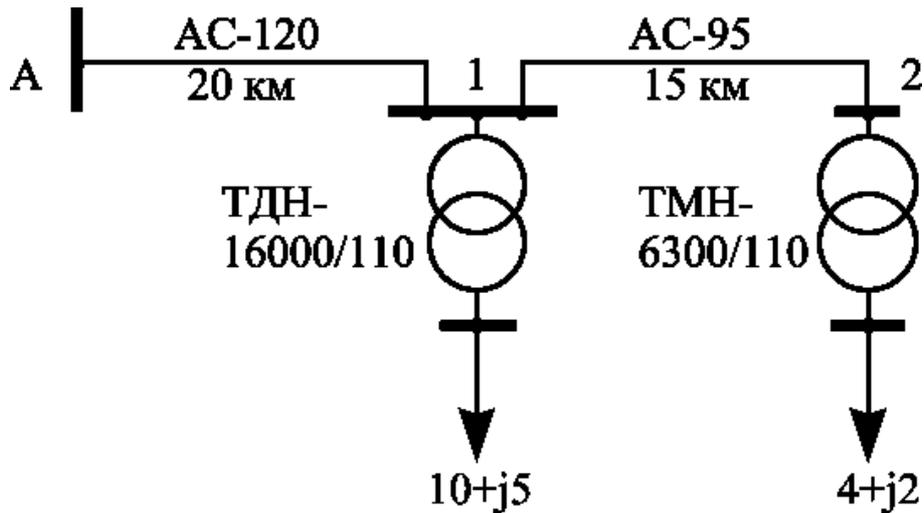
№10

Напряжение источника А равно 121 кВ. Рассчитать параметры схемы замещения кольцевой сети, построить ее и определить расчетную нагрузку узлов.



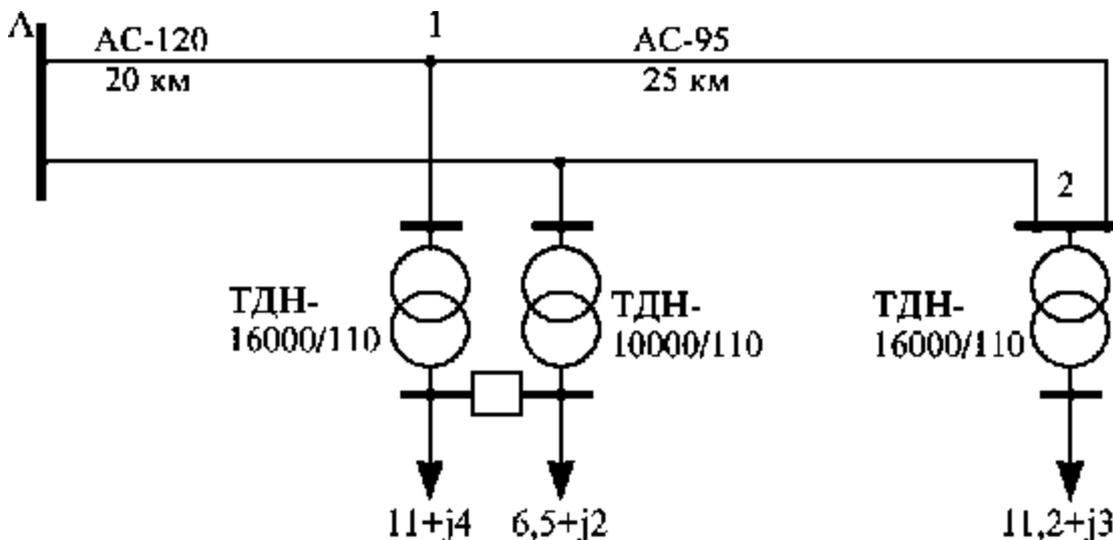
№11

В узле 1 нагрузка увеличилась вдвое, в связи с этим установлен второй трансформатор, и линия 1 стала двухцепной. Построить схему замещения, рассчитать ее параметры и расчетную нагрузку в узлах.



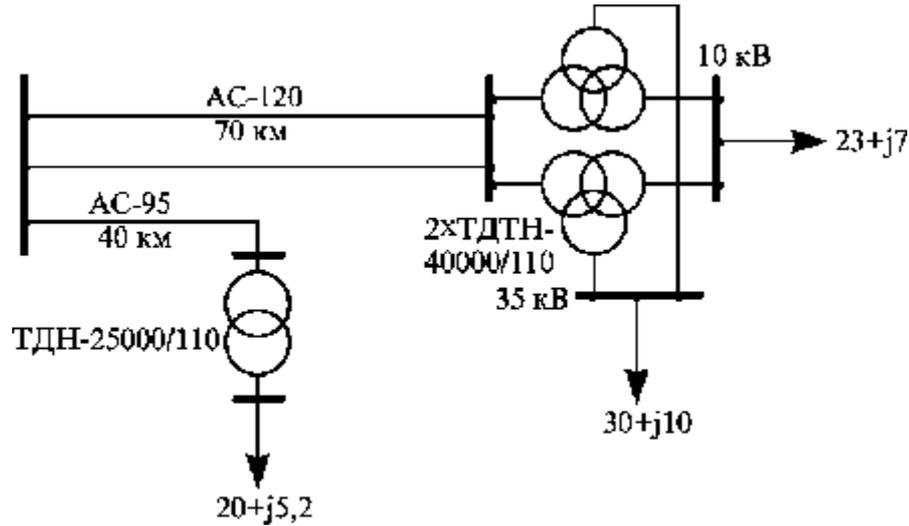
№12

Напряжение источника питания 110 кВ. Нагрузка в МВА показана на рисунке. Составить схему замещения сети, рассчитав ее параметры и расчетную мощность в узлах нагрузки.



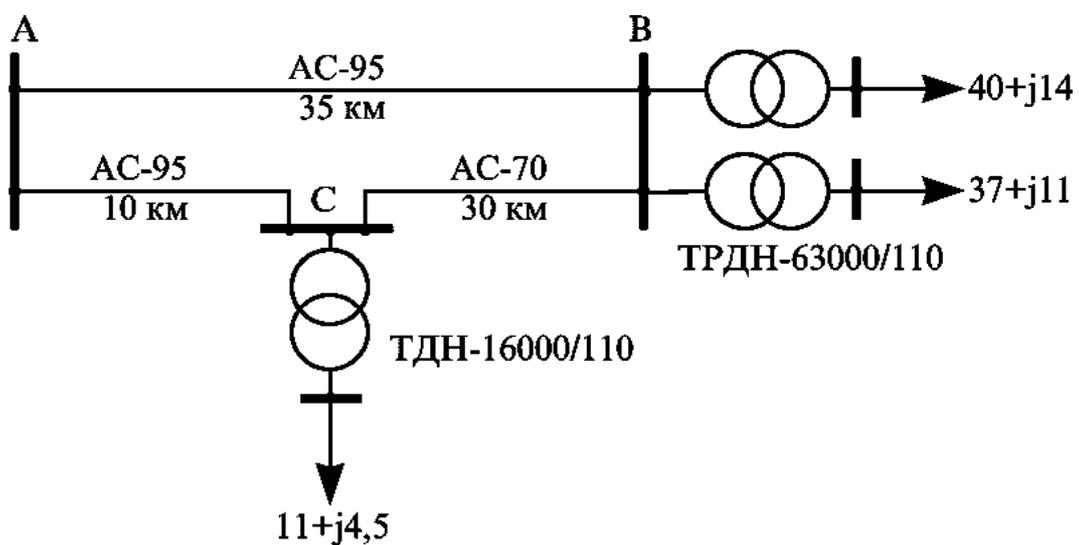
№13

Нагрузка подстанций дана в МВА. Составить схему замещения, определить ее параметры и расчетную мощность узлов.



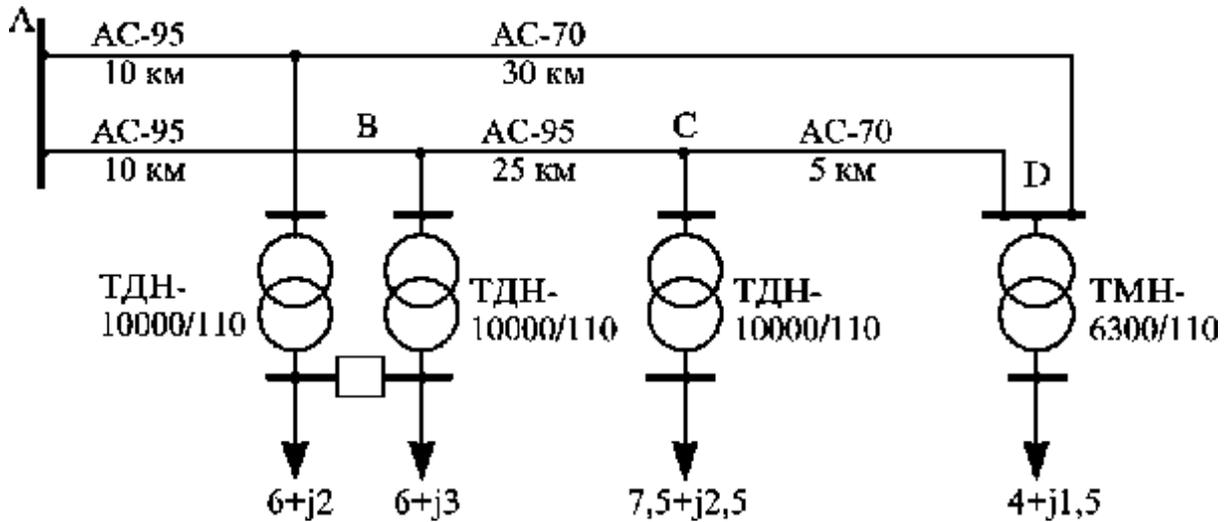
№14

Напряжение источника $U_A=110$ кВ. Две подстанции получают питание по кольцевой сети от источника питания А. Составить схему замещения, определить ее параметры и расчетную нагрузку узлов.



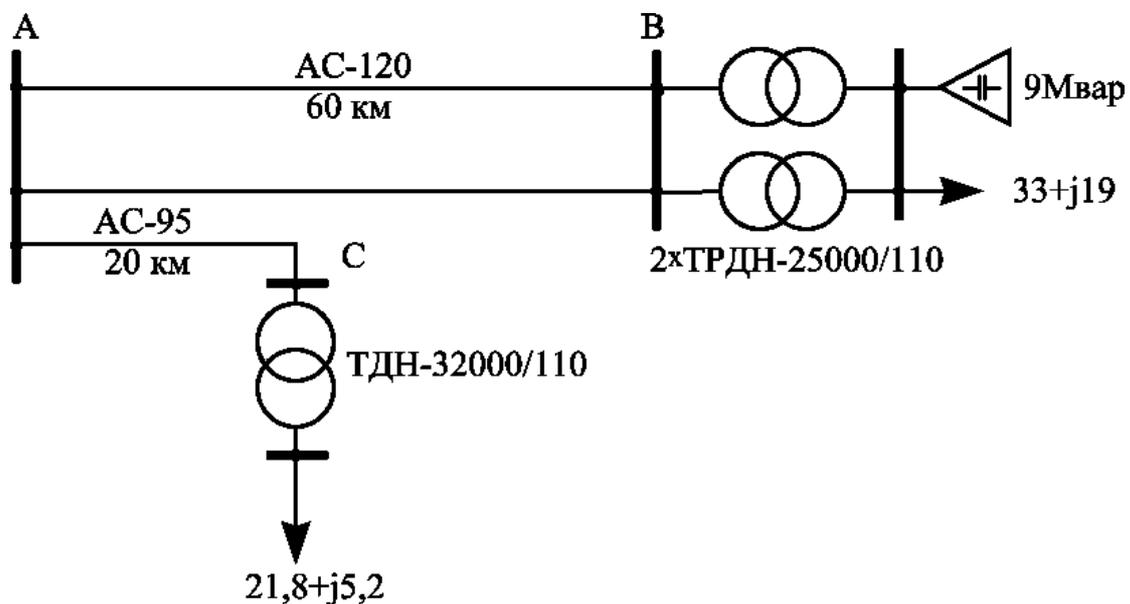
№15

Магистральная двухцепная линия 110 кВ связывает источник питания с подстанцией D. К этой линии подключены подстанции В и С. Составить схему замещения, рассчитать ее параметры и расчетные мощности нагрузок в узлах.



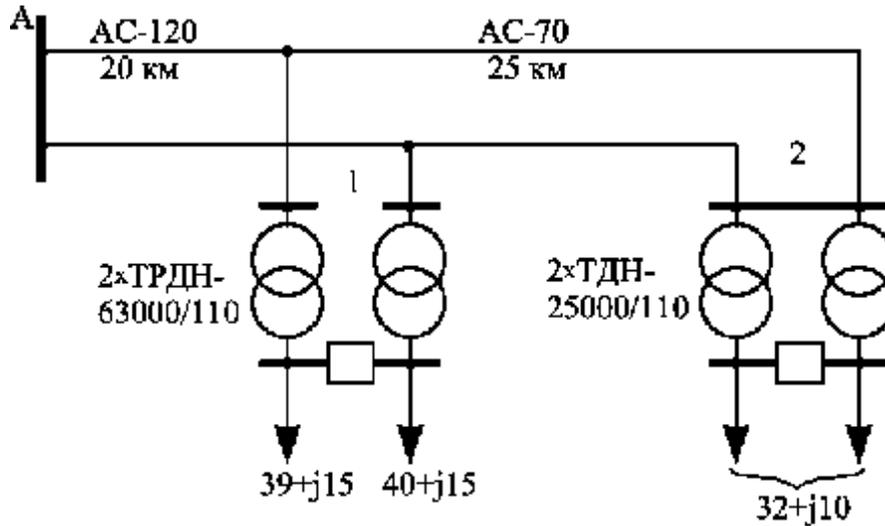
№16

Разомкнутая сеть 110 кВ связывает подстанции В и С с источником питания А. Составить схему замещения, рассчитать ее параметры и определить расчетную нагрузку в узлах. Нагрузка потребителей дана в МВА.



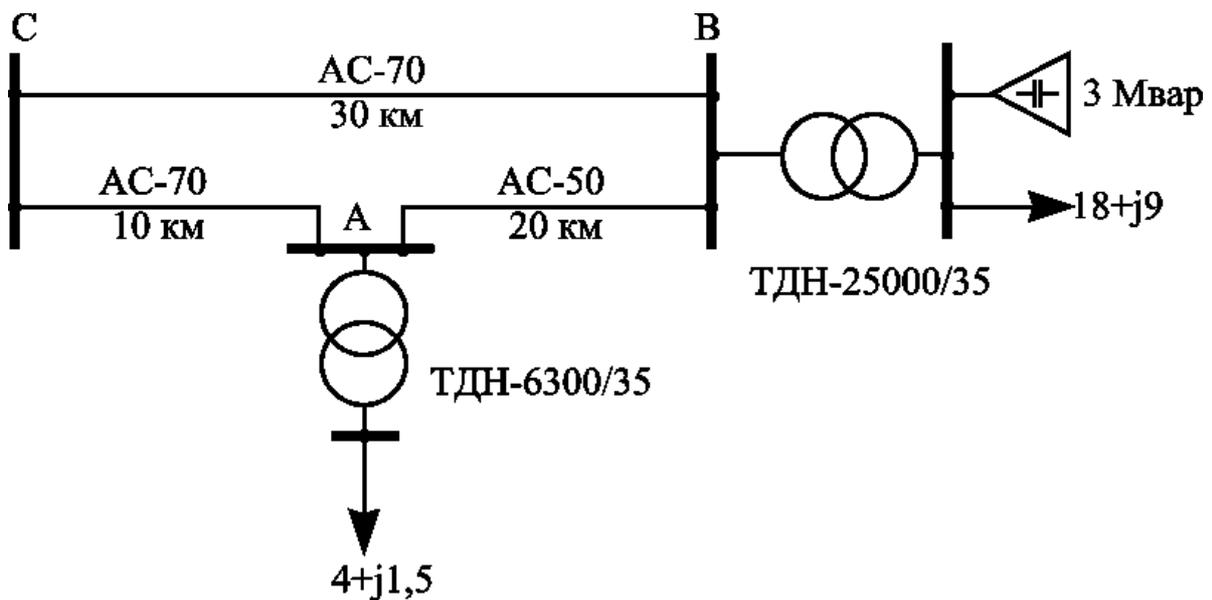
№17

Напряжение источника питания 110 кВ. Составить схему замещения сети, определить ее параметры и расчетные нагрузки узлов.



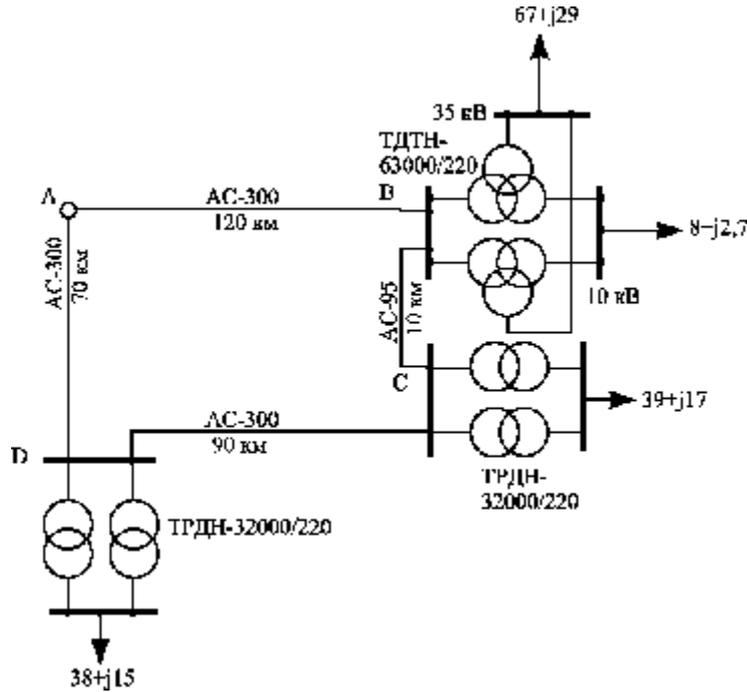
№18

Две подстанции получают энергию от источника питания С кольцевой сети 110 кВ. На подстанции В установлены батареи конденсаторов (БК). Построить схему замещения сети, рассчитать ее параметры и расчетные мощности нагрузок.



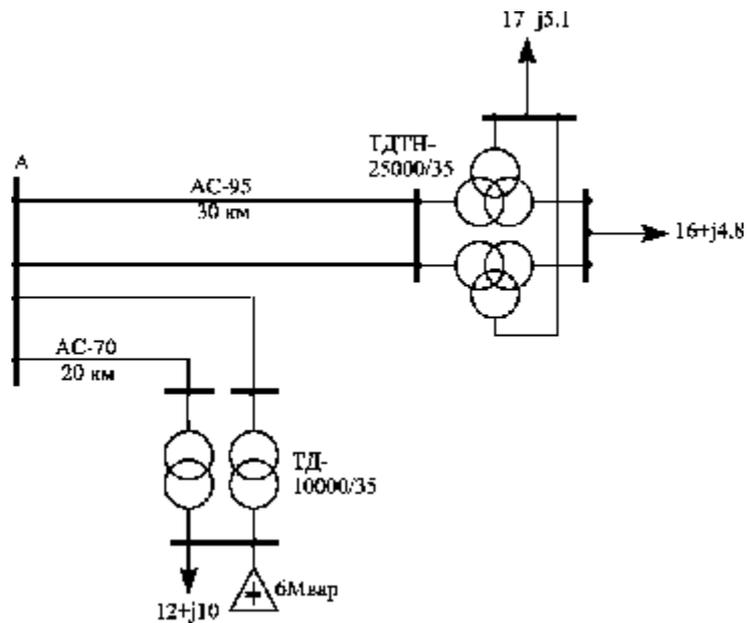
№19

Напряжение источника А равно 221 кВ. Рассчитать параметры схемы замещения кольцевой сети, построить ее и определить расчетную нагрузку узлов.



№20

Составить схему замещения, определить ее параметры и определить расчетную нагрузку узлов.



Примечание: если не указана размерность нагрузок потребителей, то она принимается в МВА.

2.2. Расчет разомкнутой сети

2.2.1. Понятия падения и потери напряжения. Векторные диаграммы

Под разомкнутой сетью понимают такую сеть, питание которой можно осуществить только с одной стороны. Разомкнутая сеть не содержит контуров. Примеры вариантов выполнения разомкнутых сетей приведены на рис. 15.

Здесь (рис. 15а) показана радиальная разомкнутая сеть, на рис. 15б - магистраль, на рис. 15в - разветвленная разомкнутая сеть.

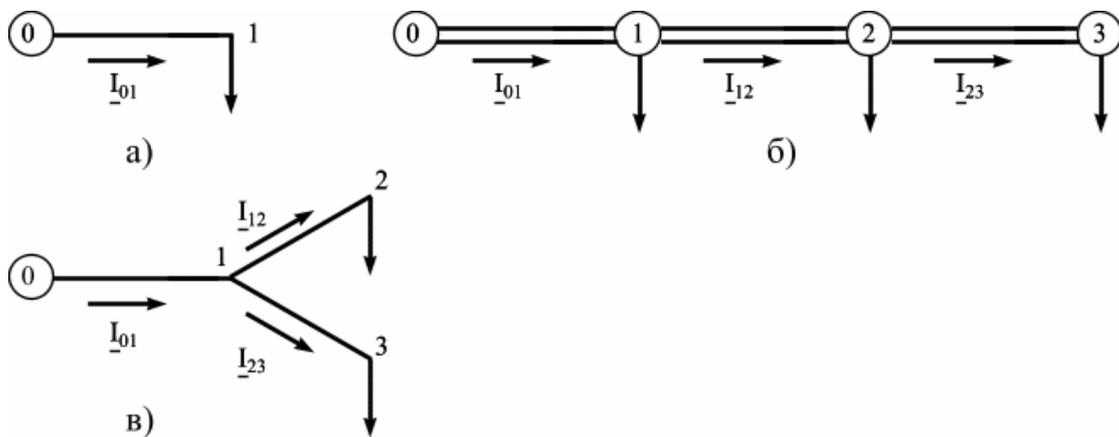


Рис. 15. Варианты выполнения разомкнутых сетей

Независимо от конфигурации разомкнутой сети для расчета ее режимов используется единый алгоритм.

Прежде чем рассматривать алгоритм расчета режимов таких сетей, необходимо ввести понятия падения и потери напряжения.

Под падением напряжения понимают векторную (геометрическую) разность между комплексами напряжений начала и конца линии

$$\underline{U}_D = DU + jdU, \quad (83)$$

где DU - продольная составляющая падения напряжения, т.е. проекция падения напряжения на действительную ось;

dU - поперечная составляющая падения напряжения, т.е. проекция падения напряжения на мнимую ось.

Падение напряжения на участке сети (рис. 16) можно определить через потоки мощности и напряжение в конце участка сети либо через потоки мощности и напряжение в начале участка.

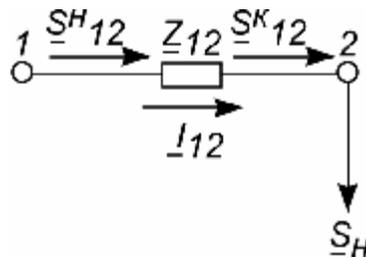


Рис. 16. Простейшая схема замещения участка сети

В первом случае (см. рис. 16) падение напряжения можно определить, выражая ток, протекающий по участку 12 через мощность в конце участка:

$$\begin{aligned} \underline{U}_D &= \sqrt{3} \underline{I}_{12} \underline{Z}_{12} = \sqrt{3} \frac{S_{12}^{*K}}{\sqrt{3} U_2^*} \underline{Z}_{12} = \frac{P_{12}^K - jQ_{12}^K}{U_2^*} (R_{12} + jX_{12}) = \\ &= \frac{P_{12}^K R_{12} + Q_{12}^K X_{12}}{U_2^*} + j \frac{P_{12}^K X_{12} - Q_{12}^K R_{12}}{U_2^*}. \end{aligned} \quad (84)$$

Если \underline{U}_2 задано только модулем, то продольную и поперечную составляющие падения напряжения, определенные по нагрузке в конце участка сети, можно записать в следующем виде:

$$DU = \frac{P_{12}^K R_{12} + Q_{12}^K X_{12}}{U_2}; \quad dU = \frac{P_{12}^K X_{12} - Q_{12}^K R_{12}}{U_2}. \quad (85)$$

На векторной диаграмме (см. рис. 17а) показаны напряжения в начале и в конце участка и падение напряжения на нем. При построении векторной диаграммы известное напряжение в конце участка U_2 располагаем вдоль действительной оси, затем строим продольную и поперечную составляющие падения напряжения, определенные по

2.2. Расчет разомкнутой сети

2.2.1. Понятия падения и потери напряжения. Векторные диаграммы

Под разомкнутой сетью понимают такую сеть, питание которой можно осуществить только с одной стороны. Разомкнутая сеть не содержит контуров. Примеры вариантов выполнения разомкнутых сетей приведены на рис. 15.

Здесь (рис. 15а) показана радиальная разомкнутая сеть, на рис. 15б - магистраль, на рис. 15в - разветвленная разомкнутая сеть.

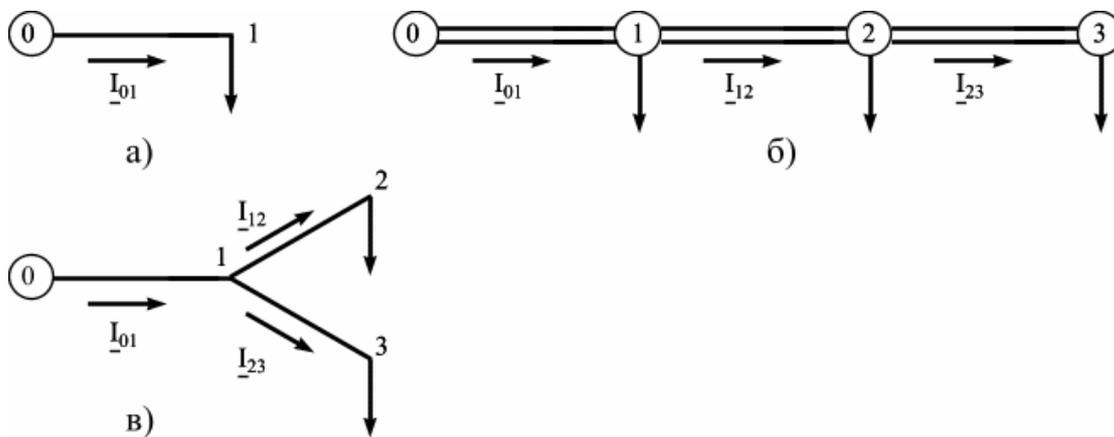


Рис. 15. Варианты выполнения разомкнутых сетей

Независимо от конфигурации разомкнутой сети для расчета ее режимов используется единый алгоритм.

Прежде чем рассматривать алгоритм расчета режимов таких сетей, необходимо ввести понятия падения и потери напряжения.

Под падением напряжения понимают векторную (геометрическую) разность между комплексами напряжений начала и конца линии

$$\underline{U}_D = DU + jdU, \quad (83)$$

где DU - продольная составляющая падения напряжения, т.е. проекция падения напряжения на действительную ось;

dU - поперечная составляющая падения напряжения, т.е. проекция падения напряжения на мнимую ось.

Падение напряжения на участке сети (рис. 16) можно определить через потоки мощности и напряжение в конце участка сети либо через потоки мощности и напряжение в начале участка.

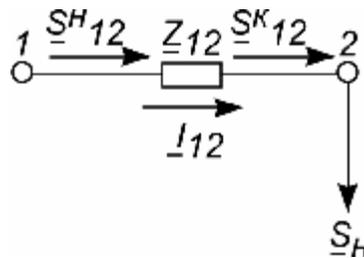


Рис. 16. Простейшая схема замещения участка сети

В первом случае (см. рис. 16) падение напряжения можно определить, выражая ток, протекающий по участку 12 через мощность в конце участка:

$$\begin{aligned} \underline{U}_D &= \sqrt{3} \underline{I}_{12} \underline{Z}_{12} = \sqrt{3} \frac{S_{12}^{*K}}{\sqrt{3} U_2^*} \underline{Z}_{12} = \frac{P_{12}^K - jQ_{12}^K}{U_2^*} (R_{12} + jX_{12}) = \\ &= \frac{P_{12}^K R_{12} + Q_{12}^K X_{12}}{U_2^*} + j \frac{P_{12}^K X_{12} - Q_{12}^K R_{12}}{U_2^*}. \end{aligned} \quad (84)$$

Если \underline{U}_2 задано только модулем, то продольную и поперечную составляющие падения напряжения, определенные по нагрузке в конце участка сети, можно записать в следующем виде:

$$DU = \frac{P_{12}^K R_{12} + Q_{12}^K X_{12}}{U_2}; \quad dU = \frac{P_{12}^K X_{12} - Q_{12}^K R_{12}}{U_2}. \quad (85)$$

На векторной диаграмме (см. рис. 17а) показаны напряжения в начале и в конце участка и падение напряжения на нем. При построении векторной диаграммы известное напряжение в конце участка U_2 располагаем вдоль действительной оси, затем строим продольную и поперечную составляющие падения напряжения, определенные по

нагрузке в конце участка, падение напряжения и напряжение в начале участка.

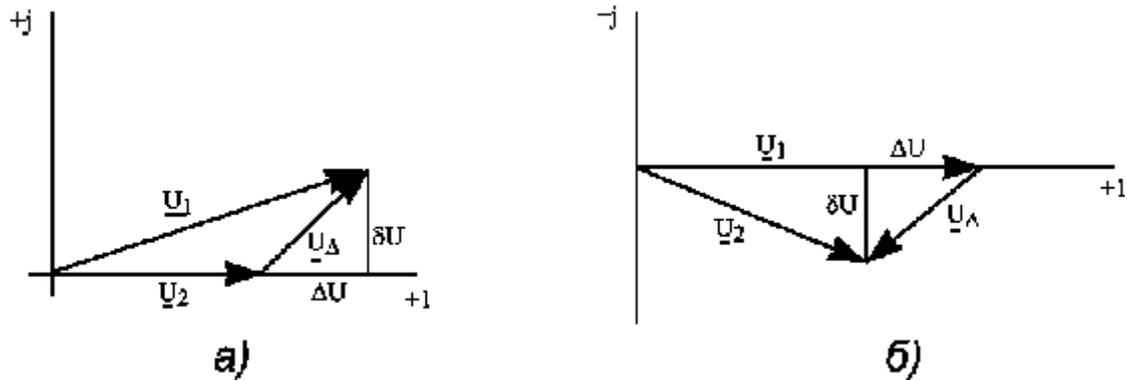


Рис. 17. Векторная диаграмма напряжений:

а) при известном напряжении в конце линии;

б) при известном напряжении в начале линии.

Следовательно:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \underline{U}_D = \underline{U}_2 + DU_{12} + jdU_{12}. \quad (86)$$

Модуль и фаза U_1 равны:

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + DU_{12})^2 + dU_{12}^2}. \quad (87)$$

$$j_{U_1} = \arctg \frac{dU_{12}}{U_2 + DU_{12}}. \quad (88)$$

Во втором случае известен поток мощности и напряжение в начале участка. Выражая ток, протекающий по участку, через известные параметры, падение напряжения на участке сети можно записать в следующем виде:

$$\underline{U}_D = \frac{P_{12}'' \times R_{12} + Q_{12}'' \times X_{12}}{U_1^*} + j \frac{P_{12}'' \times X_{12} - Q_{12}'' \times R_{12}}{U_1^*} \quad (89)$$

или при задании \underline{U}_1 модулем:

$$DU = \frac{P_{12}'' \times R_{12} + Q_{12}'' \times X_{12}}{U_1}; \quad (90)$$

$$dU = \frac{P_{12}'' \times X_{12} - Q_{12}'' \times R_{12}}{U_1}.$$

Векторная диаграмма для данного случая имеет вид, показанный на рис. 176.

Откуда

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 - \underline{U}_D = \underline{U}_1 - DU_{12} - jdU_{12}. \quad (91)$$

Модуль и фаза \underline{U}_2 равны:

$$U_2 = \sqrt{(U_1 - DU_{12})^2 + dU_{12}^2}. \quad (92)$$

$$j_{U_2} = \text{arctg} \frac{dU_{12}}{U_1 - DU_{12}}. \quad (93)$$

Необходимо отметить тот факт, что проекции падения напряжения на действительную и мнимую оси в первом и во втором случаях не равны между собой при одном и том же векторе падения напряжения.

Учитывая тот факт, что в условиях эксплуатации более точно определяются мощности нагрузок, а не токи, рассмотрим алгоритм расчета рабочих режимов разомкнутых сетей при указанном способе задания исходных данных.

2.2.2. Расчет режима при известных нагрузках и напряжении в конце разомкнутой сети

Алгоритм расчета сети рассмотрим на примере схемы, приведенной на рис. 18.

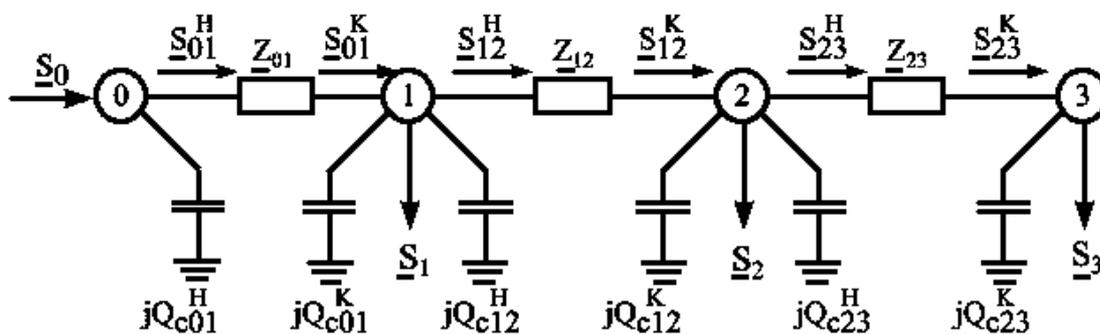


Рис. 18. Расчетная схема сети

Здесь нагрузки в узлах 1, 2, 3 заданы приведенными мощностями. Источник питания показан узлом 0, напряжение известно в узле 3, т.е. в конце рассматриваемой сети.

Расчет состоит в последовательном определении мощностей и напряжений от конца сети к началу.

1. Определяем зарядную мощность линии 23 в конце последнего участка сети, т.е. в конце участка 23:

$$Q_{c23}^k = \frac{j b_{23} l_{23} U_3^2}{2}. \quad (94)$$

2. Определяем мощность в конце последнего участка сети, т.е. участка 23:

$$\underline{S}_{23}^k = \underline{S}_3 - j Q_{c23}^k. \quad (95)$$

3. Определяем потери мощности на последнем участке:

$$D \underline{S}_{23} = \frac{P_{23}^{k^2} + Q_{23}^{k^2}}{U_3^2} (R_{23} + j X_{23}). \quad (96)$$

4. Находим мощность в начале последнего участка:

$$\underline{S}_{23}^h = \underline{S}_{23}^k + D \underline{S}_{23}. \quad (97)$$

5. Определяем падение напряжения на последнем участке, т.е. на участке 23:

$$\underline{U}_{D23} = \frac{P_{23}^k \times R_{23} + Q_{23}^k \times X_{23}}{U_3^*} + j \frac{P_{23}^k \times X_{23} - Q_{23}^k \times R_{23}}{U_3^*}. \quad (98)$$

6. Находим напряжение в предпоследнем участке сети, т.е. в узле 2:

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_3 + \underline{U}_{D23}. \quad (99)$$

7. Рассчитываем зарядные мощности в начале ВЛ последнего участка сети и в конце ВЛ предпоследнего участка сети:

$$Q_{c23}^h = \frac{j b_{23} l_{23} U_2^2}{2}, \quad (100)$$

$$Q_{c12}^k = \frac{j b_{12} l_{12} U_2^2}{2}. \quad (101)$$

8. Определим мощность в конце предпоследнего участка:

$$\underline{S}_{12}^k = \underline{S}_{23}^n + \underline{S}_2 - j(Q_{c23}^n + Q_{c12}^k). \quad (102)$$

Далее алгоритм повторяется с пункта 3 до определения напряжения источника питания.

Если источником питания является электростанция, то, как правило, определяется мощность, генерируемая с шин станции, следующим образом:

$$\underline{S}_{эс} = \underline{S}_{01}^n - j Q_{c01}^n. \quad (103)$$

Рассмотренный метод расчета режимов разомкнутой сети является точным, т.к. известны все исходные данные относительно одного узла (последнего) и нагрузки остальных узлов.

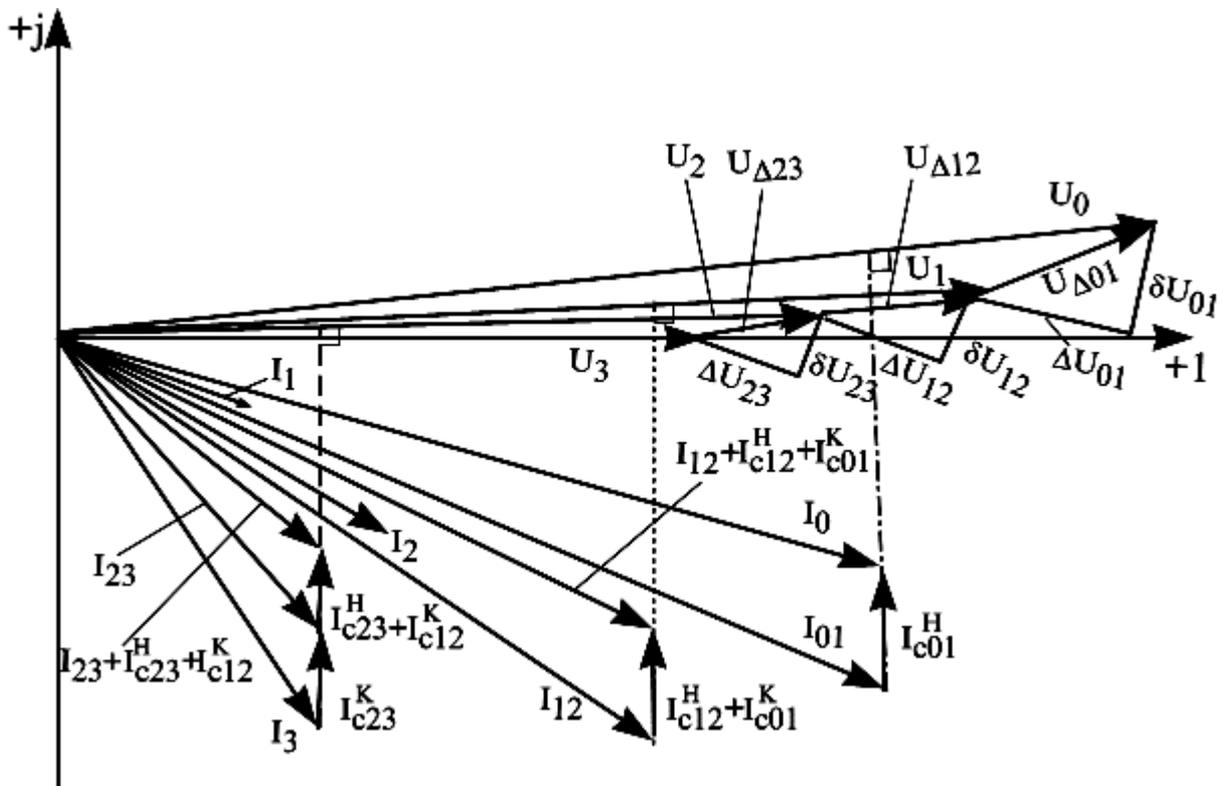


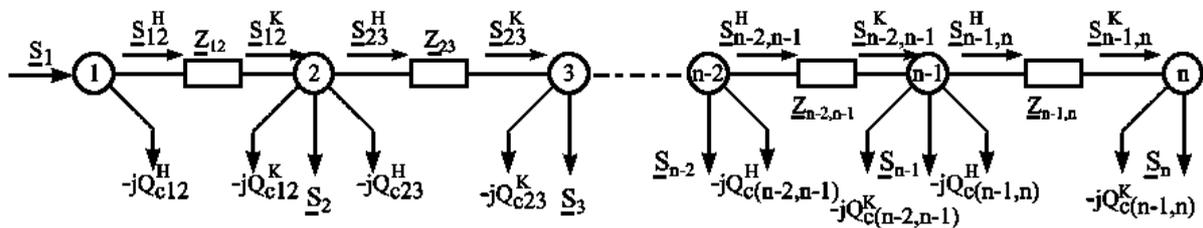
Рис.19. Векторная диаграмма, иллюстрирующая рассматриваемый алгоритм

2.2.3. Расчет режима разомкнутой сети при известных нагрузках и напряжении источника питания

В рассматриваемом случае известны нагрузки в узлах и напряжение источника питания. Именно такой способ задания исходной информации применяется в условиях эксплуатации при расчете и анализе режимов. Здесь источник питания - балансирующий узел, в нем заданы модуль и фаза напряжения, а неизвестны активная и реактивная мощность, т.е. $\underline{U}_\delta = const$, $\underline{S}_\delta = var$. При таком способе задания исходной информации невозможно определить неизвестные потоки мощности по участкам сети и напряжения в узлах точным методом, используя первый закон Кирхгофа и закон Ома, т.к. напряжение в конце разомкнутой сети неизвестно. Данную задачу можно решить, составляя систему нелинейных уравнений узловых напряжений и решая ее любым известным итерационным методом, - например, методом Ньютона-Рафсона. Такой подход предполагает использование специальных промышленных программ для расчета режимов сети и неудобен для понимания физической сущности протекающих процессов. Пользоваться им при ручном счете нецелесообразно в виду большой трудоемкости расчетов (количество итераций в зависимости от сложности схемы может достигать 10 и более).

Однако можно осуществить приближенный расчет режимов простых разомкнутых сетей в два этапа, пользуясь методом итераций или последовательных приближений. В этом случае достигается требуемая инженерная точность расчета (до 5%) при одной – двух итерациях в зависимости от номинального напряжения и разветвленности сети, легко понимается физическая сущность протекающих процессов в сети и осуществляется аналитический анализ режима.

Рассмотрим алгоритм расчета режима разомкнутой сети в два этапа на примере рис. 20.



**Рис. 20. Схема замещения разомкнутой сети
для расчета по данным начала**

Составляется схема замещения, в которой нагрузки узлов являются приведенными (рис. 20).

Первый этап заключается в определении потоков мощности по участкам сети, с учетом потерь мощности. Т.к. напряжения в узлах заранее неизвестны, то в качестве первого приближения их принимают равными номинальному значению. Расчет ведется от конца сети к началу, т.е. к головному участку.

1. Определение зарядных мощностей в начале и конце каждого участка сети:

$$Q_{Cij}^H = Q_{Cij}^K = \frac{I}{2} b_{0ij} \times l_{ij} \times U_{НОМ}^2 \quad (104)$$

или

$$Q_{Cij}^H = Q_{Cij}^K = \frac{I}{2} q_{0ij} \times l_{ij}, \quad (105)$$

где Q_{Cij}^H и Q_{Cij}^K – соответственно зарядная мощность начала и конца участка линии;

q_0 - погонное значение зарядной мощности, справочная величина, Мвар/км;

l_{ij} - длина участка ij .

2. Определение потока мощности в конце последнего участка сети:

$$\underline{S}_{n-1,n}^K = \underline{S}_{ПР(n)} - j \sum_{\substack{i=1 \\ j=i+1}}^N \dot{a} Q_{Cij}, \quad (106)$$

где $\underline{S}_{PP(n)}$ - приведенная мощность последнего узла разомкнутой сети;

ij - номер линии, подходящей к последнему участку сети;

N - число линий, подходящих к последнему участку сети.

3. Определение потерь мощности на последнем участке сети:

$$D\underline{S}_{n-1,n} = \frac{(\underline{P}_{n-1,n}^K)^2 + (\underline{Q}_{n-1,n}^K)^2}{U_{НОМ}^2} (\underline{R}_{n-1,n} + j\underline{X}_{n-1,n}). \quad (107)$$

4. Определение потока мощности в начале последнего участка сети:

$$\underline{S}_{n-1,n}^H = \underline{S}_{n-1,n}^K + D\underline{S}_{n-1,n}. \quad (108)$$

5. Определение потока мощности к концу предпоследнего участка сети:

$$\underline{S}_{n-2,n-1}^K = \underline{S}_{n-1,n}^H + \underline{S}_{PP(n-1)} - j \sum_{\substack{i=1 \\ j=i+1}}^N \underline{Q}_{Cij}. \quad (109)$$

Далее алгоритм повторяется с пункта 3 до определения потока мощности в начале головного участка.

Второй этап заключается в определении напряжений в узлах по рассчитанным на первом этапе потокам мощности и известному напряжению источника питания. Расчет ведется от начала сети к концу, т.е. от начала головного участка к последнему участку сети.

6. Определение падения напряжения на головном участке:

$$\underline{U}_{D12} = \frac{\underline{P}_{12}^H \underline{R}_{12} + \underline{Q}_{12}^H \underline{X}_{12}}{\underline{U}_1^*} + j \frac{\underline{P}_{12}^H \underline{X}_{12} - \underline{Q}_{12}^H \underline{R}_{12}}{\underline{U}_1^*} = D\underline{U}_{12} + j d\underline{U}_{12}, \quad (110)$$

где \underline{U}_1^* - сопряженный комплекс напряжения источника питания.

7. Определение напряжения в первом узле нагрузки от источника питания:

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 - \underline{U}_{D12}. \quad (111)$$

Далее алгоритм повторяется до определения напряжения в последнем узле нагрузки сети.

При расчете напряжений в узлах рассчитываются модуль U_{i+1} и фаза $j U_{i+1}$ по выражениям:

$$U_{i+1} = \sqrt{(U_i - DU_{i,i+1})^2 + (dU_{i,i+1})^2}; \quad (112)$$

$$j_{U_{i+1}} = \operatorname{arctg} \frac{dU_{i,i+1}}{U_i - DU_{i,i+1}} \quad (113)$$

Полученное значение напряжения в последнем узле сравнивается с первым приближением, т.е. с номинальным значением напряжения по выражению:

$$|e| = \left| \frac{U^{(1)}_n - U_{\text{НОМ}}}{U^{(1)}_n} \right| 100\% \leq 5\%, \quad (114)$$

где $U^{(1)}_n$ -модуль напряжения последнего узла, полученный в результате выполнения первой итерации.

Если разница не превышает 5%, то требуемая точность расчета достигнута и вторая итерация не требуется.

В противном случае осуществляется переход ко второй итерации. В качестве второго приближения на первом этапе напряжения в узлах принимаются равными значениям, полученным на втором этапе первой итерации. И расчет повторяется, начиная с п.1.

Как правило, для сетей с номинальными напряжением до 110 кВ включительно требуемая точность расчета достигается при одной итерации. При этом можно пренебречь поперечной составляющей падения напряжения. В сетях напряжением до 35 кВ включительно не учитывают зарядные мощности линий ввиду того, что они в сто и более раз меньше зарядных мощностей линий 110 кВ, т.е. очень малы и их значения соизмеримы с погрешностью расчета.

В сетях 220 кВ требуемая точность расчета в основном достигается при выполнении двух итераций.

Примеры решения задач

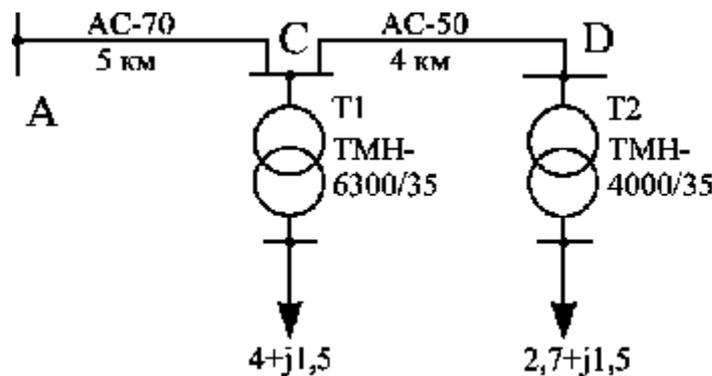
Листинг

примеров решения задач по подразделу 2.2 в программе MathCad фирмы MathSoft

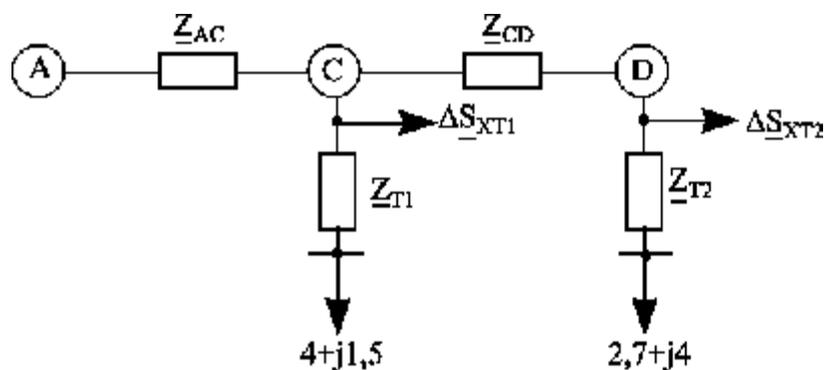
Примечание: в листингах примеров, рассчитанных в программе MathCad, точки после формул не ставятся, поскольку это некорректно для программной среды. В ряде примеров, с использованием данной программы, символы d , z , S , U , следует воспринимать как обозначения, соответствующие D , Z , S , U , которые приведены в теоретической части учебного пособия.

Пример 2.4.

Рассчитать установившийся режим разомкнутой сети: а) при заданном напряжении в конце сети 34,2 кВ; б) при заданном значении напряжения источника питания 37 кВ. Нагрузка дана в МВА.



Составляем схему замещения



Определяем параметры схемы замещения, т.е. находим значения сопротивлений линий аналогично примеру 2.2:

$$z_{ac} := 0.45 \cdot 5 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{3500}{5.85} \right) + 0.0157 \right) \cdot 5 \right] \quad z_{ac} = 2.25 + 2.085i \quad \text{Ом}$$

$$z_{cd} := 0.63 \cdot 4 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{3500}{4.95} \right) + 0.0157 \right) \cdot 4 \right] \quad z_{cd} = 2.52 + 1.71i \quad \text{Ом}$$

а) Расчет ведем по данным конца

Определяем потери мощности в трансформаторах Т1 и Т2 по выражениям (72) и (74), приведенную нагрузку узлов по выражению (71). Потери мощности в трансформаторе Т1 обозначим $dP_c + jdQ_c$, в трансформаторе Т2 - $dP_d + jdQ_d$. По [4] определяем параметры трансформаторов. Для трансформатора Т1: $DP_x = 0.008 \text{ МВт}$, $DP_k = 0.0465 \text{ МВт}$, $U_k\% = 7.5\%$, $I_x\% = 0.8\%$. Для трансформатора Т2: $DP_x = 0.0056 \text{ МВт}$, $DP_k = 0.0335 \text{ МВт}$, $U_k\% = 7.5\%$, $I_x\% = 0.9\%$. Остальные необходимые параметры находим по формулам, описанным в подразделе 1.2.

$$R_{tc} := \frac{0.0465 \cdot 35^2}{6.3^2} \quad R_{tc} = 1.435 \quad \text{Ом}$$

$$X_{tc} := \frac{7.5 \cdot 35^2}{100 \cdot 6.3} \quad X_{tc} = 14.583 \quad \text{Ом}$$

$$R_{td} := \frac{0.0335 \cdot 35^2}{4^2} \quad R_{td} = 2.565 \quad \text{Ом}$$

$$X_{td} := \frac{7.5 \cdot 35^2}{100 \cdot 4} \quad X_{td} = 22.969 \quad \text{Ом}$$

$$dQ_{xc} := \frac{0.8}{100} \cdot 6.3 \quad dQ_{xc} = 0.05 \quad \text{Мвар}$$

$$dQ_{xd} := \frac{0.9}{100} \cdot 4 \quad dQ_{xd} = 0.036 \quad \text{Мвар}$$

$$dP_c := \frac{4^2 + 1.5^2}{35^2} \cdot R_{tc} + 0.008 \quad dP_c = 0.029 \quad \text{МВт}$$

$$dQ_c := \frac{4^2 + 1.5^2}{35^2} \cdot X_{tc} + dQ_{xc} \quad dQ_c = 0.268 \quad \text{Мвар}$$

$$dP_d := \frac{2.7^2 + 1.5^2}{35^2} \cdot R_{td} + 0.0056 \quad dP_d = 0.026 \text{ МВт}$$

$$dQ_d := \frac{2.7^2 + 1.5^2}{35^2} \cdot X_{td} + dQ_{xd} \quad dQ_d = 0.215 \text{ Мвар}$$

Находим приведенные мощности

$$S_{prc} := 4 + dP_c + j \cdot (1.5 + dQ_c) \quad S_{prc} = 4.029 + 1.768i \text{ МВА}$$

$$S_{prd} := 2.7 + dP_d + j \cdot (1.5 + dQ_d) \quad S_{prd} = 2.726 + 1.715i \text{ МВА}$$

В сети 35 кВ не учитывают зарядную мощность ввиду ее малости.

Тогда мощность в конце участка CD равна приведенной нагрузке узла D.

$$S_{cdk} := S_{prd} \quad S_{cdk} = 2.726 + 1.715i \text{ МВА}$$

Определим потери мощности на участке CD по известному напряжению узла D, равному $U_D=34.2 \text{ кВ}$.

$$dS_{cd} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{cdk}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{cdk}))^2}{(34.2)^2} \cdot z_{cd} \quad dS_{cd} = 0.022 + 0.015i \text{ МВА}$$

Определим потерю напряжения на участке CD, пренебрегая поперечной составляющей падения напряжения

$$dU_{cd} := \frac{\operatorname{Re}(S_{cdk}) \cdot \operatorname{Re}(z_{cd}) + \operatorname{Im}(S_{cdk}) \cdot \operatorname{Im}(z_{cd})}{34.2} \quad dU_{cd} = 0.287 \text{ кВ}$$

Определим напряжение узла C

$$U_c := 34.2 + dU_{cd} \quad U_c = 34.487 \text{ кВ}$$

Находим поток мощности в начале участка CD

$$S_{cdn} := S_{cdk} + dS_{cd} \quad S_{cdn} = 2.748 + 1.73i \text{ МВА}$$

Находим поток мощности в конце участка AC и потери мощности на этом участке

$$S_{ack} := S_{cdn} + S_{prc} \quad S_{ack} = 6.777 + 3.498i \text{ МВА}$$

$$dS_{ac} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{ack}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{ack}))^2}{U_c^2} \cdot z_{ac} \quad dS_{ac} = 0.11 + 0.102i \text{ МВА}$$

Определим поток мощности в начале участка AC

$$S_{acn} := S_{ack} + dS_{ac} \quad S_{acn} = 6.887 + 3.6i \text{ МВА}$$

Определим потерю напряжения на участке AC

$$dU_{ac} := \frac{\operatorname{Re}(S_{ack}) \cdot \operatorname{Re}(z_{ac}) + \operatorname{Im}(S_{ack}) \cdot \operatorname{Im}(z_{ac})}{U_c} \quad dU_{ac} = 0.654 \text{ кВ}$$

Определим напряжение на источнике питания А

$$U_a := U_c + dU_{ac} \quad U_a = 35.14 \text{ кВ}$$

б) Расчет режима по данным начала

Находим поток мощности в конце участка CD и потери мощности на этом участке, принимая напряжение в узлах равным номинальному, 35 кВ.

$$S_{cdk} := S_{prd} \quad S_{cdk} = 2.726 + 1.715i \text{ МВА}$$

$$dS_{cd} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{cdk}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{cdk}))^2}{35^2} \cdot z_{cd} \quad dS_{cd} = 0.021 + 0.014i \text{ МВА}$$

Находим потоки мощности в начале участка CD и в конце участка AC

$$S_{cdn} := S_{cdk} + dS_{cd} \quad S_{cdn} = 2.747 + 1.729i \text{ МВА}$$

$$S_{ack} := S_{cdn} + S_{prc} \quad S_{ack} = 6.776 + 3.497i \text{ МВА}$$

Находим потери мощности на участке AC и поток мощности в начале участка

$$dS_{ac} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{ack}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{ack}))^2}{35^2} \cdot z_{ac} \quad dS_{ac} = 0.107 + 0.099i \text{ МВА}$$

$$S_{acn} := S_{ack} + dS_{ac} \quad S_{acn} = 6.883 + 3.596i \text{ МВА}$$

Находим потерю напряжения на участках AC и CD и напряжения в узлах C и D по известному напряжению центра питания

$$dU_{ac} := \frac{\operatorname{Re}(S_{acn}) \cdot \operatorname{Re}(z_{ac}) + \operatorname{Im}(S_{acn}) \cdot \operatorname{Im}(z_{ac})}{37} \quad dU_{ac} = 0.621 \text{ кВ}$$

$$U_c := 37 - dU_{ac} \quad U_c = 36.379 \text{ кВ}$$

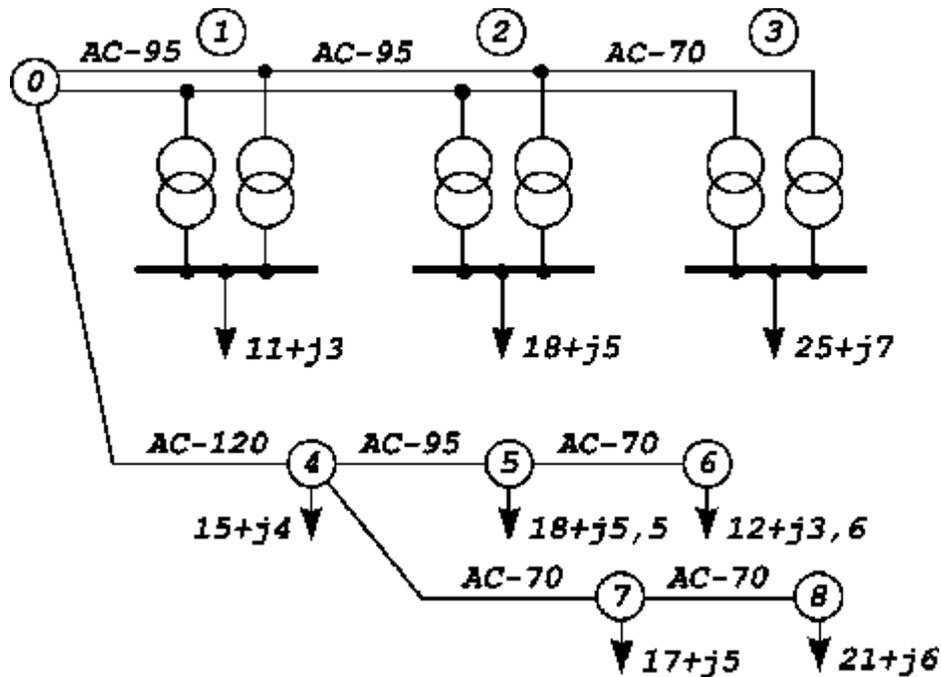
$$dU_{cd} := \frac{\operatorname{Re}(S_{cdn}) \cdot \operatorname{Re}(z_{cd}) + \operatorname{Im}(S_{cdn}) \cdot \operatorname{Im}(z_{cd})}{U_c} \quad dU_{cd} = 0.272 \text{ кВ}$$

$$U_d := U_c - dU_{cd} \quad U_d = 36.107 \text{ кВ}$$

Погрешность расчета не превышает 5%, поэтому вторая итерация не требуется.

Пример 2.5.

Рассчитать режим районной разомкнутой сети напряжением 110 кВ, приведенной на рисунке. В первом случае принять напряжение источника питания равным 120 кВ. Марки и сечения проводов, нагрузки подстанций показаны на рисунке. Во втором случае известно напряжение в узле 6, которое равно 108 кВ.



Длины участков

$$\begin{aligned}
 l_{01} &:= 20 \text{ км}; & l_{23} &:= 25 \text{ км}; & l_{45} &:= 24 \text{ км}; & l_{47} &:= 19 \text{ км}; \\
 l_{04} &:= 32 \text{ км}; & l_{56} &:= 12 \text{ км}; & l_{78} &:= 21 \text{ км}; & l_{12} &:= 18 \text{ км}.
 \end{aligned}$$

Определим индуктивные сопротивления и емкостные проводимости схем замещения участков сети. В справочных данных, например в /14/, находим погонные активные сопротивления участков в зависимости от сечения провода: $r_{01}=r_{12}=r_{45}=0.33 \text{ Ом/км}$, $r_{23}=r_{47}=r_{78}=r_{56}=0.45 \text{ Ом/км}$, $r_{04}=0.27 \text{ Ом/км}$.

Индуктивные сопротивления определяем по выражению (6), а емкостные проводимости - по выражению (22).

Сопротивления участков равны:

$$z_{01} := \left[0.33 \cdot l_{01} + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{6.95} \right) + 0.0157 \right) \cdot l_{01} \right] \right] \cdot \frac{1}{2}$$

$$z_{01} = 3.3 + 4.285i \quad \text{Ом};$$

$$z_{12} := \left[0.33 \cdot l_{12} + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{6.95} \right) + 0.0157 \right) \cdot l_{12} \right] \right] \cdot \frac{1}{2}$$

$$z_{12} = 2.97 + 3.857i \quad \text{Ом};$$

$$z_{23} := \left[0.45 \cdot l_{23} + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{5.85} \right) + 0.0157 \right) \cdot l_{23} \right] \right] \cdot \frac{1}{2}$$

$$z_{23} = 5.625 + 5.492i \quad \text{Ом};$$

$$z_{04} := 0.27 \cdot l_{04} + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{7.65} \right) + 0.0157 \right) \cdot l_{04} \right] \quad z_{04} = 8.64 + 13.52i \quad \text{Ом};$$

$$z_{45} := 0.33 \cdot l_{45} + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{6.95} \right) + 0.0157 \right) \cdot l_{45} \right] \quad z_{45} = 7.92 + 10.285i \quad \text{Ом};$$

$$z_{56} := 0.45 \cdot l_{56} + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{5.85} \right) + 0.0157 \right) \cdot l_{56} \right] \quad z_{56} = 5.4 + 5.272i \quad \text{Ом};$$

$$z_{47} := 0.45 \cdot l_{47} + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{5.85} \right) + 0.0157 \right) \cdot l_{47} \right] \quad z_{47} = 8.55 + 8.348i \quad \text{Ом};$$

$$z_{78} := 0.45 \cdot l_{78} + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{5.85} \right) + 0.0157 \right) \cdot l_{78} \right] \quad z_{78} = 9.45 + 9.226i \quad \text{Ом}.$$

Находим погонные емкостные проводимости:

$$b_{01} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{5000}{6.95} \right)} \cdot 10^{-6} \quad b_{01} = 2.653 \cdot 10^{-6} \quad \text{См};$$

$$b_{12} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{5000}{6.95} \right)} \cdot 10^{-6} \quad b_{12} = 2.653 \cdot 10^{-6} \quad \text{См};$$

$$b_{23} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{5000}{5.85} \right)} \cdot 10^{-6} \quad b_{23} = 2.585 \cdot 10^{-6} \quad \text{См};$$

$$b_{04} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{5000}{7.65} \right)} \cdot 10^{-6} \quad b_{04} = 2.692 \cdot 10^{-6} \quad \text{См};$$

$$b_{45} := \frac{7.58}{\log\left(\frac{5000}{6.95}\right)} \cdot 10^{-6} \qquad b_{45} = 2.653 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

$$b_{56} := \frac{7.58}{\log\left(\frac{5000}{5.85}\right)} \cdot 10^{-6} \qquad b_{56} = 2.585 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

$$b_{47} := \frac{7.58}{\log\left(\frac{5000}{5.85}\right)} \cdot 10^{-6} \qquad b_{47} = 2.585 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

$$b_{78} := \frac{7.58}{\log\left(\frac{5000}{5.85}\right)} \cdot 10^{-6} \qquad b_{78} = 2.585 \cdot 10^{-6} \text{ См}.$$

Заданные значения нагрузок в узлах равны:

$$S_1 := 11 + j3 \text{ МВА}; \quad S_3 := 25 + j7 \text{ МВА}; \quad S_5 := 18 + j5.5 \text{ МВА};$$

$$S_2 := 18 + j5 \text{ МВА}; \quad S_4 := 15 + j4 \text{ МВА}; \quad S_6 := 12 + j3.6 \text{ МВА};$$

$$S_7 := 17 + j5 \text{ МВА}; \quad S_8 := 21 + j6 \text{ МВА}.$$

Так как в 1, 2 и 3 узлах типы трансформаторов неизвестны, вначале выбираем их мощность, а затем рассчитываем приведенную нагрузку в МВА.

Определяем реактивную мощность, передаваемую через трансформаторы из сети высокого напряжения, при нормативном $\text{tg } \varphi = 0,3 / 16/$

$$Q_{\text{э}1} := \text{Re}(S_1) \cdot 0.3$$

$$Q_{\text{э}2} := \text{Re}(S_2) \cdot 0.3$$

$$Q_{\text{э}3} := \text{Re}(S_3) \cdot 0.3$$

Находим расчетную мощность трансформаторов

$$S_{r1} := \frac{\sqrt{\text{Re}(S_1)^2 + Q_{\text{э}1}^2}}{2 \cdot 0.7} \qquad S_{r1} = 8.203 \text{ МВА};$$

$$S_{r2} := \frac{\sqrt{\operatorname{Re}(S_2)^2 + Q_{\varepsilon 2}^2}}{2 \cdot 0.7} \quad S_{r2} = 13.423 \quad \text{МВА};$$

$$S_{r3} := \frac{\sqrt{\operatorname{Re}(S_3)^2 + Q_{\varepsilon 3}^2}}{2 \cdot 0.7} \quad S_{r3} = 18.643 \quad \text{МВА},$$

где 0,7 – коэффициент загрузки трансформатора;

2 – количество трансформаторов.

