Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Амурский государственный университет»

«Кадры для регионов»

ФГБОУ ВПО «Амурский государственный университет»

Учебное пособие подготовлено в рамках реализации проекта о подготовке высококвалифицированных кадров для предприятий и организаций регионов («Кадры для регионов»)

Н.В. Савина, Ю.В. Мясоедов, В.Ю. Маркитан

ПРАКТИКУМ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЕТЯМ

Учебное пособие

Благовещенск
Издательство АмГУ

2014

ББК 31.27 я 73
С 13

Печатается по решению редакционно-издательского совета Амурского государственного университета

Разработано в рамках реализации гранта «Подготовка высококвалифицированных кадров в сфере электроэнергетики и горно-металлургической отрасли для предприятий Амурской области» по заказу предприятия-партнера ОАО «Дальневосточная распределительная сетевая компания»

Рецензенты:

Голубев Дмитрий Анатольевич, заместитель начальника инженерного центра филиала «Амурские электрические сети» ОАО «ДРСК»

Теличенко Денис Алексеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры АППиЭ ФГБОУ ВПО «Амурский государственный университет».

С 13 Савина Н.В. **Практикум по электрическим сетям:** учебное пособие / Н.В. Савина, Ю.В. Мясоедов, В.Ю. Маркитан. - Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2014. – 254 с.

В пособии изложены основные теоретические положения, методика и примеры решения задач по расчету установившихся режимов электрических сетей различных конфигураций и нескольких номинальных напряжений. Приведены задачи для самостоятельного решения. Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 (140400.62) «Электроэнергетика и электротехника», по профилям «Электрические станции», «Электроэнергетические системы и сети», «Электроснабжение», «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».

В авторской редакции.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Электроэнергетические системы и сети» является базовой при подготовке бакалавров по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника». 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 играет именно практическая подготовка, позволяющая глубже осмыслить и закрепить теоретический материал, а также получить навыки инженерных расчетов на примерах решения конкретных электроэнергетических задач. Учитывая это, в данном учебном пособии приведены краткая теоретическая часть по каждому разделу, методы и алгоритмы расчета режимов электрических сетей различных конфигураций, характерных для распределительных сетей, показано подробное решение задач по указанной тематике.

В пособии приводится около 150 примеров для самостоятельной проработки материала. Расчеты установившихся режимов электрических сетей трудоемки, поэтому целесообразно использовать программное обеспечение MathCad 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 бакалавров по различным профилям направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника», 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.

Пособие представляет собой сборник задач по электрическим сетям; включает задачи по определению параметров схем замещения основных элементов электрических сетей, расчетных нагрузок узлов, расчету установившихся режимов разомкнутых разветвленных электрических сетей, простых замкнутых сетей, сетей различной конфигурации, сетей с несколькими номинальными напряжениями, выбору ответвлений РПН трансформаторов и линейных регуляторов.

Соотнесенность материала сборника с наиболее характерными конфигурациями электрических сетей Дальнего Востока делает пособие полезным не только для бакалавров, но и для магистров, персонала энергетических предприятий.

Пособие предназначено для бакалавров, получающих подготовку по профилям «Электрические станции», «Электроэнергетические системы и сети», «Электроснабжение», «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника». Оно направлено на приобретение навыков по расчету установившихся режимов работы электрических сетей, по поддержанию уровней напряжений в узлах сети с помощью РПН силовых трансформаторов и линейных регуляторов.

Авторы выражают глубокую признательность рецензентам за ценные замечания и предложения, учтенные при подготовке рукописи к изданию.

1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ЛИНИЙ, СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

1.1. Воздушные и кабельные линии электропередачи

Рассмотрим схему замещения линии электропередачи (ЛЭП) с сосредоточенными параметрами: активным и индуктивным сопротивлением линии $r_л$ и $x_л$, активной и емкостной проводимостью линии $g_л$ и $b_л$.

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 длиной до 400 км используется П-образная схема замещения (рис. 1.1).

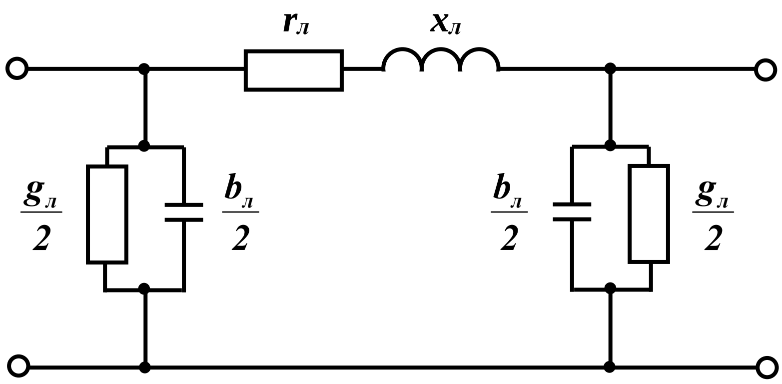


Рис. 1.1. П-образная схема замещения воздушной ЛЭП

Активное сопротивление линии определяется по формуле:

$$r_л = r_0 \cdot l, \text{ Ом}, \tag{1.1}$$

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

l - длина линии, км.

Активное сопротивление единицы длины провода 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):

$$r_0 = \frac{\rho}{F}, \quad Ом\,/\,км \tag{1.2}$$

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

ρ - удельное сопротивление Ом·мм^2/км.

Для алюминия $\rho = 28{,}9$ ***Ом·мм²/км;***

для меди $\rho = 18{,}8$ ***Ом·мм²/км;***

для сталеалюминиевых проводов $\rho = 31{,}5$ ***Ом·мм²/км.***

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

$$r_{0,\,t} = r_0 \cdot [1 + \alpha_T(t - 20)],\ Ом, \tag{1.3}$$

где α_T - температурный коэффициент, ***1/ °С***, равный ***0,004*** для сталеалюминиевых проводов;

$\alpha_T = 0{,}0043$ ***1/ °С*** для медных проводов;

t - температура провода, °С.

Индуктивное сопротивление фазы линии определяется следующим образом:

$$x_л = x_0 \cdot l,\ Ом, \tag{1.4}$$

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.

При расчетах симметричных режимов погонное индуктивное сопротивление определяется зависимостью:

$$x_0 = 0{,}1445 \cdot lg\left(\frac{D_{ср}}{R}\right) + 0{,}0157\mu,\ Ом\,/\,км, \tag{1.5}$$

где $D_{ср}$ - 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:

$$D_{ср} = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{BC} \cdot D_{CA}}, \text{ м}, \qquad (1.6)$$

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 $D_{ср} = \sqrt[3]{2}D$ (см. рис. 1.2).

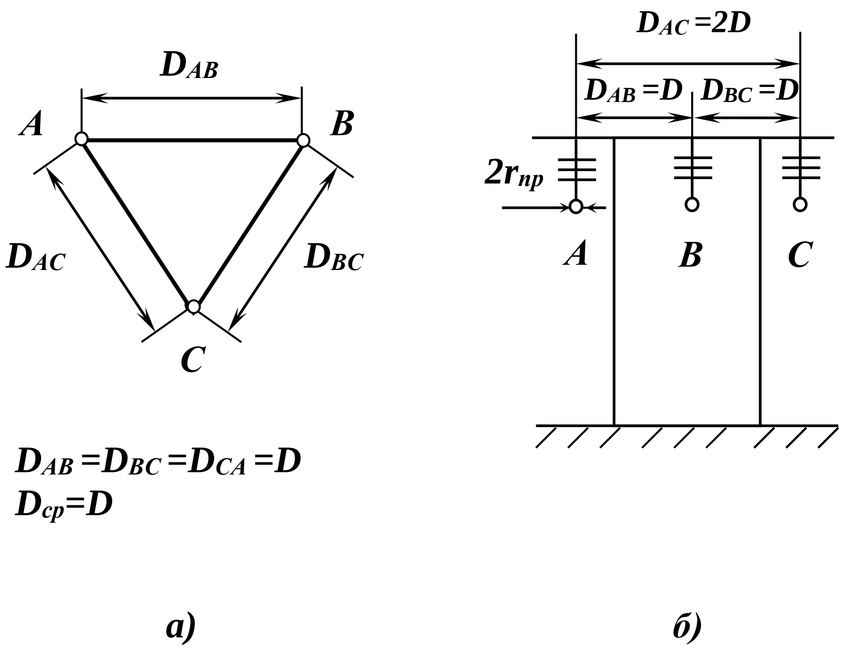


Рис. 1.2. Расположение проводов линии электропередачи:

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

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

$$R_{эк} = \sqrt[n]{R \cdot a^{n-1}}, \tag{1.7}$$

где $\boldsymbol{n}$ - число проводов в фазе;

$\boldsymbol{a}$ - расстояние между осями проводов в расщепленной фазе, мм.

Например, при расщеплении провода на 4:

$$R_{эк} = \sqrt[4]{R \cdot a^{3}}. \tag{1.8}$$

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

$$x_0 = 0{,}1445 lg\left(\frac{D_{ср}}{R_{эк}}\right) + \frac{0{,}0157}{n}. \tag{1.9}$$

Для кабельных линий погонное индуктивное сопротивление $\boldsymbol{x_0}$ определяют из таблиц физико-химических данных.

Активная проводимость линии электропередачи $\boldsymbol{g_0}$ определяется потерями активной мощности на «корону» (коронный разряд) 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.

«Корона» возникает, когда на поверхности провода напряженность электрического поля (его градиент) превышает электрическую прочность воздуха, т.е.:

$$E_{пов} \geq E_{кор},$$

где $E_{кор} = 30 \div 32$ *кВ/см*.

Расчет погонной активной проводимости для воздушных линий производится по формуле:

$$g_0 = \left(\frac{\Delta P_0}{U_ф^2}\right) \cdot 10^{-3},\ См/км, \tag{1.10}$$

где ΔP_0 - потери активной мощности на «корону» на 1 км, кВт;

$U_ф$ - напряжение фазы, кВ.

Потери активной мощности 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:

$$U_{кф} = 48{,}9 \cdot m_0 \cdot m_n \cdot \delta \cdot R \cdot lg\left(\frac{D_{ср}}{R}\right),\ кВ, \tag{1.11}$$

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

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;

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

Для проводов, расположенных горизонтально:

$U'_{кф} = 0{,}96U_{кф}$ - для среднего провода;

$U'_{кф} = 1{,}06U_{кф}$ - для крайнего провода.

Потери мощности на «корону» определяются из выражения:

$$\Delta P_0 = \left(\frac{0{,}18}{\delta}\right) \cdot \sqrt{\frac{R}{D_{ср}}} \cdot (U_ф - U_{кф})^2,\ кВт/км. \qquad (1.12)$$

Для исключения условий возникновения «короны» определены минимальные сечения и диаметры проводов для различных номинальных напряжений (см. табл. 1.1).

Таблица 1.1. - 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:

$$g_0 = \left(\frac{\Delta P_0'}{U_ф^2}\right) \cdot 10^{-3}, См/км, \qquad (1.13)$$

где $\Delta P_0'$ - потери активной мощности в изоляции, отнесенные к одной фазе и определяемые зависимостью

$$\Delta P_0' = U_ф^2 \cdot \omega \cdot C_0 \cdot tg\delta, \qquad (1.14)$$

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

$tg\delta$ - тангенс угла диэлектрических потерь в изоляции при фазном напряжении.

Активная проводимость линии равна:

$$g_л = g_0 \cdot l. \qquad (1.15)$$

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:

$$b_0 = \left(\frac{7{,}58}{lg\dfrac{D_{ср}}{R}} \right) \cdot 10^{-6}. \tag{1.16}$$

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

$$Q_c = \frac{1}{2} \cdot U^2 b_0 \cdot l, квар, \tag{1.17}$$

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

$$\underline{z}_0 = r_0 + jx_0, \tag{1.18}$$

следовательно, модуль полного сопротивления определяется как:

$$z_0 = \sqrt{r_0^2 + x_0^2}. \tag{1.19}$$

Комплекс полной поперечной проводимости единицы длины линии записывается следующим образом:

$$\underline{y}_0 = g_0 - jb_0, \tag{1.20}$$

а ее модуль

$$y_0 = \sqrt{g_0^2 + b_0^2}. \tag{1.21}$$

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

При расчете установившихся режимов сетей до 220 кВ включительно активная проводимость практически не учитывается (см. рис. 1.3а). 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 используется реактивная мощность, генерируемая емкостью линий, $\boldsymbol{Q_c}$, (см. рис. 1.3б).

Для воздушных линий $\boldsymbol{U_{ном} \leq 35}$ ***кВ*** в схеме замещения присутствуют только активные и индуктивные сопротивления (см. рис. 1.3в).

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. 1.1).

В схемах замещения кабельных линий высокого напряжения необходимо учитывать $\boldsymbol{Q_c}$, и при напряжении > 220 кВ - активную проводимость $\boldsymbol{g_л}$.

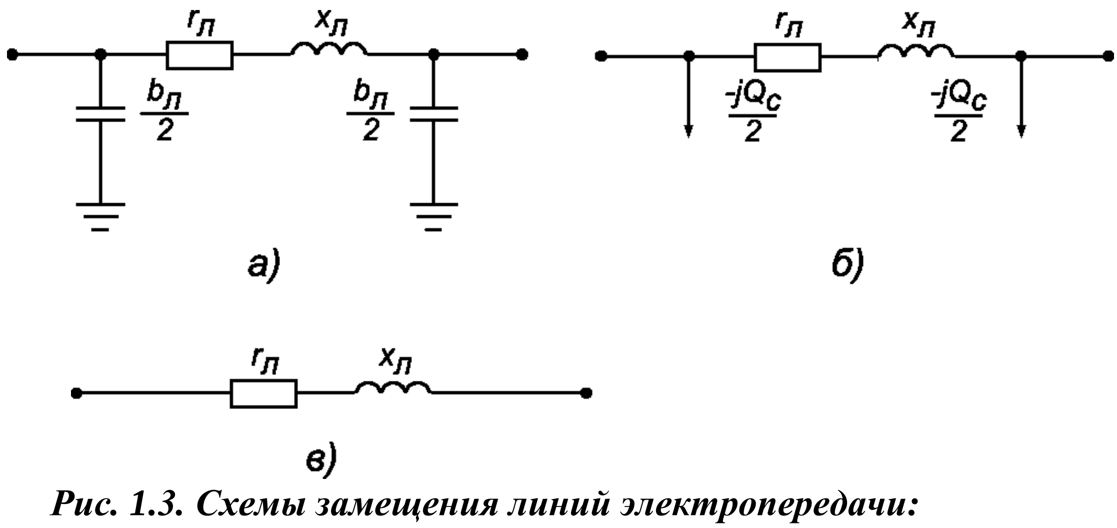


Рис. 1.3. Схемы замещения линий электропередачи:

а), б) воздушная линия 110-220 кВ с емкостной проводимостью и с реактивной мощностью, генерируемой емкостью линии;

в) воздушная или кабельная линия напряжением ≤ 35 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 [7], определяем погонные параметры провода АС-70/11:

активное сопротивление 1 км линии $r_0 = 0{,}429$ **Ом /км**;

индуктивное сопротивление 1 км линии $x_0 = 0{,}444$ **Ом /км**;

емкостную проводимость 1 км линии $b_0 = 2{,}55\cdot10^{-6}$ **См /км**.

Определяем параметры схемы замещения:

Активное сопротивление: $r = r_0 \cdot l = 0{,}429\cdot40 = 17{,}16$ **Ом**;

индуктивное: $x = x_0 \cdot l = 0{,}444\cdot40 = 17{,}76$ **Ом**;

емкостная проводимость: $B = b_0 \cdot l = 2{,}55\cdot10^{-6}\cdot40 = 1{,}02\cdot10^{-4}$ **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 [7].

Активное сопротивление единицы длины линии равно:

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

Активное сопротивление линии: $r = r_0 \cdot l = 0{,}425\cdot40 = 17$ **Ом**.

Для расчета погонного индуктивного сопротивления определим средне-геометрическое расстояние между фазами:

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

и по справочным данным [7] найдем радиус провода ***R=5,7 см***. Тогда погонное индуктивное сопротивление будет равно:

$$x_0 = 0,1445 \cdot \lg(\frac{D_{ср}}{R}) + 0,0157\mu = 0,1445 \cdot \lg(\frac{504}{0,57}) + 0,0157 = 0,44 \text{ Ом/км.}$$

Индуктивное сопротивление линии: $x = x_0 \cdot l = 0,44 \cdot 40 = 17,6$ ***Ом.***

Емкостная проводимость определяется следующим образом:

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

В схеме замещения она делится пополам и разносится по концам линии

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

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 $m_n=1$, $\delta=1$, при плохой погоде $m_n=0,8$, $\delta=0,9$.

Критическое напряжение «короны» для крайних фаз определяется так:

$$U_{кф} = 48,9 m_0 m_n \delta R\, lg(\frac{D_{ср}}{R}) = 4,89 \cdot 0,85 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,57 \cdot lg(\frac{5,04}{0,0057}) = 69,8 \text{ кВ,}$$

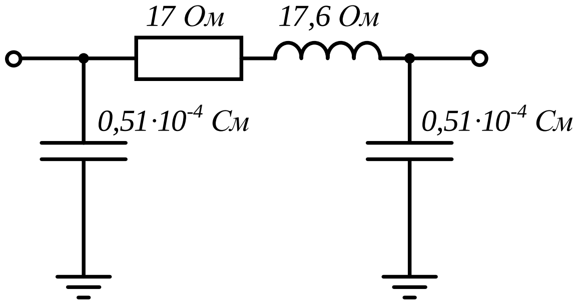
а для среднего провода равно

$$U'_{кф} = 0,96 U_{кф} = 67 \text{ кВ.}$$

Фазное напряжение линии равно $U_Ф = \frac{110}{\sqrt{3}} = 63,5$ кВ

Т.к. фазное напряжение линии меньше критического, то на всем протяжении линии «короны» не будет. Можно и по табл. 1.1 без расчета определить, что для провода марки АС - 70/11 учитывать потери на «корону» при напряжении 110 кВ не нужно.

Покажем схему замещения линии с рассчитанными параметрами:



Пример 1.2.

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

Решение

Активное сопротивление кабельной линии равно:

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

Погонное индуктивное сопротивление трехжильного кабеля с бумажной изоляцией сечением ***10 мм²*** равно $x_0 = 0,11$ ***Ом/км*** [7]. Тогда индуктивное сопротивление линии согласно справочным данным будет:

$$X = x_0 \cdot l = 0,11 \cdot 6 = 0,66 \ Ом.$$

Соотношение индуктивного и активного сопротивлений равно:

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

Зарядная мощность кабельных линий при погонной емкостной проводимости, равной согласно [7] $g_0 = 0,6 \cdot 10^{-4}$ ***См /км,*** составляет:

$$Q_c = U_2 \cdot g_0 \cdot l = 6^2 \cdot 0,6 \cdot 10^{-4} \cdot 6 = 13 \ квар.$$

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

Соотношение зарядной и полной мощности равно:

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

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. Изменятся 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 мм^2. Составить схемы замещения линий и рассчитать их параметры. Произвести анализ полученных результатов.

№11

Одноцепная ЛЭП - 110 кВ протяженностью 50 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, провода АС 150/24 будут заменены на композитный провод ACCR 297-T16? Рассчитать параметры схемы замещения в обоих случаях. Расстояние между фазами - 5 м. Данные композитного провода взять из справочника.

№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

Потребитель связан с источником электроэнергии воздушной линией 35 кВ, выполненной проводом марки АС-120/19, протяженностью 20 км. На сколько изменится полное сопротивление линии, если провод АС заменить на провод СИП-3 с сечением 120 мм^2? Рассчитать аналитически параметры схемы замещения воздушной линии при расстоянии между фазами, равном 3,2 м. Удельные параметры СИП-3 взять из справочника.

№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.

№ 17

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.

№ 18

Воздушная линия напряжением 330 кВ выполнена проводами марки АСК-300/39 с расщеплением фазы на два провода. Расстояние между проводами в расщеплении 400 мм, а длина линии - 180 км. Определить параметры схемы замещения. Расстояние между фазами - 8 м. Во сколько раз отличаются параметры схемы замещения от варианта, в котором провод АСК-300/39 с расщеплением фазы заменен на композитный провод ACCR 573-T16?

№ 19

Потребитель связан с источником двумя линиями 10 кВ. Длина линии равна 15 км. Одна из них выполнена кабелем с алюминиевыми жилами с бумажной изоляцией сечением 70 мм^2. Вторая линия выполнена самонесущим изолированным проводом СИП-3 с сечением 70 мм^2 . Составить схемы замещения линий и рассчитать их параметры. Произвести анализ полученных результатов.

№ 20

Линия электропередач напряжением 330 кВ выполнена проводом марки АС-400/41 и имеет протяженность 130 км. Изменятся 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. Сравнить оба варианта с заменой сталеалюминевых проводов на композитный провод ACCR 824-T16 и сделать вывод.

№ 21

Линия электропередач напряжением - 10 кВ, выполнена проводом ПМС-35. Длина линии 10 км. Как изменятся параметры схемы замещения линии, если провод марки ПМС-35 заменить на провод марки СИП-3 м сечением 35 мм^2?

№ 22

Линия электропередач напряжением 110 кВ протяженностью 65 км выполнена проводом АС-185/24. Расстояние между фазами 4 м. Изменятся ли параметры схемы замещения, если подвеску проводов по вершинам равностороннего треугольника заменить на горизонтальную подвеску проводов на опоре? Рассчитать параметры схемы замещения аналитически и сравнить со справочными данными.

№ 23

Как изменятся параметры схемы замещения и сама схема линии электропередач, если первоначально была линия напряжением 110 кВ, выполненная на металлических опорах с горизонтальной подвеской проводов, длиной 115 км и проводом АСКП-240/39, а затем ее изменили на ЛЭП -220 кВ с композитным проводом ACCR 470-T16? Расстояние между фазами при напряжении 110 кВ - 4 м

№ 24

Одноцепная ЛЭП - 35 кВ протяженностью 25 км выполнена на металлических двухцепных опорах проводом марки АС-70/11. Компоновка проводов на опоре - горизонтальная. Как изменятся параметры схемы замещения ЛЭП - 35 кВ, если будет подведена вторая цепь, аналогичная первой? Рассчитать параметры схемы замещения в обоих случаях. Расстояние между фазами - 3 м.

№ 25

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?

1.2. Силовые трансформаторы и автотрансформаторы

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, $\Delta P_к$;

напряжение короткого замыкания, $u_к$;

потери активной мощности в режиме холостого хода, ΔP_x;

ток холостого хода, I_x.

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: $\Delta P_{к,\,в\text{-}н}$; $\Delta P_{к,\,с\text{-}н}$; $\Delta P_{к,\,в\text{-}с}$, **%**, 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: $u_{к,\,в\text{-}н}$; $u_{к,\,в\text{-}с}$; $u_{к,\,с\text{-}н}$, **%**, 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.

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

$$S_т = \sqrt{3} I_1 \cdot U_1 \left(1 - \frac{U_2}{U_1} \right) = S_{AT\,ном} \left(1 - \frac{1}{K_{AT}} \right), \qquad (1.22)$$

где $\boldsymbol{K_{AT}} = \boldsymbol{U_1 / U_2}$.

Очевидно, что $\boldsymbol{S_m} < \boldsymbol{S_{AT\,ном}}$, поэтому выражение $\boldsymbol{(1 - 1 / K_{AT})}$ называют коэффициентом выгодности, $\boldsymbol{\alpha}$. Тогда $\boldsymbol{S_m = \alpha \cdot S_{AT\,ном}}$.

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 - $\boldsymbol{u_{к\,в\text{-}с}}$, $\boldsymbol{\Delta P_{к\,в\text{-}с}}$ отнесенные к номинальной мощности, а между обмотками ВН и НН - $\boldsymbol{u_{к\,в\text{-}н}}$, $\boldsymbol{\Delta P_{к\,в\text{-}н}}$, и СН-НН - $\boldsymbol{u_{к\,с\text{-}н}}$, $\boldsymbol{\Delta P_{к\,с\text{-}н}}$ - 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. 1.4.

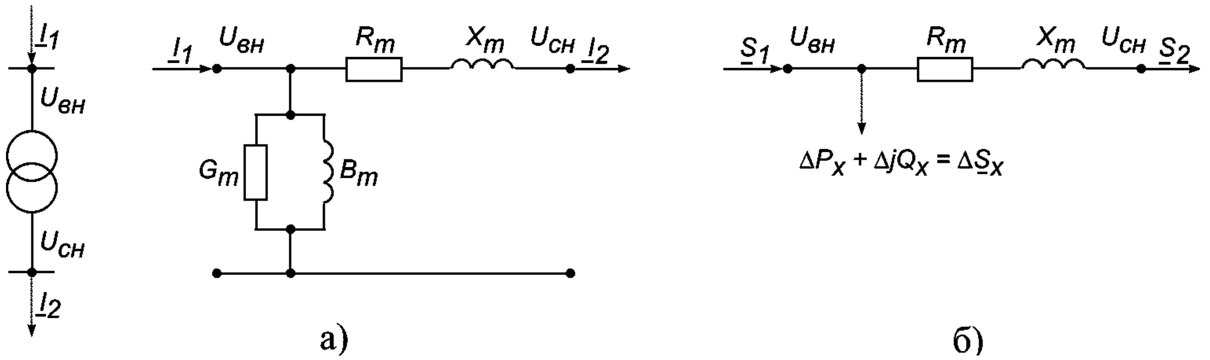


Рис. 1.4. Г-образная схема замещения трансформатора.

На рис. 1.4 поперечная ветвь проводимостей представлена:

а) ветвью проводимостей;

б) потерями мощности ХХ.

Активное сопротивление в схеме замещения для одной фазы определяется по выражению:

$$R_т = \frac{\Delta P_к \cdot U_{вн}^2}{S_{т\,ном}^2}. \qquad (1.23)$$

Индуктивное сопротивление трансформатора определяется по формуле:

$$X_т = \frac{u_{р,\%} \cdot U_{вн}^2}{100 \cdot S_{т\,ном}}, \qquad (1.24)$$

где $u_р = \sqrt{u_к^2 - u_а^2}$ - индуктивная составляющая напряжения КЗ, равная падению напряжения на индуктивном сопротивлении трансформатора;

$u_а$ - активная составляющая напряжения КЗ, равная:

$$u_{а,\%} = \frac{\sqrt{3} I_{вн} R_т}{U_{вн}} \cdot 100\% = \frac{\Delta P_к}{S_{т\,ном}} \cdot 100\%, \qquad (1.25)$$

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

Для современных мощных трансформаторов $R_т << X_т$ и $u_р \approx u_к$.

Следовательно: $$X_т = \frac{u_{к,\%} \cdot U_{вн}^2}{100 \cdot S_{т\,ном}}. \qquad (1.26)$$

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

$$G_т = \frac{\Delta P_х}{U_{вн}^2}. \qquad (1.27)$$

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

$$B_т = \frac{\Delta Q_х}{U_{вн}^2}, \qquad (1.28)$$

где $\Delta Q_х$ - потери реактивной мощности, определяемые реактивной составляющей вектора тока холостого хода, т.е.

$$I_{x,p} = \sqrt{I_x^2 - I_{x,a}^2}\,. \tag{1.29}$$

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

$$\Delta Q_x = \frac{I_{x,\%}}{100} \cdot S_{т\,ном}\,. \tag{1.30}$$

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

$$\underline{Z}_{т\Sigma} = \frac{R_т + jX_т}{n_т}\,, \tag{1.31}$$

$$\underline{Y}_{т\Sigma} = n_т\,(G_т + jB_т) \tag{1.32}$$

или

$$\Delta\underline{S}_x = n_т\,(\Delta P_x + j\Delta Q_x). \tag{1.33}$$

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. 1.5а), либо с заменой ее постоянным отбором мощности в режиме холостого хода (рис. 1.5б).

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:

$$R_т = \frac{\Delta P_к \cdot U_н^2}{S_{т\,ном}^2}\,, \tag{1.34}$$

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

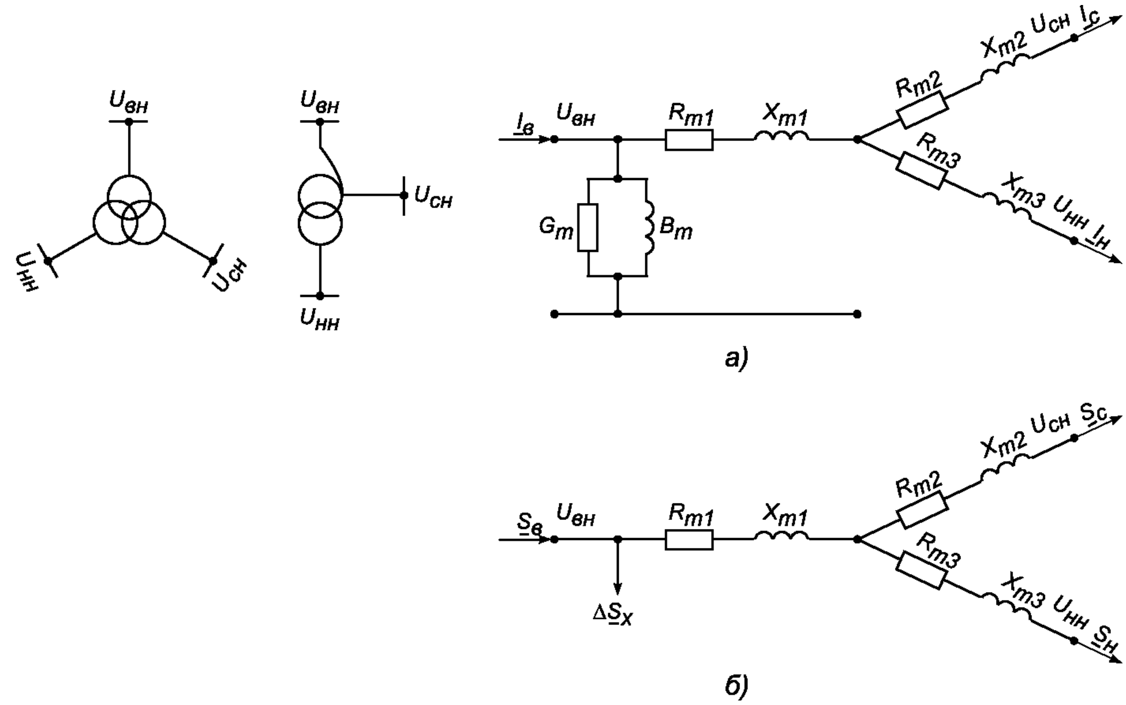


Рис. 1.5. Схема замещения трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов.

На рис. 1.5 поперечная ветвь проводимостей представлена:

а) ветвью проводимостей;

б) потерями мощности ХХ.

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

$$\boldsymbol{R_{т1} = R_{т2} = R_{т3} = 0{,}5\ R_{общ}}\,. \tag{1.35}$$

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:

$$\left.\begin{aligned}
&\Delta P_{к1} = \Delta P_{к,\,в} = 0{,}5\,(\Delta P_{к,\,в\text{-}с} + \Delta P_{к,\,в\text{-}н} - \Delta P_{к,\,с\text{-}н})\\
&\Delta P_{к2} = \Delta P_{к,\,с} = 0{,}5\,(\Delta P_{к,\,в\text{-}с} + \Delta P_{к,\,с\text{-}н} - \Delta P_{к,\,в\text{-}н})\\
&\Delta P_{к3} = \Delta P_{к,\,н} = 0{,}5\,(\Delta P_{к,\,в\text{-}н} + \Delta P_{к,\,с\text{-}н} - \Delta P_{к,\,в\text{-}с})
\end{aligned}\right\}, \tag{1.36}$$

$$R_{т1} = \frac{\Delta P_{к1} \cdot U_{вн}^2}{S_{т\,ном}^2}, \tag{1.37}$$

$$R_{т2} = \frac{\Delta P_{к2} \cdot U_{вн}^2}{S_{тном}^2}, \quad (1.38)$$

$$R_{т3} = \frac{\Delta P_{к3} \cdot U_{вн}^2}{S_{тном}^2}. \quad (1.39)$$

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

$$\left.\begin{aligned} u_{к1} &= u_{к,\,в} = 0{,}5\,(u_{к,\,в\text{-}с} + u_{к,\,в\text{-}н} - u_{к,\,с\text{-}н}) \\ u_{к2} &= u_{к,\,с} = 0{,}5\,(u_{к,\,в\text{-}с} + u_{к,\,с\text{-}н} - u_{к,\,в\text{-}н}) \\ u_{к3} &= u_{к,н} = 0{,}5\,(u_{к,\,в\text{-}н} + u_{к,\,с\text{-}н} - u_{к,\,в\text{-}с}) \end{aligned}\right\} . \quad (1.40)$$

Учитывая, что в трехобмоточных трансформаторах $u_{ка} << u_{кр}$ можно принять $u_{кр} \approx u_к$, получаем:

$$X_{т1} = \frac{u_{к1} \cdot U_{вн}^2}{S_{тном}}, \quad (1.41)$$

$$X_{т2} = \frac{u_{к2} \cdot U_{вн}^2}{S_{тном}}, \quad (1.42)$$

$$X_{т3} = \frac{u_{к3} \cdot U_{вн}^2}{S_{тном}}, \quad (1.43)$$

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

Как правило, индуктивное сопротивление обмотки среднего напряжения $X_{т2}$ 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 (1.27), (1.28), а при их замене постоянным отбором мощности потери в стали $\Delta\, \underline{S}_x$ определяются по выражению (1.33), где $n_т = 1$.

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 раздельным их включением. В первом случае трансформатор с расщепленной обмоткой работает как обычный двухобмоточный трансформатор и параметры его схемы замещения определяются по выражениям, справедливым для них.

При раздельном включении расщепленных обмоток схема замещения трансформатора соответствует рис. 1.5, причем активные сопротивления лучей звезды, а также проводимости цепи намагничивания или потери в стали определяются по соответствующим выражениям для трехобмоточного трансформатора.

Поскольку обмотка высокого напряжения располагается между обмотками низкого напряжения, ее индуктивное сопротивление можно считать равным нулю, а индуктивные сопротивления ветвей расщепленной обмотки X'_{2m} и X''_{2m} равны двойному значению общего сопротивления трансформатора:

$$X'_{2m} = X''_{2m} = 2X_m \text{ или } X_m = 0{,}5\, X'_{2m} = 0{,}5\, X''_{2m}\,. \qquad (1.44)$$

Общее индуктивное сопротивление трансформатора определяется по выражению для двухобмоточного трансформатора.

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

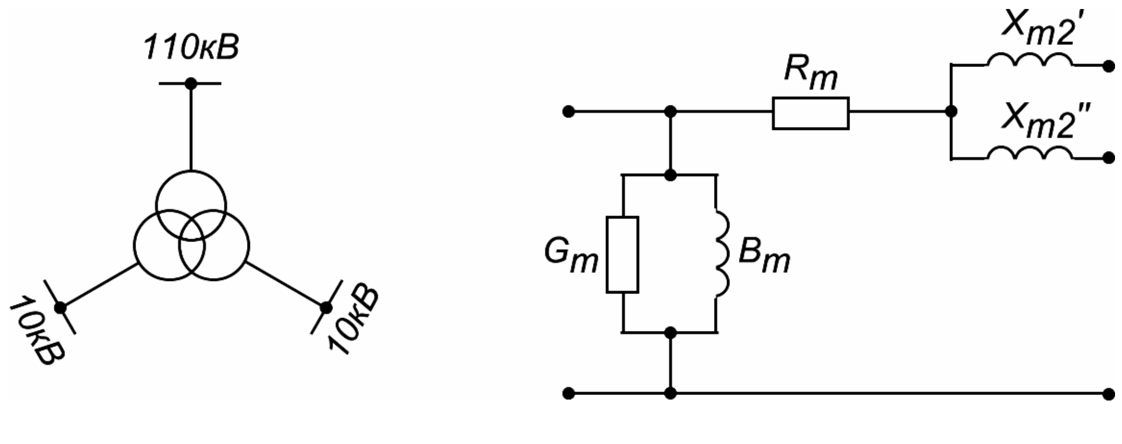


Рис. 1.6. Схема замещения трансформатора с расщепленной обмоткой

Схема замещения автотрансформатора также представляется трехлучевой звездой (рис. 1.5). В отличие от трехобмоточного трансформатора автотрансформатор характеризуется номинальной и типовой мощностью, на которую рассчитана последовательная обмотка.

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

$$R_{общ} = \frac{\Delta P_{к\,12} \cdot U^2_{вн}}{S^2_{1\,ном}} = \frac{\Delta P_{к,в-с} \cdot U^2_{вн}}{S^2_{АТ\,ном}}. \qquad (1.45)$$

Активные сопротивления обмоток ВН и СН будут равны, если мощности потерь $\Delta P_к$ для них одинаковы. Тогда:

$$R_{т1} = R_{т2} = 0{,}5\; R_{общ}. \qquad (1.46)$$

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

$$\frac{R_{т3}}{R_{т1}} = \frac{S_{АТ\,ном}}{S_{нн}}. \qquad (1.47)$$

Оно равно:
$$R_{т3} = \frac{R_{т1} \cdot S_{АТ\,ном}}{S_{нн}}. \qquad (1.48)$$

Если в каталоге приводятся потери мощности короткого замыкания между парами обмоток ($\Delta P'_{к,\,в\text{-}н}$; $\Delta P'_{к,\,с\text{-}н}$; $\Delta P_{к,\,в\text{-}с}$) ,то $\Delta P_{к,\,в\text{-}с}$ приведены к номинальной мощности автотрансформатора, а $\Delta P'_{к,\,в\text{-}н}$ и $\Delta P'_{к,\,с\text{-}н}$ – к типовой мощности (мощности обмотки НН).

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

$$\Delta P_{к\,в-н} = \frac{\Delta P'_{к\,в-н}}{\alpha^2}; \qquad (1.49)$$

$$\Delta P_{кс-н} = \frac{\Delta P'_{кс-н}}{\alpha^2}, \quad (1.50)$$

где $\alpha = \dfrac{S_{AT\,ном}}{S_{тип}} = \dfrac{U_{вн} - U_{сн}}{U_{вн}}$. (1.51)

И уже по ним определяют потери мощности короткого замыкания для каждой из обмоток по выражению (1.36).

Тогда активные сопротивления обмоток равны:

$$R_{т1} = \frac{\Delta P_{к1} \cdot U^2_{вн}}{S^2_{AT\,ном}}, \quad (1.52)$$

$$R_{т2} = \frac{\Delta P_{к2} \cdot U^2_{вн}}{S^2_{AT\,ном}}, \quad (1.53)$$

$$R_{т3} = \frac{\Delta P_{к3} \cdot U^2_{вн}}{S^2_{AT\,ном}}. \quad (1.54)$$

Индуктивные сопротивления лучей эквивалентной звезды определяются так же, как для трехобмоточного трансформатора, с использованием выражений (1.41)-(1.43). Если в каталоге или справочных данных указаны напряжения короткого замыкания пар обмоток ($u'_{к,\,в-н}$, $u'_{к,\,с-н}$), приведенные к типовой мощности, то их приведение к единому энергетическому уровню осуществляется по выражениям:

$$u_{к,\,в-н} = u'_{к,\,в-н} / \alpha, \quad (1.55)$$

$$u_{к,\,с-н} = u'_{к,\,с-н} / \alpha. \quad (1.56)$$

Проводимости автотрансформатора рассчитываются по выражениям (1.27) и (1.28), а потери мощности в стали - по выражению (1.33), где $n_т=1$.