Номинальная мощность трансформатора должна быть больше или равна его расчетной мощности.

Выбираем следующие трансформаторы:

для 1 узла - ТДН 10000/110;

для 2 узла - ТДН 16000/110;

для 3 узла - ТРДН 25000/110.

Определяем их каталожные данные по /12/ и рассчитываем сопротивления по выражениям (36), (40):

$$z_{t1} := 7.95 + j \cdot 139 \text{ Ом}; \quad z_{t2} := 4.38 + j \cdot 86.7 \text{ Ом}; \quad z_{t3} := 2.54 + j \cdot 55.9 \text{ Ом}.$$

Определяем потери мощности в трансформаторах по выражениям (72), (74):

$$D P_{t1} := \frac{\left(\sqrt{\operatorname{Re}(S_1)^2 + Q_{\varepsilon 1}^2} \right)^2}{110^2} \cdot 7.95 + 0.014 \quad D P_{t1} = 0.101 \quad \text{МВт};$$

$$D Q_{t1} := \frac{\left(\sqrt{\operatorname{Re}(S_1)^2 + Q_{\varepsilon 1}^2} \right)^2}{110^2} \cdot 139 + 0.09 \quad D Q_{t1} = 1.605 \quad \text{Мвар};$$

$$D P_{t2} := \frac{\left(\sqrt{\operatorname{Re}(S_2)^2 + Q_{\varepsilon 2}^2} \right)^2}{110^2} \cdot 4.38 + 0.021 \quad D P_{t2} = 0.149 \quad \text{МВт};$$

$$D Q_{t2} := \frac{\left(\sqrt{\operatorname{Re}(S_2)^2 + Q_{\varepsilon 2}^2} \right)^2}{110^2} \cdot 86.7 + 0.136 \quad D Q_{t2} = 2.666 \quad \text{Мвар};$$

$$D P_{t3} := \frac{\left(\sqrt{\operatorname{Re}(S_3)^2 + Q_{33}^2}\right)^2}{110^2} \cdot 2.54 + 0.029 \quad D P_{t3} = 0.172 \quad \text{МВт};$$

$$D Q_{t3} := \frac{\left(\sqrt{\operatorname{Re}(S_3)^2 + Q_{33}^2}\right)^2}{110^2} \cdot 55.9 + 0.200 \quad D Q_{t3} = 3.347 \quad \text{Мвар.}$$

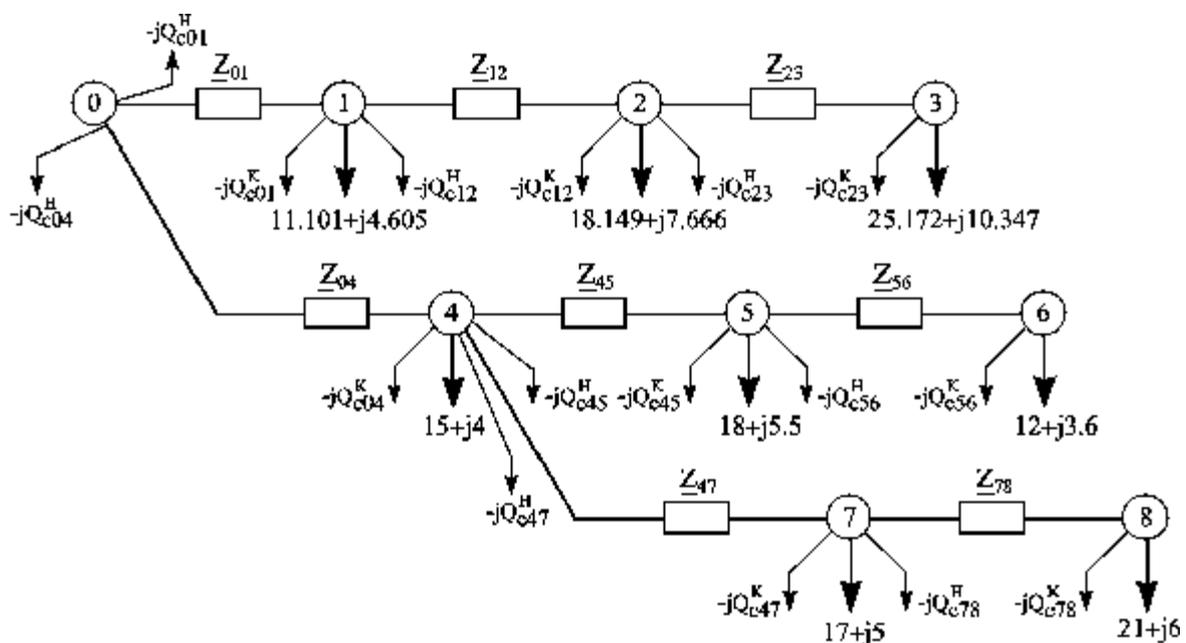
Определяем приведенные нагрузки узлов по выражению (71)

$$S_{pr1} := S_1 + D P_{t1} + j \cdot D Q_{t1} \quad S_{pr1} = 11.101 + 4.605i \quad \text{МВА};$$

$$S_{pr2} := S_2 + D P_{t2} + j \cdot D Q_{t2} \quad S_{pr2} = 18.149 + 7.666i \quad \text{МВА};$$

$$S_{pr3} := S_3 + D P_{t3} + j \cdot D Q_{t3} \quad S_{pr3} = 25.172 + 10.347i \quad \text{МВА.}$$

Схему замещения приводим к виду, показанному на рисунке.



Рассмотрим первый случай, когда известно напряжение источника питания. Расчет ведем по данным начала.

$$U_0 := 120 \text{ кВ.}$$

Находим значение зарядных мощностей в начале и конце каждой линии

$$Q_{23} := 110^2 \cdot b_{23} \cdot l_{23} \quad Q_{23} = 0.782 \quad \text{Мвар};$$

$$Q_{45} := \frac{1}{2} \cdot 110^2 \cdot b_{45} \cdot l_{45} \quad Q_{45} = 0.385 \text{ Мвар};$$

$$Q_{01} := 110^2 \cdot b_{01} \cdot l_{01} \quad Q_{01} = 0.642 \text{ Мвар};$$

$$Q_{04} := \frac{1}{2} \cdot 110^2 \cdot b_{04} \cdot l_{04} \quad Q_{04} = 0.521 \text{ Мвар};$$

$$Q_{56} := \frac{1}{2} \cdot 110^2 \cdot b_{56} \cdot l_{56} \quad Q_{56} = 0.188 \text{ Мвар};$$

$$Q_{12} := 110^2 \cdot b_{12} \cdot l_{12} \quad Q_{12} = 0.578 \text{ Мвар};$$

$$Q_{47} := \frac{1}{2} \cdot 110^2 \cdot b_{47} \cdot l_{47} \quad Q_{47} = 0.297 \text{ Мвар};$$

$$Q_{78} := \frac{1}{2} \cdot 110^2 \cdot b_{78} \cdot l_{78} \quad Q_{78} = 0.328 \text{ Мвар}.$$

Находим потоки мощности на каждом участке сети с учетом потерь по выражениям (106), (107), (108), (109):

$$S_{78k} := S_8 - j \cdot Q_{78} \quad S_{78k} = 21 + 5.672i \text{ МВА};$$

$$D S_{78} := \frac{\operatorname{Re}(S_{78k})^2 + \operatorname{Im}(S_{78k})^2}{110^2} \cdot z_{78} \quad D S_{78} = 0.37 + 0.361i \text{ МВА};$$

$$S_{78n} := S_{78k} + D S_{78} \quad S_{78n} = 21.37 + 6.032i \text{ МВА};$$

$$S_{47k} := S_{78n} + S_7 - j \cdot (Q_{78} + Q_{47}) \quad S_{47k} = 38.37 + 10.407i \text{ МВА};$$

$$D S_{47} := \frac{\operatorname{Re}(S_{47k})^2 + \operatorname{Im}(S_{47k})^2}{110^2} \cdot z_{47} \quad D S_{47} = 1.117 + 1.09i \text{ МВА};$$

$$S_{47n} := S_{47k} + D S_{47} \quad S_{47n} = 39.486 + 11.497i \text{ МВА};$$

$$S_{56k} := S_6 - j \cdot Q_{56} \quad S_{56k} = 12 + 3.412i \text{ МВА};$$

$$D S_{56} := \frac{\operatorname{Re}(S_{56k})^2 + \operatorname{Im}(S_{56k})^2}{110^2} \cdot z_{56} \quad D S_{56} = 0.069 + 0.068i \text{ МВА};$$

$$S_{56n} := S_{56k} + D S_{56} \quad S_{56n} = 12.069 + 3.48i \text{ МВА};$$

$$S_{45k} := S_{56n} + S_5 - j \cdot (Q_{56} + Q_{45}) \quad S_{45k} = 30.069 + 8.407i \text{ МВА};$$

$$D S_{45} := \frac{\operatorname{Re}(S_{45k})^2 + \operatorname{Im}(S_{45k})^2}{110^2} \cdot z_{45} \quad D S_{45} = 0.638 + 0.829i \quad \text{MBA};$$

$$S_{45n} := S_{45k} + D S_{45} \quad S_{45n} = 30.708 + 9.236i \quad \text{MBA};$$

$$S_{04k} := S_{45n} + S_4 + S_{47n} - j \cdot (Q_{45} + Q_{04} + Q_{47}) \quad S_{04k} = 85.194 + 23.529i \quad \text{MBA};$$

$$D S_{04} := \frac{\operatorname{Re}(S_{04k})^2 + \operatorname{Im}(S_{04k})^2}{110^2} \cdot z_{04} \quad D S_{04} = 5.578 + 8.729i \quad \text{MBA};$$

$$S_{04n} := S_{04k} + D S_{04} \quad S_{04n} = 90.772 + 32.258i \quad \text{MBA};$$

$$S_{23k} := S_{pr3} - j \cdot Q_{23} \quad S_{23k} = 25.172 + 9.565i \quad \text{MBA};$$

$$D S_{23} := \frac{\operatorname{Re}(S_{23k})^2 + \operatorname{Im}(S_{23k})^2}{110^2} \cdot z_{23} \quad D S_{23} = 0.337 + 0.329i \quad \text{MBA};$$

$$S_{23n} := S_{23k} + D S_{23} \quad S_{23n} = 25.509 + 9.894i \quad \text{MBA};$$

$$S_{12k} := S_{23n} + S_{pr2} - j \cdot (Q_{23} + Q_{12}) \quad S_{12k} = 43.658 + 16.201i \quad \text{MBA};$$

$$D S_{12} := \frac{\operatorname{Re}(S_{12k})^2 + \operatorname{Im}(S_{12k})^2}{110^2} \cdot z_{12} \quad D S_{12} = 0.532 + 0.691i \quad \text{MBA};$$

$$S_{12n} := S_{12k} + D S_{12} \quad S_{12n} = 44.19 + 16.892i \quad \text{MBA};$$

$$S_{01k} := S_{12n} + S_{pr1} - j \cdot (Q_{12} + Q_{01}) \quad S_{01k} = 55.291 + 20.277i \quad \text{MBA};$$

$$D S_{01} := \frac{\operatorname{Re}(S_{01k})^2 + \operatorname{Im}(S_{01k})^2}{110^2} \cdot z_{01} \quad D S_{01} = 0.946 + 1.228i \quad \text{MBA};$$

$$S_{01n} := S_{01k} + D S_{01} \quad S_{01n} = 56.237 + 21.506i \quad \text{MBA}.$$

По найденным потокам мощности находим напряжения в узлах, начиная с источника питания, по выражениям (110), (111) в кВ

$$U_1 := U_0 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{01}) + \operatorname{Im}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{01})}{\overline{U_0}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{01}) - \operatorname{Im}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{01})}{\overline{U_0}} \right)$$

$$U_1 = 117.686 - 1.417i \quad \text{кВ};$$

$$U_2 := U_1 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12}) + \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12})}{\overline{U_1}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12}) - \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12})}{\overline{U_1}} \right)$$

$$U_2 = 116.005 - 2.419i \quad \text{кВ};$$

$$U_3 := U_2 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23}) + \operatorname{Im}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23})}{\overline{U_2}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23}) - \operatorname{Im}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23})}{\overline{U_2}} \right)$$

$$U_3 = 114.285 - 3.111i \quad \text{кВ};$$

$$U_4 := U_0 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{04n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{04}) + \operatorname{Im}(S_{04n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{04})}{\overline{U_0}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{04n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{04}) - \operatorname{Im}(S_{04n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{04})}{\overline{U_0}} \right)$$

$$U_4 = 109.83 - 7.905i \quad \text{кВ};$$

$$U_5 := U_4 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{45n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{45}) + \operatorname{Im}(S_{45n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{45})}{\overline{U_4}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{45n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{45}) - \operatorname{Im}(S_{45n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{45})}{\overline{U_4}} \right)$$

$$U_5 = 106.608 - 9.882i \quad \text{кВ};$$

$$U_6 := U_5 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{56n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{56}) + \operatorname{Im}(S_{56n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{56})}{\overline{U_5}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{56n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{56}) - \operatorname{Im}(S_{56n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{56})}{\overline{U_5}} \right)$$

$$U_6 = 105.793 - 10.227i \quad \text{кВ};$$

$$U_7 := U_4 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{47n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{47}) + \operatorname{Im}(S_{47n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{47})}{\overline{U_4}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{47n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{47}) - \operatorname{Im}(S_{47n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{47})}{\overline{U_4}} \right)$$

$$U_7 = 105.752 - 9.717i \quad \text{кВ};$$

$$U_8 := U_7 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{78n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{78}) + \operatorname{Im}(S_{78n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{78})}{\overline{U_7}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{78n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{78}) - \operatorname{Im}(S_{78n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{78})}{\overline{U_7}} \right)$$

$$U_8 = 103.216 - 10.81i \quad \text{кВ}.$$

Второй случай. Известно напряжение в конце участка сети 4-6, т.е. в узле 6, и нагрузки во всех узлах, поэтому начинаем расчет режима сети с участка 4-6 и считаем по данным конца.

Расчет по данным конца

$$U_6 := 108 \text{ кВ}.$$

Определим зарядные мощности в конце линии 5-6 по выражению (94)

$$Q_{56k} := \frac{1}{2} \cdot U_6^2 \cdot b_{56} \cdot l_{56}$$

$$Q_{56k} = 0.181 \text{ Мвар.}$$

Определим мощность в конце участка 5-6 по выражению (95), потери мощности в линии 5-6 по выражению (96) и мощность в начале участка 5-6 по выражению (97).

$$S_{56k} := S_6 - j \cdot Q_{56k}$$

$$S_{56k} = 12 + 3.412i \text{ МВА;}$$

$$D S_{56} := \frac{\operatorname{Re}(S_{56k})^2 + \operatorname{Im}(S_{56k})^2}{U_6^2} \cdot z_{56}$$

$$D S_{56} = 0.072 + 0.07i \text{ МВА;}$$

$$S_{56n} := S_{56k} + D S_{56}$$

$$S_{56n} = 12.072 + 3.489i \text{ МВА.}$$

Определим напряжение в узле 5 по выражению (99), предварительно рассчитав падение напряжения на участке 5-6 по выражению (98).

$$UD_{56} := \frac{\operatorname{Re}(S_{56k}) \cdot \operatorname{Re}(z_{56}) + \operatorname{Im}(S_{56k}) \cdot \operatorname{Im}(z_{56})}{\overline{U_6}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{56k}) \cdot \operatorname{Im}(z_{56}) - \operatorname{Im}(S_{56k}) \cdot \operatorname{Re}(z_{56})}{\overline{U_6}}$$

$$UD_{56} = 0.767 + 0.415i \text{ кВ.}$$

$$U_5 := U_6 + UD_{56}$$

$$U_5 = 108.767 + 0.415i \text{ кВ.}$$

Аналогично рассчитываем участок 4-5

$$Q_{56n} := \frac{1}{2} \cdot (|U_5|)^2 \cdot b_{56} \cdot l_{56}$$

$$Q_{56n} = 0.184 \text{ Мвар;}$$

$$Q_{45k} := \frac{1}{2} \cdot (|U_5|)^2 \cdot b_{45} \cdot l_{45}$$

$$Q_{45k} = 0.377 \text{ Мвар;}$$

$$S_{45k} := S_{56n} + S_5 - j \cdot (Q_{45k} + Q_{56n})$$

$$S_{45k} = 30.076 + 8.429i \text{ МВА;}$$

$$D S_{45} := \frac{\operatorname{Re}(S_{45k})^2 + \operatorname{Im}(S_{45k})^2}{U_5^2} \cdot z_{45}$$

$$D S_{45} = 0.66 + 0.843i \text{ МВА;}$$

$$S_{45n} := S_{45k} + D S_{45}$$

$$S_{45n} = 30.736 + 9.272i \text{ МВА;}$$

$$UD_{45} := \frac{\operatorname{Re}(S_{45k}) \cdot \operatorname{Re}(z_{45}) + \operatorname{Im}(S_{45k}) \cdot \operatorname{Im}(z_{45})}{\overline{U_5}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{45k}) \cdot \operatorname{Im}(z_{45}) + \operatorname{Im}(S_{45k}) \cdot \operatorname{Re}(z_{45})}{\overline{U_5}}$$

$$UD_{45} = 2.979 + 2.242i \text{ кВ;}$$

$$U_4 := U_5 + U_{D45}$$

$$U_4 = 111.745 + 2.656i \text{ кВ.}$$

Определяем зарядные мощности линий, подходящих к узлу 4

$$Q_{04k} := \frac{1}{2} \cdot \left(|U_4| \right)^2 \cdot b_{04} \cdot l_{04}$$

$$Q_{04k} = 0.398 \text{ Мвар;}$$

$$Q_{45n} := \frac{1}{2} \cdot \left(|U_4| \right)^2 \cdot b_{45} \cdot l_{45}$$

$$Q_{45n} = 0.398 \text{ Мвар;}$$

$$Q_{47n} := \frac{1}{2} \cdot \left(|U_4| \right)^2 \cdot b_{47} \cdot l_{47}$$

$$Q_{47n} = 0.307 \text{ Мвар.}$$

Рассчитываем режим участка 4-8 по данным начала, рассматривая для него узел 4 как источник питания

$$U_4 = 111.745 + 2.656i \text{ кВ.}$$

Определим зарядные мощности линий в конце и начале участка 7-8, в конце участка 4-7, принимая напряжения узлов 7 и 8 равными номинальному.

$$Q_{78n} := Q_{78k} := \frac{1}{2} \cdot 110^2 \cdot b_{78} \cdot l_{78}$$

$$Q_{78k} = 0.328 \text{ Мвар;}$$

$$Q_{47k} := \frac{1}{2} \cdot 110^2 \cdot b_{47} \cdot l_{47}$$

$$Q_{47k} = 0.297 \text{ Мвар.}$$

Определим потоки мощностей с учетом потерь на участках 7-8, 4-7

$$S_{78k} := S_8 - j \cdot Q_{78k}$$

$$S_{78k} = 21 + 5.672i \text{ МВА;}$$

$$D S_{78} := \frac{\operatorname{Re}(S_{78k})^2 + \operatorname{Im}(S_{78k})^2}{110^2} \cdot z_{78}$$

$$D S_{78} = 0.37 + 0.361i \text{ МВА;}$$

$$S_{78n} := S_{78k} + D S_{78}$$

$$S_{78n} = 21.37 + 6.032i \text{ МВА;}$$

$$S_{47k} := S_{78n} + S_7 - j \cdot (Q_{78n} + Q_{47k})$$

$$S_{47k} = 38.37 + 10.407i \text{ МВА;}$$

$$D S_{47} := \frac{\operatorname{Re}(S_{47k})^2 + \operatorname{Im}(S_{47k})^2}{110^2} \cdot z_{47}$$

$$D S_{47} = 1.117 + 1.09i \text{ МВА;}$$

$$S_{47n} := S_{47k} + D S_{47}$$

$$S_{47n} = 39.486 + 11.497i \text{ МВА.}$$

Определим мощность в конце участка 0-4

$$S_{04k} := S_{45n} + S_{47n} + S_4 - j \cdot (Q_{45n} + Q_{47n} + Q_{04k})$$

$$S_{04k} = 85.222 + 23.667i \text{ МВА.}$$

Рассчитаем потери мощности на участке 0-4 по известному напряжению в узле 4 и потоку мощности в конце участка 0-4

$$D S_{04} := \frac{\operatorname{Re}(S_{04k})^2 + \operatorname{Im}(S_{04k})^2}{U_4^2} \cdot z_{04}$$

$$D S_{04} = 5.806 + 8.199i \text{ МВА.}$$

Определим падение напряжения на участке 0-4 по напряжению узла 4

$$UD_{04} := \frac{\operatorname{Re}(S_{04k}) \cdot \operatorname{Re}(z_{04}) + \operatorname{Im}(S_{04k}) \cdot \operatorname{Im}(z_{04})}{\overline{U_4}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{04k}) \cdot \operatorname{Im}(z_{04}) - \operatorname{Im}(S_{04k}) \cdot \operatorname{Re}(z_{04})}{\overline{U_4}}$$

$$UD_{04} = 9.246 + 8.701i \text{ кВ.}$$

Найдем напряжение источника питания - узла 0

$$U_0 := U_4 + UD_{04}$$

$$U_0 = 120.991 + 11.358i \text{ кВ.}$$

Участок сети 0-3 рассчитаем по данным начала аналогично случаю 1

$$Q_{01} := 110^2 \cdot b_{01} \cdot l_{01}$$

$$Q_{01} = 0.642 \text{ Мвар;}$$

$$Q_{12} := 110^2 \cdot b_{12} \cdot l_{12}$$

$$Q_{12} = 0.578 \text{ Мвар;}$$

$$Q_{23} := 110^2 \cdot b_{23} \cdot l_{23}$$

$$Q_{23} = 0.782 \text{ Мвар;}$$

$$S_{23k} := S_{pr3} - j \cdot Q_{23}$$

$$S_{23k} = 25.172 + 9.565i \text{ МВА;}$$

$$D S_{23} := \frac{\operatorname{Re}(S_{23k})^2 + \operatorname{Im}(S_{23k})^2}{110^2} \cdot z_{23}$$

$$D S_{23} = 0.337 + 0.329i \text{ МВА;}$$

$$S_{23n} := S_{23k} + D S_{23}$$

$$S_{23n} = 25.509 + 9.894i \text{ МВА;}$$

$$S_{12k} := S_{23n} + S_{pr2} - j \cdot (Q_{23} + Q_{12})$$

$$S_{12k} = 43.658 + 16.201i \text{ МВА;}$$

$$D S_{12} := \frac{\operatorname{Re}(S_{12k})^2 + \operatorname{Im}(S_{12k})^2}{110^2} \cdot z_{12}$$

$$D S_{12} = 0.532 + 0.691i \text{ МВА;}$$

$$S_{12n} := S_{12k} + D S_{12}$$

$$S_{12n} = 44.19 + 16.892i \text{ МВА;}$$

$$S_{01k} := S_{12n} + S_{pr1} - j \cdot (Q_{12} + Q_{01}) \quad S_{01k} = 55.291 + 20.277i \text{ MBA};$$

$$D S_{01} := \frac{\operatorname{Re}(S_{01k})^2 + \operatorname{Im}(S_{01k})^2}{110^2} \cdot z_{01} \quad D S_{01} = 0.946 + 1.228i \text{ MBA};$$

$$S_{01n} := S_{01k} + D S_{01} \quad S_{01n} = 56.237 + 21.506i \text{ MBA};$$

$$U_1 := U_0 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{01}) + \operatorname{Im}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{01})}{\overline{U_0}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{01}) - \operatorname{Im}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{01})}{\overline{U_0}} \right)$$

$$U_1 = 118.847 + 9.751i \text{ kB};$$

$$U_2 := U_1 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12}) + \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12})}{\overline{U_1}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12}) - \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12})}{\overline{U_1}} \right)$$

$$U_2 = 117.288 + 8.611i \text{ kB};$$

$$U_3 := U_2 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23}) + \operatorname{Im}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23})}{\overline{U_2}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23}) - \operatorname{Im}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23})}{\overline{U_2}} \right)$$

$$U_3 = 115.663 + 7.772i \text{ kB};$$

$$U_7 := U_4 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{47n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{47}) + \operatorname{Im}(S_{47n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{47})}{\overline{U_4}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{47n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{47}) - \operatorname{Im}(S_{47n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{47})}{\overline{U_4}} \right)$$

$$U_7 = 107.917 + 0.495i \text{ kB};$$

$$U_8 := U_7 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{78n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{78}) + \operatorname{Im}(S_{78n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{78})}{\overline{U_7}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{78n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{78}) - \operatorname{Im}(S_{78n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{78})}{\overline{U_7}} \right)$$

$$U_8 = 105.536 - 0.814i \text{ kB}.$$

Сравниваем напряжения в узлах 3 и 8 с номинальным и делаем вывод о нецелесообразности второй итерации

$$\frac{|U_8| - 110}{|U_8|} \cdot 100 = -4.227 \text{ } \%;$$

$$\frac{|U_3| - 110}{|U_3|} \cdot 100 = 4.719 \text{ } \%.$$

Мощность, генерируемая с шин источника питания

$$S_0 := S_{01n} + S_{04n} - j \cdot (Q_{01} + Q_{04}) \quad S_0 = 147.009 + 52.723i \text{ MBA}.$$

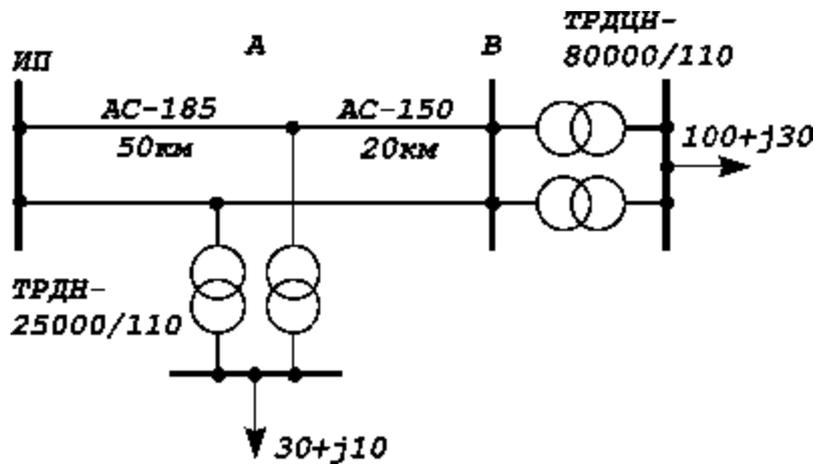
$$Q_{01} = Q_{01n}, \quad Q_{04} = Q_{04n}$$

Т.о., был рассчитан режим районной разомкнутой сети с использованием алгоритмов расчета по данным начала и конца.

Задачи для самостоятельного решения

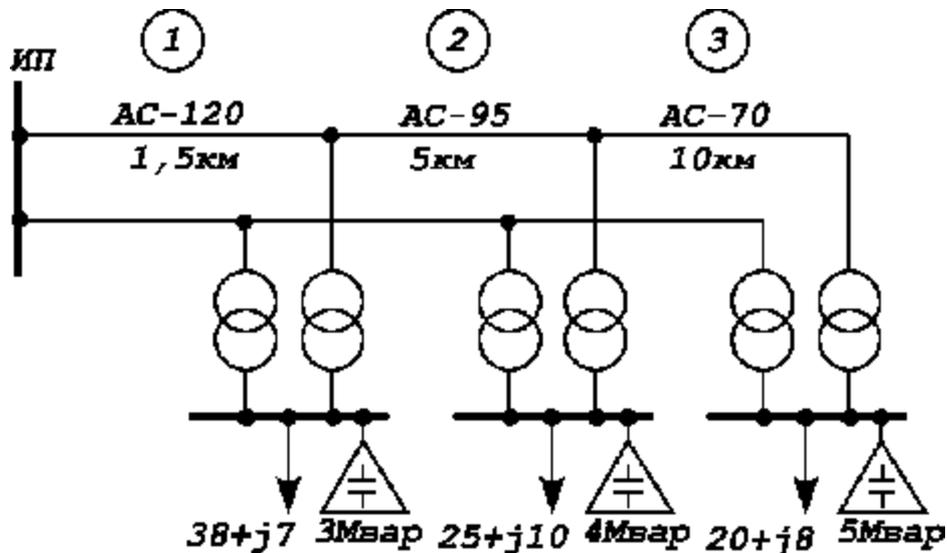
№1

Рассчитать режим районной разомкнутой сети напряжением 110 кВ, схема которой приведена на рисунке. Построить векторную диаграмму напряжений в узлах. Расчет произвести двумя алгоритмами: а) по данным начала при $U_{ип}=112$ кВ; б) по данным конца при $U_{в}=106$ кВ.



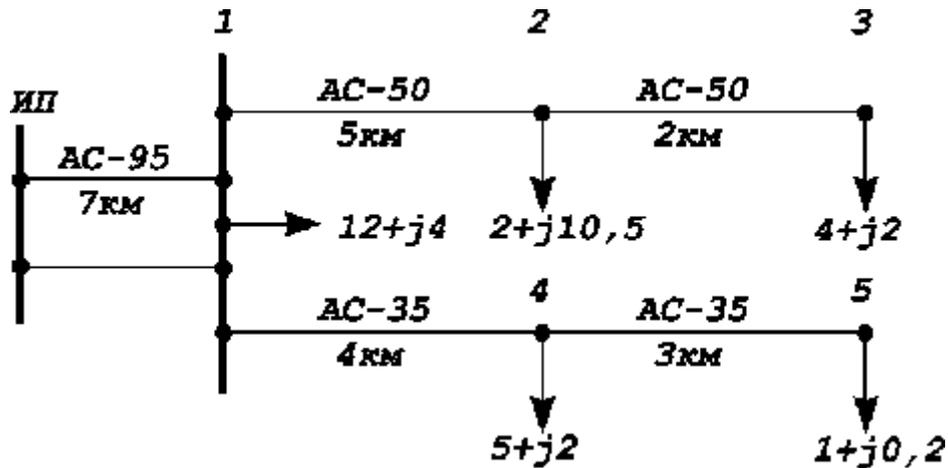
№2

Рассчитать режим разомкнутой сети напряжением 35 кВ, схема которой приведена на рисунке. Определить мощность, выдаваемую с шин источника питания, и коэффициент мощности на шинах источника питания. В первом случае принять напряжение ИП равным 37,5 кВ, во втором - принять напряжение на шинах подстанции 3 равным 33 кВ.



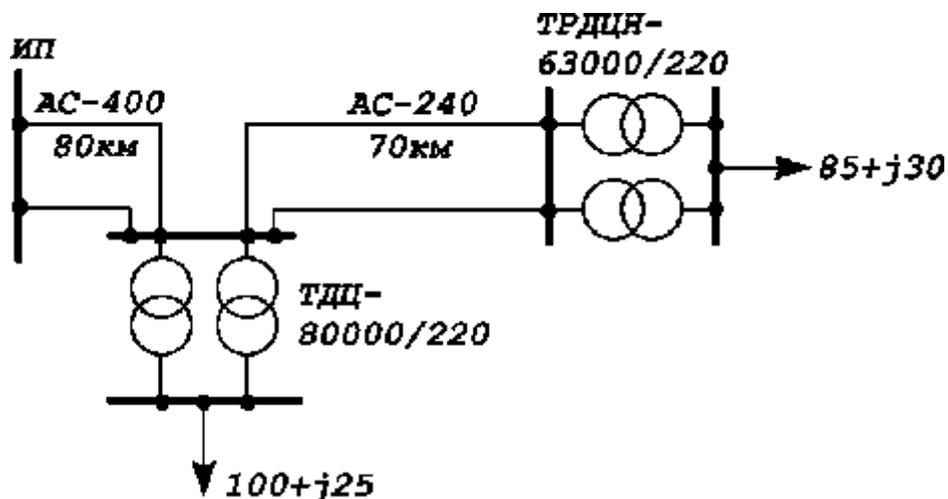
№3

Рассчитать режим разомкнутой сети 35 кВ, схема которой показана для двух случаев на рисунке. Определить наибольшую потерю напряжения в сети: а) при напряжении ИП, равном 36,8 кВ; б) при напряжении в узле 3, равном 34,8 кВ.



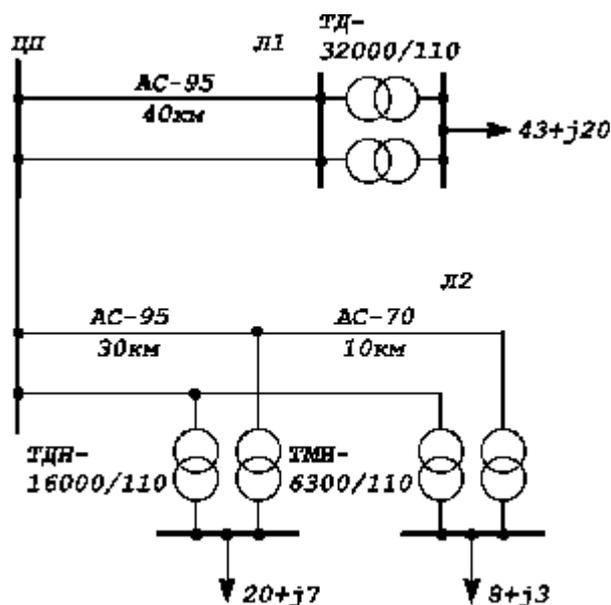
№4

Рассчитать режим районной разомкнутой сети 220 кВ, схема которой показана на рисунке: а) при известном напряжении ИП, $U_{ИП}=235$ кВ; б) при напряжении последнего узла схемы $U=218$ кВ. Построить векторную диаграмму напряжений.



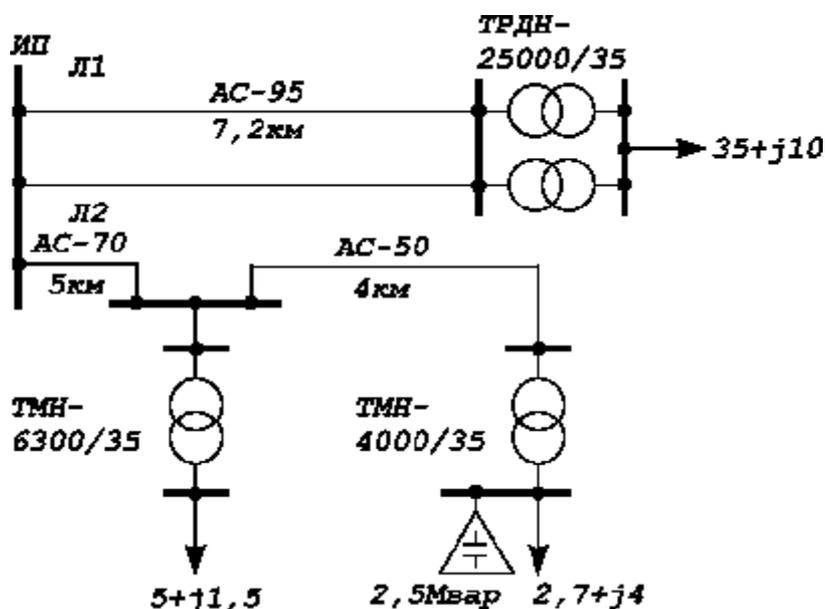
№5

Рассчитать режим районной разомкнутой сети 110 кВ, схема которой приведена на рисунке. Определить мощность, выдаваемую с шин центра питания, и К.П.Д. линии Л1: а) при напряжении центра питания 121 кВ; б) при напряжении в конце линии Л2 114 кВ.



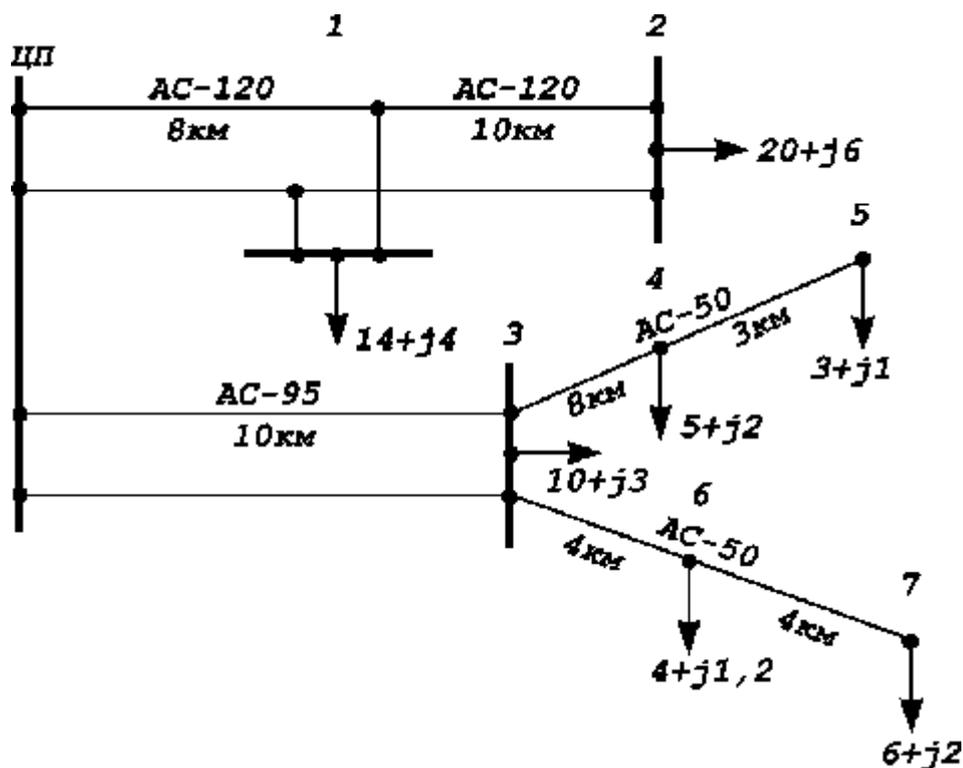
№6

Рассчитать режим работы разомкнутой сети 35 кВ, схема которой приведена на рисунке: а) при напряжении ИП 37 кВ; б) при напряжении в конце линии Л2 32,5 кВ. Определить мощность, выдаваемую с шин ИП, и коэффициент мощности на шинах ИП.



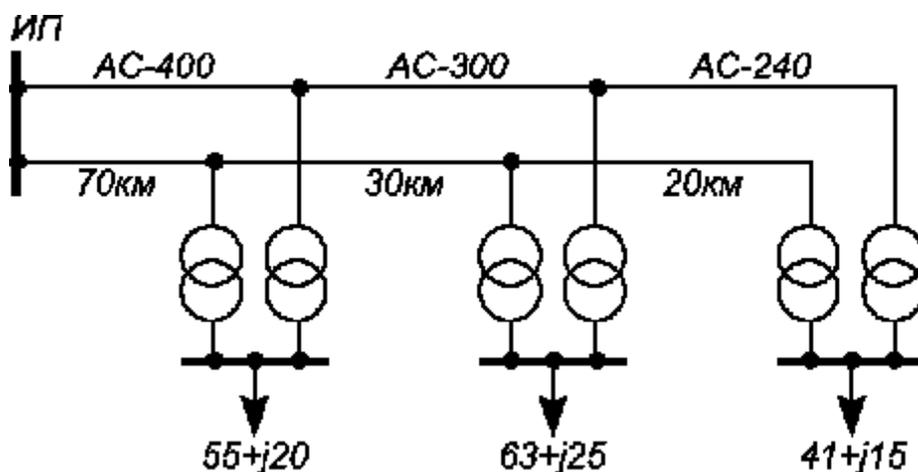
№7

Рассчитать режим разомкнутой сети 35 кВ, схема которой приведена на рисунке: а) при напряжении центра питания 37,5 кВ; б) при напряжении в узле 5, равном 32,5 кВ. Определить суммарные потери мощности в сети.



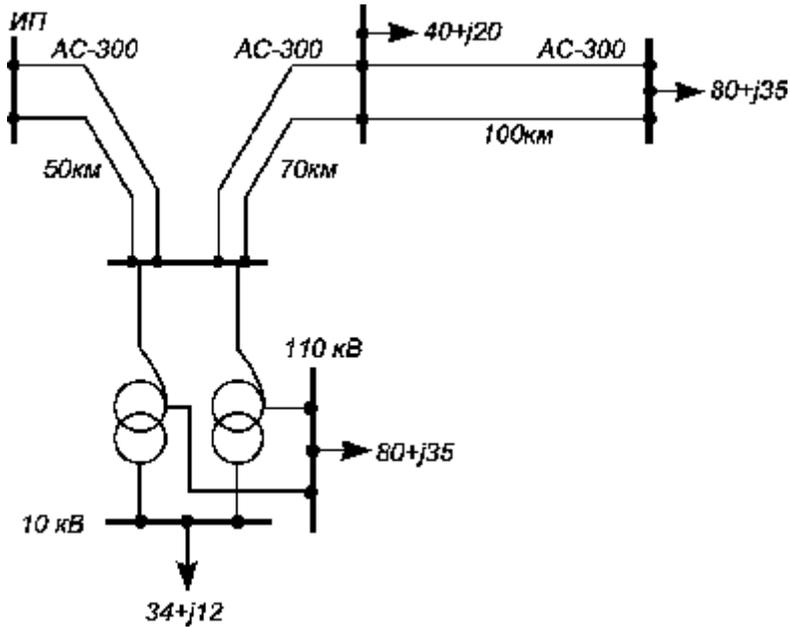
№8

Рассчитать установившийся режим работы разомкнутой сети 220 кВ, схема которой приведена на рисунке: а) $U_{ип} = 236$ кВ; б) напряжение в конце линии $U = 218$ кВ. Построить векторные диаграммы.



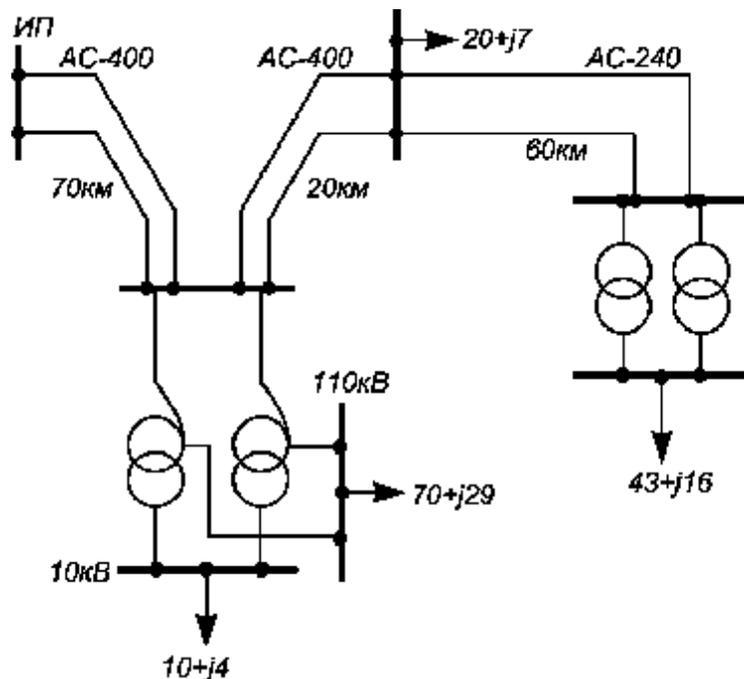
№9

Рассчитать режим разомкнутой сети, схема которой приведена на рисунке, при: а) напряжении $U_{ип} = 340$ кВ; б) напряжении в конце линии $U = 320$ кВ. Построить векторные диаграммы.



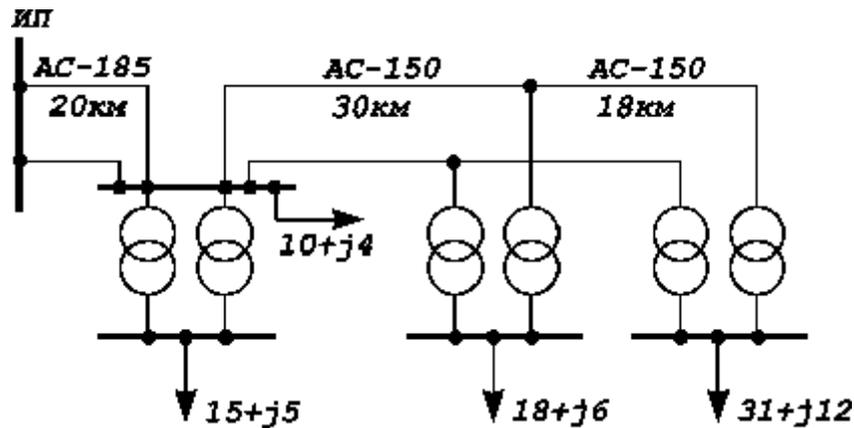
№10

Рассчитать режим разомкнутой сети 220 кВ, схема которой приведена на рисунке, при: а) напряжении $U_{ип} = 242$ кВ; б) напряжении в конце линии $U = 205$ кВ.



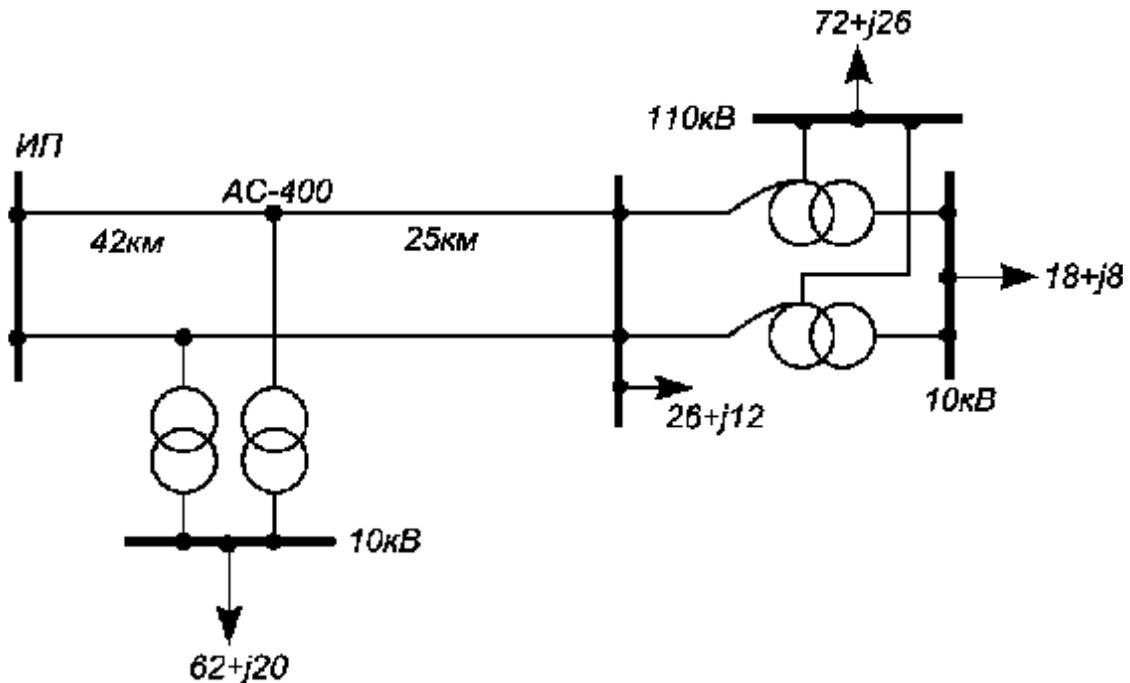
№11

Рассчитать режим районной разомкнутой сети 110 кВ, схема которой приведена на рисунке, при: а) напряжении $U_{ип} = 117$ кВ; б) напряжении в конце линии 109 кВ. Построить векторную диаграмму.



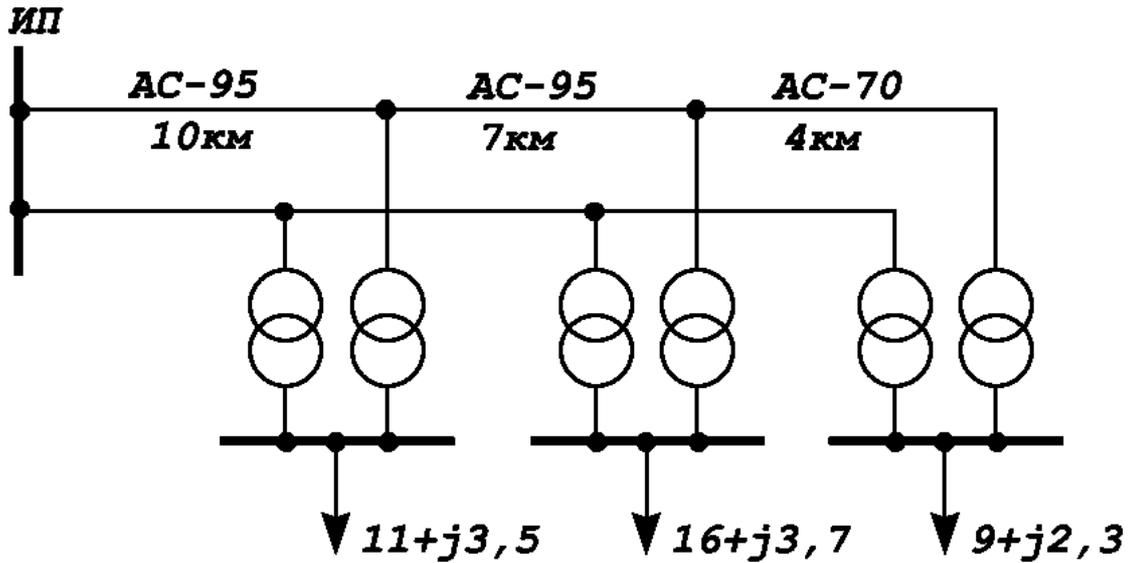
№12

Рассчитать режим разомкнутой сети напряжением 220 кВ, схема которой приведена на рисунке, при: а) напряжении $U_{ип} = 240$ кВ; б) напряжении в конце линии 210 кВ.



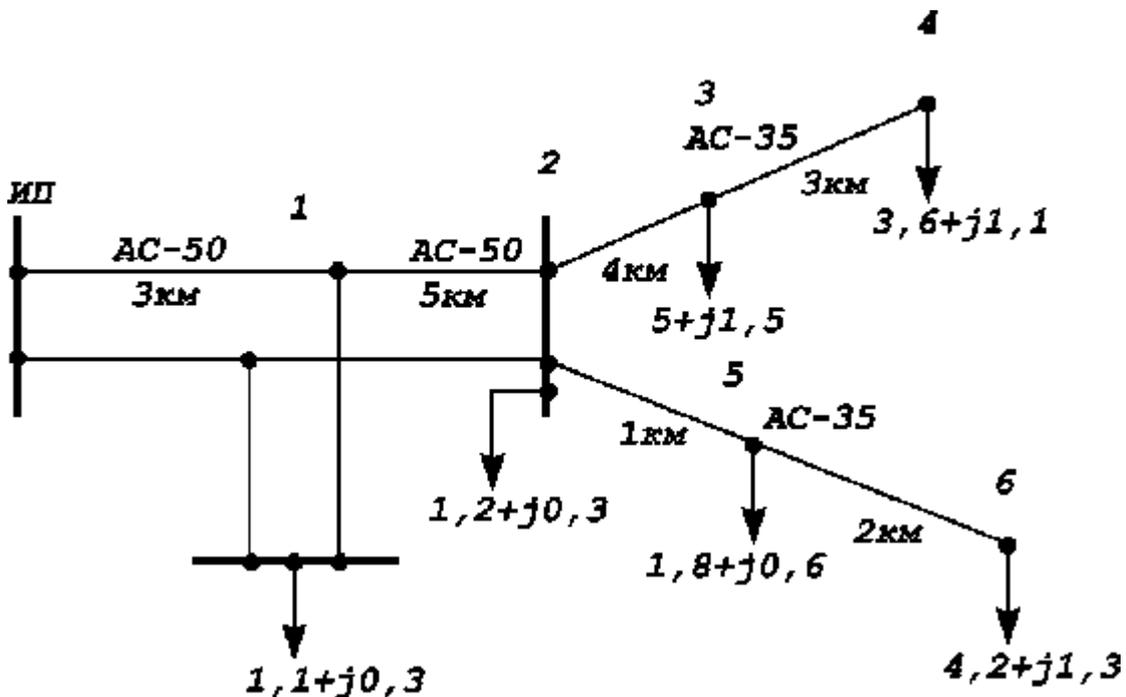
№13

Рассчитать режим разомкнутой сети напряжением 35 кВ для случаев:
 а) известного напряжения $U_{ИП} = 37,2$ кВ; б) известного напряжения в конце линии $U_k = 33$ кВ. Определить мощность, выдаваемую с шин ИП.



№14

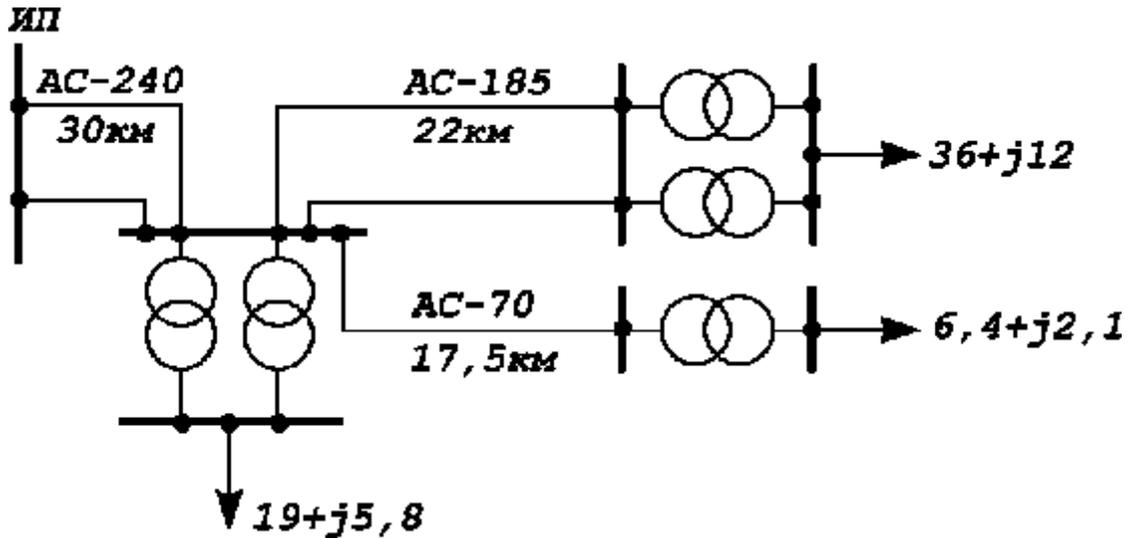
Рассчитать режим разомкнутой сети 10 кВ для случаев: а) $U_{ИП} = 11$ кВ; б) напряжение в узле 4 равно 9,5 кВ. Определить наибольшую потерю напряжения в сети.



№15

Рассчитать режим разомкнутой сети 110 кВ для двух случаев:

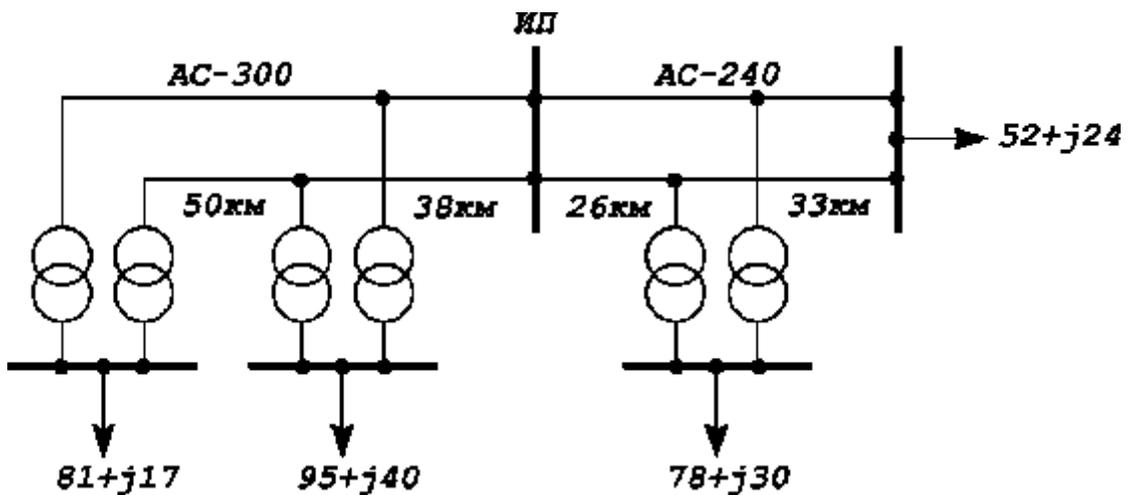
- а) $U_{ип} = 117$ кВ; б) напряжение в конце двухцепной линии - 107 кВ.



№16

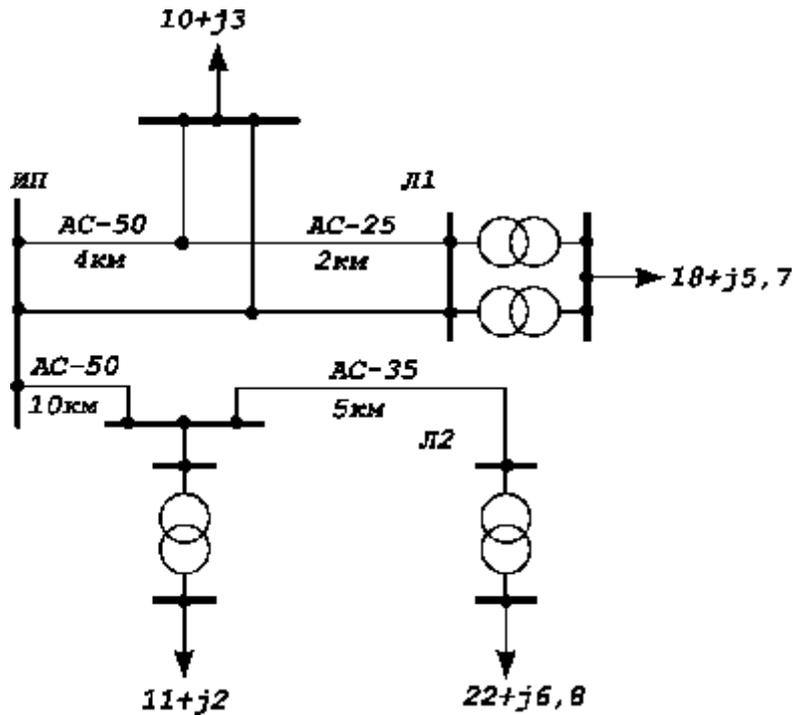
Рассчитать режим районной разомкнутой сети 220 кВ при:

- а) $U_{ип} = 238$ кВ; б) напряжении в конце линии 205 кВ. Построить векторные диаграммы.



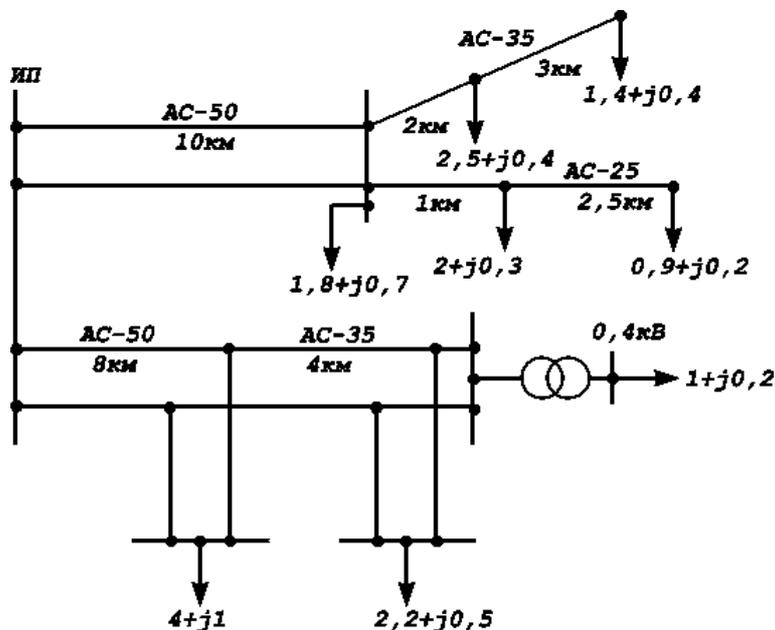
№17

Рассчитать режим разомкнутой сети 35 кВ при: а) напряжении $U_{ип} = 37$ кВ; б) напряжении в конце линии 32 кВ. Построить векторную диаграмму для указанной линии Л1.



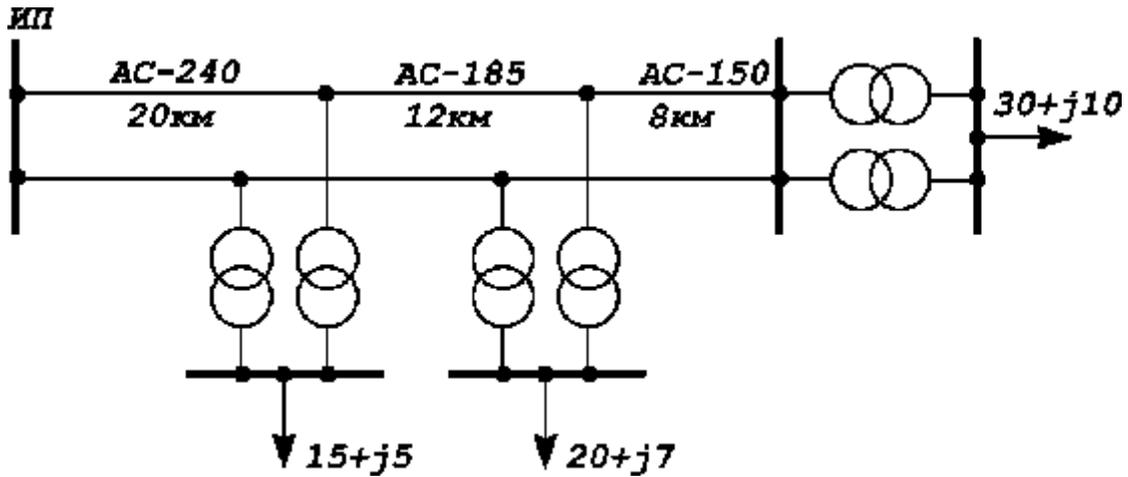
№18

Рассчитать режим разомкнутой сети при: а) $U_{ип} = 10,7$ кВ; б) напряжении в конце двухцепной линии 9,6 кВ. Определить суммарные потери мощности в сети.



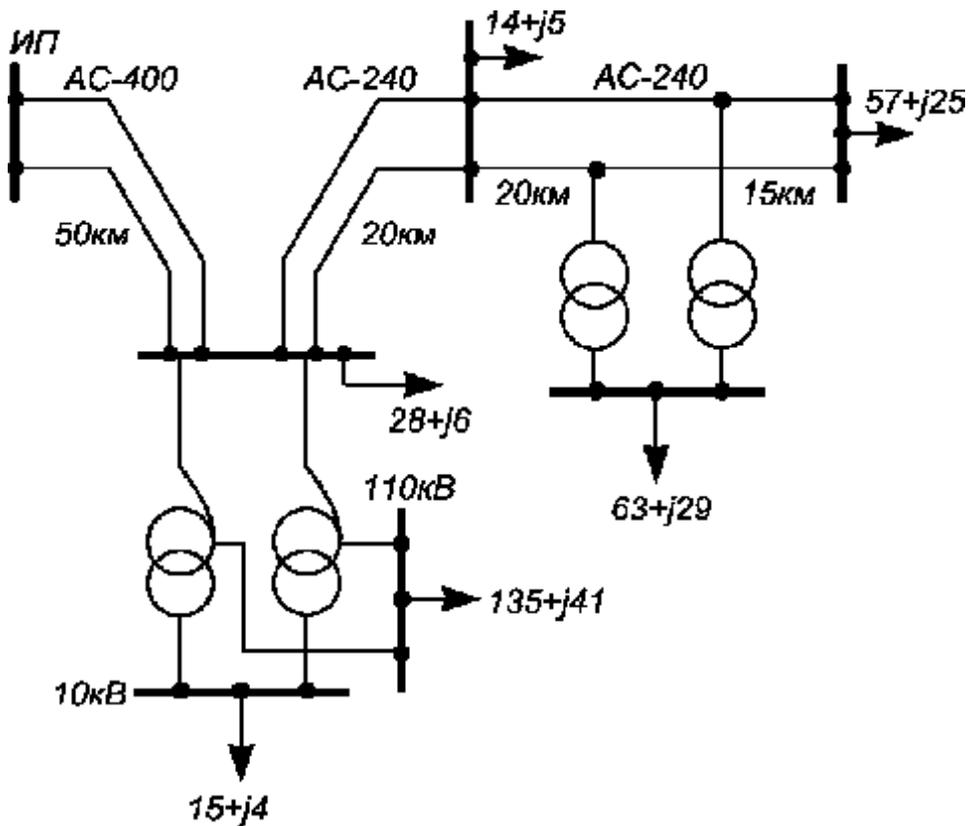
№19

Рассчитать установившийся режим 110 кВ для двух случаев:
 а) $U_{ип} = 119\text{кВ}$; б) напряжение в конце линии 107 кВ. Построить векторные диаграммы.