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

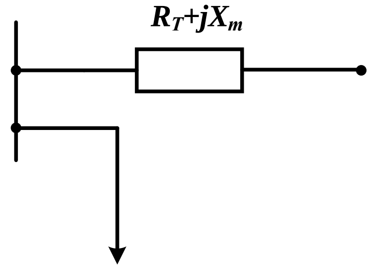
Пример 1.3

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

Решение

По каталожным данным, например [7], определяем характеристики трансформатора: $U_{вн} = 110$ ***кВ***; $u_к = 10{,}5$ ***%***; $\Delta P_к = 22$ ***кВт***; $\Delta P_x = 5$ ***кВт***; $I_x = 1{,}5$ ***%***; $\Delta Q_x = 37{,}5$ ***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:



Активное сопротивление трансформатора определяется по выражению:

$$R_т = \frac{\Delta P_к \cdot U_{ВН}^2}{S_{т\,ном}^2} = \frac{22 \cdot 110^2 \cdot 10^3}{2500^2} = 42{,}6 \;\; Ом.$$

Индуктивное сопротивление находится по формуле:

$$X_т = \frac{u_{к,\%} \cdot U_{ВН}^2}{100 \cdot S_{т\,ном}} = \frac{10{,}5 \cdot 110^2 \cdot 10^6}{100 \cdot 2500 \cdot 10^3} = 508 \;\; Ом.$$

Активная проводимость определяется по данным опыта холостого хода согласно выражению:

$$G_т = \frac{\Delta P_x}{U_{вн}^2} = \frac{5}{110^2 \cdot 10^3} = 4{,}13 \cdot 10^{-7} \; См,$$

а индуктивная проводимость - согласно выражению:

$$B_т = \frac{\Delta Q_x}{U_{вн}^2} = \frac{37{,}5}{110^2 \cdot 10^3} = 3{,}1 \cdot 10^{-6} \; См.$$

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

$$B_т = \frac{I_{х,\%} \cdot S_{т\,ном}}{100 \cdot U_{вн}^2} = \frac{1,5 \cdot 2500}{100 \cdot 110^2 \cdot 10^3} = 3,1 \cdot 10^{-6}\ См.$$

Потери в стали или потери холостого хода равны: $\Delta S_x = 5 + j37,5$ ***кВА.***

Пример 1.4.

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

Решение

Из каталожных данных, например, [15], записываем технические характеристики трансформатора: $U_{вн} = 230$ ***кВ;*** $S_{т\,ном} = 63000$ ***кВА;*** $u_{К,\,в\text{-}с} = 12,5\ \%$; $u_{К,\,в\text{-}н} = 24\ \%$; $u_{К,\,с\text{-}н} = 10,5\ \%$; $\Delta P_к = 320$ ***кВт;*** $\Delta P_x = 91$ ***кВт;*** $I_x = 1\ \%$. Отношение между мощностями обмоток ***100/100/100 %.***

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

$$R_{общ} = \frac{\Delta P_к \cdot U_{ВН}^2}{S_{т\,ном}^2} = \frac{320 \cdot 230^2 \cdot 10^3}{63000^2} = 4,26\ \ Ом.$$

Тогда активное сопротивление любой обмотки равно:

$$R_{т1} = R_{т2} = R_{т3} = 0,5 R_{общ} = 2,13\,Ом.$$

Напряжения короткого замыкания для лучей трехфазной схемы замещения равны:

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

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

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

Определим индуктивные сопротивления лучей эквивалентной звезды:

$$X_{т1} = \frac{u_{к1} \cdot U_{ВН}^2}{S_{т\,ном}} = \frac{13 \cdot 230^2 \cdot 10}{63000} = 120,84 \text{ Ом},$$

$$X_{т2} = \frac{u_{к2} \cdot U_{ВН}^2}{S_{т\,ном}} = \frac{0 \cdot 230^2 \cdot 10}{63000} = 0 \text{ Ом},$$

$$X_{т3} = \frac{u_{к3} \cdot U_{ВН}^2}{S_{т\,ном}} = \frac{11 \cdot 230^2 \cdot 10}{63000} = 102,25 \text{ Ом}.$$

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

Активная проводимость трансформатора

$$G_т = \frac{\Delta P_x}{U_{вн}^2} = \frac{91}{230^2 \cdot 10^3} = 1,55 \cdot 10^{-6} \text{ См}.$$

Реактивная проводимость

$$B_т = \frac{\Delta Q_x}{U_{вн}^2} = \frac{I_x \cdot S_{т\,ном}}{U_{вн}^2} = \frac{1,1 \cdot 63000}{100 \cdot 230^2 \cdot 10^3} = 1,85 \cdot 10^{-5} \text{ См}.$$

Схема замещения трансформатора представлена на рис. 1.5.

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 кВА; $U_{1\,ном}$ = 330 кВ; $U_{2\,ном}$ = 10,5/10,5 кВ; $\Delta P_к$ = 265 кВт; $u_к$=11 %; ΔP_x = 120 кВт; I_x = 0,7 %.

Схема замещения этого трансформатора соответствует рис. 1.6.

Определим активное сопротивление обмоток:

$$R_т = \frac{\Delta P_к \cdot U_{1\,ном}^2}{S_{т\,ном}^2} = \frac{265 \cdot 330^2 \cdot 10^3}{63000^2} = 7,35 \text{ Ом}.$$

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

$$X_m = \frac{u_{к,\%} \cdot U_{1\,ном}^2}{100 \cdot S_{m\,ном}} = \frac{11 \cdot 330^2 \cdot 10^3}{100 \cdot 63000^3} = 190\ Ом.$$

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

$$X_2^{`} = X_2^{``} = 2 \cdot X_m = 380\ Ом.$$

Активная проводимость трансформатора

$$G_m = \frac{\Delta P_x}{U_{1\,ном}^2} = \frac{120}{330^2 \cdot 10^3} = 1{,}1 \cdot 10^{-6}\ \ См.$$

Индуктивная проводимость трансформатора

$$B_m = \frac{\Delta Q_x}{U_{1\,ном}^2} = \frac{I_{x,\%} \cdot S_{m\,ном}}{100 \cdot U_{1\,ном}^2} = \frac{0{,}7 \cdot 63000}{100 \cdot 330^2 \cdot 10^3} = 4{,}07 \cdot 10^{-6}\ См.$$

Полные потери мощности в стали трансформатора:

$$\Delta S_x = \Delta P_x + j\Delta Q_x = \Delta P_x + j\frac{I_{x,\%} \cdot S_{m\,ном}}{100} = 120 + j441\ кВА.$$

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: $S_{тном} = 200000$ ***кВА***; $U_{1ном}=230$ ***кВ***; $U_{2ном} =121$ ***кВ***; $U_{3ном}=11$ ***кВ***; $u_{к,\,в\text{-}с}=11\ \%$; $u_{к,\,в\text{-}н} =32\ \%$; $u_{к,\,с\text{-}н} =20\%$; $\Delta P_{к,\,в\text{-}с} = 430$ ***кВт***; $\Delta P_{к,\,в\text{-}н} = 360$ ***кВт***; $\Delta P_{к,\,с\text{-}н} = 320$ ***кВт***; $\Delta P_x = 125$ ***кВт***; $I_x=0{,}5\%$. Соотношение мощностей обмоток ***100/100/50 %*** [15].

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

$$\Delta P_{к,в-н} = \frac{\Delta P'_{к,в-н}}{\alpha^2} = \frac{360}{0{,}5^2} = 1440\ кВт,$$

$$\Delta P_{к,с-н} = \frac{\Delta P'_{к,с-н}}{\alpha^2} = \frac{320}{0,5^2} = 1280\ кВт,$$

где $\alpha = \frac{S_{ТИП,\%}}{S_{АТ\ ном,\%}} = \frac{50}{100} = 0,5$.

Определим по выражениям (1.36) и (1.40) потери активной мощности и напряжения короткого замыкания, соответствующие лучам схемы замещения данного автотрансформатора

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

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

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

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

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

$$\Delta P_{к1} = 0,5(1440 + 1280 - 430) = 1145\ кВт,$$

По значениям $u_к$ и $\Delta P_к$ определим активные и индуктивные сопротивления автотрансформатора:

$$R_{АТ1} = \frac{\Delta P_{к1} \cdot U_{вн}^2}{S_{АТ\ ном}^2} = \frac{295 \cdot 230^2 \cdot 10^3}{200000^2} = 0,39\ Ом,$$

$$R_{АТ2} = \frac{\Delta P_{к2} \cdot U_{вн}^2}{S_{АТ\ ном}^2} = \frac{135 \cdot 230^2 \cdot 10^3}{200000^2} = 0,179\ Ом,$$

$$R_{АТ3} = \frac{\Delta P_{к3} \cdot U_{вн}^2}{S_{АТ\ ном}^2} = \frac{1145 \cdot 230^2 \cdot 10^3}{200000^2} = 1,51\ Ом,$$

$$X_{АТ1} = \frac{u_{к1} \cdot U_{ВН}^2}{S_{АТ\ ном}} = \frac{11,5 \cdot 230^2 \cdot 10}{200000} = 30,41\ Ом,$$

$$X_{АТ2} = \frac{u_{к2} \cdot U_{ВН}^2}{S_{АТ\ ном}} = \frac{0 \cdot 230^2 \cdot 10}{200000} = 0\ Ом,$$

$$X_{АТ3} = \frac{u_{к3} \cdot U_{ВН}^2}{S_{АТ\ ном}} = \frac{20,5 \cdot 230^2 \cdot 10}{200000} = 54,2\ Ом.$$

Потери реактивной мощности одного автотрансформатора составляют

$$\Delta Q_x = \frac{I_{x,\%} \cdot S_{AT\,ном}}{100\%} = \frac{0,5 \cdot 200000}{100} = 1000 \ \ квар.$$

Суммарные потери холостого хода равны

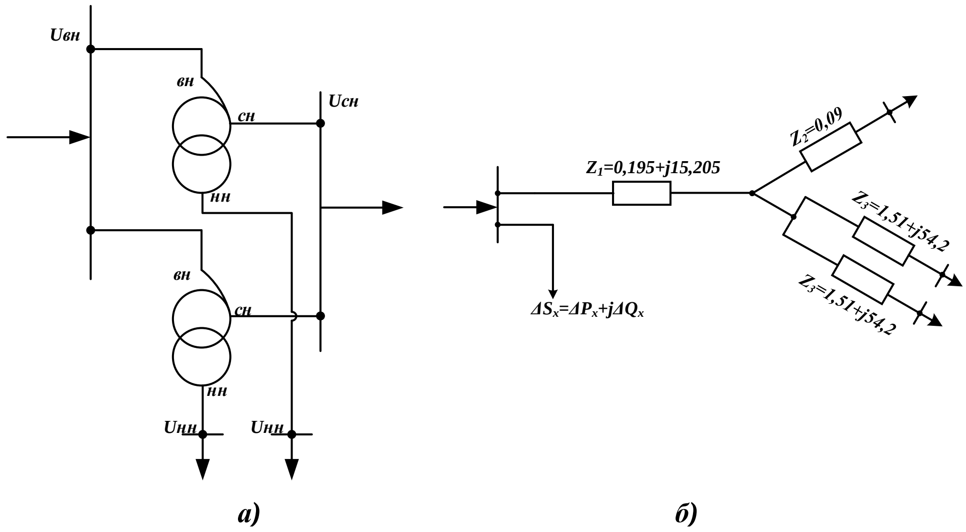
$$\Delta S_x = \Delta P_x + j\Delta Q_x = 125 + j1000 \ \ кВА.$$

Активная и индуктивная проводимости определяются следующим образом:

$$G_{AT} = \frac{\Delta P_x}{U_{1\,ном}^2} = \frac{125}{230^2 \cdot 10^3} = 2,36 \cdot 10^{-6} \ \ См,$$

$$B_{AT} = \frac{\Delta Q_x}{U_{1\,ном}^2} = \frac{1000}{230^2 \cdot 10^3} = 18,9 \cdot 10^{-6} \ \ См.$$

При условии установки на подстанции двух автотрансформаторов схема включения и схема замещения показаны ниже:



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

$$Z_1 = \frac{Z_{AT\,1}}{2} = \frac{(0,39 + j30,41)}{2} = 0,195 + j15,205 \ \ Ом,$$

$$Z_2 = \frac{Z_{AT\,2}}{2} = \frac{(0,179 + j0)}{2} = 0,9 \ \ Ом.$$

Т.к. обмотки НН автотрансформаторов работают каждая на свою нагрузку, то $Z_3 = Z_{AT\,3} = 1,51 + j54,2 \ \ Ом.$

Суммарные потери холостого хода обоих автотрансформаторов равны:

$$\Delta S_x = 2(\Delta P_x + j\Delta Q_x) = 2(125 + j1000) = 250 + j2000 \ \ кВА.$$

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: $U_{вн}= 242$ ***кВ;*** $U_{нн}= 10,5$ ***кВ;*** $u_к=11\%$***;*** $\Delta P_к=320$ ***кВт;*** $\Delta P_x= 105$ ***кВт;*** $I_x=0,6\ \%$***.***

Активное сопротивление обмоток:

приведенное к высокой стороне $R_т = \dfrac{\Delta P_к \cdot U_{вн}^2}{S_{т\,ном}^2} = \dfrac{320 \cdot 242^2 \cdot 10^3}{80000^2} = 2,93\ Ом,$

приведенное к низкой стороне $R'_т = \dfrac{\Delta P_к \cdot U_{нн}^2}{S_{т\,ном}^2} = \dfrac{320 \cdot 10,5^2 \cdot 10^3}{80000^2} = 0,0055\ Ом.$

Индуктивное сопротивление обмоток:

приведенное к высокой стороне $X_т = \dfrac{u_к \cdot U_{вн}^2}{S_{т\,ном}} = \dfrac{11 \cdot 242^2 \cdot 10}{80000} = 80,5\ \ Ом,$

приведенное к низкой стороне $X'_т = \dfrac{u_к \cdot U_{нн}^2}{S_{т\,ном}} = \dfrac{11 \cdot 10,5^2 \cdot 10}{80000} = 0,15\ \ Ом.$

Поперечные проводимости, приведенные к высокой стороне

$$G_т = \frac{\Delta P_x}{U_{вн}^2} = \frac{105}{242^2 \cdot 10^3} = 1,79 \cdot 10^{-5}\ \ См,$$

$$B_т = \frac{I_{x,\%} \cdot S_{т\,ном}}{U_{вн}^2} = \frac{0,6 \cdot 80000}{242^2 \cdot 10^3} = 8,19 \cdot 10^{-5}\ См,$$

приведенные к низкой стороне

$$G'_т = \frac{\Delta P_x}{U_{нн}^2} = \frac{105}{10,5^2 \cdot 10^3} = 9,5 \cdot 10^{-4}\ \ См,$$

$$B_т = \frac{I_{x,\%} \cdot S_{т\,ном}}{U_{вн}^2} = \frac{0,6 \cdot 80000}{10,5^2 \cdot 10^5} = 4,35 \cdot 10^{-3}\ См.$$

Пример 1.8.

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

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

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

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

Индуктивные сопротивления обмоток равны:

$$X_1=\frac{u_{к1}(\frac{U_{в\,ном}}{\sqrt{3}})^2}{S_{ф\,ном}}=\frac{10{,}83(\frac{750}{\sqrt{3}})^2}{417000}10=48{,}7\ \ Ом,$$

$$X_2=0\ \ Ом,\ X_3=\frac{u_{к3}(\frac{U_{в\,ном}}{\sqrt{3}})^2}{S_{ф\,ном}}=\frac{52{,}175(\frac{750}{\sqrt{3}})^2}{417000}10=234{,}61\ \ Ом.$$

Общее активное сопротивление трехфазной группы однофазных автотрансформаторов равно:

$$R_{общ} = \frac{\Delta P_{к,в-с} (\frac{U_{в\,ном}}{\sqrt{3}})^2}{S^2_{ф\,ном}} = \frac{920(\frac{750}{\sqrt{3}})^2}{417^2} 10^{-3} = 0{,}99 \ \ Ом.$$

Поскольку номинальные мощности обмоток ВН и СН одинаковы, то

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

Номинальная мощность обмотки НН составляет 25% от номинальной мощности обмотки ВН, поэтому из выражения (1.48) следует: $R_3 = 4R_1 = 0{,}99 \cdot 4 = 3{,}96 \ \ Ом.$

Поперечная проводимость для одной фазы равна:

Активная

$$G = \frac{\Delta P_x}{(\frac{U_{в\,ном}}{\sqrt{3}})^2} = \frac{330}{(\frac{750}{\sqrt{3}})^2 10^3} = 1{,}76 \cdot 10^{-6} \ \ См,$$

Реактивная

$$B = \frac{I_x \cdot S_{ф\,ном}}{(\frac{U_{в\,ном}}{\sqrt{3}})^2} = \frac{0{,}5 \cdot 412000}{(\frac{750}{\sqrt{3}})^2 10^5} = 11 \cdot 10^{-6} \ См,$$

Необходимо отметить, что здесь и далее по каждой теме в примерах расчетов справочные данные по параметрам линий электропередачи, силовых трансформаторов и автотрансформаторов принимались по [5,7,8,15]. Эти данные практически одни и те же в указанных литературных источниках, поэтому можно пользоваться любым из них.

Задачи для самостоятельного решения

№1

Трансформатор типа ТМ – 6300/110 имеет потери реактивной мощности в режиме холостого хода (х.х.) $\Delta Q_х$ = 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 раздельно работающих трансформаторов.

№5

Во сколько раз реактивная составляющая тока холостого хода трансформатора типа ТД - 10000 /110 больше активной, если ток холостого хода $I_х$ = 1 %, а $\Delta Q_х$=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%; ΔQ_x=80 квар, ΔP_x=14,5 кВт.

№7

Построить схемы замещения трансформаторов типа ТДН-16000/35 и ТРДН-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 раздельно.

№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 раздельной 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

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

№12

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

№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 АТДЦТН - 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 АТДЦТН - 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 ТРДН – 63000/220.

№20

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

№21

На подстанции напряжением 110 кВ установлен трансформатор Построить схемы замещения трансформаторов типа ТДЦ–125000/110 как изменятся параметры схемы замещения при его замене на трансформатор ТДЦ-250000/110

№22

Привести схему замещения для двух параллельно работающих трансформаторов типа ТДТН - 40000/220 и определить ее параметры.

№23

Построить схемы замещения трансформаторов типа ТДН–40000/110 и ТРДЦН 125000/110 и рассчитать их параметры. Обмотки низкого напряжения трансформатора типа ТРДН - 125000/110 включены раздельно.

№24

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

№25

Рассчитать параметры схемы замещения трехфазной группы из однофазных автотрансформаторов типа АОДЦТН - 417000/750/500

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. 2.1).

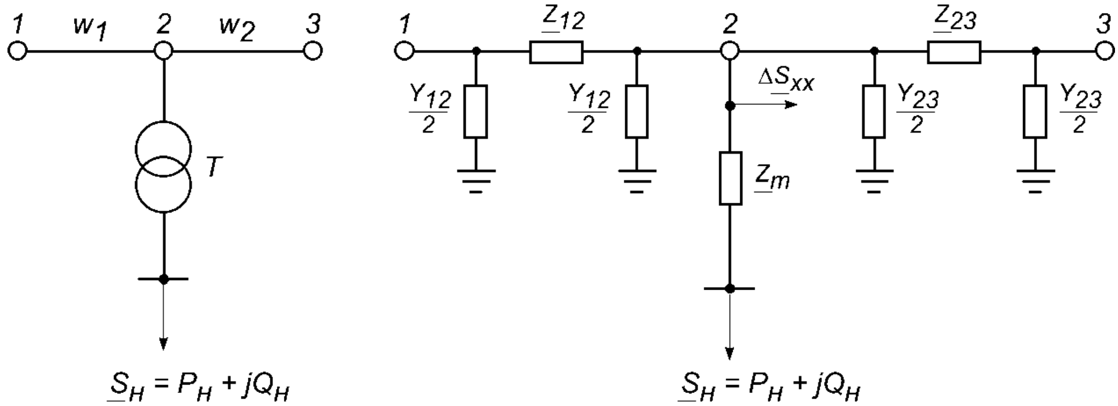


Рис. 2.1. Схема замещения участка сети с двухобмоточным трансформатором

Для упрощения конфигурации схемы замещения сети 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:

$$\underline{S}_{\text{п}} = \underline{S}_{\text{н}} + \Delta\underline{S}_{\text{т}} = P_{\text{н}} + \Delta P_{\text{т}} + j(Q_{\text{н}} + \Delta Q_{\text{т}}), \qquad (2.1)$$

где $\Delta\underline{S}_{\text{т}}$ - 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

$$\Delta P_т = \frac{P_н^2 + Q_н^2}{U_{вн}^2} \cdot R_т + \Delta P_x \tag{2.2}$$

или

$$\Delta P_т = \frac{\Delta P_к \cdot S_н^2}{S_{т\,ном}^2} + \Delta P_x = \Delta P_к \cdot K_з^2 + \Delta P_x\,, \tag{2.3}$$

где $K_з$ – коэффициент загрузки трансформатора, равный $K_з = \dfrac{S_н}{S_{т\,ном}}$;

реактивные потери мощности

$$\Delta Q_т = \left(\frac{P_н^2 + Q_н^2}{U_{вн}^2} \right) \cdot X_т + \Delta Q_x \tag{2.4}$$

или

$$\Delta Q_т = \frac{u_{к,\%} \cdot S_н^2}{100 \cdot S_{т\,ном}} + \frac{I_{x,\%} \cdot S_{т\,ном}}{100}. \tag{2.5}$$

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

$$\Delta P_т = \frac{\Delta P_{кв} \cdot S_{вн}^2}{S_{т\,ном}^2} + \frac{\Delta P_{кс} \cdot S_{сн}^2}{S_{т\,ном}^2} + \frac{\Delta P_{кн} \cdot S_{нн}^2}{S_{т\,ном}^2} + \Delta P_x \tag{2.6}$$

или

$$\Delta P_т = \frac{S_{нн}^2}{U_в^2} R_{т3} + \frac{S_{сн}^2}{U_в^2} R_{т2} + \frac{S_{вн}^2}{U_в^2} R_{т1} + \Delta P_x\,, \tag{2.7}$$

$$\Delta Q_т = \frac{u_{кв,\%} \cdot S_{вн}^2}{100 \cdot S_{т\,ном}} + \frac{u_{кс,\%} \cdot S_{сн}^2}{100 \cdot S_{т\,ном}} + \frac{u_{кн,\%} \cdot S_{нн}^2}{100 \cdot S_{т\,ном}} + \frac{I_{x,\%} \cdot S_{т\,ном}}{100} \tag{2.8}$$

или

$$\Delta Q_т = \frac{S_{нн}^2}{U_в^2} X_{т3} + \frac{S_{сн}^2}{U_в^2} X_{т2} + \frac{S_{вн}^2}{U_в^2} X_{т1} + \Delta Q_x\,, \tag{2.9}$$

где $U_в$ - напряжение высокой стороны трансформатора.

Здесь мощность нагрузки на высокой стороне трансформатора определяется следующим образом:

$$\underline{S}_{вн} = \underline{S}_{нн} + \Delta\underline{S}_{тн} + \underline{S}_{сн} + \Delta\underline{S}_{тс}\ , \qquad (2.10)$$

где $\Delta\underline{S}_{тн}$ и $\Delta\underline{S}_{тс}$ - соответственно потери мощности в обмотке низкого и среднего напряжения

$$\Delta\underline{S}_{тс} = \frac{S^2_{сн}}{U^2_{в}}(R_{т2} + jX_{т2});\ \Delta\underline{S}_{тн} = \frac{S^2_{нн}}{U^2_{в}}(R_{т3} + jX_{т3}).$$

Расчетная нагрузка подстанции включает в себя приведенную мощность нагрузки и сумму реактивных мощностей, генерируемых линиями, подходящими к подстанции. Например, для рис. 2.1 расчетная нагрузка подстанции равна:

$$\underline{S}_{р} = \underline{S}_{н} + \Delta\underline{S}_{т} - jQ^{к}_{с12} - jQ^{н}_{с23}, \qquad (2.11)$$

где $jQ^{к}_{с12};\ jQ^{к}_{с23}$ - соответственно реактивные мощности, генерируемые в конце линии 12 и начале линии 23.

Эти мощности также называются зарядными и определяются по выражениям:

$$Q^{к}_{с12} = \frac{U^2_2 \cdot b_{12}}{2};\ Q^{н}_{с23} = \frac{U^2_2 \cdot b_{23}}{2}\ , \qquad (2.12)$$

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

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

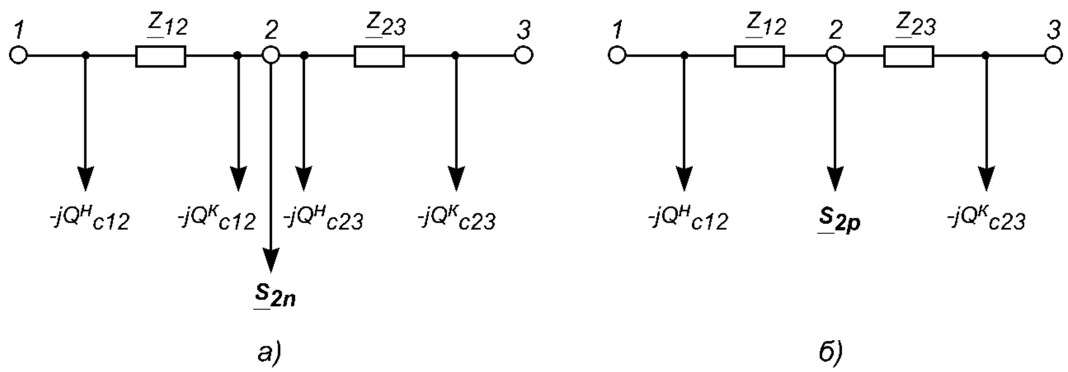


Рис. 2.2. Упрощенные схемы замещения:

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

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

Примеры решения задач

Пример 2.1.

Для участка сети, схема замещения которого приведена на рис. 1.7, 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. [5,7] определяем погонные параметры линий.

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

$$b_{01} = 2{,}65\cdot10^{-6} \text{ См /км}; \; q_1 = 3{,}5\cdot10^{-2} \text{ Мвар /км}.$$

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

$$b_{02} = 2{,}69\cdot10^{-6} \text{ См /км}; \; q_2 = 3{,}6\cdot10^{-2} \text{ Мвар /км}.$$

Трансформатор типа ТРДН - 40000/110 согласно [15] имеет следующие технические данные:

$U_{в\,ном} = 115$ кВ; $u_к = 10{,}5$ %; $\Delta P_к = 175$ кВт; $\Delta P_х = 42$ кВт; $I_х = 0{,}7$ %.

Определим параметры схемы замещения воздушных линий:

$$R_1 = r_{01}\cdot l_1 = 0{,}314\cdot70 = 22 \text{ Ом},$$

$$X_1 = x_{01}\cdot l_1 = 0{,}429\cdot70 = 30 \text{ Ом},$$

$$R_2 = r_{02}\cdot l_2 = 0{,}249\cdot50 = 12{,}45 \text{ Ом},$$

$$X_2 = x_{02}\cdot l_2 = 0{,}423\cdot50 = 21{,}15 \text{ Ом}$$

Зарядные мощности половины длины каждой линии:

$$Q^{н}_{c12} = Q^{к}_{c12} = \frac{q_{01} \cdot l_1}{2} = \frac{3,5 \cdot 10^{-2} \cdot 70}{2} = 1,125 \ \ Мвар,$$

$$Q^{н}_{c23} = Q^{к}_{c23} = \frac{q_{02} \cdot l_2}{2} = \frac{3,6 \cdot 10^{-2} \cdot 50}{2} = 0,900 \ \ Мвар.$$

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

$$\Delta P_т = \frac{\Delta P_к \cdot S^2_н}{S^2_{т\,ном}} + \Delta P_х = \frac{175(24^2 + 18^2)}{40^2} + 42 = 0,1404 \ \ МВт.$$

Потери реактивной мощности в трансформаторе:

$$\Delta Q_т = \frac{u_{к,\%} \cdot S^2_{ном}}{100 \cdot S_{т\,ном}} + \frac{I_{х,\%} \cdot S_{т\,ном}}{100} = \frac{10,5(24^2 + 18^2) \cdot 10^3}{100 \cdot 40} + \frac{0,7 \cdot 40 \cdot 10^3}{100} = 2,642\,Мвар.$$

Т.о., приведенная нагрузка подстанции к высокой стороне будет равна:

$$S_{пр} = P_н + \Delta P_т + j(Q_н + \Delta Q_т) = 24 + 0,1404 + j(18 + 2,642) = 24,1404 + j20,642\,МВА.$$

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

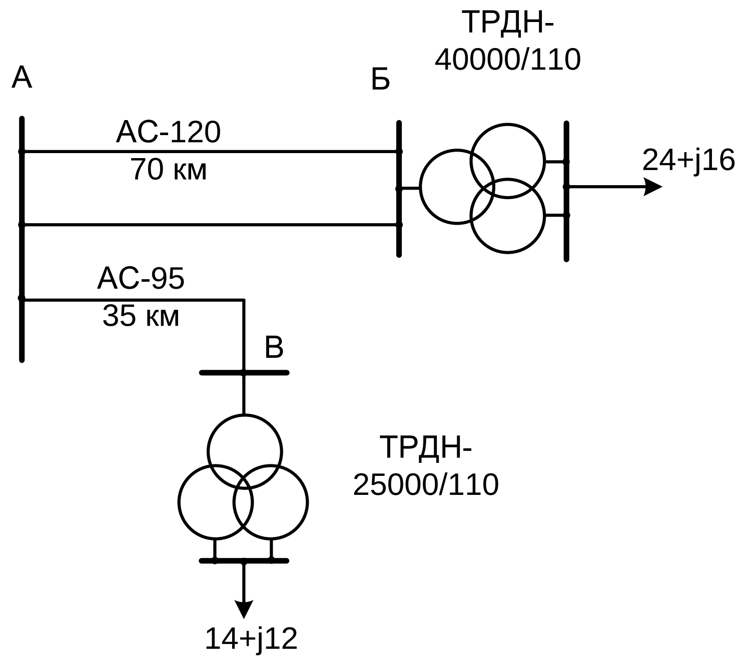
$$S_р = S_{пр} - j(Q^{к}_{c12} + Q^{н}_{c23}) = 24,1404 + j20,642 - j(1,125 + 0,9) = 24,1404 + j18,517 \ \ МВА.$$

Схема замещения участка сети показана на рис. 2.2.

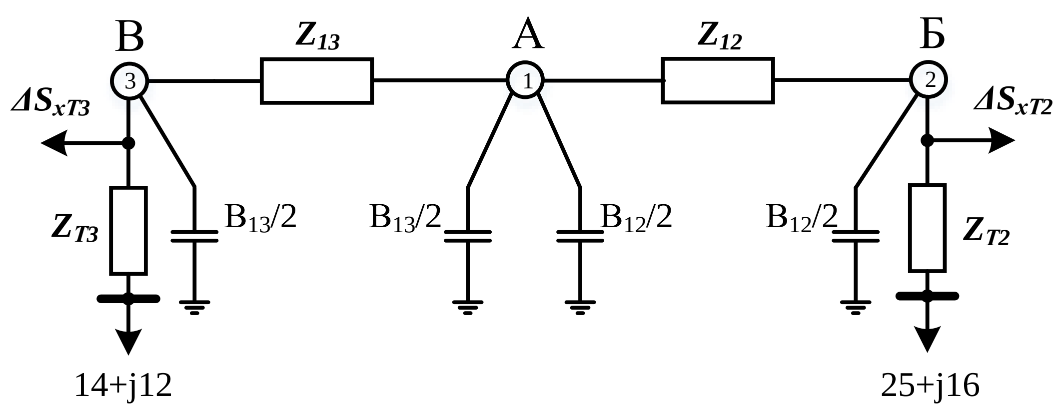
Листинг
примеров решения задач по разделу 2.1
в программе MathCad фирмы MathSoft

Пример 2.2.

Разомкнутая сеть 110 кВ связывает подстанции Б и В 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, индуктивные сопротивления и емкостную проводимость.

Исходные данные:

$U_{ном} := 110$ кВ

Длина линий:

$l_{12} := 70$ км $\qquad l_{13} := 35$ км

Нагрузка в узлах Б и В

$P_{н2} := 25$ МВт $\quad P_{н3} := 14$ МВт $\quad Q_{н2} := 16$ Мвар $\quad Q_{н3} := 12$ Мвар

Провод АС 120/19:

$r_{0\_120} := 0.244 \frac{Ом}{км} \qquad x_{0\_120} := 0.427 \frac{Ом}{км} \qquad b_{0\_120} := 2.658 \cdot 10^{-6} \frac{См}{км}$

Провод АС 95/16:

$r_{0\_95} := 0.301 \frac{Ом}{км} \qquad x_{0\_95} := 0.434 \frac{Ом}{км} \qquad b_{0\_95} := 2.611 \cdot 10^{-6} \frac{См}{км}$

Полное сопротивление линии А-Б равно:

$Z_{12} := \left(r_{0\_120} \cdot l_{12} + i \cdot x_{0\_120} \cdot l_{12}\right) \cdot \frac{1}{2} \qquad Z_{12} = 8.54 + 14.945i$ Ом

Полное сопротивление линии А-В равно:

$Z_{13} := \left(r_{0\_95} \cdot l_{13} + i \cdot x_{0\_95} \cdot l_{13}\right) \qquad Z_{13} = 10.535 + 15.19i$ Ом

Определяем параметры трансформаторов по справочным данным (индексацию трансформаторов осуществляем в соответствии с номером узла)

Трансформатор ТРДН-40000/110:

$R_{T2} := 1.4$ Ом $\quad X_{T2} := 34.7$ Ом $\quad \Delta P_{xT2} := 36$ кВт $\quad \Delta Q_{xT2} := 260$ квар

Трансформатор ТРДН-25000/110:

$R_{T3} := 2.54$ Ом $\quad X_{T3} := 55.9$ Ом $\quad \Delta P_{xT3} := 27$ кВт $\quad \Delta Q_{xT3} := 175$ квар

Определим потери активной и реактивной мощности в силовых трансформаторах:

$$\Delta P_{T2} := \frac{P_{н2}^2 + Q_{н2}^2}{U_{ном}^2} \cdot R_{T2} + \Delta P_{xT2} \cdot 10^{-3} \qquad \Delta P_{T2} = 0.138 \text{ МВт}$$

$$\Delta Q_{T2} := \frac{P_{н2}^2 + Q_{н2}^2}{U_{ном}^2} \cdot X_{T2} + \Delta Q_{xT2} \cdot 10^{-3} \qquad \Delta Q_{T2} = 2.787 \text{ Мвар}$$

$$\Delta P_{T3} := \frac{P_{н3}^{2} + Q_{н3}^{2}}{U_{ном}^{2}} \cdot R_{T3} + \Delta P_{xT3} \cdot 10^{-3} \qquad \Delta P_{T3} = 0.098 \quad МВт$$

$$\Delta Q_{T3} := \frac{P_{н3}^{2} + Q_{н3}^{2}}{U_{ном}^{2}} \cdot X_{T3} + \Delta P_{xT3} \cdot 10^{-3} \qquad \Delta Q_{T3} = 1.598 \quad Мвар$$

Находим приведенную нагрузку узлов 2 и 3

$$S_{пр2} := P_{н2} + \Delta P_{T2} + i \cdot (Q_{н2} + \Delta Q_{T2}) \qquad S_{пр2} = 25.138 + 18.787i \quad МВА$$

$$S_{пр3} := P_{н3} + \Delta P_{T3} + i \cdot (Q_{н3} + \Delta Q_{T3}) \qquad S_{пр3} = 14.098 + 13.598i \quad МВА$$

Находим значения зарядных мощностей в линиях А-Б и А-В

$$Q_{c12} := \left(\frac{1}{2} \cdot U_{ном}^{2} \cdot b_{0\_120} \cdot l_{12} \right) \cdot 2 \qquad Q_{c12} = 2.251 \quad Мвар$$

Примечание: Умножение на 2, так как линиях двухцепная

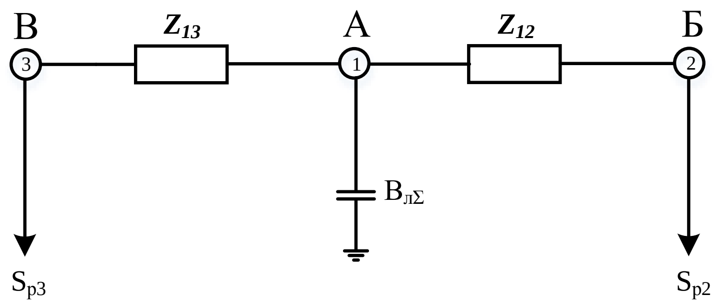
$$Q_{c13} := \frac{1}{2} \cdot U_{ном}^{2} \cdot b_{0\_95} \cdot l_{13} \qquad Q_{c13} = 0.553 \quad Мвар$$

Находим расчетную нагрузку узлов 2 и 3:

$$S_{p2} := S_{пр2} - i \cdot Q_{c12} \qquad S_{p2} = 25.138 + 16.535i \quad МВА$$

$$S_{p3} := S_{пр3} - i \cdot Q_{c13} \qquad S_{p3} = 14.098 + 13.045i \quad МВА$$

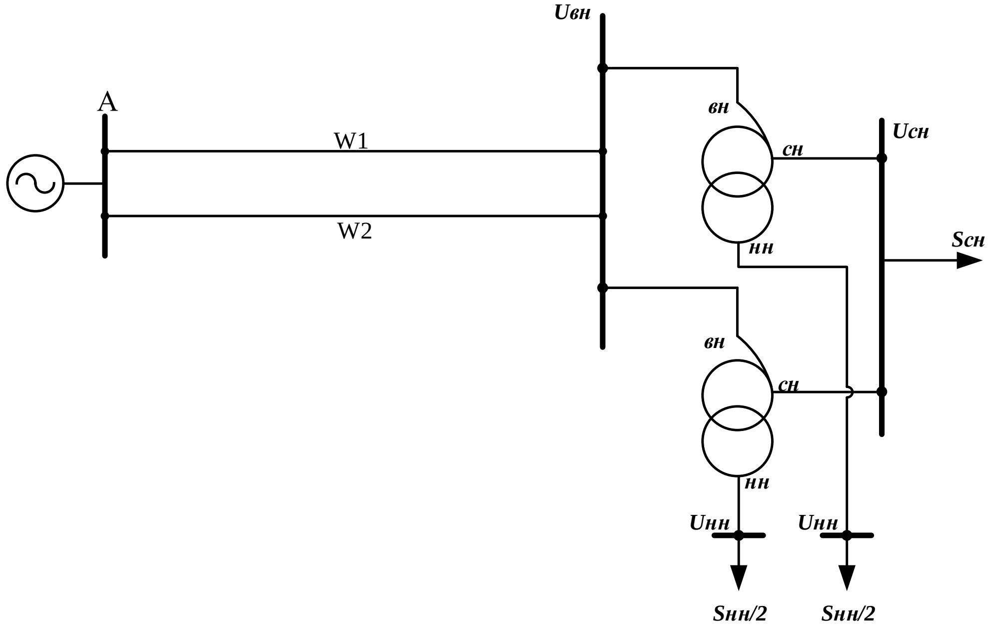
Окончательная схема замещение сети имеет вид:



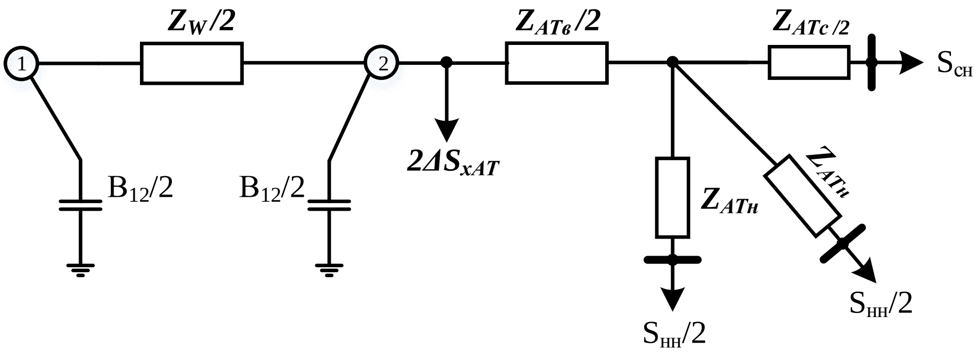
Пример 2.3.

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 параметры схемы замещения

По справочным данным находим погонные активные, индуктивные сопротивления и емкостную проводимость.

Исходные данные:

$U_{ном} := 220$ кВ

Длина линии:

$l_W := 150$ км

Нагрузки обмоток среднего и низкого напряжения автотрансформаторов:

$P_{НН} := 50$ МВт $\quad Q_{НН} := 15$ Мвар

$P_{СН} := 100$ МВт $\quad Q_{СН} := 40$ Мвар

Для провода АС-300/39

$$r_{0\_300} := 0.0960 \quad \frac{Ом}{км} \qquad x_{0\_300} := 0.429 \quad \frac{Ом}{км} \qquad b_{0\_300} := 2.645 \cdot 10^{-6} \quad \frac{См}{км}$$

Полное сопротивление линии от ИП до ВН автотрансформатора равно:

$$Z_W := \left(r_{0\_300} \cdot l_{12} + i \cdot x_{0\_300} \cdot l_{12}\right) \cdot \frac{1}{2} \qquad Z_W = 3.36 + 15.015i \quad Ом$$

Автотрансформатор АТДЦТН-125000/220/110:

Напряжения обмоток:

$$U_{ВН} := 230 \;\; кВ \qquad U_{СН} := 121 \;\; кВ \qquad U_{НН} := 11 \;\; кВ$$

Сопротивления обмоток:

$$R_{АТв} := 0.52 \;\; Ом \qquad R_{АТс} := 0.52 \;\; Ом \qquad R_{АТн} := 3.2 \;\; Ом$$

$$X_{АТв} := 49 \;\; Ом \qquad X_{АТс} := 0 \;\; Ом \qquad X_{АТн} := 131 \;\; Ом$$

Потери холостого хода:

$$\Delta P_{хАТ} := 0.065 \;\; МВт \qquad \Delta Q_{хАТ} := 0.625 \;\; Мвар$$

Рассчитаем потери мощности в обмотке среднего напряжения:

$$\Delta S_{АТс} := \frac{P_{СН}^{\;2} + Q_{СН}^{\;2}}{U_{ном}^{\;2}} \cdot \frac{R_{АТс} + i \cdot X_{АТс}}{2} \qquad \Delta S_{АТс} = 0.062 \quad МВА$$

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

$$\Delta S_{АТн} := \frac{\left(\frac{P_{НН}}{2}\right)^2 + \left(\frac{Q_{НН}}{2}\right)^2}{U_{ном}^{\;2}} \cdot \left(R_{АТн} + i \cdot X_{АТн}\right) \qquad \Delta S_{АТн} = 0.045 + 1.844i \quad МВА$$

Тогда мощность обмотки высокого напряжения равна:

$$S_{ВН} := 2 \cdot \left(\frac{P_{НН}}{2} + i \cdot \frac{Q_{НН}}{2} + \Delta S_{АТн}\right) + P_{СН} + i \cdot Q_{СН} + \Delta S_{АТн} \qquad S_{ВН} = 150.135 + 60.532i \quad МВА$$

Активная и реактивная мощности обмотки высокого напряжения соответственно равны:

$$P_{ВН} := 150.135 \;\; МВт \qquad Q_{ВН} := 60.532 \;\; Мвар$$

Определим суммарные потери активной и реактивной мощности в автотрансформаторе

$$\Delta P_{AT} := 2\cdot\frac{\left(\frac{P_{нн}}{2}\right)^2+\left(\frac{Q_{нн}}{2}\right)^2}{U_{ном}^2}\cdot R_{ATн}+\frac{P_{сн}^2+Q_{сн}^2}{U_{ном}^2}\cdot\frac{R_{ATс}}{2}+\frac{P_{вн}^2+Q_{вн}^2}{U_{ном}^2}\cdot\frac{R_{ATв}}{2}+2\cdot\Delta P_{xAT}$$

$\Delta P_{AT} = 0.423$ МВт

$$\Delta Q_{AT} := 2\cdot\frac{\left(\frac{P_{нн}}{2}\right)^2+\left(\frac{Q_{нн}}{2}\right)^2}{U_{ном}^2}\cdot X_{ATн}+\frac{P_{сн}^2+Q_{сн}^2}{U_{ном}^2}\cdot\frac{X_{ATс}}{2}+\frac{P_{вн}^2+Q_{вн}^2}{U_{ном}^2}\cdot\frac{X_{ATв}}{2}+2\cdot\Delta Q_{xAT}$$

$\Delta Q_{AT} = 18.203$ Мвар

Приведенная нагрузка автотрансформатора:

$S_{пр} := P_{нн} + P_{сн} + \Delta P_{AT} + i\cdot(Q_{нн} + Q_{сн} + \Delta Q_{AT})$ $S_{пр} = 150.423 + 73.203i$ МВА

Зарядная мощность линии равна:

$Q_{cw} := \frac{1}{2}\cdot\left(U_{ном}^2\cdot b_{0\_300}\cdot l_w\right)\cdot 2$ $Q_{cw} = 19.203$ Мвар

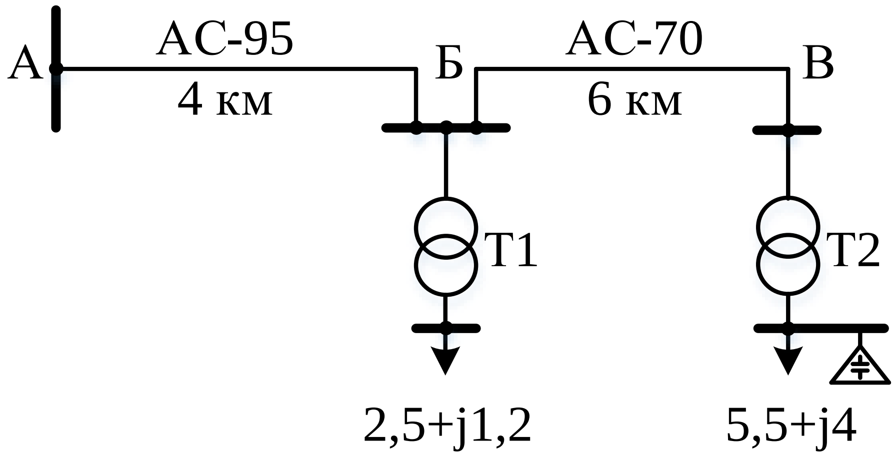
Расчетная нагрузка автотрансформатора

$S_r := S_{пр} - i\cdot Q_{cw}$ $S_r = 150.423 + 54i$ МВА

Задачи для самостоятельного решения

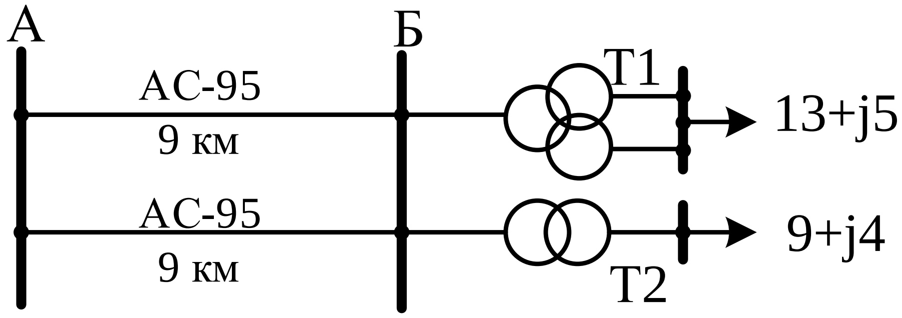
№1

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



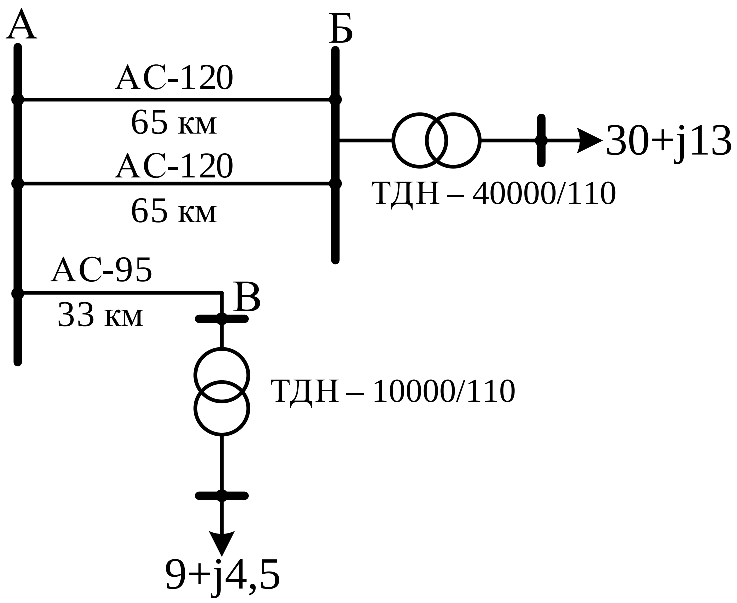
№2

Подстанция, на которой установлены трансформаторы типа ТРДН-25000/35 (Т1) и типа ТДН-1 0000/35 (Т2), получает питание по двух-цепной 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



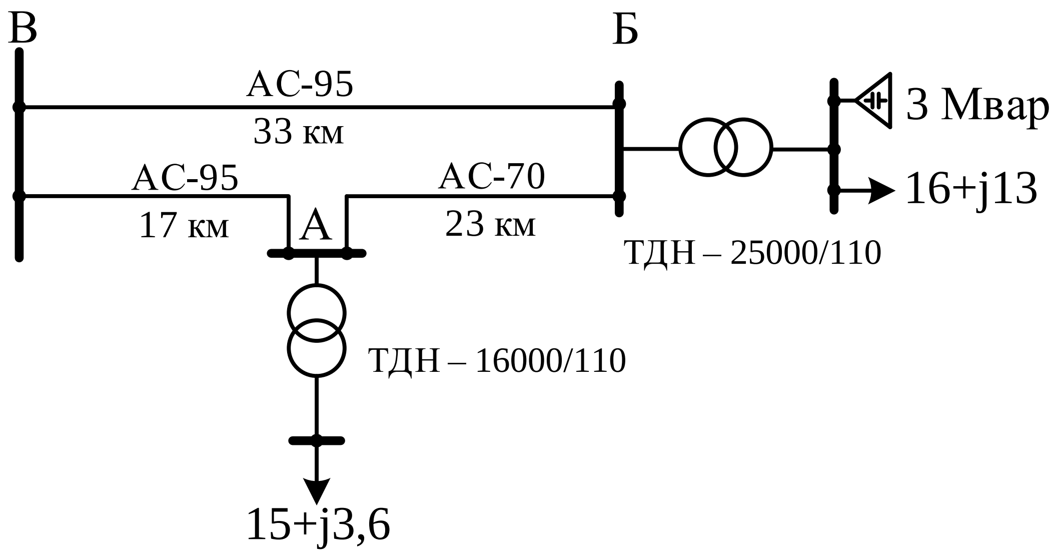
№3

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



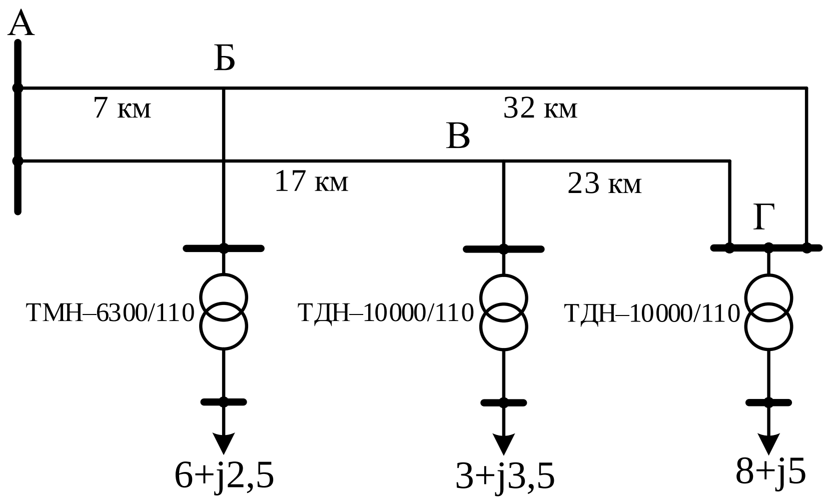
№4

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



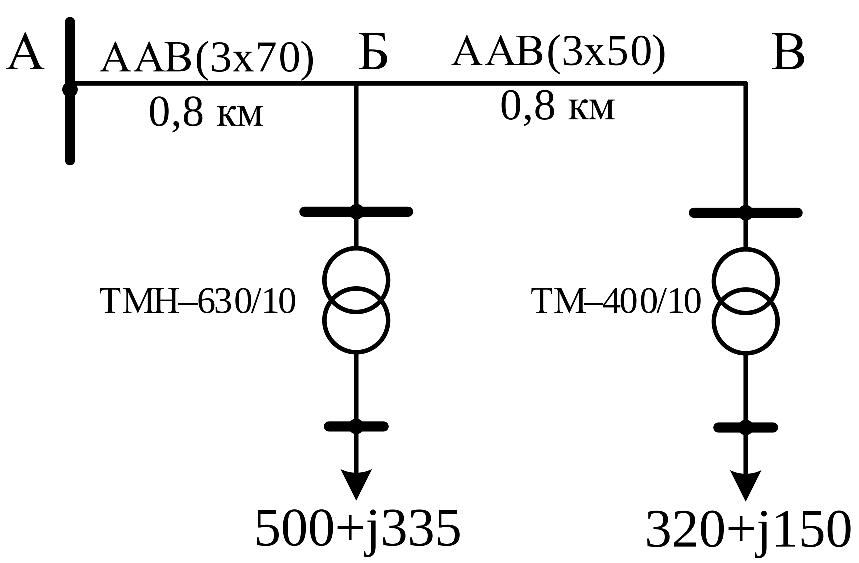
№5

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



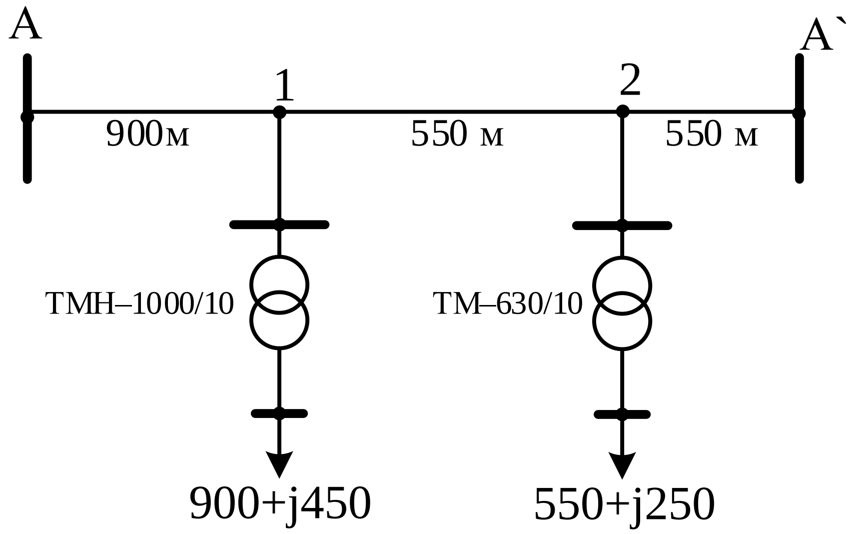
№6

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.



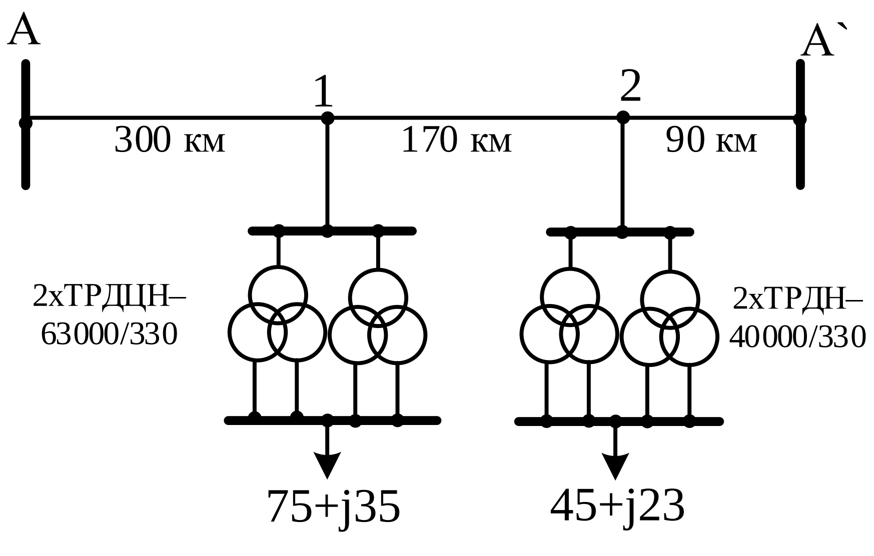
№7

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.



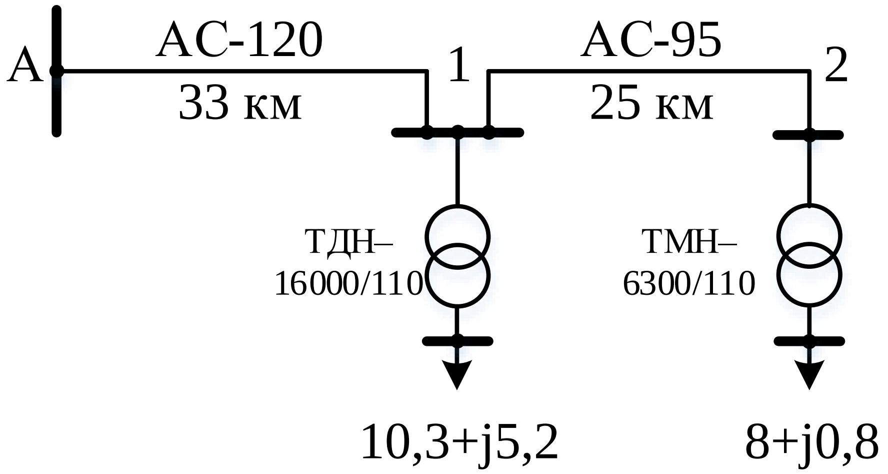
№8

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.



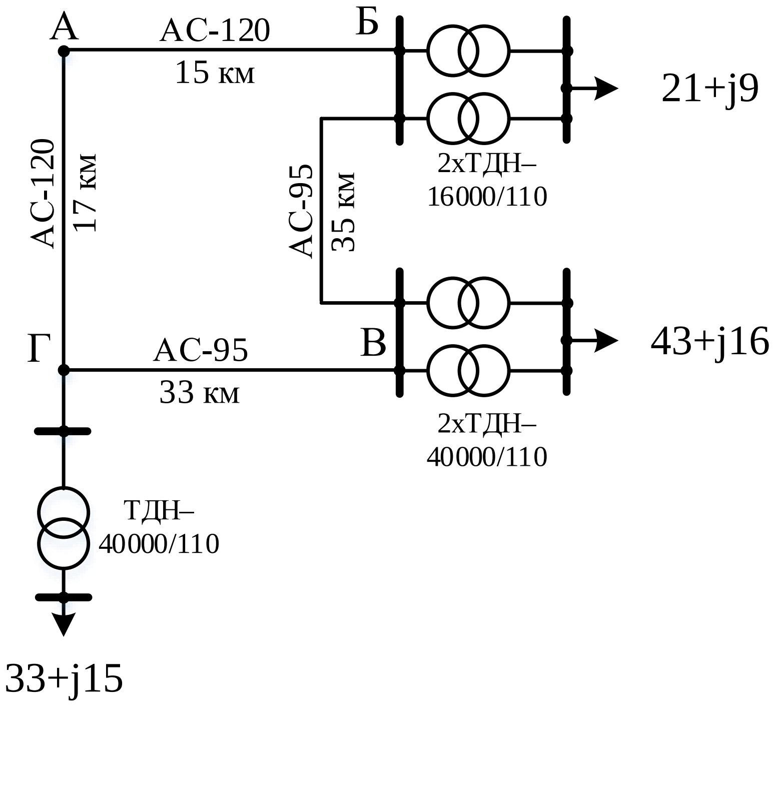
№9

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



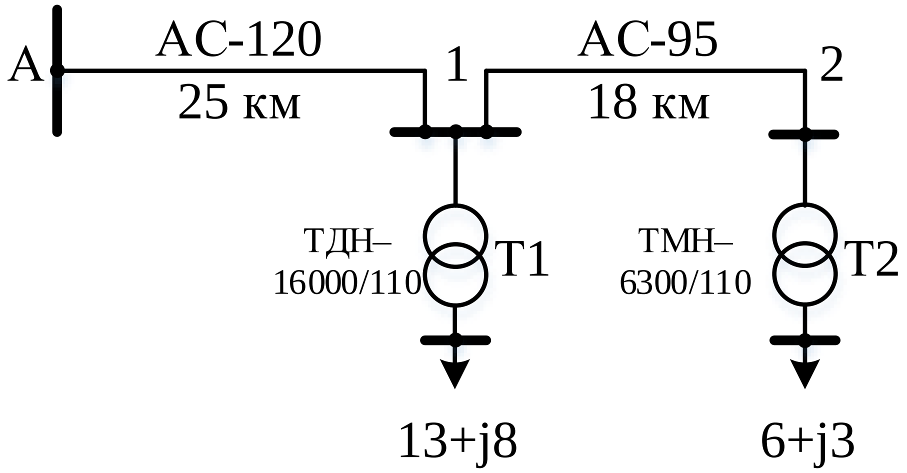
№10

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



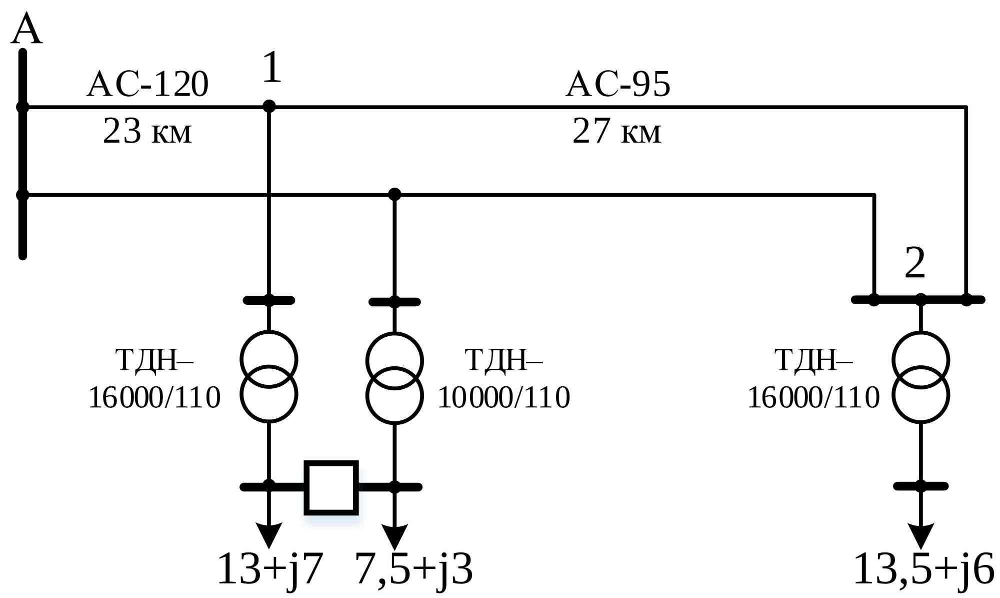
№11

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.



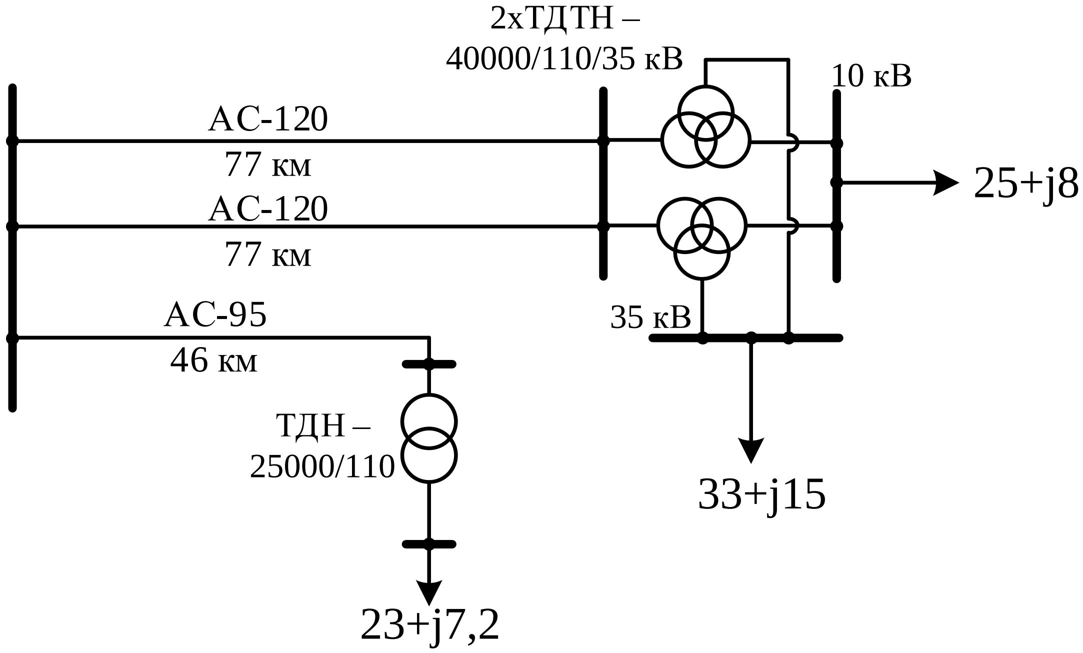
№12

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



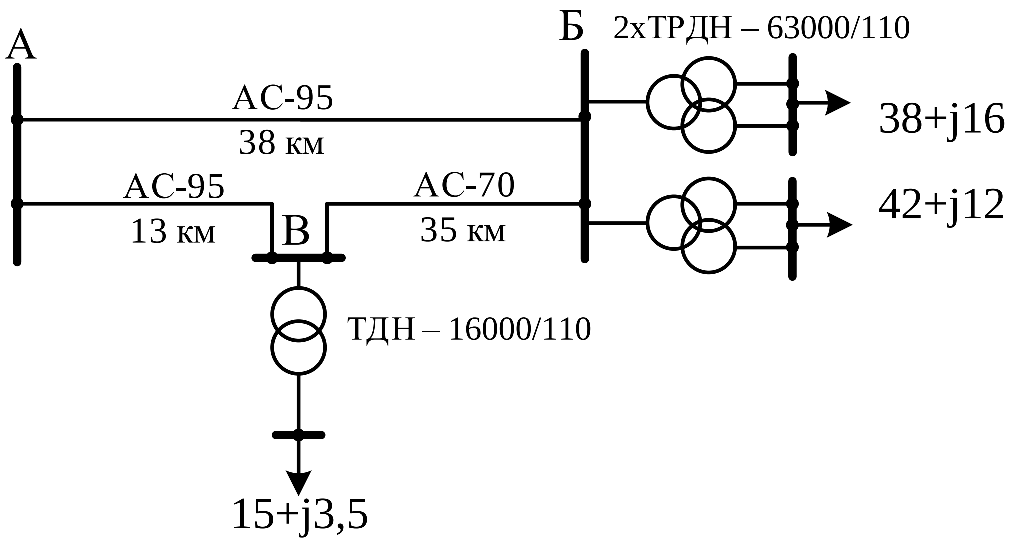
№13

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



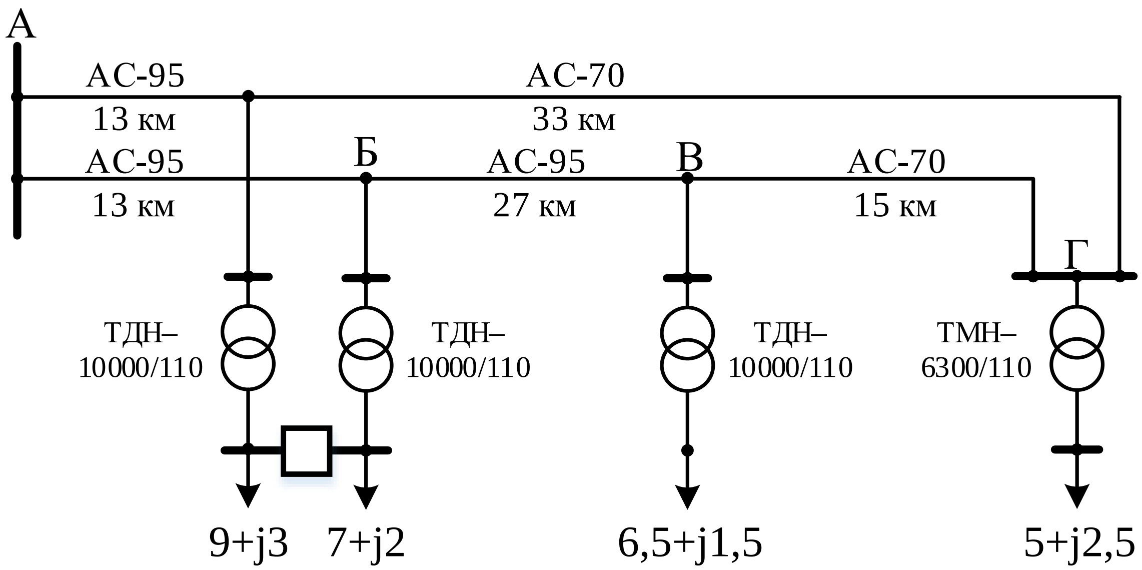
№14

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.



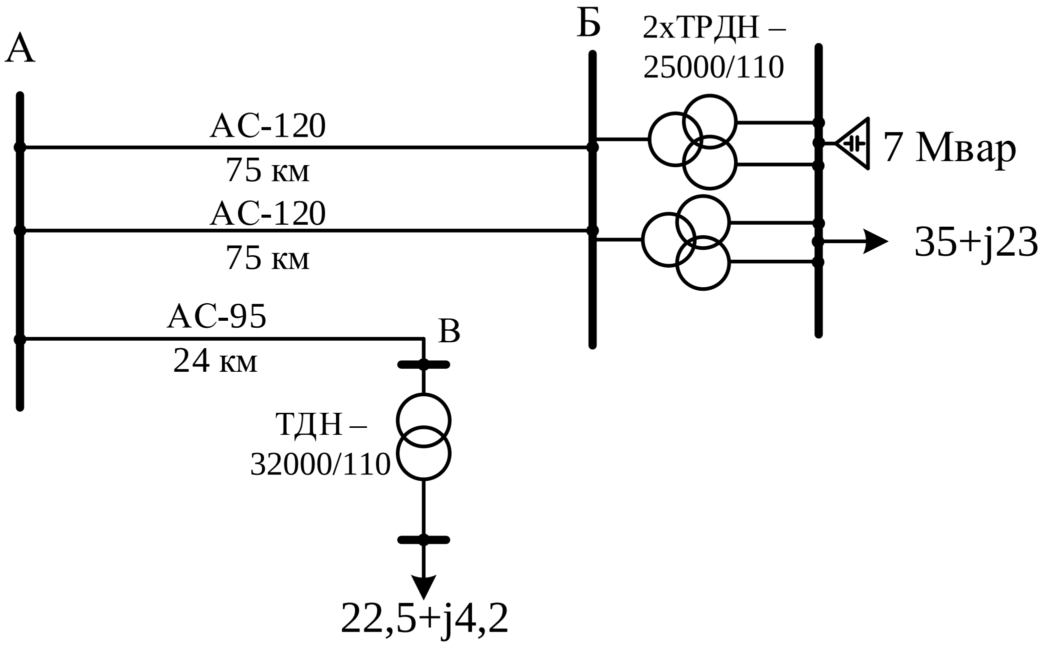
№15

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



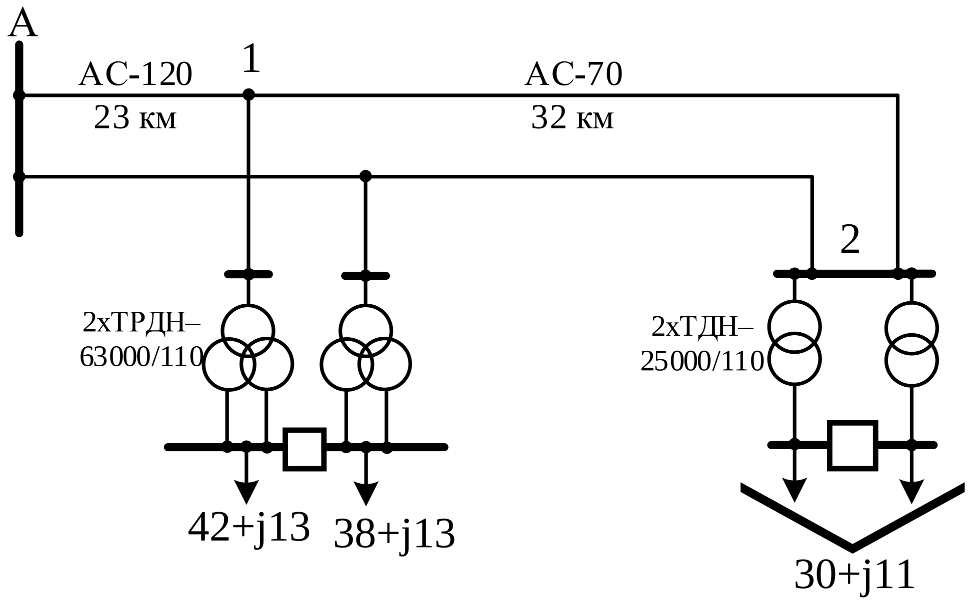
№16

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



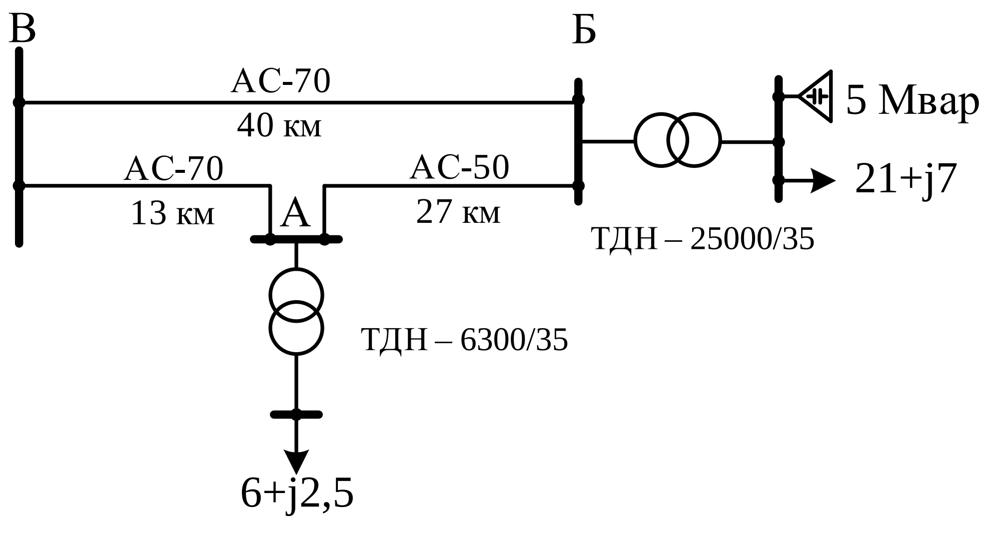
№17

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



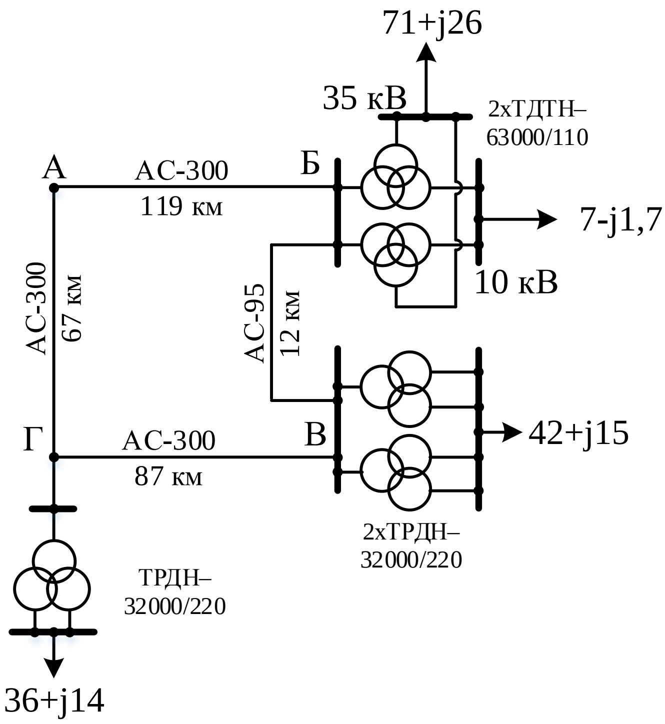
№18

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.