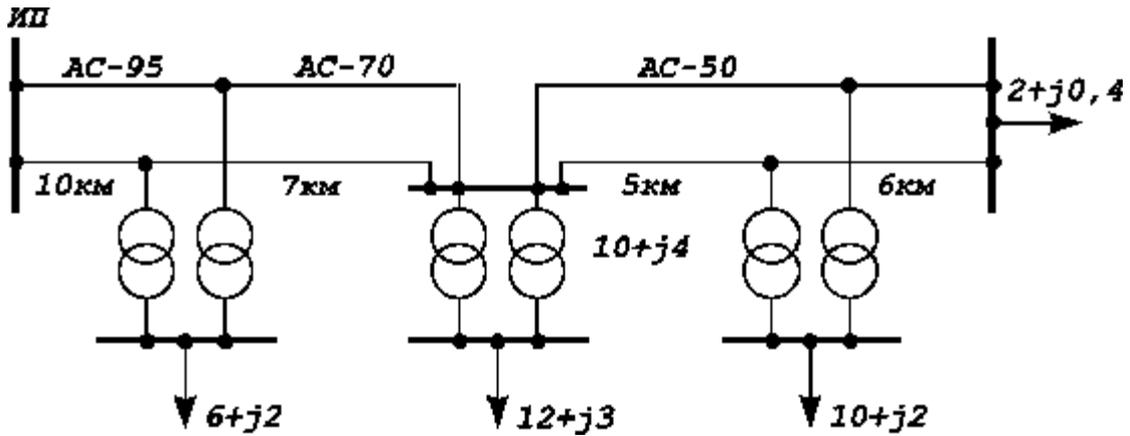
№20

Рассчитать режим разомкнутой сети при: а) $U_{ип} = 228\text{ кВ}$;
 б) напряжении в конце линии 209 кВ. Построить векторные диаграммы.



№21

Рассчитать режим разомкнутой сети при: а) напряжении ИП, равном $U_{ИП} = 37,8$ кВ; б) напряжении в конце линии, равном 32 кВ.



Для всех задач, если не указано номинальное напряжение на низкой стороне трансформатора, принимать его равным 10 кВ.

3. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ПРОСТЫХ ЗАМКНУТЫХ СЕТЕЙ

3.1 Кольцевые сети

Сети с одноконтурной конфигурацией называются кольцевыми. Кольцевые сети могут иметь как одинаковые номинальные напряжения всех участков, так и различные при осуществлении связи участков разных номинальных напряжений через автотрансформаторы или трехобмоточные трансформаторы соответствующих подстанций. Алгоритм расчета таких сетей един. Однако во втором случае перед расчетом установившихся режимов параметры схемы замещения участков сети приводят к одной ступени напряжения по следующим выражениям:

$$\underline{Z}_{\text{пр}} = \underline{Z}k_T^2, \quad \underline{Y}_{\text{пр}} = \frac{\underline{Y}}{k_T^2}, \quad (115)$$

где $\underline{Z}_{\text{пр}}$, $\underline{Y}_{\text{пр}}$ - приведенные к базисному напряжению сопротивление и проводимость рассматриваемого элемента электрической сети;

k_T - коэффициент трансформации идеального трансформатора на пути между рассматриваемыми элементами и сетью базисной ступени напряжения.

Под базисным напряжением понимают напряжение той ступени, к которому приводят всю сеть. Как правило, это ступень с более высоким напряжением.

Т.к. реальное напряжение обмоток силового трансформатора или автотрансформатора заранее неизвестно, то при первом приближении коэффициенты трансформации определяют по номинальным напряжениям трансформатора или средним номинальным напряжениям сети. В этом случае при приведении сопротивлений или проводимостей более низкой ступени напряжения (второй) к более высокой ступени (первой) коэффициент трансформации идеального трансформатора определяется следующим образом:

3. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ПРОСТЫХ ЗАМКНУТЫХ СЕТЕЙ

3.1 Кольцевые сети

Сети с одноконтурной конфигурацией называются кольцевыми. Кольцевые сети могут иметь как одинаковые номинальные напряжения всех участков, так и различные при осуществлении связи участков разных номинальных напряжений через автотрансформаторы или трехобмоточные трансформаторы соответствующих подстанций. Алгоритм расчета таких сетей един. Однако во втором случае перед расчетом установившихся режимов параметры схемы замещения участков сети приводят к одной ступени напряжения по следующим выражениям:

$$\underline{Z}_{\text{пр}} = \underline{Z}k_T^2, \quad \underline{Y}_{\text{пр}} = \frac{\underline{Y}}{k_T^2}, \quad (115)$$

где $\underline{Z}_{\text{пр}}$, $\underline{Y}_{\text{пр}}$ - приведенные к базисному напряжению сопротивление и проводимость рассматриваемого элемента электрической сети;

k_T - коэффициент трансформации идеального трансформатора на пути между рассматриваемыми элементами и сетью базисной ступени напряжения.

Под базисным напряжением понимают напряжение той ступени, к которому приводят всю сеть. Как правило, это ступень с более высоким напряжением.

Т.к. реальное напряжение обмоток силового трансформатора или автотрансформатора заранее неизвестно, то при первом приближении коэффициенты трансформации определяют по номинальным напряжениям трансформатора или средним номинальным напряжениям сети. В этом случае при приведении сопротивлений или проводимостей более низкой ступени напряжения (второй) к более высокой ступени (первой) коэффициент трансформации идеального трансформатора определяется следующим образом:

$$k_T = \frac{U_{НОМ1}}{U_{НОМ2}}. \quad (116)$$

Таким образом, кольцевая сеть имеет одинаковое номинальное напряжение и готова к расчету (см. рис. 21).

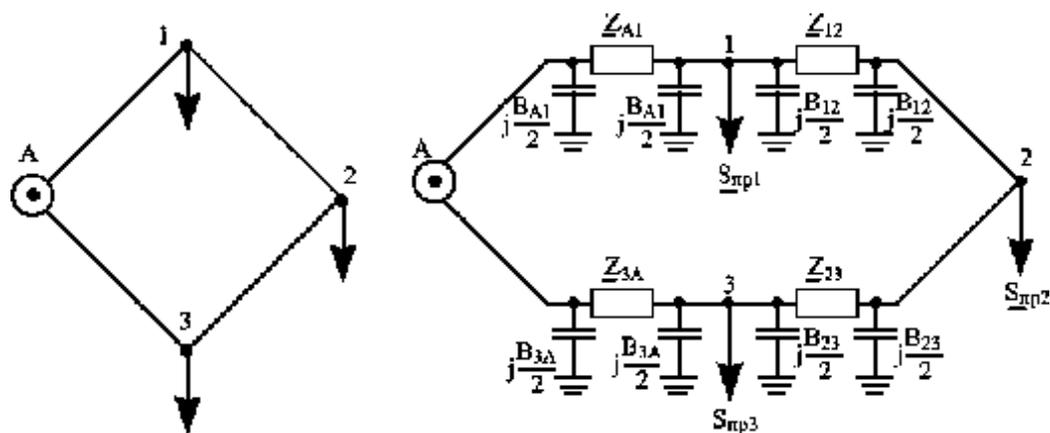


Рис. 21. Пример кольцевой сети и ее схема замещения

Алгоритм расчета кольцевых сетей при использовании метода последовательных приближений (см. п. 2.2.3) показан ниже.

1-й этап. Распределение потоков мощности по участкам кольцевой сети без учета потерь мощности

1. Кольцевая сеть разрезается по источнику питания и приводится к сети с двумя источниками питания, имеющими одинаковое напряжение (рис. 22).

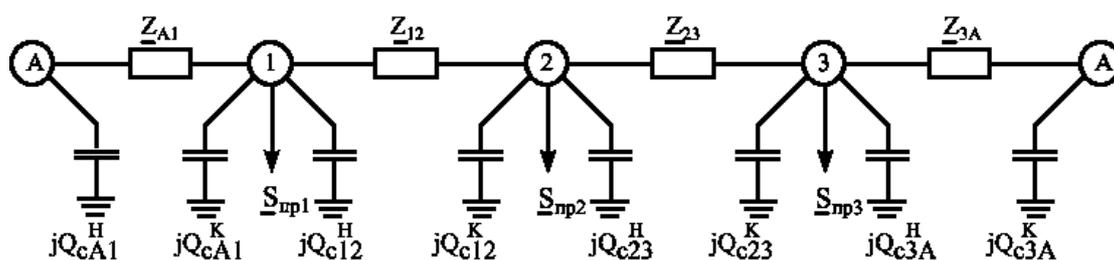


Рис. 22. Схема замещения кольцевой сети, разрезанной по источнику питания

2. Определяется расчетная нагрузка каждого узла по выражению (81).
Схема замещения кольцевой сети с расчетными нагрузками узлов подготовлена к определению потоков мощности на головных участках (см. рис. 23).

Под головным понимается участок сети, непосредственно примыкающий к источнику питания.

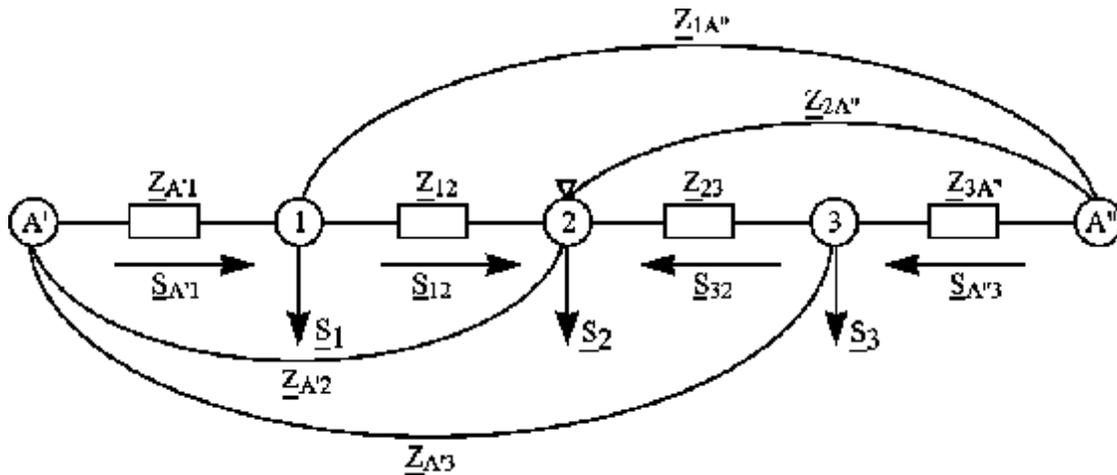


Рис. 23. Схема замещения кольцевой сети с расчетными нагрузками узлов

Здесь S_i - расчетная нагрузка i - го узла.

3. Определяются потоки мощности на головных участках, при этом используется допущение об отсутствии потерь мощности на участках. В общем виде:

$$\underline{S}_{A\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{a} S_i \underline{Z}_{iA\alpha}^*}{\underline{Z}_{A\zeta-A\alpha}^*}, \quad (117)$$

$$\underline{S}_{A\alpha\zeta} = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{a} S_i \underline{Z}_{iA\zeta}^*}{\underline{Z}_{A\zeta-A\alpha}^*} \quad (118)$$

или применительно к рассматриваемой схеме:

$$\underline{S}_{A\alpha} = \frac{\underline{S}_1 \underline{Z}_{1A\alpha}^* + \underline{S}_2 \underline{Z}_{2A\alpha}^* + \underline{S}_3 \underline{Z}_{3A\alpha}^*}{\underline{Z}_{A\zeta-A\alpha}^*}; \quad (119)$$

$$\underline{S}_{A\alpha\zeta} = \frac{\underline{S}_1 \underline{Z}_{1A\zeta}^* + \underline{S}_2 \underline{Z}_{2A\zeta}^* + \underline{S}_3 \underline{Z}_{3A\zeta}^*}{\underline{Z}_{A\zeta-A\alpha}^*}, \quad (120)$$

где \underline{S}_i - расчетная мощность нагрузки i -го узла;

$\underline{Z}_{iA\zeta}^*$, $\underline{Z}_{iA\alpha}^*$ - сопряженные комплексы сопротивлений от i -й точки сети до соответствующего конца (A' или A'') развернутой схемы замещения кольцевой сети при ее разрезании в точке источника питания;

$\underline{Z}_{A\alpha A\alpha}$ - сопряженный комплекс суммарного сопротивления всех участков кольцевой сети.

Проверка правильности расчета осуществляется по следующему условию: сумма потоков мощности на головных участках равна сумме расчетных мощностей всех узлов.

4. Определяется точка потокораздела активной и реактивной мощности. Точка потокораздела - тот узел сети, нагрузка которого получает питание с двух сторон. Иными словами, это точка сети, в которой встречаются потоки мощности. Для нахождения точки потокораздела используется первый закон Кирхгофа:

$$\underline{S}_{12} = \underline{S}_{A'1} - \underline{S}_1; \quad \underline{S}_{23} = \underline{S}_{12} - \underline{S}_2 \quad \text{и т.д.} \quad (121)$$

После точки потокораздела мощность на участке, следующем за ней, меняет свой знак на противоположный.

С целью проверки правильности расчета поток мощности на одном из участков рассчитывается с двух сторон. При этом должно выполняться условие (см. рис. 23):

$$\underline{S}_{23} = - \underline{S}_{32}. \quad (122)$$

Точка потокораздела на схеме замещения обозначается ∇ .

5. Разделение кольцевой сети на две разомкнутые магистральные в точке потокораздела.

В данном пункте схема замещения кольцевой сети приводится к двум схемам замещения разомкнутых сетей (см. рис. 24).

Значения \underline{S}_{12} и \underline{S}_{32} получены в п.4 при определении точки потокораздела.

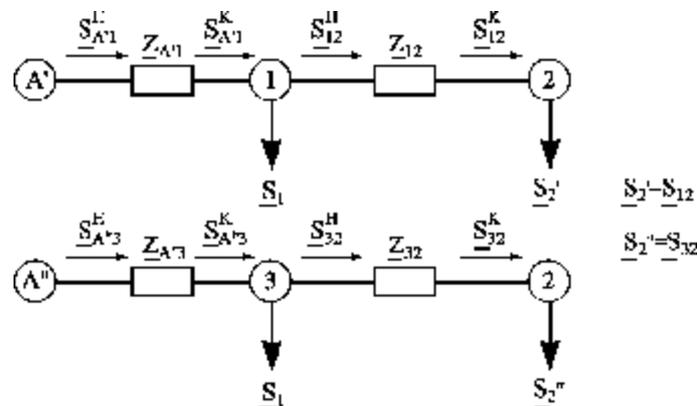


Рис. 24. Приведенная к двум разомкнутым схема замещения

6. Расчет двух разомкнутых сетей по алгоритму, приведенному в п.2.2.3, т.е. по методу расчета сети в два этапа (расчет разомкнутой сети по данным начала).

На первой итерации в качестве исходных приближений напряжения в узлах принимаются равными номинальному. В каждой из схем замещения, приведенных на рис. 24, рассчитывается напряжение в узле 2, т.е. в точке потокораздела. Напряжение в точке потокораздела должно совпадать. В противном случае осуществляется переход ко второй итерации, при этом находят среднее значение напряжения в точке потокораздела:

$$U_2 = \frac{U_2^{\zeta} + U_2^{\alpha}}{2}. \quad (123)$$

В качестве напряжений узлов во второй итерации используются значения напряжений узлов, полученные на первой итерации, при этом напряжение узла 2 принимается равным среднему. Расчет оканчивается при достижении требуемой точности, т.е. значения напряжений в точке потокораздела, определенные с двух сторон, совпадают и на двух соседних итерациях не отличаются более чем на 5%.

3.2. Особенности расчета режимов замкнутых сетей при двух точках потокораздела

В общем случае точки потокораздела по активной и реактивной мощности могут не совпадать. Рассмотрим особенности расчета режимов таких сетей на примере схемы, приведенной на рис. 25.

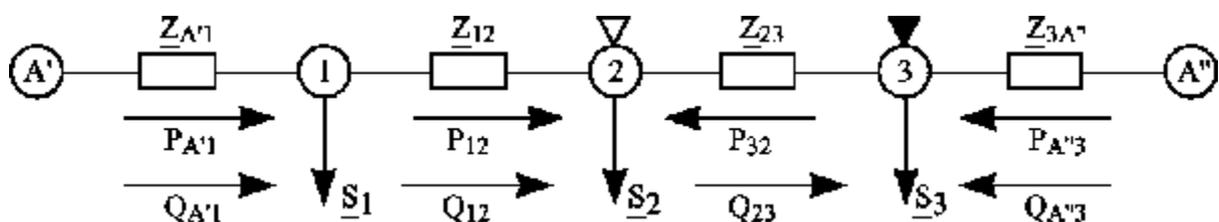


Рис. 25. Схема замещения простой замкнутой сети с двумя точками потокораздела

На рис. 26: ∇ - точка потокораздела по активной мощности;

\blacktriangledown - точка потокораздела по реактивной мощности.

Чтобы разделить сеть (рис. 25) на две разомкнутые сети, необходимо вычислить потери мощности на участке между точками потокораздела:

$$DS_{23} = DP_{23} + jDQ_{23} = \frac{P_{23}^2 + Q_{23}^2}{U_{ном}^2} Z_{23}. \quad (124)$$

Теперь необходимо «вырезать» участок между точками потокораздела, т.е. участок 2-3. Следовательно, потери мощности на нем нужно включить в нагрузку узлов 2 и 3 по следующим выражениям:

$$\underline{S}_{2*} = P_{12} + j(Q_{12} + DQ_{23}), \quad (125)$$

$$\underline{S}_{3*} = P_{A\alpha 3} + DP_{32} + jQ_{A\alpha 3}, \quad (126)$$

где потоки мощности \underline{S}_{ij} по участкам сети, без учета потерь мощности, определяются по алгоритму расчета кольцевых сетей, т.е. по выражениям (121).

Таким образом, рассматриваемая сеть приведена к двум разомкнутым (рис. 26) и может быть рассчитана по алгоритму расчета режимов разомкнутой сети при известных нагрузках и напряжениях источников питания.

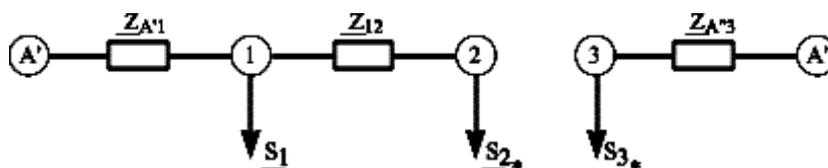


Рис. 26. Разделение простой замкнутой сети с двумя точками потокораздела на две разомкнутые

Примеры решения задач

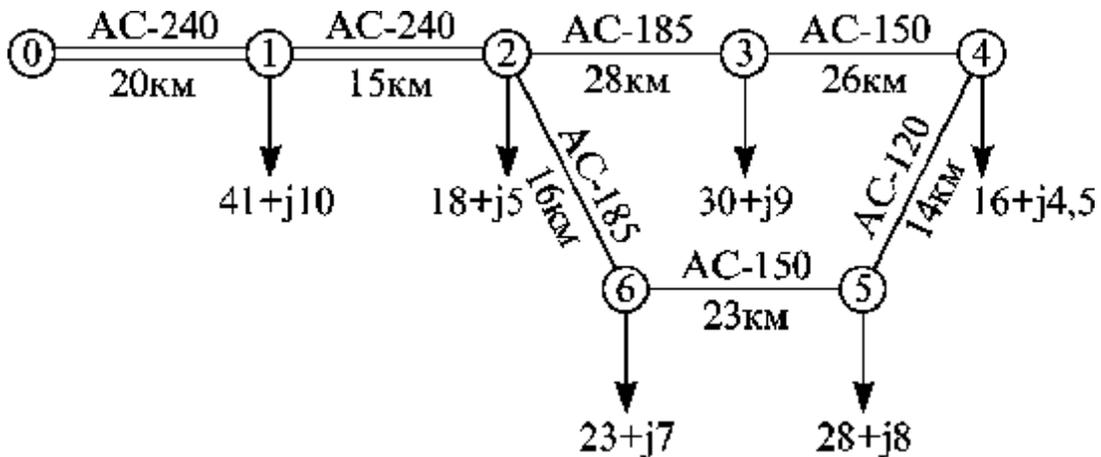
Листинг

примеров решения задач по разделу 3.1
в программе MathCad фирмы MathSoft

Пример 3.1.

Рассчитать потокораспределение в сети и напряжения в узлах сети, схема которой показана на рисунке, при известном напряжении источника питания. Исходные данные приведены на рисунке.

$U_{\text{ип}}=119,1 \text{ кВ}$.



Определяем сопротивления и проводимости всех участков сети аналогично примеру 2.2, пользуясь справочными данными /14/:

$$z_{01} := \left[0.13 \cdot 20 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{10.75} \right) + 0.0157 \right) \cdot 20 \right] \right] \cdot \frac{1}{2}$$

$$z_{01} = 1.3 + 4.012j \quad \text{Ом};$$

$$z_{12} := \left[0.13 \cdot 15 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{10.75} \right) + 0.0157 \right) \cdot 15 \right] \right] \cdot \frac{1}{2}$$

$$z_{12} = 0.975 + 3.009j \quad \text{Ом};$$

$$z_{23} := 0.17 \cdot 28 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{9.55} \right) + 0.0157 \right) \cdot 28 \right]$$

$$z_{23} = 4.76 + 11.441j \quad \text{Ом};$$

$$z_{34} := 0.21 \cdot 26 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{8.5} \right) + 0.0157 \right) \cdot 26 \right]$$

$$z_{34} = 5.46 + 10.813j \quad \text{ОМ};$$

$$z_{45} := 0.27 \cdot 14 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{7.65} \right) + 0.0157 \right) \cdot 14 \right]$$

$$z_{45} = 3.78 + 5.915j \quad \text{ОМ};$$

$$z_{56} := 0.21 \cdot 23 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{8.5} \right) + 0.0157 \right) \cdot 23 \right]$$

$$z_{56} = 4.83 + 9.566j \quad \text{ОМ};$$

$$z_{62} := 0.17 \cdot 16 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{5000}{9.55} \right) + 0.0157 \right) \cdot 16 \right]$$

$$z_{62} = 2.72 + 6.537j \quad \text{ОМ};$$

$$b_{001} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{5000}{10.75} \right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{001} = 2.842 \cdot 10^{-6} \quad \text{СМ};$$

$$b_{045} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{5000}{7.65} \right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{045} = 2.692 \cdot 10^{-6} \quad \text{СМ};$$

$$b_{012} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{5000}{10.75} \right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{012} = 2.842 \cdot 10^{-6} \quad \text{СМ};$$

$$b_{056} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{5000}{8.5} \right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{056} = 2.737 \cdot 10^{-6} \quad \text{СМ};$$

$$b_{023} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{5000}{9.55} \right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{023} = 2.788 \cdot 10^{-6} \quad \text{СМ};$$

$$b_{062} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{5000}{9.55} \right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{062} = 2.788 \cdot 10^{-6} \quad \text{СМ};$$

$$b_{o34} := \frac{7.58}{\log\left(\frac{5000}{8.5}\right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{o34} = 2.737 \cdot 10^{-6} \quad \text{См};$$

$$U_0 := 119.1 \text{ кВ.}$$

Рассчитываем зарядные мощности участков сети по номинальному напряжению:

$$Q_{c01} := 110^2 \cdot b_{o01} \cdot 20$$

$$Q_{c01} = 0.688 \quad \text{Мвар};$$

$$Q_{c12} := 110^2 \cdot b_{o12} \cdot 15$$

$$Q_{c12} = 0.516 \quad \text{Мвар};$$

$$Q_{c23} := \frac{110^2 \cdot b_{o23} \cdot 28}{2}$$

$$Q_{c23} = 0.472 \quad \text{Мвар};$$

$$Q_{c34} := \frac{110^2 \cdot b_{o34} \cdot 26}{2}$$

$$Q_{c34} = 0.431 \quad \text{Мвар};$$

$$Q_{c45} := \frac{110^2 \cdot b_{o45} \cdot 14}{2}$$

$$Q_{c45} = 0.228 \quad \text{Мвар};$$

$$Q_{c56} := \frac{110^2 \cdot b_{o56} \cdot 23}{2}$$

$$Q_{c56} = 0.381 \quad \text{Мвар};$$

$$Q_{c62} := \frac{110^2 \cdot b_{o62} \cdot 16}{2}$$

$$Q_{c62} = 0.27 \quad \text{Мвар.}$$

Определяем расчетные нагрузки узлов:

$$S_1 := 41 + j \cdot 10 - j \cdot Q_{c01} - j \cdot Q_{c12}$$

$$S_1 = 41 + 8.797j \quad \text{МВА};$$

$$S_2 := 18 + j \cdot 5 - j \cdot Q_{c12} - j \cdot Q_{c23} - j \cdot Q_{c62}$$

$$S_2 = 18 + 3.742j \quad \text{МВА};$$

$$S_3 := 30 + j \cdot 9 - j \cdot Q_{c23} - j \cdot Q_{c34}$$

$$S_3 = 30 + 8.097j \quad \text{МВА};$$

$$S_4 := 16 + j \cdot 4.5 - j \cdot Q_{c34} - j \cdot Q_{c45}$$

$$S_4 = 16 + 3.841j \quad \text{МВА};$$

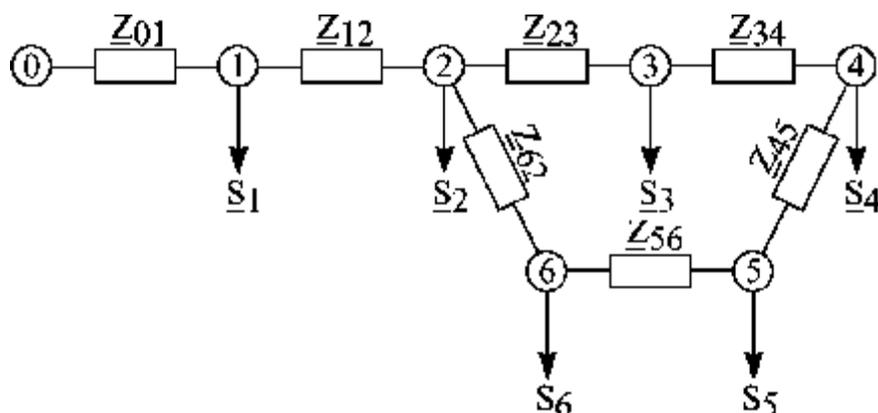
$$S_5 := 28 + j \cdot 8 - j \cdot Q_{c45} - j \cdot Q_{c56}$$

$$S_5 = 28 + 7.391j \quad \text{МВА};$$

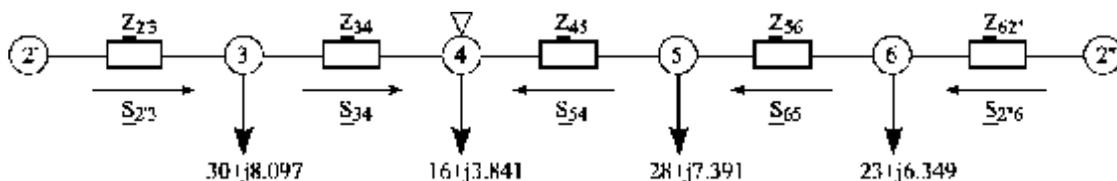
$$S_6 := 23 + j \cdot 7 - j \cdot Q_{c56} - j \cdot Q_{c62}$$

$$S_6 = 23 + 6.349j \quad \text{МВА.}$$

Схема замещения сети имеет вид, показанный на рисунке. Здесь приведены расчетные нагрузки узлов.



Принимаем в качестве источника питания узел 2, по которому разрезаем кольцевую сеть. Схема замещения кольцевой сети имеет вид:



Определим потоки мощности на головных участках, для чего вначале рассчитаем сопротивления. При определении сопротивлений учтено, что $Z_{2'3} = Z_{23}$ и $Z_{2''6} = Z_{26}$.

$$z_{2'2''} := z_{23} + z_{34} + z_{45} + z_{56} + z_{62}$$

$$z_{32''} := z_{34} + z_{45} + z_{56} + z_{62}$$

$$z_{62'} := z_{56} + z_{45} + z_{34} + z_{23}$$

$$z_{42''} := z_{45} + z_{56} + z_{62}$$

$$z_{52'} := z_{45} + z_{34} + z_{23}$$

$$z_{52''} := z_{56} + z_{62}$$

$$z_{42'} := z_{34} + z_{23}$$

$$z_{62''} := z_{62}$$

$$z_{32'} := z_{23}$$

Потоки мощности на головных участках (сопряжение показывается черточкой сверху):

$$S_{2'3} := \frac{\overline{S_3 \cdot z_{32''}} + \overline{S_4 \cdot z_{42''}} + \overline{S_5 \cdot z_{52''}} + \overline{S_6 \cdot z_{62''}}}{z_{2'2''}}$$

$$S_{2'3} = 43.852 + 11.856j \text{ MVA};$$

$$S_{2''6} := \frac{S_6 \cdot \overline{z_{62'}} + S_5 \cdot \overline{z_{52'}} + S_4 \cdot \overline{z_{42'}} + S_3 \cdot \overline{z_{32'}}}{z_{2'2''}}$$

$$S_{2''6} = 53.148 + 13.823j \quad \text{МВА.}$$

Находим потоки мощности на остальных участках сети

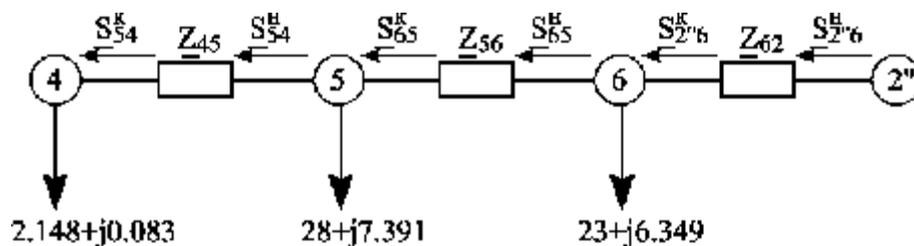
$$S_{34} := S_{2'3} - S_3 \quad S_{34} = 13.852 + 3.759j \quad \text{МВА;}$$

$$S_{45} := S_{34} - S_4 \quad S_{45} = -2.148 - 0.083j \quad \text{МВА;}$$

$$S_{65} := S_{2''6} - S_6 \quad S_{65} = 30.148 + 7.474j \quad \text{МВА;}$$

$$S_{54} := S_{65} - S_5 \quad S_{54} = 2.148 + 0.083j \quad \text{МВА.}$$

Точка 4 - точка потокораздела, по которой разрезаем кольцевую сеть на две разомкнутые. Расчет каждой разомкнутой сети ведем по данным начала.



Потери мощности на участке сети 4-5:

активные

$$dP_{54} := \frac{\text{Re}((S_{45}))^2 + \text{Im}((S_{45}))^2}{110^2} \cdot \text{Re}(z_{45}) \quad dP_{54} = 1.443 \cdot 10^{-3} \quad \text{МВт;}$$

реактивные

$$dQ_{54} := \frac{\text{Re}((S_{45}))^2 + \text{Im}((S_{45}))^2}{110^2} \cdot \text{Im}(z_{45}) \quad dQ_{54} = 2.258 \cdot 10^{-3} \quad \text{Мвар;}$$

$$S_{54n} := S_{54} + dP_{54} + j \cdot dQ_{54} \quad S_{54n} = 2.149 + 0.085j \quad \text{МВА.}$$

Определяем мощность в конце участка 5-6 и потери мощности на нем:

$$S_{65k} := S_{54n} + S_5 \quad S_{65k} = 30.149 + 7.476j \quad \text{МВА;}$$

$$dP_{65} := \frac{\operatorname{Re}((S_{65k})^2) + \operatorname{Im}((S_{65k}))^2}{110^2} \cdot \operatorname{Re}(z_{56}) \quad dP_{65} = 0.385 \quad \text{МВт};$$

$$dQ_{65} := \frac{\operatorname{Re}((S_{65k})^2) + \operatorname{Im}((S_{65k}))^2}{110^2} \cdot \operatorname{Im}(z_{56}) \quad dQ_{65} = 0.763 \quad \text{Мвар.}$$

Мощность в начале участка 5-6

$$S_{65n} := S_{65k} + dP_{65} + j \cdot dQ_{65} \quad S_{65n} = 30.534 + 8.239j \quad \text{МВА.}$$

Далее расчет ведем аналогично.

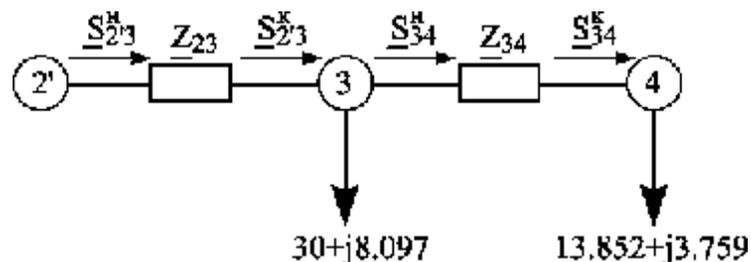
$$S_{2''6k} := S_{65n} + S_6 \quad S_{2''6k} = 53.534 + 14.588j \quad \text{МВА};$$

$$dP_{2''6} := \frac{\operatorname{Re}((S_{2''6k})^2) + \operatorname{Im}((S_{2''6k}))^2}{110^2} \cdot \operatorname{Re}(z_{62}) \quad dP_{2''6} = 0.692 \quad \text{МВт};$$

$$dQ_{2''6} := \frac{\operatorname{Re}((S_{2''6k})^2) + \operatorname{Im}((S_{2''6k}))^2}{110^2} \cdot \operatorname{Im}(z_{62}) \quad dQ_{2''6} = 1.663 \quad \text{Мвар};$$

$$S_{2''6n} := S_{2''6k} + dP_{2''6} + j \cdot dQ_{2''6} \quad S_{2''6n} = 54.226 + 16.252j \quad \text{МВА.}$$

Определим потоки мощности в сети 2'-4.



$$dP_{34} := \frac{\operatorname{Re}((S_{34})^2) + \operatorname{Im}((S_{34}))^2}{110^2} \cdot \operatorname{Re}(z_{34}) \quad dP_{34} = 0.093 \quad \text{МВт};$$

$$dQ_{34} := \frac{\operatorname{Re}((S_{34})^2) + \operatorname{Im}((S_{34}))^2}{110^2} \cdot \operatorname{Im}(z_{34}) \quad dQ_{34} = 0.184 \quad \text{Мвар};$$

$$S_{34n} := S_{34} + dP_{34} + j \cdot dQ_{34} \quad S_{34n} = 13.945 + 3.943j \quad \text{МВА};$$

$$S_{2'3k} := S_{34n} + S_3 \quad S_{2'3k} = 43.945 + 12.04j \quad \text{МВА};$$

$$dP_{2'3} := \frac{\operatorname{Re}((S_{2'3k})^2) + \operatorname{Im}((S_{2'3k}))^2}{110^2} \cdot \operatorname{Re}(z_{23}) \quad dP_{2'3} = 0.817 \quad \text{МВт};$$

$$dQ_{2'3} := \frac{\operatorname{Re}((S_{2'3k}))^2 + \operatorname{Im}((S_{2'3k}))^2}{110^2} \cdot \operatorname{Im}(z_{23}) \quad dQ_{2'3} = 1.963 \quad \text{Мвар};$$

$$S_{2'3n} := S_{2'3k} + dP_{2'3} + j \cdot dQ_{2'3} \quad S_{2'3n} = 44.762 + 14.003j \quad \text{МВА.}$$

Рассчитаем потоки мощности на участке сети 0- 2.

$$S_{12k} := S_{2'3k} + S_{2''6n} + S_2 \quad S_{12k} = 116.172 + 32.034j \quad \text{МВА};$$

$$dP_{12} := \frac{\operatorname{Re}((S_{12k}))^2 + \operatorname{Im}((S_{12k}))^2}{110^2} \cdot \operatorname{Re}(z_{12}) \quad dP_{12} = 1.17 \quad \text{МВт};$$

$$dQ_{12} := \frac{\operatorname{Re}((S_{12k}))^2 + \operatorname{Im}((S_{12k}))^2}{110^2} \cdot \operatorname{Im}(z_{12}) \quad dQ_{12} = 3.611 \quad \text{Мвар};$$

$$S_{12n} := S_{12k} + dP_{12} + j \cdot dQ_{12} \quad S_{12n} = 117.342 + 35.645j \quad \text{МВА};$$

$$S_{01k} := S_{12n} + S_1 \quad S_{01k} = 158.342 + 44.441j \quad \text{МВА};$$

$$dP_{01} := \frac{\operatorname{Re}((S_{01k}))^2 + \operatorname{Im}((S_{01k}))^2}{110^2} \cdot \operatorname{Re}(z_{01}) \quad dP_{01} = 2.906 \quad \text{МВт};$$

$$dQ_{01} := \frac{\operatorname{Re}((S_{01k}))^2 + \operatorname{Im}((S_{01k}))^2}{110^2} \cdot \operatorname{Im}(z_{01}) \quad dQ_{01} = 8.967 \quad \text{Мвар};$$

$$S_{01n} := S_{01k} + dP_{01} + j \cdot dQ_{01} \quad S_{01n} = 161.248 + 53.409j \quad \text{МВА};$$

Рассчитываем напряжения в узлах схемы по известному напряжению источника питания и потоку мощности в начале головного участка. Т.к. в сети номинального напряжения 110 кВ поперечная составляющая падения напряжения мала, в инженерных расчетах ею можно пренебречь и учесть только продольную составляющую.

$$U_0 = 119.1 \quad \text{кВ.}$$

$$U_1 := U_0 - \frac{\operatorname{Re}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{01}) + \operatorname{Im}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{01})}{U_0} \quad U_1 = 115.541 \quad \text{кВ};$$

$$U_2 := U_1 - \frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12}) + \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12})}{U_1} \quad U_2 = 113.623 \quad \text{кВ};$$

$$U_3 := U_2 - \frac{\operatorname{Re}(S_{2'3n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23}) + \operatorname{Im}(S_{2'3n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23})}{U_2} \quad U_3 = 110.337 \text{ кВ};$$

$$U_4 := U_3 - \frac{\operatorname{Re}(S_{34n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{34}) + \operatorname{Im}(S_{34n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{34})}{U_3} \quad U_4 = 109.261 \text{ кВ};$$

$$U_6 := U_2 - \frac{\operatorname{Re}(S_{2''6n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{62}) + \operatorname{Im}(S_{2''6n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{62})}{U_2} \quad U_6 = 111.389 \text{ кВ};$$

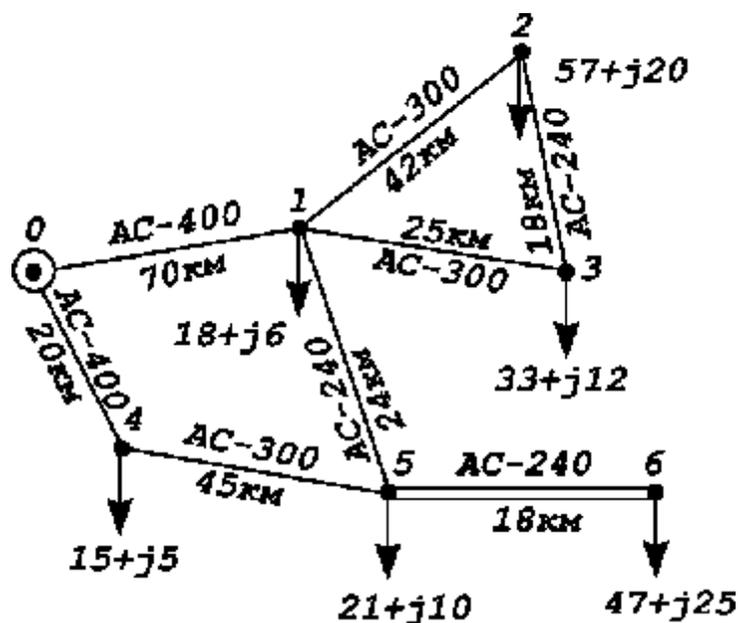
$$U_5 := U_6 - \frac{\operatorname{Re}(S_{65n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{56}) + \operatorname{Im}(S_{65n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{56})}{U_6} \quad U_5 = 109.358 \text{ кВ};$$

$$U_4 := U_5 - \frac{\operatorname{Re}(S_{54n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{45}) + \operatorname{Im}(S_{54n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{45})}{U_5} \quad U_4 = 109.279 \text{ кВ}.$$

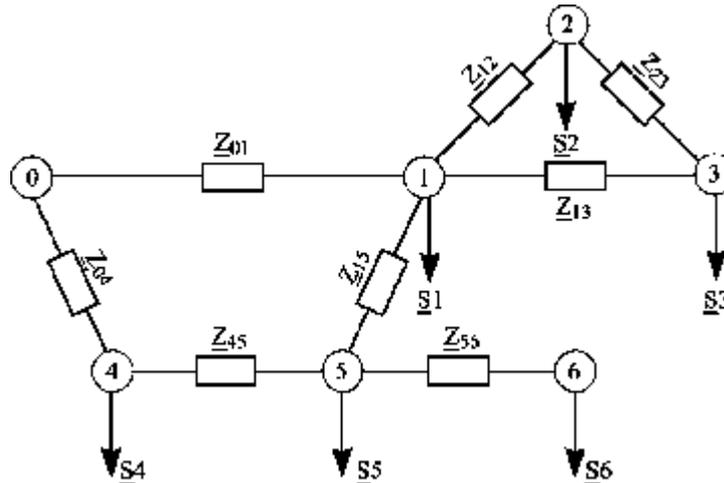
Сравнивая напряжения в точке потокораздела, полученные с двух сторон, между собой и с номинальным напряжением сети, делаем вывод, что вторая итерация не нужна.

Пример 3.2.

Рассчитать установившийся режим в сети, схема которой приведена на рисунке. Напряжение источника питания 242 кВ. Мощности нагрузок узлов заданы в МВА.



Составляем схему замещения, в которой покажем расчетные нагрузки узлов.



Определяем параметры схемы замещения.

Находим значения сопротивлений и проводимостей по справочным данным /14/:

$$z_{01} := 0.078 \cdot 70 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{13.9} \right) + 0.0157 \right) \cdot 70 \right]$$

$$z_{01} = 5.46 + 28.431i \quad \text{Ом};$$

$$z_{12} := 0.105 \cdot 42 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{12.2} \right) + 0.0157 \right) \cdot 42 \right]$$

$$z_{12} = 4.41 + 17.402i \quad \text{Ом};$$

$$z_{13} := 0.105 \cdot 25 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{12.2} \right) + 0.0157 \right) \cdot 25 \right]$$

$$z_{13} = 2.625 + 10.358i \quad \text{Ом};$$

$$z_{23} := 0.13 \cdot 18 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{10.75} \right) + 0.0157 \right) \cdot 18 \right]$$

$$z_{23} = 2.34 + 7.601i \quad \text{Ом};$$

$$z_{04} := 0.078 \cdot 20 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{13.9} \right) + 0.0157 \right) \cdot 20 \right]$$

$$z_{04} = 1.56 + 8.123i \quad \text{Ом};$$

$$z_{45} := 0.105 \cdot 45 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{12.2} \right) + 0.0157 \right) \cdot 45 \right]$$

$$z_{45} = 4.725 + 18.645i \quad \text{Ом};$$

$$z_{15} := 0.13 \cdot 24 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{10.75} \right) + 0.0157 \right) \cdot 24 \right]$$

$$z_{15} = 3.12 + 10.135i \quad \text{Ом};$$

$$z_{56} := \left[0.13 \cdot 18 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{10.75} \right) + 0.0157 \right) \cdot 18 \right] \right] \cdot \frac{1}{2}$$

$$z_{56} = 1.17 + 3.801i \quad \text{Ом};$$

$$b_{001} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{7000}{13.9} \right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{001} = 2.805 \cdot 10^{-6} \quad \text{См};$$

$$b_{004} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{7000}{13.9} \right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{004} = 2.805 \cdot 10^{-6} \quad \text{См};$$

$$b_{012} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{7000}{12.2} \right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{012} = 2.748 \cdot 10^{-6} \quad \text{См};$$

$$b_{045} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{7000}{12.2} \right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{045} = 2.748 \cdot 10^{-6} \quad \text{См};$$

$$b_{013} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{7000}{12.2} \right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{013} = 2.748 \cdot 10^{-6} \quad \text{См};$$

$$b_{015} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{7000}{10.75} \right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{015} = 2.694 \cdot 10^{-6} \quad \text{См};$$

$$b_{023} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{7000}{10.75} \right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{023} = 2.694 \cdot 10^{-6} \quad \text{См};$$

$$b_{056} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{7000}{10.75} \right)} \cdot 10^{-6} \cdot 2$$

$$b_{056} = 5.388 \cdot 10^{-6} \quad \text{См};$$

$$U_0 := 242 \text{ кВ.}$$

Принимаем напряжения в узлах равными номинальному и рассчитываем зарядные мощности линий.

$$Q_{c01} := \frac{220^2 \cdot b_{o01} \cdot 70}{2} \qquad Q_{c01} = 4.752 \text{ Мвар};$$

$$Q_{c12} := \frac{220^2 \cdot b_{o12} \cdot 42}{2} \qquad Q_{c12} = 2.851 \text{ Мвар};$$

$$Q_{c13} := \frac{220^2 \cdot b_{o13} \cdot 25}{2} \qquad Q_{c13} = 1.662 \text{ Мвар};$$

$$Q_{c23} := \frac{220^2 \cdot b_{o23} \cdot 18}{2} \qquad Q_{c23} = 1.173 \text{ Мвар};$$

$$Q_{c04} := \frac{220^2 \cdot b_{o04} \cdot 20}{2} \qquad Q_{c04} = 1.358 \text{ Мвар};$$

$$Q_{c45} := \frac{220^2 \cdot b_{o45} \cdot 45}{2} \qquad Q_{c45} = 2.992 \text{ Мвар};$$

$$Q_{c15} := \frac{220^2 \cdot b_{o15} \cdot 24}{2} \qquad Q_{c15} = 1.565 \text{ Мвар};$$

$$Q_{c56} := \frac{220^2 \cdot b_{o56} \cdot 18}{2} \qquad Q_{c56} = 2.347 \text{ Мвар}.$$

Находим расчетные мощности узлов нагрузки.

$$S_2 := 57 + j \cdot 20 - j \cdot Q_{c12} - j \cdot Q_{c23} \qquad S_2 = 57 + 15.975i \text{ МВА};$$

$$S_3 := 33 + j \cdot 12 - j \cdot Q_{c23} - j \cdot Q_{c13} \qquad S_3 = 33 + 9.164i \text{ МВА};$$

$$S_4 := 15 + j \cdot 5 - j \cdot Q_{c04} - j \cdot Q_{c45} \qquad S_4 = 15 + 0.65i \text{ МВА};$$

$$S_6 := 47 + j \cdot 25 - j \cdot Q_{c56} \qquad S_6 = 47 + 22.653i \text{ МВА}.$$

Определяем потери мощности на участке 5-6 и мощность в начале участка.

$$DS_{56} := \frac{\operatorname{Re}(S_6)^2 + \operatorname{Im}(S_6)^2}{220^2} \cdot z_{56} \qquad DS_{56} = 0.066 + 0.214i \text{ МВА};$$

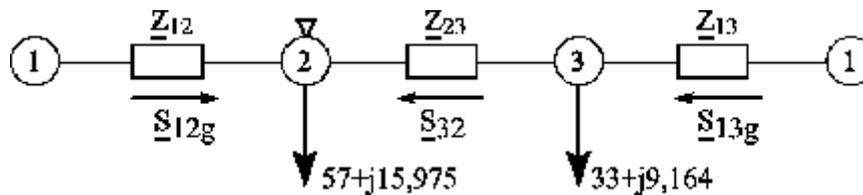
$$S_{56n} := S_6 + DS_{56} \quad S_{56n} = 47.066 + 22.867i \quad \text{MBA.}$$

Определяем суммарную нагрузку узла 5.

$$S_{5'} := 21 + j \cdot 10 - j \cdot Q_{c45} - j \cdot Q_{c56} - j \cdot Q_{c15} + S_6 + DS_{56}$$

$$S_{5'} = 68.066 + 25.963i \quad \text{MBA.}$$

Рассчитываем кольцо 1-2-3, разрезая его по узлу 1 как по источнику питания.



Находим потоки мощности на головных участках.

$$S_{12g} := \frac{S_2 \cdot (\overline{z_{23}} + \overline{z_{13}}) + S_3 \cdot \overline{z_{13}}}{z_{12} + z_{23} + z_{13}} \quad S_{12g} = 38.612 + 11.014i \quad \text{MBA}$$

$$S_{13g} := \frac{S_3 \cdot (\overline{z_{23}} + \overline{z_{12}}) + S_2 \cdot \overline{z_{12}}}{z_{12} + z_{23} + z_{13}} \quad S_{13g} = 51.388 + 14.125i \quad \text{MBA}$$

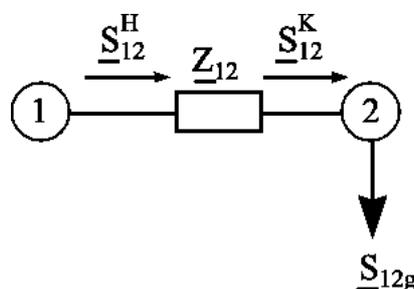
Определяем потоки мощности на остальных участках кольца.

$$S_{23} := S_{12g} - S_2 \quad S_{23} = -18.388 - 4.961i \quad \text{MBA}$$

$$S_{32} := S_{13g} - S_3 \quad S_{32} = 18.388 + 4.961i \quad \text{MBA}$$

Точка потокораздела - узел 2. Разрезаем сеть по узлу 2.

Рассчитываем разомкнутую сеть 1-2.



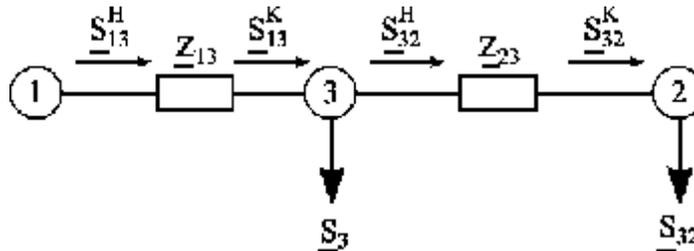
Определяем потери мощности на участке 1-2.

$$DS_{12} := \frac{\text{Re}(S_{12g})^2 + \text{Im}(S_{12g})^2}{220^2} \cdot z_{12} \quad DS_{12} = 0.147 + 0.58i \quad \text{MBA}$$

Мощность в начале участка 1-2:

$$S_{12n} := S_{12g} + DS_{12} \quad S_{12n} = 38.759 + 11.594i \quad \text{MVA}$$

Рассчитываем разомкнутую сеть 1-3-2.



Определяем потери мощности на участке 2-3.

$$DS_{32} := \frac{\text{Re}(S_{32})^2 + \text{Im}(S_{32})^2}{220^2} \cdot z_{23} \quad DS_{32} = 0.018 + 0.057i \quad \text{MVA}$$

Определяем поток мощности в начале участка 2-3

$$S_{32n} := S_{32} + DS_{32} \quad S_{32n} = 18.405 + 5.018i \quad \text{MVA}$$

Определяем поток мощности в конце участка 3-1

$$S_{13k} := S_{32n} + S_3 \quad S_{13k} = 51.405 + 14.182i \quad \text{MVA}$$

Определяем потери мощности на участке 3-1

$$DS_{13} := \frac{\text{Re}(S_{13k})^2 + \text{Im}(S_{13k})^2}{220^2} \cdot z_{13} \quad DS_{13} = 0.154 + 0.609i \quad \text{MVA}$$

Определяем поток мощности в начале участка 3-1

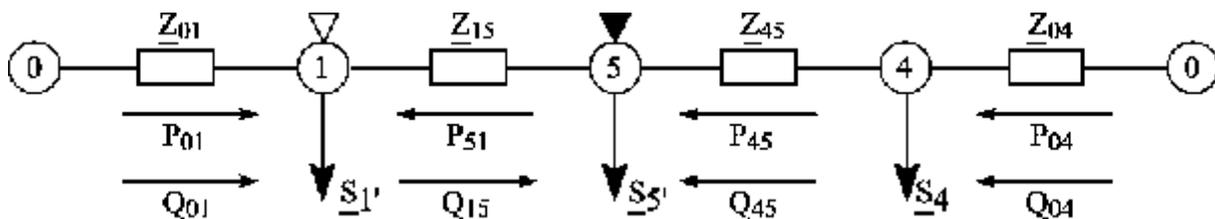
$$S_{13n} := S_{13k} + DS_{13} \quad S_{13n} = 51.559 + 14.791i \quad \text{MVA}$$

Находим суммарную нагрузку первого узла

$$S_{1'} := 18 + j6 + S_{12n} + S_{13n} - j(Q_{c01} + Q_{c12} + Q_{c13} + Q_{c15})$$

$$S_{1'} = 108.319 + 21.554i \quad \text{MVA}$$

Рассчитываем кольцо 0-1-5-4-0.



Разрезаем кольцо по источнику питания и определяем потоки мощности на головных участках.

$$S_{01g} := \frac{S_{1'} \cdot (\overline{z_{15}} + \overline{z_{45}} + \overline{z_{04}}) + S_{5'} \cdot (\overline{z_{45}} + \overline{z_{04}}) + S_{4'} \cdot (\overline{z_{04}})}{\overline{z_{01}} + \overline{z_{15}} + \overline{z_{45}} + \overline{z_{04}}}$$

$$S_{01g} = 90.939 + 24.701i \quad \text{MBA}$$

$$S_{04g} := \frac{S_{4'} \cdot (\overline{z_{45}} + \overline{z_{15}} + \overline{z_{01}}) + S_{5'} \cdot (\overline{z_{15}} + \overline{z_{01}}) + S_{1'} \cdot (\overline{z_{01}})}{\overline{z_{01}} + \overline{z_{15}} + \overline{z_{45}} + \overline{z_{04}}}$$

$$S_{04g} = 100.445 + 23.466i \quad \text{MBA}$$

Определяем потоки мощности на остальных участках кольца

$$S_{15} := S_{01g} - S_{1'} \qquad S_{15} = -17.379 + 3.147i \quad \text{MBA}$$

$$S_{45} := S_{04g} - S_{4'} \qquad S_{45} = 85.445 + 22.816i \quad \text{MBA}$$

$$S_{51} := S_{45} - S_{5'} \qquad S_{51} = 17.379 - 3.147i \quad \text{MBA}$$

В сети имеются две точки потокораздела: по активной мощности и по реактивной. Разрезаем сеть на две разомкнутые по точкам потокораздела, вырезая участок 1-5.

Находим потери мощности на участке 1-5

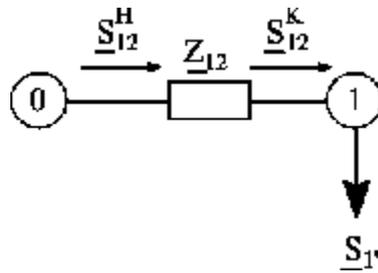
$$DS_{15} := \frac{\text{Re}(S_{15})^2 + \text{Im}(S_{15})^2}{220^2} \cdot z_{15} \qquad DS_{15} = 0.02 + 0.065i \quad \text{MBA}$$

Определим нагрузки узлов 1 и 5 при разделении кольцевой сети на две разомкнутые.

$$S_{1''} := \text{Re}(S_{01g}) + j \cdot (\text{Im}(DS_{15}) + \text{Im}(S_{01g})) \qquad S_{1''} = 90.939 + 24.766i \quad \text{MBA}$$

$$S_{5''} := \text{Re}(S_{45}) + \text{Re}(DS_{15}) + j \cdot \text{Im}(S_{45}) \qquad S_{5''} = 85.465 + 22.816i \quad \text{MBA}$$

Разомкнутая сеть 0-1



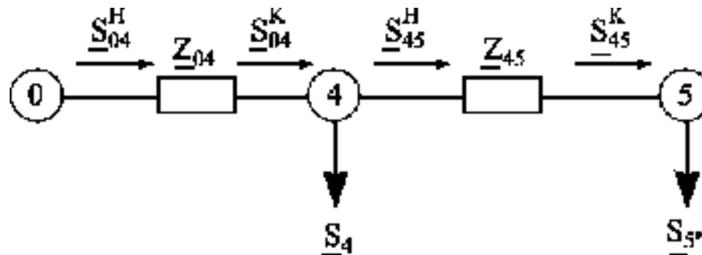
Находим потери мощности на участке 0-1.

$$D S_{01} := \frac{\operatorname{Re}(S_{1^n})^2 + \operatorname{Im}(S_{1^n})^2}{220^2} \cdot z_{01} \quad D S_{01} = 1.002 + 5.218i \quad \text{MBA}$$

Определяем поток мощности в начале участка 0-1.

$$S_{01n} := S_{1^n} + D S_{01} \quad S_{01n} = 91.942 + 29.984i \quad \text{MBA}$$

Находим потоки мощности на участке 0-5.



$$D S_{45} := \frac{\operatorname{Re}(S_{5^n})^2 + \operatorname{Im}(S_{5^n})^2}{220^2} \cdot z_{45} \quad D S_{45} = 0.764 + 3.014i \quad \text{MBA}$$

$$S_{45n} := S_{5^n} + D S_{45} \quad S_{45n} = 86.229 + 25.831i \quad \text{MBA}$$

$$S_{04k} := S_{45n} + S_4 \quad S_{04k} = 101.229 + 26.481i \quad \text{MBA}$$

$$D S_{04} := \frac{\operatorname{Re}(S_{04k})^2 + \operatorname{Im}(S_{04k})^2}{220^2} \cdot z_{04} \quad D S_{04} = 0.353 + 1.838i \quad \text{MBA}$$

$$S_{04n} := S_{04k} + D S_{04} \quad S_{04n} = 101.582 + 28.318i \quad \text{MBA}$$

Рассчитываем напряжения в узлах схемы кольца 0-1-5-4-0 по известному напряжению источника питания.

$$U_1 := U_0 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{01}) + \operatorname{Im}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{01})}{\overline{U_0}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{01}) - \operatorname{Im}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{01})}{\overline{U_0}} \right)$$

$$U_1 = 236.403 - 10.125i \quad \text{кВ}$$

$$U_4 := U_0 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{04n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{04}) + \operatorname{Im}(S_{04n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{04})}{\overline{U_0}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{04n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{04}) - \operatorname{Im}(S_{04n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{04})}{\overline{U_0}} \right)$$

$$U_4 = 240.395 - 3.227i \quad \text{кВ}$$

$$U_5 := U_4 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{45n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{45}) + \operatorname{Im}(S_{45n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{45})}{\overline{U_4}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{45n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{45}) - \operatorname{Im}(S_{45n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{45})}{\overline{U_4}} \right)$$

$$U_5 = 236.614 - 9.357i \quad \text{кВ}$$

$$U_6 := U_5 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{56n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{56}) + \operatorname{Im}(S_{56n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{56})}{\overline{U_5}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{56n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{56}) - \operatorname{Im}(S_{56n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{56})}{\overline{U_5}} \right)$$

$$U_6 = 235.99 - 9.975i \quad \text{кВ}$$

Сравним напряжения в первом узле, полученные с двух сторон.

$$U_{1'} := U_5 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{51}) \cdot \operatorname{Re}(z_{15}) + \operatorname{Im}(S_{51}) \cdot \operatorname{Im}(z_{15})}{\overline{U_5}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{51}) \cdot \operatorname{Im}(z_{15}) - \operatorname{Im}(S_{51}) \cdot \operatorname{Re}(z_{15})}{\overline{U_5}} \right)$$

$$U_{1'} = 236.489 - 10.138i \quad \text{кВ}$$

$$\frac{|U_1| - |U_{1'}|}{|U_1|} \cdot 100 = -0.036 \quad \%$$

Рассчитываем напряжения в узлах схемы кольца 1-2-3-1.

$$U_2 := U_1 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12}) + \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12})}{\overline{U_1}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12}) - \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12})}{\overline{U_1}} \right)$$

$$U_2 = 234.717 - 12.69i \quad \text{кВ}$$

$$U_3 := U_1 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{13n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{13}) + \operatorname{Im}(S_{13n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{13})}{\overline{U_1}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{13n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{13}) - \operatorname{Im}(S_{13n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{13})}{\overline{U_1}} \right)$$

$$U_3 = 235.095 - 12.164i \quad \text{кВ}$$

$$U_{2'} := U_3 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{32n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23}) + \operatorname{Im}(S_{32n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23})}{\overline{U_3}} + j \frac{\operatorname{Re}(S_{32n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23}) - \operatorname{Im}(S_{32n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23})}{\overline{U_3}} \right)$$

$$U_{2'} = 234.722 - 12.69i \quad \text{кВ}$$

$$e := \frac{U_{2'} - U_2}{U_{2'}} \cdot 100 \quad |e| = 2.441 \cdot 10^{-3} \quad \%$$

Напряжения в узле 2, рассчитанные с двух сторон, совпали, что свидетельствует о правильности расчета. Сравним полученные значения напряжения узла 2 с номинальным и определим погрешность расчета.

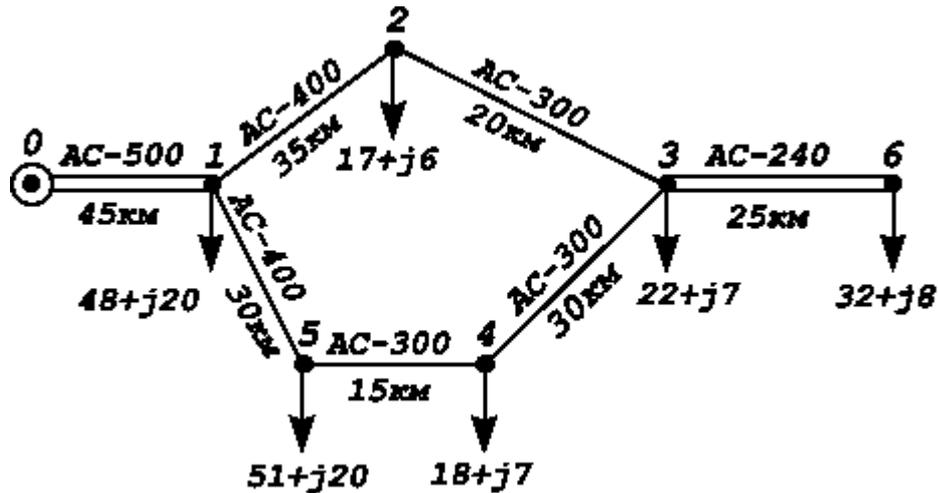
$$e := \frac{|U_2| - 220}{|U_2|} \cdot 100 \quad e = 6.407 \quad \%$$

Необходима вторая итерация. Принимаем в узлах значения напряжений, рассчитанные на первой итерации, для определения потоков мощности и полностью повторяем приведенный алгоритм.

Задачи для самостоятельного решения

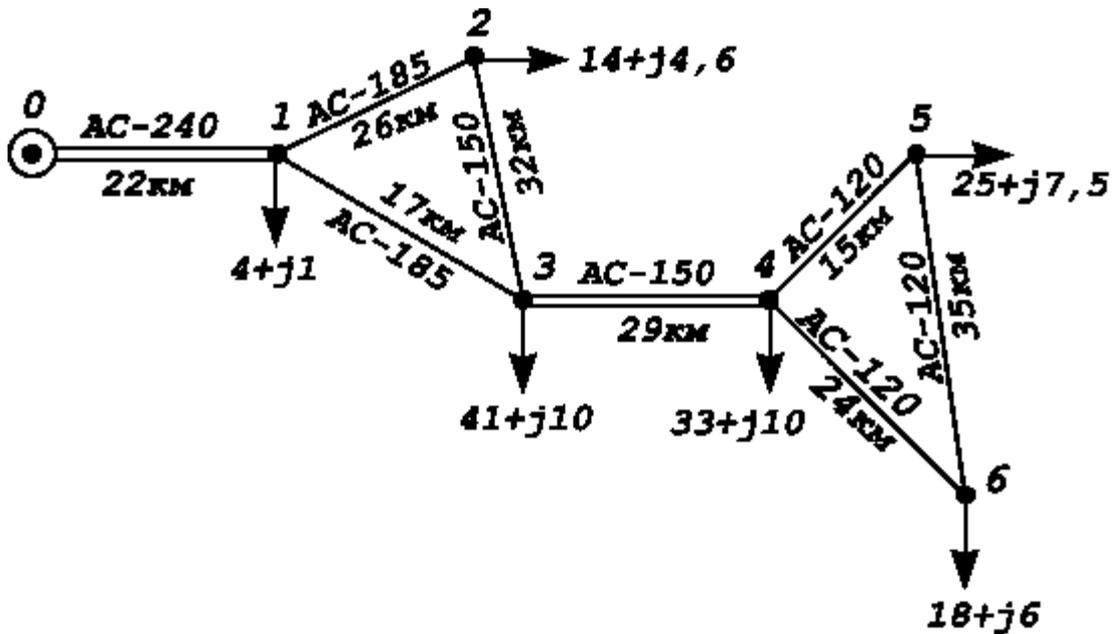
№1

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $242e^{j15}$ кВ.