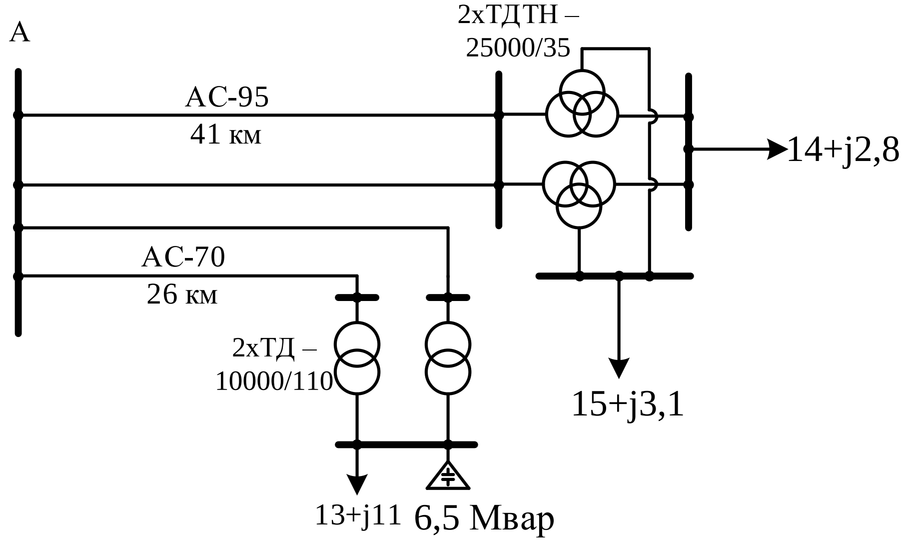
№19

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



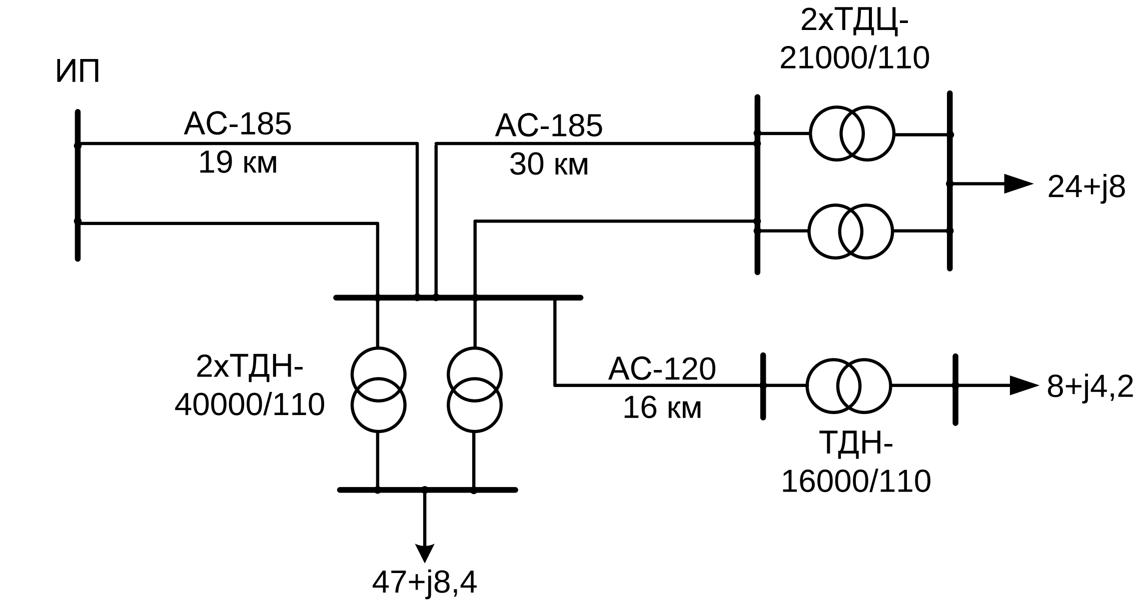
№20

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



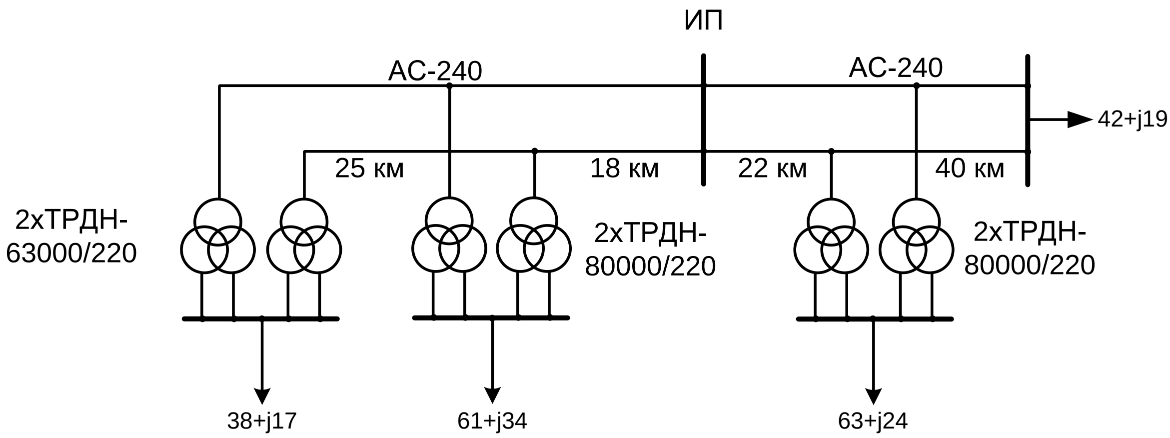
№ 21

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



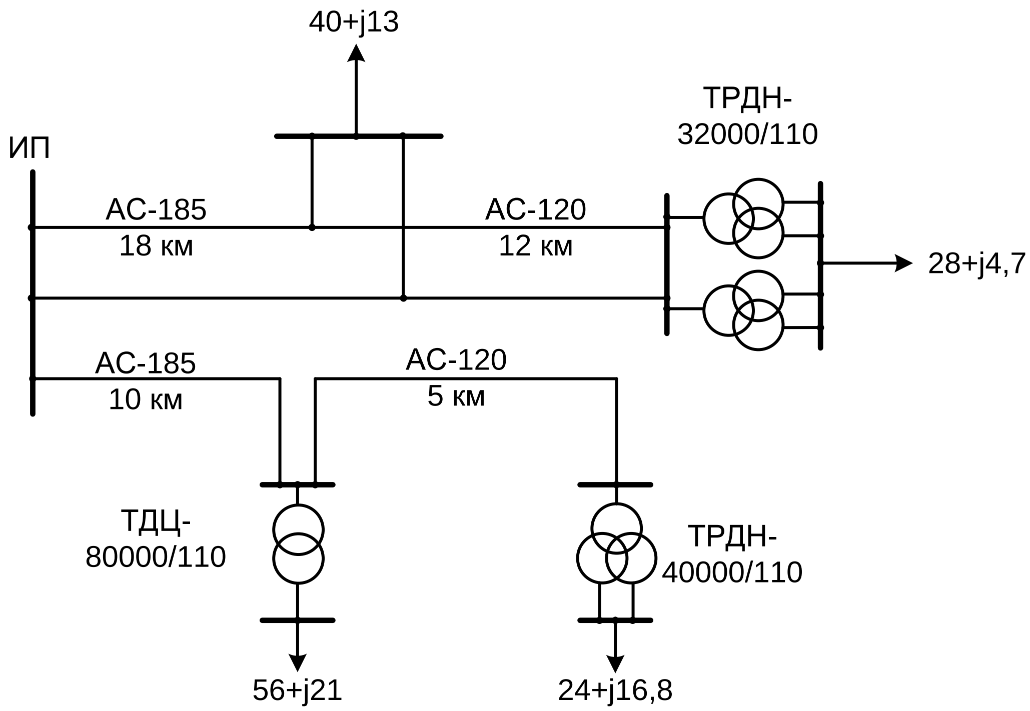
№ 22

Напряжение источника питания 220 кВ. Составить схему замещения сети, определить ее параметры и расчетные нагрузки узлов.



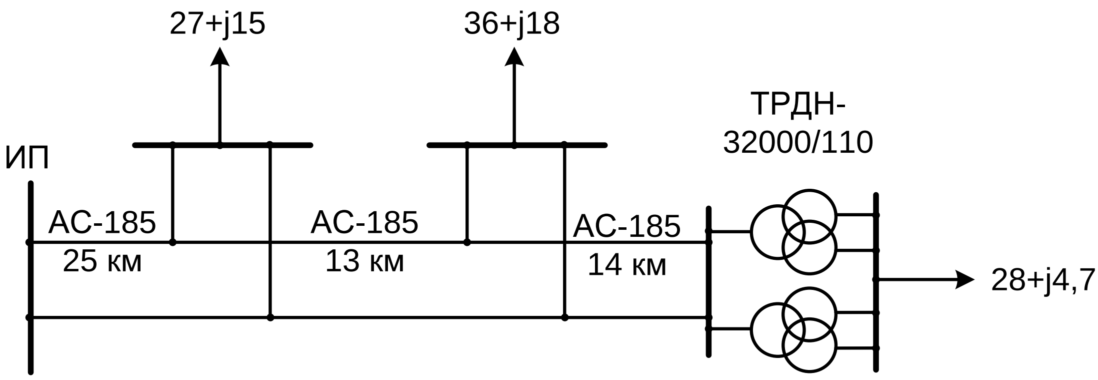
№ 23

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



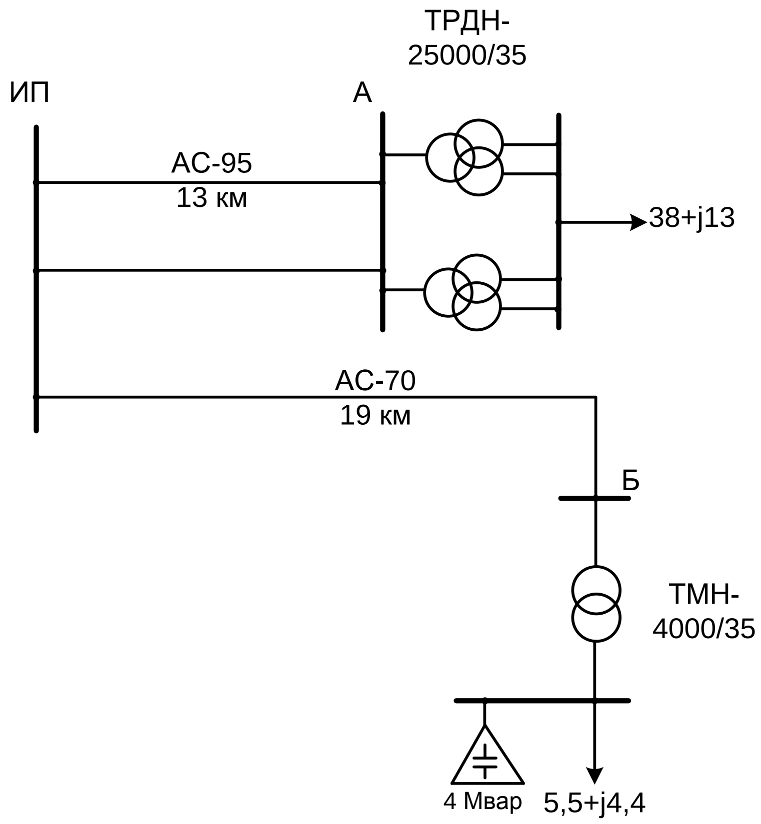
№ 24

Напряжение источника питания 112 кВ. Составить схему замещения сети, определить ее параметры и расчетные нагрузки узлов.



№ 25

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

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. 2.3.

Здесь (рис. 2.3 а) показана радиальная разомкнутая сеть, на рис. 2.3 б - магистраль, на рис. 2.3 в - разветвленная разомкнутая сеть.

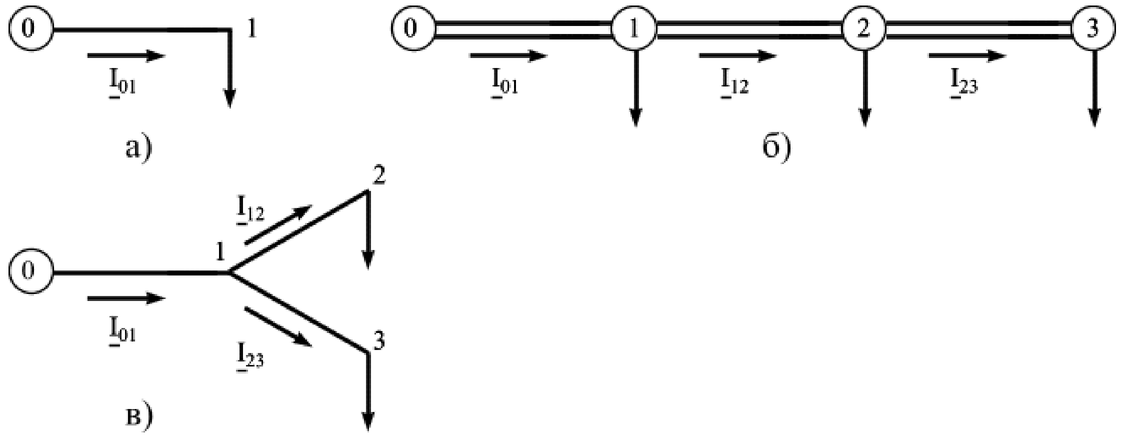


Рис. 2.3. Варианты выполнения разомкнутых сетей

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

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

Алгоритм расчета сети рассмотрим на примере схемы, приведенной на рис. 2.4.

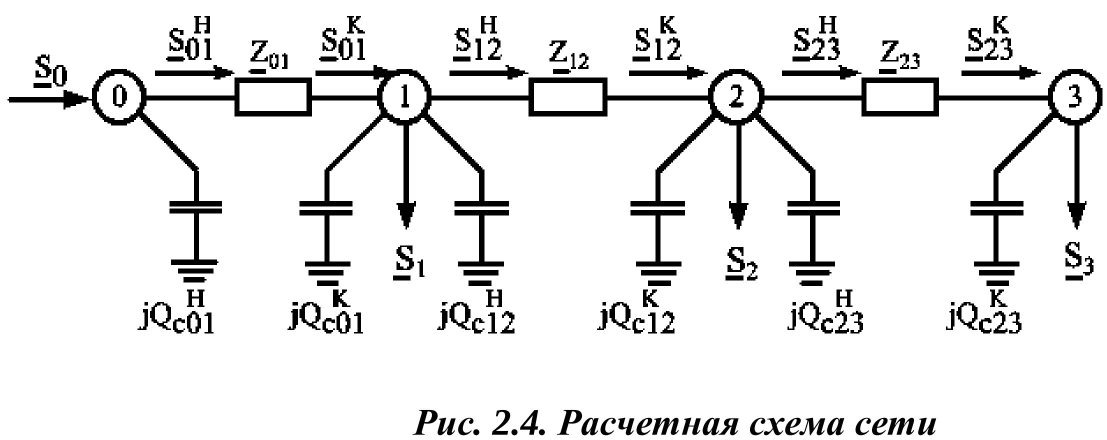


Рис. 2.4. Расчетная схема сети

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:

$$Q^{k}_{c23} = \frac{b_{23} l_{23} U_3^2}{2} \qquad (2.13)$$

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

$$\underline{S}^{к}_{23} = \underline{S}_3 - j\, Q^{к}_{c23}\,. \qquad (2.14)$$

3. Определяем потери мощности на последнем участке:

$$\Delta \underline{S}_{23} = \frac{{P^{к}_{23}}^2 + {Q^{к}_{23}}^2}{U_3^2}\left(R_{23} + jX_{23}\right). \qquad (2.15)$$

4. Находим мощность в начале последнего участка:

$$\underline{S}^{н}_{23} = \underline{S}^{к}_{23} + \Delta \underline{S}_{23}\,. \qquad (2.16)$$

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

$$\underline{U}_{\Delta 23} = \frac{P^{к}_{23} \cdot R_{23} + Q^{к}_{23} \cdot X_{23}}{U_3^*} + j\,\frac{P^{к}_{23} \cdot X_{23} - Q^{к}_{23} \cdot R_{23}}{U_3^*}. \qquad (2.17)$$

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

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_3 + \underline{U}_{\Delta 23}\,. \qquad (2.18)$$

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

$$Q^{н}_{c23} = \frac{b_{23} l_{23} U_3^2}{2} \qquad (2.19)$$

$$Q^{k}_{c12} = \frac{b_{12} l_{12} U_2^2}{2} \qquad (2.20)$$

8. Определим мощность в конце предпоследнего участка:

$$\underline{S}^{k}_{12} = \underline{S}^{н}_{23} + \underline{S}_2 - j\,(Q^{н}_{c23} + Q^{к}_{c12}). \qquad (2.21)$$

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:

$$\underline{S}_{эс} = \underline{S}^{н}_{01} - j\,Q^{н}_{c01}\,. \qquad (2.22)$$

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

На рис. 2.5 приведена векторная диаграмма токов и напряжений для рассмотренного алгоритма расчета.

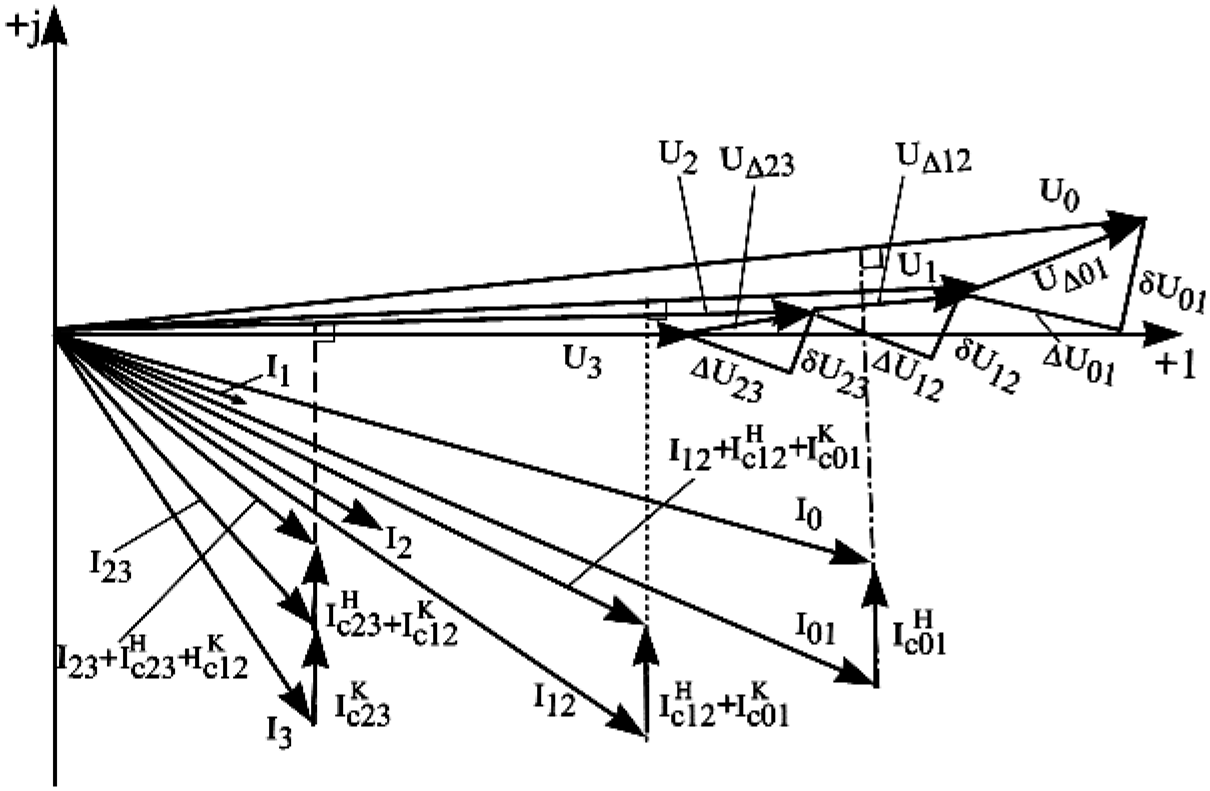


Рис. 2.5. Векторная диаграмма, иллюстрирующая рассматриваемый алгоритм

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

В рассматриваемом случае известны нагрузки в узлах и напряжение источника питания. 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. 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 схемы замещения, показанной на рис. 2.6. В ней используется приведенная мощность нагрузки узлов.

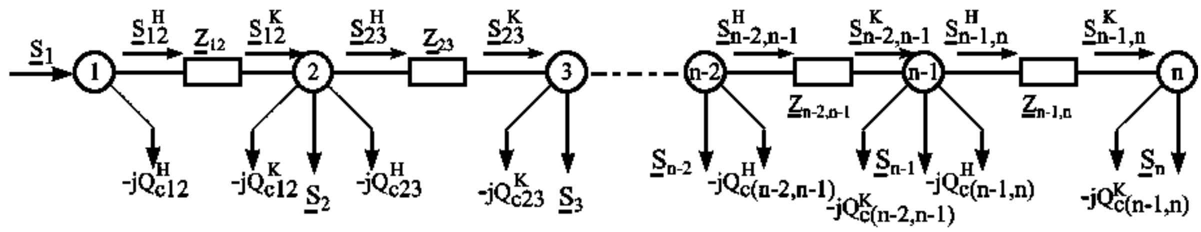


Рис. 2.6. Схема замещения разомкнутой сети для расчета по данным начала

Первый этап

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:

$$Q_{Cij}^{H} = Q_{Cij}^{K} = \frac{1}{2} b_{0\,ij} \cdot l_{ij} \cdot U_{HOM}^{2} \qquad (2.23)$$

или

$$Q_{Cij}^{H} = Q_{Cij}^{K} = \frac{1}{2} q_{0\,ij} \cdot l_{ij}, \qquad (2.24)$$

где $Q_{Cij}^{н}$ и $Q_{Cij}^{к}$ – 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:

$$\underline{S}_{n-1,n}^{K} = \underline{S}_{ПР(n)} - j \sum_{\substack{i=1 \\ j=i+1}}^{N} Q_{Cij}, \qquad (2.25)$$

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

$i\,j$ - номер линии, подходящей к последнему участку сети;

N - число линий, подходящих к последнему участку сети.

3. Определение потерь мощности на последнем участке сети:

$$\Delta\underline{S}_{n-1,n} = \frac{(P_{n-1,n}^{K})^2 + (Q_{n-1,n}^{K})^2}{U_{HOM}^{2}} (R_{n-1,n} + jX_{n-1,n}). \qquad (2.26)$$

4. Определение потока мощности в начале последнего участка сети:

$$\underline{S}_{n-1,n}^{H} = \underline{S}_{n-1,n}^{K} + \Delta\underline{S}_{n-1,n}. \qquad (2.27)$$

5. Определение потока мощности к конце предпоследнего участка сети:

$$\underline{S}_{n-2,n-1}^{K} = \underline{S}_{n-1,n}^{H} + \underline{S}_{ПР(n-1)} - j \sum_{\substack{i=1 \\ j=i+1}}^{N} Q_{Cij}. \qquad (2.28)$$

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

Второй этап

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. В алгоритме используется сквозная нумерация шагов (пунктов выполнения).

6. Определение падения напряжения на головном участке:

$$\underline{U}_{\Delta 12} = \frac{P_{12}^{H} R_{12} + Q_{12}^{H} X_{12}}{\overset{*}{U}_{1}} + j\frac{P_{12}^{H} X_{12} - Q_{12}^{H} R_{12}}{\overset{*}{U}_{1}} = \Delta U_{12} + j\delta U_{12}, \qquad (2.29)$$

где $\overset{*}{U}_{1}$ - сопряженный комплекс напряжения источника питания.

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

$$\underline{U}_{2} = \underline{U}_{1} - \underline{U}_{\Delta 12}. \qquad (2.30)$$

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

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

$$U_{i+1} = \sqrt{(U_i - \Delta U_{i,i+1})^2 + (\delta U_{i,i+1})^2}\ ; \qquad (2.31)$$

$$\varphi_{U_{i+1}} = arctg\frac{\delta U_{i,i+1}}{U_i - \Delta U_{i,i+1}} \qquad (2.32)$$

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

$$|\varepsilon| = \left|\frac{U^{(1)}{}_n - U_{HOM}}{U^{(1)}{}_n}\right| 100\% \le 5\%, \qquad (2.33)$$

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

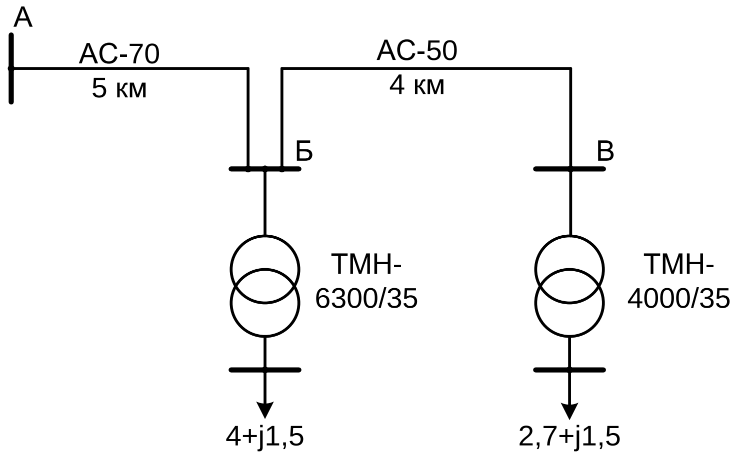
Примечание: в листингах примеров, рассчитанных в программе MathCad, точки после формул не ставятся, поскольку это некорректно для программной среды. В ряде примеров, с использованием данной программы, символы z, S, U, следует воспринимать как обозначения, соответствующие $\underline{Z}$, $\underline{S}$,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

Пример 2.4.

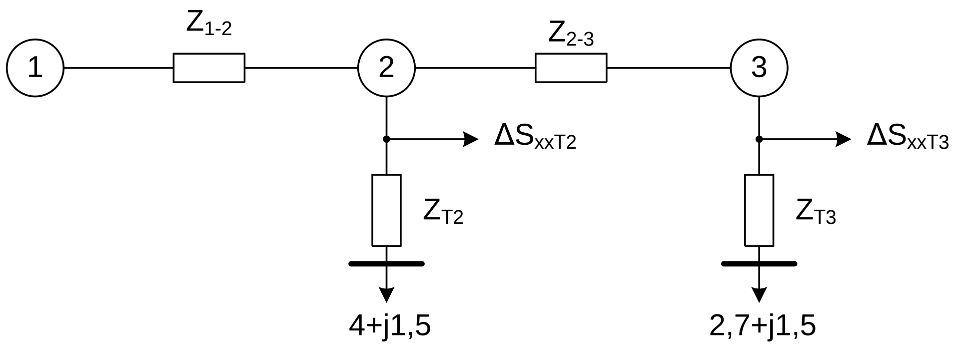
Рассчитать установившийся режим разомкнутой сети:

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, присваивая цифровую нумерацию узлов сети: ИП А – узел 1, ПС Б – узел 2, ПС В – узел 3.



Исходные данные к задаче

Напряжения:

$U_{ном} := 35$ кВ $\quad U_3 := 34.2$ кВ $\quad U_{ИП} := 37$ кВ

Длины линий:

$l_{12} := 5$ км $\quad l_{23} := 4$ км

Определяем параметры схемы замещения: по справочным данным определяем параметры линий и трансформаторов (*индексация трансформаторов осуществлена в соответствии с номером узла*)

Провод АС-50/8:

$r_{0\_50} := 0.63 \ \frac{Ом}{км} \qquad x_{0\_50} := 0.41 \ \frac{Ом}{км}$

Провод АС-70/11:

$r_{0\_70} := 0.42 \ \frac{Ом}{км} \qquad x_{0\_70} := 0.43 \ \frac{Ом}{км}$

Трансформатор ТМН-6300/35:

$R_{T2} := 1.4$ Ом $\quad X_{T2} := 14.6$ Ом $\quad \Delta P_{xT2} := 0.009$ МВт $\quad \Delta Q_{xT2} := 0.056$ Мвар

Трансформатор ТМН-4000/35

$R_{T3} := 2.6$ Ом $\quad X_{T3} := 23$ Ом $\quad \Delta P_{xT3} := 0.006$ МВт $\quad \Delta Q_{xT3} := 0.04$ Мвар

Нагрузка в узлах сети:

$P_{н2} := 4$ МВт $\quad Q_{н2} := 1.5$ Мвар

$P_{н3} := 2.7$ МВт $\quad Q_{н3} := 1.5$ Мвар

Находим значения активного, индуктивного и полного сопротивления линий 1-2 и 2-3 в соответствии с их длиной

$R_{12} := r_{0\_70} \cdot l_{12} \qquad R_{12} = 2.11$ Ом

$X_{12} := x_{0\_70} \cdot l_{12}$ $\qquad X_{12} = 2.16$ Ом

$R_{23} := r_{0\_50} \cdot l_{23}$ $\qquad R_{23} = 2.52$ Ом

$X_{23} := x_{0\_50} \cdot l_{23}$ $\qquad X_{23} = 1.668$ Ом

$Z_{12} := R_{12} + i \cdot X_{12}$ $\qquad Z_{12} = 2.11 + 2.16i$ Ом

$Z_{23} := R_{23} + i \cdot X_{23}$ $\qquad Z_{23} = 2.52 + 1.668i$ Ом

а) **Расчет режима по данным конца**

Определяем потери мощности в трансформаторах Т2 и Т3.

$$\Delta P_{T2} := \frac{P_{н2}^2 + Q_{н2}^2}{U_{ном}^2} \cdot R_{T2} + \Delta P_{xT2} \qquad \Delta P_{T2} = 0.03 \text{ МВт}$$

$$\Delta Q_{T2} := \frac{P_{н2}^2 + Q_{н2}^2}{U_{ном}^2} \cdot X_{T2} + \Delta Q_{xT2} \qquad \Delta Q_{T2} = 0.274 \text{ Мвар}$$

$$\Delta P_{T3} := \frac{P_{н3}^2 + Q_{н3}^2}{U_{ном}^2} \cdot R_{T3} + \Delta P_{xT3} \qquad \Delta P_{T3} = 0.027 \text{ МВт}$$

$$\Delta Q_{T3} := \frac{P_{н3}^2 + Q_{н3}^2}{U_{ном}^2} \cdot X_{T3} + \Delta Q_{xT3} \qquad \Delta Q_{T3} = 0.219 \text{ Мвар}$$

Приведенные нагрузки узлов равны:

$$S_{пр2} := P_{н2} + \Delta P_{T2} + i \cdot \left(Q_{н2} + \Delta Q_{T2}\right) \qquad S_{пр2} = 4.03 + 1.774i \text{ МВА}$$

$$S_{пр3} := P_{н3} + \Delta P_{T3} + i \cdot \left(Q_{н3} + \Delta Q_{T3}\right) \qquad S_{пр3} = 2.727 + 1.719i \text{ МВА}$$

В сети 35 кВ не учитывается зарядная мощность линий ввиду ее малости. Тогда мощность в конце участка 2-3 равна приведенной нагрузке узла 3.

$$S_{23к} := S_{пр3} \qquad S_{23к} = 2.727 + 1.719i \text{ МВА}$$

Перетоки активной и реактивной мощности по ветви 2-3 соответственно равны:

$P_{23к} := 2.72$ МВт $\qquad Q_{23к} := 1.71$ Мвар

Определим потери мощности на участке 2-3 по известному напряжению узла 3, равному U_3=34,2 кВ

$$\Delta S_{23} := \frac{P_{23к}^2 + Q_{23к}^2}{U_3^2} \cdot Z_{23} \qquad \Delta S_{23} = 0.0224 + 0.0148i \ \text{МВА}$$

Определим потерю напряжения на участке 2-3, пренебрегая поперечной составляющей падения напряжения

$$\Delta U_{23} := \frac{P_{23к} \cdot R_{23} + Q_{23к} \cdot X_{23}}{U_3} \qquad \Delta U_{23} = 0.285 \ \text{кВ}$$

Определим напряжение узла 2:

$$U_2 := U_3 + \Delta U_{23} \qquad U_2 = 34.485 \ \text{кВ}$$

Находим поток мощности в начале участка

$$S_{23н} := S_{23к} + \Delta S_{23} \qquad S_{23н} = 2.749 + 1.734i \ \text{МВА}$$

Находим поток мощности в конце участка 1-2 и потери мощности на этом участке

$$S_{12к} := S_{23н} + S_{пр2} \qquad S_{12к} = 6.779 + 3.508i \ \text{МВА}$$

Перетоки активной и реактивной мощности по ветви 1-2 соответственно равны

$$P_{12к} := 6.7 \ \text{МВт} \qquad Q_{12к} := 3.5 \ \text{Мвар}$$

$$\Delta S_{12} := \frac{P_{12к}^2 + Q_{12к}^2}{U_2^2} \cdot Z_{12} \qquad \Delta S_{12} = 0.1033 + 0.1057i \ \text{МВА}$$

Находим поток мощности в начале участка 1-2

$$S_{12н} := S_{12к} + \Delta S_{12} \qquad S_{12н} = 6.883 + 3.614i \ \text{МВА}$$

Определим потерю напряжения на участке 1-2

$$\Delta U_{12} := \frac{P_{12к} \cdot R_{12} + Q_{12к} \cdot X_{12}}{U_2} \qquad \Delta U_{12} = 0.634 \ \text{кВ}$$

Определим напряжение на источнике питания 1

$$U_1 := U_2 + \Delta U_{12} \qquad U_1 = 35.119 \ \text{кВ}$$

б) **Расчет режима по данным начала**

Для исключения переопределения переменных используем в индексации одинаковых величин знак "

Находим поток мощности в конце участка 2-3 и потери на этом участке, принимая напряжение в узлах равным номинальному, $U_{ном}$=35 кВ.

$S_{23к"} := S_{пр3}$ $\qquad S_{23к} = 2.727 + 1.719i$ МВА

Перетоки активной и реактивной мощности по ветви 2-3 соответственно равны:

$P_{23к"} := 2.72$ МВт $\qquad Q_{23к"} := 1.71$ Мвар

$$\Delta S_{23"} := \frac{P_{23к"}^2 + Q_{23к"}^2}{U_{ном}^2} \cdot Z_{23} \qquad \Delta S_{23"} = 0.0214 + 0.0141i \text{ МВА}$$

Находим потоки мощности в начале участка 2-3 и конце участка 1-2

$S_{23н"} := S_{23к"} + \Delta S_{23"}$ $\qquad S_{23н"} = 2.748 + 1.733i$ МВА

$S_{12к"} := S_{23н"} + S_{пр2}$ $\qquad S_{12к"} = 6.778 + 3.507i$ МВА

Перетоки активной и реактивной мощности в конце ветви 1-2 и начале ветви 2-3 соответственно равны:

$P_{12к"} := 6.77$ МВт $\qquad Q_{12к"} := 3.50$ Мвар

$P_{23н"} := 2.74$ МВт $\qquad Q_{23н"} := 1.73$ Мвар

Находим потери мощности на участке 1-2 и поток мощности в начале участка:

$$\Delta S_{12"} := \frac{P_{12к"}^2 + Q_{12к"}^2}{U_{ном}^2} \cdot Z_{12} \qquad \Delta S_{12"} = 0.1003 + 0.1027i \text{ МВА}$$

$S_{12н"} := S_{12к"} + \Delta S_{12"}$ $\qquad S_{12н"} = 6.879 + 3.61i$ МВА

Перетоки активной и реактивной мощности по началу ветви 1-2 соответственно равны:

$P_{12н"} := 6.87$ МВт $\qquad Q_{12н"} := 3.6$ Мвар

Находим потерю напряжения на участках 1-2 и 2-3 напряжения в узлах 2 и 3 по известному напряжению источника питания

$$\Delta U_{12''} := \frac{P_{12н''} \cdot R_{12} + Q_{12н''} \cdot X_{12}}{U_{ИП}} \qquad \Delta U_{12''} = 0.603 \quad кВ$$

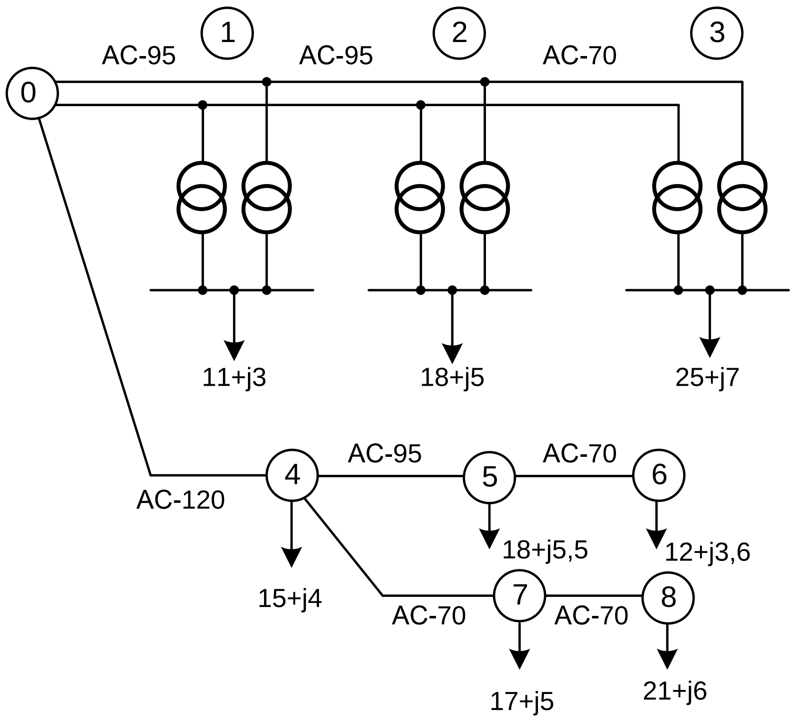
$$U_{2''} := U_{ИП} - \Delta U_{12'} \qquad U_{2''} = 36.397 \quad кВ$$

$$\Delta U_{23''} := \frac{P_{23н''} \cdot R_{12} + Q_{23н''} \cdot X_{12}}{U_{2''}} \qquad \Delta U_{23''} = 0.262 \quad кВ$$

$$U_{3''} := U_{2''} - \Delta U_{23''} \qquad U_{3''} = 36.135 \quad кВ$$

Пример 2.5.

Рассчитать режим распределительной 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. Экономически целесообразный tgφ, указанный в договоре энергоснабжения, равен 0,3.



Длины участков:

$l_{01} := 20$ км $\quad l_{04} := 32$ км $\quad l_{47} := 19$ км

$l_{12} := 18$ км $\quad l_{45} := 24$ км $\quad l_{78} := 21$ км

$l_{23} := 25$ км $\quad l_{56} := 12$ км

Определим активные и индуктивные сопротивления, а также емкостные проводимости схем замещения участков сети. В справочных данных находим погонные активные сопротивления сталеалюминевых проводов в зависимости от сечения провода:

Погонные сопротивления

$\text{АС} - 70$

$r_{0\_70} := 0.422 \quad \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$

$x_{0\_70} := 0.444 \quad \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$

$b_{0\_70} := 2.547 \cdot 10^{-6} \quad \frac{\text{См}}{\text{км}}$

$\text{АС} - 95$

$r_{0\_95} := 0.301 \quad \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$

$x_{0\_95} := 0.434 \quad \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$

$b_{0\_95} := 2.611 \cdot 10^{-6} \quad \frac{\text{См}}{\text{км}}$

$\text{АС} - 120$

$r_{0\_120} := 0.244 \quad \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$

$x_{0\_120} := 0.427 \quad \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$

$b_{0\_120} := 2.658 \cdot 10^{-6} \quad \frac{\text{См}}{\text{км}}$

Активные и индуктивные сопротивления линий

$R_{01} := \frac{r_{0\_95}}{2} \cdot l_{01} = 3.01$ Ом $\qquad X_{01} := \frac{x_{0\_95}}{2} \cdot l_{01} = 4.34$ Ом

$R_{12} := \frac{r_{0\_95}}{2} \cdot l_{12} = 2.709$ Ом $\qquad X_{12} := \frac{x_{0\_95}}{2} \cdot l_{12} = 3.906$ Ом

$R_{23} := \frac{r_{0\_70}}{2} \cdot l_{23} = 5.275$ Ом $\qquad X_{23} := \frac{x_{0\_70}}{2} \cdot l_{23} = 5.55$ Ом

$R_{04} := r_{0\_120} \cdot l_{04} = 7.808$ Ом $\qquad X_{04} := x_{0\_120} \cdot l_{04} = 13.664$ Ом

$R_{45} := r_{0\_95} \cdot l_{45} = 7.224$ Ом $\qquad X_{45} := x_{0\_95} \cdot l_{45} = 10.416$ Ом

$R_{56} := r_{0\_70} \cdot l_{56} = 5.064$ Ом $\qquad X_{56} := x_{0\_70} \cdot l_{56} = 5.328$ Ом

$R_{47} := r_{0\_70} \cdot l_{47} = 8.018$ Ом $\qquad X_{47} := x_{0\_70} \cdot l_{47} = 8.436$ Ом

$R_{78} := r_{0\_70} \cdot l_{78} = 8.862$ Ом $\qquad X_{78} := x_{0\_70} \cdot l_{78} = 9.324$ Ом

Емкостные проводимости линий:

$B_{01} := b_{0\_95} \cdot l_{01} = 5.222 \times 10^{-5}$ См

$B_{12} := b_{0\_95} \cdot l_{12} = 4.7 \times 10^{-5}$ См

$B_{23} := b_{0\_70} \cdot l_{23} = 6.367 \times 10^{-5}$ См

$B_{04} := b_{0\_120} \cdot l_{04} = 8.506 \times 10^{-5}$ См

$B_{45} := b_{0\_95} \cdot l_{45} = 6.266 \times 10^{-5}$ См

$B_{56} := b_{0\_70} \cdot l_{56} = 3.056 \times 10^{-5}$ См

$B_{47} := b_{0\_70} \cdot l_{47} = 4.839 \times 10^{-5}$ См

$B_{78} := b_{0\_70} \cdot l_{78} = 5.349 \times 10^{-5}$ См

Полные сопротивления линий:

$Z_{01} := R_{01} + i \cdot X_{01}$ $Z_{01} = 3.01 + 4.34i$ Ом

$Z_{12} := R_{12} + i \cdot X_{12}$ $Z_{12} = 2.709 + 3.906i$ Ом

$Z_{23} := R_{23} + i \cdot X_{23}$ $Z_{23} = 5.275 + 5.55i$ Ом

$Z_{04} := R_{04} + i \cdot X_{04}$ $Z_{04} = 7.808 + 13.664i$ Ом

$Z_{45} := R_{45} + i \cdot X_{45}$ $Z_{45} = 7.224 + 10.416i$ Ом

$Z_{56} := R_{56} + i \cdot X_{56}$ $Z_{56} = 5.064 + 5.328i$ Ом

$Z_{47} := R_{47} + i \cdot X_{47}$ $Z_{47} = 8.018 + 8.436i$ Ом

$Z_{78} := R_{78} + i \cdot X_{78}$ $Z_{78} = 8.862 + 9.324i$ Ом

Заданные значения нагрузок в узлах:

$P_{Н1} := 11$ МВт $Q_{Н1} := 3$ Мвар

$P_{Н2} := 18$ МВт $Q_{Н2} := 5$ Мвар

$P_{Н3} := 25$ МВт $Q_{Н3} := 7$ Мвар

$P_{Н4} := 15$ МВт $Q_{Н4} := 4$ Мвар

$P_{Н5} := 18$ МВт $Q_{Н5} := 5.5$ Мвар

$P_{Н6} := 12$ МВт $Q_{Н6} := 3.6$ Мвар

$P_{Н7} := 17$ МВт $Q_{Н7} := 5$ Мвар

$P_{Н8} := 21$ МВт $Q_{Н8} := 6$ Мвар

$S_{Н1} := P_{Н1} + i \cdot Q_{Н1} = 11 + 3i$ МВА $S_{Н5} := P_{Н5} + i \cdot Q_{Н5} = 18 + 5.5i$ МВА

$S_{Н2} := P_{Н2} + i \cdot Q_{Н2} = 18 + 5i$ МВА $S_{Н6} := P_{Н6} + i \cdot Q_{Н6} = 12 + 3.6i$ МВА

$S_{Н3} := P_{Н3} + i \cdot Q_{Н3} = 25 + 7i$ МВА $S_{Н7} := P_{Н7} + i \cdot Q_{Н7} = 17 + 5i$ МВА

$S_{Н4} := P_{Н4} + i \cdot Q_{Н4} = 15 + 4i$ МВА $S_{Н8} := P_{Н8} + i \cdot Q_{Н8} = 21 + 6i$ 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 экономически целесообразном tg φ = 0,3.

$Q_{э1} := P_{н1} \cdot 0.3$ $\qquad Q_{э1} = 3.3$ Мвар

$Q_{э2} := P_{н2} \cdot 0.3$ $\qquad Q_{э2} = 5.4$ Мвар

$Q_{э3} := P_{н3} \cdot 0.3$ $\qquad Q_{э3} = 7.5$ Мвар

Находим расчетную мощность трансформаторов

$$S_{рТ1} := \frac{\sqrt{P_{н1}^2 + Q_{э1}^2}}{2 \cdot 0.7} \qquad S_{рТ1} = 8.203 \text{ МВА}$$

$$S_{рТ2} := \frac{\sqrt{P_{н2}^2 + Q_{э2}^2}}{2 \cdot 0.7} \qquad S_{рТ2} = 13.423 \text{ МВА}$$

$$S_{рТ3} := \frac{\sqrt{P_{н3}^2 + Q_{э3}^2}}{2 \cdot 0.7} \qquad S_{рТ3} = 18.643 \text{ МВА}$$

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 - активные и индуктивные сопротивления обмоток, потери активной и реактивной мощности в режиме Х.Х.:

$R_{T1} := 7.95$ Ом $\qquad X_{T1} := 139$ Ом

$R_{T2} := 4.38$ Ом $\qquad X_{T2} := 86.7$ Ом

$R_{T3} := 2.54$ Ом $\qquad X_{T3} := 55.9$ Ом

$$Z_{T1} := R_{T1} + i \cdot X_{T1} = 7.95 + 139i \quad \text{Ом}$$
$$Z_{T2} := R_{T2} + i \cdot X_{T2} = 4.38 + 86.7i \quad \text{Ом}$$
$$Z_{T3} := R_{T3} + i \cdot X_{T3} = 2.54 + 55.9i \quad \text{Ом}$$

$$\Delta P_{x\_T1} := 0.014 \quad \text{МВт} \qquad \Delta Q_{x\_T1} := 0.070 \quad \text{Мвар}$$
$$\Delta P_{x\_T2} := 0.019 \quad \text{МВт} \qquad \Delta Q_{x\_T2} := 0.112 \quad \text{Мвар}$$
$$\Delta P_{x\_T3} := 0.027 \quad \text{МВт} \qquad \Delta Q_{x\_T3} := 0.175 \quad \text{Мвар}$$

Определяем потери мощности в трансформаторах:

$$\Delta P_{T1} := \frac{P_{н1}^2 + Q_{н1}^2}{U_{ном}^2} \cdot R_{T1} + \Delta P_{x\_T1} \qquad \Delta P_{T1} = 0.099 \quad \text{МВт}$$

$$\Delta P_{T2} := \frac{P_{н2}^2 + Q_{н2}^2}{U_{ном}^2} \cdot R_{T2} + \Delta P_{x\_T2} \qquad \Delta P_{T2} = 0.145 \quad \text{МВт}$$

$$\Delta P_{T3} := \frac{P_{н3}^2 + Q_{н3}^2}{U_{ном}^2} \cdot R_{T3} + \Delta P_{x\_T3} \qquad \Delta P_{T3} = 0.168 \quad \text{МВт}$$

$$\Delta Q_{T1} := \frac{P_{н1}^2 + Q_{н1}^2}{U_{ном}^2} \cdot X_{T1} + \Delta Q_{x\_T1} \qquad \Delta Q_{T1} = 1.563 \quad \text{Мвар}$$

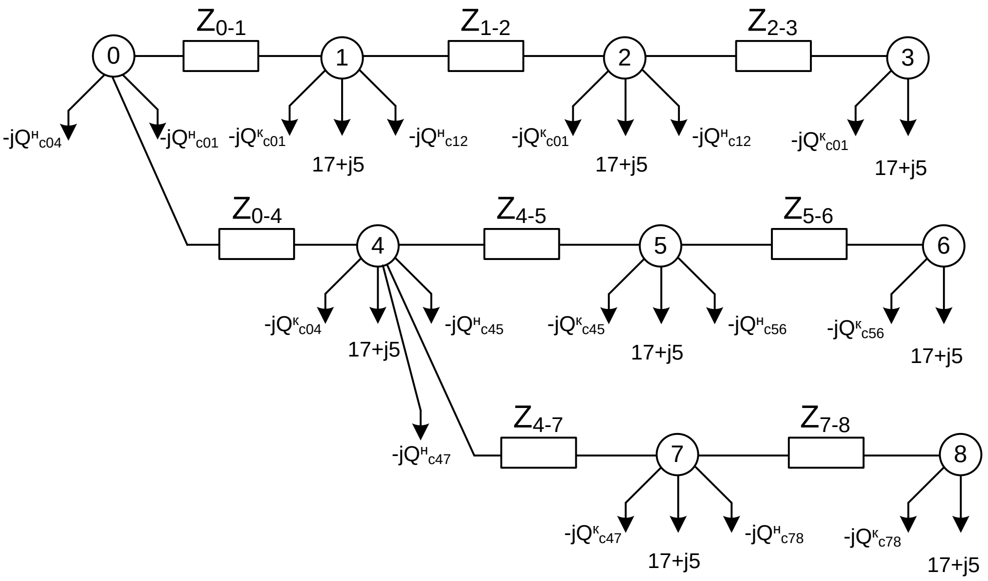
$$\Delta Q_{T2} := \frac{P_{н2}^2 + Q_{н2}^2}{U_{ном}^2} \cdot X_{T2} + \Delta Q_{x\_T2} \qquad \Delta Q_{T2} = 2.613 \quad \text{Мвар}$$

$$\Delta Q_{T3} := \frac{P_{н3}^2 + Q_{н3}^2}{U_{ном}^2} \cdot X_{T3} + \Delta Q_{x\_T3} \qquad \Delta Q_{T3} = 3.289 \quad \text{Мвар}$$

Определяем приведенные нагрузки узлов

$$S_{пр1} := P_{н1} + \Delta P_{T1} + i \cdot (Q_{н1} + \Delta Q_{T1}) \qquad S_{пр1} = 11.099 + 4.563i \quad \text{МВА}$$
$$S_{пр2} := P_{н2} + \Delta P_{T2} + i \cdot (Q_{н2} + \Delta Q_{T2}) \qquad S_{пр2} = 18.145 + 7.613i \quad \text{МВА}$$
$$S_{пр3} := P_{н3} + \Delta P_{T3} + i \cdot (Q_{н3} + \Delta Q_{T3}) \qquad S_{пр3} = 25.168 + 10.289i \quad \text{МВА}$$

Схему замещения приводим к виду, показанному на рисунке.



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

$U_0 := 120$ кВ

Находим значение зарядных мощностей в каждой линии:

$Q_{c01} := b_{0\_95} \cdot l_{01} \cdot U_{ном}^2$ $\qquad Q_{c01} = 0.632$ Мвар

$Q_{c12} := b_{0\_95} \cdot l_{12} \cdot U_{ном}^2$ $\qquad Q_{c12} = 0.569$ Мвар

$Q_{c23} := b_{0\_70} \cdot l_{23} \cdot U_{ном}^2$ $\qquad Q_{c23} = 0.77$ Мвар

$Q_{c04} := b_{0\_120} \cdot l_{04} \cdot \frac{1}{2} \cdot U_{ном}^2$ $\qquad Q_{c04} = 0.515$ Мвар

$Q_{c45} := b_{0\_95} \cdot l_{45} \cdot \frac{1}{2} \cdot U_{ном}^2$ $\qquad Q_{c45} = 0.379$ Мвар

$Q_{c56} := b_{0\_70} \cdot l_{56} \cdot \frac{1}{2} \cdot U_{ном}^2$ $\qquad Q_{c56} = 0.185$ Мвар

$Q_{c47} := b_{0\_70} \cdot l_{47} \cdot \frac{1}{2} \cdot U_{ном}^2$ $\qquad Q_{c47} = 0.293$ Мвар

$Q_{c78} := b_{0\_70} \cdot l_{78} \cdot \frac{1}{2} \cdot U_{ном}^2$ $\qquad Q_{c78} = 0.324$ Мвар

Находим потоки мощности на каждом участке сети с учетом потерь:

$S_{78к} := S_{н8} - i \cdot Q_{c78}$ $\qquad S_{78к} = 21 + 5.676i$ МВА

$P_{78к} := 21$ МВт

$Q_{78к} := 5.676$ Мвар

$$\Delta S_{78} := \frac{P_{78к}^2 + Q_{78к}^2}{U_{ном}^2} \cdot Z_{78} \qquad \Delta S_{78} = 0.347 + 0.365i \text{ МВА}$$

$S_{78н} := S_{78к} + \Delta S_{78}$ $\qquad S_{78н} = 21.347 + 6.041i$ МВА

$P_{78н} := 21.347$ МВт

$Q_{78н} := 6.041$ Мвар

$S_{47к} := S_{78н} + S_{н7} - \left(Q_{c78} + Q_{c47}\right)$ $\qquad S_{47к} = 37.73 + 11.041i$ МВА

$P_{47к} := 37.73$ МВт

$Q_{47к} := 11.041$ Мвар

$$\Delta S_{47} := \frac{P_{47к}^2 + Q_{47к}^2}{U_{ном}^2} \cdot Z_{47} \qquad \Delta S_{47} = 1.024 + 1.077i \text{ МВА}$$

$S_{47н} := S_{47к} + \Delta S_{47}$ $\qquad S_{47н} = 38.754 + 12.119i$ МВА

$P_{47н} := 38.754$ МВт

$Q_{47н} := 12.119$ Мвар

$S_{56к} := S_{н6} - i \cdot Q_{c56}$ $\qquad S_{56к} = 12 + 3.415i$ МВА

$P_{56к} := 12$ МВт

$Q_{56к} := 3.415$ Мвар

$$\Delta S_{56} := \frac{P_{56к}^2 + Q_{56к}^2}{U_{ном}^2} \cdot Z_{56} \qquad \Delta S_{56} = 0.065 + 0.069i \text{ МВА}$$

$S_{56н} := S_{56к} + \Delta S_{56}$ $\qquad S_{56н} = 12.065 + 3.484i$ МВА

$P_{56н} := 12.065$ МВт

$Q_{56н} := 3.484$ Мвар

$S_{45к} := S_{56н} + S_{н5} - i \cdot (Q_{c56} + Q_{c45})$

$P_{45к} := 30.065$ МВт

$Q_{45к} := 8.42$ Мвар

$S_{45к} = 30.065 + 8.42i$ МВА

$$\Delta S_{45} := \frac{P_{45к}^2 + Q_{45к}^2}{U_{ном}^2} \cdot Z_{45}$$

$\Delta S_{45} = 0.582 + 0.839i$ МВА

$S_{45н} := S_{45к} + \Delta S_{45}$

$S_{45н} = 30.647 + 9.259i$ МВА

$P_{45н} := 30.647$ МВт

$Q_{45н} := 9.259$ Мвар

$S_{04к} := S_{45н} + S_{47н} + S_{н4} - i \cdot (Q_{c45} + Q_{c04} + Q_{c47})$

$S_{04к} = 84.401 + 24.191i$ МВА

$P_{04к} := 84.401$ МВт

$Q_{04к} := 24.191$ Мвар

$$\Delta S_{04} := \frac{P_{04к}^2 + Q_{04к}^2}{U_{ном}^2} \cdot Z_{04}$$

$\Delta S_{04} = 4.974 + 8.705i$ МВА

$S_{04н} := S_{04к} + \Delta S_{04}$

$S_{04н} = 89.376 + 32.896i$ МВА

$P_{04н} := 89.376$ МВт

$Q_{04н} := 32.896$ Мвар

$S_{23к} := S_{пр3} - i \cdot Q_{c23}$

$S_{23к} = 25.168 + 9.518i$ МВА

$P_{23к} := 25.168$ МВт

$Q_{23к} := 9.518$ Мвар

$$\Delta S_{23} := \frac{P_{23к}^2 + Q_{23к}^2}{U_{ном}^2} \cdot Z_{23}$$

$\Delta S_{23} = 0.316 + 0.332i$ МВА

$S_{23н} := S_{23к} + \Delta S_{23}$

$S_{23н} = 25.484 + 9.85i$ МВА

$P_{23н} := 25.484$ МВт

$Q_{23н} := 9.85$ Мвар

$$S_{12к} := S_{23н} + S_{пр2} - i \cdot \left(Q_{c23} + Q_{c12}\right) \qquad S_{12к} = 43.629 + 16.124i \quad МВА$$

$P_{12к} := 43.629$ МВт

$Q_{12к} := 16.124$ Мвар

$$\Delta S_{12} := \frac{P_{12к}^2 + Q_{12к}^2}{U_{ном}^2} \cdot Z_{12} \qquad \Delta S_{12} = 0.484 + 0.698i \quad МВА$$

$$S_{12н} := S_{12к} + \Delta S_{12} \qquad S_{12н} = 44.114 + 16.822i \quad МВА$$

$P_{12н} := 44.114$ МВт

$Q_{12н} := 16.822$ Мвар

$$S_{01к} := S_{12н} + S_{пр1} - i \cdot \left(Q_{c01} + Q_{c12}\right)$$

$P_{01к} := 55.213$ МВт

$$S_{01к} = 55.213 + 20.185i \quad МВА$$

$Q_{01к} := 20.185$ Мвар

$$\Delta S_{01} := \frac{P_{01к}^2 + Q_{01к}^2}{U_{ном}^2} \cdot Z_{01} \qquad \Delta S_{01} = 0.86 + 1.24i \quad МВА$$

$$S_{01н} := S_{01к} + \Delta S_{01} \qquad S_{01н} = 56.073 + 21.425i$$

$P_{01н} := 56.073$ МВт

$Q_{01н} := 21.425$ Мвар

По найденным потокам мощности находим напряжения в узлах, начиная с источника питания, в кВ, от начала к концу:

$$U_1 := U_0 - \left(\frac{P_{01н} \cdot R_{01} + Q_{01н} \cdot X_{01}}{\overline{U_0}} + i \cdot \frac{P_{01н} \cdot X_{01} + Q_{01н} \cdot R_{01}}{\overline{U_0}} \right)$$

$$U_1 = 117.819 - 2.565i \quad кВ$$

$$U_2 := U_1 - \left(\frac{P_{12н} \cdot R_{12} + Q_{12н} \cdot X_{12}}{\overline{U_1}} + i \cdot \frac{P_{12н} \cdot X_{12} + Q_{12н} \cdot R_{12}}{\overline{U_1}} \right)$$

$$U_2 = 116.207 - 4.38i \quad кВ$$

$$U_3 := U_2 - \left(\frac{P_{23н} \cdot R_{23} + Q_{23н} \cdot X_{23}}{\overline{U_2}} + i \cdot \frac{P_{23н} \cdot X_{23} + Q_{23н} \cdot R_{23}}{\overline{U_2}} \right)$$

$$U_3 = 114.52 - 5.98i \quad кВ$$

$$U_4 := U_0 - \left(\frac{P_{04н} \cdot R_{04} + Q_{04н} \cdot X_{04}}{\overline{U_0}} + i \cdot \frac{P_{04н} \cdot X_{04} + Q_{04н} \cdot R_{04}}{\overline{U_0}} \right)$$

$$U_4 = 110.439 - 12.317i \quad кВ$$

$$U_5 := U_4 - \left(\frac{P_{45н} \cdot R_{45} + Q_{45н} \cdot X_{45}}{\overline{U_4}} + i \cdot \frac{P_{45н} \cdot X_{45} + Q_{45н} \cdot R_{45}}{\overline{U_4}} \right)$$

$$U_5 = 107.211 - 15.453i \quad кВ$$

$$U_6 := U_5 - \left(\frac{P_{56н} \cdot R_{56} + Q_{56н} \cdot X_{56}}{\overline{U_5}} + i \cdot \frac{P_{56н} \cdot X_{56} + Q_{56н} \cdot R_{56}}{\overline{U_5}} \right)$$

$$U_6 = 106.375 - 16.097i \quad кВ$$

$$U_7 := U_4 - \left(\frac{P_{47н} \cdot R_{47} + Q_{47н} \cdot X_{47}}{\overline{U_4}} + i \cdot \frac{P_{47н} \cdot X_{47} + Q_{47н} \cdot R_{47}}{\overline{U_4}} \right)$$

$$U_7 = 106.322 - 15.698i \quad кВ$$

$$U_8 := U_7 - \left(\frac{P_{78н} \cdot R_{78} + Q_{78н} \cdot X_{78}}{\overline{U_7}} + i \cdot \frac{P_{78н} \cdot X_{78} + Q_{78н} \cdot R_{78}}{\overline{U_7}} \right)$$

$$U_8 = 103.719 - 17.69i \quad кВ$$

1) 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

Примечание: для того чтобы исключить переопределение переменных в ПВК Mathcad всем переменным рассчитываемым во втором случае присвоим дополнительный индекс «'»

Напряжение в узле 6:

$$U'_6 := 108 \quad кВ$$

Определим зарядную мощность в конце линии 5-6 по выражению (94)

$Q'_{c56к} := \frac{1}{2} \cdot U'_6{}^2 \cdot b_{0\_70} \cdot l_{56}$ $\quad Q'_{c56к} = 0.178$ Мвар

Определим мощность в конце участка 5-6, потери мощности в линии 5-6 и мощность в начале участка 5-6.

$S'_{56к} := S_{н6} - i \cdot Q'_{c56к}$ $\quad S'_{56к} = 12 + 3.422i$ МВА

$P'_{56к} := 12$ МВт

$Q'_{56к} := 3.422$ Мвар

$$\Delta S'_{56} := \frac{P'_{56к}{}^2 + Q'_{56к}{}^2}{U'_6{}^2} \cdot Z_{56} \qquad \Delta S'_{56} = 0.068 + 0.071i \text{ МВА}$$

$S'_{56н} := S'_{56к} + \Delta S'_{56}$ $\quad S'_{56н} = 12.068 + 3.493i$ МВА

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

$$U'_{\Delta 56} := \frac{P'_{56к} \cdot R_{56} + Q'_{56к} \cdot X_{56}}{\overline{U_6}} + i \cdot \frac{P'_{56к} \cdot X_{56} + Q'_{56к} \cdot R_{56}}{\overline{U_6}}$$

$U'_{\Delta 56} = 0.839 + 0.637i$ кВ

$U'_5 := U'_6 + U'_{\Delta 56}$ $\quad U'_5 = 108.839 + 0.637i$ кВ

Аналогично рассчитываем участок 4-5

$Q'_{c56н} := \frac{1}{2} \cdot \left(\left|U'_5\right|\right)^2 \cdot b_{0\_70} \cdot l_{56}$ $\quad Q'_{c56н} = 0.181$ Мвар

$Q'_{c45к} := \frac{1}{2} \cdot \left(\left|U'_5\right|\right)^2 \cdot b_{0\_95} \cdot l_{45}$ $\quad Q'_{c45к} = 0.371$ Мвар

$S'_{45к} := S'_{56н} + S_{н5} - i \cdot \left(Q'_{c56н} + Q'_{c45к}\right)$

$P'_{45к} := 30.068$ МВт $\quad S'_{45к} = 30.068 + 8.441i$ МВА

$Q'_{45к} := 8.441$ Мвар

$$\Delta S'_{45} := \frac{P'_{45к}{}^2 + Q'_{45к}{}^2}{U'_5{}^2} \cdot Z_{45} \qquad \Delta S'_{45} = 0.605 + 0.851i \text{ МВА}$$

$$S'_{45н} := S'_{45к} + \Delta S'_{45} \qquad S'_{45н} = 30.672 + 9.291i \text{ МВА}$$

$$U'_{\Delta 45} := \frac{P'_{45к} \cdot R_{45} + Q'_{45к} \cdot X_{45}}{\overline{U'_5}} + i \cdot \frac{P'_{45к} \cdot X_{45} + Q'_{45к} \cdot R_{45}}{\overline{U'_5}}$$

$$U'_{\Delta 45} = 2.783 + 3.454i \text{ кВ}$$

$$U'_4 := U'_5 + U'_{\Delta 45} \qquad U'_4 = 111.622 + 4.091i \text{ кВ}$$

Определяем зарядные мощности линий, подходящих к узлу 4

$$Q'_{c04к} := \frac{1}{2} \cdot \left(\left| U'_4 \right| \right)^2 \cdot b_{0\_120} \cdot l_{04} \qquad Q'_{c04к} = 0.531 \text{ Мвар}$$

$$Q'_{c45н} := \frac{1}{2} \cdot \left(\left| U'_4 \right| \right)^2 \cdot b_{0\_95} \cdot l_{45} \qquad Q'_{c45н} = 0.391 \text{ Мвар}$$

$$Q'_{c47н} := \frac{1}{2} \cdot \left(\left| U'_4 \right| \right)^2 \cdot b_{0\_70} \cdot l_{47} \qquad Q'_{c47н} = 0.302 \text{ Мвар}$$

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

$$U'_4 = 111.622 + 4.091i \text{ кВ}$$

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

$$Q'_{c78н} := \frac{1}{2} \cdot U_{ном}^2 \cdot b_{0\_70} \cdot l_{78} \qquad Q'_{c78н} = 0.324 \text{ Мвар}$$

$$Q'_{c47к} := \frac{1}{2} \cdot U_{ном}^2 \cdot b_{0\_70} \cdot l_{47} \qquad Q'_{c47к} = 0.293 \text{ Мвар}$$

$$Q'_{c78к} := Q'_{c78н}$$

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

$$S'_{78к} := S_{н8} - i \cdot Q'_{c78к} \qquad S'_{78к} = 21 + 5.676i \text{ МВА}$$

$$P'_{78к} := 21 \text{ МВт}$$

$$Q'_{78к} := 5.676 \text{ Мвар}$$

$$\Delta S'_{78} := \frac{P'^{2}_{78к} + Q'^{2}_{78к}}{U_{ном}^2} \cdot Z_{78} \qquad \Delta S'_{78} = 0.347 + 0.365i \text{ МВА}$$

$$S'_{78н} := S'_{78к} + \Delta S'_{78} \qquad S'_{78н} = 21.347 + 6.041i \text{ МВА}$$

$Q'_{78н} := 6.041$ Мвар

$S'_{47к} := S'_{78н} + S_{н7} - i\cdot(Q'_{c78н} + Q'_{c47к})$

$P'_{47к} := 38.283$ МВт $\quad S'_{47к} = 38.347 + 10.425i$ МВА

$Q'_{47к} := 10.467$ Мвар

$$\Delta S'_{47} := \frac{P'^{2}_{47к} + Q'^{2}_{47к}}{U_{ном}^{2}}\cdot Z_{47} \qquad \Delta S'_{47} = 1.044 + 1.098i \quad \text{МВА}$$

$S'_{47н} := S'_{47к} + \Delta S'_{47}$ $\quad S'_{47н} = 39.39 + 11.523i$ МВА

$P'_{47н} := 39.39$ МВт

$Q'_{47н} := 11.523$ Мвар

Определим мощность в конце участка 0-4

$S'_{04к} := S'_{45н} + S'_{47н} + S_{н4} - i\cdot(Q'_{c45н} + Q'_{c47н} + Q'_{c04к})$ $\quad P'_{04к} := 85.063$ МВт

$S'_{04к} = 85.063 + 23.591i$ МВА

$Q'_{04к} := 23.591$ Мвар

Рассчитаем потери мощности на участке 0-4 по известному напряжению в узле 4 и потоку мощности в конце участка 0-4

$$\Delta S'_{04} := \frac{P'^{2}_{04к} + Q'^{2}_{04к}}{U'^{2}_{4}}\cdot Z_{04} \qquad \Delta S'_{04} = 5.488 + 8.154i \quad \text{МВА}$$

$S'_{04н} := S'_{04к} + \Delta S'_{04}$ $\quad S'_{04н} = 90.551 + 31.745i$ МВА

Определим падение напряжения на участке 0-4 по напряжению узла 4

$$U'_{\Delta 04} := \frac{P'_{04к}\cdot R_{04} + Q'_{04к}\cdot X_{04}}{\overline{U'_{4}}} + i\cdot\frac{P'_{04к}\cdot X_{04} + Q'_{04к}\cdot R_{04}}{\overline{U'_{4}}}$$

$U'_{\Delta 04} = 8.385 + 12.37i$ кВ

Найдем напряжение источника питания - узла 0

$U'_{0} := U'_{4} + U'_{\Delta 04}$ $\quad U'_{0} = 120.007 + 16.461i$ кВ

Участок сети 0-3 рассчитаем по данным начала аналогично случаю 1

$Q'_{c01} := U_{ном}^{2} \cdot b_{0\_95} \cdot l_{01}$ $\quad Q'_{c01} = 0.632$ Мвар

$Q'_{c12} := U_{ном}^{2} \cdot b_{0\_95} \cdot l_{12}$ $\quad Q'_{c12} = 0.569$ Мвар

$Q'_{c23} := U_{ном}^{2} \cdot b_{0\_70} \cdot l_{23}$ $\quad Q'_{c23} = 0.77$ Мвар

$S'_{23к} := S_{пр3} - i \cdot Q'_{c23}$ $\quad S'_{23к} = 25.168 + 9.518i$ МВА

$P'_{23к} := 25.168$ МВт

$Q'_{23к} := 9.518i$ Мвар

$$\Delta S'_{23} := \frac{P'_{23к}{}^{2} + Q'_{23к}{}^{2}}{U_{ном}^{2}} \cdot Z_{23} \qquad \Delta S'_{23} = 0.237 + 0.249i \text{ МВА}$$

$S'_{23н} := S'_{23к} + \Delta S'_{23}$ $\quad S'_{23н} = 25.405 + 9.767i$ МВА

$P'_{23н} := 25.405$ МВт

$Q'_{23н} := 9.767$ Мвар

$S'_{12к} := S'_{23н} + S_{пр2} - i \cdot \left(Q'_{c23} + Q'_{c12}\right)$

$P'_{12к} := 43.55$ МВт $\quad S'_{12к} = 43.55 + 16.041i$ МВА

$Q'_{12к} := 16.041$ Мвар

$$\Delta S'_{12} := \frac{P'_{12к}{}^{2} + Q'_{12к}{}^{2}}{U_{ном}^{2}} \cdot Z_{12} \qquad \Delta S'_{12} = 0.482 + 0.695i \text{ МВА}$$

$S'_{12н} := S'_{12к} + \Delta S'_{12}$ $\quad S'_{12н} = 44.033 + 16.736i$ МВА

$P'_{12н} := 44.033$ МВт

$Q'_{12н} := 16.736$ Мвар

$S'_{01к} := S'_{12н} + S_{пр1} - i \cdot \left(Q'_{c01} + Q'_{c12}\right)$

$P'_{01к} := 55.132$ МВт $\quad S'_{01к} = 55.132 + 20.099i$ МВА

$Q'_{01к} := 20.099$ Мвар

$$\Delta S'_{01} := \frac{P'_{01к}{}^{2} + Q'_{01к}{}^{2}}{U_{ном}^{2}} \cdot Z_{01} \qquad \Delta S'_{01} = 0.857 + 1.235i \text{ МВА}$$

$$S'_{01н} := S'_{01к} + \Delta S'_{01} \qquad S'_{01н} = 55.989 + 21.334i \quad МВА$$

$$P'_{01н} := 55.989 \quad МВт$$

$$Q'_{01н} := 21.334 \quad Мвар$$

$$U'_1 := U'_0 - \left(\frac{P'_{01н} \cdot R_{01} + Q'_{01н} \cdot X_{01}}{\overline{U'_0}} + i \cdot \frac{P'_{01н} \cdot X_{01} + Q'_{01н} \cdot R_{01}}{\overline{U'_0}} \right)$$

$$U'_1 = 118.216 + 13.656i \quad кВ$$

$$U'_2 := U'_1 - \left(\frac{P'_{12н} \cdot R_{12} + Q'_{12н} \cdot X_{12}}{\overline{U'_1}} + i \cdot \frac{P'_{12н} \cdot X_{12} + Q'_{12н} \cdot R_{12}}{\overline{U'_1}} \right)$$

$$U'_2 = 116.884 + 11.663i \quad кВ$$

$$U_{3'} := U'_2 - \left(\frac{P'_{23н} \cdot R_{23} + Q'_{23н} \cdot X_{23}}{\overline{U'_2}} + i \cdot \frac{P'_{23н} \cdot X_{23} + Q'_{23н} \cdot R_{23}}{\overline{U'_2}} \right)$$

$$U_{3'} = 115.452 + 9.874i \quad кВ$$

$$U'_7 := U'_4 - \left(\frac{P'_{47н} \cdot R_{47} + Q'_{47н} \cdot X_{47}}{\overline{U'_4}} + i \cdot \frac{P'_{47н} \cdot X_{47} + Q'_{47н} \cdot R_{47}}{\overline{U'_4}} \right)$$

$$U'_7 = 108.066 + 0.156i \quad кВ$$

$$U'_8 := U'_7 - \left(\frac{P'_{78н} \cdot R_{78} + Q'_{78н} \cdot X_{78}}{\overline{U'_7}} + i \cdot \frac{P'_{78н} \cdot X_{78} + Q'_{78н} \cdot R_{78}}{\overline{U'_7}} \right)$$

$$U'_8 = 105.798 - 2.184i \quad кВ$$

Сравниваем напряжения в узлах 3 и 8 с номинальным и делаем вывод о нецелесообразности второй итерации:

$$\frac{|U'_8| - U_{ном}}{|U'_8|} \cdot 100 = -3.95 \quad \% \qquad \frac{|U_{3'}| - U_{ном}}{|U_{3'}|} \cdot 100 = 5.069 \quad \%$$

Мощность, генерируемая с шин источника питания

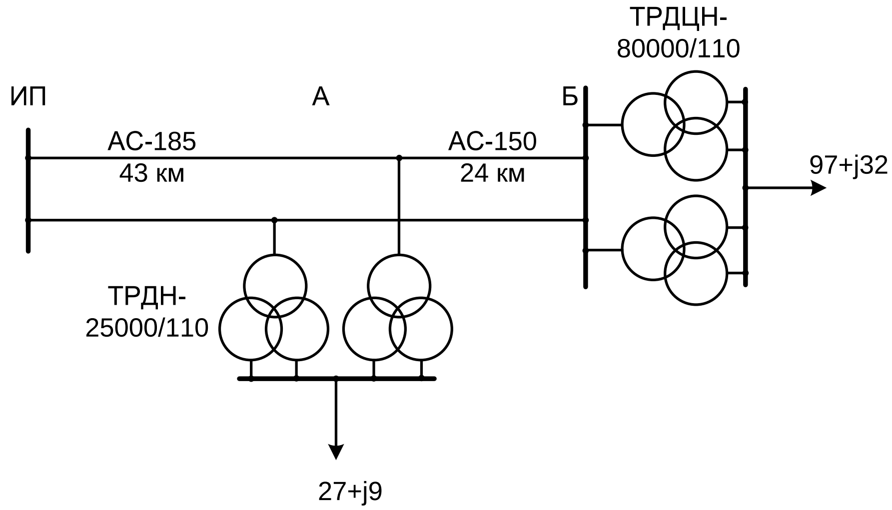
$$S_0 := S'_{01н} + S'_{04н} - i \cdot \left(Q'_{c01} + Q'_{c04к} \right) \qquad S_0 = 146.54 + 51.917i \quad МВА$$

Т.о. был рассчитан режим распределительной разомкнутой сети с использованием алгоритмов расчета по данным начала и конца.

Задачи для самостоятельного решения

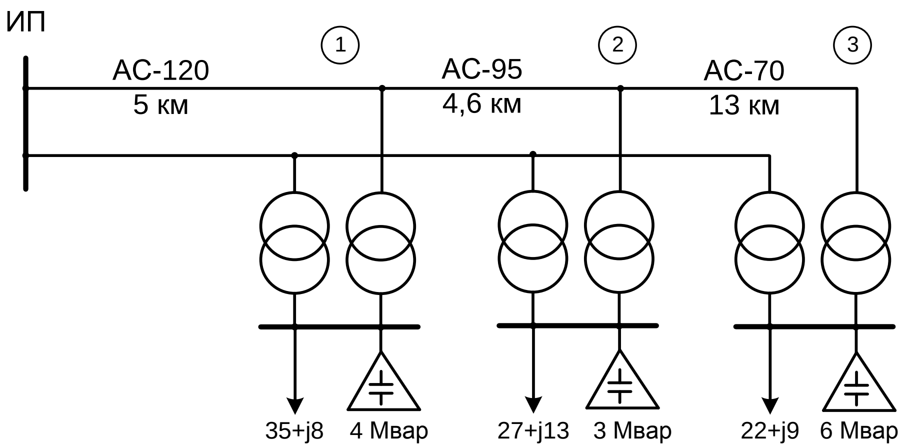
№1

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.



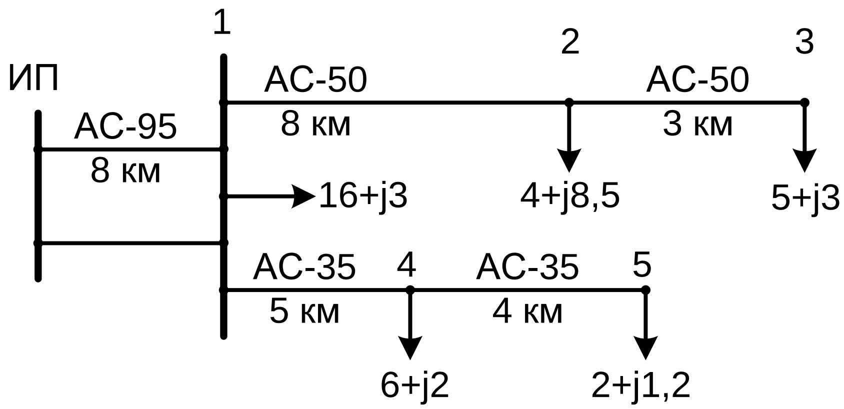
№2

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.



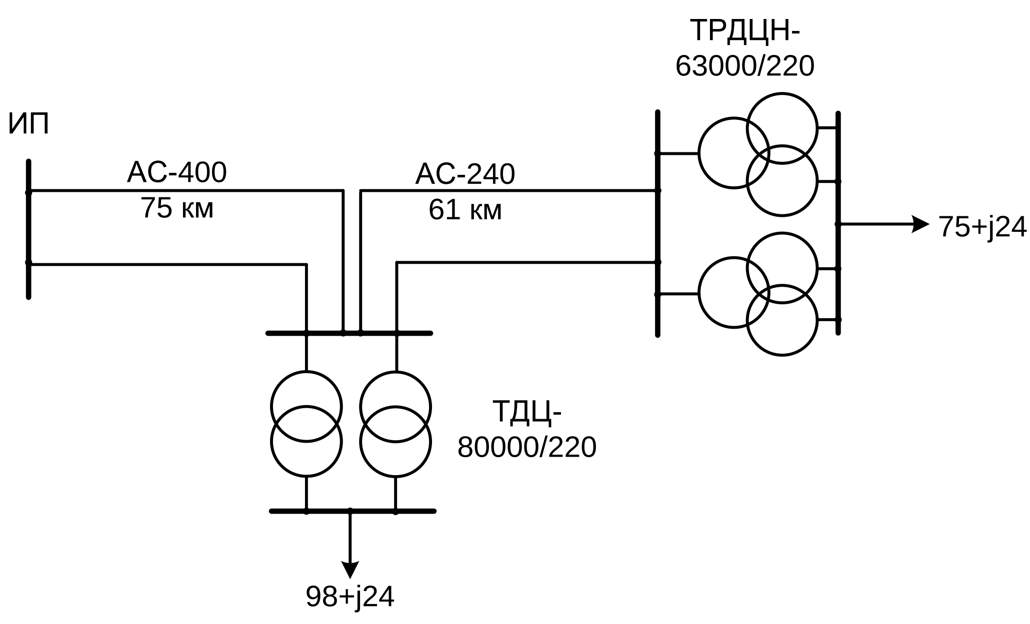
№3

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.



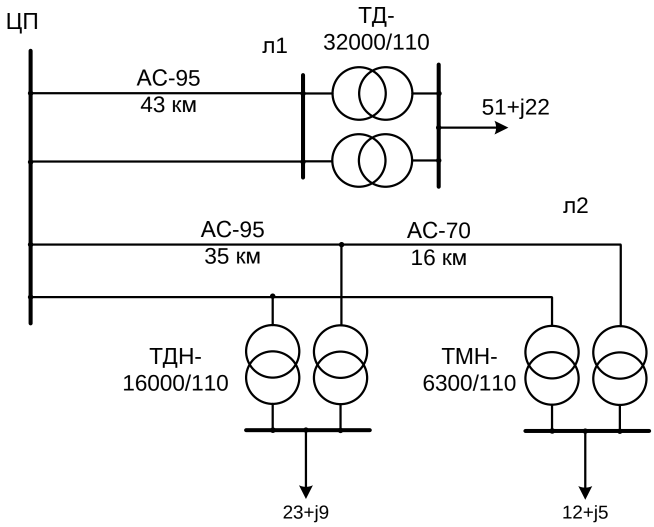
№4

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.



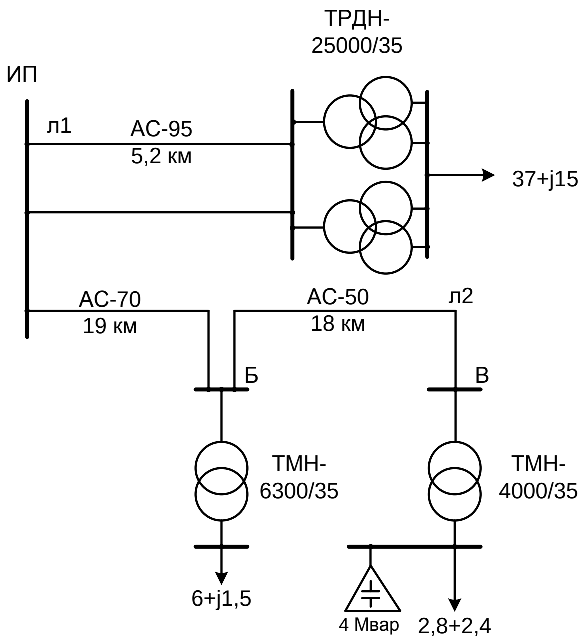
№5

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.