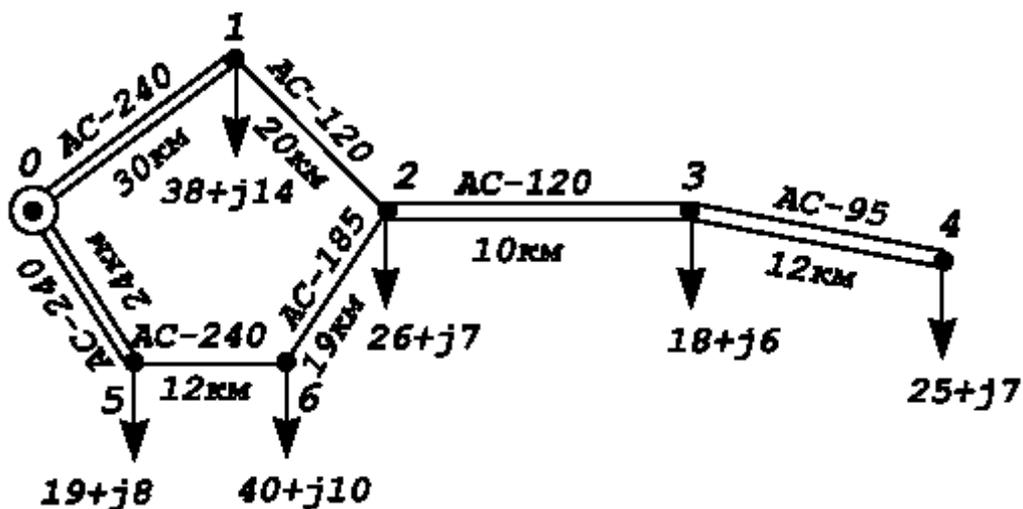
№2

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $119e^{j12}$ кВ.



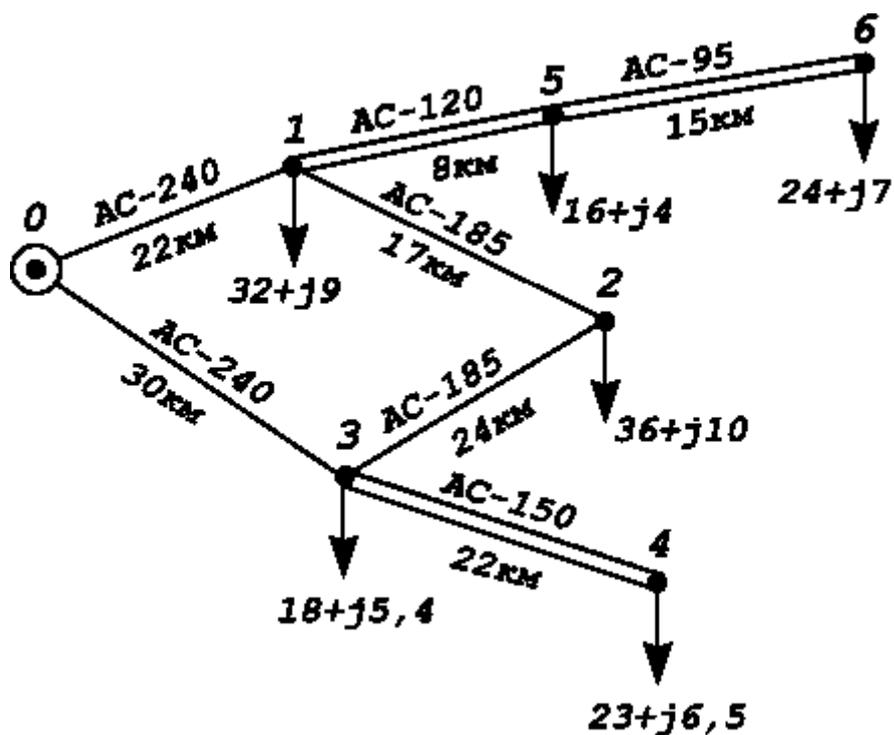
№3

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $120e^{j8}$ кВ.



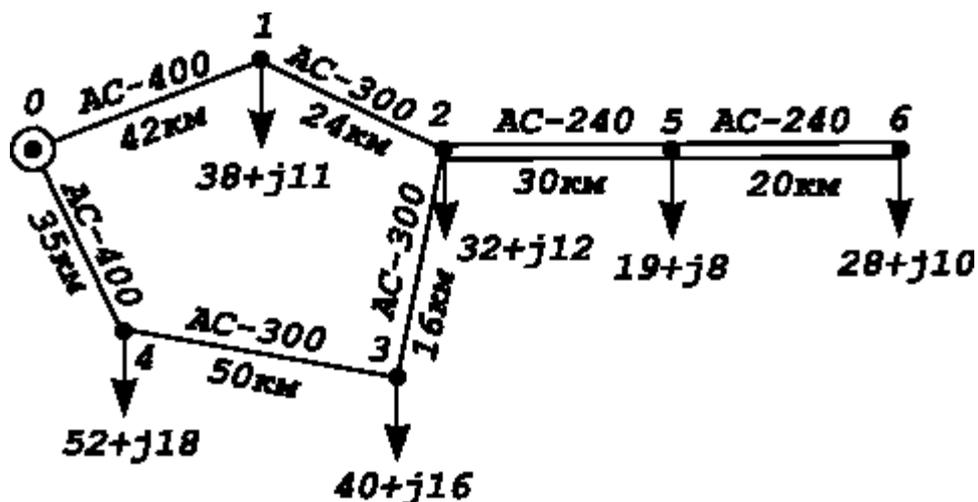
№4

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $119e^{j10}$ кВ.



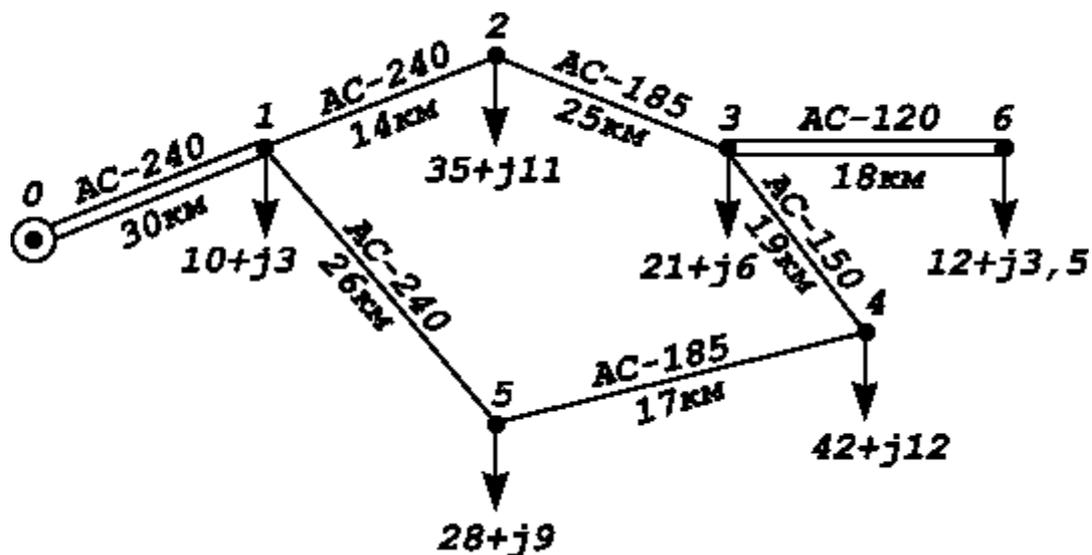
№5

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $238e^{j17}$ кВ.



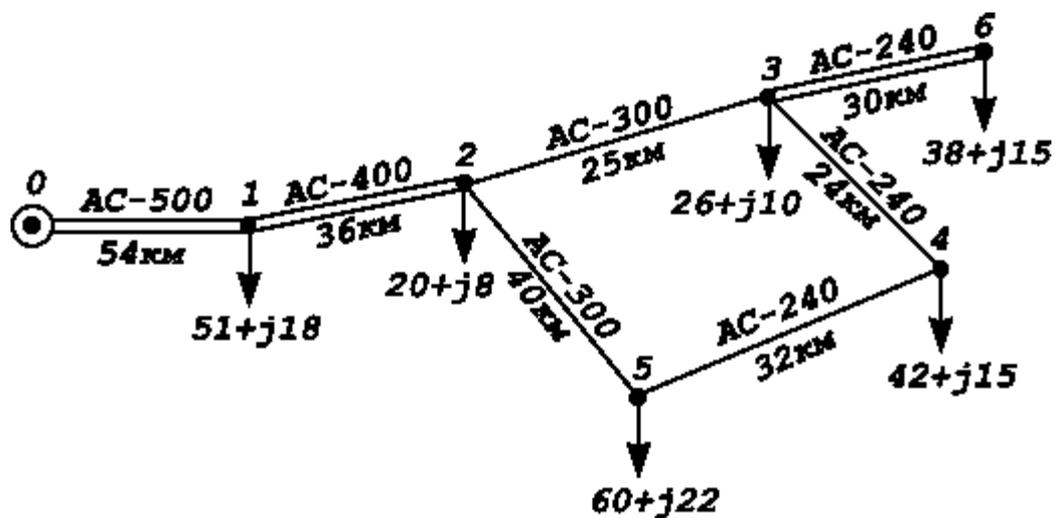
№6

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $120e^{j9}$ кВ.



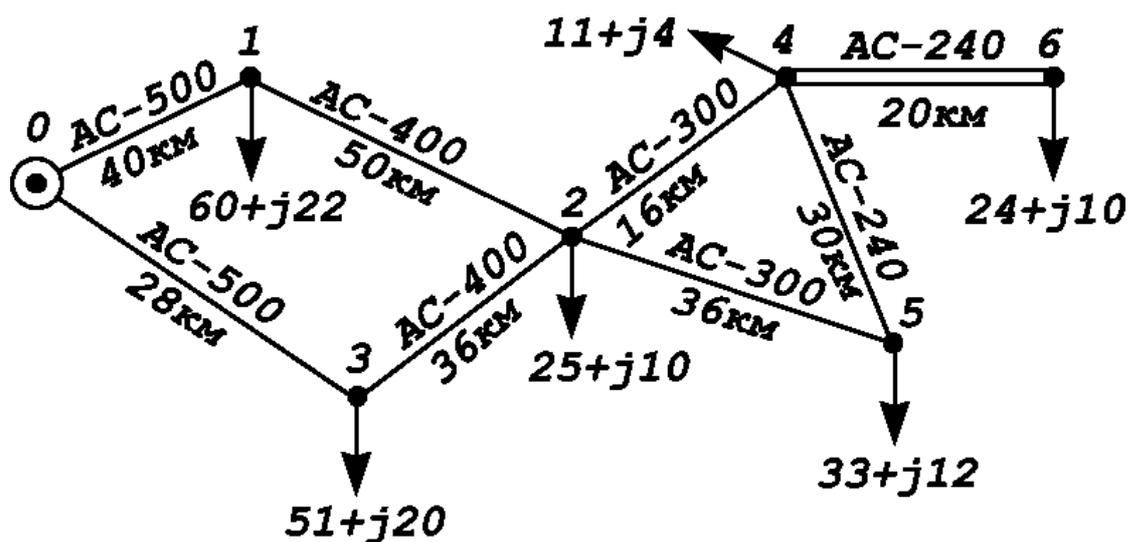
№7

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $236e^{j16}$ кВ.



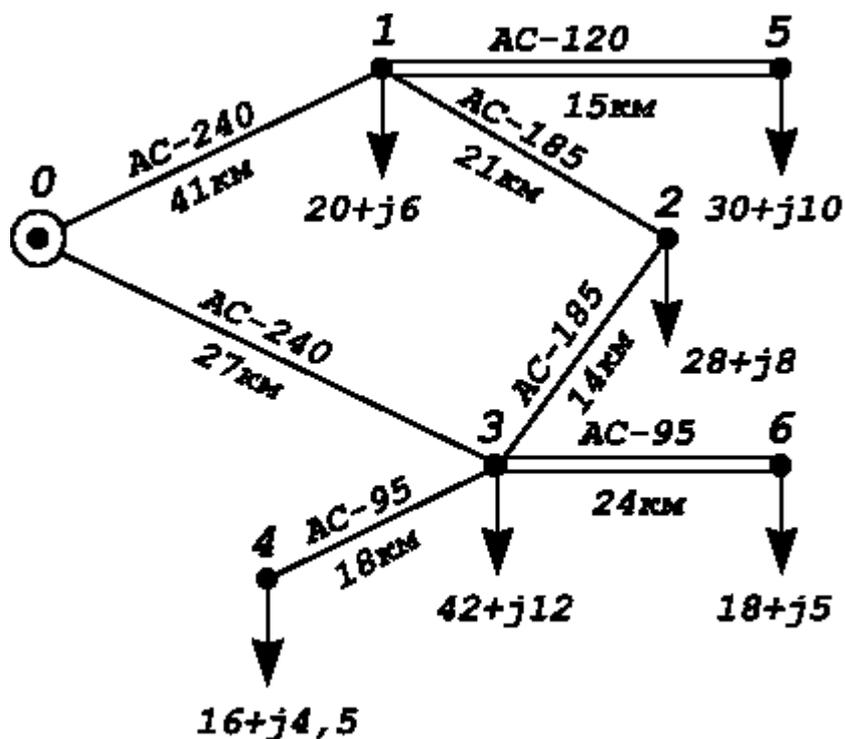
№8

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $228e^{j18}$ кВ.



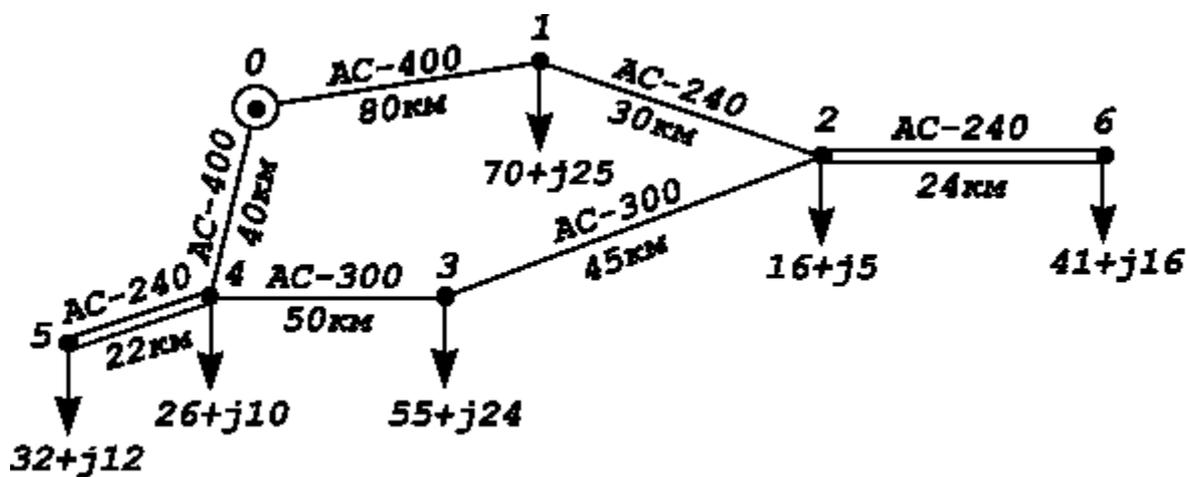
№9

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $117e^{j12}$ кВ.



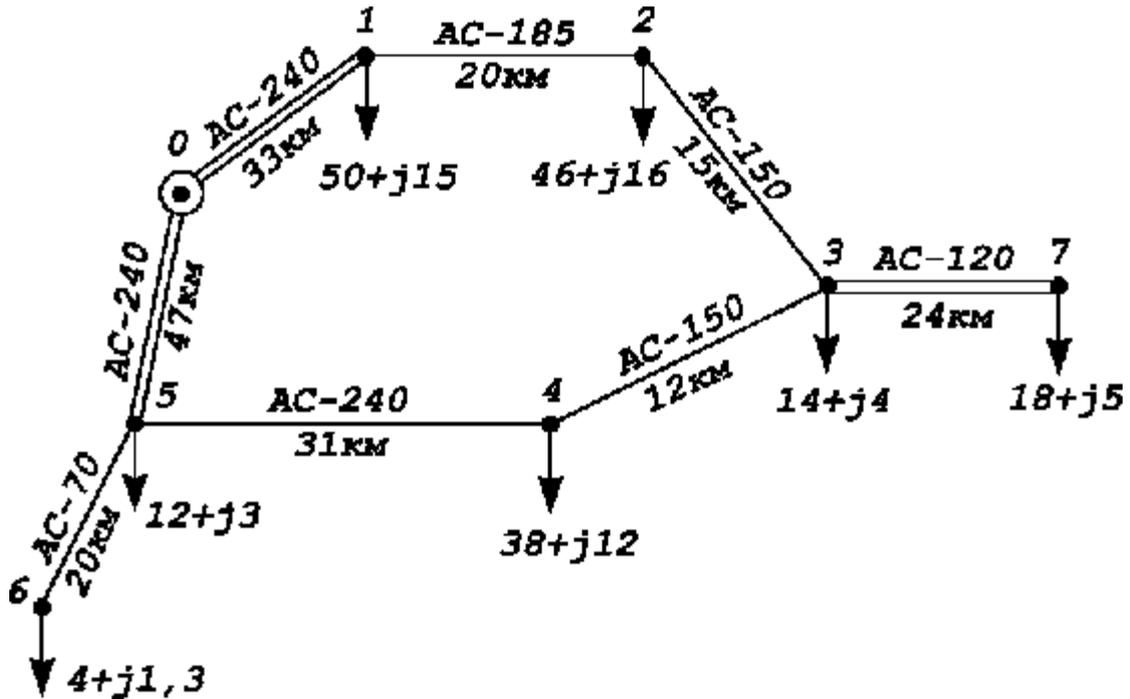
№10

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $237e^{j12}$ кВ.



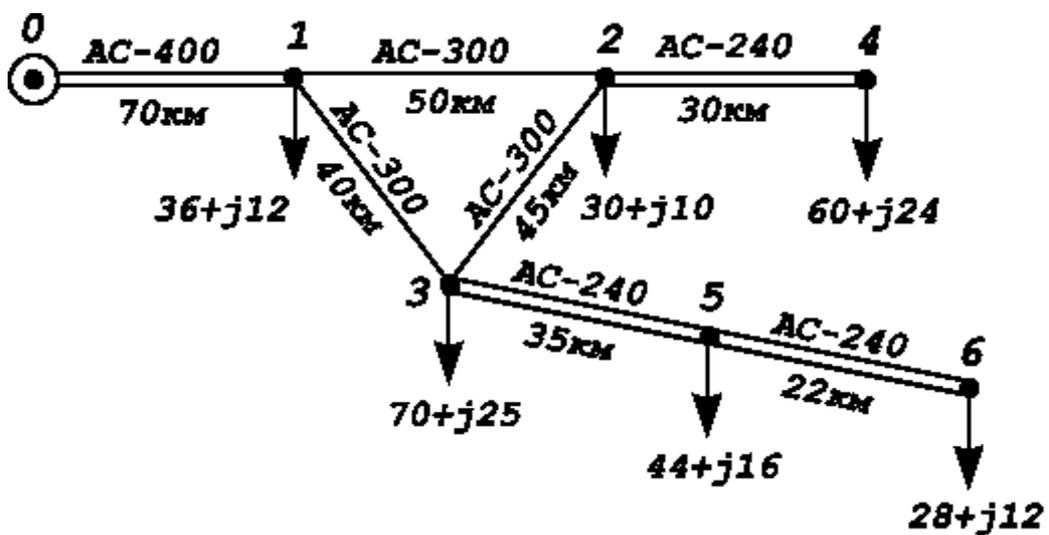
№11

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $119e^{j14}$ кВ.



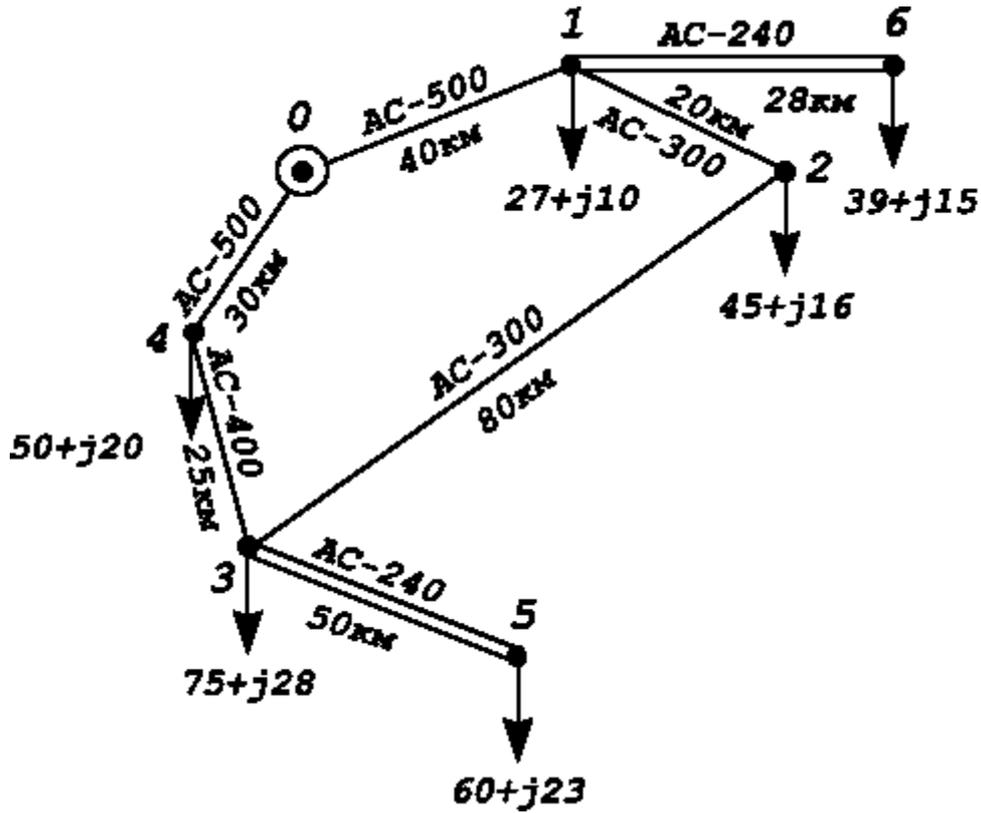
№12

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $235e^{j15}$ кВ.



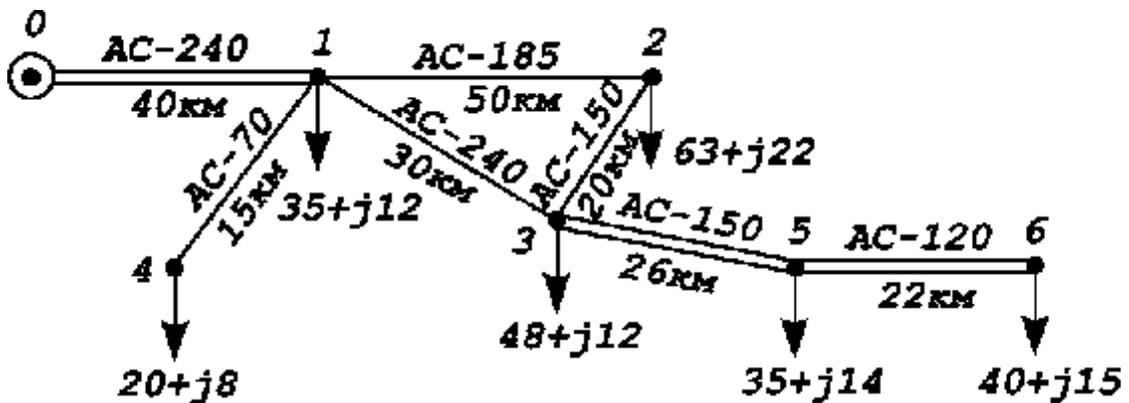
№13

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $227e^{j20}$ кВ.



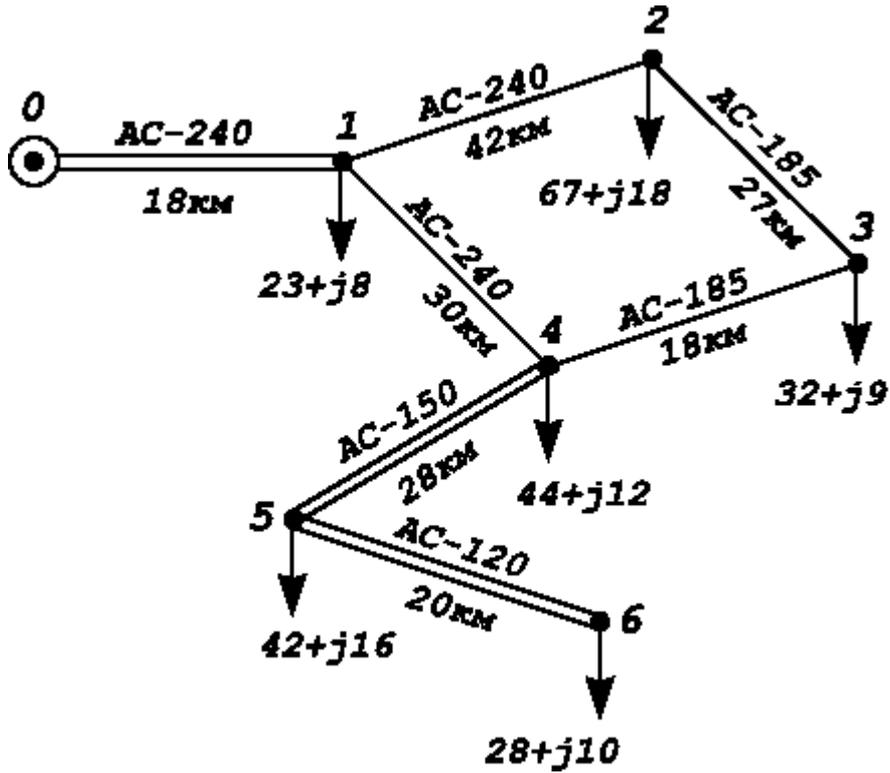
№14

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $120e^{j8}$ кВ.



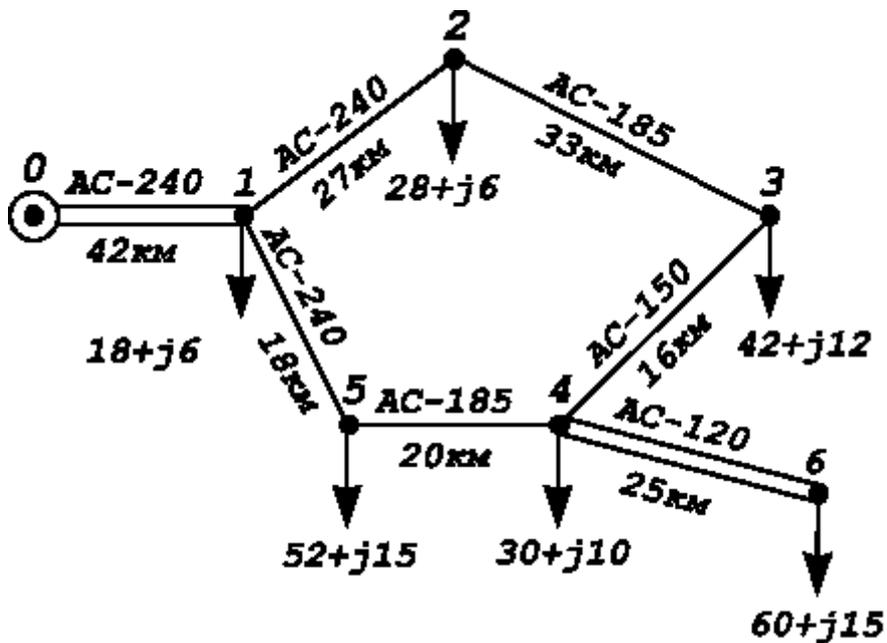
№15

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $120e^{j7}$ кВ.



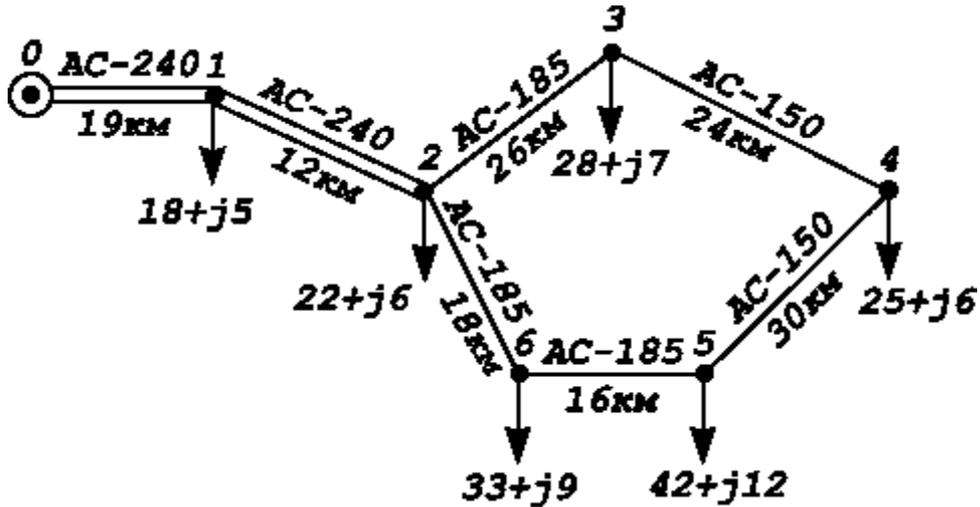
№16

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $118e^{j10}$ кВ.



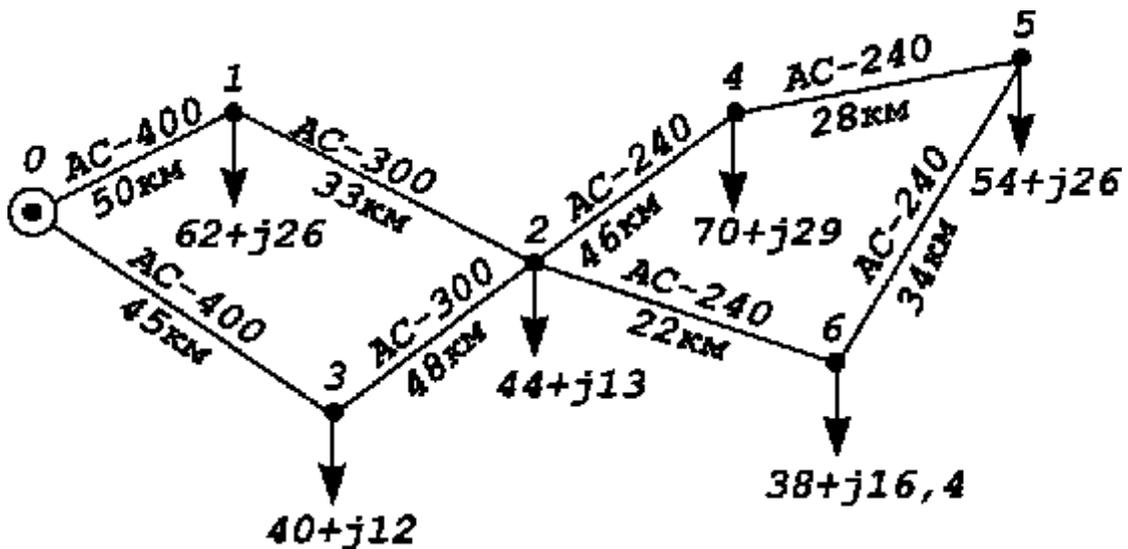
№17

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $116e^{j8}$ кВ.



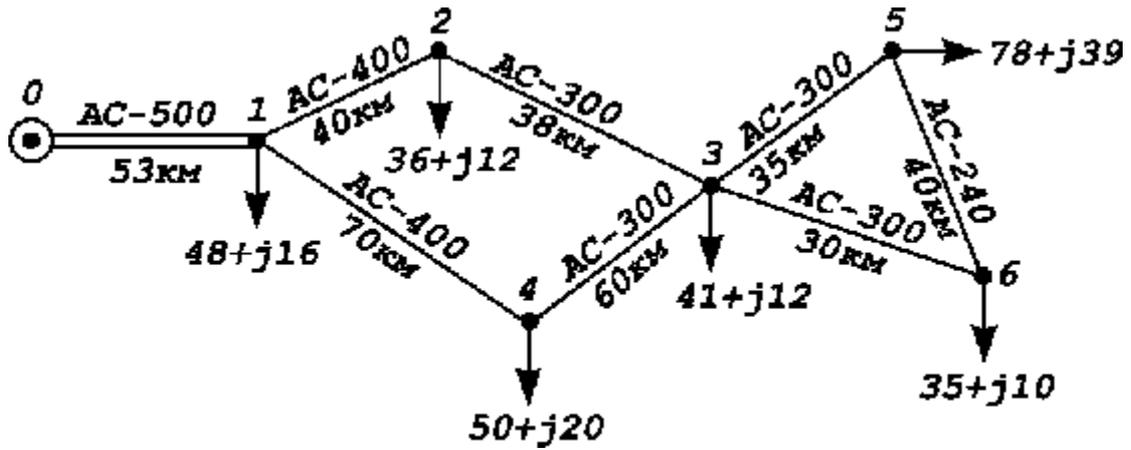
№18

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $224e^{j16}$ кВ.



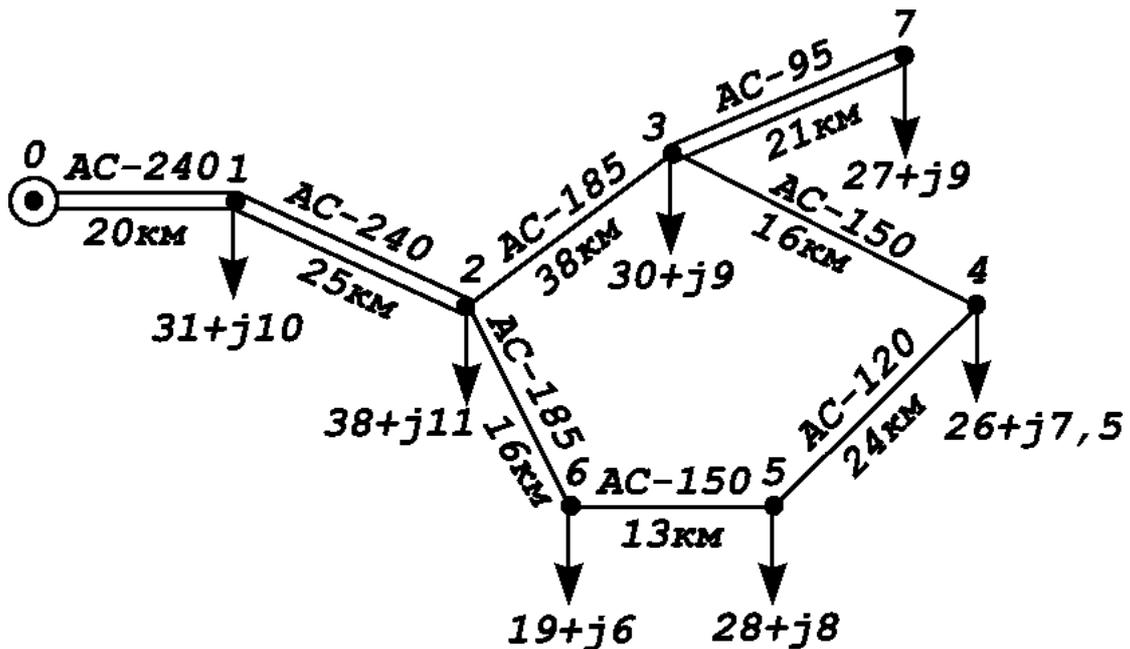
№19

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $222e^{j18}$ кВ.



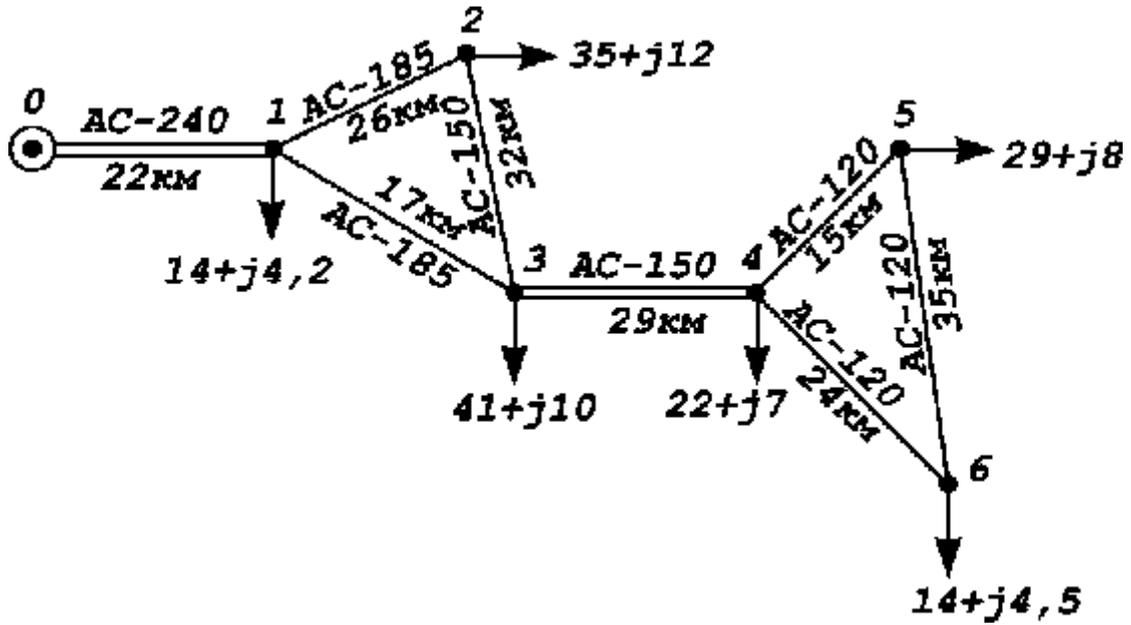
№20

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $120e^{j7}$ кВ.



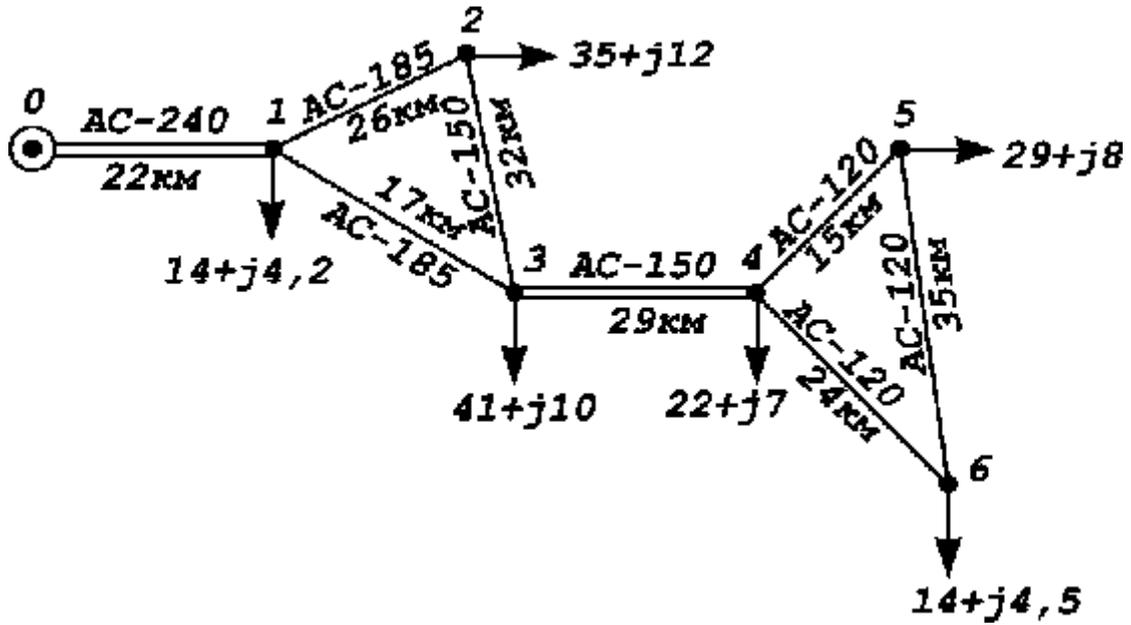
№21

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $119e^{j9}$ кВ.



№21

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $119e^{j9}$ кВ.



3.3. Сети с двумя источниками питания

В общем случае два источника питания, имеющие различные фиксированные напряжения, соединяются между собой линиями с промежуточными подстанциями.

Расчет режима такой сети выполняется аналогично расчету режима кольцевой сети, но с использованием метода наложения.

В этом случае схема сети с двусторонним питанием представляется в виде двух схем:

а) схема сети с одинаковыми напряжениями источника питания, т.е. напряжение первого источника принимается равным напряжению второго (см. рис. 23)

$$U_{ип1} = U_{ип2}. \quad (127)$$

б) схема сети без промежуточного отбора мощности, в которой напряжение одного источника принимается равным нулю, а второго - разности между напряжениями источников питания. Такая схема замещения показана на рис. 27.

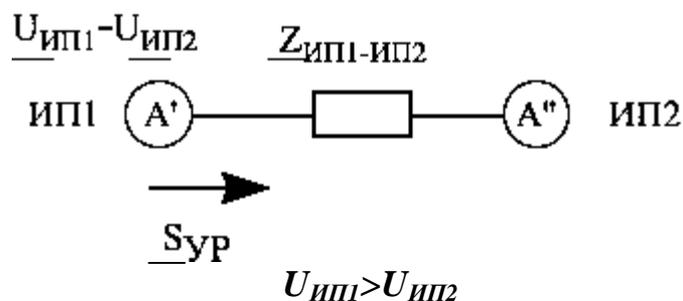


Рис. 27. Схема замещения сети без отбора мощности

В сети, схема которой приведена на рис. 27, протекает уравнительная мощность от источника питания с большим напряжением к источнику питания с меньшим напряжением, она равна

$$S_{ур} = \frac{U_{ип1}^* - U_{ип2}^*}{Z_{A' A''}^*} \times U_{ном}. \quad (128)$$

Исходя из сказанного, алгоритм расчета сети с двухсторонним питанием следующий:

1. Рассчитываются потоки мощности на головных участках сети при равенстве напряжений источников питания по выражениям (117), (118), $\underline{S}_{ГУ}$.
2. Определяется уравнивающая мощность по выражению (128).
3. Уточняются потоки мощности на головных участках с учетом уравнивающей мощности $\underline{S}_{УР}$.

Для головного участка, питаемого от источника с большим напряжением:

$$\underline{S}_{ГУ}^{факт} = \underline{S}_{ГУ} + \underline{S}_{УР}. \quad (129)$$

Для головного участка, питаемого от источника с меньшим напряжением:

$$\underline{S}_{ГУ}^{факт} = \underline{S}_{ГУ} - \underline{S}_{УР}. \quad (130)$$

4. Определяется точка потокораздела. Дальнейший расчет сети сводится к алгоритму расчета кольцевой сети.

3.4. Порядок расчета различных комбинаций замкнутых и разветвленных разомкнутых сетей

При расчете реальных сетей довольно часто встречаются ситуации, когда в схеме сети сочетаются различные комбинации соединения замкнутых и разветвленных разомкнутых сетей. Наиболее типичны следующие:

к различным узлам кольцевой сети подключены разветвленные разомкнутые сети (рис. 28);

к разомкнутой сети в одном или нескольких узлах подключены кольцевые сети (рис. 29);

к сети с двухсторонним питанием в одном или нескольких узлах подключены разветвленные разомкнутые сети (рис. 30);

к сети с двухсторонним питанием подключена кольцевая сеть (рис. 31).

Порядок расчета таких сетей показан на рис. 28-31, на которых приведены комбинации соединения простых замкнутых сетей и разветвленных разомкнутых сетей.

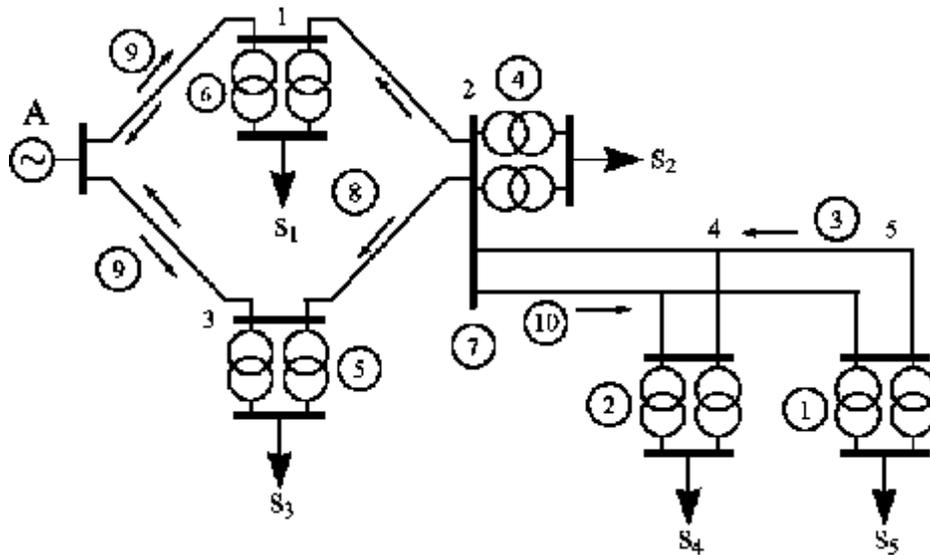


Рис. 28. Схема сети, содержащей кольцо и разветвленную разомкнутую сеть

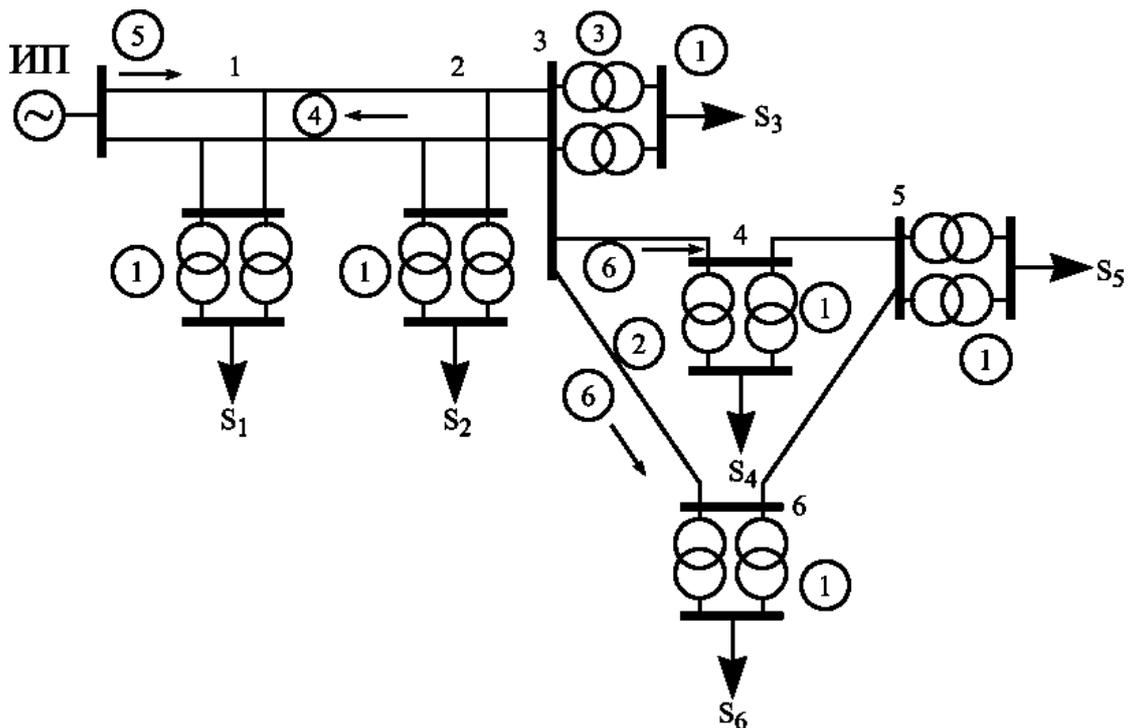


Рис. 29. Схема сети, содержащей разомкнутую сеть и питаемое от нее кольцо

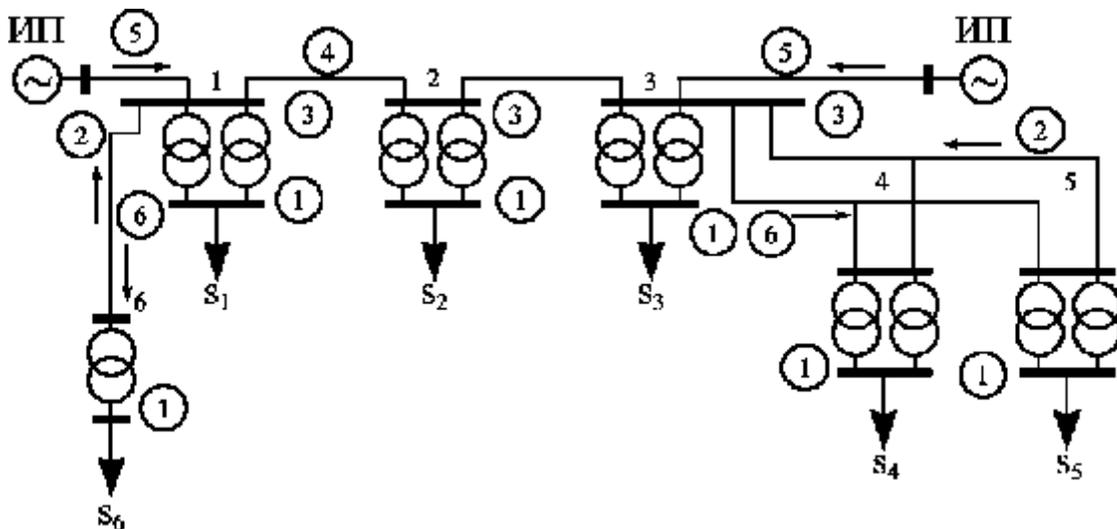


Рис. 30. Схема сети, содержащей магистраль с двухсторонним питанием и разомкнутую сеть

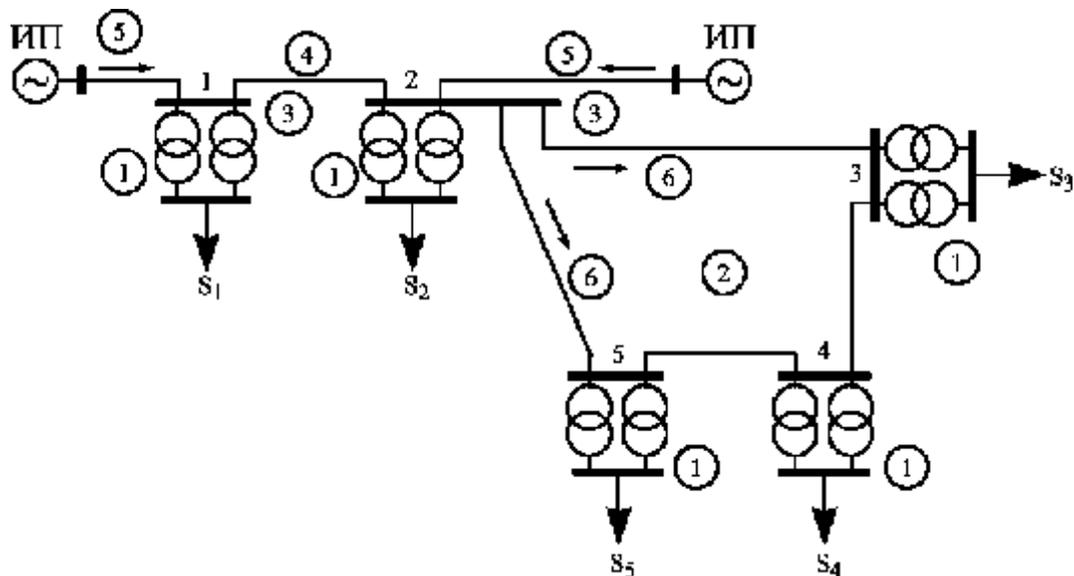


Рис. 31. Схема сети, содержащей магистраль с двухсторонним питанием и питаемое от нее кольцо

Порядок расчета сети, приведенной на рис. 28.

1. Определение приведенной нагрузки узла 5.
2. Определение приведенной нагрузки узла 4.
3. Расчет потоков мощности с учетом потерь в разомкнутой магистрали 2-4-5.
4. Определение приведенной нагрузки узла 2.
5. Определение приведенной нагрузки узла 3.
6. Определение приведенной нагрузки узла 1.

7. Определение суммарной мощности узла 2 (с учетом потока мощности в начале участка 2-4).
8. Расчет потоков мощности с учетом потерь в кольце А-1-2-3-А.
9. Расчет напряжений в узлах кольца по известному напряжению источника питания.
10. Расчет напряжений в узлах разомкнутой сети.

Порядок расчета сети, приведенной на рис. 29.

1. Определение приведенных мощностей нагрузок i -го узла (узел 1, 2, 3, 4, 5, 6).
2. Расчет потоков мощности с учетом потерь в кольце 3-4-5-6-3.
3. Определение суммарной мощности узла 3.
4. Расчет потоков мощности с учетом потерь в разомкнутой сети ИП-1-2-3.
5. Расчет напряжений в узлах разомкнутой сети по известному напряжению источника питания.
6. Расчет напряжений в узлах кольца сети по найденному напряжению третьего узла.

Порядок расчета сети, приведенной на рис. 30.

1. Определение приведенной мощности нагрузки i -го узла (узел 1, 2, 3, 4, 5, 6).
2. Расчет потоков мощностей в разомкнутых участках сети 1-6 и 3-4-5.
3. Определение расчетной нагрузки узлов (узлы 1, 2, 3).
4. Расчет потоков мощности с учетом потерь в сети с двухсторонним питанием.
5. Определение напряжений в узлах магистрали с двухсторонним питанием.
6. Расчет напряжений в узлах разомкнутой сети:
 - а) в узлах 4, 5 по напряжению узла 3;
 - б) в узле 6 по напряжению узла 1.

Порядок расчета сети, приведенной на рис. 31.

1. Определение приведенной мощности нагрузки узлов (узлы 1, 2, 3, 4, 5).
2. Расчет потоков мощности с учетом потерь в кольце 2-3-4-5-2.
3. Определение расчетных нагрузок узлов (узел 1 и 2).
4. Расчет потоков мощности с учетом потерь в магистрали с двухсторонним питанием.
5. Определение напряжений в узлах магистрали с двухсторонним питанием.
6. Определение напряжений в узлах кольца по найденному напряжению узла 2.

Алгоритм расчета по каждому выделенному пункту приведен в соответствующих разделах (2.1, 2.2, 3.1, 3.3).

Примечание: порядок расчета сети (см. рис. 28-31) в тексте показан относительно цифр в кружках, приведенных на рисунках.

Примеры решения задач

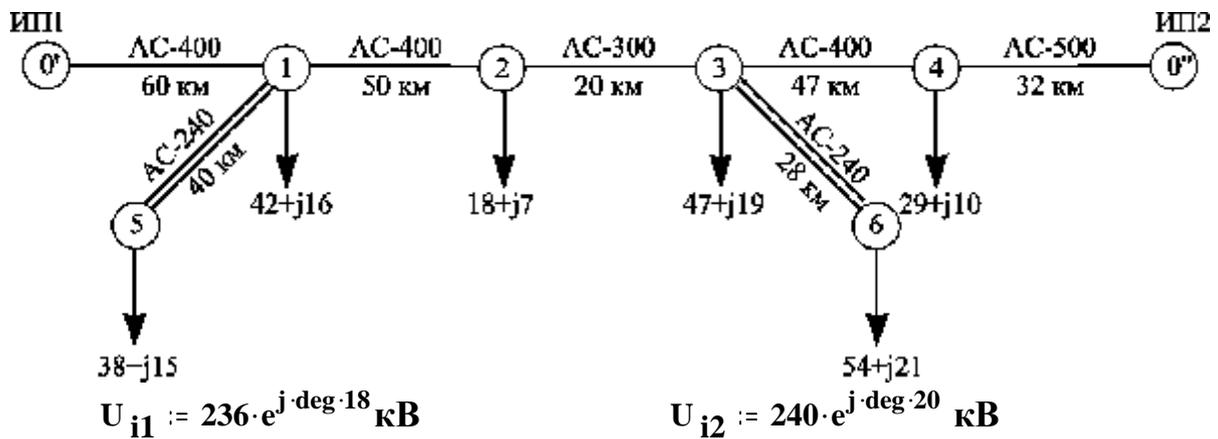
Листинг

примеров решения задач по подразделу 3.3

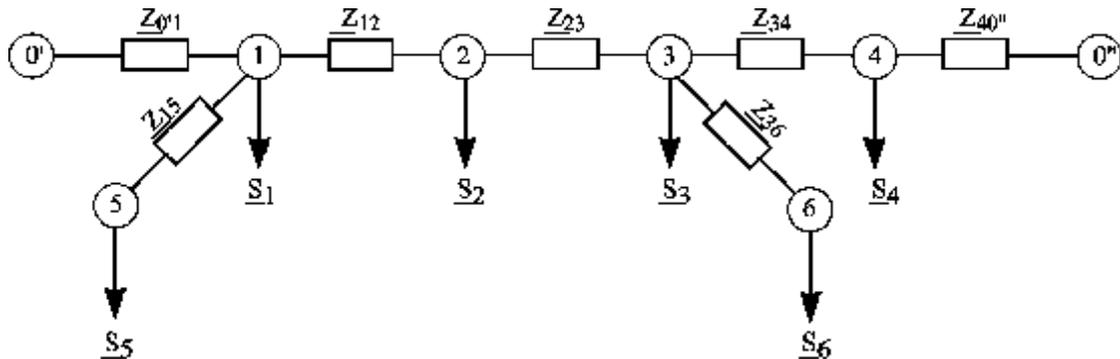
в программе MathCad фирмы MathSoft

Пример 3.3.

Рассчитать установившийся режим в сети, схема которой приведена на рисунке. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжения источников питания: первого $236 \cdot e^{j \cdot 18}$ кВ, второго $240 \cdot e^{j \cdot 20}$ кВ.



Составляем схему замещения, в которой показаны расчетные нагрузки узлов.



Находим параметры схемы замещения.

Сопровитления участков сети определим по погонным параметрам /4/:

$$z_{0'1} := 0.075 \cdot 60 + j \cdot 0.42 \cdot 60$$

$$z_{0'1} = 4.5 + 25.2i \quad \text{Ом}$$

$$z_{12} := 0.075 \cdot 50 + j \cdot 0.42 \cdot 50$$

$$z_{12} = 3.75 + 21i \quad \text{Ом}$$

$$z_{23} := 0.098 \cdot 20 + j \cdot 0.429 \cdot 20$$

$$z_{23} = 1.96 + 8.58i \quad \text{Ом}$$

$$z_{34} := 0.075 \cdot 47 + j \cdot 0.42 \cdot 47$$

$$z_{34} = 3.525 + 19.74i \quad \text{Ом}$$

$$z_{15} := \frac{1}{2} \cdot (0.121 \cdot 40 + j \cdot 0.406 \cdot 40)$$

$$z_{15} = 2.42 + 8.12i \quad \text{Ом}$$

$$z_{36} := \frac{1}{2} \cdot (0.121 \cdot 28 + j \cdot 0.409 \cdot 28)$$

$$z_{36} = 1.694 + 5.726i \quad \text{Ом}$$

$$z_{40''} := 0.06 \cdot 32 + j \cdot 0.413 \cdot 32$$

$$z_{40''} = 1.92 + 13.216i \quad \text{Ом}$$

Емкостные проводимости участков сети также определим по справочным данным /4/.

$$b_{o0'1} := 2.7 \cdot 10^{-6} \text{См}$$

$$b_{o12} := 2.7 \cdot 10^{-6} \text{См}$$

$$b_{o23} := 2.64 \cdot 10^{-6} \text{См}$$

$$b_{o34} := 2.7 \cdot 10^{-6} \text{См}$$

$$b_{o15} := 2 \cdot 2.6 \cdot 10^{-6} \text{См}$$

$$b_{o36} := 2 \cdot 2.6 \cdot 10^{-6} \text{См}$$

$$b_{o40''} := 2.74 \cdot 10^{-6} \text{См}$$

Находим зарядные мощности, принимая напряжения в узлах равными номинальному.

$$Q_{c0'1} := \frac{220^2 \cdot b_{o0'1} \cdot 60}{2}$$

$$Q_{c0'1} = 3.92 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c12} := \frac{220^2 \cdot b_{o12} \cdot 50}{2}$$

$$Q_{c12} = 3.267 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c23} := \frac{220^2 \cdot b_{o23} \cdot 20}{2}$$

$$Q_{c23} = 1.278 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c34} := \frac{220^2 \cdot b_{o34} \cdot 47}{2}$$

$$Q_{c34} = 3.071 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c36} := \frac{220^2 \cdot b_{o36} \cdot 28}{2}$$

$$Q_{c36} = 3.524 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c15} := \frac{220^2 \cdot b_{o15} \cdot 40}{2}$$

$$Q_{c15} = 5.034 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c40''} := \frac{220^2 \cdot b_{o40''} \cdot 32}{2}$$

$$Q_{c40''} = 2.122 \quad \text{Мвар}$$

Находим расчетные мощности нагрузок узлов.

$$\begin{aligned}
S_1 &:= 42 + j \cdot 16 - j \cdot Q_{c0'1} - j \cdot Q_{c12} - j \cdot Q_{c15} & S_1 &= 42 + 3.779i \quad \text{MBA} \\
S_2 &:= 18 + j \cdot 7 - j \cdot Q_{c12} - j \cdot Q_{c23} & S_2 &= 18 + 2.455i \quad \text{MBA} \\
S_3 &:= 47 + j \cdot 19 - j \cdot Q_{c23} - j \cdot Q_{c34} - j \cdot Q_{c36} & S_3 &= 47 + 11.128i \quad \text{MBA} \\
S_4 &:= 29 + j \cdot 10 - j \cdot Q_{c34} - j \cdot Q_{c40''} & S_4 &= 29 + 4.807i \quad \text{MBA} \\
S_5 &:= 38 + j \cdot 15 - j \cdot Q_{c15} & S_5 &= 38 + 9.966i \quad \text{MBA} \\
S_6 &:= 54 + j \cdot 21 - j \cdot Q_{c36} & S_6 &= 54 + 17.476i \quad \text{MBA}
\end{aligned}$$

Определяем потери мощности на участках 1-5 и 3-6 и находим суммарную нагрузку первого и третьего узлов сети.

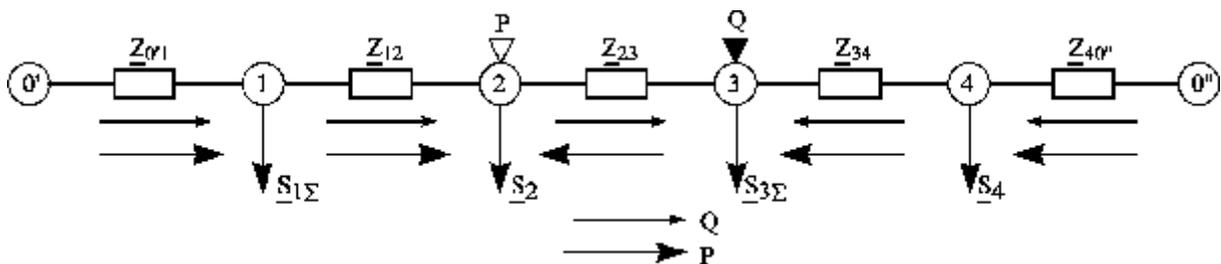
$$dS_{15} := \frac{(\operatorname{Re}(S_5))^2 + (\operatorname{Im}(S_5))^2}{220^2} \cdot (z_{15}) \quad dS_{15} = 0.077 + 0.259i \quad \text{MBA}$$

$$S_{1S} := S_1 + S_5 + dS_{15} \quad S_{1S} = 80.077 + 14.004i \quad \text{MBA}$$

$$dS_{36} := \frac{(\operatorname{Re}(S_6))^2 + (\operatorname{Im}(S_6))^2}{220^2} \cdot (z_{36}) \quad dS_{36} = 0.113 + 0.381i \quad \text{MBA}$$

$$S_{3S} := S_3 + S_6 + dS_{36} \quad S_{3S} = 101.113 + 28.985i \quad \text{MBA}$$

Схема замещения примет вид:



Находим потоки мощности на головных участках, определив предварительно суммарные сопротивления участков сети.

$$z_{0'0''} := z_{0'1} + z_{12} + z_{23} + z_{34} + z_{40''}$$

$$z_{40'} := z_{34} + z_{23} + z_{12} + z_{0'1} \quad z_{10''} := z_{12} + z_{23} + z_{34} + z_{40''}$$

$$z_{30'} := z_{23} + z_{12} + z_{0'1} \quad z_{20''} := z_{23} + z_{34} + z_{40''}$$

$$z_{20'} := z_{12} + z_{0'1} \quad z_{30''} := z_{34} + z_{40''}$$

$$z_{10'} := z_{0'1}$$

$$z_{40''} := z_{40''}$$

$$S_{0'1} := \frac{\overline{S_{1S} \cdot z_{10''}} + \overline{S_{2S} \cdot z_{20''}} + \overline{S_{3S} \cdot z_{30''}} + \overline{S_{4S} \cdot z_{40''}}}{z_{0'0''}}$$

$$S_{0''1} = 107.998 + 22.096i \quad \text{MBA}$$

$$S_{0''4} := \frac{\overline{S_{4S} \cdot z_{40'}} + \overline{S_{3S} \cdot z_{30'}} + \overline{S_{2S} \cdot z_{20'}} + \overline{S_{1S} \cdot z_{10'}}}{z_{0'0''}}$$

$$S_{0'4} = 120.192 + 28.156i \quad \text{MBA}$$

Находим уравнительную мощность, протекающую в сети из-за неравенства напряжений источников питания.

$$S_{ur} := \frac{\overline{U_{i2}} - \overline{U_{i1}}}{z_{0'0''}} \cdot 220$$

$$S_{ur} = 22.719 - 1.354i \quad \text{MBA}$$

Определяем фактическую мощность на головных участках сети.

$$S_{0'1f} := S_{0'1} - S_{ur}$$

$$S_{0''1f} = 85.279 + 23.449i \quad \text{MBA}$$

$$S_{0''4f} := S_{0''4} + S_{ur}$$

$$S_{0'4f} = 142.911 + 26.803i \quad \text{MBA}$$

Ищем точку потокораздела.

$$S_{12} := S_{0'1f} - S_{1S}$$

$$S_{12} = 5.202 + 9.445i \quad \text{MBA}$$

$$S_{23} := S_{12} - S_{2S}$$

$$S_{23} = -12.798 + 6.99i \quad \text{MBA}$$

$$S_{34} := S_{23} - S_{3S}$$

$$S_{34} = -113.911 - 21.995i \quad \text{MBA}$$

$$S_{43} := S_{0''4f} - S_{4S}$$

$$S_{43} = 113.911 + 21.995i \quad \text{MBA}$$

$$S_{32} := S_{43} - S_{3S}$$

$$S_{32} = 12.798 - 6.99i \quad \text{MBA}$$

В схеме сети две точки потокораздела: по активной мощности узел 2, по реактивной - узел 3.