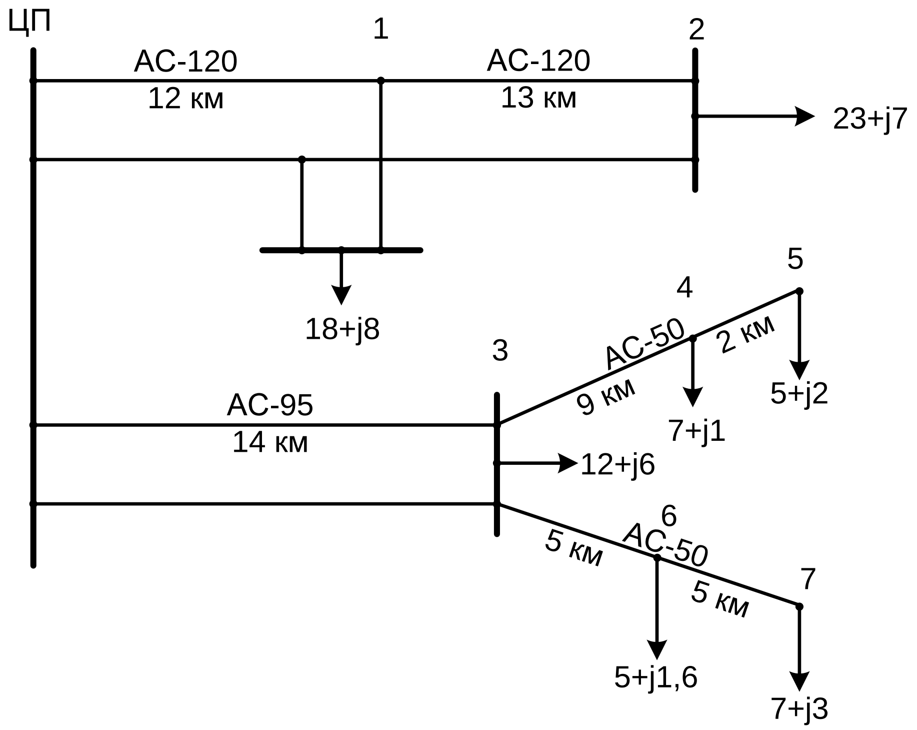
№6

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.



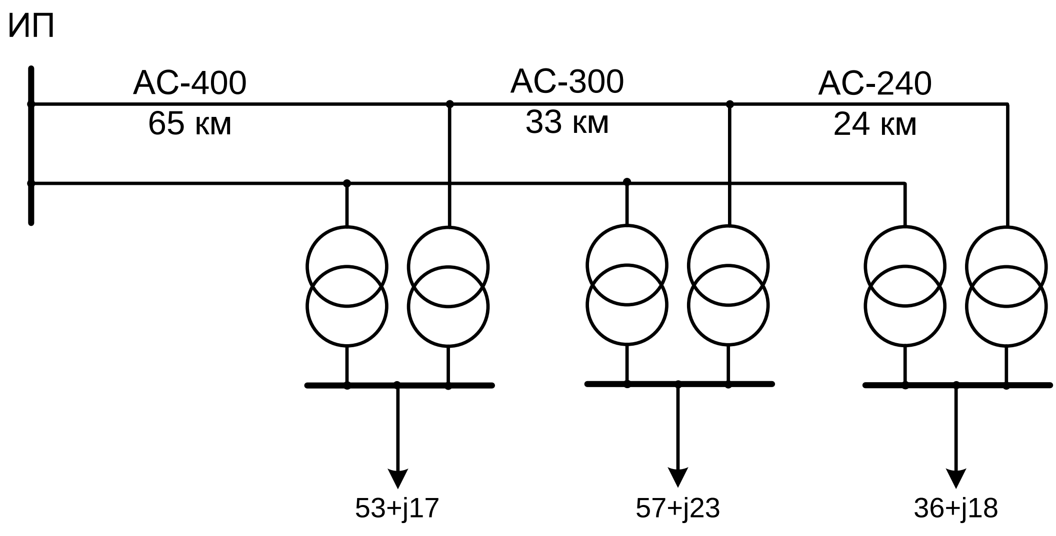
№7

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.



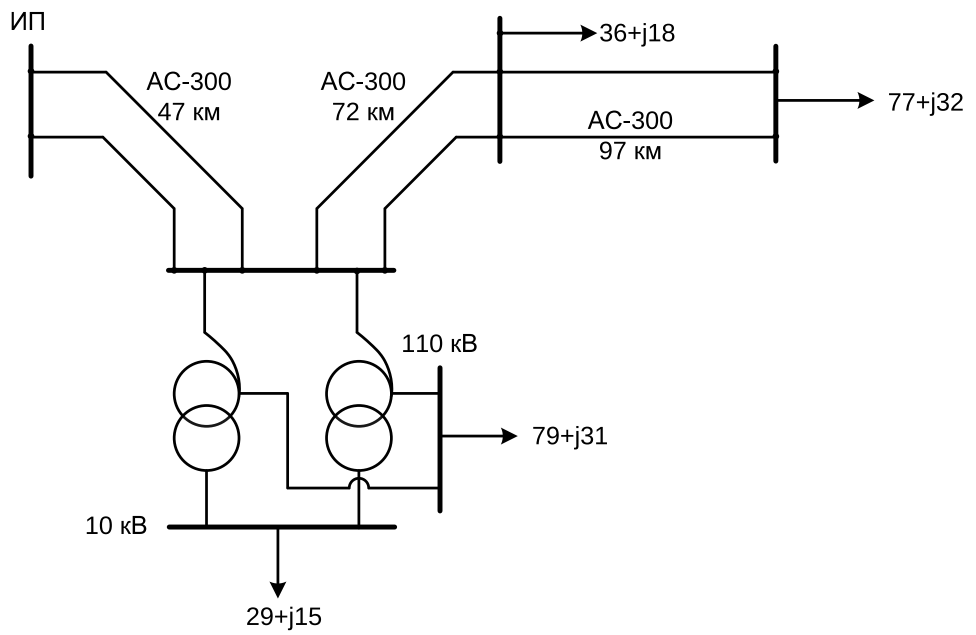
№8

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.



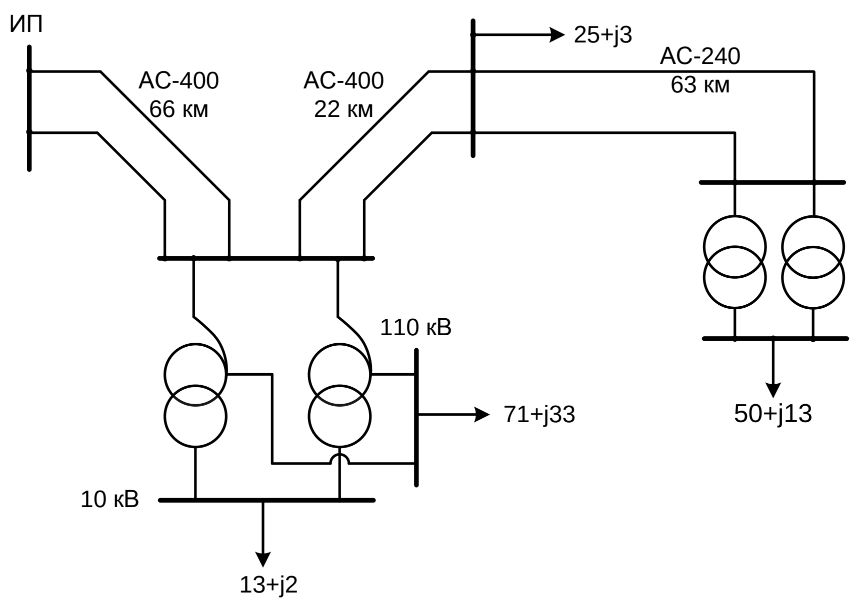
№9

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.



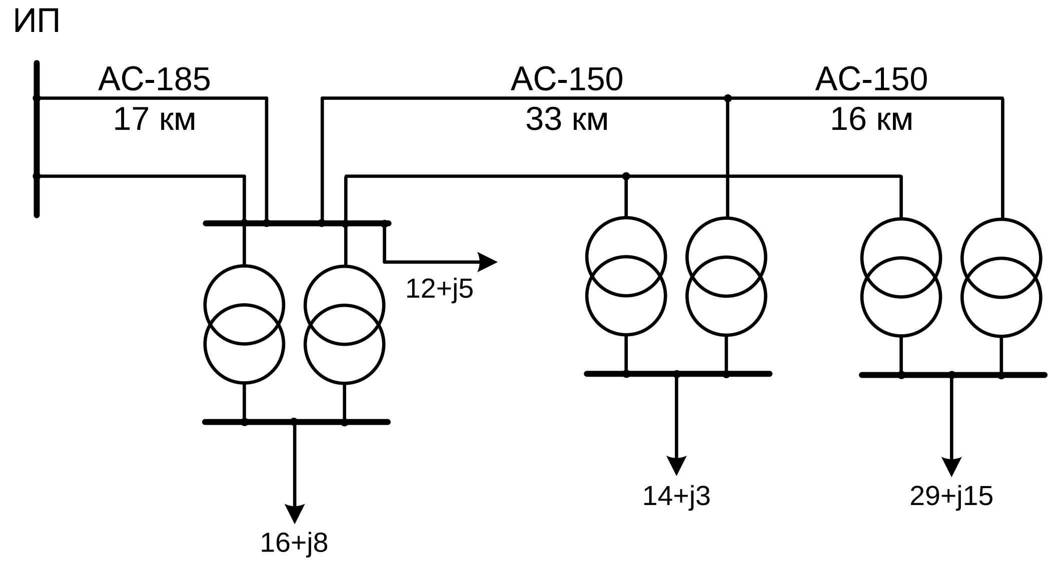
№10

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.



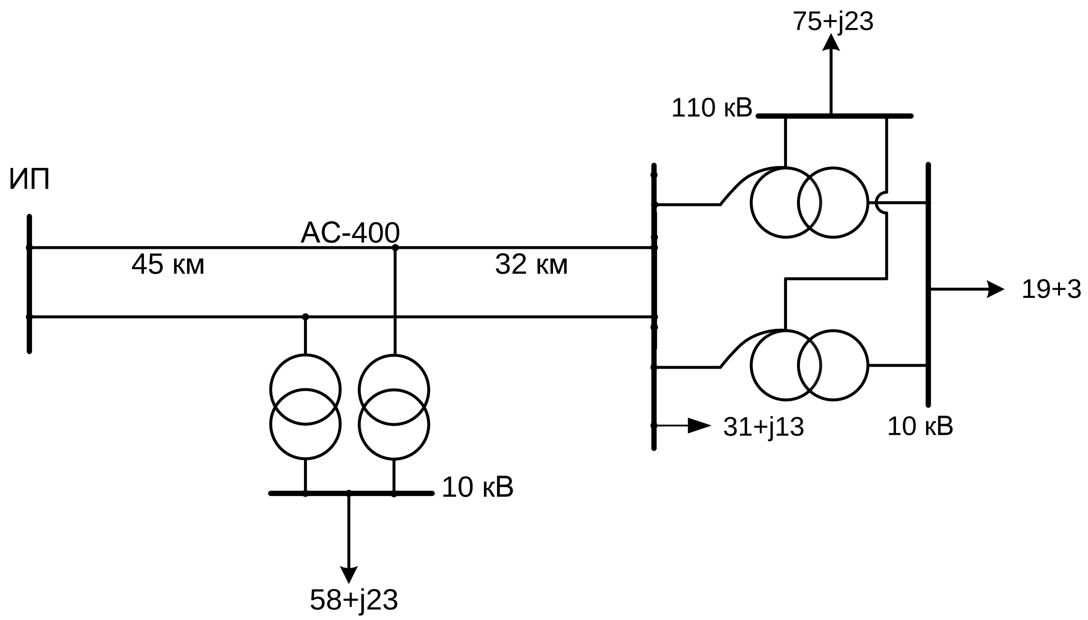
№11

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.



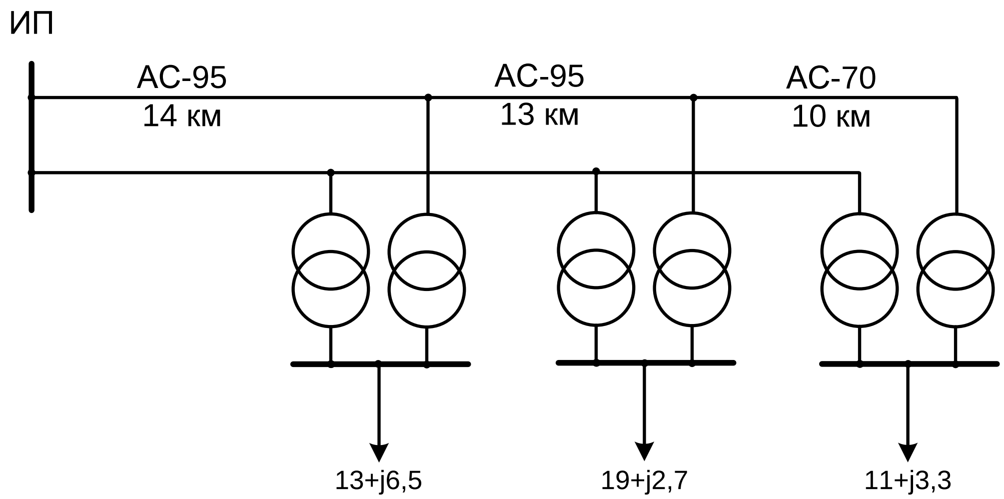
№12

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.



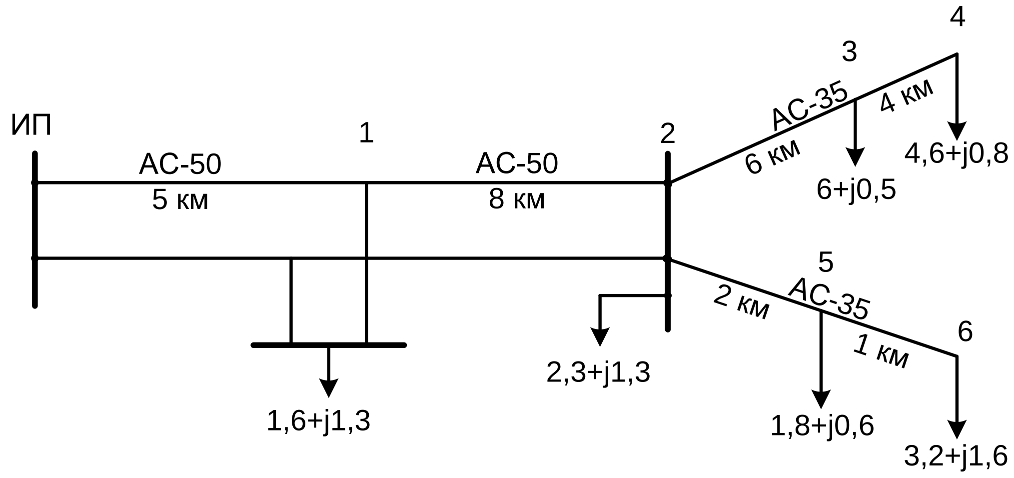
№13

Рассчитать режим разомкнутой сети напряжением 35 кВ для случаев: а) известного напряжения $U_{ип}$ = 37,2 кВ; б) известного напряжения в конце линии $U_к$ = 33 кВ. Определить мощность, выдаваемую с шин ИП.



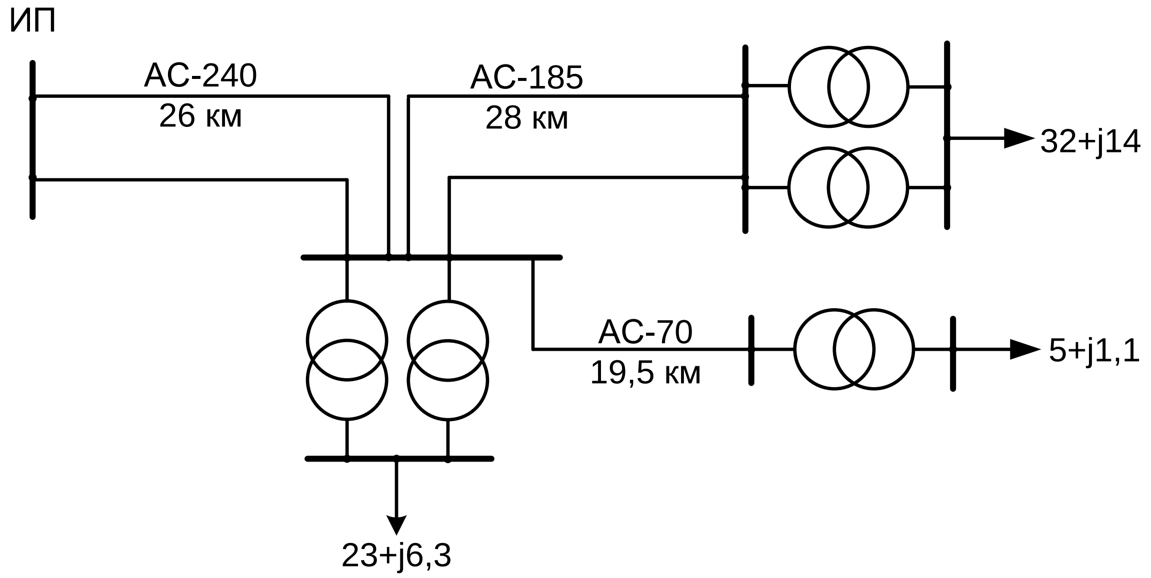
№14

Рассчитать режим разомкнутой сети 10 кВ для случаев: а) $U_{ип}$=11кВ; б) напряжение в узле 4 равно 9,5 кВ. Определить наибольшую потерю напряжения в сети.



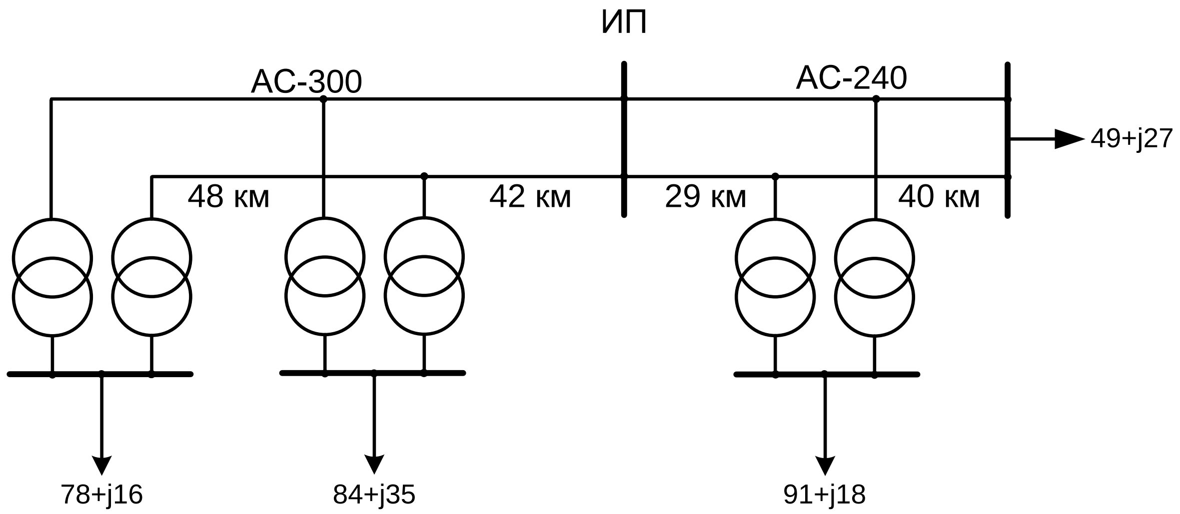
№15

Рассчитать режим разомкнутой сети 110 кВ для двух случаев: а) $U_{ип}$ = 117 кВ; б) напряжение в конце двухцепной линии - 107 кВ.



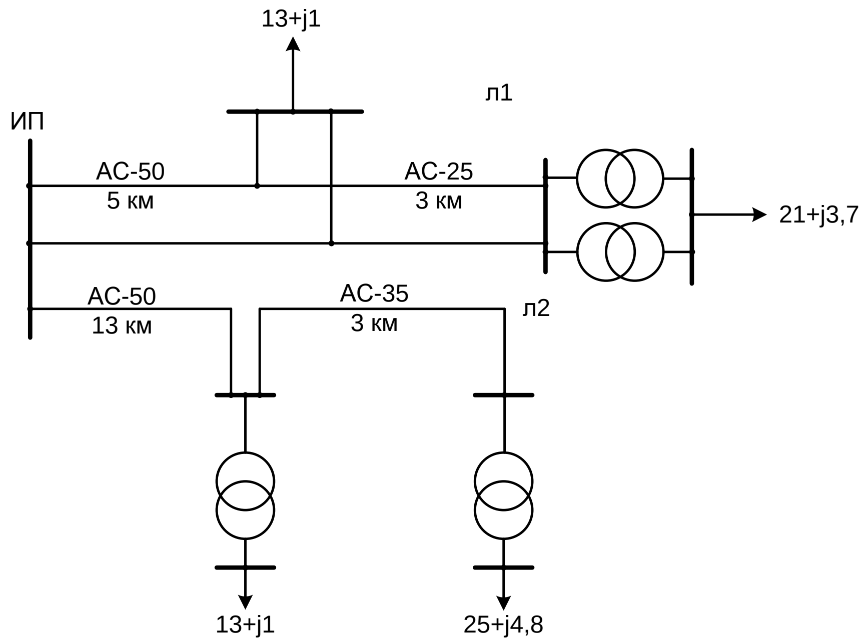
№16

Рассчитать режим районной разомкнутой сети 220 кВ при: а) $U_{ип}$ = 238 кВ; б) напряжении в конце линии 205 кВ. Построить векторные диаграммы.



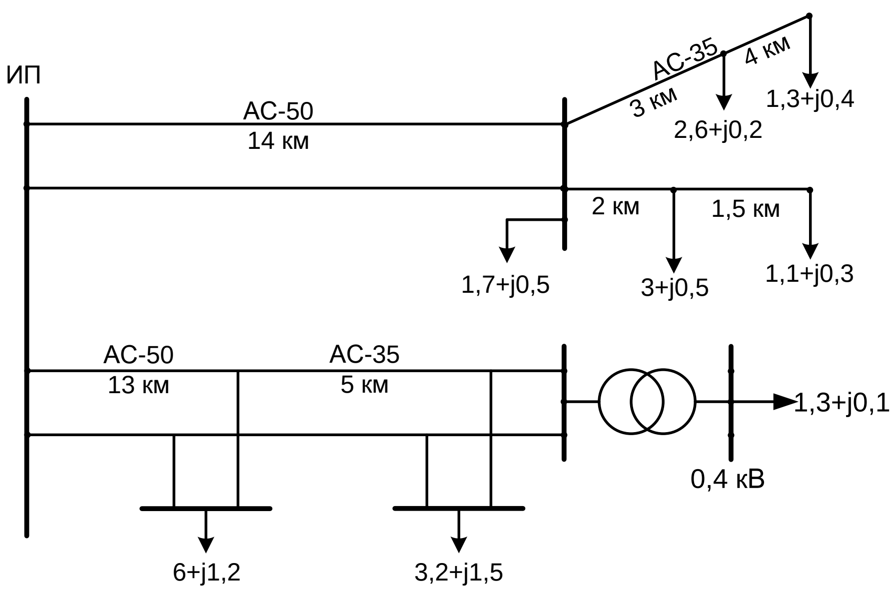
№17

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.



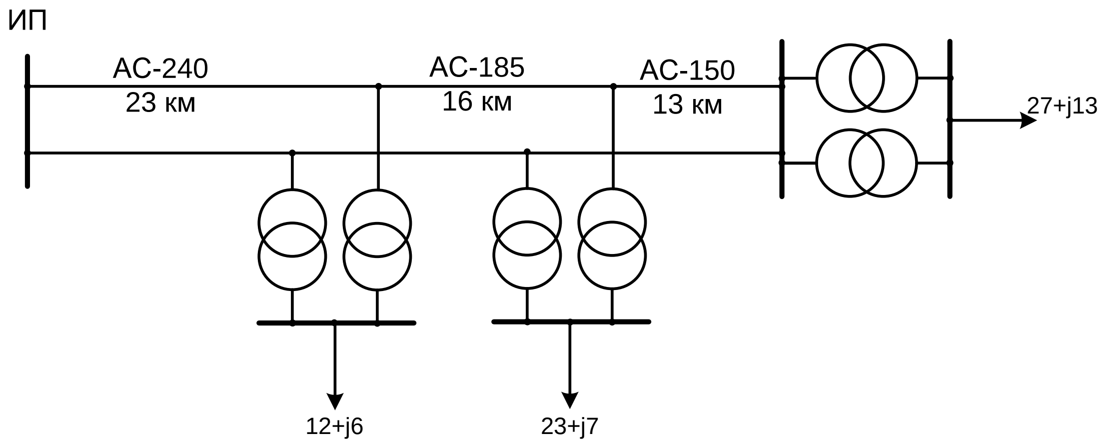
№18

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.



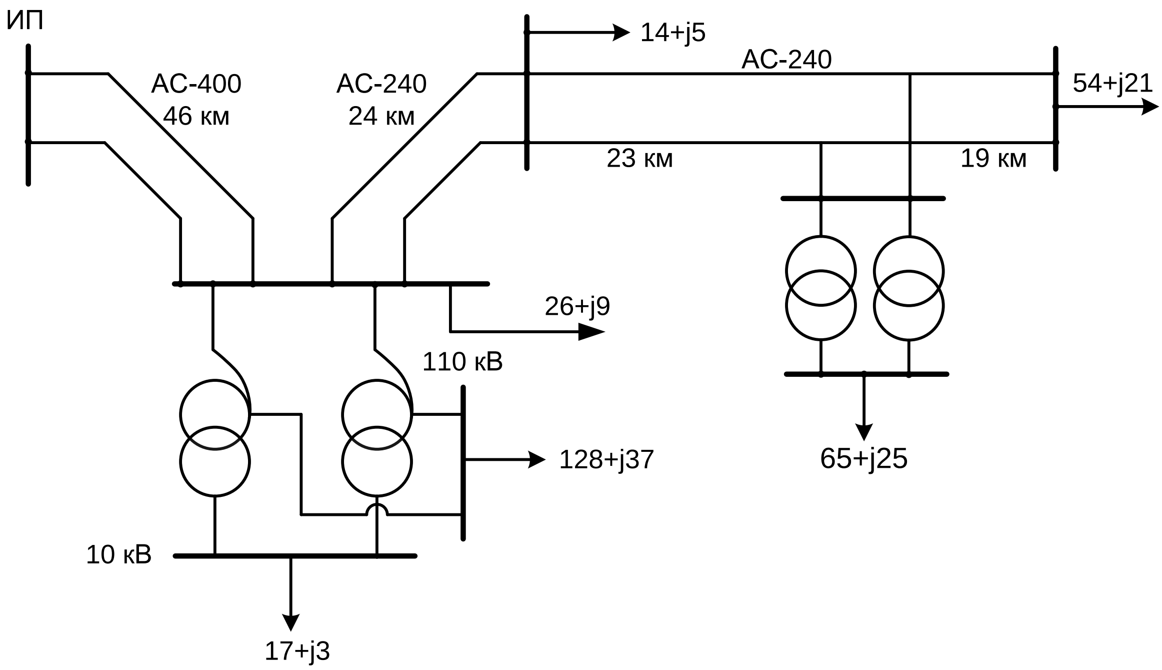
№19

Рассчитать установившийся режим 110 кВ для двух случаев: а) $U_{ип}$ = 119кВ; б) напряжение в конце линии 107 кВ. Построить векторные диаграммы.



№20

Рассчитать режим разомкнутой сети при: а) $U_{ип}$ = 228 кВ; б) напряжении в конце линии 209 кВ. Построить векторные диаграммы.

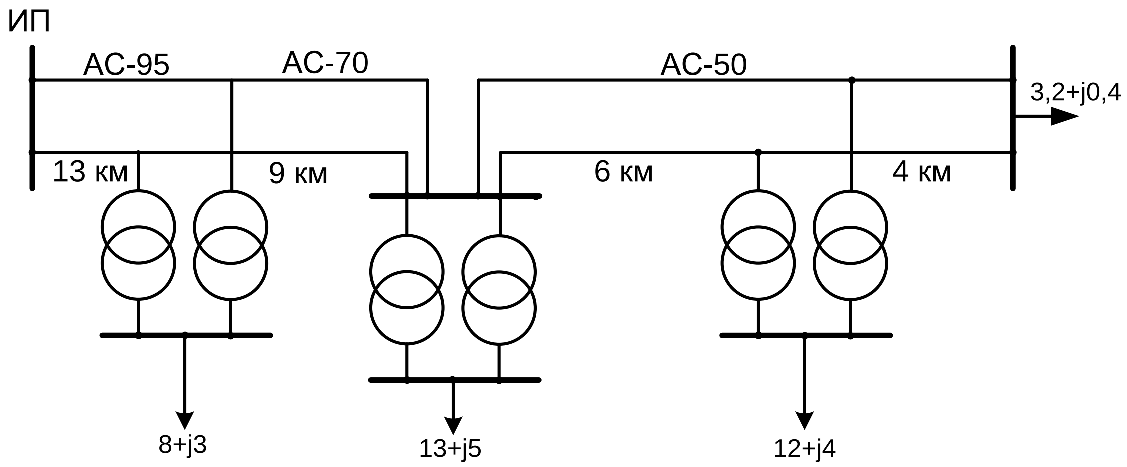


№21

Рассчитать режим разомкнутой сети при:

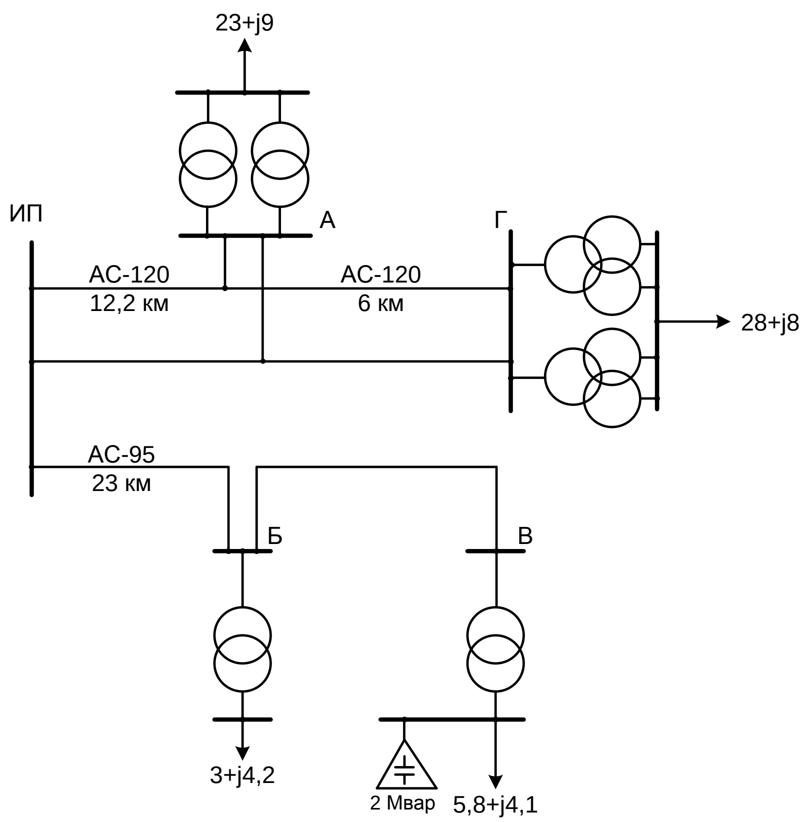
а) напряжении ИП, равном $U_{ип}$ = 37,8 кВ;

б) напряжении в конце линии, равном 32 кВ.



№22

Рассчитать режим разомкнутой сети при: а) напряжении ИП, равном $U_{ип}$ = 38,6 кВ; б) известного напряжения в конце линии $U_к$ = 34 кВ.

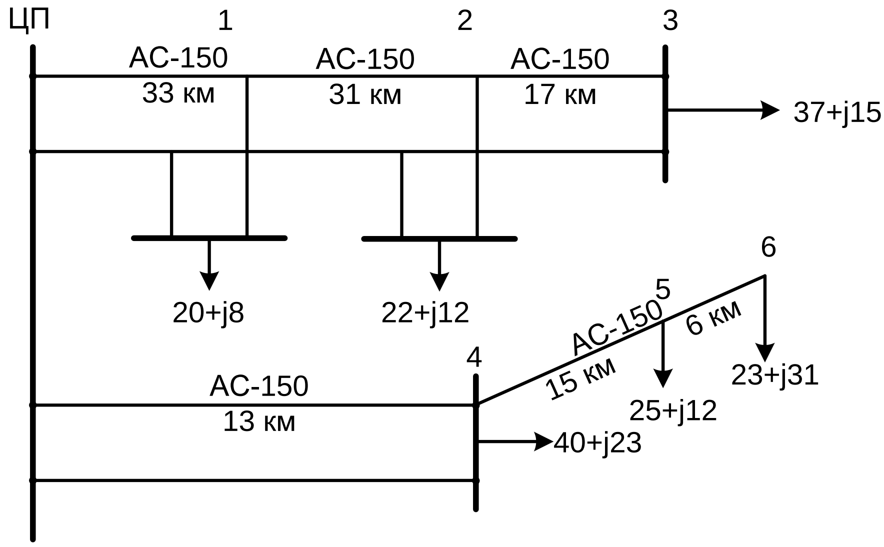


№23

Рассчитать установившийся режим 110 кВ для двух случаев:

а) $U_{ип}$ = 117кВ;

б) напряжение в конце линии 105 кВ. Построить векторные диаграммы.

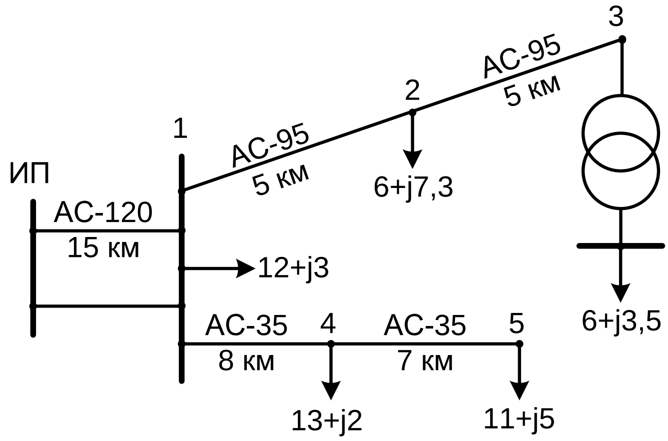


№24

Рассчитать режим разомкнутой сети при:

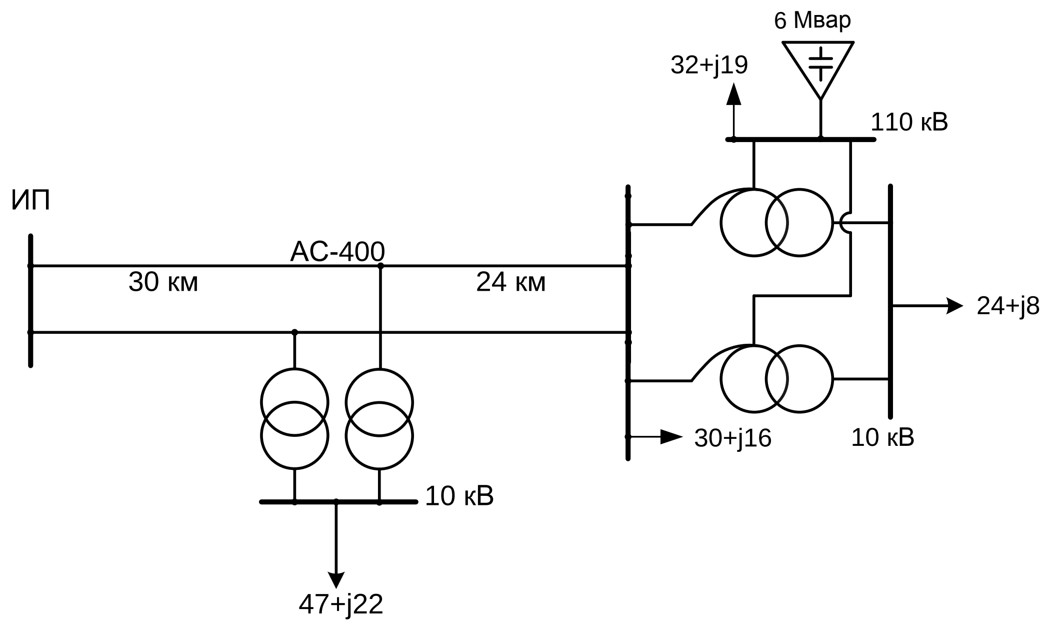
а) напряжении ИП, равном $U_{ип}$ = 37,9 кВ;

б) известного напряжения в конце линии $U_к$ = 34,3 кВ.



№25

Рассчитать режим разомкнутой сети при: а) $U_{ип}$ = 223 кВ; б) напряжении в конце линии 208 кВ. Построить векторные диаграммы.



Для всех задач, если не указано номинальное напряжение на низкой стороне трансформатора, принимать его равным 10 кВ.

Примечание:

В ряде задач заданы такие исходные данные, при которых в конце сети будет недопустимая посадка напряжения, либо напряжение источника питания будет недопустимо высоко. В этом случае нужно указать, что в сети необходимо регулировать напряжение. Как это делать будет показано дальше.

3. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ПРОСТЫХ ЗАМКНУТЫХ СЕТЕЙ

3.1 Кольцевые сети

Сети с одноконтурной конфигурацией называются кольцевыми. Алгоритм расчета установившегося режима кольцевой сети покажем на примере графа сети, показанного на рис. 3.1.

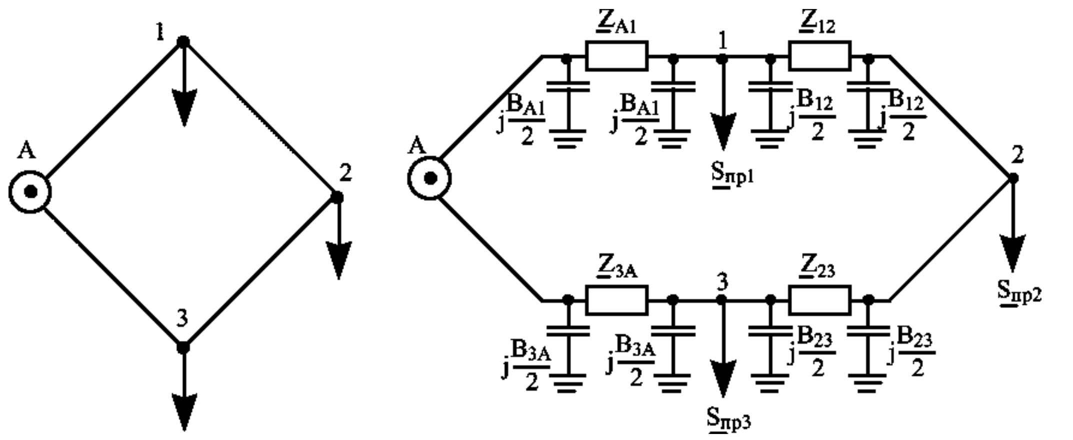


Рис. 3.1. Пример кольцевой сети и ее схема замещения

Режимы кольцевых сетей рассчитываются с помощью метода последовательных приближений, и состоит из нескольких этапов.

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. 3.2).

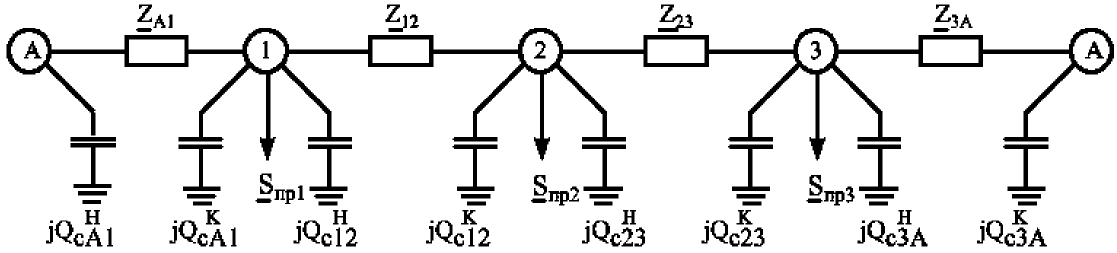


Рис. 3.2. Схема замещения кольцевой сети, разрезанной по источнику питания

2. Определяется расчетная нагрузка каждого узла по выражению (2.11). Схема замещения кольцевой сети с расчетными нагрузками узлов подготовлена к определению потоков мощности на головных участках (см. рис. 3.3).

Под головным понимается участок сети, непосредственно примыкающий к источнику питания.