Определим потери мощности на участке сети между точками потокораздела.

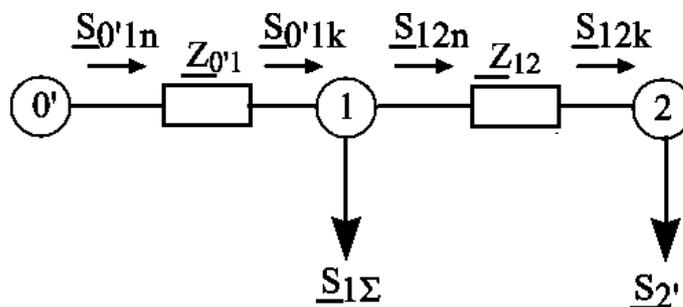
$$dS_{23} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{23}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{23}))^2}{220^2} \cdot (z_{23}) \quad dS_{23} = 8.612 \cdot 10^{-3} + 0.038i \quad \text{MBA}$$

Разрезаем сеть по точкам потокораздела и определяем нагрузку в конце последнего участка каждой разомкнутой сети.

$$S_{2'} := \operatorname{Re}(S_{12}) + j \cdot (\operatorname{Im}(S_{12}) + \operatorname{Im}(dS_{23})) \quad S_{2'} = 5.202 + 9.483i \quad \text{MBA}$$

$$S_{3'} := \operatorname{Re}(S_{43}) + \operatorname{Re}(dS_{23}) + j \cdot \operatorname{Im}(S_{43}) \quad S_{3'} = 113.92 + 21.995i \quad \text{MBA}$$

Расчет потоков мощности в разомкнутой сети 0'-1-2.



$$dS_{12} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{2'}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{2'}))^2}{220^2} \cdot (z_{12}) \quad dS_{12} = 9.064 \cdot 10^{-3} + 0.051i \quad \text{MBA}$$

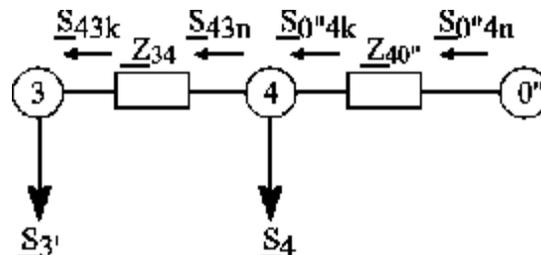
$$S_{12n} := S_{2'} + dS_{12} \quad S_{12n} = 5.211 + 9.534i \quad \text{MBA}$$

$$S_{0'1k} := S_{12n} + S_{1\Sigma} \quad S_{0'1k} = 85.288 + 23.538i \quad \text{MBA}$$

$$dS_{0'1} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{0'1k}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{0'1k}))^2}{220^2} \cdot (z_{0'1}) \quad dS_{0'1} = 0.728 + 4.076i \quad \text{MBA}$$

$$S_{0'1n} := S_{0'1k} + dS_{0'1} \quad S_{0'1n} = 86.016 + 27.614i \quad \text{MBA}$$

Расчет потоков мощности в разомкнутой сети 0''-4-3.



$$dS_{43} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{3'}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{3'}))^2}{220^2} \cdot (z_{34}) \quad dS_{43} = 0.98 + 5.49i \quad \text{MBA}$$

$$S_{43n} := S_{3'} + dS_{43}$$

$$S_{43n} = 114.9 + 27.486i \quad \text{MBA}$$

$$S_{0''4k} := S_{43n} + S_4$$

$$S_{0''4k} = 143.9 + 32.293i \quad \text{MBA}$$

$$dS_{0''4} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{0''4k}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{0''4k}))^2}{220^2} \cdot (z_{40''}) \quad dS_{0''4} = 0.863 + 5.939i \quad \text{MBA}$$

$$S_{0''4n} := S_{0''4k} + dS_{0''4}$$

$$S_{0''4n} = 144.763 + 38.232i \quad \text{MBA}$$

Находим напряжения во всех узлах схемы.

$$U_1 := U_{i1} - \frac{\operatorname{Re}(S_{0'1n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{0'1}) + \operatorname{Im}(S_{0'1n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{0'1})}{\overline{U_{i1}}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{0'1n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{0'1}) - \operatorname{Im}(S_{0'1n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{0'1})}{\overline{U_{i1}}}$$

$$U_1 = 222.761 + 63.276i \quad \text{кВ}$$

$$U_2 := U_1 - \frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12}) + \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12})}{\overline{U_1}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12}) - \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12})}{\overline{U_1}}$$

$$U_2 = 221.935 + 62.71i \quad \text{кВ}$$

$$U_4 := U_{i2} - \frac{\operatorname{Re}(S_{0''4n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{40''}) + \operatorname{Im}(S_{0''4n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{40''})}{\overline{U_{i2}}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{0''4n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{40''}) - \operatorname{Im}(S_{0''4n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{40''})}{\overline{U_{i2}}}$$

$$U_4 = 225.081 + 73.766i \quad \text{кВ}$$

$$U_3 := U_4 - \frac{\operatorname{Re}(S_{43n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{34}) + \operatorname{Im}(S_{43n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{34})}{\overline{U_4}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{43n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{34}) - \operatorname{Im}(S_{43n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{34})}{\overline{U_4}}$$

$$U_3 = 224.135 + 63.808i \quad \text{кВ}$$

$$S_{32n} := S_{32} + \operatorname{Re}(dS_{23})$$

$$S_{32n} = 12.807 - 6.99i \quad \text{MBA}$$

$$U_{2'} := U_3 - \frac{\operatorname{Re}(S_{32n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23}) + \operatorname{Im}(S_{32n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23})}{\overline{U_3}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{32n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23}) - \operatorname{Im}(S_{32n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23})}{\overline{U_3}}$$

$$U_{2'} = 224.424 + 63.339i \quad \text{кВ}$$

$$e := \frac{|U_2| - |U_{2'}|}{|U_2|} \cdot 100$$

$$e = -1.113 \quad \%$$

Потоки мощности в начале участков 1-5 и 3-6.

$$S_{15n} := S_5 + dS_{15}$$

$$S_{15n} = 38.077 + 10.225i \quad \text{MBA}$$

$$S_{36n} := S_6 + dS_{36}$$

$$S_{36n} = 54.113 + 17.858i \quad \text{MBA}$$

$$U_5 := U_1 - \frac{\operatorname{Re}(S_{15n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{15}) + \operatorname{Im}(S_{15n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{15})}{\overline{U_1}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{15n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{15}) - \operatorname{Im}(S_{15n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{15})}{\overline{U_1}}$$

$$U_5 = 213.005 + 94.85i \quad \text{кВ}$$

$$U_6 := U_3 - \frac{\operatorname{Re}(S_{36n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{36}) + \operatorname{Im}(S_{36n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{36})}{\overline{U_3}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{36n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{36}) - \operatorname{Im}(S_{36n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{36})}{\overline{U_3}}$$

$$U_6 = 223.663 + 62.427i \quad \text{кВ}$$

$$e := \frac{|U_5| - 220}{|U_5|}$$

$$e = 0.056 \quad \%$$

$$e := \frac{|U_6| - 220}{|U_6|}$$

$$e = 0.053 \quad \%$$

На этом примере можно рассмотреть, как влияет разница напряжений на источниках питания на результат расчета, в частности на расположение точек потокораздела в схеме. Уменьшим модуль напряжения и угол на источнике 1 и рассчитаем схему заново, оставив неизменными все ее параметры.

$$U_{i1} := 230 \cdot e^{j \cdot \text{deg} \cdot 15} \quad \text{кВ}$$

$$U_{i2} := 242 \cdot e^{j \cdot \text{deg} \cdot 20} \quad \text{кВ}$$

До нахождения уравнивающей мощности и точек потокораздела расчет будет полностью аналогичен приведенному выше расчету этого примера, поэтому здесь он не приводится.

Находим уравнивающую мощность, протекающую в сети из-за неравенства напряжений источников питания.

$$S_{ur} := \frac{\overline{U_{i2}} - \overline{U_{i1}}}{z_{0''}} \cdot 220$$

$$S_{ur} = 58.751 + 2.663i \quad \text{МВА}$$

Определяем фактическую мощность на головных участках сети

$$S_{0'1f} := S_{0'1} - S_{ur}$$

$$S_{0'1f} = 49.247 + 19.433i \quad \text{МВА}$$

$$S_{0''4f} := S_{0''4} + S_{ur}$$

$$S_{0''4f} = 178.943 + 30.819i \quad \text{МВА}$$

Ищем точку потокораздела

$$S_{12} := S_{0'1f} - S_{1S}$$

$$S_{12} = -30.83 + 5.429i \quad \text{MBA}$$

$$S_{23} := S_{12} - S_2$$

$$S_{23} = -48.83 + 2.973i \quad \text{MBA}$$

$$S_{34} := S_{23} - S_{3S}$$

$$S_{34} = -149.943 - 26.012i \quad \text{MBA}$$

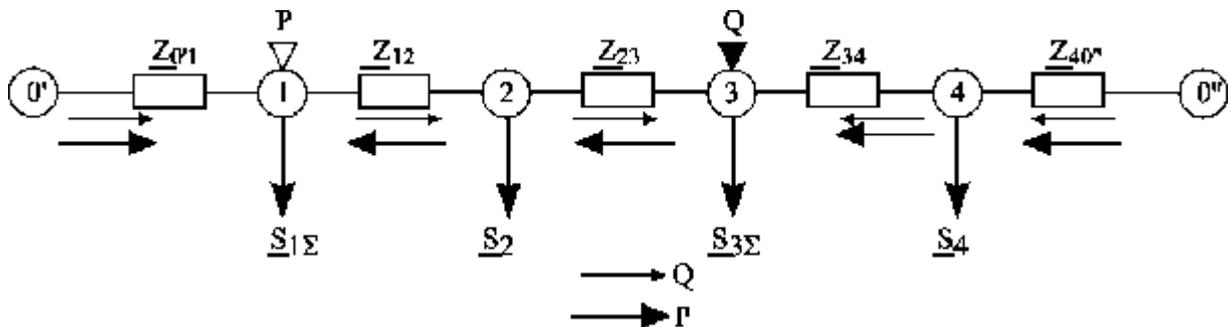
$$S_{43} := S_{0'4f} - S_4$$

$$S_{43} = 149.943 + 26.012i \quad \text{MBA}$$

$$S_{32} := S_{43} - S_{3S}$$

$$S_{32} = 48.83 - 2.973i \quad \text{MBA}$$

Схема замещения в этом случае имеет вид.



В схеме сети две точки потокораздела: по активной мощности узел 1, по реактивной - узел 3.

Определим потери мощности на участках сети между точками потокораздела.

$$dS_{12} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{12}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{12}))^2}{220^2} \cdot (z_{12}) \quad dS_{12} = 0.076 + 0.425i \quad \text{MBA}$$

$$dS_{23} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{23}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{23}))^2}{220^2} \cdot (z_{23}) \quad dS_{23} = 0.097 + 0.424i \quad \text{MBA}$$

Разрезаем сеть по точкам потокораздела и определяем нагрузку в конце последнего участка каждой разомкнутой сети.

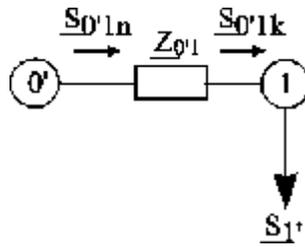
$$S_{1'} := \operatorname{Re}(S_{0'1f}) + j \cdot (\operatorname{Im}(S_{0'1f}) + \operatorname{Im}(dS_{12}) + \operatorname{Im}(dS_{23}))$$

$$S_{1'} = 49.247 + 20.282i \quad \text{MBA}$$

$$S_{3'} := \operatorname{Re}(S_{43}) + \operatorname{Re}(dS_{23}) + \operatorname{Re}(dS_{12}) + j \cdot \operatorname{Im}(S_{43})$$

$$S_{3'} = 150.116 + 26.012i \quad \text{MBA}$$

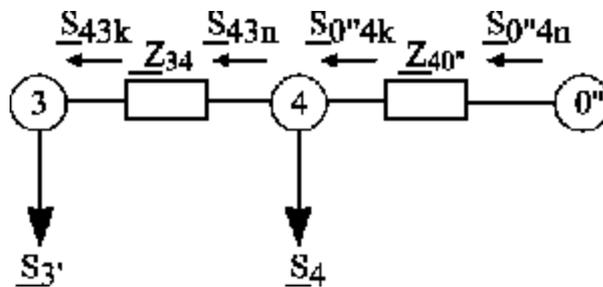
Расчет потоков мощности в разомкнутой сети 0'-1



$$dS_{0'1} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{1'}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{1'}))^2}{220^2} \cdot (z_{0'1}) \quad dS_{0'1} = 0.264 + 1.477i \quad \text{MBA}$$

$$S_{0'1n} := S_{1'} + dS_{0'1} \quad S_{0'1n} = 49.511 + 21.759i \quad \text{MBA}$$

Расчет потоков мощности в разомкнутой сети 0''-4-3



$$dS_{43} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{3'}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{3'}))^2}{220^2} \cdot (z_{34}) \quad dS_{43} = 1.69 + 9.467i \quad \text{MBA}$$

$$S_{43n} := S_{3'} + dS_{43} \quad S_{43n} = 151.806 + 35.479i \quad \text{MBA}$$

$$S_{0''4k} := S_{43n} + S_4 \quad S_{0''4k} = 180.806 + 40.286i \quad \text{MBA}$$

$$dS_{0''4} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{0''4k}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{0''4k}))^2}{220^2} \cdot (z_{40''}) \quad dS_{0''4} = 1.361 + 9.37i \quad \text{MBA}$$

$$S_{0''4n} := S_{0''4k} + dS_{0''4} \quad S_{0''4n} = 182.167 + 49.656i \quad \text{MBA}$$

Находим напряжения во всех узлах схемы

$$U_1 := U_{i1} - \frac{\operatorname{Re}(S_{0'1n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{0'1}) + \operatorname{Im}(S_{0'1n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{0'1})}{\overline{U_{i1}}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{0'1n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{0'1}) - \operatorname{Im}(S_{0'1n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{0'1})}{\overline{U_{i1}}}$$

$$U_1 = 220.218 + 53.832i \quad \text{кВ}$$

$$U_4 := U_{i2} - \frac{\operatorname{Re}(S_{0''4n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{40''}) + \operatorname{Im}(S_{0''4n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{40''})}{\overline{U_{i2}}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{0''4n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{40''}) - \operatorname{Im}(S_{0''4n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{40''})}{\overline{U_{i2}}}$$

$$U_4 = 226.767 + 72.369i \quad \text{кВ}$$

$$U_3 := U_4 - \frac{\operatorname{Re}(S_{43n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{34}) + \operatorname{Im}(S_{43n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{34})}{\overline{U_4}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{43n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{34}) - \operatorname{Im}(S_{43n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{34})}{\overline{U_4}}$$

$$U_3 = 225.49 + 59.298i \quad \text{кВ}$$

Уточним потоки мощности на "вырезанных" участках сети 1-2 и 2-3.

$$S_{32n} := S_{32} + \operatorname{Re}(dS_{23}) + \operatorname{Re}(dS_{12}) \quad S_{32n} = 49.003 - 2.973i \quad \text{МВА}$$

$$S_{12n} := S_{12} + \operatorname{Im}(dS_{23}) + \operatorname{Im}(dS_{12}) \quad S_{12n} = -29.981 + 5.429i \quad \text{МВА}$$

$$U_{2'} := U_3 - \frac{\operatorname{Re}(S_{32n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23}) + \operatorname{Im}(S_{32n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23})}{\overline{U_3}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{32n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23}) - \operatorname{Im}(S_{32n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23})}{\overline{U_3}}$$

$$U_{2'} = 227.87 + 49.058i \quad \text{кВ}$$

$$U_2 := U_1 - \frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12}) + \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12})}{\overline{U_1}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12}) - \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12})}{\overline{U_1}}$$

$$U_2 = 219.531 + 56.615i \quad \text{кВ}$$

$$|U_{2'}| = 233.091 \quad \text{кВ}$$

$$|U_2| = 226.714 \quad \text{кВ}$$

$$\left| \frac{U_2 - U_{2'}}{U_2} \cdot 100 \right| = 4.964 \quad \%$$

Т.к. разница между напряжениями не превышает 5%, вторая итерация не нужна.

Потоки мощности в начале участков 1-5 и 3-6

$$S_{15n} := S_5 + dS_{15} \quad S_{15n} = 38.077 + 10.225i \quad \text{МВА}$$

$$S_{36n} := S_6 + dS_{36} \quad S_{36n} = 54.113 + 17.858i \quad \text{МВА}$$

$$U_5 := U_1 - \frac{\operatorname{Re}(S_{15n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{15}) + \operatorname{Im}(S_{15n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{15})}{\overline{U_1}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{15n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{15}) - \operatorname{Im}(S_{15n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{15})}{\overline{U_1}}$$

$$U_5 = 211.454 + 86.432i \quad \text{кВ}$$

$$U_6 := U_3 - \frac{\operatorname{Re}(S_{36n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{36}) + \operatorname{Im}(S_{36n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{36})}{\overline{U_3}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{36n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{36}) - \operatorname{Im}(S_{36n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{36})}{\overline{U_3}}$$

$$U_6 = 224.991 + 57.927i \text{ кВ}$$

$$e := \frac{|U_5| - 220}{|U_5|}$$

$$e = 0.037 \%$$

$$e := \frac{|U_6| - 220}{|U_6|}$$

$$e = 0.053 \%$$

Из расчета видно, что при большой разнице напряжений источников питания между точками потокораздела могут находиться несколько участков сети.

Пример 3.4.

Рассчитать установившийся режим в сети с двухсторонним питанием. В узлах показаны приведенные нагрузки в МВА. Напряжение источника питания $0'$ равно $227 \cdot e^{j \cdot 18}$

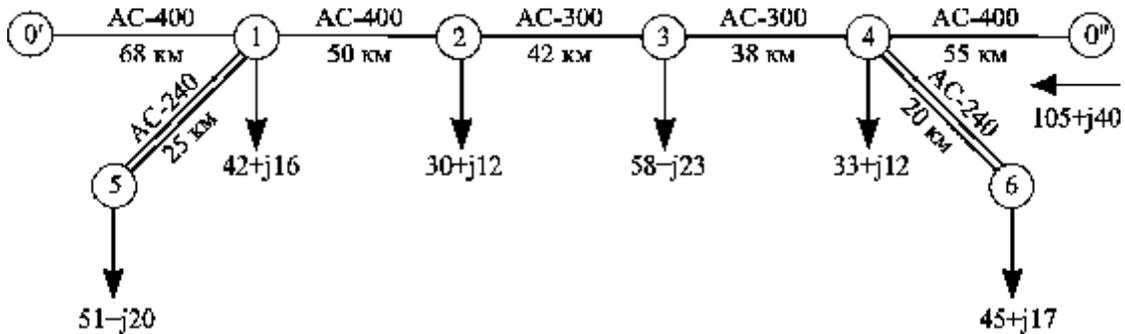
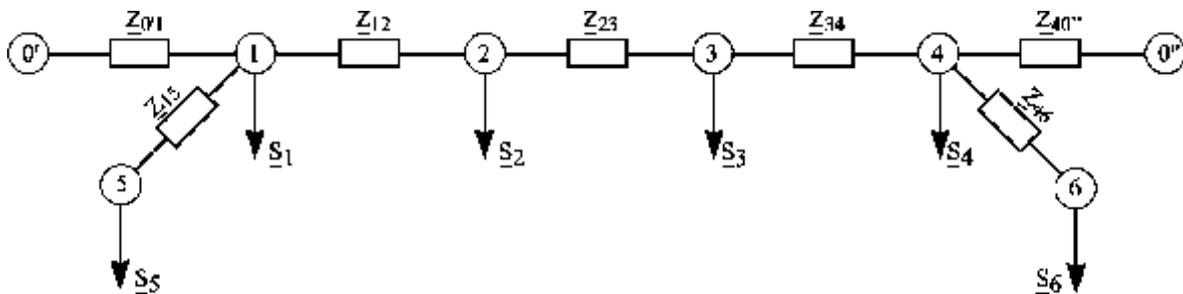


Схема замещения сети



где S_i – расчетные нагрузки узлов.

$$U_{i1} := 227 \cdot e^{j \cdot \text{deg} \cdot 18} \text{ кВ}$$

Находим параметры схемы замещения по справочным данным /14/.

$$z_{0'1} := 0.078 \cdot 68 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{13.9} \right) + 0.0157 \right) \cdot 68 \right]$$

$$z_{0'1} = 5.304 + 27.618j \quad \text{Ом}$$

$$z_{12} := 0.078 \cdot 50 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{13.9} \right) + 0.0157 \right) \cdot 50 \right]$$

$$z_{12} = 3.9 + 20.308j \quad \text{Ом}$$

$$z_{23} := 0.105 \cdot 42 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{12.2} \right) + 0.0157 \right) \cdot 42 \right]$$

$$z_{23} = 4.41 + 17.402j \quad \text{Ом}$$

$$z_{34} := 0.105 \cdot 38 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{12.2} \right) + 0.0157 \right) \cdot 38 \right]$$

$$z_{34} = 3.99 + 15.745j \quad \text{Ом}$$

$$z_{15} := \frac{1}{2} \cdot \left[0.13 \cdot 25 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{10.75} \right) + 0.0157 \right) \cdot 25 \right] \right]$$

$$z_{15} = 1.625 + 5.278j \quad \text{Ом}$$

$$z_{46} := \frac{1}{2} \cdot \left[0.13 \cdot 20 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{10.75} \right) + 0.0157 \right) \cdot 20 \right] \right]$$

$$z_{46} = 1.3 + 4.223j \quad \text{Ом}$$

$$z_{40''} := 0.078 \cdot 55 + j \cdot \left[\left(0.1445 \cdot \log \left(\frac{7000}{13.9} \right) + 0.0157 \right) \cdot 55 \right]$$

$$z_{40''} = 4.29 + 22.338j \quad \text{Ом}$$

$$b_{o0'1} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{7000}{13.9} \right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{o0'1} = 2.805 \cdot 10^{-6} \quad \text{См}$$

$$b_{o15} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{7000}{10.75} \right)} \cdot 10^{-6} \cdot 2$$

$$b_{o15} = 5.388 \cdot 10^{-6} \quad \text{См}$$

$$b_{o12} := \frac{7.58}{\log \left(\frac{7000}{13.9} \right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{o12} = 2.805 \cdot 10^{-6} \quad \text{См}$$

$$b_{o46} := \frac{7.58}{\log\left(\frac{7000}{10.75}\right)} \cdot 10^{-6} \cdot 2$$

$$b_{o46} = 5.388 \cdot 10^{-6} \quad \text{См}$$

$$b_{o23} := \frac{7.58}{\log\left(\frac{7000}{12.2}\right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{o23} = 2.748 \cdot 10^{-6} \quad \text{См}$$

$$b_{o40''} := \frac{7.58}{\log\left(\frac{7000}{13.9}\right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{o40''} = 2.805 \cdot 10^{-6} \quad \text{См}$$

$$b_{o34} := \frac{7.58}{\log\left(\frac{7000}{12.2}\right)} \cdot 10^{-6}$$

$$b_{o34} = 2.748 \cdot 10^{-6} \quad \text{См}$$

Находим зарядные мощности линий.

$$Q_{c0'1} := \frac{220^2 \cdot b_{o0'1} \cdot 68}{2}$$

$$Q_{c0'1} = 4.616 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c12} := \frac{220^2 \cdot b_{o12} \cdot 50}{2}$$

$$Q_{c12} = 3.394 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c23} := \frac{220^2 \cdot b_{o23} \cdot 42}{2}$$

$$Q_{c23} = 2.793 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c34} := \frac{220^2 \cdot b_{o34} \cdot 38}{2}$$

$$Q_{c34} = 2.527 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c46} := \frac{220^2 \cdot b_{o46} \cdot 20}{2}$$

$$Q_{c46} = 2.608 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c15} := \frac{220^2 \cdot b_{o15} \cdot 25}{2}$$

$$Q_{c15} = 3.26 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c40''} := \frac{220^2 \cdot b_{o40''} \cdot 55}{2}$$

$$Q_{c40''} = 3.734 \quad \text{Мвар}$$

Находим расчетные мощности нагрузок узлов.

$$S_1 := 42 + j \cdot 16 - j \cdot Q_{c0'1} - j \cdot Q_{c12} - j \cdot Q_{c15}$$

$$S_1 = 42 + 4.73j \quad \text{МВА}$$

$$S_2 := 30 + j \cdot 12 - j \cdot Q_{c12} - j \cdot Q_{c23}$$

$$S_2 = 30 + 5.813j \quad \text{MBA}$$

$$S_3 := 58 + j \cdot 23 - j \cdot Q_{c23} - j \cdot Q_{c34}$$

$$S_3 = 58 + 17.681j \quad \text{MBA}$$

$$S_4 := 33 + j \cdot 12 - j \cdot Q_{c34} - j \cdot Q_{c40''} - j \cdot Q_{c46}$$

$$S_4 = 33 + 3.132j \quad \text{MBA}$$

$$S_5 := 51 + j \cdot 20 - j \cdot Q_{c15}$$

$$S_5 = 51 + 16.74j \quad \text{MBA}$$

$$S_6 := 45 + j \cdot 17 - j \cdot Q_{c46}$$

$$S_6 = 45 + 14.392j \quad \text{MBA}$$

Находим суммарные мощности в первом и четвертом узлах.

Потери мощности на участке 1-5.

$$dP_{15} := \frac{(\operatorname{Re}(S_5))^2 + (\operatorname{Im}(S_5))^2}{220^2} \cdot \operatorname{Re}(z_{15})$$

$$dP_{15} = 0.097 \quad \text{МВт}$$

$$dQ_{15} := \frac{(\operatorname{Re}(S_5))^2 + (\operatorname{Im}(S_5))^2}{220^2} \cdot \operatorname{Im}(z_{15})$$

$$dQ_{15} = 0.314 \quad \text{Мвар}$$

Суммарная мощность узла 1.

$$S_{1S} := S_1 + S_5 + dP_{15} + j \cdot dQ_{15}$$

$$S_{1S} = 93.097 + 21.784j \quad \text{MBA}$$

Потери мощности на участке 4-6.

$$dP_{46} := \frac{(\operatorname{Re}(S_6))^2 + (\operatorname{Im}(S_6))^2}{220^2} \cdot \operatorname{Re}(z_{46})$$

$$dP_{46} = 0.06 \quad \text{МВт}$$

$$dQ_{46} := \frac{(\operatorname{Re}(S_6))^2 + (\operatorname{Im}(S_6))^2}{220^2} \cdot \operatorname{Im}(z_{46})$$

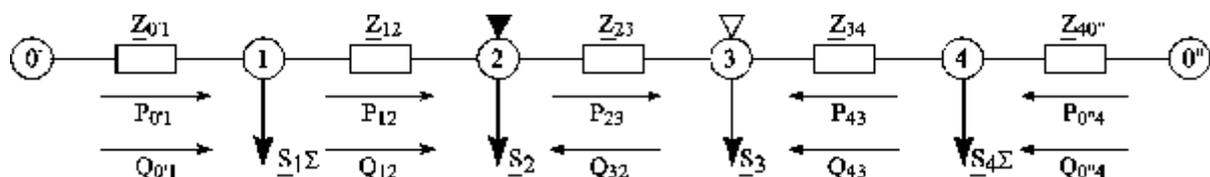
$$dQ_{46} = 0.195 \quad \text{Мвар}$$

Суммарная мощность узла 4.

$$S_{4S} := S_4 + S_6 + dP_{46} + j \cdot dQ_{46}$$

$$S_{4S} = 78.06 + 17.719j \quad \text{MBA}$$

Находим мощности на головных участках, считая напряжения источников питания равными между собой.



$$z_{0'0''} := z_{0'1} + z_{12} + z_{23} + z_{34} + z_{40''}$$

$$z_{40'} := z_{34} + z_{23} + z_{12} + z_{0'1} \quad z_{10''} := z_{12} + z_{23} + z_{34} + z_{40''}$$

$$z_{30'} := z_{23} + z_{12} + z_{0'1} \quad z_{20''} := z_{23} + z_{34} + z_{40''}$$

$$z_{20'} := z_{12} + z_{0'1} \quad z_{30''} := z_{34} + z_{40''}$$

$$z_{10'} := z_{0'1} \quad z_{40''} := z_{40''}$$

$$S_{0'1} := \frac{S_{1S} \cdot \overline{z_{10''}} + S_{2S} \cdot \overline{z_{20''}} + S_{3S} \cdot \overline{z_{30''}} + S_{4S} \cdot \overline{z_{40''}}}{z_{0'0''}}$$

$$S_{0'1} = 122.54 + 29.979j \quad \text{MBA}$$

$$S_{0''4} := \frac{S_{4S} \cdot \overline{z_{40'}} + S_{3S} \cdot \overline{z_{30'}} + S_{2S} \cdot \overline{z_{20'}} + S_{1S} \cdot \overline{z_{10'}}}{z_{0'0''}}$$

$$S_{0''4} = 136.617 + 33.017j \quad \text{MBA}$$

Находим напряжение на втором источнике питания.

Определим уравнительную мощность.

$$S_{ur} := S_{0''4} - (105 + j \cdot 40) \quad S_{ur} = 31.617 - 6.983j \quad \text{MBA}$$

Из выражения (128) находим напряжение второго источника питания.

$$U_{i2} := \frac{-1}{220} \cdot \left(S_{ur} - \frac{220}{z_{0'0''}} \cdot \overline{U_{i1}} \right) \cdot \overline{z_{0'0''}} \quad U_{i2} = 216.026 - 54.59j \quad \text{кВ}$$

$$|U_{i2}| = 222.816 \quad \text{кВ}$$

Находим фактические мощности на головных участках.

$$S_{0'1f} := S_{0'1} + S_{ur} \quad S_{0'1f} = 154.157 + 22.996j \quad \text{MBA}$$

$$S_{0''4f} := S_{0''4} - S_{ur} \quad S_{0''4f} = 105 + 40j \quad \text{MBA}$$

Находим точки потокоораздела.

$$S_{12} := S_{0'1f} - S_{1S} \quad S_{12} = 61.06 + 1.212j \quad \text{MBA}$$

$$S_{23} := S_{12} - S_{2S} \quad S_{23} = 31.06 - 4.601j \quad \text{MBA}$$

$$S_{34} := S_{23} - S_{3S} \quad S_{34} = -26.94 - 22.281j \quad \text{MBA}$$

$$S_{43} := S_{0''4f} - S_{4S} \quad S_{43} = 26.94 + 22.281j \quad \text{MBA}$$

$$S_{32} := S_{43} - S_3 \quad S_{32} = -31.06 + 4.601j \quad \text{MBA}$$

Точки потокоораздела: по активной мощности - узел 3, по реактивной мощности - узел 2. Разрезаем сеть с двухсторонним питанием по точкам потокоораздела 2 и 3.

Потери мощности на участке 2-3

$$dP_{23} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{23}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{23}))^2}{220^2} \cdot \operatorname{Re}(z_{23}) \quad dP_{23} = 0.09 \quad \text{МВт}$$

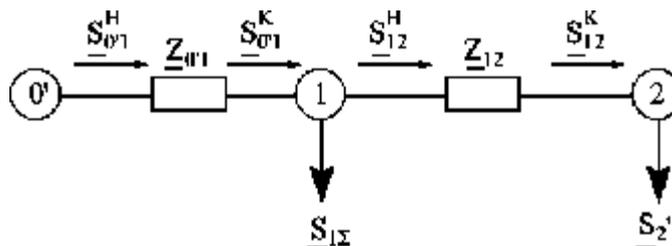
$$dQ_{23} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{23}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{23}))^2}{220^2} \cdot \operatorname{Im}(z_{23}) \quad dQ_{23} = 0.354 \quad \text{Мвар}$$

Нагрузки конечных узлов разомкнутых сетей: 0'-1-2 и 0''-4-3.

$$S_{3'} := \operatorname{Re}(S_{43}) + j \cdot (\operatorname{Im}(S_{43}) + dQ_{23}) \quad S_{3'} = 26.94 + 22.636j \quad \text{MBA}$$

$$S_{2'} := \operatorname{Re}(S_{12}) + dP_{23} + j \cdot \operatorname{Im}(S_{12}) \quad S_{2'} = 61.15 + 1.212j \quad \text{MBA}$$

Рассчитываем две разомкнутые сети.



Находим потоки мощности на всех участках схемы сети 0'-1-2.

$$dS_{12} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{2'}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{2'}))^2}{220^2} \cdot (z_{12}) \quad dS_{12} = 0.301 + 1.57j \quad \text{MBA}$$

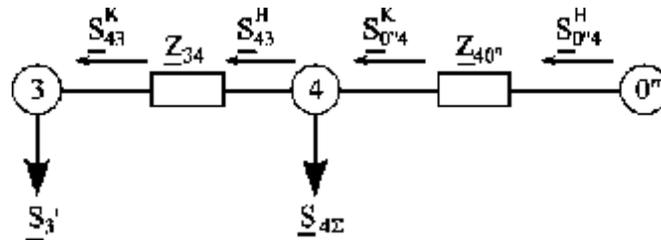
$$S_{12n} := S_{2'} + dS_{12} \quad S_{12n} = 61.451 + 2.782j \quad \text{MBA}$$

$$S_{0'1k} := S_{12n} + S_{1S} \quad S_{0'1k} = 154.548 + 24.566j \quad \text{MBA}$$

$$dS_{0'1} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{0'1k}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{0'1k}))^2}{220^2} \cdot (z_{0'1}) \quad dS_{0'1} = 2.684 + 13.974j \quad \text{MBA}$$

$$S_{0'1n} := S_{0'1k} + dS_{0'1} \quad S_{0'1n} = 157.232 + 38.54j \quad \text{MBA}$$

Находим потоки мощности в сети 3-4-0''.



$$dS_{43} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{3'})^2 + (\operatorname{Im}(S_{3'}))^2}{220^2} \cdot (z_{34}) \quad dS_{43} = 0.102 + 0.403j \quad \text{MBA}$$

$$S_{43n} := S_{3'} + dS_{43} \quad S_{43n} = 27.042 + 23.039j \quad \text{MBA}$$

$$S_{0''4k} := S_{43n} + S_{4\Sigma} \quad S_{0''4k} = 105.102 + 40.757j \quad \text{MBA}$$

$$dS_{0''4} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{0''4k}))^2 + (\operatorname{Im}(S_{0''4k}))^2}{220^2} \cdot (z_{40''}) \quad dS_{0''4} = 1.126 + 5.865j \quad \text{MBA}$$

$$S_{0''4n} := S_{0''4k} + dS_{0''4} \quad S_{0''4n} = 106.228 + 46.622j \quad \text{MBA}$$

Рассчитываем напряжения в узлах схемы по известным напряжениям источников питания.

$$U_1 := U_{i1} - \frac{\operatorname{Re}(S_{0'1n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{0'1}) + \operatorname{Im}(S_{0'1n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{0'1})}{\overline{U_{i1}}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{0'1n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{0'1}) - \operatorname{Im}(S_{0'1n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{0'1})}{\overline{U_{i1}}}$$

$$U_1 = 213.569 + 50.226j \quad \text{кВ}$$

$$U_2 := U_1 - \frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12}) + \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12})}{\overline{U_1}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12}) - \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12})}{\overline{U_1}}$$

$$U_2 = 213.546 + 44.428j \quad \text{кВ}$$

$$U_4 := U_{i2} - \frac{\operatorname{Re}(S_{0''4n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{40''}) + \operatorname{Im}(S_{0''4n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{40''})}{\overline{U_{i2}}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{0''4n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{40''}) - \operatorname{Im}(S_{0''4n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{40''})}{\overline{U_{i2}}}$$

$$U_4 = 207.122 - 62.399j \quad \text{кВ}$$

$$U_3 := U_4 - \frac{\operatorname{Re}(S_{43n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{34}) + \operatorname{Im}(S_{43n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{34})}{\overline{U_4}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{43n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{34}) - \operatorname{Im}(S_{43n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{34})}{\overline{U_4}}$$

$$U_3 = 204.593 - 63.249j \quad \text{кВ}$$

$$S_{23n} := S_{23} + dP_{23} \quad S_{23n} = 31.15 - 4.601j \quad \text{MBA}$$

$$U_{3'} := U_2 - \frac{\operatorname{Re}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23}) + \operatorname{Im}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23})}{\overline{U_2}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23}) - \operatorname{Im}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23})}{\overline{U_2}}$$

$$U_{3'} = 213.814 + 41.85j \quad \text{кВ}$$

$$e_3 := \frac{|U_3| - |U_{3'}|}{|U_3|} \cdot 100$$

$$e_3 = -1.739 \quad \%$$

Находим мощность и напряжения в 5 и 6 узлах.

$$S_{15n} := S_{0'1k} - S_1 - S_{12n}$$

$$S_{15n} = 51.097 + 17.054i \quad \text{МВА}$$

$$S_{46n} := S_{0''4k} - S_4 - S_{34n}$$

$$S_{46n} = 45.06 + 14.586i \quad \text{МВА}$$

$$U_5 := U_1 - \frac{\operatorname{Re}(S_{15n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{15}) + \operatorname{Im}(S_{15n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{15})}{\overline{U_1}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{15n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{15}) + \operatorname{Im}(S_{15n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{15})}{\overline{U_1}}$$

$$U_5 = 213.112 + 48.726i \quad \text{кВ}$$

$$U_6 := U_4 - \frac{\operatorname{Re}(S_{46n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{46}) + \operatorname{Im}(S_{46n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{46})}{\overline{U_4}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{46n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{46}) + \operatorname{Im}(S_{46n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{46})}{\overline{U_4}}$$

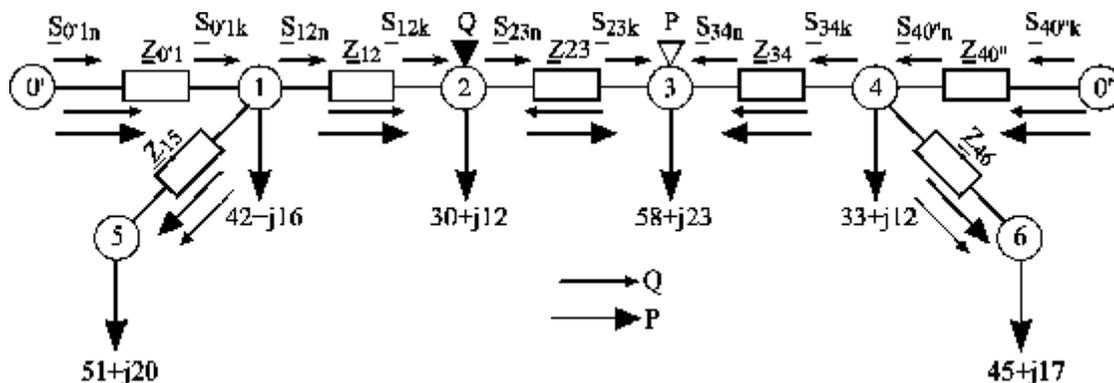
$$U_6 = 206.869 + 61.313i \quad \text{кВ}$$

$$e_5 := \frac{|U_5| - 220}{|U_5|} \cdot 100$$

$$e_5 = -0.635 \quad \%$$

$$e_6 := \frac{|U_6| - 220}{|U_6|} \cdot 100$$

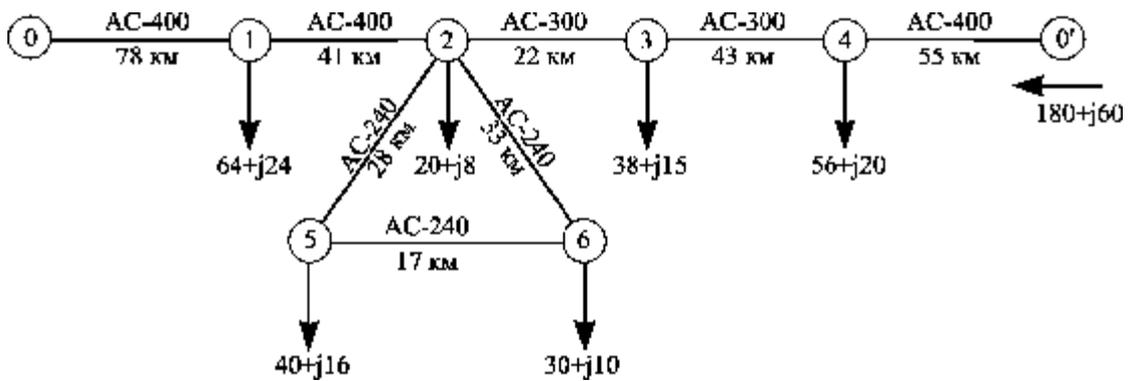
$$e_6 = -1.963 \quad \%$$



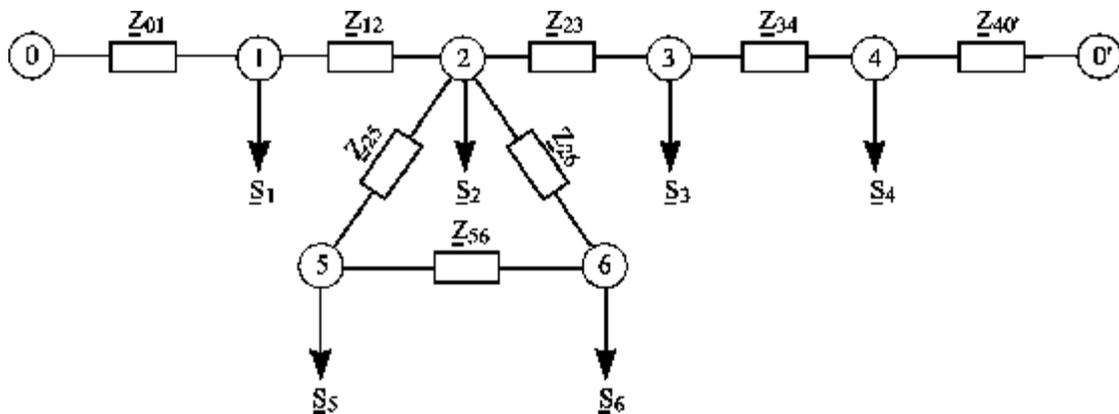
Пример 3.5.

Рассчитать установившийся режим в сети с двухсторонним питанием. Исходные данные показаны на рисунке.

$$U_{i2} := 240 \cdot e^{j \cdot \text{deg} \cdot 12} \text{ кВ}$$



Составляем схему замещения с расчетными нагрузками узлов.



Параметры схемы замещения.

Сопротивления участков сети.

$$Z_{01} := 5.85 + j \cdot 32.76 \text{ Ом}$$

$$Z_{40'} := 4.125 + j \cdot 23.1 \text{ Ом}$$

$$Z_{12} := 3.075 + j \cdot 17.22 \text{ Ом}$$

$$Z_{25} := 3.388 + j \cdot 12.18 \text{ Ом}$$

$$Z_{23} := 2.156 + j \cdot 9.438 \text{ Ом}$$

$$Z_{26} := 3.993 + j \cdot 14.355 \text{ Ом}$$

$$Z_{34} := 4.214 + j \cdot 18.447 \text{ Ом}$$

$$Z_{56} := 2.057 + j \cdot 7.395 \text{ Ом}$$

Зарядные мощности участков сети.

$$Q_{c01} := 0.5 \cdot 220^2 \cdot 2.7 \cdot 10^{-6} \cdot 78$$

$$Q_{c01} = 5.097 \text{ Мвар}$$

$$Q_{c12} := 0.5 \cdot 220^2 \cdot 2.7 \cdot 10^{-6} \cdot 41$$

$$Q_{c12} = 2.679 \text{ Мвар}$$

$$Q_{c23} := 0.5 \cdot 220^2 \cdot 2.64 \cdot 10^{-6} \cdot 22$$

$$Q_{c23} = 1.406 \text{ Мвар}$$

$$Q_{c34} := 0.5 \cdot 220^2 \cdot 2.64 \cdot 10^{-6} \cdot 43$$

$$Q_{c34} = 2.747 \text{ Мвар}$$

$$Q_{c40'} := 0.5 \cdot 220^2 \cdot 2.7 \cdot 10^{-6} \cdot 55 \quad Q_{c40'} = 3.594 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c25} := 0.5 \cdot 220^2 \cdot 2.6 \cdot 10^{-6} \cdot 28 \quad Q_{c25} = 1.762 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c26} := 0.5 \cdot 220^2 \cdot 2.6 \cdot 10^{-6} \cdot 33 \quad Q_{c26} = 2.076 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c56} := 0.5 \cdot 220^2 \cdot 2.6 \cdot 10^{-6} \cdot 17 \quad Q_{c56} = 1.07 \quad \text{Мвар}$$

Определяем расчетную нагрузку узлов.

$$S_{1r} := 64 + j \cdot (24 - Q_{c01} - Q_{c12}) \quad S_{1r} = 64 + 16.225j \quad \text{МВА}$$

$$S_{2r} := 20 + j \cdot (8 - Q_{c12} - Q_{c23} - Q_{c26} - Q_{c25}) \quad S_{2r} = 20 + 0.077j \quad \text{МВА}$$

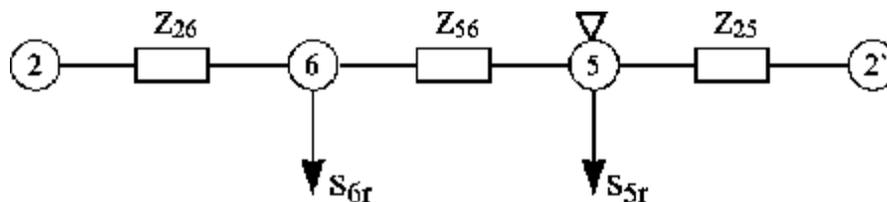
$$S_{3r} := 38 + j \cdot (15 - Q_{c23} - Q_{c34}) \quad S_{3r} = 38 + 10.847j \quad \text{МВА}$$

$$S_{4r} := 56 + j \cdot (20 - Q_{c34} - Q_{c40'}) \quad S_{4r} = 56 + 13.659j \quad \text{МВА}$$

$$S_{5r} := 40 + j \cdot (16 - Q_{c25} - Q_{c56}) \quad S_{5r} = 40 + 13.169j \quad \text{МВА}$$

$$S_{6r} := 30 + j \cdot (10 - Q_{c26} - Q_{c56}) \quad S_{6r} = 30 + 6.854j \quad \text{МВА}$$

Рассчитываем кольцо 2-6-5-2', разрезая его по узлу 2, принятому за источник питания.



Находим потоки мощностей на головных участках, принимая $Z_{2'5} = Z_{25}$

$$S_{26} := \frac{S_{6r} \cdot (\overline{Z_{56}} + \overline{Z_{25}}) + S_{5r} \cdot (\overline{Z_{25}})}{\overline{Z_{26}} + \overline{Z_{25}} + \overline{Z_{56}}} \quad S_{26} = 31.667 + 8.681j \quad \text{МВА}$$

$$S_{2'5} := \frac{S_{5r} \cdot (\overline{Z_{56}} + \overline{Z_{26}}) + S_{6r} \cdot (\overline{Z_{26}})}{\overline{Z_{26}} + \overline{Z_{25}} + \overline{Z_{56}}} \quad S_{2'5} = 38.333 + 11.341j \quad \text{МВА}$$

Потоки мощностей на остальных участках схемы.

$$S_{65} := S_{26} - S_{6r} \quad S_{65} = 1.667 + 1.827j \quad \text{МВА}$$

$$S_{52'} := S_{65} - S_{5r} \quad S_{52'} = -38.333 - 11.341j \quad \text{МВА}$$

Точка потокораздела - узел 5.

Разрезаем кольцо по точке потокораздела на две разомкнутые сети и рассчитываем в них потоки мощности.

$$D S_{2'5} := \frac{\operatorname{Re}(S_{2'5})^2 + \operatorname{Im}(S_{2'5})^2}{220^2} \cdot Z_{25} \quad D S_{2'5} = 0.112 + 0.402j \quad \text{MBA}$$

$$S_{2'5n} := S_{2'5} + D S_{2'5} \quad S_{2'5n} = 38.445 + 11.743j \quad \text{MBA}$$

$$D S_{65} := \frac{\operatorname{Re}(S_{65})^2 + \operatorname{Im}(S_{65})^2}{220^2} \cdot Z_{56} \quad D S_{65} = 2.6 \cdot 10^{-4} + 9.346j \cdot 10^{-4} \quad \text{MBA}$$

$$S_{65n} := S_{65} + D S_{65} \quad S_{65n} = 1.667 + 1.828j \quad \text{MBA}$$

$$S_{26k} := S_{65n} + S_{6r} \quad S_{26k} = 31.667 + 8.682j \quad \text{MBA}$$

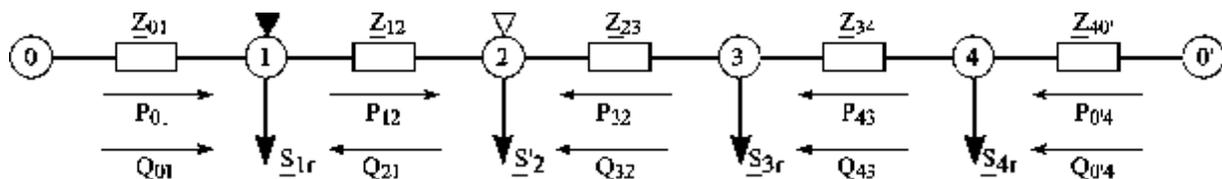
$$D S_{26} := \frac{\operatorname{Re}(S_{26})^2 + \operatorname{Im}(S_{26})^2}{220^2} \cdot Z_{26} \quad D S_{26} = 0.089 + 0.32j \quad \text{MBA}$$

$$S_{26n} := S_{26k} + D S_{26} \quad S_{26n} = 31.756 + 9.002j \quad \text{MBA}$$

Находим суммарную мощность второго узла.

$$S'_{2} := S_{26n} + S_{2'5n} + S_{2r} \quad S'_{2} = 90.201 + 20.823j \quad \text{MBA}$$

Рассчитываем магистраль с двухсторонним питанием.



Определяем потоки мощности на головных участках магистрали с двухсторонним питанием, считая напряжения ИП равными между собой.

$$S_{01gu} := \frac{S_{1r} \cdot (\overline{Z_{12}} + \overline{Z_{23}} + \overline{Z_{34}} + \overline{Z_{40'}}) + S'_{2} \cdot (\overline{Z_{23}} + \overline{Z_{34}} + \overline{Z_{40'}}) + S_{3r} \cdot (\overline{Z_{34}} + \overline{Z_{40'}}) + S_{4r} \cdot (\overline{Z_{40'}})}{\overline{Z_{12}} + \overline{Z_{23}} + \overline{Z_{34}} + \overline{Z_{40'}} + \overline{Z_{01}}} \quad S_{01gu} = 117.19 + 29.928j \quad \text{MBA}$$

$$S_{0'4gu} := \frac{S_{4r} \cdot (\overline{Z_{12}} + \overline{Z_{23}} + \overline{Z_{34}} + \overline{Z_{01}}) + S_{3r} \cdot (\overline{Z_{23}} + \overline{Z_{12}} + \overline{Z_{01}}) + S'_{2} \cdot (\overline{Z_{01}} + \overline{Z_{12}}) + S_{1r} \cdot (\overline{Z_{01}})}{\overline{Z_{12}} + \overline{Z_{23}} + \overline{Z_{34}} + \overline{Z_{40'}} + \overline{Z_{01}}} \quad S_{0'4gu} = 131.011 + 31.626j \quad \text{MBA}$$

Определяем уравнительную мощность и напряжение первого ИП.

$$S_{ur} := 180 + j \cdot 60 - S_{0'4gu} \quad S_{ur} = 48.989 + 28.374j \quad \text{MBA}$$

$$U_{i1} := U_{i2} - \frac{S_{ur} \cdot (\overline{Z_{12}} + \overline{Z_{23}} + \overline{Z_{34}} + \overline{Z_{40'}} + \overline{Z_{01}})}{220}$$

$$U_{i1} := \overline{U_{i1}}$$

$$U_{i1} = 217.409 + 29.921j \quad \text{кВ}$$

Определяем уточненные потоки мощности в сети с учетом уравнивающей мощности.

$$S_{01} := S_{01gu} - S_{ur}$$

$$S_{01} = 68.201 + 1.554j \quad \text{MBA}$$

$$S_{43} := S_{0'4gu} + S_{ur} - S_{4r}$$

$$S_{43} = 124 + 46.341j \quad \text{MBA}$$

$$S_{32} := S_{43} - S_{3r}$$

$$S_{32} = 86 + 35.494j \quad \text{MBA}$$

$$S_{21} := S_{32} - S'_{2}$$

$$S_{21} = -4.201 + 14.671j \quad \text{MBA}$$

$$S_{12} := S_{01} - S_{1r}$$

$$S_{12} = 4.201 - 14.671j \quad \text{MBA}$$

$$S_{10} := S_{21} - S_{1r}$$

$$S_{10} = -68.201 - 1.554j \quad \text{MBA}$$

Находим точки потоко раздела (узел 1 и 2) и разрезаем сеть на две разомкнутые сети 0-1 и 0'-4-3-2.

Рассчитываем потери мощности на участке между точками потоко раздела.

$$DS_{12} := \frac{\text{Re}(S_{21})^2 + \text{Im}(S_{21})^2}{220^2} \cdot Z_{12}$$

$$DS_{12} = 0.015 + 0.083j \quad \text{MBA}$$

Определяем нагрузки в конце каждой разомкнутой сети.

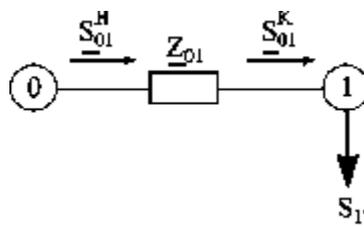
$$S_{1'} := \text{Re}(S_{01}) + \text{Re}(DS_{12}) + j \cdot \text{Im}(S_{01})$$

$$S_{1'} = 68.216 + 1.554j \quad \text{MBA}$$

$$S_{2'} := \text{Re}(S_{32}) + j \cdot (\text{Im}(S_{32}) + \text{Im}(DS_{12}))$$

$$S_{2'} = 86 + 35.576j \quad \text{MBA}$$

Определяем потоки мощности в разомкнутых сетях.

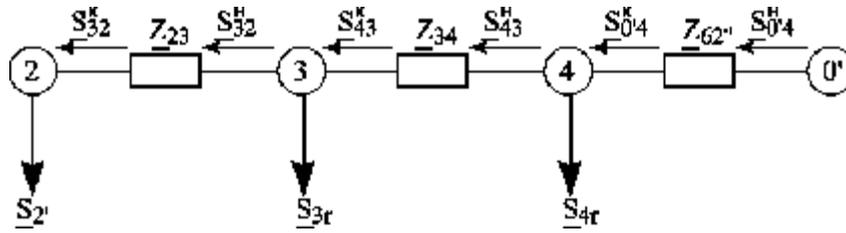


$$DS_{01} := \frac{\text{Re}(S_{1'})^2 + \text{Im}(S_{1'})^2}{220^2} \cdot Z_{01}$$

$$DS_{01} = 0.563 + 3.151j \quad \text{MBA}$$

$$S_{01n} := S_{1'} + DS_{01}$$

$$S_{01n} = 68.779 + 4.705j \quad \text{MBA}$$



$$D S_{32} := \frac{\operatorname{Re}(S_{2'})^2 + \operatorname{Im}(S_{2'})^2}{220^2} \cdot Z_{23}$$

$$D S_{32} = 0.386 + 1.689j \quad \text{MBA}$$

$$S_{32n} := S_{2'} + D S_{32}$$

$$S_{32n} = 86.386 + 37.265j \quad \text{MBA}$$

$$S_{43k} := S_{32n} + S_{3r}$$

$$S_{43k} = 124.386 + 48.113j \quad \text{MBA}$$

$$D S_{43} := \frac{\operatorname{Re}(S_{43k})^2 + \operatorname{Im}(S_{43k})^2}{220^2} \cdot Z_{34}$$

$$D S_{43} = 1.549 + 6.779j \quad \text{MBA}$$

$$S_{43n} := S_{43k} + D S_{43}$$

$$S_{43n} = 125.934 + 54.892j \quad \text{MBA}$$

$$S_{0'4k} := S_{43n} + S_{4r}$$

$$S_{0'4k} = 181.934 + 68.551j \quad \text{MBA}$$

$$D S_{0'4} := \frac{\operatorname{Re}(S_{0'4k})^2 + \operatorname{Im}(S_{0'4k})^2}{220^2} \cdot Z_{40'}$$

$$D S_{0'4} = 3.222 + 18.041j \quad \text{MBA}$$

$$S_{0'4n} := S_{0'4k} + D S_{0'4}$$

$$S_{0'4n} = 185.156 + 86.592j \quad \text{MBA}$$

$$S_{12n} := S_{12} + \operatorname{Re}(D S_{12})$$

$$S_{12n} = 4.216 - 14.671i \quad \text{MBA}$$

Рассчитываем напряжения в узлах.

$$D U_{01} := \frac{\operatorname{Re}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{01}) + \operatorname{Im}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{01})}{\overline{U_{i1}}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{01}) - \operatorname{Im}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{01})}{\overline{U_{i1}}}$$

$$D U_{01} = 1.129 + 10.393j \quad \text{кВ}$$

$$U_1 := U_{i1} - D U_{01}$$

$$U_1 = 216.28 + 19.528j \quad \text{кВ}$$

$$D U_{0'4} := \frac{\operatorname{Re}(S_{0'4n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{40'}) + \operatorname{Im}(S_{0'4n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{40'})}{\overline{U_{i2}}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{0'4n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{40'}) - \operatorname{Im}(S_{0'4n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{40'})}{\overline{U_{i2}}}$$

$$D U_{0'4} = 7.869 + 18.371j \quad \text{кВ}$$

$$U_4 := U_{i2} - D U_{0'4}$$

$$U_4 = 226.886 + 31.528j \quad \text{кВ}$$

$$D U_{43} := \frac{\operatorname{Re}(S_{43n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{34}) + \operatorname{Im}(S_{43n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{34})}{\overline{U_4}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{43n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{34}) - \operatorname{Im}(S_{43n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{34})}{\overline{U_4}}$$

$$D U_{43} = 5.416 + 9.972j \quad \text{кВ}$$

$$U_3 := U_4 - D U_{43} \quad U_3 = 221.47 + 21.556j \quad \text{кВ}$$

$$D U_{32} := \frac{\operatorname{Re}(S_{32n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{23}) + \operatorname{Im}(S_{32n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{23})}{\overline{U_3}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{32n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{23}) - \operatorname{Im}(S_{32n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{23})}{\overline{U_3}}$$

$$D U_{32} = 2.086 + 3.522j \quad \text{кВ}$$

$$U_2 := U_3 - D U_{32} \quad U_2 = 219.384 + 18.034j \quad \text{кВ}$$

$$D U_{12} := \frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{12}) + \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{12})}{\overline{U_1}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{12}) - \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{12})}{\overline{U_1}}$$

$$U_{2'} := U_1 - D U_{12} \quad U_{2'} = 215.913 + 19.219j \quad \text{кВ}$$

$$e_2 := \frac{|U_2| - |U_{2'}|}{|U_2|} \cdot 100 \quad e_2 = 1.525 \quad \%$$

$$D U_{26} := \frac{\operatorname{Re}(S_{26n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{26}) + \operatorname{Im}(S_{26n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{26})}{\overline{U_2}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{26n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{26}) - \operatorname{Im}(S_{26n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{26})}{\overline{U_2}}$$

$$D U_{26} = 1.003 + 1.996j \quad \text{кВ}$$

$$U_6 := U_2 - D U_{26} \quad U_6 = 218.381 + 16.038j \quad \text{кВ}$$

$$D U_{56} := \frac{\operatorname{Re}(S_{65n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{56}) + \operatorname{Im}(S_{65n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{56})}{\overline{U_6}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{65n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{56}) - \operatorname{Im}(S_{65n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{56})}{\overline{U_6}}$$

$$D U_{56} = 0.074 + 0.045j \quad \text{кВ}$$

$$U_{5'} := U_6 - D U_{56} \quad U_{5'} = 218.306 + 15.993j \quad \text{кВ}$$

$$D U_{2'5} := \frac{\operatorname{Re}(S_{2'5n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{25}) + \operatorname{Im}(S_{2'5n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{25})}{\overline{U_2}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{2'5n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{25}) - \operatorname{Im}(S_{2'5n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{25})}{\overline{U_2}}$$

$$D U_{2'5} = 1.078 + 2.042j \quad \text{кВ}$$

$$U_{5''} := U_2 - D U_{2'5} \quad U_{5''} = 218.306 + 15.993j \quad \text{кВ}$$

$$\frac{220 - |U_{5'}|}{220} \cdot 100 = 2.161 \quad \%$$

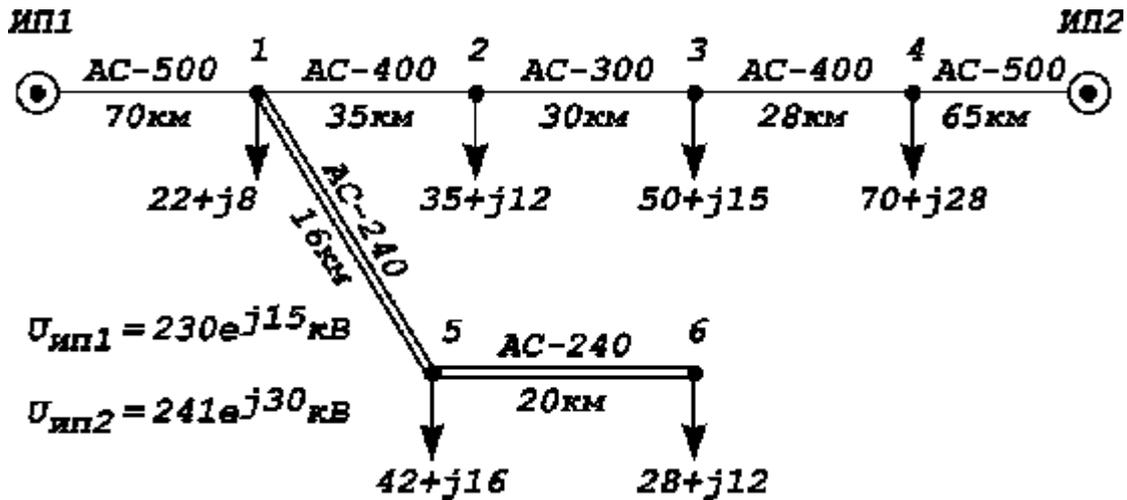
Так как напряжения в пятой точке, рассчитанные с разных сторон, совпадают, то расчет проведен верно. Сравниваем модуль напряжения узла 5, равный 215,24 кВ, с номинальным напряжением сети и делаем вывод о нецелесообразности второй итерации, т.к. погрешность расчета равна 2,161%.

Задачи для самостоятельного решения

№1

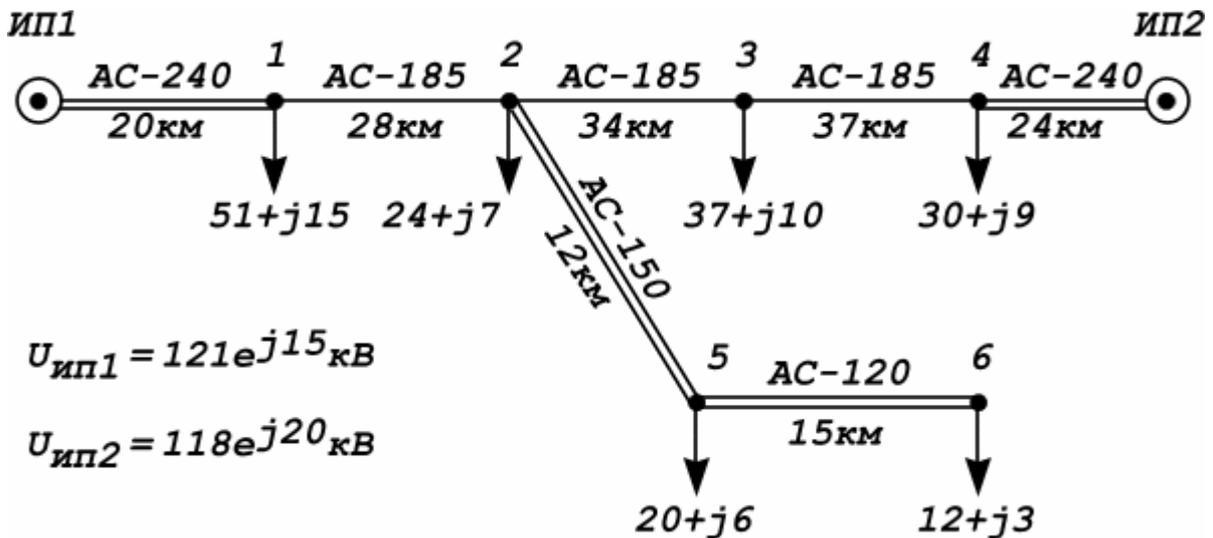
Рассчитать установившийся режим в схеме, приведенной на рисунке.