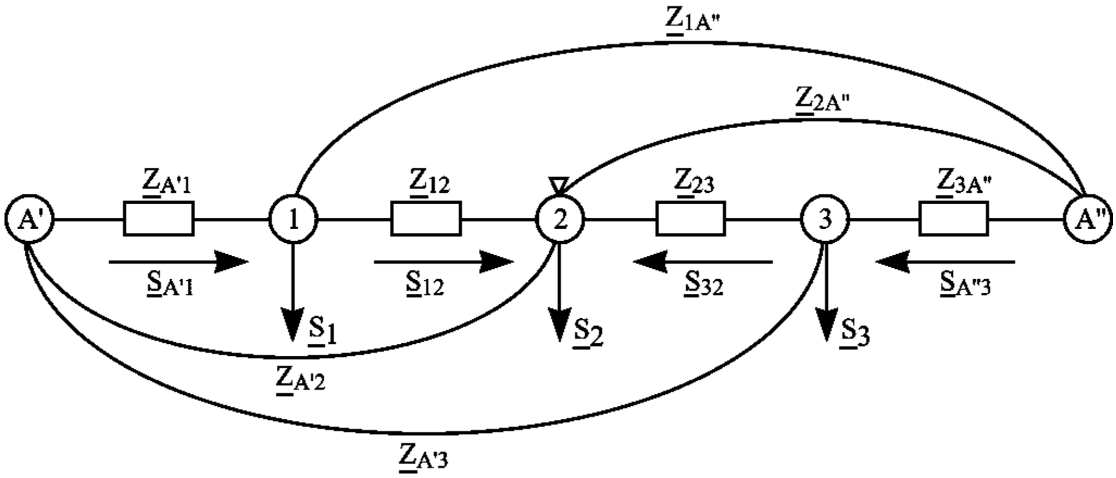


Рис. 3.2. Схема замещения кольцевой сети с расчетными нагрузками узлов

Здесь $\boldsymbol{S_i}$ - 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:

$$\underline{S}_{A'1} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \underline{S}_i \overset{*}{\underline{Z}}_{iA''}}{\overset{*}{\underline{Z}}_{A'-A''}}, \qquad (3.1)$$

$$\underline{S}_{A''n} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \underline{S}_i \overset{*}{\underline{Z}}_{iA'}}{\overset{*}{\underline{Z}}_{A'-A''}} \qquad (3.2)$$

или применительно к рассматриваемой схеме:

$$\underline{S}_{A'1} = \frac{\underline{S}_1 \overset{*}{\underline{Z}}_{1A''} + \underline{S}_2 \overset{*}{\underline{Z}}_{2A''} + \underline{S}_3 \overset{*}{\underline{Z}}_{3A''}}{\overset{*}{\underline{Z}}_{A'-A''}}; \qquad (3.3)$$

$$\underline{S}_{A''3} = \frac{\underline{S}_1 \underline{Z}^*_{1A'} + \underline{S}_2 \underline{Z}^*_{2A'} + \underline{S}_3 \underline{Z}^*_{3A'}}{\underline{Z}^*_{A'-A''}}, \qquad (3.4)$$

где $\underline{S}_i$ - расчетная мощность нагрузки $\boldsymbol{i}$-го узла;

$\underline{Z}^*_{iA'}$, $\underline{Z}^*_{iA''}$ - сопряженные комплексы сопротивлений от $\boldsymbol{i}$-й точки сети до соответствующего конца (A′ или A″) развернутой схемы замещения кольцевой сети при ее разрезании в точке источника питания;

$\underline{Z}_{A'-A''}$ - 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:

$$\underline{S}_{12}=\underline{S}_{A'1} - \underline{S}_1; \quad \underline{S}_{23}=\underline{S}_{12} - \underline{S}_2 \quad \text{и т.д.} \qquad (3.5)$$

После точки потокораздела мощность на участке, следующем за ней, меняет свой знак на противоположный.

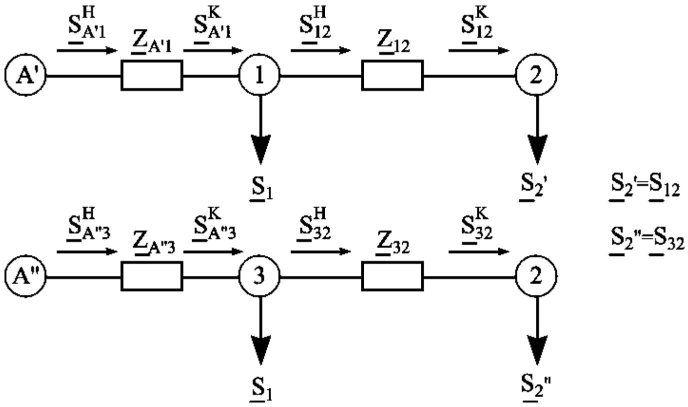
С целью проверки правильности расчета поток мощности на одном из участков рассчитывается с двух сторон. При этом должно выполняться условие (см. рис. 3.2):

$$\underline{S}_{23} = - \underline{S}_{32}. \qquad (3.6)$$

Точка потокораздела на схеме замещения обозначается $\bigtriangledown$.

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. 3.3).



Значения $\underline{S}_{12}$ *и* $\underline{S}_{32}$ *получены в п.4 при определении точки потокораздела.*

Рис. 3.3. Схема замещения, приведенная к двум разомкнутым схемам

6. Расчет двух разомкнутых сетей по алгоритму, приведенному в п.2.2.2, 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. 3.3, рассчитывается напряжение в узле 2, т.е. в точке потокораздела. Напряжение в точке потокораздела, полученное с двух сторон, должно совпадать. В противном случае осуществляется переход ко второй итерации, при этом находят среднее значение напряжения в точке потокораздела:

$$U_2 = \frac{U'_2 + U''_2}{2}. \tag{3.7}$$

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. 3.4.

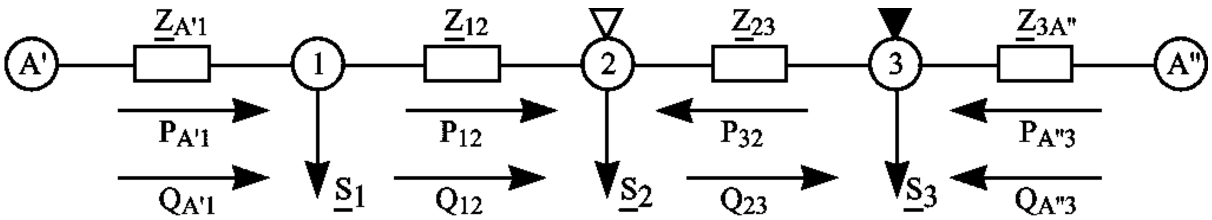


Рис. 3.4. Схема замещения сети с двумя точками потокораздела

На рис. 3.4 ▽ точка потокораздела по активной мощности;

▼ - точка потокораздела по реактивной мощности.

Чтобы разделить сеть на две разомкнутые сети, необходимо вычислить потери мощности на участке между точками потокораздела:

$$\Delta \underline{S}_{23} = \Delta P_{23} + j\Delta Q_{23} = \frac{P_{23}^2 + Q_{23}^2}{U_{ном}} \underline{Z}_{23}. \qquad (3.8)$$

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:

$$\underline{S}_{2*} = P_{12} + j(Q_{12} + \Delta Q_{23}), \qquad (3.9)$$

$$\underline{S}_{3*} = P_{A''3} + \Delta P_{32} + jQ_{A''3}, \qquad (3.10)$$

где потоки мощности $\underline{S}_{ij}$ по участкам сети, без учета потерь мощности, определяются по алгоритму расчета кольцевых сетей, т.е. по выражениям (3.5).

Таким образом, рассматриваемая сеть приведена к двум разомкнутым (рис. 3.5) и может быть рассчитана по алгоритму расчета режимов разомкнутой сети при известных нагрузках и напряжениях источников питания.

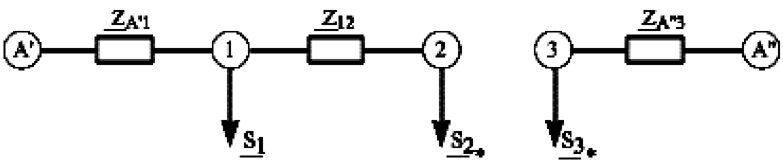
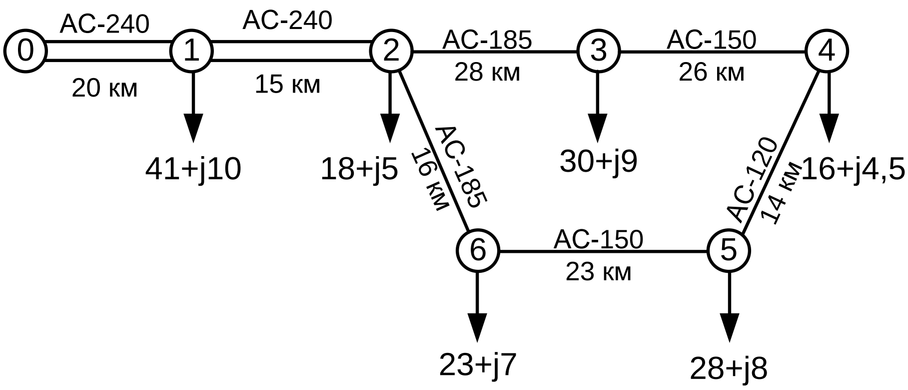


Рис. 3.5. Разделение замкнутой сети с двумя точками потокораздела на две разомкнутые

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.

Uип=119,1 кВ.

Определяем сопротивления и проводимости всех участков сети аналогично примеру 2.2, пользуясь справочными данными:

$r_{0\_240} := 0.13\ \frac{Ом}{км}$ $x_{0\_240} := 0.401\ \frac{Ом}{км}$

$r_{0\_185} := 0.17\ \frac{Ом}{км}$ $x_{0\_185} := 0.409\ \frac{Ом}{км}$

$r_{0\_150} := 0.21\ \frac{Ом}{км}$ $x_{0\_150} := 0.416\ \frac{Ом}{км}$

$r_{0\_120} := 0.27\ \frac{Ом}{км}$ $x_{0\_120} := 0.422\ \frac{Ом}{км}$

Полные сопротивления участков сети равны:

$Z_{01} := \left(r_{0\_240}\cdot 20 + i\cdot x_{0\_240}\cdot 20\right)\cdot\frac{1}{2}$ $z_{01} = 1.3 + 4.012j$ Ом;

$Z_{12} := \left(r_{0\_240}\cdot 15 + i\cdot x_{0\_240}\cdot 15\right)\cdot\frac{1}{2}$ $z_{12} = 0.975 + 3.009j$ Ом;

$Z_{23} := r_{0\_185}\cdot 28 + i\cdot x_{0\_185}\cdot 28$ $z_{23} = 4.76 + 11.441j$ Ом;

$Z_{34} := r_{0\_150} \cdot 26 + i \cdot x_{0\_150} \cdot 26$ $\quad z_{34} = 5.46 + 10.813j$ **Ом;**

$Z_{45} := r_{0\_120} \cdot 14 + i \cdot x_{0\_120} \cdot 14$ $\quad z_{45} = 3.78 + 5.915j$ **Ом;**

$Z_{56} := r_{0\_150} \cdot 23 + i \cdot x_{0\_150} \cdot 23$ $\quad z_{56} = 4.83 + 9.566j$ **Ом;**

$Z_{62} := r_{0\_185} \cdot 16 + i \cdot x_{0\_185} \cdot 16$ $\quad z_{62} = 2.72 + 6.537j$ **Ом;**

Емкостные проводимости участков сети равны:

$b_{o01} = 2.842 \cdot 10^{-6}$ **См;**

$b_{o45} = 2.692 \cdot 10^{-6}$ **См;**

$b_{o12} = 2.842 \cdot 10^{-6}$ **См;**

$b_{o56} = 2.737 \cdot 10^{-6}$ **См;**

$b_{o23} = 2.788 \cdot 10^{-6}$ **См;**

$b_{o62} = 2.788 \cdot 10^{-6}$ **См;**

$b_{o34} = 2.737 \cdot 10^{-6}$ **См;**

$U_0 := 119.1$ **кВ.**

Рассчитываем зарядные мощности участков сети, принимая на первом приближении напряжения в узлах, равными номинальному напряжению:

$Q_{c01} := 110^2 \cdot b_{o01} \cdot 20$ $\quad Q_{c01} = 0.688$ **Мвар;**

$Q_{c12} := 110^2 \cdot b_{o12} \cdot 15$ $\quad Q_{c12} = 0.516$ **Мвар;**

$Q_{c23} := \dfrac{110^2 \cdot b_{o23} \cdot 28}{2}$ $\quad Q_{c23} = 0.472$ **Мвар;**

$Q_{c34} := \dfrac{110^2 \cdot b_{o34} \cdot 26}{2}$ $\quad Q_{c34} = 0.431$ **Мвар;**

$Q_{c45} := \dfrac{110^2 \cdot b_{o45} \cdot 14}{2}$ $\quad Q_{c45} = 0.228$ **Мвар;**

$Q_{c56} := \dfrac{110^2 \cdot b_{o56} \cdot 23}{2}$ $\quad Q_{c56} = 0.381$ **Мвар;**

$Q_{c62} := \dfrac{110^2 \cdot b_{o62} \cdot 16}{2}$ $\quad Q_{c62} = 0.27$ **Мвар.**

Определяем расчетные нагрузки узлов:

$\mathbf{S_1 := 41 + j\cdot 10 - j\cdot Q_{c01} - j\cdot Q_{c12}}$ $\qquad$ $\mathbf{S_1 = 41 + 8.797j}$ **МВА;**

$\mathbf{S_2 := 18 + j\cdot 5 - j\cdot Q_{c12} - j\cdot Q_{c23} - j\cdot Q_{c62}}$ $\qquad$ $\mathbf{S_2 = 18 + 3.742j}$ **МВА;**

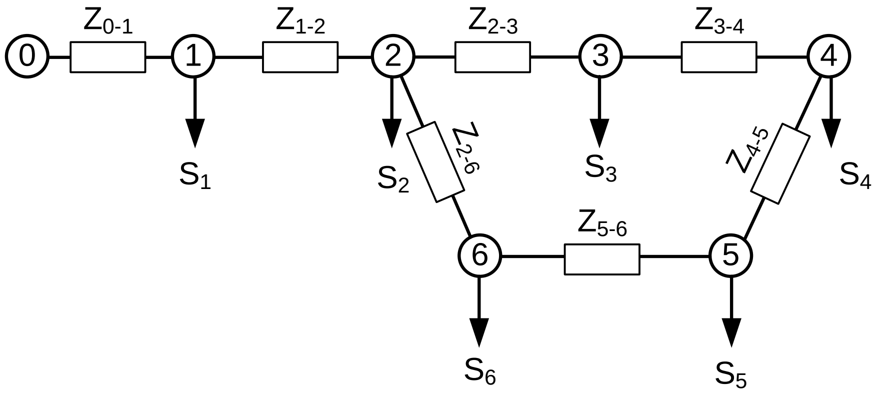
$\mathbf{S_3 := 30 + j\cdot 9 - j\cdot Q_{c23} - j\cdot Q_{c34}}$ $\qquad$ $\mathbf{S_3 = 30 + 8.097j}$ **МВА;**

$\mathbf{S_4 := 16 + j\cdot 4.5 - j\cdot Q_{c34} - j\cdot Q_{c45}}$ $\qquad$ $\mathbf{S_4 = 16 + 3.841j}$ **МВА;**

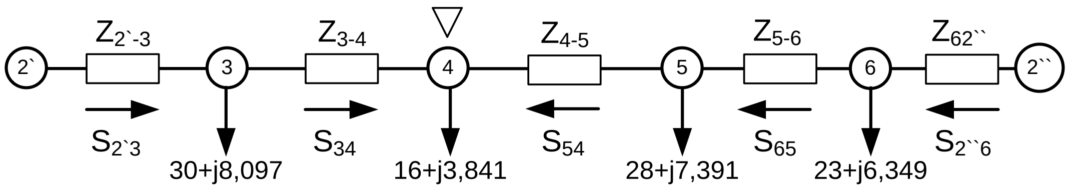
$\mathbf{S_5 := 28 + j\cdot 8 - j\cdot Q_{c45} - j\cdot Q_{c56}}$ $\qquad$ $\mathbf{S_5 = 28 + 7.391j}$ **МВА;**

$\mathbf{S_6 := 23 + j\cdot 7 - j\cdot Q_{c56} - j\cdot Q_{c62}}$ $\qquad$ $\mathbf{S_6 = 23 + 6.349j}$ **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 2-3-4-5-6-2. Схема замещения кольцевой сети имеет вид:



- Определим потоки мощности на головных участках, для чего вначале рассчитаем сопротивления. При определении сопротивлений учтено, что $\mathbf{z_{2'3}=z_{23}}$ и $\mathbf{z_{2''6}=z_{26}}$.

$\mathbf{z_{2'2''} := z_{23} + z_{34} + z_{45} + z_{56} + z_{62}}$

$\mathbf{z_{32''} := z_{34} + z_{45} + z_{56} + z_{62}}$ $\qquad$ $\mathbf{z_{62'} := z_{56} + z_{45} + z_{34} + z_{23}}$

$\mathbf{z_{42''} := z_{45} + z_{56} + z_{62}}$ $\qquad$ $\mathbf{z_{52'} := z_{45} + z_{34} + z_{23}}$

$z_{52''} := z_{56} + z_{62}$ $\qquad$ $z_{42'} := z_{34} + z_{23}$

$z_{62''} := z_{62}$ $\qquad$ $z_{32'} := z_{23}$

Определяем потоки мощности на головных участках (сопряжение показывается черточкой сверху):

$$S_{2'3} := \frac{S_3 \cdot \overline{z_{32''}} + S_4 \cdot \overline{z_{42''}} + S_5 \cdot \overline{z_{52''}} + S_6 \cdot \overline{z_{62''}}}{\overline{z_{2'2''}}}$$

$S_{2'3} = 43.852 + 11.856j$ **МВА;**

$$S_{2''6} := \frac{S_6 \cdot \overline{z_{62'}} + S_5 \cdot \overline{z_{52'}} + S_4 \cdot \overline{z_{42'}} + S_3 \cdot \overline{z_{32'}}}{\overline{z_{2'2''}}}$$

$S_{2''6} = 53.148 + 13.823j$ **МВА.**

Находим потоки мощности на остальных участках сети

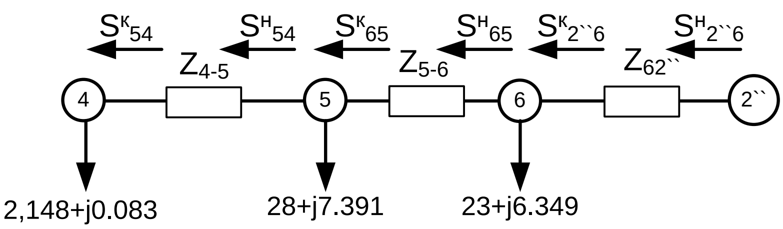
$S_{34} := S_{2'3} - S_3$ $\qquad$ $S_{34} = 13.852 + 3.759j$ **МВА;**

$S_{45} := S_{34} - S_4$ $\qquad$ $S_{45} = -2.148 - 0.083j$ **МВА;**

$S_{65} := S_{2''6} - S_6$ $\qquad$ $S_{65} = 30.148 + 7.474j$ **МВА;**

$S_{54} := S_{65} - S_5$ $\qquad$ $S_{54} = 2.148 + 0.083j$ **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

***Примечание**: Здесь и далее по расчету для определения необходимых величин активных и реактивных мощностей в узле и в цепи, а также активного и индуктивного сопротивлений участков будут использоваться уже получение в результате расчетов величины полной мощности и полного сопротивления.*

$P_{45} := 2.148$ МВт $\quad Q_{45} := 0.083$ Мвар

$R_{45} := 3.78$ Ом; $\quad X_{45} := 5.915$ Ом;

$$dP_{54} := \frac{P_{45}^2 + Q_{45}^2}{110^2} \cdot R_{45} \qquad dP_{54} = 1.443 \cdot 10^{-3} \text{ МВт;}$$

реактивные

$$dQ_{54} := \frac{P_{45}^2 + Q_{45}^2}{110^2} \cdot X_{45} \qquad dQ_{54} = 2.258 \cdot 10^{-3} \text{ Мвар;}$$

$$S_{54n} := S_{54} + dP_{54} + j \cdot dQ_{54} \qquad S_{54n} = 2.149 + 0.085j \text{ МВА.}$$

Определяем мощность в конце участка 5-6 и потери мощности на нем:

$$S_{65k} := S_{54n} + S_5 \qquad S_{65k} = 30.149 + 7.476j \text{ МВА;}$$

$P_{65k} := 30.149$ МВт $\quad Q_{65k} := 7.476$ Мвар

$R_{56} := 4.83$ Ом; $\quad X_{56} := 9.568$ Ом;

$$dP_{65} := \frac{P_{65k}^2 + Q_{65k}^2}{110^2} \cdot R_{56} \qquad dP_{65} = 0.385 \text{ МВт;}$$

$$dQ_{65} := \frac{P_{65k}^2 + Q_{65k}^2}{110^2} \cdot X_{56} \qquad dQ_{65} = 0.763 \text{ Мвар.}$$

Мощность в начале участка 5-6

$$S_{65n} := S_{65k} + dP_{65} + j \cdot dQ_{65} \qquad S_{65n} = 30.534 + 8.239j \text{ МВА.}$$

Далее расчет ведем аналогично.

$$S_{2''6k} := S_{65n} + S_6 \qquad S_{2''6k} = 53.534 + 14.588j \text{ МВА;}$$

$P_{2''6k} := 53.534$ МВт $\quad Q_{2''6k} := 14.588$ Мвар

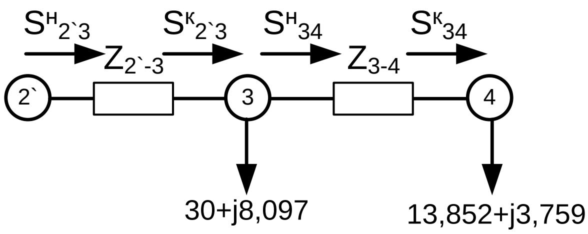
$R_{62} := 2.72$ Ом; $\quad X_{62} := 6.537$ Ом;

$$dP_{2''6} := \frac{P_{2''6k}^{\,2} + Q_{2''6k}^{\,2}}{110^2} \cdot R_{62}$$ $dP_{2''6} = 0.692$ **МВт;**

$$dQ_{2''6} := \frac{P_{2''6k}^{\,2} + Q_{2''6k}^{\,2}}{110^2} \cdot X_{62}$$ $dQ_{2''6} = 1.663$ **Мвар;**

$S_{2''6n} := S_{2''6k} + dP_{2''6} + j \cdot dQ_{2''6}$ $S_{2''6n} = 54.226 + 16.252j$ **MBA.**

Определим потоки мощности в сети 2'-4.



$P_{34} := 13.852$ **МВт** $Q_{34} := 3.759$ **Мвар**

$R_{34} := 5.46$ **Ом;** $X_{34} := 10.813$ **Ом;**

$$dP_{34} := \frac{P_{34}^{\,2} + Q_{34}^{\,2}}{110^2} \cdot R_{34}$$ $dP_{34} = 0.093$ **МВт;**

$$dQ_{34} := \frac{P_{34}^{\,2} + Q_{34}^{\,2}}{110^2} \cdot X_{34}$$ $dQ_{34} = 0.184$ **Мвар;**

$S_{34n} := S_{34} + dP_{34} + j \cdot dQ_{34}$ $S_{34n} = 13.945 + 3.943j$ **MBA;**

$S_{2'3k} := S_{34n} + S_3$ $S_{2'3k} = 43.945 + 12.04j$ **MBA;**

$P_{2'3k} := 43.945$ **МВт** $Q_{2'3k} := 12.04$ **Мвар**

$R_{23} := 4.76$ **Ом;** $X_{23} := 11.441$ **Ом;**

$$dP_{2'3} := \frac{P_{2'3k}^{\,2} + Q_{2'3k}^{\,2}}{110^2} \cdot R_{23}$$ $dP_{2'3} = 0.817$ **МВт;**

$$dQ_{2'3} := \frac{P_{2'3k}^{\,2} + Q_{2'3k}^{\,2}}{110^2} \cdot X_{23}$$ $dQ_{2'3} = 1.963$ **Мвар;**

$S_{2'3n} := S_{2'3k} + dP_{2'3} + j \cdot dQ_{2'3}$ $S_{2'3n} = 44.762 + 14.003j$ **МВА.**

Рассчитаем потоки мощности на участке сети 0 – 2 от конца к началу.

$S_{12k} := S_{2'3k} + S_{2''6n} + S_2$ $S_{12k} = 116.172 + 32.034j$ **МВА;**

$P_{12k} := 116.172$ **МВт** $Q_{12k} := 32.034$ **Мвар**

$R_{12} := 0.975$ Ом; $X_{12} := 3.009$ Ом;

$$dP_{12} := \frac{P_{12k}^2 + Q_{12k}^2}{110^2} \cdot R_{12}$$ $dP_{12} = 1.17$ **МВт;**

$$dQ_{12} := \frac{P_{12k}^2 + Q_{12k}^2}{110^2} \cdot X_{12}$$ $dQ_{12} = 3.611$ **Мвар;**

$S_{12n} := S_{12k} + dP_{12} + j \cdot dQ_{12}$ $S_{12n} = 117.342 + 35.645j$ **МВА;**

$S_{01k} := S_{12n} + S_1$ $S_{01k} = 158.342 + 44.441j$ **МВА;**

$P_{01k} := 158.342$ **МВт** $Q_{01k} := 44.441$ **Мвар**

$R_{01} := 1.3$ Ом; $X_{01} := 4.012$ Ом;

$$dP_{01} := \frac{P_{01k}^2 + Q_{01k}^2}{110^2} \cdot R_{01}$$ $dP_{01} = 2.906$ **МВт;**

$$dQ_{01} := \frac{P_{01k}^2 + Q_{01k}^2}{110^2} \cdot X_{01}$$ $dQ_{01} = 8.967$ **Мвар;**

$S_{01n} := S_{01k} + dP_{01} + j \cdot dQ_{01}$ $S_{01n} = 161.248 + 53.409j$ **МВА;**

Переходим к этапу расчета напряжений в сети.

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.

$U_0 = 119.1$ **кВ.**

$P_{12n} := 117.342$ МВт $\quad Q_{12n} := 35.645$ Мвар

$P_{2'3n} := 44.762$ МВт $\quad Q_{2'3n} := 14.003$ Мвар

$P_{34n} := 13.945$ МВт $\quad Q_{34n} := 3.943$ Мвар

$P_{2''6n} := 54.226$ МВт $\quad Q_{2''6n} := 16.252$ Мвар

$P_{65n} := 30.534$ МВт $\quad Q_{65n} := 8.239$ Мвар

$P_{54n} := 2.149$ МВт $\quad Q_{54n} := 0.085$ Мвар

$$U_1 := U_0 - \frac{P_{01n} \cdot R_{01} + Q_{01n} \cdot X_{01}}{U_0} \qquad U_1 = 115.541 \quad кВ;$$

$$U_2 := U_1 - \frac{P_{12n} \cdot R_{12} + Q_{12n} \cdot X_{12}}{U_1} \qquad U_2 = 113.623 \quad кВ;$$

$$U_3 := U_2 - \frac{P_{2'3n} \cdot R_{23} + Q_{2'3n} \cdot X_{23}}{U_2} \qquad U_3 = 110.337 \quad кВ;$$

$$U_4 := U_3 - \frac{P_{34n} \cdot R_{34} + Q_{34n} \cdot X_{34}}{U_3} \qquad U_4 = 109.261 \quad кВ;$$

$$U_6 := U_2 - \frac{P_{2''6n} \cdot R_{62} + Q_{2''6n} \cdot X_{62}}{U_2} \qquad U_6 = 111.389 \quad кВ;$$

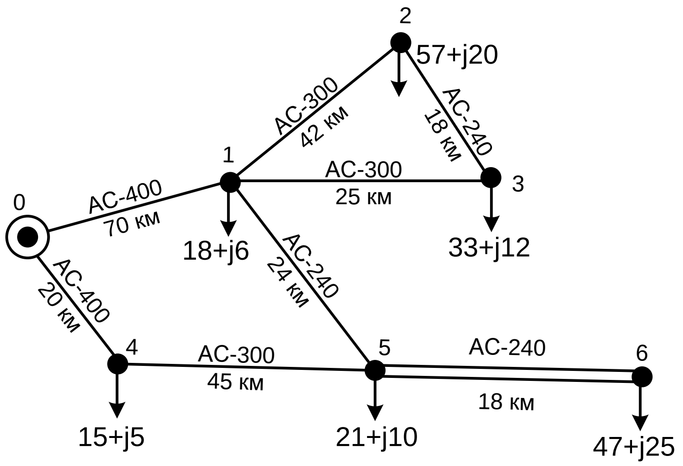
$$U_5 := U_6 - \frac{P_{65n} \cdot R_{56} + Q_{65n} \cdot X_{56}}{U_6} \qquad U_5 = 109.358 \quad кВ;$$

$$U'_4 := U_5 - \frac{P_{54n} \cdot R_{45} + Q_{54n} \cdot X_{45}}{U_5} \qquad U'_4 = 109.279 \quad кВ.$$

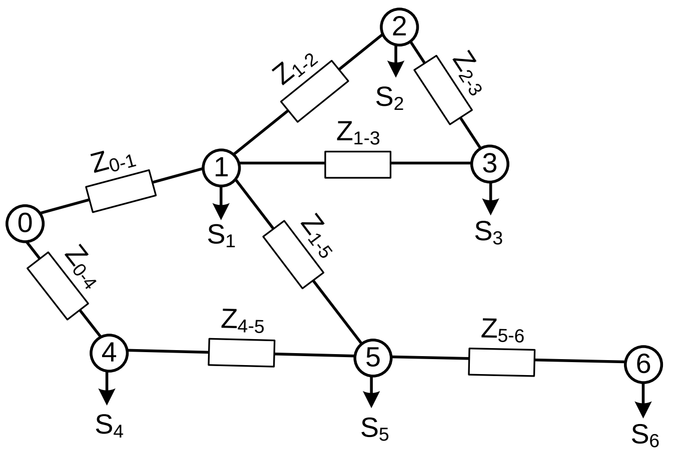
Сравнивая напряжения в точке потокораздела, полученные с двух сторон, между собой и с номинальным напряжением сети, делаем вывод, что вторая итерация не нужна.

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:

$$r_{0\_240} := 0.13\ \frac{\text{Ом}}{\text{км}} \qquad x_{0\_240} := 0.422\ \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$$

$$r_{0\_300} := 0.105\ \frac{\text{Ом}}{\text{км}} \qquad x_{0\_300} := 0.414\ \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$$

$$r_{0\_400} := 0.078\ \frac{\text{Ом}}{\text{км}} \qquad x_{0\_400} := 0.406\ \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$$

Полное сопротивление участков сети равно:

$Z_{01} := r_{0\_400} \cdot 70 + i \cdot x_{0\_400} \cdot 70$ $\quad z_{01} = 5.46 + 28.431i$ **Ом;**

$Z_{12} := r_{0\_300} \cdot 42 + i \cdot x_{0\_300} \cdot 42$ $\quad z_{12} = 4.41 + 17.402i$ **Ом;**

$Z_{13} := r_{0\_300} \cdot 25 + i \cdot x_{0\_300} \cdot 25$ $\quad z_{13} = 2.625 + 10.358i$ **Ом;**

$Z_{23} := r_{0\_240} \cdot 18 + i \cdot x_{0\_240} \cdot 18$ $\quad z_{23} = 2.34 + 7.601i$ **Ом;**

$Z_{04} := r_{0\_400} \cdot 20 + i \cdot x_{0\_400} \cdot 20$ $\quad z_{04} = 1.56 + 8.123i$ **Ом;**

$Z_{45} := r_{0\_300} \cdot 45 + i \cdot x_{0\_300} \cdot 45$ $\quad z_{45} = 4.725 + 18.645i$ **Ом;**

$Z_{15} := r_{0\_240} \cdot 24 + i \cdot x_{0\_240} \cdot 24$ $\quad z_{15} = 3.12 + 10.135i$ **Ом;**

$Z_{56} := \left(r_{0\_240} \cdot 18 + i \cdot x_{0\_240} \cdot 18\right) \cdot \frac{1}{2}$ $\quad z_{56} = 1.17 + 3.801i$ **Ом;**

Емкостные проводимости участков сети:

$b_{o01} = 2.805 \cdot 10^{-6}$ **См;**

$b_{o04} = 2.805 \cdot 10^{-6}$ **См;**

$b_{o12} = 2.748 \cdot 10^{-6}$ **См;**

$b_{o45} = 2.748 \cdot 10^{-6}$ **См;**

$b_{o13} = 2.748 \cdot 10^{-6}$ **См;**

$b_{o15} = 2.694 \cdot 10^{-6}$ **См;**

$b_{o23} = 2.694 \cdot 10^{-6}$ **См;**

$b_{o56} = 5.388 \cdot 10^{-6}$ **См;**

$U_0 := 242$ **кВ.**

Принимаем напряжения в узлах равными номинальному и рассчитываем зарядные мощности линий.

$Q_{c01} := \frac{220^2 \cdot b_{o01} \cdot 70}{2}$ $\quad Q_{c01} = 4.752$ **Мвар;**

$Q_{c12} := \frac{220^2 \cdot b_{o12} \cdot 42}{2}$ $\quad Q_{c12} = 2.851$ **Мвар;**

$Q_{c13} := \frac{220^2 \cdot b_{o13} \cdot 25}{2}$ $\quad Q_{c13} = 1.662$ **Мвар;**

$$Q_{c23} := \frac{220^2 \cdot b_{o23} \cdot 18}{2} \qquad Q_{c23} = 1.173 \quad \text{Мвар;}$$

$$Q_{c04} := \frac{220^2 \cdot b_{o04} \cdot 20}{2} \qquad Q_{c04} = 1.358 \quad \text{Мвар;}$$

$$Q_{c45} := \frac{220^2 \cdot b_{o45} \cdot 45}{2} \qquad Q_{c45} = 2.992 \quad \text{Мвар;}$$

$$Q_{c15} := \frac{220^2 \cdot b_{o15} \cdot 24}{2} \qquad Q_{c15} = 1.565 \quad \text{Мвар;}$$

$$Q_{c56} := \frac{220^2 \cdot b_{o56} \cdot 18}{2} \qquad Q_{c56} = 2.347 \quad \text{Мвар.}$$

Находим расчетные мощности узлов нагрузки.

$$S_2 := 57 + j \cdot 20 - j \cdot Q_{c12} - j \cdot Q_{c23} \qquad S_2 = 57 + 15.975i \quad \text{МВА;}$$

$$S_3 := 33 + j \cdot 12 - j \cdot Q_{c23} - j \cdot Q_{c13} \qquad S_3 = 33 + 9.164i \quad \text{МВА;}$$

$$S_4 := 15 + j \cdot 5 - j \cdot Q_{c04} - j \cdot Q_{c45} \qquad S_4 = 15 + 0.65i \quad \text{МВА;}$$

$$S_6 := 47 + j \cdot 25 - j \cdot Q_{c56} \qquad S_6 = 47 + 22.653i \quad \text{МВА.}$$

Определяем потери мощности на участке 5-6 и мощность в начале участка.

$$P_6 := 47 \quad \text{МВт} \qquad Q_6 := 22.653 \quad \text{Мвар}$$

$$\Delta S_{56} := \frac{\mathrm{Re}\left(S_6\right)^2 + \mathrm{Im}\left(S_6\right)^2}{220^2} \cdot z_{56} \qquad \Delta S_{56} = 0.066 + 0.214i \quad \text{МВА;}$$

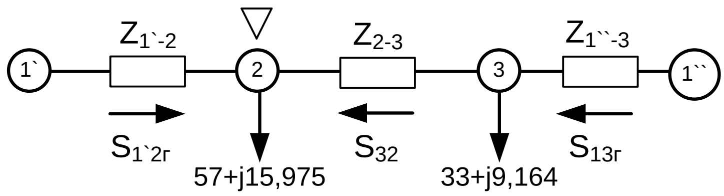
$$S_{56n} := S_6 + \Delta S_{56} \qquad S_{56n} = 47.066 + 22.867i \quad \text{МВА.}$$

Определяем суммарную нагрузку узла 5.

$$S_{5'} := 21 + j \cdot 10 - j \cdot Q_{c45} - j \cdot Q_{c56} - j \cdot Q_{c15} + S_6 + \Delta S_{56}$$

$$S_{5'} = 68.066 + 25.963i \quad \text{МВА.}$$

Рассчитываем кольцо 1-2-3, разрезая его по узлу 1 как по источнику питания.



Находим потоки мощности на головных участках.

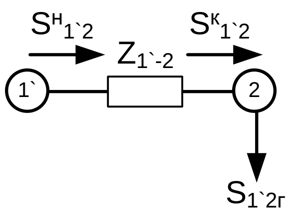
$$S_{12g} := \frac{S_2 \cdot \left(\overline{Z_{23}} + \overline{Z_{13}}\right) + S_3 \cdot \overline{Z_{13}}}{\overline{Z_{12}} + \overline{Z_{23}} + \overline{Z_{13}}} \qquad S_{12g} = 38.612 + 11.014i \quad \text{МВА}$$

$$S_{13g} := \frac{S_3 \cdot \left(\overline{Z_{23}} + \overline{Z_{12}}\right) + S_2 \cdot \overline{Z_{12}}}{\overline{Z_{12}} + \overline{Z_{23}} + \overline{Z_{13}}} \qquad S_{13g} = 51.388 + 14.125i \quad \text{МВА}$$

Определяем потоки мощности на остальных участках кольца.

$$S_{23} := S_{12g} - S_2 \qquad S_{23} = -18.388 - 4.961i \quad \text{МВА}$$

$$S_{32} := S_{13g} - S_3 \qquad S_{32} = 18.388 + 4.961i \quad \text{МВА}$$



Точка потокораздела - узел 2. Разрезаем сеть по узлу 2.

Рассчитываем разомкнутую сеть 1-2.

Определяем потери мощности на участке 1-2.

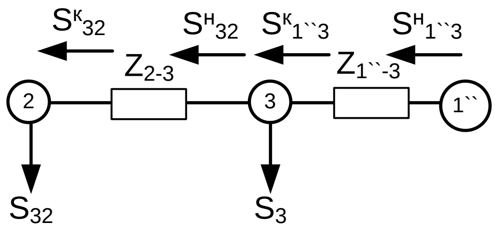
$$P_{12g} := 38.612 \ \text{МВт} \qquad Q_{12g} := 11.014 \ \text{Мвар}$$

$$\Delta S_{12} := \frac{P_{12g}^2 + Q_{12g}^2}{220^2} \cdot Z_{12} \qquad \Delta S_{12} = 0.147 + 0.58i \quad \text{МВА}$$

Мощность в начале участка 1-2:

$$S_{12n} := S_{12g} + \Delta S_{12} \qquad S_{12n} = 38.759 + 11.594i \quad \text{МВА}$$

Рассчитываем разомкнутую сеть 1-3-2.



Определяем потери мощности на участке 2-3.