В узлах задана приведенная мощность в МВА.



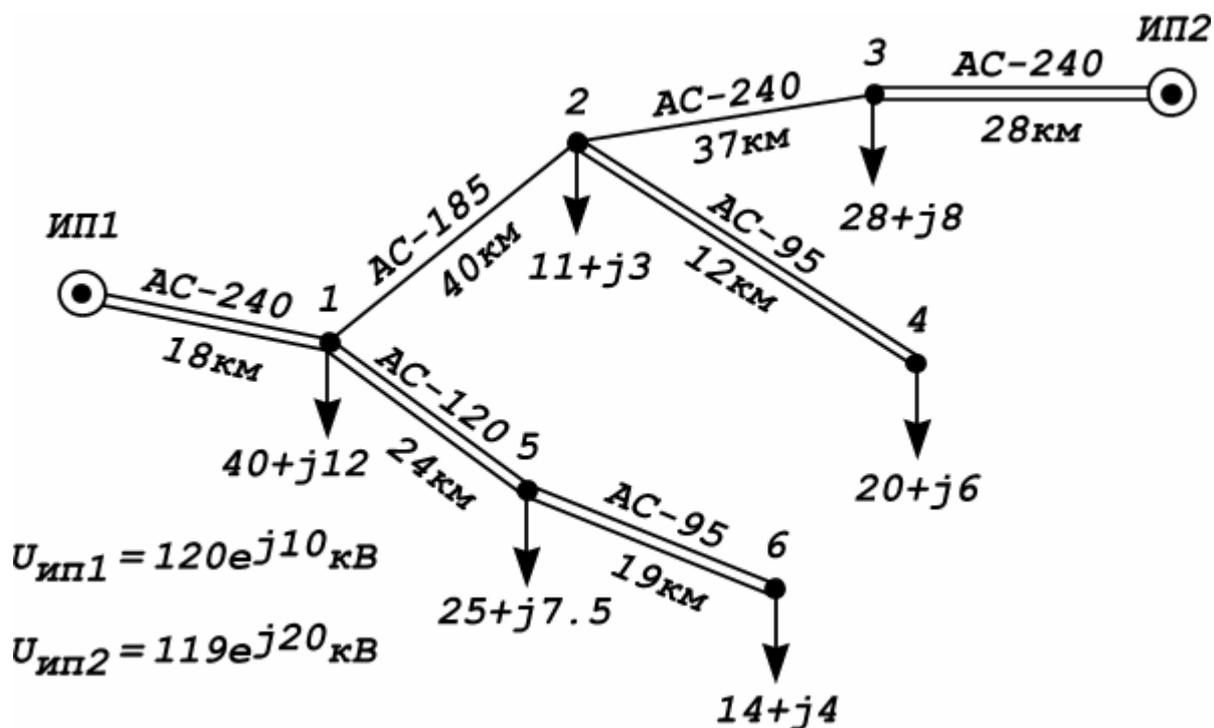
№ 2

Рассчитать потокораспределение мощности и напряжения в узлах сети. Нагрузки заданы в МВА.



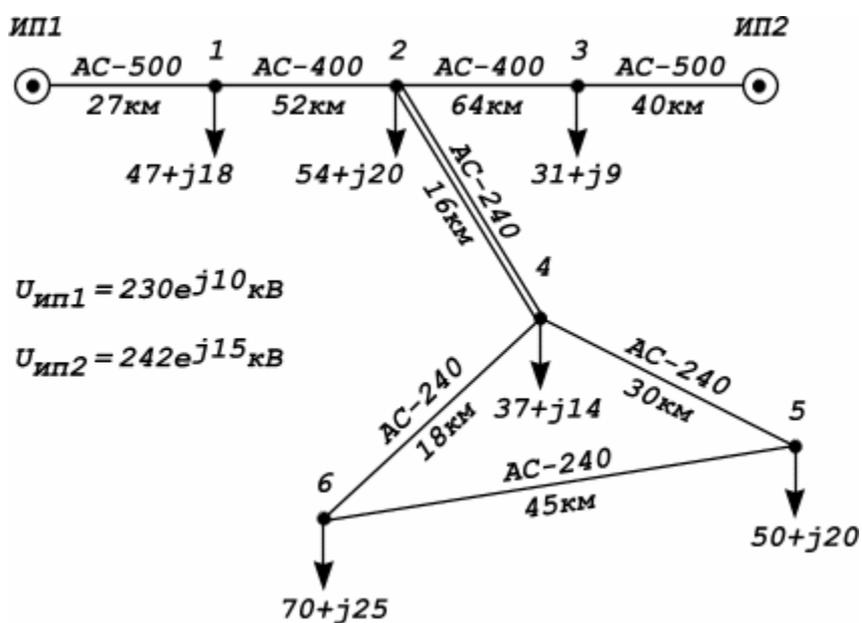
№3

Рассчитать установившийся режим в сети. В узлах заданы приведенные нагрузки в МВА.



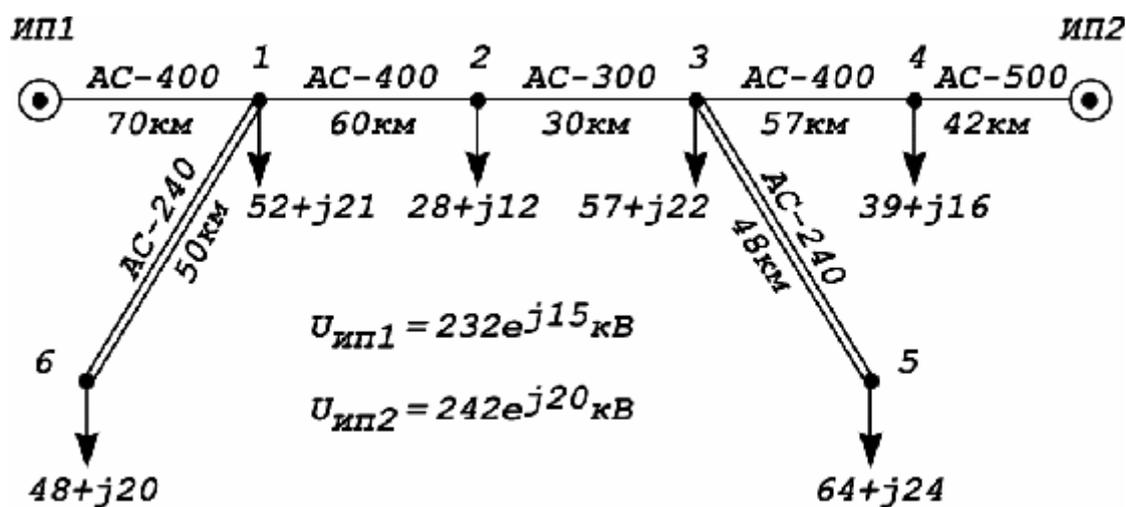
№4

Рассчитать установившийся режим в сети. В узлах заданы приведенные мощности нагрузок в МВА.



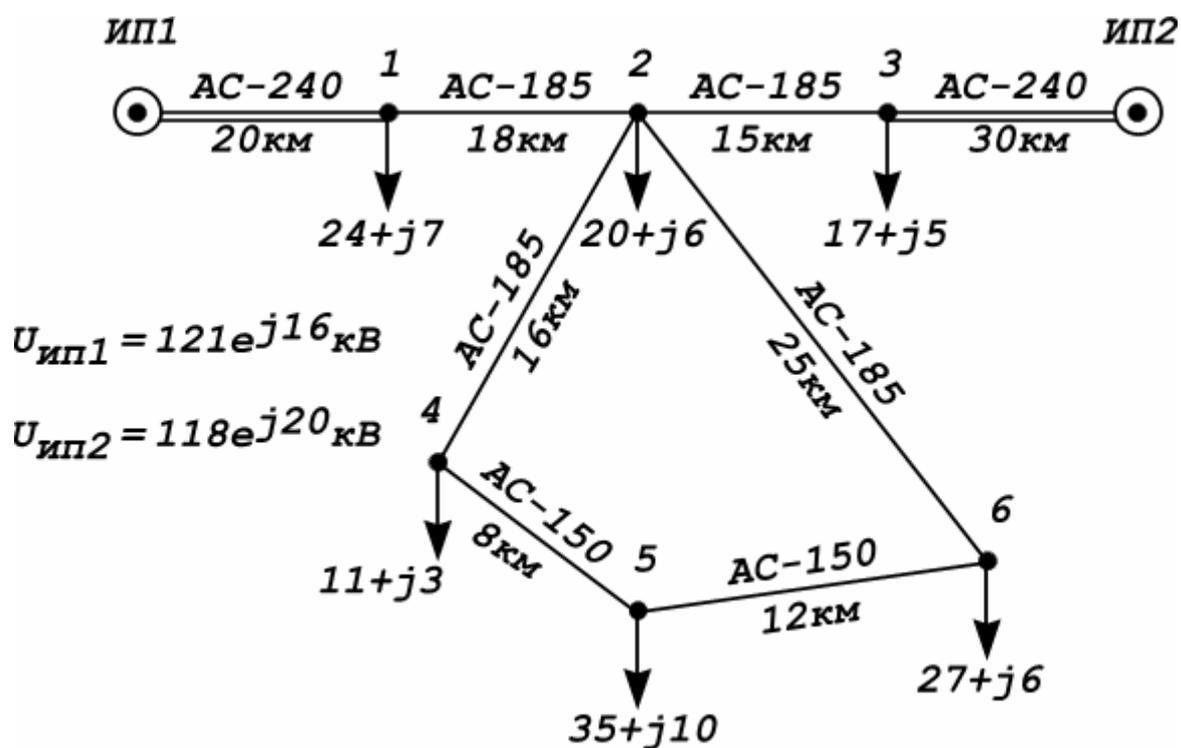
№5

Рассчитать установившийся режим сети, схема которой приведена на рисунке. Нагрузки заданы в МВА.



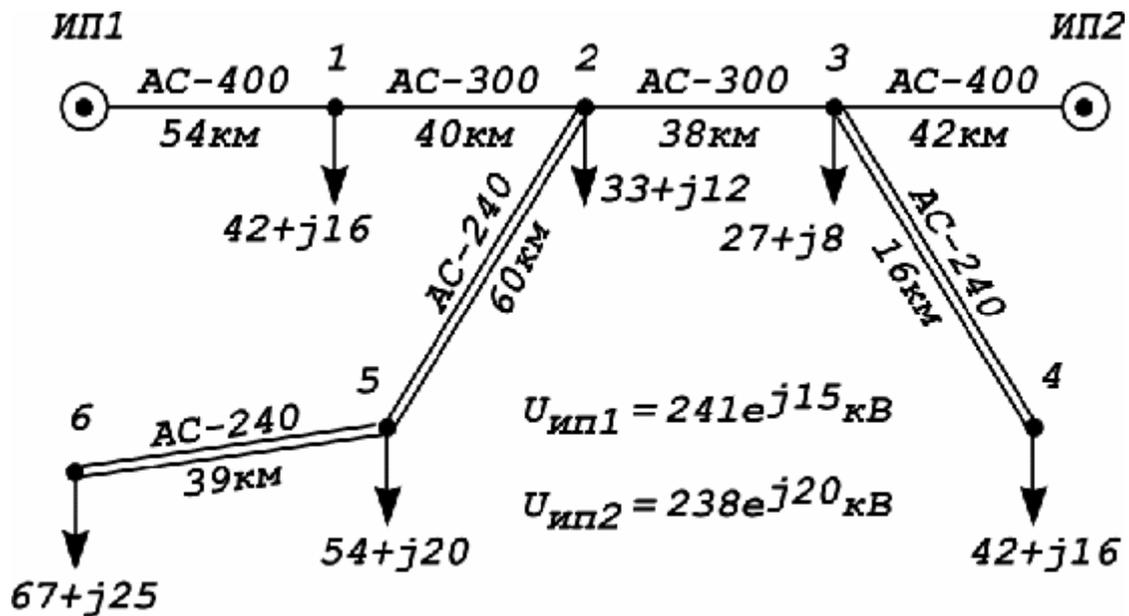
№6

Рассчитать установившийся режим сети. Нагрузки заданы в МВА.



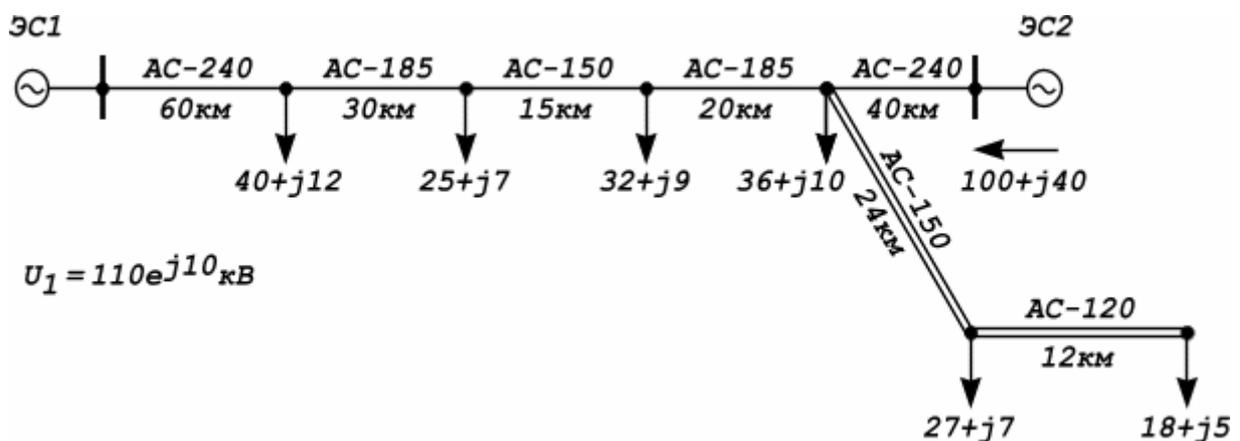
№7

Рассчитать установившийся режим сети. Нагрузки заданы в МВА.



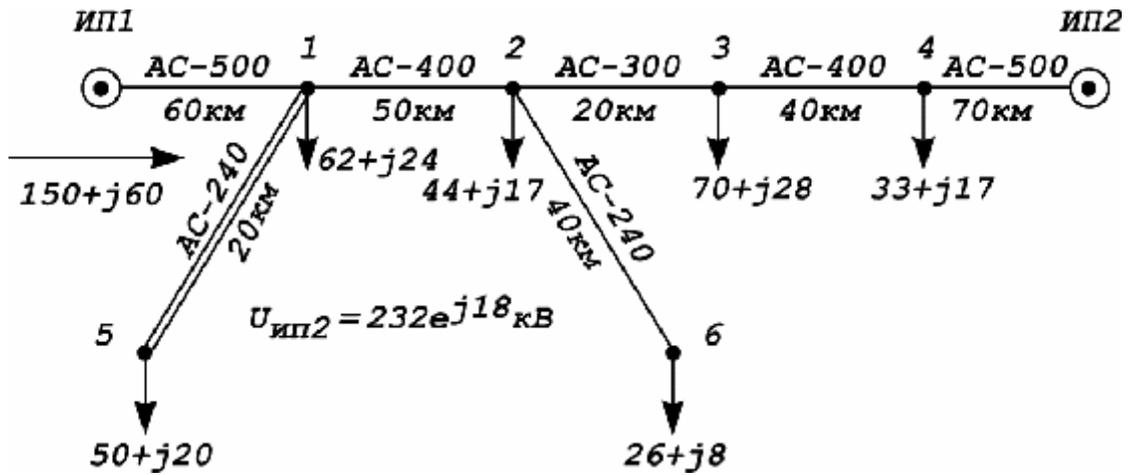
№8

Определить напряжение на шинах электростанции 2 и потоки мощности в сети. Нагрузки заданы в МВА.



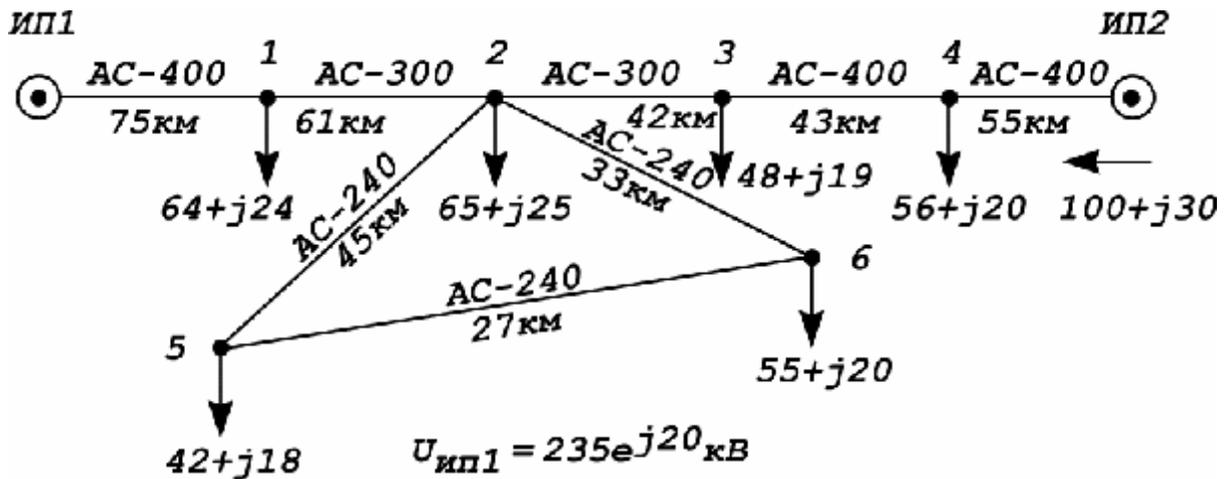
№9

Рассчитать потокораспределение мощности в сети и напряжение у первого ИП. Нагрузки заданы в МВА.



№10

Рассчитать установившийся режим в сети и напряжение второго ИП. Нагрузки в узлах заданы в МВА.

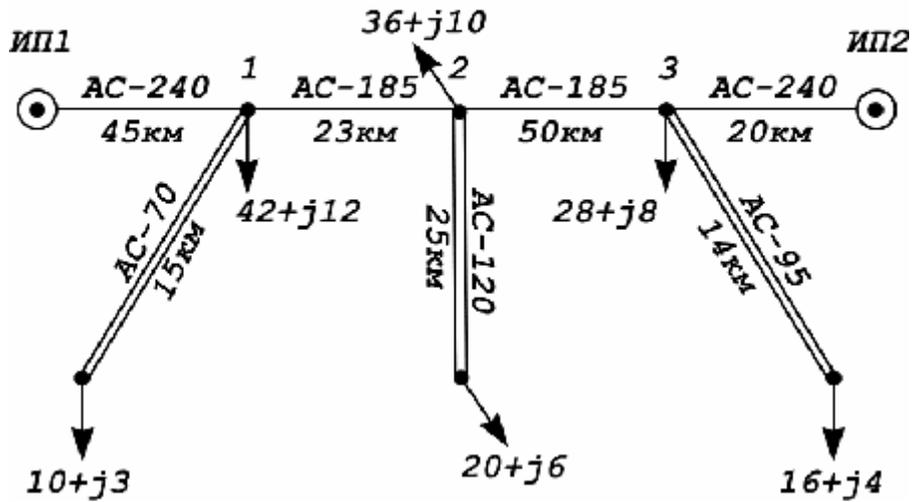


№11

Рассчитать установившийся режим в сети. Нагрузки заданы в МВА.

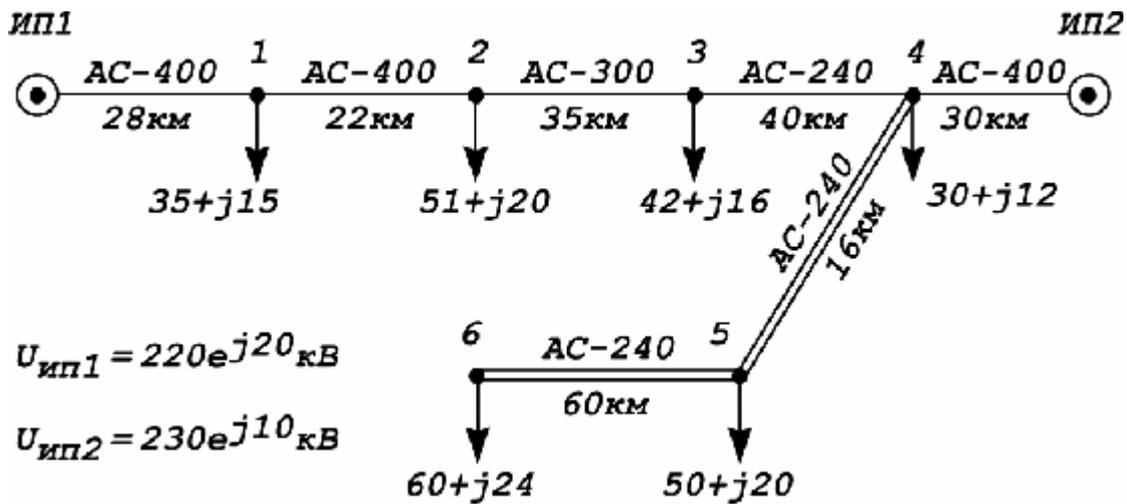
$$U_{\text{ИП1}} = 121e^{j15} \text{ кВ}$$

$$U_{\text{ИП2}} = 118e^{j10} \text{ кВ}$$



№12

Рассчитать установившийся режим в сети. Нагрузки заданы в МВА.

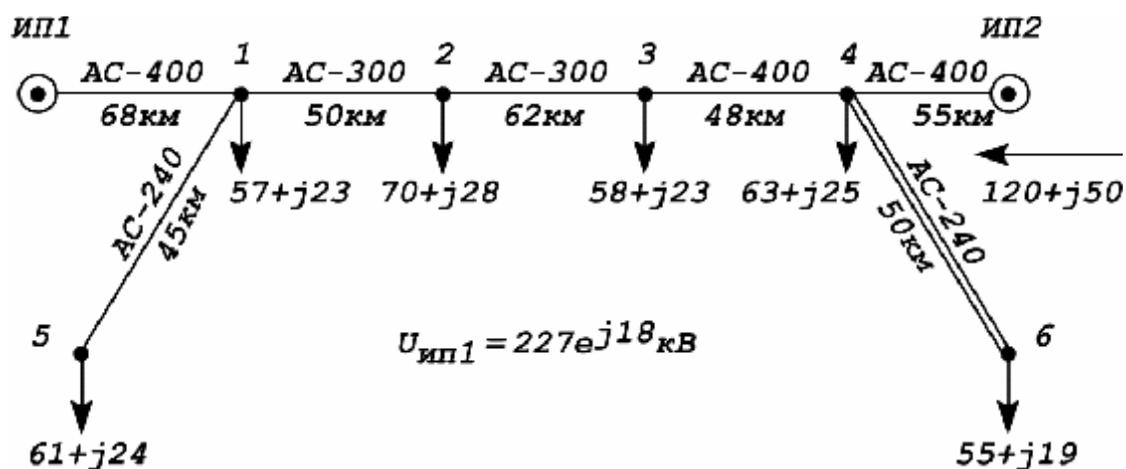


$$U_{\text{ИП1}} = 220e^{j20} \text{ кВ}$$

$$U_{\text{ИП2}} = 230e^{j10} \text{ кВ}$$

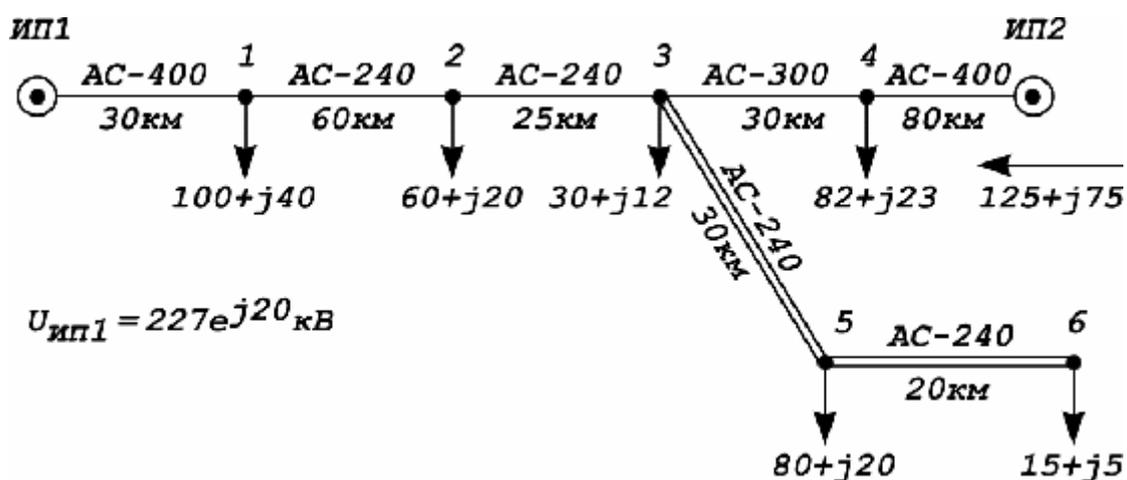
№ 13

Рассчитать установившийся режим в сети. Определить напряжение второго ИП. Нагрузки в узлах заданы в МВА.



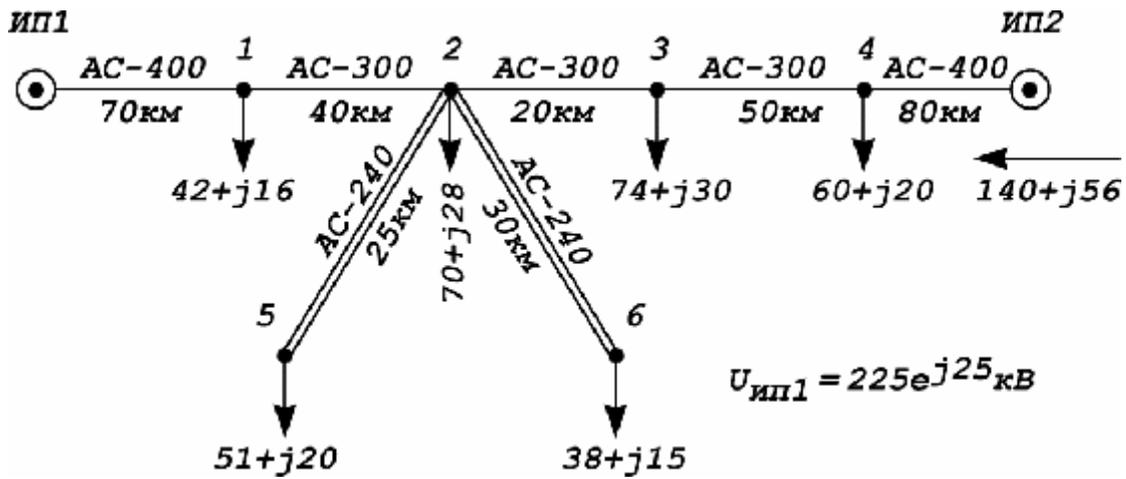
№ 14

Рассчитать установившийся режим в сети. Определить напряжение второго ИП. Нагрузки в узлах заданы в МВА.



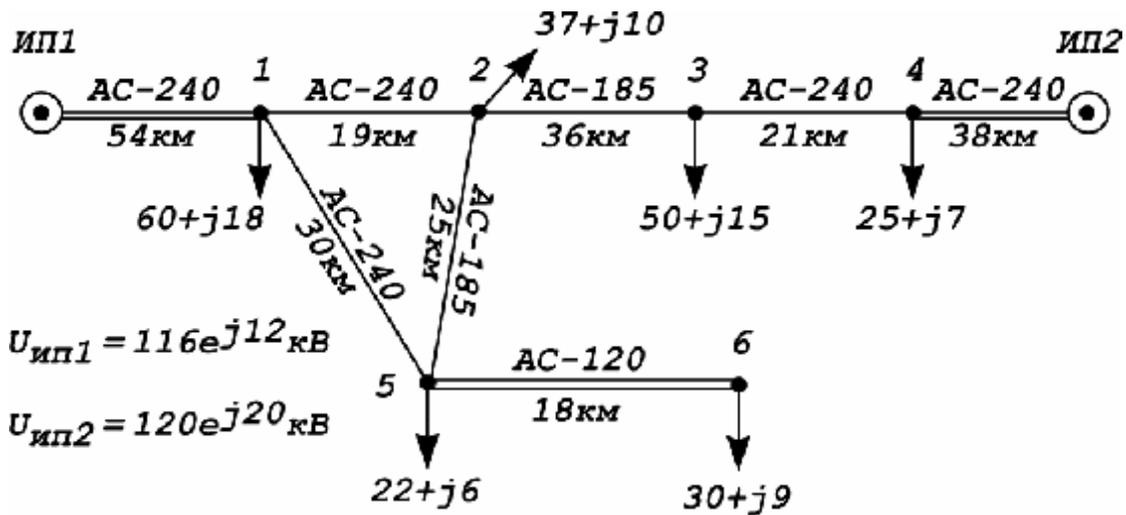
№15

Рассчитать установившийся режим в сети и определить напряжение второго ИП. Нагрузки в узлах заданы в МВА.



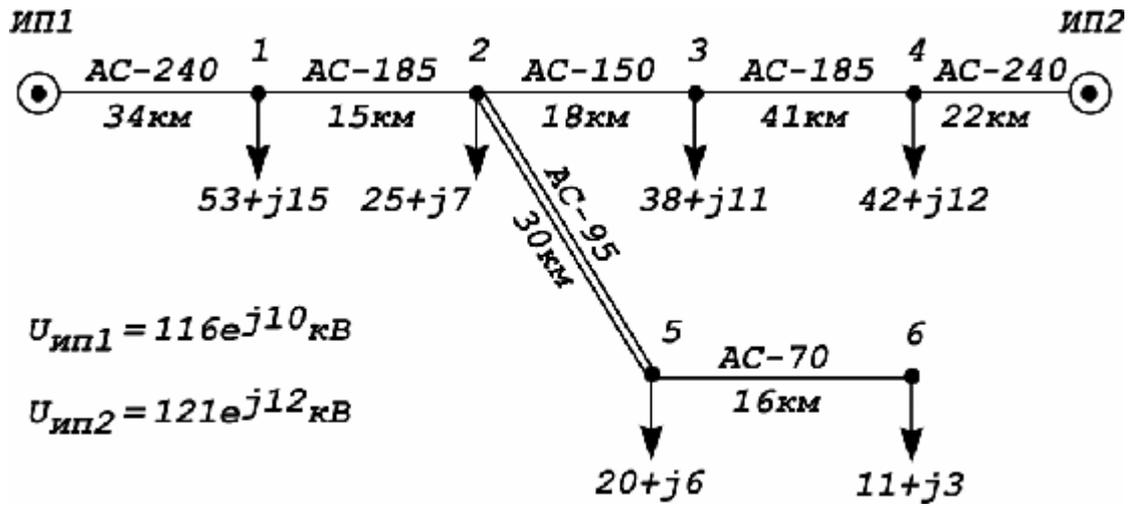
№16

Рассчитать установившийся режим в сети. Нагрузки заданы в МВА.



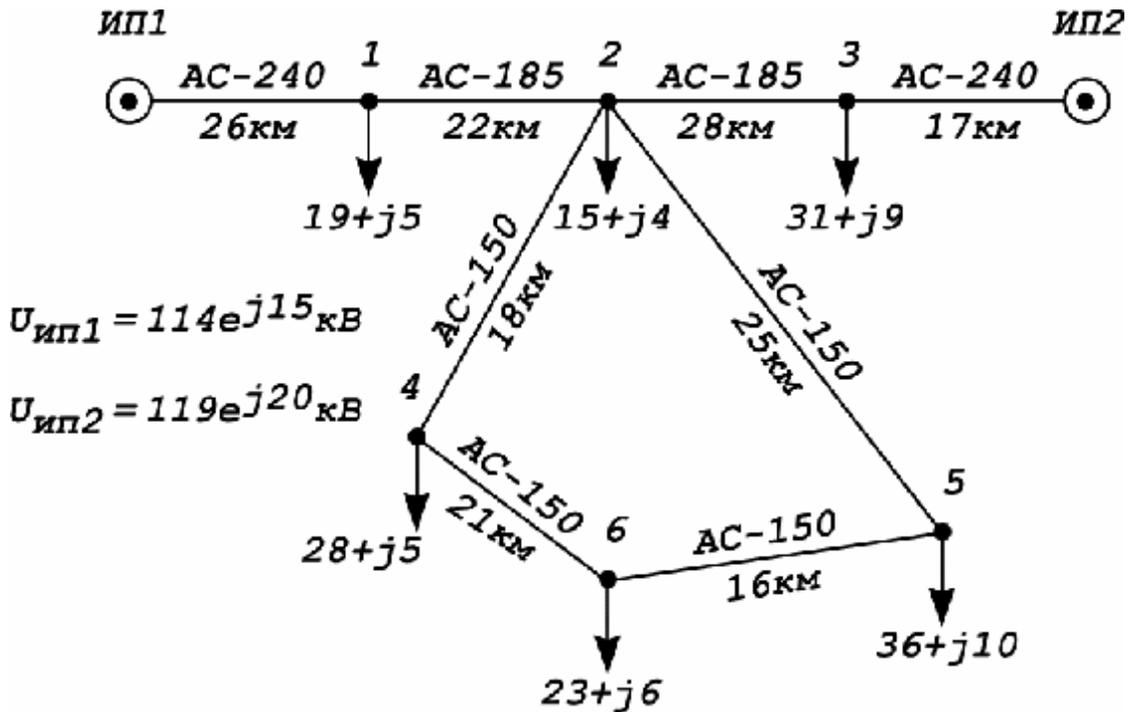
№ 17

Рассчитать установившийся режим в сети. Нагрузки заданы в МВА.



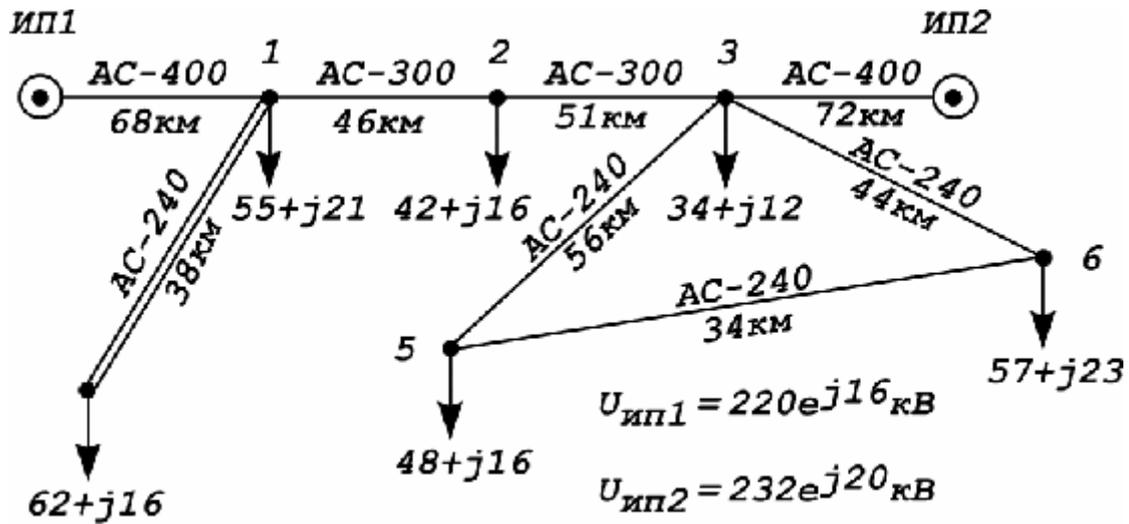
№18

Рассчитать установившийся режим сети. Нагрузки заданы в МВА.



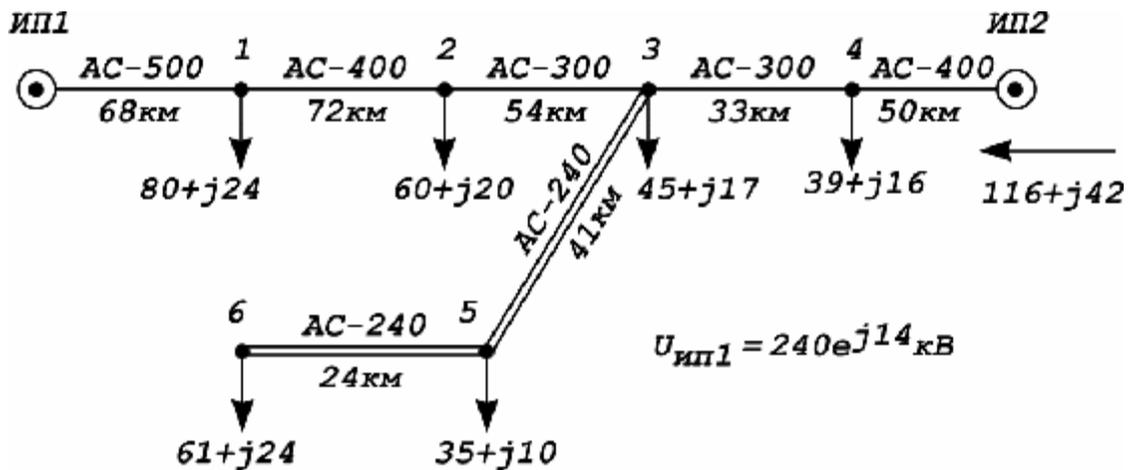
№ 19

Рассчитать установившийся режим в сети. Нагрузки заданы в МВА.



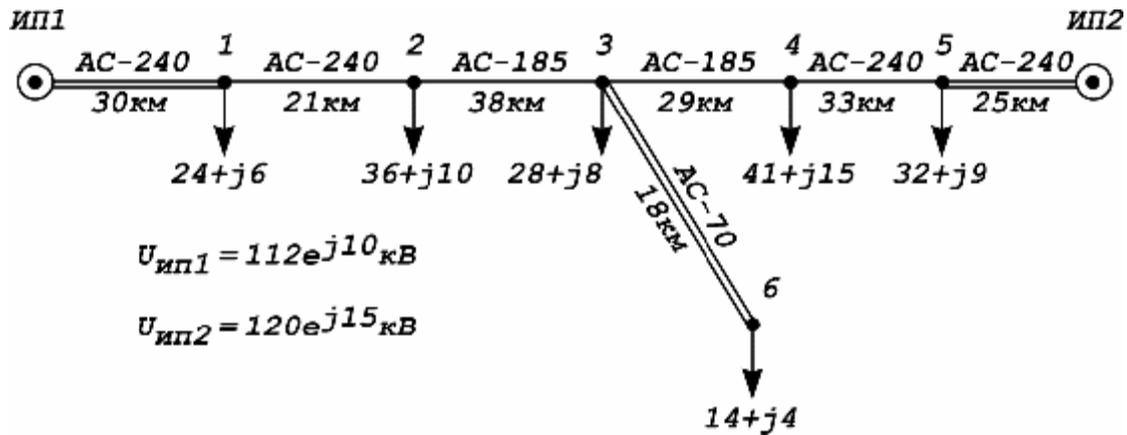
№20

Рассчитать установившийся режим в сети. Нагрузки заданы в МВА.



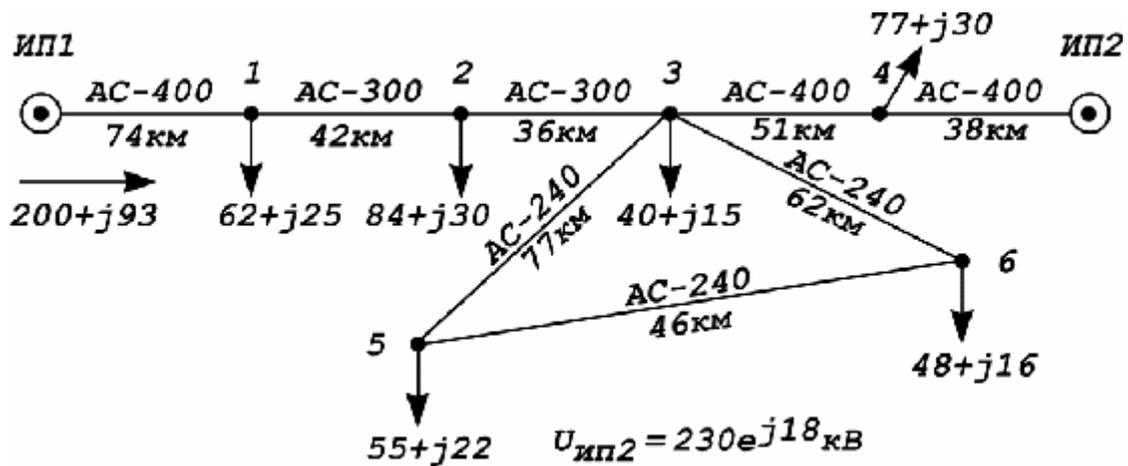
№21

Рассчитать установившийся режим в сети. Нагрузки заданы в МВА.



№ 22

Рассчитать установившийся режим в сети и напряжение первого ИП.
 Нагрузки заданы в МВА.



4. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ СЕТЕЙ С РАЗНЫМИ НОМИНАЛЬНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ. РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ С ПОМОЩЬЮ ТРАНСФОРМАТОРОВ С РПН И ЛИНЕЙНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

4.1. Определение напряжения на стороне низшего напряжения подстанций

Все рассмотренные способы электрического расчета сетей позволяли определять напряжения на стороне высокого напряжения (ВН) подстанций. Рассмотрим способ расчета напряжения на стороне низкого напряжения (НН) подстанции (см. рис. 32) /2/. На рис. 32 силовой трансформатор представлен в виде двух элементов: первый – сопротивление трансформатора Z_{T1} , второй – идеальный трансформатор. Идеальный трансформатор не имеет сопротивления, но обладает коэффициентом трансформации:

$$n_T = \frac{U_{Вном}}{U_{Нном}}. \quad (131)$$

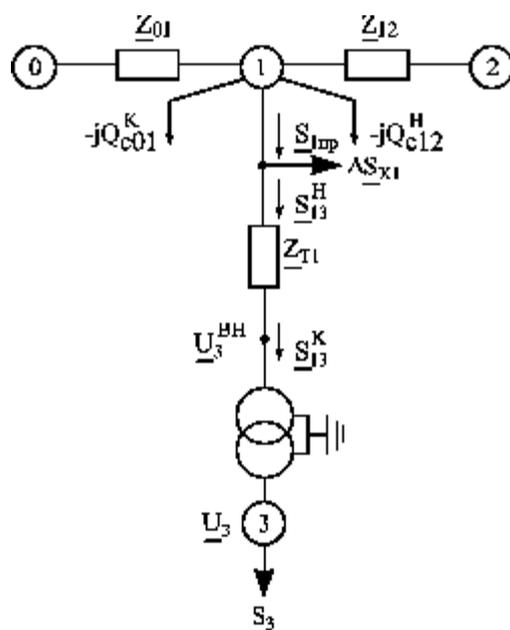


Рис. 32. Схема для определения напряжения на низкой стороне трансформатора

Такое условное разделение силового трансформатора на его сопротивление и идеальный трансформатор применяется, когда совместно рассматриваются сети высшего и низшего напряжений без приведения параметров сети к одному базисному напряжению. Расчет напряжения низкой стороны трансформатора ведется так же, как и напряжения в конце любого сопротивления.

Обозначим приведенное к стороне ВН напряжение на шинах НН - \underline{U}_3^{BH} ; действительное напряжение на шинах НН - \underline{U}_3 . Мощность нагрузки узла 3, \underline{S}_3 , известна. Тогда расчет напряжения на шинах НН подстанции осуществляется в следующем порядке:

определяется мощность, входящая в обмотку ВН силового трансформатора:

$$\underline{S}_{13}^H = \underline{S}_{1np} - D\underline{S}_{X1}, \quad (132)$$

где

$$\underline{S}_{1np} = \underline{S}_3 + D\underline{S}_{T1} + D\underline{S}_{X1}; \quad (133)$$

приведенную нагрузку трансформатора \underline{S}_{1np} можно найти из понятия расчетной нагрузки:

$$\underline{S}_{1np} = \underline{S}_{P1} + j \times \underline{Q}_{c01}^K + j \times \underline{Q}_{c12}^H.$$

По известным напряжению узла \underline{U}_1 и мощности в начале участка \underline{S}_{13}^H легко определить напряжение низкой стороны трансформатора, приведенное к высокой \underline{U}_3^{BH} в конце сопротивления \underline{Z}_{T1} :

$$\underline{U}_3^{BH} = \underline{U}_1 - \frac{\underline{P}_{13}^H \times \underline{R}_{T1} + \underline{Q}_{13}^H \times \underline{X}_{T1}}{\underline{U}_1^*} - j \times \frac{\underline{P}_{13}^H \times \underline{X}_{T1} - \underline{Q}_{13}^H \times \underline{R}_{T1}}{\underline{U}_1^*}. \quad (134)$$

Модуль и фаза этого напряжения равны

$$U_3^{BH} = \sqrt{\frac{\Re}{\Im} \underline{U}_1 - \frac{\underline{P}_{13}^H \times \underline{R}_{T1} + \underline{Q}_{13}^H \times \underline{X}_{T1}}{\underline{U}_1} \frac{\Im}{\Re} + \frac{\Re}{\Im} \frac{\underline{P}_{13}^H \times \underline{X}_{T1} - \underline{Q}_{13}^H \times \underline{R}_{T1}}{\underline{U}_1} \frac{\Im}{\Re}}^2}; \quad (135)$$

$$tgj = \frac{\underline{P}_{13}^H \times \underline{X}_{T1} - \underline{Q}_{13}^H \times \underline{R}_{T1}}{\underline{U}_1 - (\underline{P}_{13}^H \times \underline{R}_{T1} + \underline{Q}_{13}^H \times \underline{X}_{T1})}. \quad (136)$$

4. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ СЕТЕЙ С РАЗНЫМИ НОМИНАЛЬНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ. РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ С ПОМОЩЬЮ ТРАНСФОРМАТОРОВ С РПН И ЛИНЕЙНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

4.1. Определение напряжения на стороне низшего напряжения подстанций

Все рассмотренные способы электрического расчета сетей позволяли определять напряжения на стороне высокого напряжения (ВН) подстанций. Рассмотрим способ расчета напряжения на стороне низкого напряжения (НН) подстанции (см. рис. 32) /2/. На рис. 32 силовой трансформатор представлен в виде двух элементов: первый – сопротивление трансформатора Z_{T1} , второй – идеальный трансформатор. Идеальный трансформатор не имеет сопротивления, но обладает коэффициентом трансформации:

$$n_T = \frac{U_{Вном}}{U_{Нном}}. \quad (131)$$

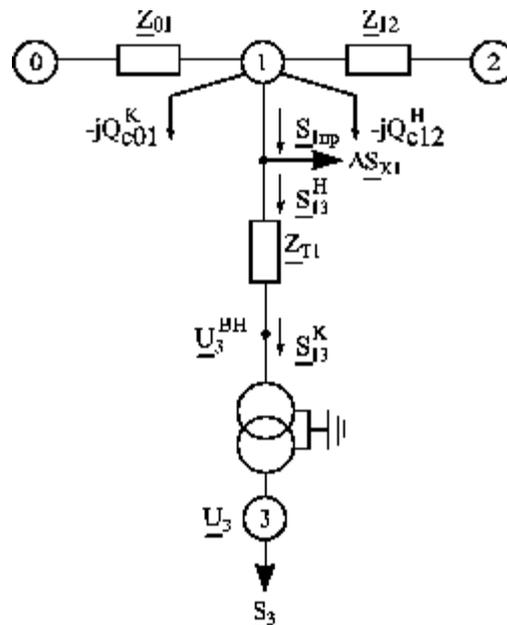


Рис. 32. Схема для определения напряжения на низкой стороне трансформатора

Такое условное разделение силового трансформатора на его сопротивление и идеальный трансформатор применяется, когда совместно рассматриваются сети высшего и низшего напряжений без приведения параметров сети к одному базисному напряжению. Расчет напряжения низкой стороны трансформатора ведется так же, как и напряжения в конце любого сопротивления.

Обозначим приведенное к стороне ВН напряжение на шинах НН - \underline{U}_3^{BH} ; действительное напряжение на шинах НН - \underline{U}_3 . Мощность нагрузки узла 3, \underline{S}_3 , известна. Тогда расчет напряжения на шинах НН подстанции осуществляется в следующем порядке:

определяется мощность, входящая в обмотку ВН силового трансформатора:

$$\underline{S}_{13}^H = \underline{S}_{1np} - D\underline{S}_{X1}, \quad (132)$$

где

$$\underline{S}_{1np} = \underline{S}_3 + D\underline{S}_{T1} + D\underline{S}_{X1}; \quad (133)$$

приведенную нагрузку трансформатора \underline{S}_{1np} можно найти из понятия расчетной нагрузки:

$$\underline{S}_{1np} = \underline{S}_{P1} + j \times \underline{Q}_{c01}^K + j \times \underline{Q}_{c12}^H.$$

По известным напряжению узла \underline{U}_1 и мощности в начале участка \underline{S}_{13}^H легко определить напряжение низкой стороны трансформатора, приведенное к высокой \underline{U}_3^{BH} в конце сопротивления \underline{Z}_{T1} :

$$\underline{U}_3^{BH} = \underline{U}_1 - \frac{\underline{P}_{13}^H \times \underline{R}_{T1} + \underline{Q}_{13}^H \times \underline{X}_{T1}}{\underline{U}_1^*} - j \times \frac{\underline{P}_{13}^H \times \underline{X}_{T1} - \underline{Q}_{13}^H \times \underline{R}_{T1}}{\underline{U}_1^*}. \quad (134)$$

Модуль и фаза этого напряжения равны

$$U_3^{BH} = \sqrt{\frac{\Re \underline{U}_1 - \frac{\underline{P}_{13}^H \times \underline{R}_{T1} + \underline{Q}_{13}^H \times \underline{X}_{T1}}{\underline{U}_1}}{\Im \underline{U}_1} + \frac{\Re \underline{U}_1 - \frac{\underline{P}_{13}^H \times \underline{R}_{T1} + \underline{Q}_{13}^H \times \underline{X}_{T1}}{\underline{U}_1}}{\Im \underline{U}_1}}^2 + \frac{\Im \underline{U}_1 - \frac{\underline{P}_{13}^H \times \underline{X}_{T1} - \underline{Q}_{13}^H \times \underline{R}_{T1}}{\underline{U}_1}}{\Re \underline{U}_1}}^2}; \quad (135)$$

$$\operatorname{tg} j = \frac{\underline{P}_{13}^H \times \underline{X}_{T1} - \underline{Q}_{13}^H \times \underline{R}_{T1}}{\underline{U}_1 - (\underline{P}_{13}^H \times \underline{R}_{T1} + \underline{Q}_{13}^H \times \underline{X}_{T1})}. \quad (136)$$

Чтобы найти действительное напряжение на шинах НН подстанции, т.е. \underline{U}_3 , надо \underline{U}_3^{BH} разделить на коэффициент трансформации n_T :

$$\underline{U}_3 = \frac{\underline{U}_3^{BH}}{n_T} = \underline{U}_3^{BH} \times \frac{U_{Нном}}{U_{Вном}}. \quad (137)$$

4.2. Порядок расчета сети с разными номинальными напряжениями

Рассмотрим последовательность расчета сети с разными номинальными напряжениями на примере сети с двумя номинальными напряжениями $U_{ВН}$, $U_{СН}$ (см. рис. 33). Здесь трехобмоточный трансформатор является трансформатором связи между сетями разного номинального напряжения. На рис. 34 показана схема замещения сети с идеальными трансформаторами.

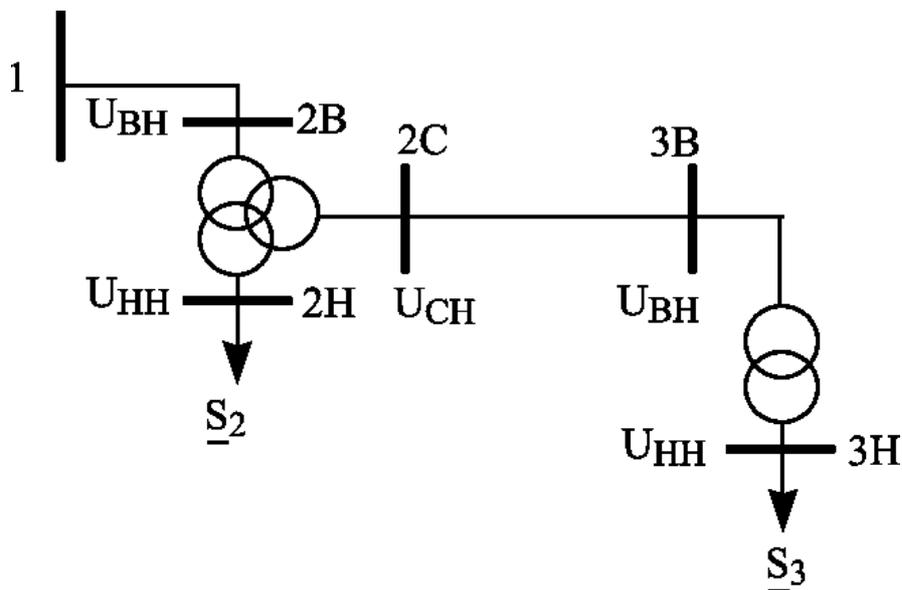


Рис. 33. Схема сети с двумя номинальными напряжениями

Определим приведенные нагрузки узлов \underline{S}_3 и \underline{S}_2 и преобразуем схему замещения к виду, показанному на рис. 35.

На рис. 35 представлен один идеальный силовой трансформатор, соответствующий преобразованию напряжения от высокого к среднему.

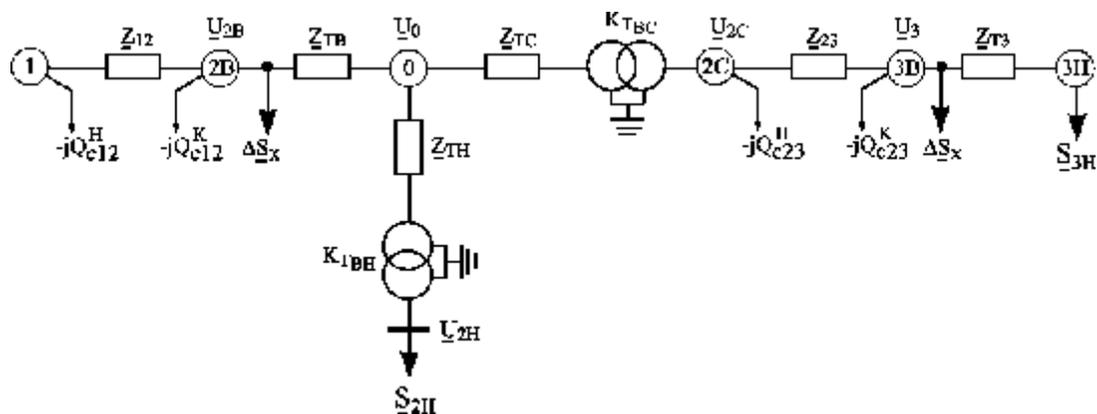


Рис. 34. Схема замещения сети с идеальными трансформаторами

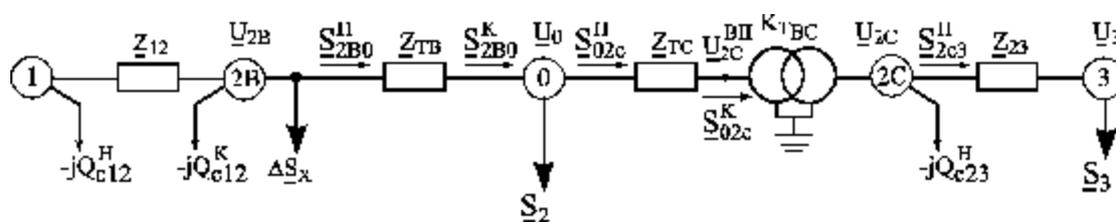


Рис. 35. Преобразованная схема замещения сети

Таким образом, в схеме, приведенной на рис. 35, показаны Z_{TC} – сопротивление обмотки СН трансформатора и идеальный силовой трансформатор, не имеющий сопротивления, но обладающий коэффициентом трансформации:

$$K_{TBC} = \frac{U_{BH}}{U_{CH}}. \quad (138)$$

В узле 3 приведена расчетная нагрузка.

Расчет сети с разными номинальными напряжениями можно проводить двумя способами.

Первый способ – приведение сети к одному базисному напряжению.

При этом рассчитывается режим сети, схема замещения которой показана на рис.36, где отсутствуют идеальные трансформаторы, но сопротивление линии 23 приведено к высокой стороне, т.е. к U_{BH} .

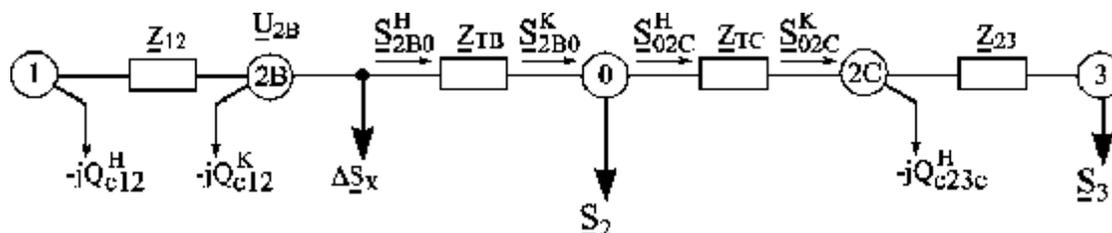


Рис. 36. Схема замещения

Приведение к ВН сопротивления осуществляется по следующему выражению:

$$\underline{Z}_{23}^B = \underline{Z}_{23} \times K_{TBC}^2 = \underline{Z}_{23} \times \frac{U_{BH}^2}{U_{CH}^2}. \quad (139)$$

Аналогично для проводимости: $\underline{Y}_{23}^B = \underline{Y}_{23} \times \frac{I}{K_{TBC}^2}$.

Этот способ часто используется при расчете токов короткого замыкания и редко - при расчете установившихся режимов электрических сетей и систем.

Второй способ – учет идеальных трансформаторов, т.е. коэффициентов трансформации при определении напряжения.

Последовательность расчета режима сети по данным конца

1. Ведется расчет режима разомкнутой сети среднего напряжения по значениям напряжения \underline{U}_3 (участок 2С-3). Определяется напряжение на шинах СН трансформатора 2 \underline{U}_{2C} (см. рис. 35).

2. Напряжение \underline{U}_{2C} приводится к высокой стороне:

$$\underline{U}_{2C}^{BH} = K_{Tbc} \times \underline{U}_{2C}, \quad (140)$$

а потоки мощности до и после идеального трансформатора равны между собой.

$$\underline{S}_{02c}^K = \underline{S}_{2c3}^H. \quad (141)$$

3. Дальнейший расчет ведется по алгоритму расчета режима разомкнутой сети на высокой стороне силового трансформатора, т.е. при известном напряжении в конце сети \underline{U}_{2c}^{BH} .

Последовательность расчета режима сети по данным начала

I этап – определение потоков мощности с учетом потерь сначала в сети СН, затем в сети ВН – так же, как для сети с одним номинальным напряжением, вплоть до определения потоков мощности в началах головных участков сети ВН. При этом потери мощности в сети СН

определяются по номинальному напряжению сети СН, а в сети ВН - по номинальному напряжению сети ВН.

II этап – определение напряжений в узлах сети ВН по заданному напряжению источника питания и рассчитанным потокам мощности в начале каждого участка сети.

Определяется напряжение в нулевой точке трансформатора U_0 :

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_{2B} - \underline{U}_{D2B0}, \quad (142)$$

где \underline{U}_{D2B0} – падение напряжения в обмотке ВН трансформатора.

$$\underline{U}_{D2B0} = \frac{P_{2B0}^H \times R_{TB} + Q_{2B0}^H \times X_{TB}}{U_{2B}} + j \frac{P_{2B0}^H \times X_{TB} - Q_{2B0}^H \times R_{TB}}{U_{2B}}.$$

Затем рассчитывается напряжение средней стороны, приведенное к высокой стороне

$$\underline{U}_{2C}^{BH} = \underline{U}_0 - \underline{U}_{D02C}, \quad (143)$$

где \underline{U}_{D02C} – падение напряжения в обмотке СН трансформатора.

$$\underline{U}_{D02C} = \frac{P_{02C}^H \times R_{TC} + Q_{02C}^H \times X_{TC}}{U_0} + j \frac{P_{02C}^H \times X_{TC} - Q_{02C}^H \times R_{TC}}{U_0}.$$

После этого находится действительное напряжение средней стороны силового трансформатора.

$$U_{2C} = \frac{U_{2C}^{BH}}{K_{TBC}} = U_{2C}^{BH} \times \frac{U_{CH}}{U_{BH}}. \quad (144)$$

Затем рассчитываются напряжения в узлах сети среднего напряжения по значению \underline{U}_{2C} как напряжения источника питания.

Если в сети есть несколько различных трансформаторов связи, то коэффициенты трансформации учитываются аналогичным образом.

При расчетах установившихся режимов сложных электрических сетей и систем на ЭВМ для расчета сетей с различными номинальными напряжениями используются уравнения узловых напряжений, учитывающие наличие в сети трансформаторов связи.

4.3. Понятие о регулировании напряжения в сети. Выбор ответвлений РПН трансформаторов и линейных регуляторов

Под регулированием напряжения понимают принудительное изменение режима напряжения в сети и у электроприемников с целью обеспечить требования ГОСТ 13109-97 или оптимальный режим по напряжению.

Регулирование напряжения может осуществляться:

изменением напряжения у источника питания, – например, изменением коэффициента трансформации силового трансформатора под нагрузкой (РПН) либо со снятием нагрузки (ПБВ) или с помощью линейного регулятора;

изменением величины реактивной мощности, протекающей по сети (поперечная компенсация реактивной мощности);

изменением реактивного сопротивления сети (продольная компенсация реактивной мощности).

Для обеспечения необходимых режимов напряжения во всей распределительной сети должны выбираться централизованные средства регулирования напряжения, к которым относятся трансформаторы с РПН и линейные регуляторы, устанавливаемые в центрах питания. Если регулирование напряжения в центре питания не обеспечивает необходимого уровня напряжения, то используют способы местного (локального) регулирования напряжения (изменение коэффициента трансформации цеховых трансформаторов, установки продольной компенсации, батареи конденсаторов поперечной компенсации и т. д.)

Для определения добавки напряжения, создаваемой трансформатором с РПН (линейным регулятором), необходимо выбрать

нужное напряжение ответвлений (отпаяк) РПН трансформатора или линейного регулятора.

Рассмотрим алгоритм выбора номера ответвлений (отпаяк) РПН, установленных на различного типа трансформаторах и автотрансформаторах, а также линейных регуляторов.

Двухобмоточный силовой трансформатор (устройство РПН установлено на стороне ВН)

1. Определение приведенного к стороне ВН напряжения стороны НН силового трансформатора

$$U_{НН}^{ВН} = U_{ВН} - DU_T, \quad (145)$$

где $U_{ВН}$ - фактическое напряжение на стороне ВН, полученное в результате расчета режима сети высокого напряжения;

DU_T – модуль падения напряжения в силовом трансформаторе.

2. Определение желаемого коэффициента трансформации

$$K_{ТВН}^{жел} = \frac{U_{НН}^{ВН}}{U_{НН}^{жел}}, \quad (146)$$

где $U_{НН}^{жел}$ - желаемое напряжение на стороне НН силового трансформатора.

3. Выбор номера отпайки РПН.

Условием выбора номера отпайки РПН является его попадание в диапазон регулирования напряжения, т.е.

$$- N \leq n \leq +N, \quad (147)$$

где $\pm N$ - крайние номера отпаяк РПН (даются в справочниках, – например, $\pm 9 \sim 1,78 \%$);

n - номер отпайки.

Шаг регулирования t задается в процентах, – например, 1,78%.

Диапазон регулирования напряжения равен:

$$\pm N \times t, \quad (148)$$

например, $\pm 16\%$.

Действительный коэффициент трансформации определяется выражением:

$$K = \frac{U_{ВН}^{ном}}{U_{НН}^{ном}} \times (1 + n \times t_*) = K_{ТВН}^{ном} \times (1 + n \times t_*), \quad (149)$$

где t_* - шаг регулирования в относительных единицах.

Если в качестве желаемого принять действительный коэффициент трансформации, т.е.:

$$K_{ТВН}^{жел} = K_{ТВН}^{ном} \times (1 + n_{жел} \times t_*), \quad (150)$$

то из (150) можно найти желаемый номер отпайки РПН для обеспечения требуемого значения напряжения на низкой стороне трансформатора:

$$n_{жел} = \frac{\frac{K_{ТВН}^{жел}}{K_{ТВН}^{ном}} - 1}{t_*} = \frac{\frac{U_{НН}^{ВН}}{U_{НН}^{жел} \times K_{ТВН}^{ном}} - 1}{t_*}. \quad (151)$$

Полученный номер отпайки округляется до ближайшего целого, $n_{станд}$.

По найденному $n_{станд}$ определяется фактическое напряжение низкой стороны $U_{НН}^{факт}$:

$$U_{НН}^{факт} = \frac{U_{НН}^{ВН}}{K_{ТВН}^{ном} \times (1 + n_{станд} \times t_*)}. \quad (152)$$

Трехобмоточный силовой трансформатор

В трехобмоточном силовом трансформаторе регулирование напряжения под нагрузкой выполняется в обмотке высшего напряжения (РПН устанавливается в нейтрали обмотки ВН), а обмотка среднего напряжения содержит ответвления, которые переключаются после снятия нагрузки (устройство ПБВ – переключение без возбуждения, установлено в обмотке СН). Поэтому сначала необходимо выбрать номер отпайки РПН, чтобы обеспечить желаемое напряжение на низшей стороне

трансформатора, а затем рассчитывать ответвление ПБВ для обеспечения желаемого значения на средней стороне трансформатора.

Действительные коэффициенты трансформации равны:

$$K_{ТВН} = K_{ТВН}^{ном} \times (1 + n_p \times t_{p*}), \quad (153)$$

$$K_{ТВС} = K_{ТВС}^{ном} \times \frac{1 + n_p \times t_{p*}}{1 + n_n \times t_{n*}}, \quad (154)$$

где n_p, t_{p*} - номер отпайки и шаг регулирования устройства РПН в относительных единицах;

n_n, t_{n*} - номер отпайки и шаг регулирования устройства ПБВ в относительных единицах.

Порядок выбора

Определяется напряжение низшей стороны трансформатора, приведенное к стороне высшего напряжения:

$$U_{НН}^{ВН} = U_{ВН} - DU_{ТВ} - DU_{ТН}, \quad (155)$$

где $U_{ВН}$ – фактическое напряжение высокой стороны трансформатора, полученное в результате расчета режима сети высшего напряжения;

$DU_{ТВ}, DU_{ТН}$ – соответственно модули падения напряжения в обмотке ВН и обмотке НН силового трансформатора.

Рассчитывается напряжение средней стороны трансформатора, приведенное к стороне высшего напряжения:

$$U_{СН}^{ВН} = U_{ВН} - DU_{ТВ} - DU_{ТС}, \quad (156)$$

где $DU_{ТС}$ – модуль падения напряжения в обмотке СН трансформатора.

Определяются желаемые коэффициенты трансформации напряжения с высокой на низкую и с высокой на среднюю стороны трансформатора.

$$K_{ТВН}^{жсел} = \frac{U_{НН}^{ВН}}{U_{НН}^{жсел}}; \quad K_{ТВС}^{жсел} = \frac{U_{СН}^{ВН}}{U_{СН}^{жсел}}, \quad (157)$$

где $U_{НН}^{жсел}$, $U_{СН}^{жсел}$ – соответственно желаемые напряжения низкой и средней сторон трансформатора.

Выбирается номер отпайки РПН, $n_p^{жсел}$, со стороны высшего напряжения, обеспечивающий желаемое напряжение на шинах НН (трансформатор рассматривается как двухобмоточный с обмотками высшего и низшего напряжения), из выражения (153):

$$n_p^{жсел} = \frac{\alpha K_{ТВН}^{жсел}}{\xi K_{ТВН}^{ном}} - I_{\div} \times \frac{I}{t_{p^*}} = \frac{\alpha U_{НН}^{ВН}}{\xi U_{НН}^{жсел} \times K_{ТВН}^{ном}} - I_{\div} \times \frac{I}{t_{p^*}}. \quad (158)$$

Полученный номер округляется до ближайшего целого $n_p^{станд}$.

Выбирается номер ответвления ПБВ, $n_n^{жсел}$, со стороны среднего напряжения, обеспечивающий желаемое напряжение на средней стороне трансформатора, из выражения (154):

$$\begin{aligned} n_n^{жсел} &= \frac{\alpha K_{ТВС}^{ном} \times (1 + n_p^{станд} \times t_{p^*})}{\xi K_{ТВС}^{жсел}} - I_{\div} \times \frac{I}{t_{n^*}} = \\ &= \frac{\alpha K_{ТВС}^{ном} \times (1 + n_p^{станд} \times t_{p^*}) \times U_{СН}^{жсел}}{\xi U_{СН}^{ВН}} - I_{\div} \times \frac{I}{t_{n^*}}. \end{aligned} \quad (159)$$

Полученный номер округляется до ближайшего целого $n_n^{станд}$.

Рассчитываются действительные значения напряжения на шинах низшего и среднего напряжения:

$$U_{НН}^{факт} = \frac{U_{НН}^{ВН}}{K_{ТВН}^{ном} \times (1 + n_p^{станд} \times t_{p^*})}, \quad (160)$$

$$U_{СН}^{факт} = \frac{U_{СН}^{ВН} \times (1 + n_n^{станд} \times t_{n^*})}{K_{ТВС}^{ном} \times (1 + n_p^{станд} \times t_{p^*})}. \quad (161)$$

Если для обеспечения желаемого напряжения на средней стороне трансформатора не хватает диапазона регулирования устройства ПБВ, то

со стороны обмотки среднего напряжения устанавливается линейный регулятор (вольтодобавочный трансформатор). Номер ответвления линейного регулятора в этом случае определяют по формуле:

$$n_{ЛР}^{жел} = \frac{U_{СН}^{жел} - U_{СН}^{факт}}{U_{ЛР}^{ном}} \cdot \frac{1}{t_{ЛР}^*}, \quad (162)$$

где $t_{ЛР}^*$ - шаг (ступень) регулирования линейного регулятора в относительных единицах.

$U_{ЛР}^{ном}$ - номинальное напряжение линейного регулятора.

Рассчитанный номер ответвления линейного регулятора округляется до ближайшего целого, $n_{ЛР}^{станд}$.

Мощность линейного регулятора выбирается по мощности нагрузки, подключаемой к шинам СН.

Действительное значение напряжения на шинах СН при установке линейного регулятора равно:

$$U_{СН}^{действ} = U_{СН}^{факт} + n_{ЛР}^{станд} \times t_{ЛР}^* \times U_{ЛР}^{ном}, \quad (163)$$

где $U_{СН}^{факт}$ - определяется по выражению (161);

Автотрансформаторы

Автотрансформаторы могут иметь устройство регулирования напряжения под нагрузкой в нейтрали или со стороны среднего либо со стороны высшего напряжения (см. рис. 37). В автотрансформаторах регулирование напряжения во всех случаях осуществляется только на средней стороне. Чтобы получить желаемое напряжение на стороне НН автотрансформатора, нужно установить линейный регулятор со стороны низкого напряжения либо включить его в нейтраль автотрансформатора.

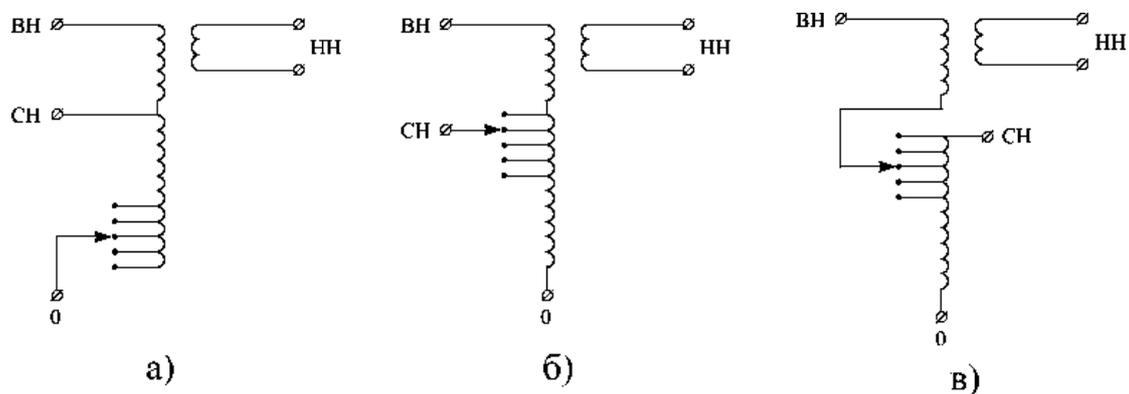


Рис. 37. Расположение устройства РПН в автотрансформаторе:

а) устройство РПН расположено в нейтрали

б) устройство РПН расположено в обмотке СН

в) устройство РПН расположено в обмотке ВН

Номинальные коэффициенты автотрансформатора равны:

$$K_{BC}^{ном} = \frac{U_{ВН}^{ном}}{U_{СН}^{ном}}; \quad K_{ВН}^{ном} = \frac{U_{ВН}^{ном}}{U_{НН}^{ном}} = const, \quad (164)$$

т.е. коэффициент трансформации напряжения с высшей стороны на низшую не регулируется.

Рассмотрим различные случаи регулирования напряжения под нагрузкой в автотрансформаторе.

Устройство РПН установлено в обмотке СН автотрансформатора.

В этом случае действительный коэффициент трансформации напряжения с высшей стороны автотрансформатора на среднюю равен:

$$K_{BC}^{факт} = \frac{U_{ВН}^{ном}}{U_{СН}^{ном} \times (1 + n_p \times t_{p^*})} = \frac{K_{BC}^{ном}}{1 + n_p \times t_{p^*}}. \quad (165)$$

Номер отпайки РПН автотрансформатора выбирается с целью обеспечения желаемого напряжения средней стороны автотрансформатора по следующему алгоритму:

определяются напряжения средней и низкой сторон, приведенные к высшей стороне автотрансформатора, по выражениям (155), (156);

выбирается желаемый номер отпайки РПН из выражения (165):

$$n_{жсл} = \frac{\frac{\alpha K_{BC}^{ном}}{\xi K_{BC}^{жсл}} - I \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \times \frac{1}{t_{p*}}}{\frac{\alpha K_{BC}^{ном} \times U_{CH}^{жсл}}{U_{CH}^{ВН}} - I \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \times \frac{1}{t_{p*}}}; \quad (166)$$

номер отпайки РПН округляется до ближайшего целого, $n_{станд}$;

определяются действительные уровни напряжения средней и низшей сторон автотрансформатора:

$$U_{CH}^{факт} = \frac{U_{CH}^{ВН}}{K_{BC}^{факт}} = \frac{U_{CH}^{ВН} \times (1 + n_{станд} \times t_{p*})}{K_{BC}^{ном}}; \quad (167)$$

$$U_{НН}^{факт} = \frac{U_{НН}^{ВН}}{K_{ВН}^{ном}}. \quad (168)$$

Если действительное значение напряжения не удовлетворяет желаемому, то со стороны низшего напряжения автотрансформатора устанавливается линейный регулятор (рис. 38), номер ответвления которого определяется по формуле:

$$n_{ЛР} = \frac{\frac{\alpha U_{НН}^{жсл}}{\xi U_{НН}^{факт}} - I \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \times \frac{1}{t_{ЛР*}}}{\dots} \quad (169)$$

и округляется до ближайшего целого, $n_{ЛР}^{станд}$.

Тогда действительное напряжение на шинах НН равно:

$$U_{НН}^{факт} = U_{НН}^{расч} + n_{ЛР}^{станд} \times U_{ЛР}^{ном} \times t_{ЛР*}, \quad (170)$$

где

$$U_{НН}^{расч} = \frac{U_{НН}^{ВН}}{K_{ВН}^{ном}}. \quad (171)$$

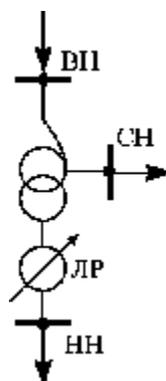


Рис. 38. Установка линейного регулятора со стороны НН автотрансформатора

Устройство РПН установлено в обмотке СН автотрансформатора, линейный регулятор – в нейтрали обмотки ВН автотрансформатора.

Добавочная ЭДС линейного регулятора в относительных единицах De_{LP*} , необходимая для обеспечения желаемого напряжения на стороне НН автотрансформатора, определяется из соотношения:

$$U_{НН}^{ж\text{ел}} = \frac{U_{НН}^{ВН}}{K_{ВН}^{ном} (1 + De_{LP*})} = \frac{U_{НН}^{ВН}}{K_{ВН}^{ном} (1 + n_{LP} \times t_{LP*})}. \quad (172)$$

Отсюда желаемый номер ответвления линейного регулятора равен:

$$n_{LP}^{ж\text{ел}} = \frac{\alpha K_{ВН}^{ж\text{ел}}}{\xi K_{ВН}^{ном}} - I \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \frac{1}{t_{LP*}}. \quad (173)$$

Округляем расчетное значение до ближайшего целого, $n_{LP}^{станд}$, и определяем фактическое напряжение низкой стороны

$$U_{НН}^{факт} = \frac{U_{НН}^{ВН}}{K_{ВН}^{ном} (1 + n_{LP} \times t_{LP*})} = \frac{U_{НН}^{ВН} \times U_{НН}^{ном}}{U_{ВН}^{ном} (1 + n_{LP} \times t_{LP*})}, \quad (174)$$

где $U_{НН}^{ВН}$ определяется по выражению (155).

Номер отпайки РПН выбирается из выражения для определения действительного коэффициента трансформации высшего напряжения в среднем:

$$K_{ВС} = K_{ВС}^{ном} \frac{1 + n_p \times t_{p*}}{1 + n_{LP} \times t_{LP*}}, \quad (175)$$

откуда

$$\begin{aligned} n_p^{ж\text{ел}} &= \frac{\alpha K_{ВС}^{ном} (1 + n_{LP}^{станд} \times t_{LP*})}{\xi K_{ВС}^{ж\text{ел}}} - I \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \frac{1}{t_{p*}} = \\ &= \frac{\alpha K_{ВС}^{ном} (1 + n_{LP}^{станд} \times t_{LP*}) \times U_{СН}^{ж\text{ел}}}{\xi U_{СН}^{ВН}} - I \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \frac{1}{t_{p*}}, \end{aligned} \quad (176)$$

где $U_{СН}^{ВН}$ определяется по выражению (156).

Полученный номер ответвления округляется до ближайшего целого, $n_p^{станд}$. Рассчитывается действительное значение напряжения на средней стороне автотрансформатора:

$$U_{СН}^{факт} = \frac{U_{СН}^{ВН} \times (1 + n_p^{станд} \times t_{p*})}{K_{ВС}^{ном} \times (1 + n_{LP} \times t_{LP*})}. \quad (177)$$

Устройство РПН установлено в нейтрали автотрансформатора.

Действительный коэффициент трансформации между высшим и средним напряжением равен:

$$K_{BC} = \frac{U_{BH}^{ном} \times (1 + n_p \times t_{p^*})}{U_{CH}^{ном} + n_p \times t_{p^*} \times U_{BH}^{ном}} = \frac{K_{BC}^{ном} \times (1 + n_p \times t_{p^*})}{1 + n_p \times t_{p^*} \times K_{BC}^{ном}}. \quad (178)$$

Чтобы выбрать номер отпайки РПН, обеспечивающий желаемое напряжение средней стороны, необходимо по выражению (156) определить напряжение средней стороны, приведенное к высшей, U_{CH}^{BH} , затем вычислить желаемый коэффициент трансформации между высшим и средним напряжением по выражению (157).

Номер отпайки РПН определяется из выражения для действительного коэффициента трансформации (178):

$$n_p^{жел} = \frac{1 - \frac{K_{BC}^{жел}}{K_{BC}^{ном}}}{\left(\frac{K_{BC}^{жел}}{K_{BC}^{ном}} - 1 \right) \times t_{p^*}}. \quad (179)$$

Найденный номер отпайки РПН округляется до ближайшего целого $n_p^{станд}$ и по нему рассчитывается напряжение средней стороны автотрансформатора:

$$U_{CH}^{факт} = \frac{U_{CH}^{BH} \times \frac{1}{K_{BC}^{ном}} + n_p^{станд} \times t_{p^*}}{1 + n_p^{станд} \times t_{p^*}}. \quad (180)$$

Действительное напряжение на шинах НН в этом случае равно:

$$U_{HH}^{факт} = \frac{U_{HH}^{BH}}{K_{BH}^{ном} \times (1 + n_p^{станд} \times t_{p^*})}. \quad (181)$$

Если действительное значение напряжения низкой стороны автотрансформатора не соответствует желаемому, то со стороны обмотки НН устанавливается линейный регулятор, номер ответвления которого рассчитывается по формуле (169).

Действительное напряжение на шинах НН при установке линейного регулятора равно:

$$U_{\text{НН}}^{\text{действ}} = U_{\text{НН}}^{\text{факт}} \left(1 + n_{\text{ЛР}}^{\text{станд}} \times t_{\text{ЛР}^*} \right), \quad (182)$$

где $U_{\text{НН}}^{\text{факт}}$ определяется по выражению (181).

Устройство РПН установлено в обмотке ВН автотрансформатора.

Действительный коэффициент трансформации между высшим и средним напряжением равен:

$$K_{\text{ВС}} = \frac{U_{\text{ВН}}^{\text{ном}} \times \left(1 + n_p \times t_{p^*} \right)}{U_{\text{СН}}^{\text{ном}}} = K_{\text{ВС}}^{\text{ном}} \left(1 + n_p \times t_{p^*} \right). \quad (183)$$

Отсюда можно определить номер отпайки РПН, обеспечивающий желаемое напряжение на средней стороне:

$$n_p^{\text{жел}} = \frac{\alpha K_{\text{ВС}}^{\text{жел}}}{\xi K_{\text{ВС}}^{\text{ном}}} - \frac{\ddot{0} I}{\ddot{0} t_{p^*}}, \quad (184)$$

где $K_{\text{ВС}}^{\text{жел}}$ определяется по выражению (157).

При округлении его до ближайшего целого, $n_p^{\text{станд}}$, действительное напряжение на шинах СН определяется как

$$U_{\text{СН}}^{\text{факт}} = \frac{U_{\text{СН}}^{\text{ВН}}}{K_{\text{ВС}}^{\text{ном}} \times \left(1 + n_p^{\text{станд}} \times t_{p^*} \right)}. \quad (185)$$

Действительное напряжение на шинах НН равно

$$U_{\text{НН}}^{\text{факт}} = \frac{U_{\text{НН}}^{\text{ВН}}}{K_{\text{ВН}}^{\text{ном}} \times \left(1 + n_p^{\text{станд}} \times t_{p^*} \right)}. \quad (186)$$

Если действительное напряжение на шинах НН не соответствует желаемому, со стороны НН устанавливается линейный регулятор, номер ответвления которого определяется по выражению:

$$n_{\text{ЛР}}^{\text{жел}} = \frac{\alpha U_{\text{НН}}^{\text{жел}} - U_{\text{НН}}^{\text{факт}}}{\xi U_{\text{ЛР}}^{\text{ном}}} \times \frac{\ddot{0} I}{\ddot{0} t_{\text{ЛР}^*}}, \quad (187)$$

а действительное напряжение на шинах НН после установки линейного регулятора - по выражению:

$$U_{\text{НН}}^{\text{действ}} = U_{\text{НН}}^{\text{факт}} + n_{\text{ЛР}}^{\text{станд}} \times t_{\text{ЛР}^*} \times U_{\text{ЛР}}^{\text{ном}}. \quad (188)$$

Таким образом, рассмотрены все возможные случаи установки РПН в автотрансформаторе в сочетании с линейным регулятором для обеспечения желаемых напряжений на сторонах СН и НН.

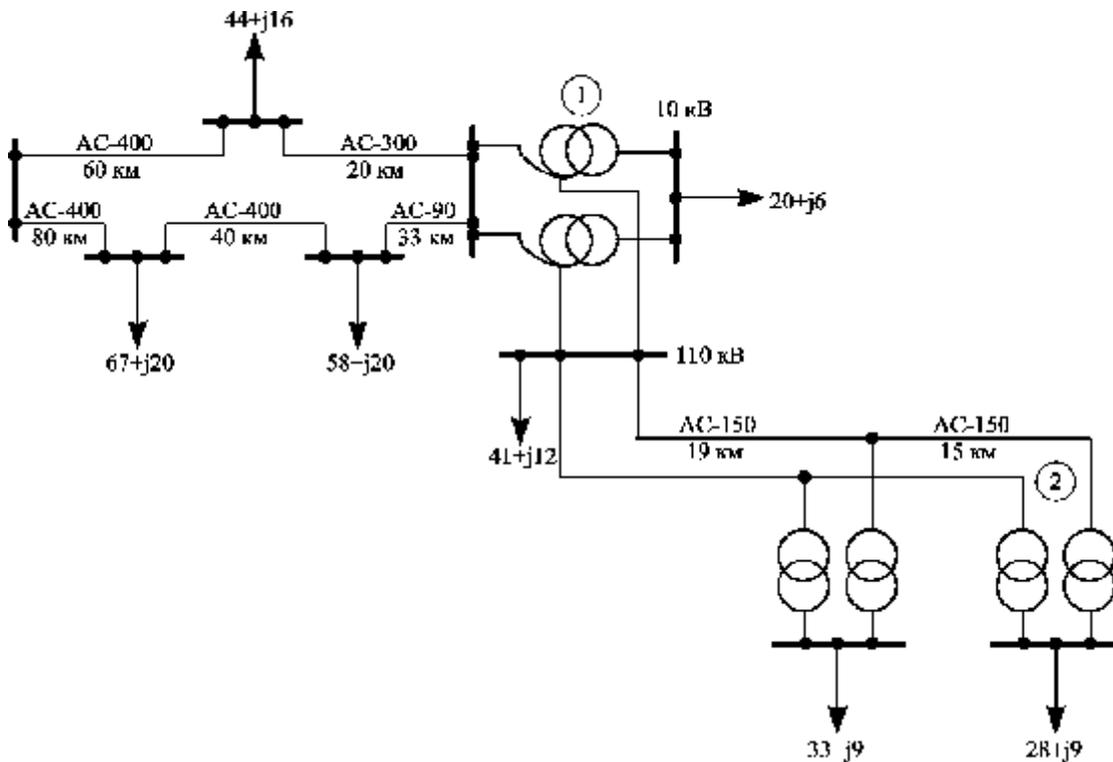
Примеры решения задач

Листинг

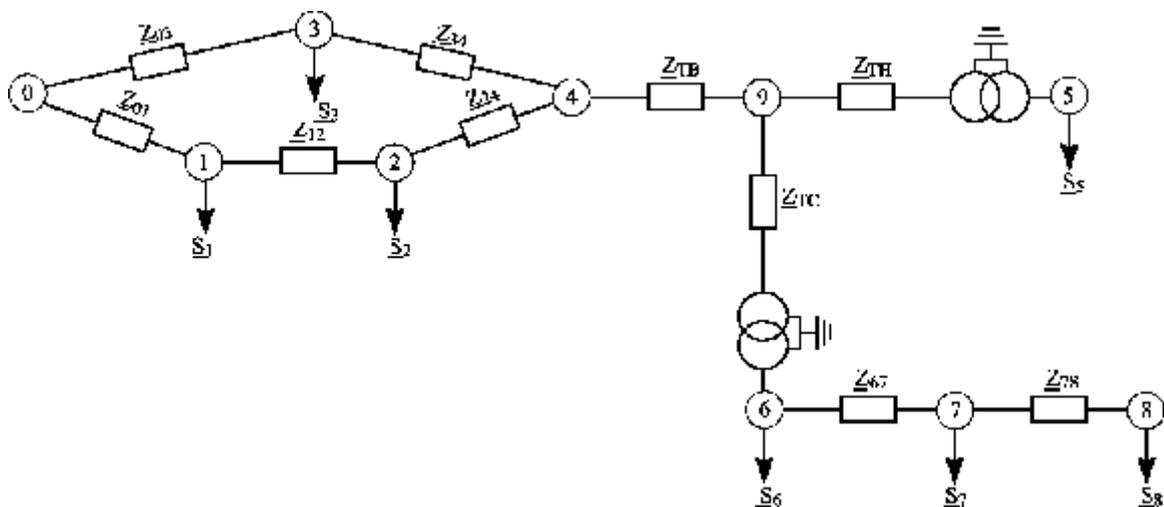
расчета примеров по разделу 4 в программе MathCad фирмы MathSoft

Пример 4.1.

Рассчитать установившийся режим в сети двух напряжений 220 и 110 кВ. Выбрать номера отпаяк РПН для обеспечения напряжения на шинах подстанций: первой - 116 кВ и 10,3 кВ; второй - 10,1 кВ. Напряжение источника питания равно 238 кВ.



Составляем схему замещения, в которой показаны расчетные нагрузки узлов.



Определяем параметры схемы замещения.

Находим сопротивления и зарядные мощности линий:

$$Z_{01} := 6 + 33.6j \text{ Ом}; \quad Z_{03} := 4.5 + 25.2j \text{ Ом}; \quad Z_{12} := 3 + 16.8j \text{ Ом};$$

$$Z_{24} := 2.475 + 13.86j \text{ Ом}; \quad Z_{34} := 1.96 + 8.58j \text{ Ом}; \quad Z_{76} := 1.881 + 9.99j \text{ Ом};$$

$$Z_{78} := 1.485 + 3.15j \text{ Ом}.$$

$$Q_{c01} := \frac{1}{2} \cdot 220^2 \cdot 2.7 \cdot 10^{-6} \cdot 80 \qquad Q_{c01} = 5.227 \text{ Мвар}$$

$$Q_{c03} := \frac{1}{2} \cdot 220^2 \cdot 2.7 \cdot 10^{-6} \cdot 60 \qquad Q_{c03} = 3.92 \text{ Мвар}$$

$$Q_{c12} := \frac{1}{2} \cdot 220^2 \cdot 2.7 \cdot 10^{-6} \cdot 40 \qquad Q_{c12} = 2.614 \text{ Мвар}$$

$$Q_{c24} := \frac{1}{2} \cdot 220^2 \cdot 2.7 \cdot 10^{-6} \cdot 33 \qquad Q_{c24} = 2.156 \text{ Мвар}$$

$$Q_{c34} := \frac{1}{2} \cdot 220^2 \cdot 2.64 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \qquad Q_{c34} = 1.278 \text{ Мвар}$$

$$Q_{c67} := 220^2 \cdot 2.7 \cdot 10^{-6} \cdot 19 \qquad Q_{c67} = 2.483 \text{ Мвар}$$

$$Q_{c78} := 220^2 \cdot 2.7 \cdot 10^{-6} \cdot 15 \qquad Q_{c78} = 1.96 \text{ Мвар}$$

Заданные мощности нагрузок и напряжение источника питания:

$$S_1 := 67 + 20j \text{ МВА}; \quad S_2 := 58 + 20j \text{ МВА}; \quad S_3 := 44 + 16j \text{ МВА};$$

$$S_5 := 20 + 6j \text{ МВА}; \quad S_6 := 41 + 12j \text{ МВА}; \quad S_7 := 33 + 9j \text{ МВА};$$

$$S_8 := 28 + 9j \text{ МВА}.$$

$$U_0 := 238 \text{ кВ}.$$

Выбираем трансформаторы для узлов 7 и 8.

Определяем расчетную мощность трансформатора

$$S_p = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{N_T \cdot \kappa_3},$$

где N_m - число трансформаторов,

κ_3 - коэффициент загрузки.

$$S_{r8} := \frac{\sqrt{28^2 + 9^2}}{2 \cdot 0.7} \quad S_{r8} = 21.008 \text{ МВА.}$$

Выбираем трансформатор ТРДН-25000/110, работающий как двухобмоточный трансформатор.

$$S_{r7} := \frac{\sqrt{33^2 + 9^2}}{2 \cdot 0.7} \quad S_{r7} = 24.432 \text{ МВА.}$$

Выбираем трансформатор ТРДН-25000/110.

Параметры схемы замещения трансформатора: мощность холостого хода и сопротивление / 5 /.

$$S_{hh} := 0.027 + 0.175j \text{ МВА}; \quad Z_{tr} := 2.54 + 55.9j \text{ Ом.}$$

Находим потери мощности в трансформаторах и расчетные нагрузки узлов 7 и 8.

$$D S_{tr8} := \frac{\operatorname{Re}\left(\frac{S_8}{2}\right)^2 + \operatorname{Im}\left(\frac{S_8}{2}\right)^2}{110^2} \cdot Z_{tr} \quad D S_{tr8} = 0.045 + 0.999i \text{ МВА}$$

$$S_{pr8} := S_8 + (D S_{tr8} + S_{hh}) \cdot 2$$

$$S_{pr8} = 28.145 + 11.348i \text{ МВА}$$

$$S_{8r} := S_8 + (D S_{tr8} + S_{hh}) \cdot 2 - j \cdot Q_{c78} \quad S_{8r} = 28.145 + 9.388i \text{ МВА}$$

$$D S_{tr7} := \frac{\operatorname{Re}\left(\frac{S_7}{2}\right)^2 + \operatorname{Im}\left(\frac{S_7}{2}\right)^2}{110^2} \cdot Z_{tr} \quad D S_{tr7} = 0.061 + 1.351i \text{ МВА}$$

$$S_{7r} := S_7 + (D S_{tr7} + S_{hh}) \cdot 2 - j \cdot (Q_{c78} + Q_{c67}) \quad S_{7r} = 33.177 + 7.609i \text{ МВА}$$

Рассчитываем потокораспределение в разомкнутой сети 6-7-8 номинального напряжения 110 кВ, начиная с дальнего участка.

$$D S_{78} := \frac{\operatorname{Re}(S_{8r})^2 + \operatorname{Im}(S_{8r})^2}{110^2} \cdot Z_{78} \quad D S_{78} = 0.108 + 0.229i \text{ МВА}$$

$$S_{78n} := S_{8r} + D S_{78} \quad S_{78n} = 28.253 + 9.617i \text{ МВА}$$

$$S_{67k} := S_{78n} + S_{7r} \quad S_{67k} = 61.43 + 17.227i \quad \text{MBA}$$

$$D S_{67} := \frac{\operatorname{Re}(S_{67k})^2 + \operatorname{Im}(S_{67k})^2}{110^2} \cdot Z_{76} \quad D S_{67} = 0.633 + 3.361i \quad \text{MBA}$$

$$S_{67n} := S_{67k} + D S_{67} \quad S_{67n} = 62.062 + 20.587i \quad \text{MBA}$$

$$S_{6n} := S_{67k} + D S_{67} + S_6 - j \cdot Q_{c67} \quad S_{6n} = 103.062 + 30.104i \quad \text{MBA}$$

Выбираем автотрансформатор и определяем параметры его схемы замещения.

$$S_{\text{rat}} := \frac{\sqrt{(\operatorname{Re}(S_{6n}) + \operatorname{Re}(S_5))^2 + (\operatorname{Im}(S_{6n}) + \operatorname{Im}(S_5))^2}}{0.7 \cdot 2} \quad S_{\text{rat}} = 91.607 \quad \text{MBA}$$

Выбираем автотрансформатор АТДЦТН-125000/220/110.

Сопротивление обмоток автотрансформатора и потери мощности холостого хода.

$$Z_{tv} := 0.5 + 48.6j \quad \text{Ом} \quad Z_{ts} := 0.5 \quad \text{Ом} \quad Z_{tn} := 1 + 82.5j \quad \text{Ом}$$

$$D Shh2 := 0.085 + 0.625j \quad \text{MBA}$$

Определяем потери мощности в обмотках среднего и низкого напряжения автотрансформатора.

$$D S_{69} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{6n})^2 + \operatorname{Im}(S_{6n})^2)}{220^2} \cdot \frac{1}{2} \cdot Z_{ts} \quad D S_{69} = 0.061 \quad \text{MBA}$$

$$D S_{59} := \frac{(\operatorname{Re}(S_5)^2 + \operatorname{Im}(S_5)^2)}{220^2} \cdot \frac{1}{2} \cdot Z_{tn} \quad D S_{59} = 4.504 \cdot 10^{-3} + 0.372i \quad \text{MBA}$$

Рассчитываем потоки мощности, втекающие в обмотки НН и СН.

$$S_{59n} := S_5 + D S_{59} \quad S_{59n} = 20.005 + 6.372i \quad \text{MBA}$$

$$S_{69n} := S_{6n} + D S_{69} \quad S_{69n} = 103.122 + 30.104i \quad \text{MBA}$$

Определяем мощность, вытекающую из обмотки высокого напряжения автотрансформатора.

$$S_{49k} := S_{6n} + D S_{69} + S_5 + D S_{59} \quad S_{49k} = 123.127 + 36.476i \quad \text{MBA}$$

Потери мощности в обмотке ВН.

$$D S_{49} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{49k})^2 + \operatorname{Im}(S_{49k})^2)}{220^2} \cdot \frac{1}{2} \cdot Z_{tv} \quad D S_{49} = 0.085 + 8.279i \quad \text{MBA}$$

Находим расчетные мощности нагрузок узлов 1, 2, 3, 4.

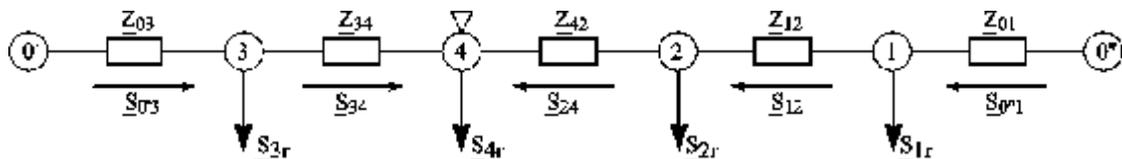
$$S_{4r} := S_{49k} + D S_{49} + 2 \cdot D S_{hh2} - j \cdot (Q_{c24} + Q_{c34}) \quad S_{4r} = 123.382 + 42.571i \quad \text{MBA}$$

$$S_{1r} := S_1 - j \cdot (Q_{c01} + Q_{c12}) \quad S_{1r} = 67 + 12.159i \quad \text{MBA}$$

$$S_{2r} := S_2 - j \cdot (Q_{c12} + Q_{c24}) \quad S_{2r} = 58 + 15.23i \quad \text{MBA}$$

$$S_{3r} := S_3 - j \cdot (Q_{c03} + Q_{c34}) \quad S_{3r} = 44 + 10.802i \quad \text{MBA}$$

Расчет кольца 0-3-4-2-1-0.



Находим мощности на головных участках, принимая $Z_{0*1}=Z_{01}$ и

$$Z_{0*3}=Z_{03}$$

$$S_{03} := \frac{S_{3r} \cdot (\overline{Z_{34}} + \overline{Z_{24}} + \overline{Z_{12}} + \overline{Z_{01}}) + S_{4r} \cdot (\overline{Z_{24}} + \overline{Z_{12}} + \overline{Z_{01}}) + S_{2r} \cdot (\overline{Z_{12}} + \overline{Z_{01}}) + S_{1r} \cdot \overline{Z_{01}}}{\overline{Z_{03}} + \overline{Z_{34}} + \overline{Z_{24}} + \overline{Z_{12}} + \overline{Z_{01}}}$$

$$S_{03} = 166.401 + 47.38i \quad \text{MBA}$$

$$S_{01} := \frac{S_{1r} \cdot (\overline{Z_{34}} + \overline{Z_{24}} + \overline{Z_{12}} + \overline{Z_{03}}) + S_{2r} \cdot (\overline{Z_{24}} + \overline{Z_{34}} + \overline{Z_{03}}) + S_{4r} \cdot (\overline{Z_{34}} + \overline{Z_{03}}) + S_{3r} \cdot \overline{Z_{03}}}{\overline{Z_{03}} + \overline{Z_{34}} + \overline{Z_{24}} + \overline{Z_{12}} + \overline{Z_{01}}}$$

$$S_{01} = 125.98 + 33.383i \quad \text{MBA}$$

Определяем мощности на остальных участках схемы и находим точку потокоораздела.

$$S_{34} := S_{03} - S_{3r} \quad S_{34} = 122.401 + 36.578i \quad \text{MBA}$$

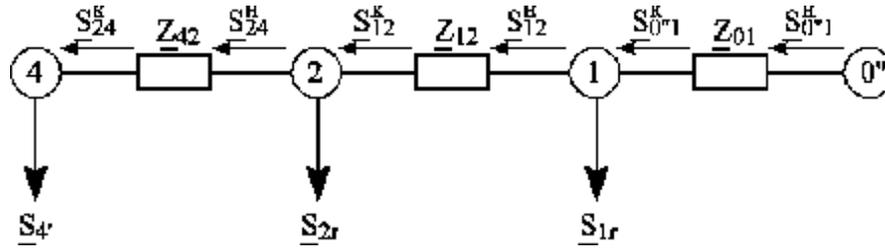
$$S_{42} := S_{34} - S_{4r} \quad S_{42} = -0.98 - 5.993i \quad \text{MBA}$$

$$S_{12} := S_{01} - S_{1r} \quad S_{12} = 58.98 + 21.223i \quad \text{MBA}$$

$$S_{24} := S_{12} - S_{2r} \quad S_{24} = 0.98 + 5.993i \quad \text{MBA}$$

Точка потоко раздела - узел 4.

Рассчитываем потокораспределение в разомкнутой сети 0-1-2-4.



Здесь $S_{4'} = S_{24}$.

Определяем потери мощности на участке 2-4.

$$D S_{24} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{42})^2 + \operatorname{Im}(S_{42})^2)}{220^2} \cdot Z_{24} \quad D S_{24} = 1.886 \cdot 10^{-3} + 0.011i \quad \text{MVA}$$

Находим поток мощности в начале участка 2-4.

$$S_{24n} := -S_{42} + D S_{24} \quad S_{24n} = 0.982 + 6.004i \quad \text{MVA}$$

Находим поток мощности в конце участка 1-2.

$$S_{12k} := S_{24n} + S_{2r} \quad S_{12k} = 58.982 + 21.234i \quad \text{MVA}$$

Определяем потери мощности на участке 1-2.

$$D S_{12} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{12k})^2 + \operatorname{Im}(S_{12k})^2)}{220^2} \cdot Z_{12} \quad D S_{12} = 0.244 + 1.364i \quad \text{MVA}$$

Находим поток мощности в начале участка 1-2.

$$S_{12n} := S_{12k} + D S_{12} \quad S_{12n} = 59.226 + 22.598i \quad \text{MVA}$$

Находим поток мощности в конце участка 0-1.

$$S_{01k} := S_{12n} + S_{1r} \quad S_{01k} = 126.226 + 34.757i \quad \text{MVA}$$

Определяем потери мощности на участке 0-1.

$$D S_{01} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{01k})^2 + \operatorname{Im}(S_{01k})^2)}{220^2} \cdot Z_{01} \quad D S_{01} = 2.125 + 11.9i \quad \text{MVA}$$

Находим поток мощности в начале участка 0-1.

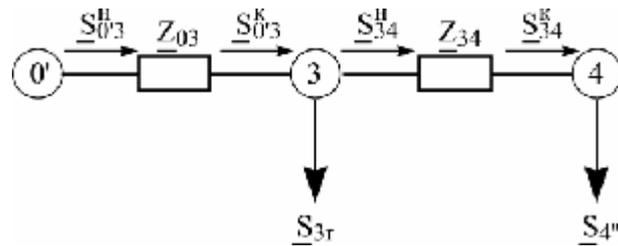
$$S_{01n} := S_{01k} + D S_{01} \quad S_{01n} = 128.351 + 46.657i \quad \text{MVA}$$

С учетом зарядной мощности он равен

$$S_{g01} := S_{01n} - j \cdot Q_{c01}$$

$$S_{g01} = 128.351 + 41.43i \quad \text{MBA.}$$

Аналогично рассчитываем разомкнутую сеть 0'-3-4.



Здесь $S_{4r} = S_{34}$.

$$D S_{34} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{34})^2 + \operatorname{Im}(S_{34})^2)}{220^2} \cdot Z_{34}$$

$$D S_{34} = 0.661 + 2.893i \quad \text{MBA}$$

$$S_{34n} := S_{34} + D S_{34}$$

$$S_{34n} = 123.062 + 39.471i \quad \text{MBA}$$

$$S_{03k} := S_{34n} + S_{3r}$$

$$S_{03k} = 167.062 + 50.273i \quad \text{MBA}$$

$$D S_{03} := \frac{(\operatorname{Re}(S_{03k})^2 + \operatorname{Im}(S_{03k})^2)}{220^2} \cdot Z_{03}$$

$$D S_{03} = 2.83 + 15.847i \quad \text{MBA}$$

$$S_{03n} := S_{03k} + D S_{03}$$

$$S_{03n} = 169.892 + 66.12i \quad \text{MBA}$$

Определяем поток мощности с учетом зарядной мощности линии 0-3.

$$S_{g03} := S_{03n} - j \cdot Q_{c03}$$

$$S_{g03} = 169.892 + 62.2i \quad \text{MBA}$$

Находим мощность, отпускаемую с шин источника питания.

$$S_g := S_{g01} + S_{g03}$$

$$S_g = 298.243 + 103.629i \quad \text{MBA}$$

Находим напряжения в узлах кольцевой схемы сети.

$$U_1 := U_0 - \frac{\operatorname{Re}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{01}) + \operatorname{Im}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{01})}{\overline{U_0}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{01}) - \operatorname{Im}(S_{01n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{01})}{\overline{U_0}}$$

$$U_1 = 228.177 - 16.944i \quad \text{кВ}$$

$$U_2 := U_1 - \frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{12}) + \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{12})}{\overline{U_1}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{12}) - \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{12})}{\overline{U_1}}$$

$$U_2 = 225.448 - 20.805i \quad \text{кВ}$$

$$U_4 := U_2 - \frac{\operatorname{Re}(S_{24n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{24}) + \operatorname{Im}(S_{24n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{24})}{\overline{U_2}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{24n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{24}) - \operatorname{Im}(S_{24n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{24})}{\overline{U_2}}$$

$$U_4 = 225.072 - 20.765i \quad \text{кВ}$$

$$U_3 := U_0 - \frac{\operatorname{Re}(S_{03n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{03}) + \operatorname{Im}(S_{03n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{03})}{\overline{U_0}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{03n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{03}) - \operatorname{Im}(S_{03n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{03})}{\overline{U_0}}$$

$$U_3 = 227.787 - 16.738i \quad \text{кВ}$$

$$U_{4'} := U_3 - \frac{\operatorname{Re}(S_{34n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{34}) + \operatorname{Im}(S_{34n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{34})}{\overline{U_3}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{34n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{34}) - \operatorname{Im}(S_{34n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{34})}{\overline{U_3}}$$

$$U_{4'} = 224.941 - 20.825i \quad \text{кВ}$$

$$e_4 := \frac{|U_4| - |U_{4'}|}{|U_4|} \cdot 100$$

$$e_4 = 0.055 \quad \%$$

Выбор отпаяк РПН автотрансформатора АДЦТН-125000/220/110, у которого пределы регулирования напряжения равны $\pm 6.2\%$, а устройство РПН установлено на стороне СН (в обмотке СН).

Номинальные напряжения автотрансформатора:

$$U_{vn} := 230 \text{ кВ}$$

$$U_{sn} := 121 \text{ кВ}$$

$$U_{nn} := 11 \text{ кВ}$$

Номинальные коэффициенты трансформации:

$$k_{tvn} := \frac{230}{11}$$

$$k_{tvn} = 20.909$$

$$k_{tvs} := \frac{230}{121}$$

$$k_{tvs} = 1.901$$

Определим напряжение нулевой точки автотрансформатора (узел 9).

$$S_{49n} := S_{49k} + D S_{49}$$

$$S_{49n} = 123.212 + 44.755i \quad \text{МВА}$$

$$U_9 := U_4 - \frac{\operatorname{Re}(S_{49n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{tv}) + \operatorname{Im}(S_{49n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{tv})}{\overline{U_4}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{49n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{tv}) - \operatorname{Im}(S_{49n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{tv})}{\overline{U_4}}$$

$$U_9 = 212.793 - 46.138i \quad \text{кВ}$$

Рассчитываем напряжение средней стороны автотрансформатора, приведенное к высокой стороне.

$$U_{CHBH} := U_9 - \frac{\operatorname{Re}(S_{69n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{ts}) + \operatorname{Im}(S_{69n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{ts})}{\overline{U_9}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{69n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{ts}) - \operatorname{Im}(S_{69n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{ts})}{\overline{U_9}}$$

$$|U_{CHBH}| = 217.501 \quad \text{кВ}$$

Определим напряжение средней стороны автотрансформатора:

$$U_6 := \frac{U_{\text{СНВН}}}{k_{\text{tvs}}} \quad |U_6| = 114.425 \text{ кВ}$$

Аналогично определим напряжение низкой стороны автотрансформатора:

$$U_{\text{ННВН}} := U_9 - \frac{\text{Re}(S_{59n}) \cdot \text{Re}(Z_{\text{tn}}) + \text{Im}(S_{59n}) \cdot \text{Im}(Z_{\text{tn}})}{\overline{U_9}} - j \cdot \frac{\text{Re}(S_{59n}) \cdot \text{Im}(Z_{\text{tn}}) - \text{Im}(S_{59n}) \cdot \text{Re}(Z_{\text{tn}})}{\overline{U_9}}$$

$$|U_{\text{ННВН}}| = 215.364 \text{ кВ}$$

$$U_5 := \frac{U_{\text{ННВН}}}{k_{\text{tvn}}} \quad |U_5| = 10.3 \text{ кВ}$$

Так как расчетное значение напряжения низкой стороны практически равно желаемому, то установка линейных регуляторов не требуется.

Желаемый коэффициент трансформации с высокой на среднюю сторону определяем по желаемому напряжению средней стороны (см. формулу (157)).

$$k_{\text{tvsjel}} := \frac{|U_{\text{СНВН}}|}{116} \quad k_{\text{tvsjel}} = 1.875$$

Желаемый номер отпайки РПН находится по формуле (166).

$$n_{\text{vsjel}} := \left(\frac{k_{\text{tvs}}}{k_{\text{tvsjel}}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{0.02} \quad n_{\text{vsjel}} = 0.688$$

Округляем до стандартного, равного 1.

Фактическое напряжение на шинах СН автотрансформатора.

$$U_{\text{vsf}} := \frac{|U_{\text{СНВН}}| \cdot (1 + 1 \cdot 0.02)}{k_{\text{tvs}}} \quad U_{\text{vsf}} = 116.713 \text{ кВ}$$

Рассчитываем напряжения в узлах сети среднего напряжения, не учитывая поперечную составляющую падения напряжения ввиду ее малости.

$$U_6 := 116.713 \text{ кВ}$$

$$U_7 := U_6 - \frac{\operatorname{Re}(S_{67n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{76}) + \operatorname{Im}(S_{67n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{76})}{U_6} \quad U_7 = 114.173 \text{ кВ}$$

$$U_8 := U_7 - \frac{\operatorname{Re}(S_{78n}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{78}) + \operatorname{Im}(S_{78n}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{78})}{U_7} \quad U_8 = 113.54 \text{ кВ}$$

Определим номер отпайки РПН двухобмоточного трансформатора:
узла 8.

Потеря напряжения в трансформаторе:

$$DU_t := \frac{\operatorname{Re}(S_{pr8}) \cdot \operatorname{Re}(Z_{tr}) + \operatorname{Im}(S_{pr8}) \cdot \operatorname{Im}(Z_{tr})}{U_8} \quad DU_t = 6.217 \text{ кВ}$$

Напряжение низкой стороны, приведенное к высокой:

$$U_{ННВН} := U_8 - DU_t \quad U_{ННВН} = 107.323 \text{ кВ}$$

Номинальные напряжения высшей и низшей сторон трансформатора:

$$U_{nn} := 10.5 \text{ кВ} \quad U_{vn} := 115 \text{ кВ}$$

Номинальный коэффициент трансформации:

$$k_{vnn} := \frac{U_{vn}}{U_{nn}} \quad k_{vnn} = 11.524$$

Определение желаемого коэффициента трансформации.

$$k_{vnjel} := \frac{U_{ННВН}}{10.1} \quad k_{vnjel} = 10.626$$

Желаемый номер отпайки (151):

$$n_{vnjel} := \left(\frac{k_{vnjel}}{k_{vnn}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{0.0178} \quad n_{vnjel} = -4.377$$

округляется до ближайшего стандартного, равного -4.

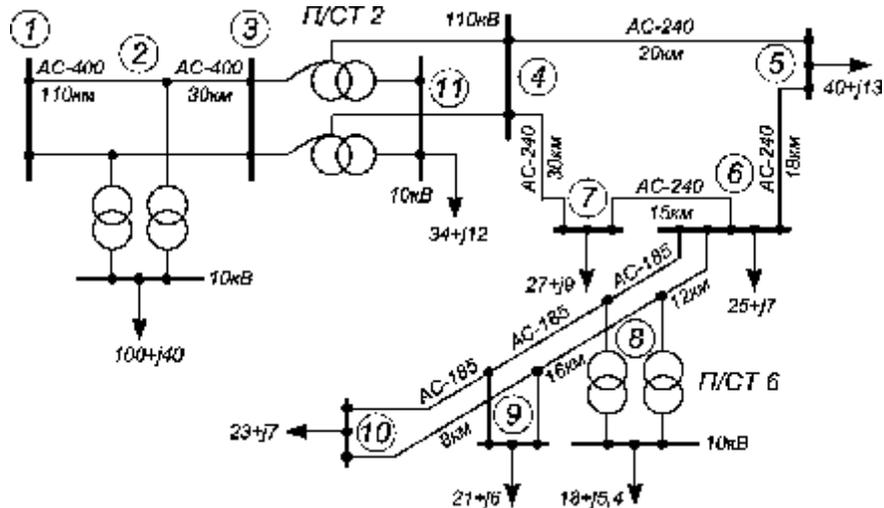
Фактическое напряжение на шинах НН трансформатора узла 8 (158):

$$U_{vnf} := \frac{U_{ННВН}}{k_{vnn} \cdot (1 - 4 \cdot 0.0178)} \quad U_{vnf} = 10.027 \text{ кВ}$$

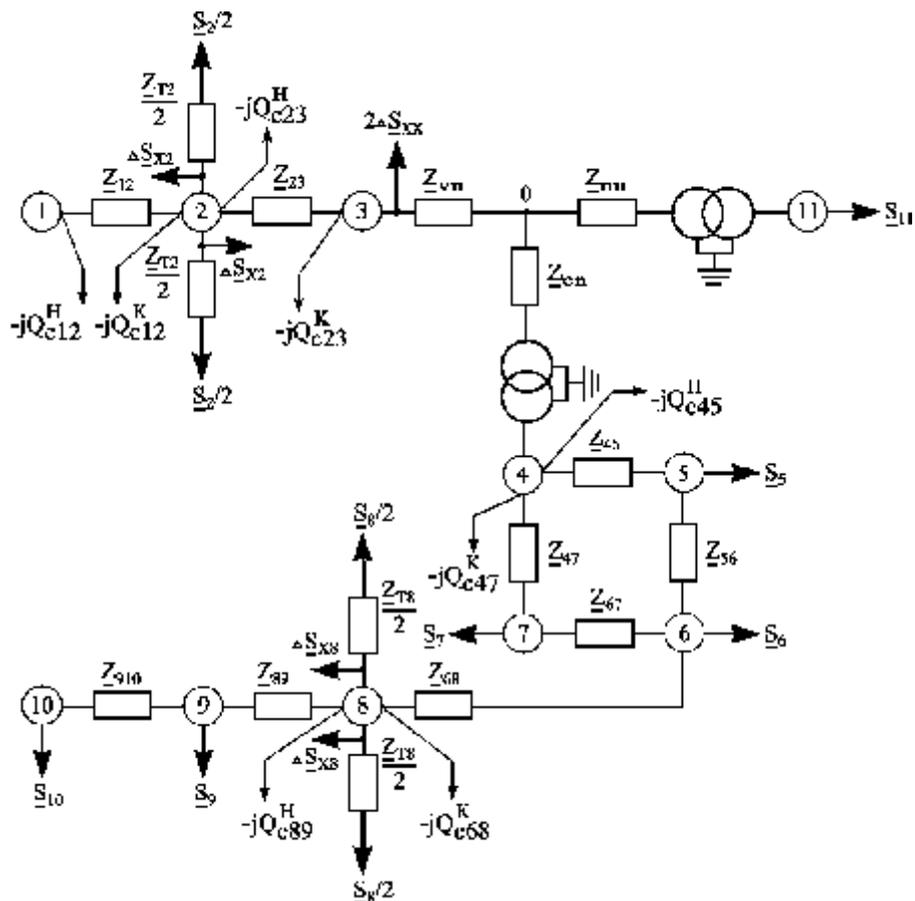
Рассчитанное фактическое напряжение совпало с желаемым, - следовательно, расчет проведен правильно.

Пример 4.2.

Рассчитать установившийся режим в сети двух номинальных напряжений, схема которой приведена на рисунке. Выбрать номера ответвлений РПН и линейных регуляторов для поддержания уровней напряжения на шинах подстанции 2 – 118 кВ и 10,5 кВ; подстанции 6 - 10,5кВ. $U_1 := 241$ кВ.



Составляем схему замещения



Примечание: в узлах 5, 6, 7, 9, 10 показана расчетная мощность нагрузки.

Находим сопротивления и проводимости линий по справочным данным /2/.

$$z_{12} := \frac{0.075 \cdot 110 + j \cdot 0.42 \cdot 110}{2} \quad z_{12} = 4.125 + 23.1i \quad \text{Ом}$$

$$z_{23} := \frac{0.075 \cdot 30 + j \cdot 0.42 \cdot 30}{2} \quad z_{23} = 1.125 + 6.3i \quad \text{Ом}$$

$$z_{45} := 0.121 \cdot 20 + j \cdot 0.405 \cdot 20 \quad z_{45} = 2.42 + 8.1i \quad \text{Ом}$$

$$z_{56} := 0.121 \cdot 18 + j \cdot 0.405 \cdot 18 \quad z_{56} = 2.178 + 7.29i \quad \text{Ом}$$

$$z_{67} := 0.121 \cdot 15 + j \cdot 0.405 \cdot 15 \quad z_{67} = 1.815 + 6.075i \quad \text{Ом}$$

$$z_{47} := 0.121 \cdot 30 + j \cdot 0.405 \cdot 30 \quad z_{47} = 3.63 + 12.15i \quad \text{Ом}$$

$$z_{68} := \frac{0.162 \cdot 12 + j \cdot 0.413 \cdot 12}{2} \quad z_{68} = 0.972 + 2.478i \quad \text{Ом}$$

$$z_{89} := \frac{0.162 \cdot 16 + j \cdot 0.413 \cdot 16}{2} \quad z_{89} = 1.296 + 3.304i \quad \text{Ом}$$

$$z_{910} := \frac{0.162 \cdot 8 + j \cdot 0.413 \cdot 8}{2} \quad z_{910} = 0.648 + 1.652i \quad \text{Ом}$$

$$b_{o12} := 2.7 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \text{ См} \quad b_{o23} := 2.7 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \text{ См} \quad b_{o45} := 2.81 \cdot 10^{-6} \text{ См}$$

$$b_{o56} := 2.81 \cdot 10^{-6} \text{ См} \quad b_{o67} := 2.81 \cdot 10^{-6} \text{ См} \quad b_{o47} := 2.81 \cdot 10^{-6} \text{ См}$$

$$b_{o68} := 2.75 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \text{ См} \quad b_{o89} := 2.75 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \text{ См} \quad b_{o910} := 2.75 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \text{ См}$$

Находим зарядные мощности.

$$Q_{c12} := \frac{220^2 \cdot b_{o12} \cdot 110}{2} \quad Q_{c12} = 14.375 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c23} := \frac{220^2 \cdot b_{o23} \cdot 30}{2} \quad Q_{c23} = 3.92 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c45} := \frac{110^2 \cdot b_{o45} \cdot 20}{2} \quad Q_{c45} = 0.34 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c56} := \frac{110^2 \cdot b_{o56} \cdot 18}{2} \quad Q_{c56} = 0.306 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c67} := \frac{110^2 \cdot b_{o67} \cdot 15}{2} \quad Q_{c67} = 0.255 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c47} := \frac{110^2 \cdot b_{o47} \cdot 30}{2} \quad Q_{c47} = 0.51 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c68} := \frac{110^2 \cdot b_{o68} \cdot 12}{2} \quad Q_{c68} = 0.399 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c89} := \frac{110^2 \cdot b_{o89} \cdot 16}{2} \quad Q_{c89} = 0.532 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c910} := \frac{110^2 \cdot b_{o910} \cdot 8}{2} \quad Q_{c910} = 0.266 \quad \text{Мвар}$$

Определяем расчетную мощность трансформаторов подстанции узла 8.

$$S_{trash8} := \frac{\sqrt{18^2 + 5.4^2}}{2 \cdot 0.7} \quad S_{trash8} = 13.423 \quad \text{МВА.}$$

Выбираем трансформатор типа ТДН-16000/110, справочные данные которого приведены в /5/.

Определяем потери мощности в трансформаторе.

$$D P_{tr8} := \frac{\left(\frac{18}{2}\right)^2 + \left(\frac{5.4}{2}\right)^2}{110^2} \cdot 4.38 + 0.019 \quad D P_{tr8} = 0.051 \quad \text{МВт}$$

$$D Q_{tr8} := \frac{\left(\frac{18}{2}\right)^2 + \left(\frac{5.4}{2}\right)^2}{110^2} \cdot 86.7 + 0.112 \quad D Q_{tr8} = 0.745 \quad \text{Мвар}$$

Рассчитаем приведенную нагрузку узла 8.

$$S_{pr8} := 18 + j \cdot 5.4 + 2 \cdot (D P_{tr8} + j \cdot D Q_{tr8}) \quad S_{pr8} = 18.102 + 6.889i \quad \text{МВА}$$

Определяем расчетную мощность трансформаторов подстанции узла 2.

$$S_{\text{trash2}} := \frac{\sqrt{100^2 + 40^2}}{2 \cdot 0.7} \quad S_{\text{trash2}} = 76.931 \quad \text{MBA.}$$

В узле 2 ставим трансформатор ТДЦ-80000/220. Справочные данные по нему принимаем по /5/.

$$D P_{\text{tr2}} := \frac{\left(\frac{100}{2}\right)^2 + \left(\frac{40}{2}\right)^2}{220^2} \cdot 2.64 + 0.105 \quad D P_{\text{tr2}} = 0.263 \quad \text{МВт}$$

$$D Q_{\text{tr2}} := \frac{\left(\frac{100}{2}\right)^2 + \left(\frac{40}{2}\right)^2}{220^2} \cdot 72.8 + 0.480 \quad D Q_{\text{tr2}} = 4.842 \quad \text{Мвар}$$

Определим приведенную нагрузку 2 узла.

$$S_{\text{pr2}} := 100 + j \cdot 40 + (D P_{\text{tr2}} + j \cdot D Q_{\text{tr2}}) \cdot 2 \quad S_{\text{pr2}} = 100.526 + 49.684i \quad \text{MBA}$$

Расчетные нагрузки узлов:

$$S_2 := S_{\text{pr2}} - j \cdot (Q_{\text{c12}} + Q_{\text{c23}}) \quad S_2 = 100.526 + 31.389i \quad \text{MBA}$$

$$S_5 := 40 + j \cdot 13 - j \cdot (Q_{\text{c56}} + Q_{\text{c45}}) \quad S_5 = 40 + 12.354i \quad \text{MBA}$$

$$S_6 := 25 + j \cdot 7 - j \cdot (Q_{\text{c56}} + Q_{\text{c67}} + Q_{\text{c68}}) \quad S_6 = 25 + 6.04i \quad \text{MBA}$$

$$S_7 := 27 + j \cdot 9 - j \cdot (Q_{\text{c47}} + Q_{\text{c67}}) \quad S_7 = 27 + 8.235i \quad \text{MBA}$$

$$S_8 := S_{\text{pr8}} - j \cdot (Q_{\text{c68}} + Q_{\text{c89}}) \quad S_8 = 18.102 + 5.958i \quad \text{MBA}$$

$$S_9 := 21 + j \cdot 6 - j \cdot (Q_{\text{c89}} + Q_{\text{c910}}) \quad S_9 = 21 + 5.201i \quad \text{MBA}$$

$$S_{10} := 23 + j \cdot 7 - j \cdot Q_{\text{c910}} \quad S_{10} = 23 + 6.734i \quad \text{MBA}$$

Находим потоки мощности в разомкнутой сети 6-8-9-10.

$$D S_{910} := \frac{\text{Re}(S_{10})^2 + \text{Im}(S_{10})^2}{110^2} \cdot z_{910} \quad D S_{910} = 0.031 + 0.078i \quad \text{MBA}$$

$$S_{910n} := S_{10} + D S_{910} \quad S_{910n} = 23.031 + 6.812i \quad \text{MBA}$$

$$S_{89k} := S_{910n} + S_9 \quad S_{89k} = 44.031 + 12.014i \quad \text{MBA}$$

$$D S_{89} := \frac{\operatorname{Re}(S_{89k})^2 + \operatorname{Im}(S_{89k})^2}{110^2} \cdot z_{89}$$

$$D S_{89} = 0.223 + 0.569i \quad \text{MBA}$$

$$S_{89n} := S_{89k} + D S_{89}$$

$$S_{89n} = 44.254 + 12.582i \quad \text{MBA}$$

$$S_{68k} := S_{89n} + S_8$$

$$S_{68k} = 62.356 + 18.54i \quad \text{MBA}$$

$$D S_{68} := \frac{\operatorname{Re}(S_{68k})^2 + \operatorname{Im}(S_{68k})^2}{110^2} \cdot z_{68}$$

$$D S_{68} = 0.34 + 0.867i \quad \text{MBA}$$

$$S_{68n} := S_{68k} + D S_{68}$$

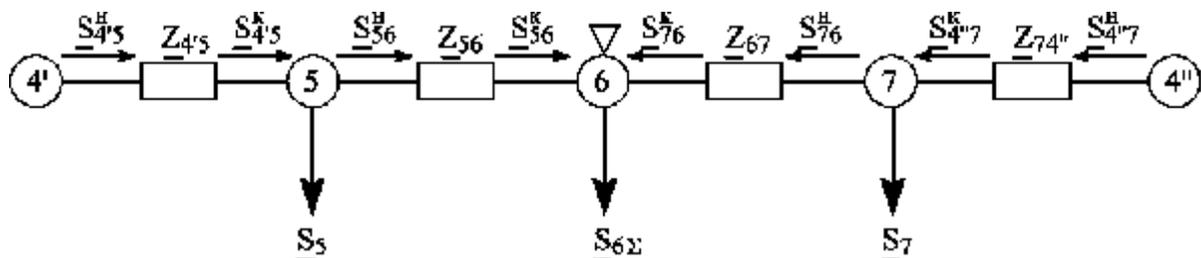
$$S_{68n} = 62.696 + 19.407i \quad \text{MBA}$$

Суммарная нагрузка узла 6.

$$S_{6S} := S_{68n} + S_6$$

$$S_{6S} = 87.696 + 25.446i \quad \text{MBA}$$

Расчет потоков мощности с учетом потерь в кольце 4'-5-6-7-4''.



Находим потоки мощности на головных участках.

Определим сопротивления всех участков схемы для расчета потоков

мощности на головных участках:

$$z_{74''} := z_{47}$$

$$z_{54'} := z_{45}$$

$$z_{64''} := z_{67} + z_{47}$$

$$z_{64'} := z_{56} + z_{45}$$

$$z_{54''} := z_{56} + z_{67} + z_{47}$$

$$z_{74'} := z_{67} + z_{56} + z_{45}$$

$$z_{4'4''} := z_{45} + z_{56} + z_{67} + z_{47}$$

$$S_{4'5} := \frac{S_5 \cdot z_{54''} + S_{6S} \cdot z_{64''} + S_7 \cdot z_{74''}}{z_{4'4''}}$$

$$S_{4'5} = 87.666 + 26.15i \quad \text{MBA}$$

$$S_{4''7} := \frac{S_7 \cdot z_{74'} + S_{6S} \cdot z_{64'} + S_5 \cdot z_{54'}}{z_{4'4''}}$$

$$S_{4''7} = 67.029 + 19.885i \quad \text{MBA}$$

Находим точку потокораздела:

$$S_{56} := S_{4'5} - S_5$$

$$S_{56} = 47.666 + 13.796i \quad \text{MBA}$$

$$S_{67} := S_{56} - S_{6S}$$

$$S_{67} = -40.029 - 11.65i \quad \text{MBA}$$

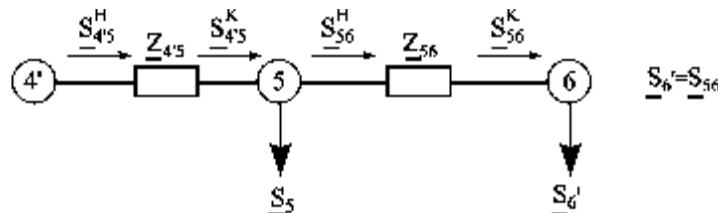
$$S_{76} := S_{4''7} - S_7$$

$$S_{76} = 40.029 + 11.65i \quad \text{MBA}$$

Точка потокораздела б.

Разрезаем сеть по точке потокораздела и рассчитываем две разомкнутые сети.

Сеть 4'-5-6:



$$D S_{56} := \frac{\text{Re}(S_{56})^2 + \text{Im}(S_{56})^2}{110^2} \cdot z_{56}$$

$$D S_{56} = 0.443 + 1.484i \quad \text{MBA}$$

$$S_{56n} := S_{56} + D S_{56}$$

$$S_{56n} = 48.11 + 15.279i \quad \text{MBA}$$

$$S_{4'5k} := S_{56n} + S_5$$

$$S_{4'5k} = 88.11 + 27.633i \quad \text{MBA}$$

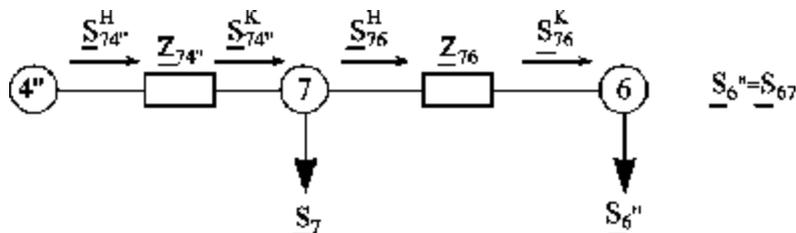
$$D S_{4'5} := \frac{\text{Re}(S_{4'5k})^2 + \text{Im}(S_{4'5k})^2}{110^2} \cdot z_{45}$$

$$D S_{4'5} = 1.705 + 5.708i \quad \text{MBA}$$

$$S_{4'5n} := S_{4'5k} + D S_{4'5}$$

$$S_{4'5n} = 89.815 + 33.341i \quad \text{MBA}$$

Сеть 4''-7-8



$$D S_{76} := \frac{\text{Re}(S_{76})^2 + \text{Im}(S_{76})^2}{110^2} \cdot z_{67}$$

$$D S_{76} = 0.261 + 0.873i \quad \text{MBA}$$

$$S_{76n} := S_{76} + D S_{76}$$

$$S_{76n} = 40.29 + 12.523i \quad \text{MBA}$$

$$S_{4''7k} := S_{76n} + S_7 \quad S_{4''7k} = 67.29 + 20.758i \quad \text{MBA}$$

$$D S_{4''7} := \frac{\operatorname{Re}(S_{4''7k})^2 + \operatorname{Im}(S_{4''7k})^2}{110^2} \cdot z_{47} \quad D S_{4''7} = 1.488 + 4.979i \quad \text{MBA}$$

$$S_{4''7n} := S_{4''7k} + D S_{4''7} \quad S_{4''7n} = 68.778 + 25.737i \quad \text{MBA}$$

Суммарная нагрузка узла 4:

$$S_4 := S_{4'5n} + S_{4''7n} - j \cdot (Q_{c45} + Q_{c47}) \quad S_4 = 158.593 + 58.229i \quad \text{MBA}$$

Суммарная нагрузка автотрансформатора:

$$S'_{\text{rash}} := S_4 + 34 + j \cdot 12 \quad S'_{\text{rash}} = 192.593 + 70.229i \quad \text{MBA}$$

$$S_{\text{rash}} := \frac{\sqrt{\operatorname{Re}(S'_{\text{rash}})^2 + \operatorname{Im}(S'_{\text{rash}})^2}}{2 \cdot 0.7} \quad S_{\text{rash}} = 146.427 \quad \text{MBA}$$

Выбираем трансформатор АТДЦТН-200000/220/110.

По справочным /14/ данным находим сопротивления обмоток автотрансформатора.

$$z_{nn} := 1.15 + j \cdot 54 \quad z_{nn} = 1.15 + 54i \quad \text{Ом}$$

$$z_{cn} := \frac{0.2 + j \cdot 0}{2} \quad z_{cn} = 0.1 \quad \text{Ом}$$

$$z_{vn} := \frac{0.39 + j \cdot 30.4}{2} \quad z_{vn} = 0.195 + 15.2i \quad \text{Ом}$$

Находим потери мощности в обмотках низшего напряжения автотрансформаторов:

$$D S'_{nn} := \frac{\left(\frac{34}{2}\right)^2 + \left(\frac{12}{2}\right)^2}{220^2} \cdot z_{nn} \quad D S'_{nn} = 7.722 \cdot 10^{-3} + 0.363i \quad \text{MBA}$$

$$D S_{nn} := 2 \cdot D S'_{nn} \quad D S_{nn} = 0.015 + 0.725i \quad \text{MBA}$$

Находим потери мощности в обмотках среднего напряжения автотрансформаторов:

$$D S_{cn} := \frac{\operatorname{Re}(S_4)^2 + \operatorname{Im}(S_4)^2}{220^2} \cdot z_{cn} \quad D S_{cn} = 0.059 \quad \text{MVA}$$

Потоки мощности, входящие в обмотки НН и СН:

$$S_{011n} := 34 + j \cdot 12 + D S_{nn} \quad S_{011n} = 34.015 + 12.725i \quad \text{MVA}$$

$$S_{04n} := S_4 + D S_{cn} \quad S_{04n} = 158.622 + 58.229i \quad \text{MVA}$$

Поток мощности, выходящий из обмотки ВН:

$$S_{30k} := S_{011n} + S_{04n} \quad S_{30k} = 192.638 + 70.954i \quad \text{MVA}$$

Потери мощности в обмотках ВН:

$$D S_{vn} := \frac{\operatorname{Re}(S_{30k})^2 + \operatorname{Im}(S_{30k})^2}{220^2} \cdot z_{vn} \quad D S_{vn} = 0.17 + 13.239i \quad \text{MVA}$$

$$D S_{xx} := 2 \cdot (0.125 + j \cdot 1) \quad D S_{xx} = 0.25 + 2i \quad \text{MVA}$$

Находим расчетную нагрузку узла 3:

$$S_{30n} := S_{30k} + D S_{vn} \quad S_{30n} = 192.837 + 84.193i \quad \text{MVA}$$

$$S_3 := S_{30n} + D S_{xx} - j \cdot Q_{c23} \quad S_3 = 193.087 + 82.272i \quad \text{MVA}$$

Находим потоки мощности в разомкнутой сети 1-2-3:

$$D S_{23} := \frac{\operatorname{Re}(S_3)^2 + \operatorname{Im}(S_3)^2}{220^2} \cdot z_{23} \quad D S_{23} = 1.024 + 5.734i \quad \text{MVA}$$

$$S_{23n} := S_3 + D S_{23} \quad S_{23n} = 194.111 + 88.006i \quad \text{MVA}$$

$$S_{12k} := S_{23n} + S_2 \quad S_{12k} = 294.637 + 119.395i \quad \text{MVA}$$

$$D S_{12} := \frac{\operatorname{Re}(S_{12k})^2 + \operatorname{Im}(S_{12k})^2}{220^2} \cdot z_{12} \quad D S_{12} = 8.614 + 48.236i \quad \text{MVA}$$

$$S_{12n} := S_{12k} + D S_{12} \quad S_{12n} = 303.251 + 167.631i \quad \text{MVA}$$

Определяем напряжения в узлах сети 220 кВ:

$$U_2 := U_1 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12}) + \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12})}{\overline{U_1}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{12}) - \operatorname{Im}(S_{12n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{12})}{\overline{U_1}} \right)$$

$$U_2 = 219.742 - 26.198i \quad \text{кВ}$$

$$U_3 := U_2 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23}) + \operatorname{Im}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23})}{\overline{U_2}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{23}) - \operatorname{Im}(S_{23n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{23})}{\overline{U_2}} \right)$$

$$U_3 = 215.673 - 30.827i \quad \text{кВ} \quad |U_3| = 217.865 \quad \text{кВ}$$

Рассчитываем падения напряжения в обмотках автотрансформаторов и напряжения средней и низкой сторон, приведенные к высшей стороне.

$$DU_{vn} := \frac{\operatorname{Re}(S_{30n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{vn}) + \operatorname{Im}(S_{30n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{vn})}{\overline{U_3}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{30n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{vn}) - \operatorname{Im}(S_{30n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{vn})}{\overline{U_3}}$$

$$DU_{vn} = 7.879 + 12.388i \quad \text{кВ}$$

$$U_0 := U_3 - DU_{vn}$$

$$U_0 = 207.794 - 43.215i \quad \text{кВ}$$

$$DU_{cn} := \frac{\operatorname{Re}(S_{04n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{cn}) + \operatorname{Im}(S_{04n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{cn})}{\overline{U_0}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{04n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{cn}) - \operatorname{Im}(S_{04n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{cn})}{\overline{U_0}}$$

$$DU_{cn} = 0.068 - 0.042i \quad \text{кВ}$$

Напряжение средней стороны, приведенное к высшей стороне

$$U_{CHBH} := U_0 - DU_{cn}$$

$$U_{CHBH} = 207.727 - 43.173i \quad \text{кВ}$$

$$|U_{CHBH}| = 212.166 \quad \text{кВ}$$

$$DU_{nn} := \frac{\operatorname{Re}(S_{011n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{nn}) + \operatorname{Im}(S_{011n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{nn})}{\overline{U_0}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{011n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{nn}) - \operatorname{Im}(S_{011n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{nn})}{\overline{U_0}}$$

$$DU_{nn} = 5.098 + 7.709i \quad \text{кВ}$$

Напряжение низкой стороны, приведенное к высшей стороне

$$U_{HHBH} := U_0 - DU_{nn}$$

$$U_{HHBH} = 202.696 - 50.924i \quad \text{кВ}$$

$$|U_{HHBH}| = 210.434 \quad \text{кВ}$$

$$k_{VCn} := \frac{230}{121} - \text{номинальный коэффициент трансформации напряжения с}$$

высшей стороны на среднюю.

Действительное напряжение на стороне СН:

$$U_{CH} := \frac{U_{CHBH}}{k_{VCn}} \quad U_{CH} = 109.282 - 22.713i \quad \text{кВ} \quad |U_{CH}| = 111.618 \quad \text{кВ}$$

$k_{VNn} := \frac{230}{11}$ - номинальный коэффициент трансформации напряжения с высшей стороны на низшую.

Действительное напряжение на стороне НН:

$$U_{НН} := \frac{U_{НВН}}{k_{VNn}} \quad U_{НН} = 9.694 - 2.436i \quad \text{кВ} \quad |U_{НН}| = 9.995 \quad \text{кВ}$$

Так как действительные напряжения обмоток СН и НН не равны желаемым, определим номера ответвлений РПН и линейного регулятора. В автотрансформаторе устройство РПН установлено в нейтрали. Диапазон регулирования равен $\pm 8 \times 1,5\%$. Определяем желаемый номер отпайки РПН для обеспечения напряжения средней стороны, равного 118 кВ. Для чего найдем желаемый коэффициент трансформации по (157).

$$k_{VCjel} := \frac{|U_{СНВН}|}{118} \quad k_{VCjel} = 1.798$$

Тогда по (178)

$$n_{pjel} := \frac{1 - \frac{k_{VCjel}}{k_{VCn}}}{(k_{VCjel} - 1) \cdot 0.015} \quad n_{pjel} = 4.519$$

Округляем полученный номер отпайки РПН до ближайшего целого

$$n_p := 5$$

Находим напряжение средней стороны автотрансформатора после регулирования напряжения:

$$U_{СНf} := \frac{U_{СНВН} \left(\frac{1}{k_{VCn}} + n_p \cdot 0.015 \right)}{1 + n_p \cdot 0.015} \quad |U_{СНf}| = 118.633 \quad \text{кВ}$$

Т.к. устройство РПН установлено в нейтрали автотрансформатора, то действительное напряжение на шинах НН определяется с учетом изменения $U_{ВН}$ за счет переключения на другой номер отпайки РПН, т.е.

$$U_{\text{ННf}} := \frac{U_{\text{ННВН}}}{k_{\text{VНn}} \cdot (1 + n_{\text{p}} \cdot 0.015)} \quad |U_{\text{ННf}}| = 9.298 \text{ кВ.}$$

Выбираем номер ответвления линейного регулятора, установленного со стороны НН автотрансформатора для поддержания требуемого напряжения на шинах НН. Выбираем линейный регулятор по мощности нагрузки обмотки НН автотрансформатора.

$$S_{\text{rashmn}} := \sqrt{34^2 + 12^2} \quad S_{\text{rashmn}} = 36.056 \text{ МВА}$$

Принимаем к установке линейный регулятор ЛТДН – 40000/10 со следующими данными $S_{\text{НОМ}}=40$ МВА, $U_{\text{НОМ}}=11$ кВ с диапазоном регулирования $\pm 10 \times 1,5 \% / 5 /$.

Номер ответвления линейного регулятора рассчитывается по выражению

$$n_{\text{LRjel}} := \left(\frac{10.5 - |U_{\text{ННf}}|}{11} \right) \cdot \frac{1}{0.015} \quad n_{\text{LRjel}} = 7.285$$

Принимаем стандартное ответвление линейного регулятора $n_{\text{LR}} := 7$
 Действительное напряжение на шинах НН найдем по выражению (182).

$$U_{\text{ННd}} := U_{\text{ННf}} + n_{\text{LR}} \cdot 0.015 \cdot U_{\text{НН}} \quad |U_{\text{ННd}}| = 10.453 \text{ кВ}$$

где $U_{\text{НН}}$ – номинальное напряжение линейного регулятора.

Рассчитываем напряжения в узлах сети 110 кВ.

$$U_5 := U_{\text{CHf}} - \left(\frac{\text{Re}(S_{4'5n}) \cdot \text{Re}(z_{45}) + \text{Im}(S_{4'5n}) \cdot \text{Im}(z_{45})}{\overline{U_{\text{CHf}}}} + j \cdot \frac{\text{Re}(S_{4'5n}) \cdot \text{Im}(z_{45}) - \text{Im}(S_{4'5n}) \cdot \text{Re}(z_{45})}{\overline{U_{\text{CHf}}}} \right)$$

$$U_5 = 111.018 - 28.643i \text{ кВ} \quad |U_5| = 114.654 \text{ кВ}$$

$$U_{6'} := U_5 - \left(\frac{\text{Re}(S_{56n}) \cdot \text{Re}(z_{56}) + \text{Im}(S_{56n}) \cdot \text{Im}(z_{56})}{\overline{U_5}} + j \cdot \frac{\text{Re}(S_{56n}) \cdot \text{Im}(z_{56}) - \text{Im}(S_{56n}) \cdot \text{Re}(z_{56})}{\overline{U_5}} \right)$$

$$U_{6'} = 108.501 - 30.852i \text{ кВ}$$

$$U_7 := U_{\text{CHf}} - \left(\frac{\text{Re}(S_{4''7n}) \cdot \text{Re}(z_{47}) + \text{Im}(S_{4''7n}) \cdot \text{Im}(z_{47})}{\overline{U_{\text{CHf}}}} + j \cdot \frac{\text{Re}(S_{4''7n}) \cdot \text{Im}(z_{47}) - \text{Im}(S_{4''7n}) \cdot \text{Re}(z_{47})}{\overline{U_{\text{CHf}}}} \right)$$

$$U_7 = 110.236 - 29.301i \quad \text{кВ}$$

$$U_{6''} := U_7 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{76n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{67}) + \operatorname{Im}(S_{76n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{67})}{\overline{U_7}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{76n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{67}) + \operatorname{Im}(S_{76n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{67})}{\overline{U_7}} \right)$$

$$U_{6''} = 108.37 - 31.232i \quad \text{кВ}$$

Напряжения в узле 6, рассчитанные с двух сторон, практически совпали.

$$U_8 := U_{6'} - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{68n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{68}) + \operatorname{Im}(S_{68n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{68})}{\overline{U_{6'}}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{68n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{68}) + \operatorname{Im}(S_{68n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{68})}{\overline{U_{6'}}} \right)$$

$$U_8 = 107.149 - 32.074i \quad \text{кВ}$$

$$U_9 := U_8 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{89n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{89}) + \operatorname{Im}(S_{89n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{89})}{\overline{U_8}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{89n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{89}) + \operatorname{Im}(S_{89n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{89})}{\overline{U_8}} \right)$$

$$U_9 = 105.885 - 33.212i \quad \text{кВ}$$

$$U_{10} := U_9 - \left(\frac{\operatorname{Re}(S_{910n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{910}) + \operatorname{Im}(S_{910n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{910})}{\overline{U_9}} + j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{910n}) \cdot \operatorname{Im}(z_{910}) + \operatorname{Im}(S_{910n}) \cdot \operatorname{Re}(z_{910})}{\overline{U_9}} \right)$$

$$U_{10} = 105.545 - 33.507i \quad \text{кВ}$$

Выбор номера отпайки РПН двухобмоточного трансформатора в узле 8.

Определим напряжение низшей стороны, приведенное к высшей стороне:

$$S_{8pr} := \frac{S_{pr8} - 2 \cdot (0.019 + j \cdot 0.112)}{2}$$

$$U_{\text{ННВН8}} := U_8 - \frac{\operatorname{Re}(S_{8pr}) \cdot 4.38 + \operatorname{Im}(S_{8pr}) \cdot 86.7}{\overline{U_8}} - j \cdot \frac{\operatorname{Re}(S_{8pr}) \cdot 86.7 + \operatorname{Im}(S_{8pr}) \cdot 4.38}{\overline{U_8}}$$

$$U_{\text{ННВН8}} = 102.29 - 38.064i \quad \text{кВ}$$

$$|U_{\text{ННВН8}}| = 109.143 \quad \text{кВ}$$

Определяем напряжения на шинах НН трансформатора:

$$k_{tVNn} := \frac{121}{11}$$

$$U_{\text{NN}} := \frac{|U_{\text{ННВН8}}|}{k_{tVNn}}$$

$$U_{\text{NN}} = 9.922 \quad \text{кВ}$$

Т.к. полученное напряжение не соответствует желаемому, находим желаемый коэффициент трансформации:

$$k_{\text{tvnjel}} := \frac{|U_{\text{HNBH8}}|}{10.5} \qquad k_{\text{tvnjel}} = 10.395$$

Определяем желаемый номер отпайки РПН:

$$n := \left(\frac{k_{\text{tvnjel}}}{k_{\text{tvnn}}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{0.0178} \qquad n = -3.092$$

Полученный номер отпайки РПН округляем до ближайшего целого

$$n_{\text{ct}} := -3$$

Находим фактическое напряжение на шинах НН после регулирования напряжения и сравниваем с желаемым:

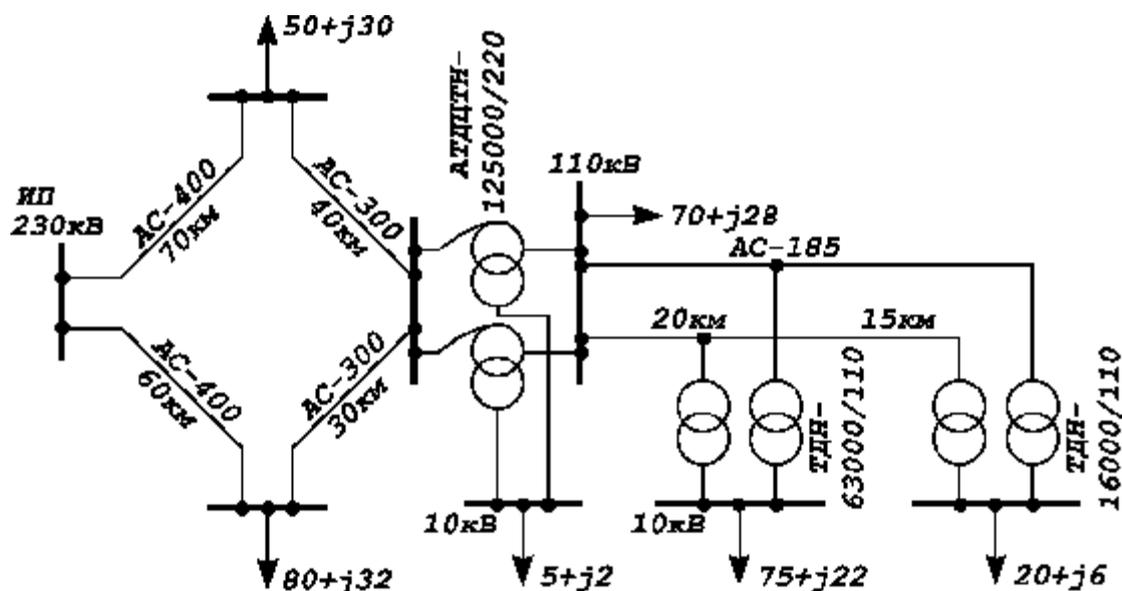
$$U_{\text{HHf8}} := \frac{U_{\text{HNBH8}}}{k_{\text{tvnn}} \cdot (1 + n_{\text{ct}} \cdot 0.0178)} \qquad |U_{\text{HHf8}}| = 10.482 \text{ кВ}$$

Фактическое напряжение практически совпало с желаемым, - следовательно, расчет проведен верно.

Задачи для самостоятельного решения

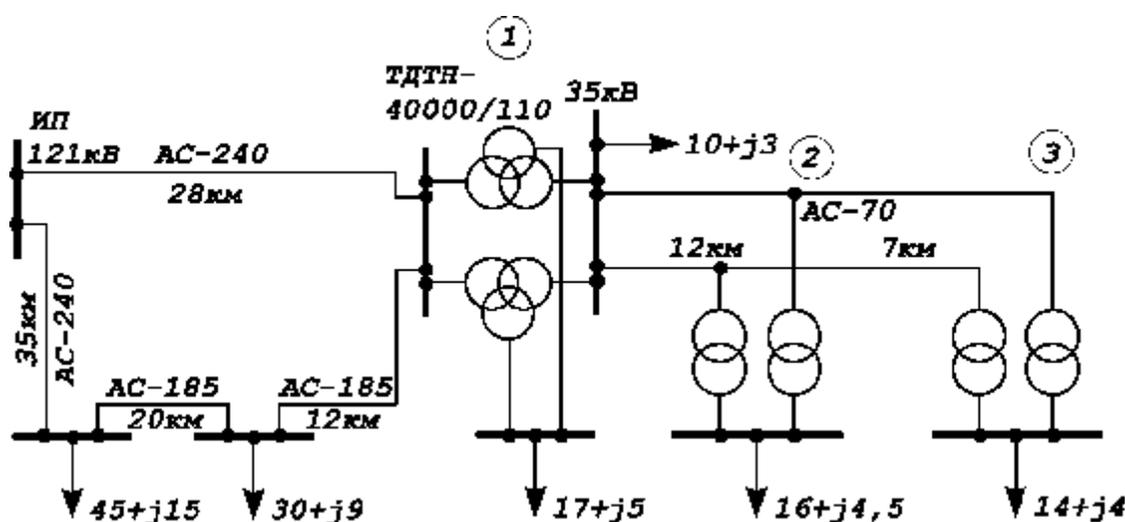
№ 1

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать отпайки РПН автотрансформатора для поддержания напряжения на шинах СН равным 116 кВ, на шинах НН – 10,5 кВ и трансформатора ТДН – 63000/110 для поддержания напряжения на шинах НН равным 10,2 кВ.



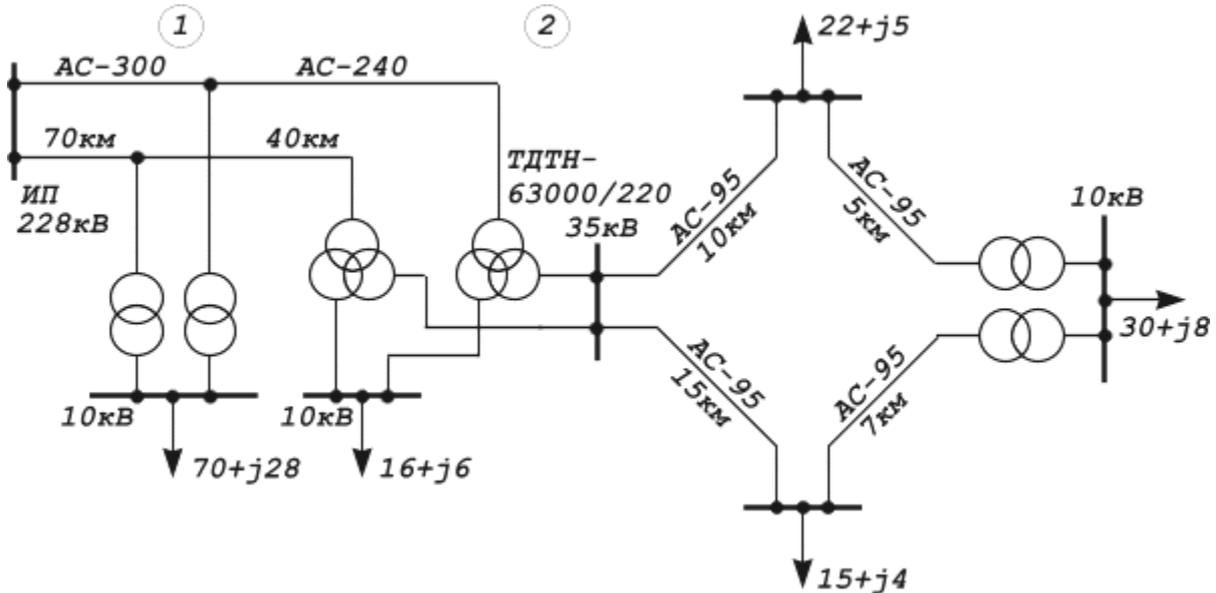
№ 2

Рассчитать режим сети двух напряжений 110 и 35 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать отпайки РПН трансформаторов подстанций 1 и 3 для поддержания на шинах подстанции 1 следующих уровней напряжения: 37 кВ и 10,4 кВ; подстанции 3 – 10,3 кВ.



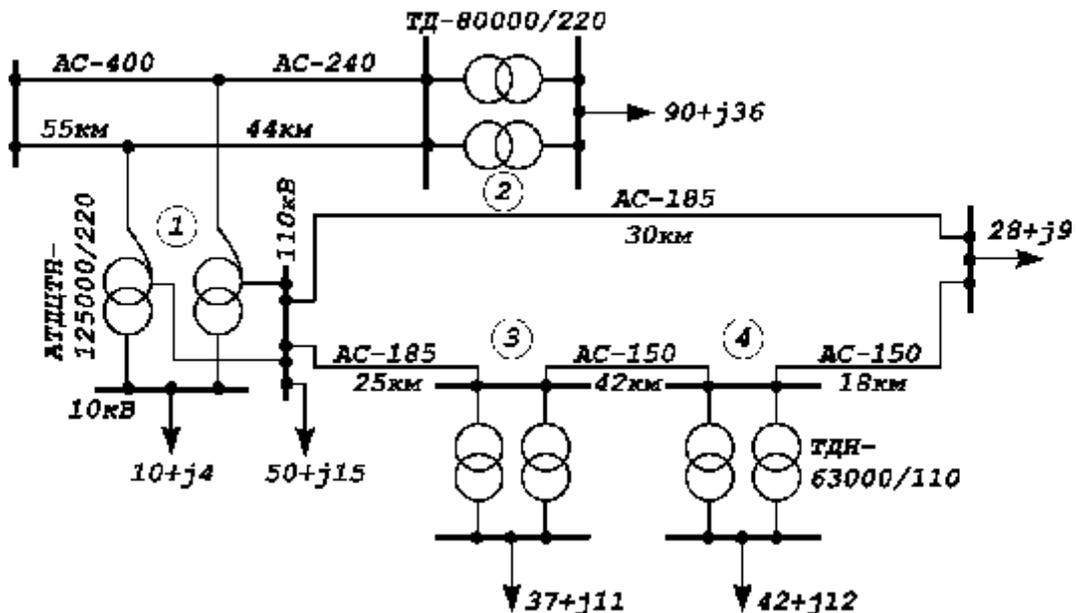
№ 3

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 35 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 10,4 кВ; подстанции 2 – 37,5 кВ и 10,4 кВ.



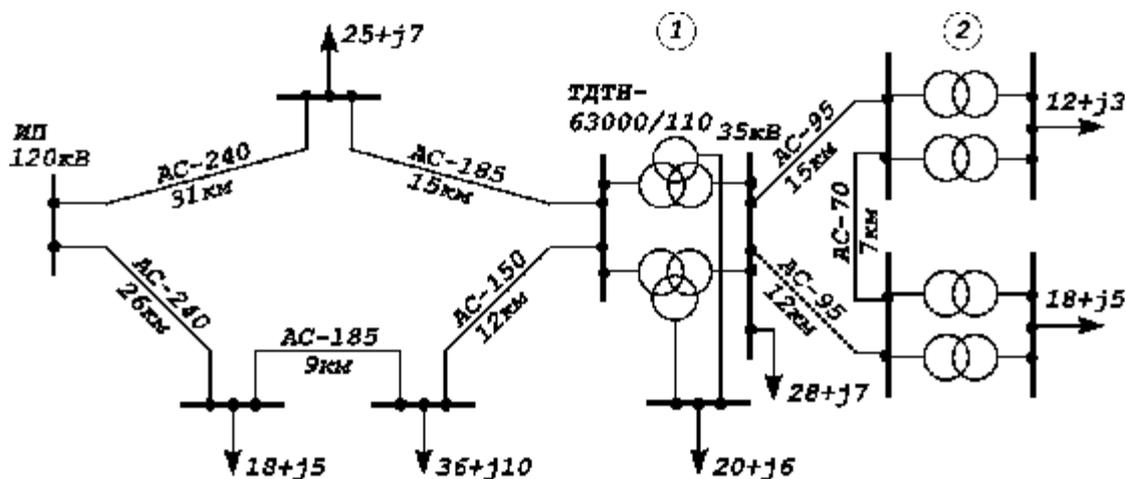
№ 4

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 120 кВ и 10,3 кВ; подстанции 4 – 10,4 кВ.



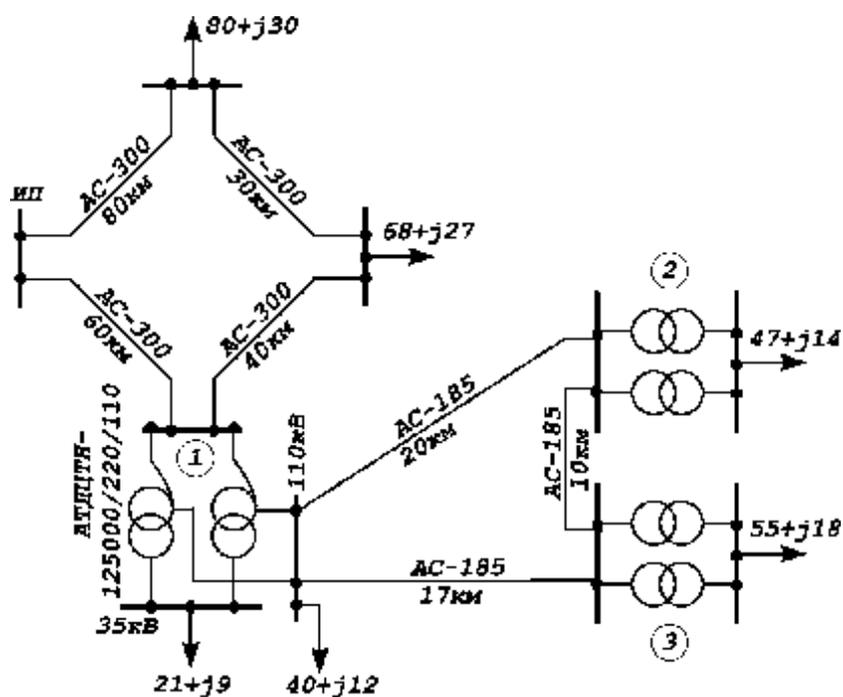
№ 5

Рассчитать режим сети двух напряжений 110 и 35 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 37,2 кВ и 10,3 кВ; подстанции 2 – 10,5 кВ.



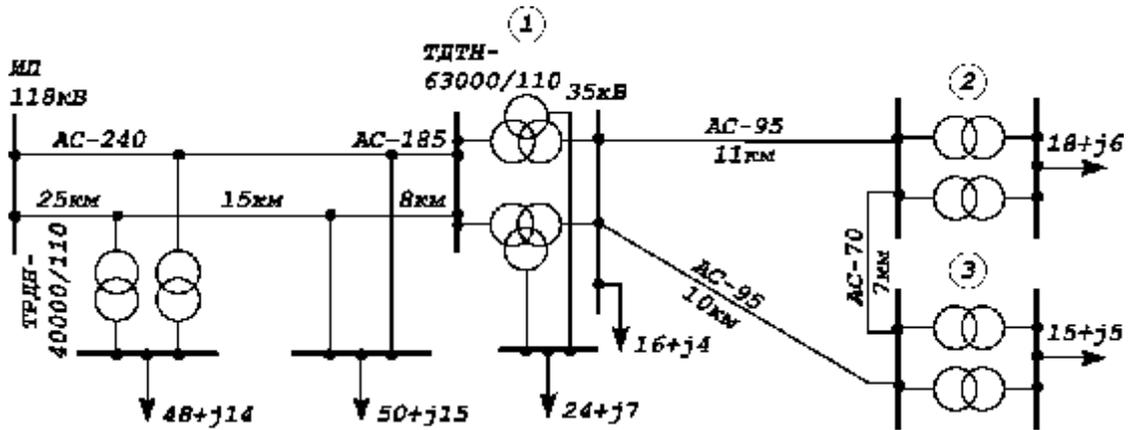
№6

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 119 кВ и 32,5 кВ; подстанции 3 – 10,1 кВ.



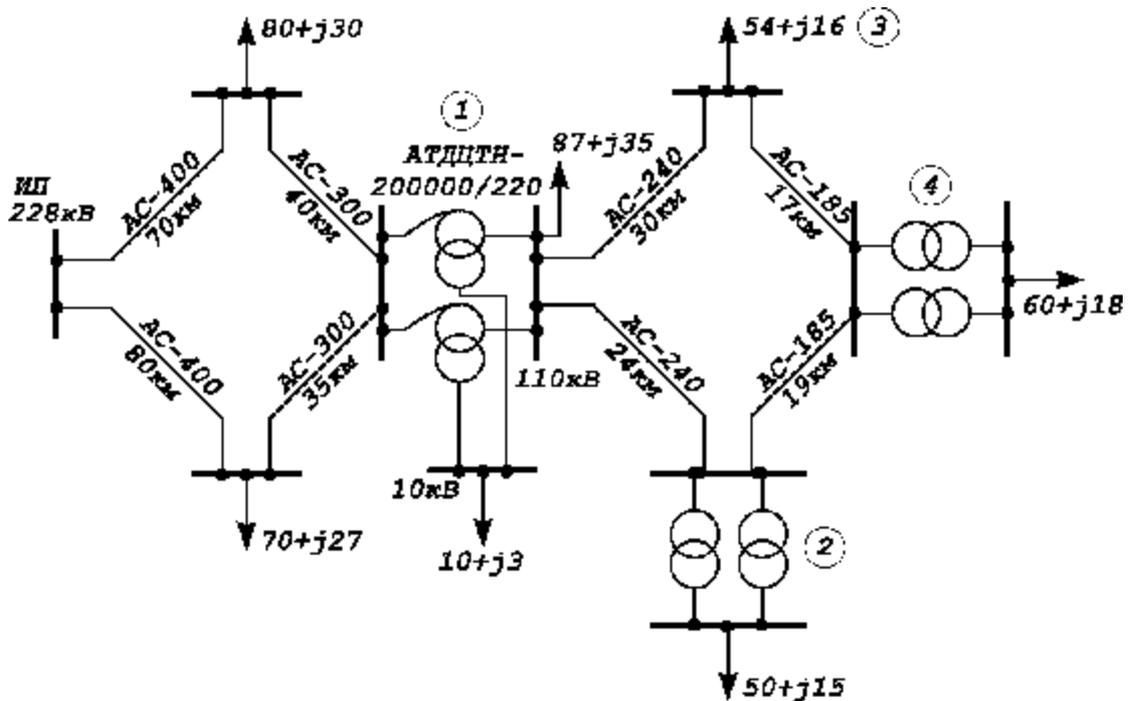
№ 7

Рассчитать режим сети двух напряжений 110 и 35 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 37 кВ и 10,4 кВ; подстанции 2 – 10,3 кВ.



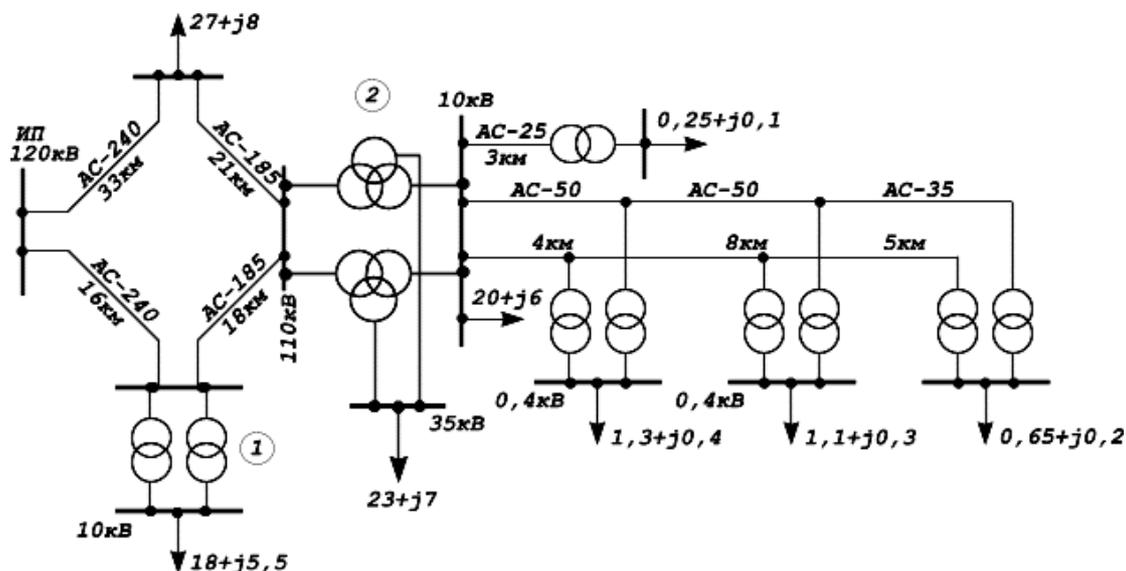
№ 8

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 121 кВ и 10,5 кВ; подстанции 4 – 10,0 кВ.



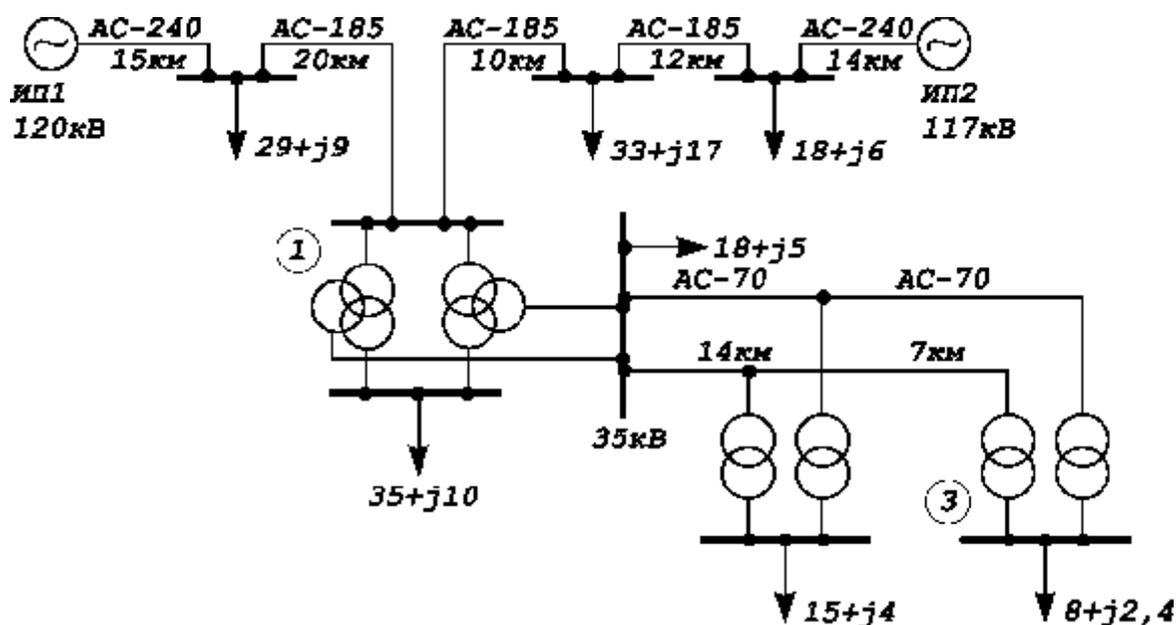
№ 9

Рассчитать режим сети двух напряжений 110 и 10 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 10,4 кВ ; подстанции 2 – 36,2 кВ и 10,2 кВ.



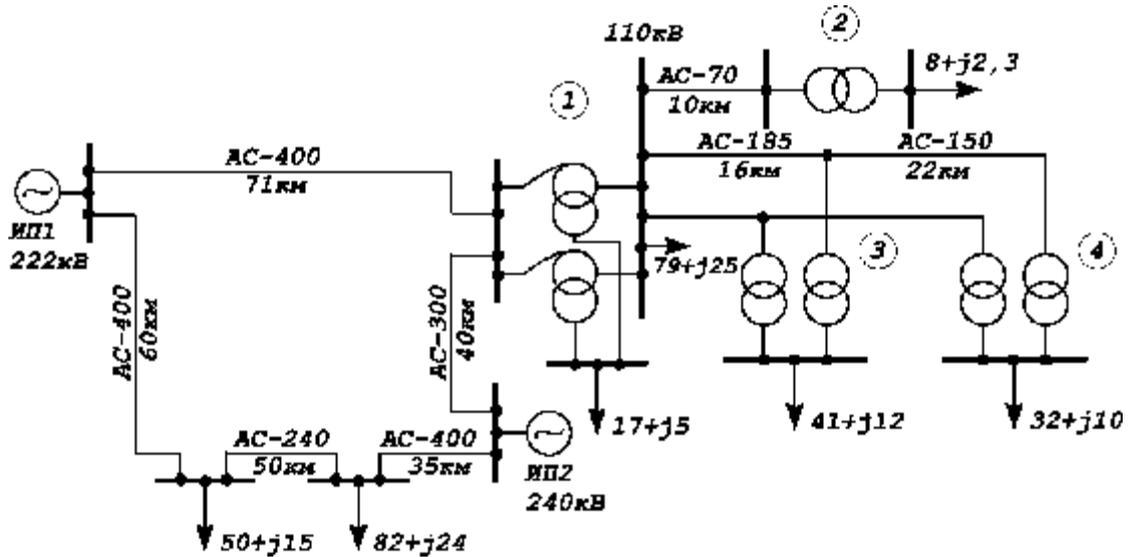
№ 10

Рассчитать режим сети двух напряжений 110 и 35 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 37,2 кВ и 10,5 кВ; подстанции 3 – 10,2 кВ.



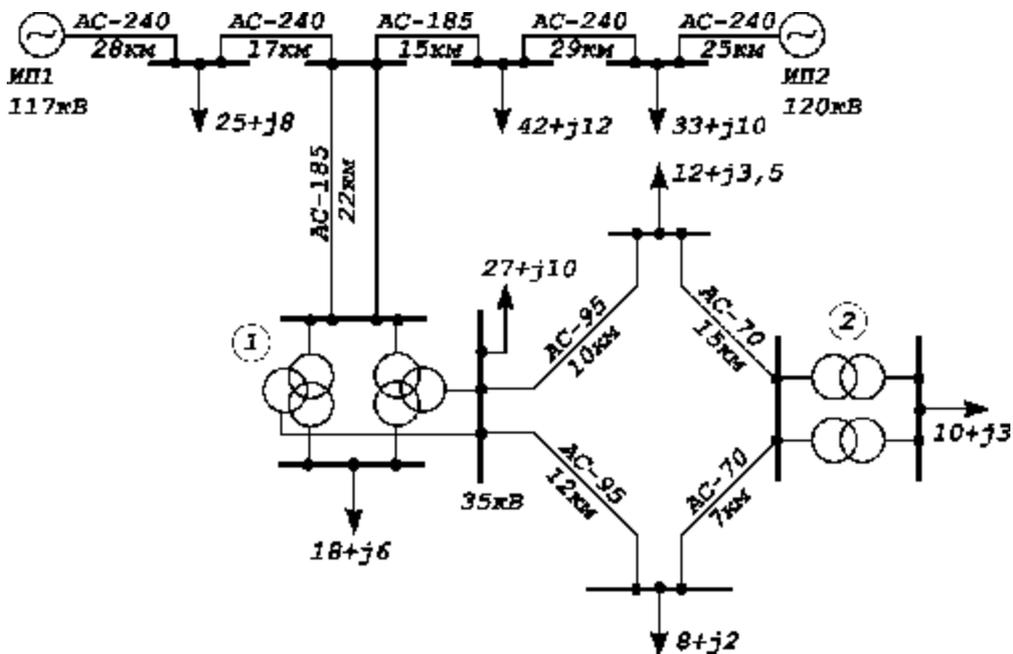
№11

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 118 кВ и 10,4 кВ; подстанции 4 – 10,5 кВ.



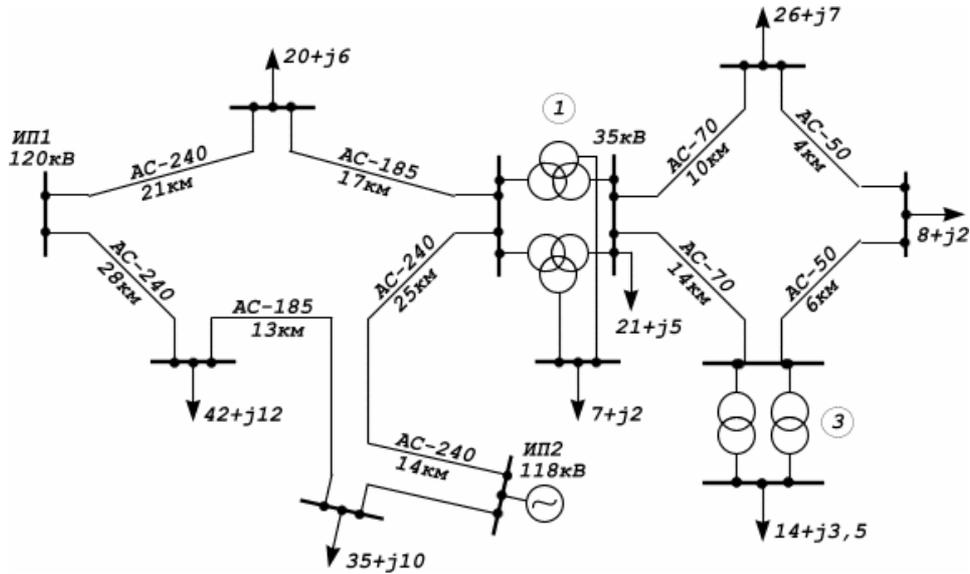
№ 12

Рассчитать режим сети двух напряжений 110 и 35 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 37,3 кВ и 10,3 кВ; подстанции 2 – 10 кВ.



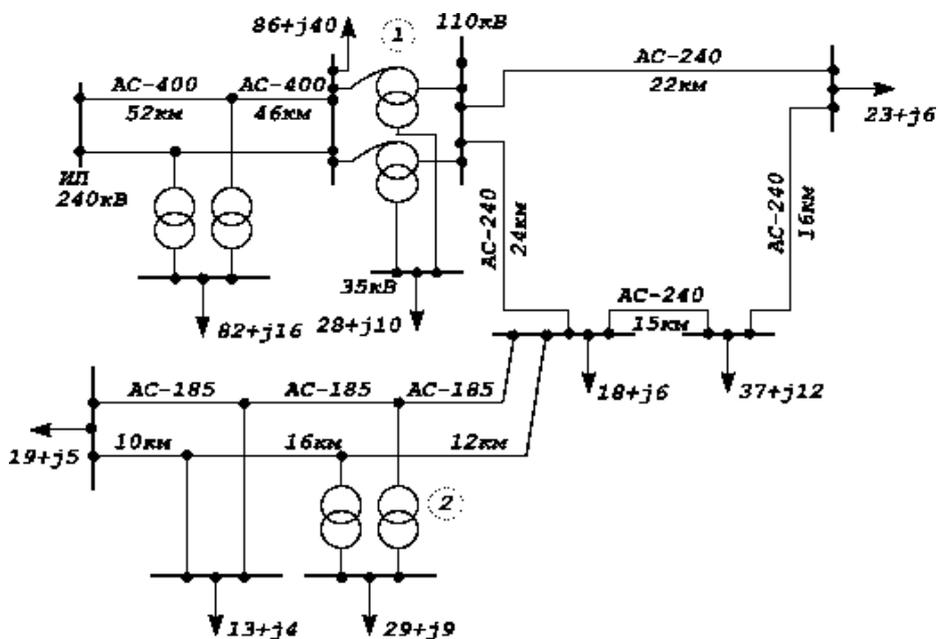
№13

Рассчитать режим сети двух напряжений 110 и 35 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 36,5 кВ и 10,5 кВ; подстанции 3 – 10,4 кВ.



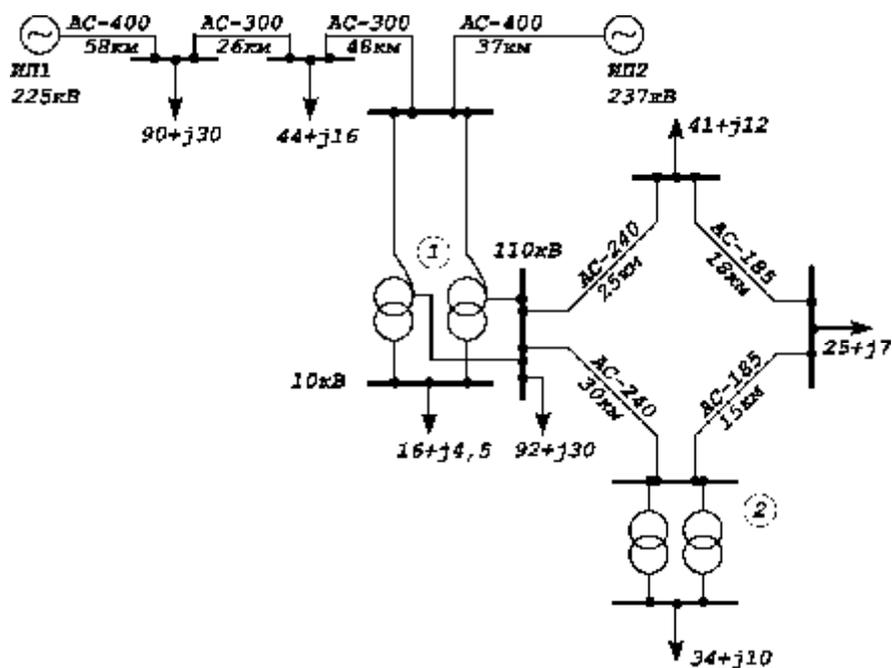
№14

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 119 кВ и 10,4 кВ; подстанции 2 – 10,3 кВ.



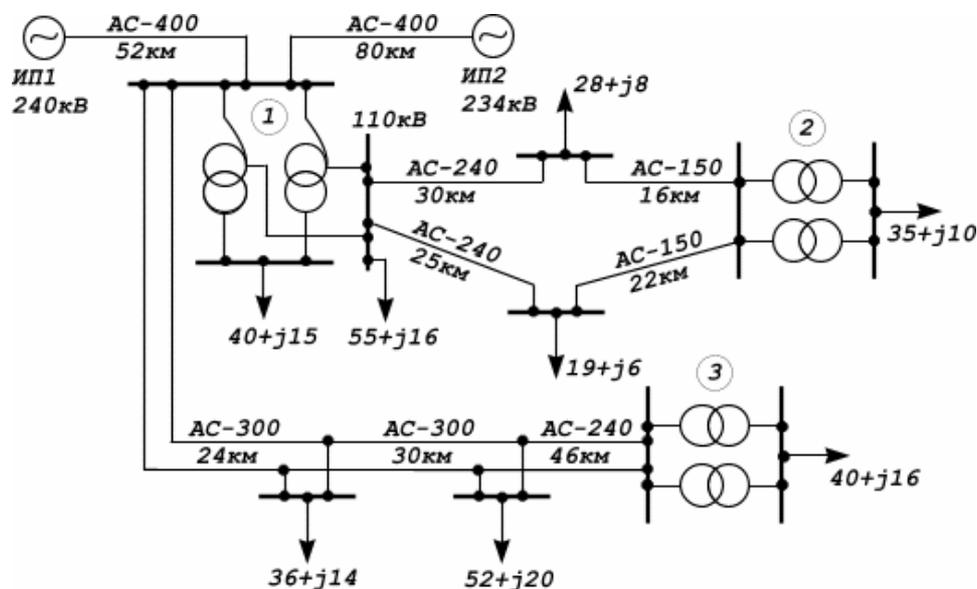
№ 15

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 118 кВ и 10,5 кВ; подстанции 2 – 10,4 кВ.



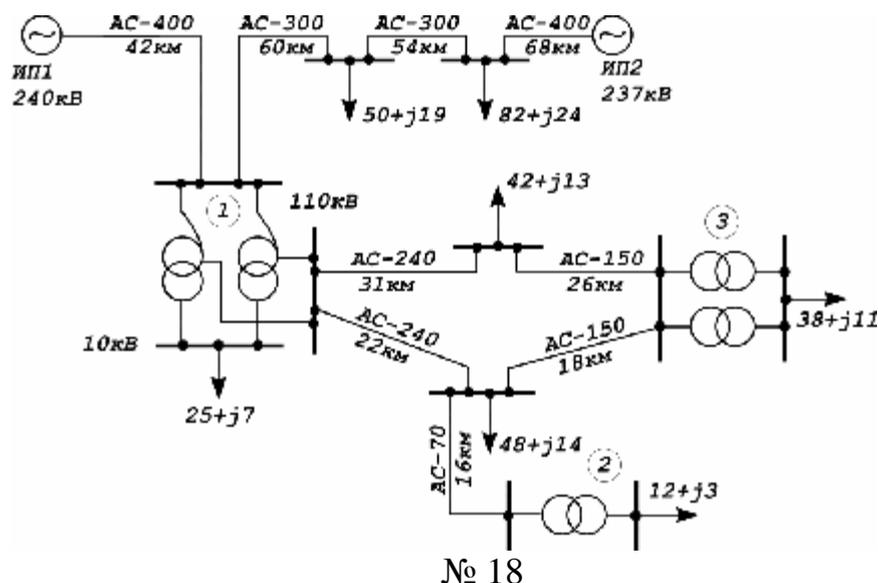
№ 16

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 119 кВ и 10,5 кВ; подстанции 3 – 10,2 кВ.

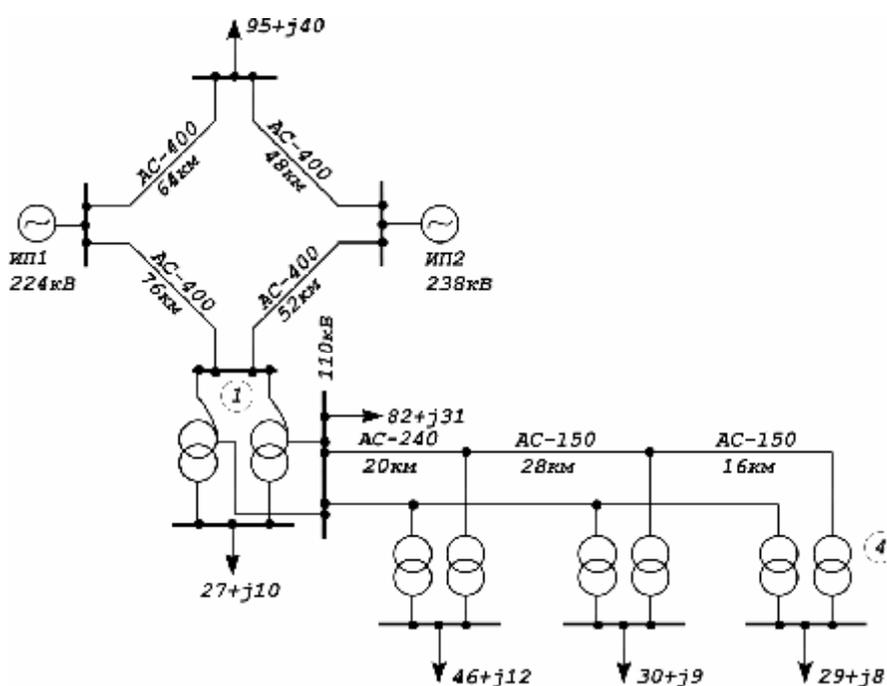


№ 17

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 116 кВ и 10,4 кВ; подстанции 3 – 10,5 кВ.

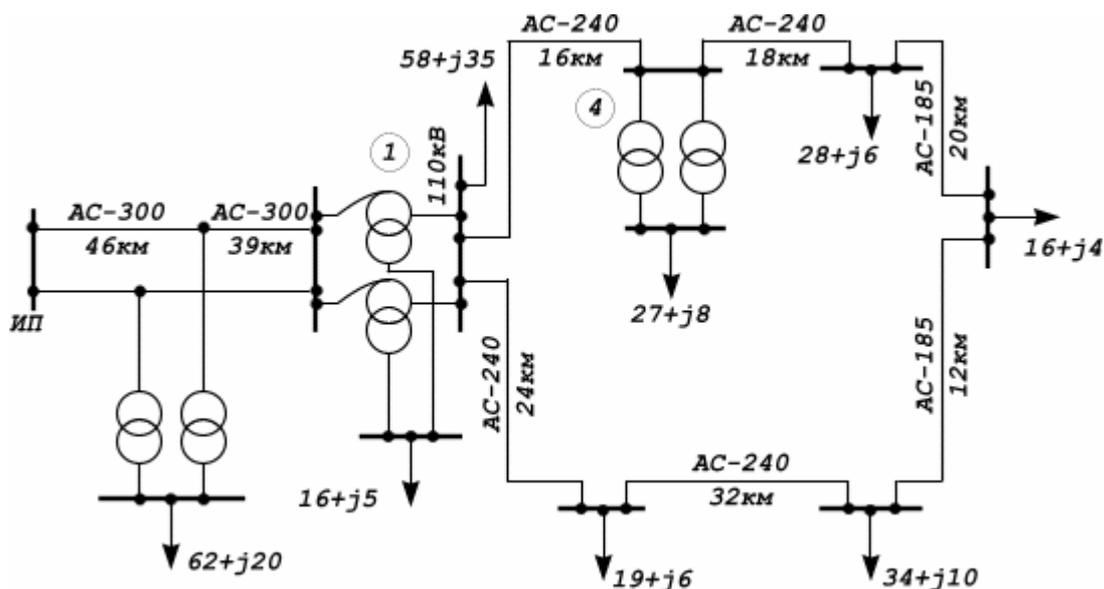


Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 119 кВ и 10,3 кВ; подстанции 2 – 10,4 кВ.



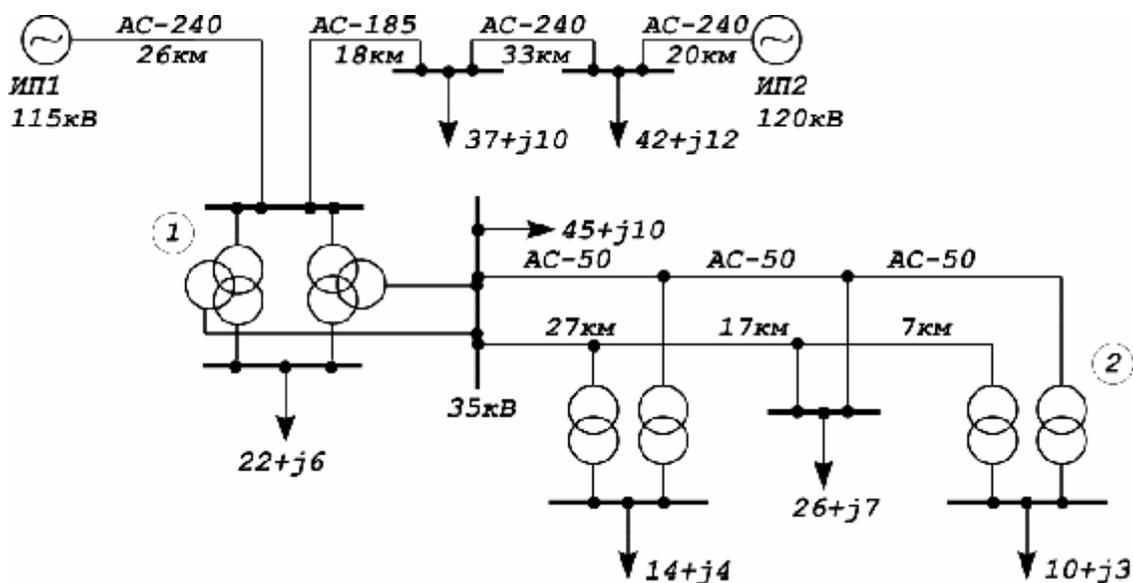
№ 19

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 120 кВ и 10,5 кВ; подстанции 4 – 10 кВ.



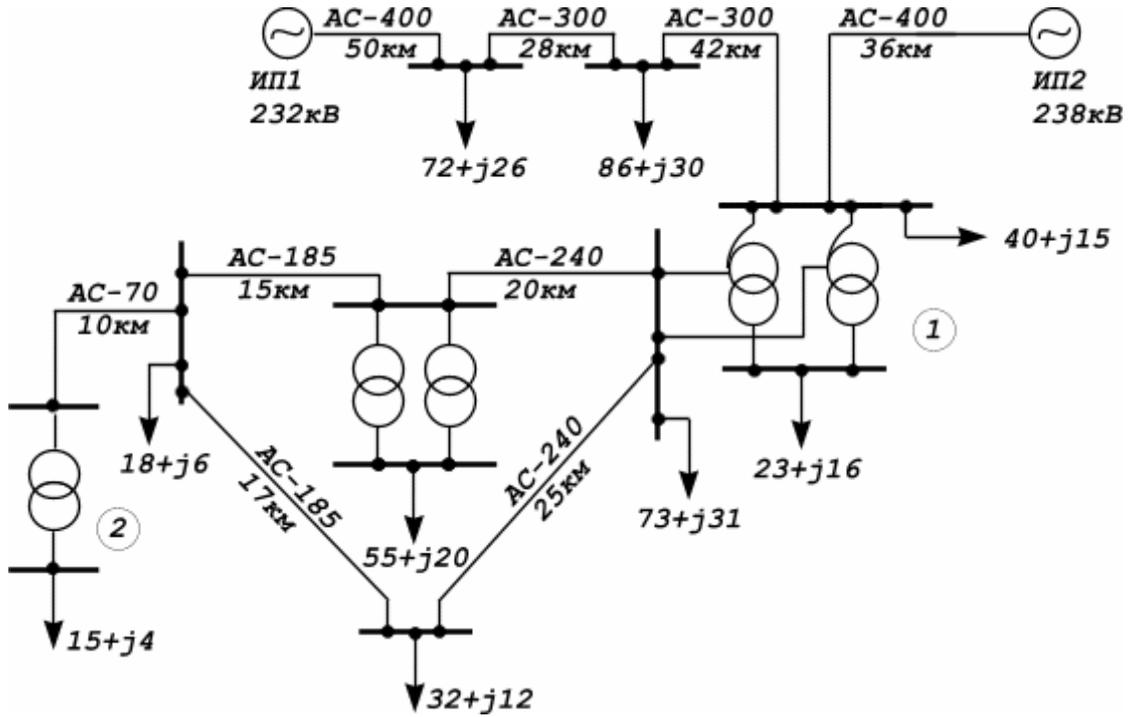
№ 20

Рассчитать режим сети двух напряжений 110 и 35 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 37 кВ и 10,4 кВ; подстанции 2 – 10,3 кВ.



№21

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаяк РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 120 кВ и 10,1 кВ; подстанции 2 – 10,2 кВ.



Литература

1. Электрические системы. Электрические сети: Учеб. для электроэнерг. спец. вузов / Под ред. В.А. Веникова, В.А.Строева. – М.: Высш. шк., 1998. – 511с.
2. *Идельчик В.И.* Электрические системы и сети. – М.: Высш. шк., 1989. – 592с.
3. *Поспелов Г.Е., Федин В.Т.* Электрические системы и сети. Проектирование. – Минск: Выш. шк., 1988. – 308с.
4. *Некленаев Б.Н., Крючков И.П.* Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 680с.
5. Пособие к курсовому и дипломному проектированию для электроэнергетических специальностей вузов / Под ред. В.М. Блок. – М.: Высш. шк., 1990. – 383с.
6. Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях. / Под ред. В.А. Веникова. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 504с.
7. Правила устройств электроустановок. / Минэнерго СССР. 8 изд. – М.: 1986. – 648с.
8. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / Под ред. С.С. Рокотяна, И.М. Шапиро. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 352с.
9. Электротехнический справочник: В 3 т. Т.3. Кн.1. Производство и распределение электрической энергии / Под общ. ред. профессоров МЭИ: И.Н. Орлова (гл. ред.) и др. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 880с.
10. *Гордон С.В.* Сооружение линий электропередачи. – М.: Энергоиздат, 1984. – 432с.

11. *Идельчик В.И.* Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288с.
12. *Боровиков В.А.* Электрические сети энергетических систем. – Л.: Энергия, 1977. – 392с.
13. Справочник по проектированию подстанций 35 – 500 кВ /Под ред. С.С. Рокотяна, Я.С. Самойлова. – М.: Энергоиздат, 1982.– 352с.
14. *Блок В.М.* Электрические сети и системы. – М.: Высш. шк., 1986. – 430с.
15. Справочник по проектированию систем электроснабжения / Под ред. Ю.Г. Барыбина и др. – М.: Энергоатомиздат, 1990 – 576с.
16. Инструктивные материалы по компенсации реактивной мощности и качеству электрической энергии. – М.: Минэнерго СССР, 1991. – 31с.