$P_{32} := 18.388$ МВт $\qquad Q_{32} := 4.961$ Мвар

$$\Delta S_{32} := \frac{P_{32}^2 + Q_{32}^2}{220^2} \cdot Z_{23} \qquad \Delta S_{32} = 0.018 + 0.057i \quad \text{МВА}$$

Определяем поток мощности в начале участка 2-3

$$S_{32n} := S_{32} + \Delta S_{32} \qquad S_{32n} = 18.405 + 5.018i \quad \text{МВА}$$

Определяем поток мощности в конце участка 3-1

$$S_{13k} := S_{32n} + S_{3} \qquad S_{13k} = 51.405 + 14.182i \quad \text{МВА}$$

Определяем потери мощности на участке 3-1

$P_{13k} := 51.405$ МВт $\qquad Q_{13k} := 14.182$ Мвар

$$\Delta S_{13} := \frac{P_{13k}^2 + Q_{13k}^2}{220^2} \cdot Z_{13} \qquad \Delta S_{13} = 0.154 + 0.609i \quad \text{МВА}$$

Определяем поток мощности в начале участка 3-1

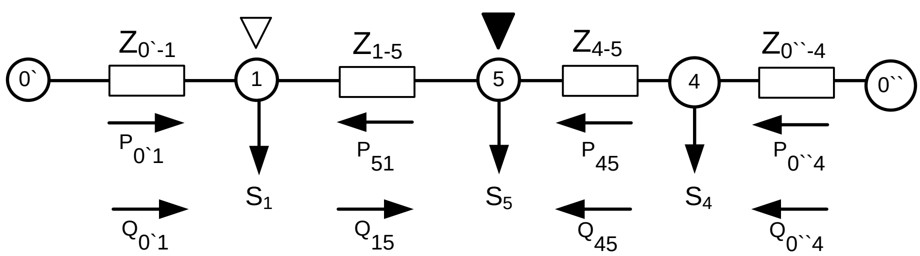
$$S_{13n} := S_{13k} + \Delta S_{13} \qquad S_{13n} = 51.559 + 14.791i \quad \text{МВА}$$

Находим суммарную нагрузку первого узла

$$S_{1'} := 18 + j \cdot 6 + S_{12n} + S_{13n} - j \cdot \left(Q_{c01} + Q_{c12} + Q_{c13} + Q_{c15}\right)$$

$$S_{1'} = 108.319 + 21.554i \quad \text{МВА}$$

Рассчитываем кольцо 0-1-5-4-0.



Разрезаем кольцо по источнику питания и определяем потоки мощности на головных участках.

$$S_{01g} := \frac{S_{1'} \cdot \left(\overline{z_{15}} + \overline{z_{45}} + \overline{z_{04}}\right) + S_{5'} \cdot \left(\overline{z_{45}} + \overline{z_{04}}\right) + S_{4} \cdot \left(\overline{z_{04}}\right)}{\overline{z_{01}} + \overline{z_{15}} + \overline{z_{45}} + \overline{z_{04}}}$$

$S_{01g} = 90.939 + 24.701i$ МВА

$$S_{04g} := \frac{S_{4} \cdot \left(\overline{z_{45}} + \overline{z_{15}} + \overline{z_{01}}\right) + S_{5'} \cdot \left(\overline{z_{15}} + \overline{z_{01}}\right) + S_{1'} \cdot \left(\overline{z_{01}}\right)}{\overline{z_{01}} + \overline{z_{15}} + \overline{z_{45}} + \overline{z_{04}}}$$

$S_{04g} = 100.445 + 23.466i$ МВА

Определяем потоки мощности на остальных участках кольца

$S_{15} := S_{01g} - S_{1'}$ $\qquad S_{15} = -17.379 + 3.147i$ МВА

$S_{45} := S_{04g} - S_{4}$ $\qquad S_{45} = 85.445 + 22.816i$ МВА

$S_{51} := S_{45} - S_{5'}$ $\qquad S_{51} = 17.379 - 3.147i$ МВА

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

$P_{15} := 17.379$ МВт $\qquad Q_{15} := 3.147$ Мвар

$$\Delta S_{15} := \frac{P_{15}^2 + Q_{15}^2}{220^2} \cdot Z_{15} \qquad \Delta S_{15} = 0.02 + 0.065i \text{ МВА}$$

Определим нагрузки узлов 1 и 5 при разделении кольцевой сети на две разомкнутые.

$P_{01g} := 90.939$ МВт $\qquad Q_{01g} := 24.701$ Мвар

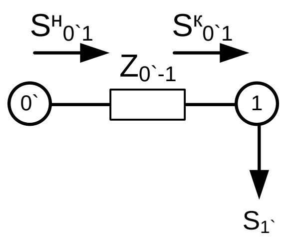
$P_{45} := 85.445$ МВт $\qquad Q_{45} := 22.816$ Мвар

$\Delta P_{15} := 0.02$ МВт $\qquad \Delta Q_{15} := 0.065$ Мвар

$S_{1''} := P_{01g} + i \cdot \left(Q_{01g} + \Delta Q_{15}\right)$ $\qquad S_{1''} = 90.939 + 24.766i$ МВА

$S_{5''} := P_{45} + \Delta P_{15} + i \cdot Q_{45}$ $\qquad S_{5''} = 85.465 + 22.816i$ **МВА**

<u>Разомкнутая сеть 0-1</u>



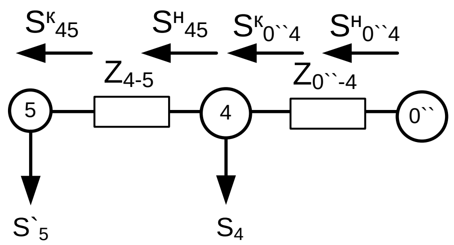
Находим потери мощности на участке 0-1.

$$\Delta S_{01} := \frac{P_{1''}^{2} + Q_{1''}^{2}}{220^{2}} \cdot Z_{01} \qquad \Delta S_{01} = 1.002 + 5.218i \text{ МВА}$$

Определяем поток мощности в начале участка 0-1.

$S_{01n} := S_{1''} + \Delta S_{01}$ $\qquad S_{01n} = 91.942 + 29.984i$ **МВА**

Находим потоки мощности на участке 0-5.



$P_{5''} := 85.465$ **МВт** $\qquad Q_{5''} := 22.816$ **Мвар**

$$\Delta S_{45} := \frac{P_{5''}^{2} + Q_{5''}^{2}}{220^{2}} \cdot Z_{45} \qquad \Delta S_{45} = 0.764 + 3.014i \text{ МВА}$$

$S_{45n} := S_{5''} + \Delta S_{45}$ $\qquad S_{45n} = 86.229 + 25.831i$ **МВА**

$S_{04k} := S_{45n} + S_{4}$ $\qquad S_{04k} = 101.229 + 26.481i$ **МВА**

$P_{04k} := 101.229$ **МВт** $\qquad Q_{04k} := 26.481$ **Мвар**

$$\Delta S_{04} := \frac{P_{04k}^{2} + Q_{04k}^{2}}{220^{2}} \cdot Z_{04} \qquad \Delta S_{04} = 0.353 + 1.838i \text{ МВА}$$

$S_{04n} := S_{04k} + \Delta S_{04}$ $\qquad S_{04n} = 101.582 + 28.318i$ **МВА**

Рассчитываем напряжения в узлах схемы кольца 0-1-5-4-0 по известному напряжению источника питания.

$P_{01n} := 91.942$	МВт	$Q_{01n} := 29.984$	Мвар
$P_{12n} := 38.759$	МВт	$Q_{12n} := 11.594$	Мвар
$P_{13n} := 51.559$	МВт	$Q_{13n} := 14.791$	Мвар
$P_{32n} := 18.405$	МВт	$Q_{32n} := 5.018$	Мвар
$P_{04n} := 101.582$	МВт	$Q_{04n} := 28.318$	Мвар
$P_{45n} := 86.229$	МВт	$Q_{45n} := 25.831$	Мвар
$P_{51} := 17.379$	МВт	$Q_{51} := 3.147$	Мвар
$P_{56n} := 47.066$	МВт	$Q_{56n} := 22.867$	Мвар

$R_{01} := 5.46$	Ом;	$X_{01} := 28.431$	Ом;
$R_{04} := 1.56$	Ом;	$X_{04} := 8.123$	Ом;
$R_{45} := 4.725$	Ом;	$X_{45} := 18.645$	Ом;
$R_{56} := 1.17$	Ом;	$X_{56} := 3.801$	Ом;
$R_{15} := 3.12$	Ом;	$X_{15} := 10.135$	Ом;
$R_{12} := 4.41$	Ом;	$X_{12} := 17.402$	Ом;
$R_{13} := 2.625$	Ом;	$X_{13} := 10.358$	Ом;
$R_{23} := 2.34$	Ом;	$X_{23} := 7.601$	Ом;

$$U_1 := U_0 - \left(\frac{P_{01n} \cdot R_{01} + Q_{01n} \cdot X_{01}}{\overline{U_0}} + i \cdot \frac{P_{01n} \cdot X_{01} - Q_{01n} \cdot R_{01}}{\overline{U_0}} \right)$$

$U_1 = 236.403 - 10.125i$ кВ

$$U_4 := U_0 - \left(\frac{P_{04n} \cdot R_{04} + Q_{04n} \cdot X_{04}}{\overline{U_0}} + i \cdot \frac{P_{04n} \cdot X_{04} - Q_{04n} \cdot R_{04}}{\overline{U_0}} \right)$$

$U_4 = 240.395 - 3.227i$ кВ

$$U_5 := U_4 - \left(\frac{P_{45n} \cdot R_{45} + Q_{45n} \cdot X_{45}}{\overline{U_4}} + i \cdot \frac{P_{45n} \cdot X_{45} - Q_{45n} \cdot R_{45}}{\overline{U_4}} \right)$$

$$U_5 = 236.614 - 9.357i \quad кВ$$

$$U_6 := U_5 - \left(\frac{P_{56n} \cdot R_{56} + Q_{56n} \cdot X_{56}}{\overline{U_5}} + i \cdot \frac{P_{56n} \cdot X_{56} - Q_{56n} \cdot R_{56}}{\overline{U_5}} \right)$$

$$U_6 = 235.99 - 9.975i \quad кВ$$

Сравним напряжения в первом узле, полученные с двух сторон.

$$U_{1'} := U_5 - \left(\frac{P_{51} \cdot R_{15} + Q_{51} \cdot X_{15}}{\overline{U_5}} + i \cdot \frac{P_{51} \cdot X_{15} - Q_{51} \cdot R_{15}}{\overline{U_5}} \right)$$

$$U_{1'} = 236.489 - 10.138i \quad кВ$$

$$\frac{|U_1| - |U_{1'}|}{|U_1|} \cdot 100 = -0.036 \quad \%$$

Рассчитываем напряжения в узлах схемы кольца 1-2-3-1.

$$U_2 := U_1 - \left(\frac{P_{12n} \cdot R_{12} + Q_{12n} \cdot X_{12}}{\overline{U_1}} + i \cdot \frac{P_{12n} \cdot X_{12} - Q_{12n} \cdot R_{12}}{\overline{U_1}} \right)$$

$$U_2 = 234.717 - 12.69i \quad кВ$$

$$U_3 := U_1 - \left(\frac{P_{13n} \cdot R_{13} + Q_{13n} \cdot X_{13}}{\overline{U_1}} + i \cdot \frac{P_{13n} \cdot X_{13} - Q_{13n} \cdot R_{13}}{\overline{U_1}} \right)$$

$$U_3 = 235.095 - 12.164i \quad кВ$$

$$U_{2'} := U_3 - \left(\frac{P_{32n} \cdot R_{23} + Q_{32n} \cdot X_{23}}{\overline{U_3}} + i \cdot \frac{P_{32n} \cdot X_{23} - Q_{32n} \cdot R_{23}}{\overline{U_3}} \right)$$

$$U_{2'} = 234.722 - 12.69i \quad кВ$$

$$\varepsilon := \frac{U_{2'} - U_2}{U_{2'}} \cdot 100 \qquad |\varepsilon| = 2.441 \cdot 10^{-3} \quad \%$$

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.

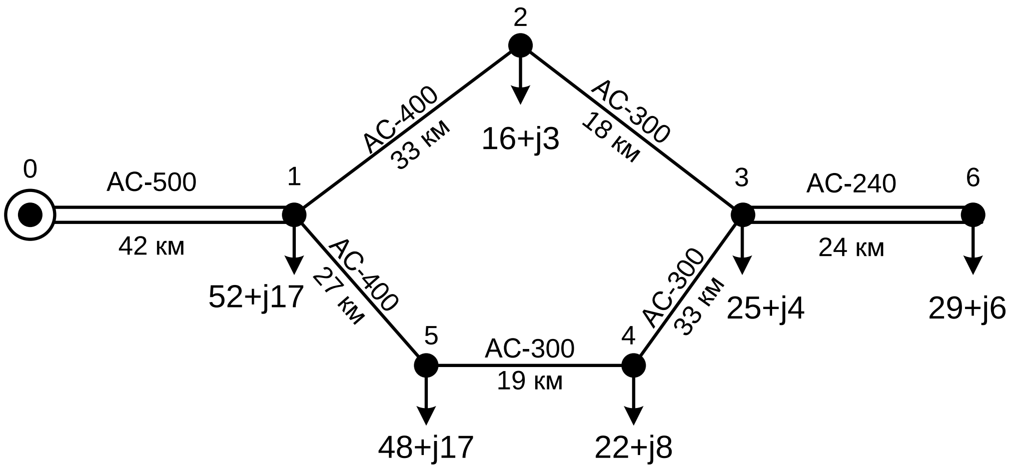
$$\varepsilon := \frac{|U_2| - 220}{|U_2|} \cdot 100 \qquad \varepsilon = 6.407 \quad \%$$

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

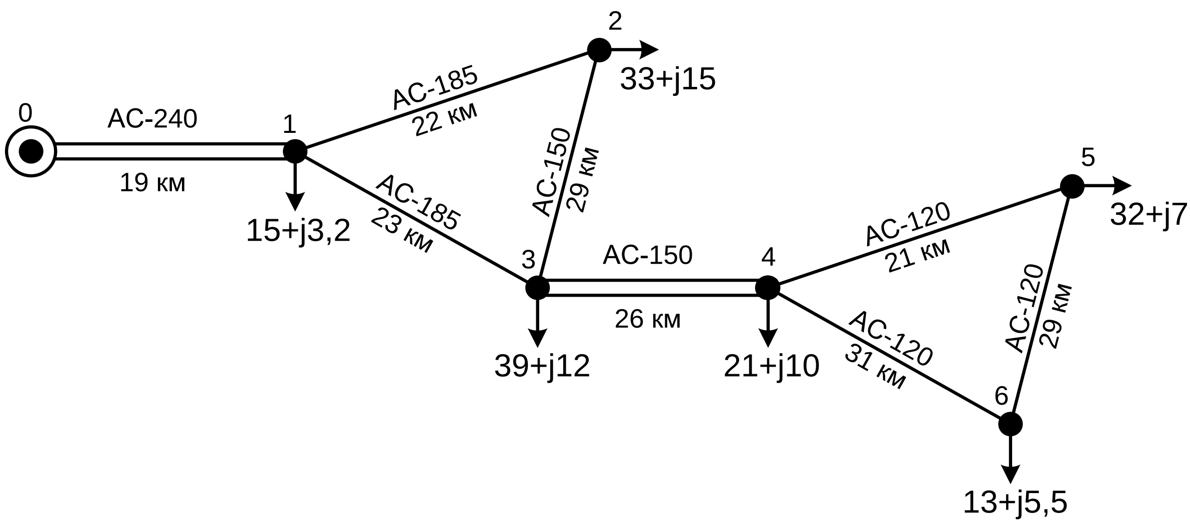
№1

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $242e^{j\,15}$ кВ.



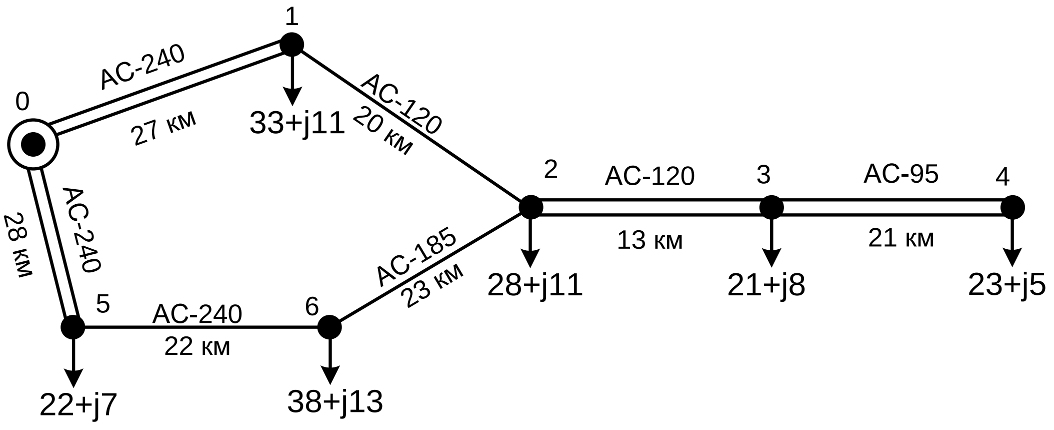
№2

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $119e^{j\,12}$ кВ.



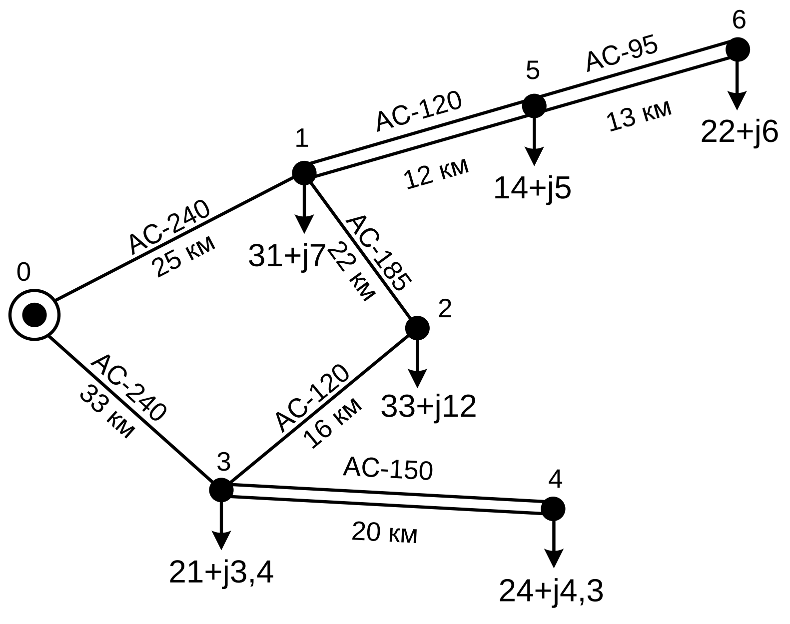
№3

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП 120e$^{j\,8}$ кВ.



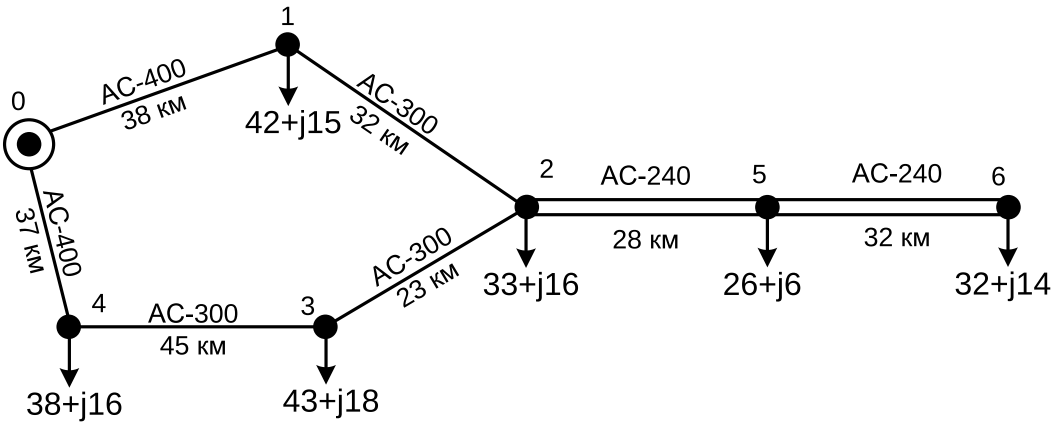
№4

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП 119e$^{j\,10}$ кВ.



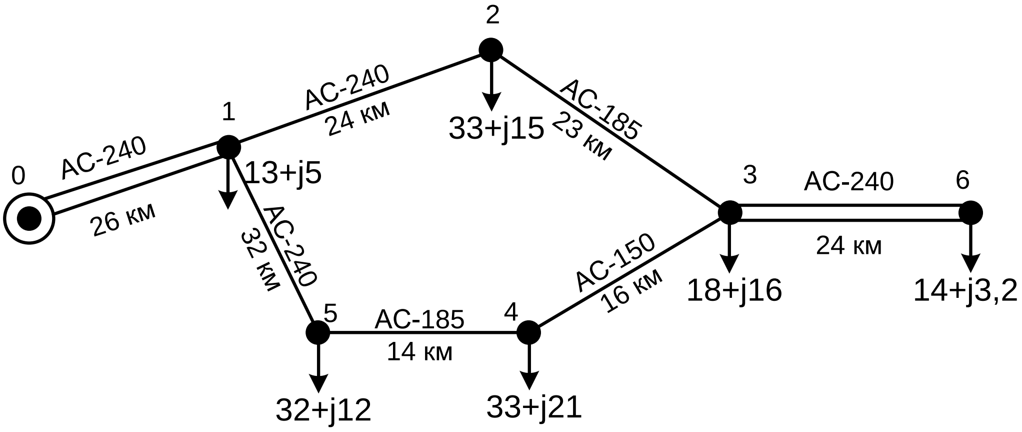
№5

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП 238e$^{j\,17}$ кВ.



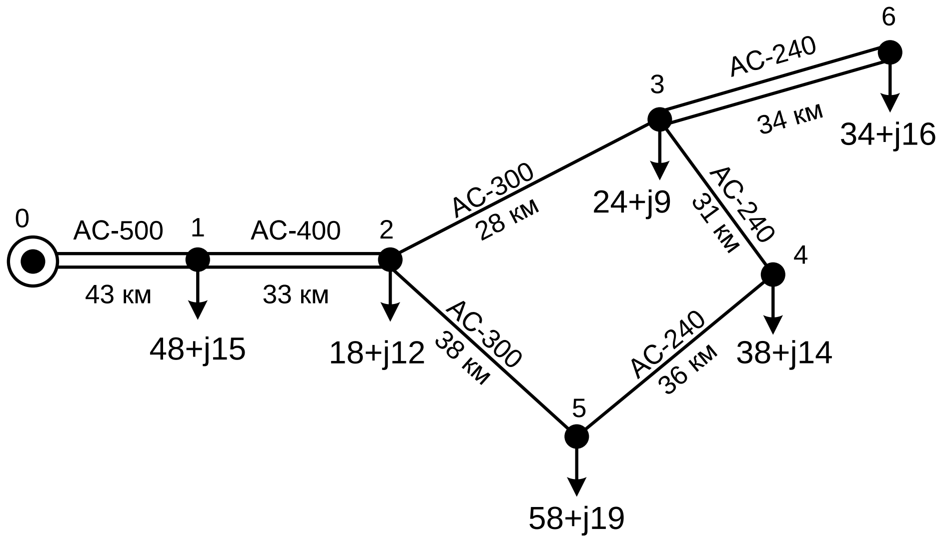
№6

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП 120e$^{j\,9}$ кВ.



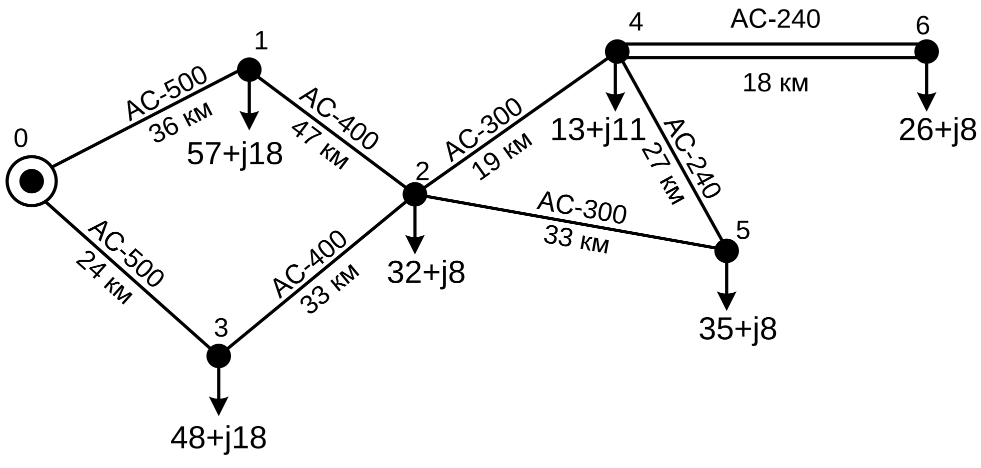
№7

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП 236e$^{j\,16}$ кВ.



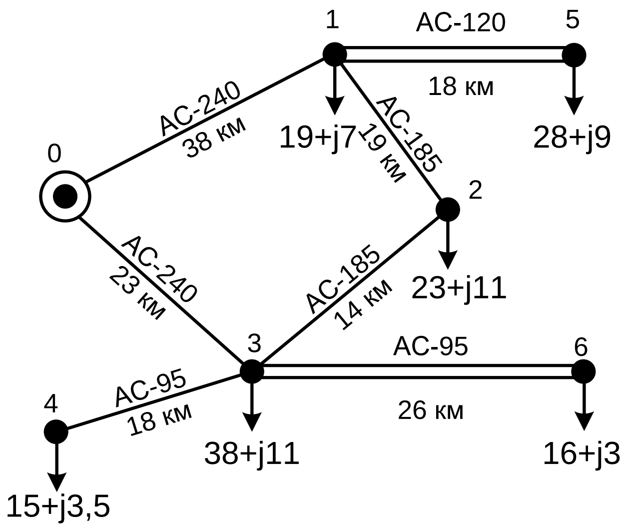
№8

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП 228e$^{j\,18}$ кВ.



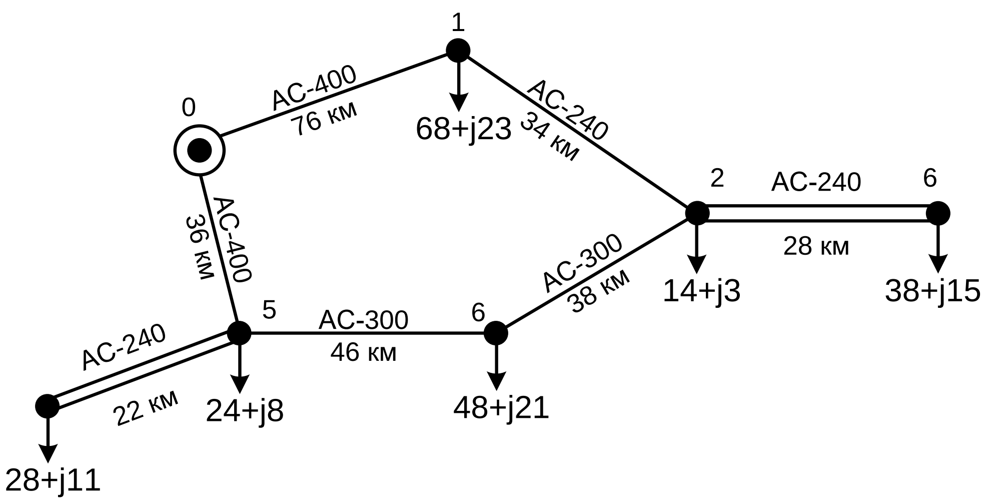
№9

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $117e^{j\,12}$ кВ.



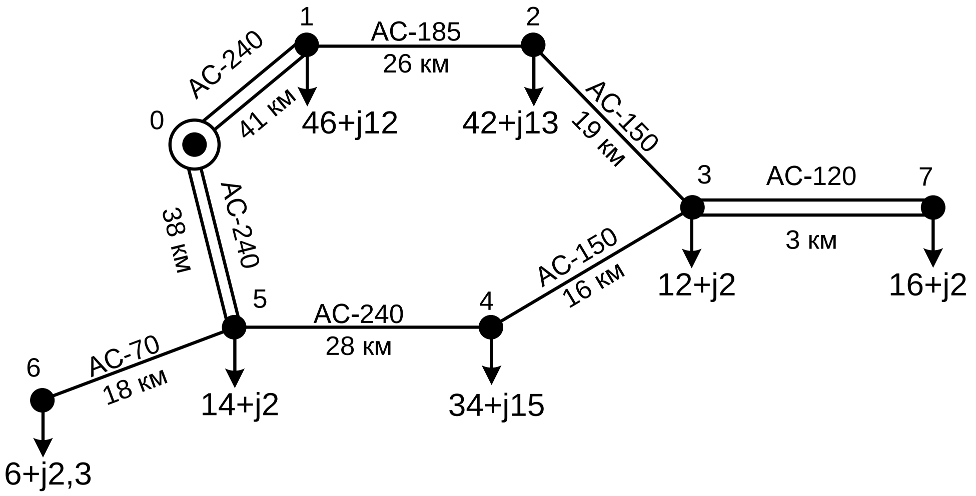
№10

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $237e^{j\,12}$ кВ.



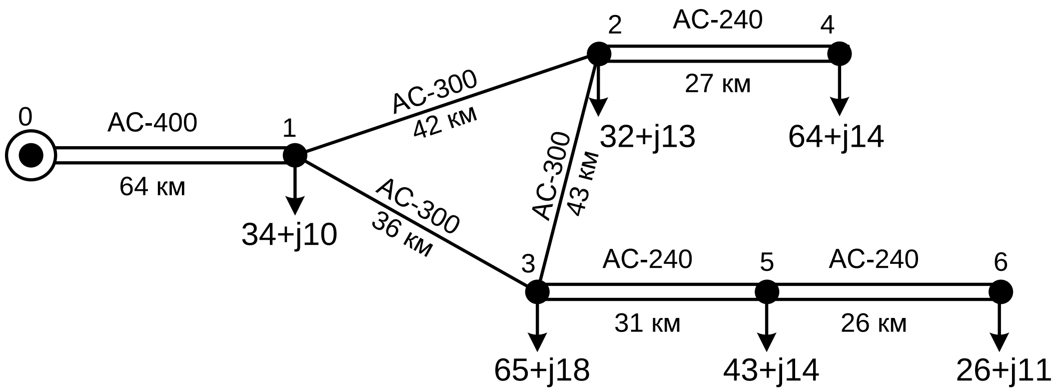
№11

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $119e^{j\,14}$ кВ.



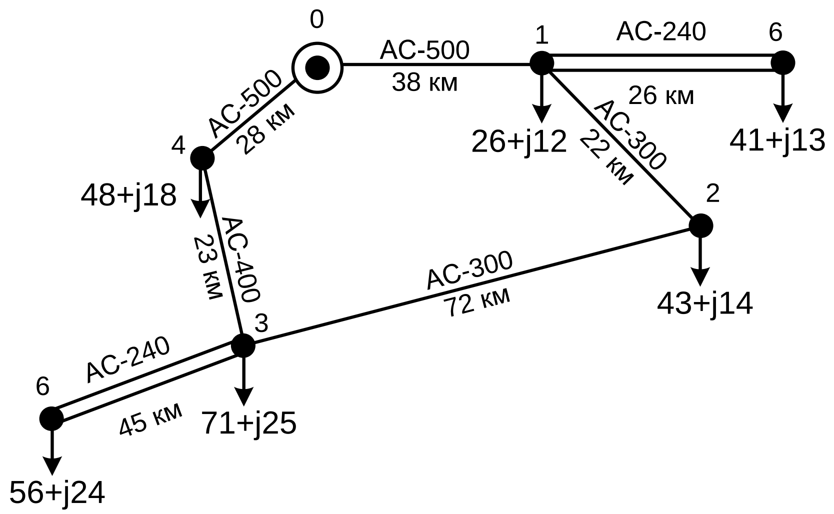
№12

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $235e^{j\,15}$ кВ.



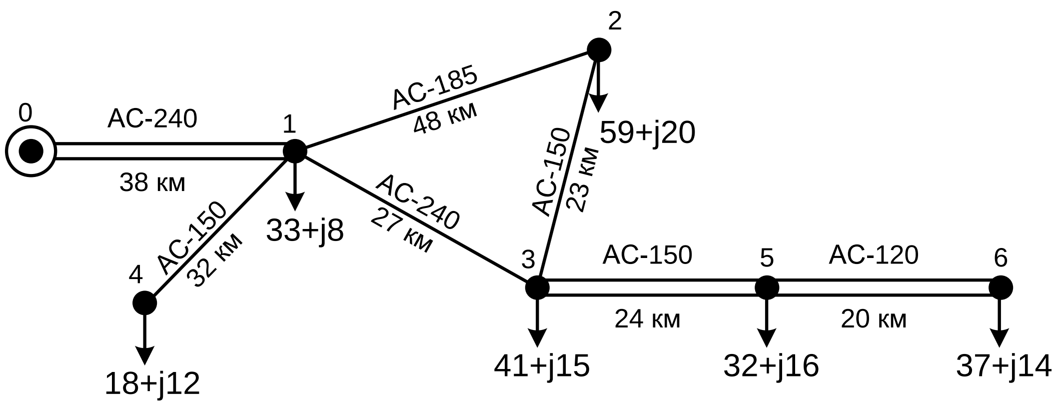
№13

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $227e^{j\,20}$ кВ.



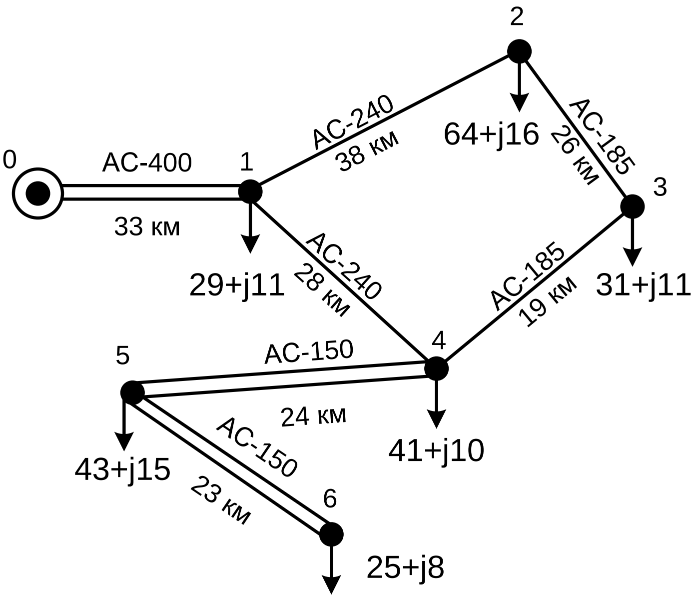
№14

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $120e^{j\,8}$ кВ.



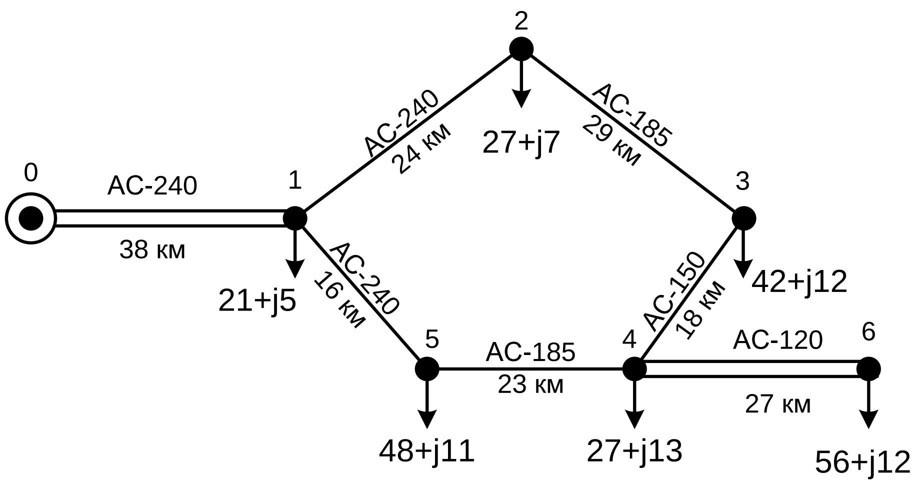
№15

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $120e^{j\,7}$ кВ.



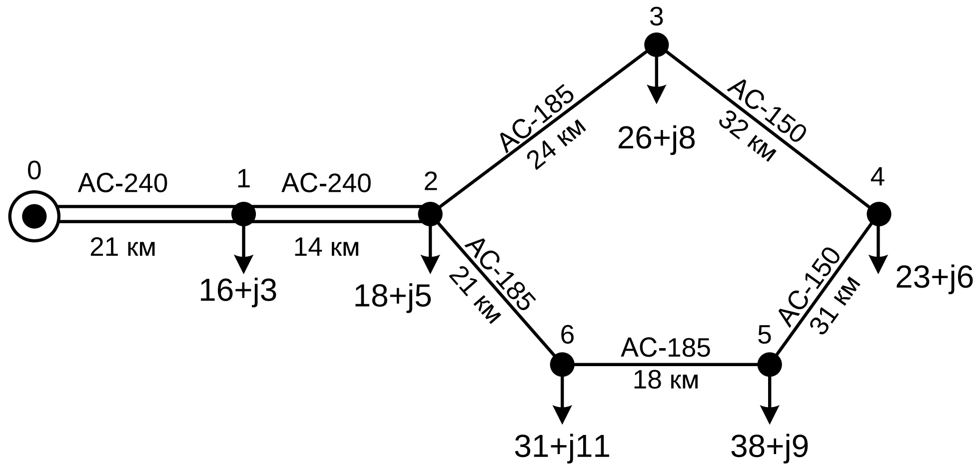
№16

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $118e^{j\,10}$ кВ.



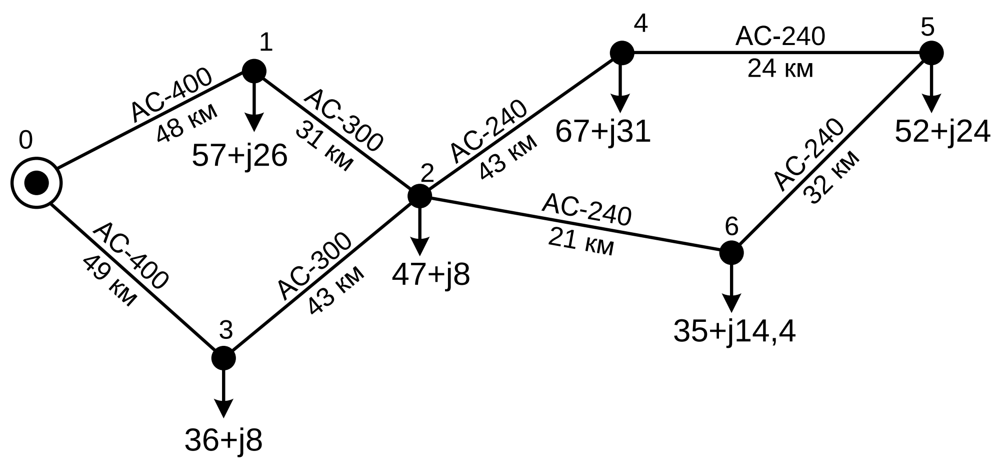
№17

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $116e^{j\,8}$ кВ.



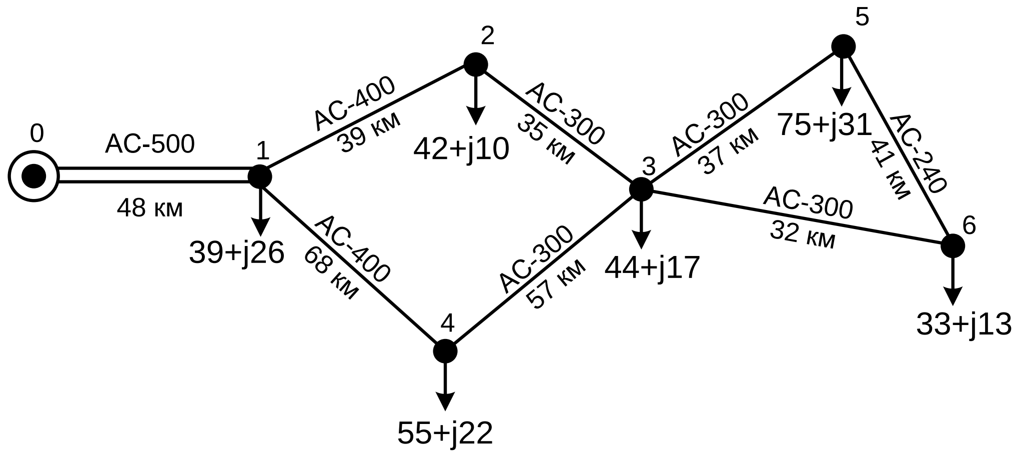
№18

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $224e^{j\,16}$ кВ.



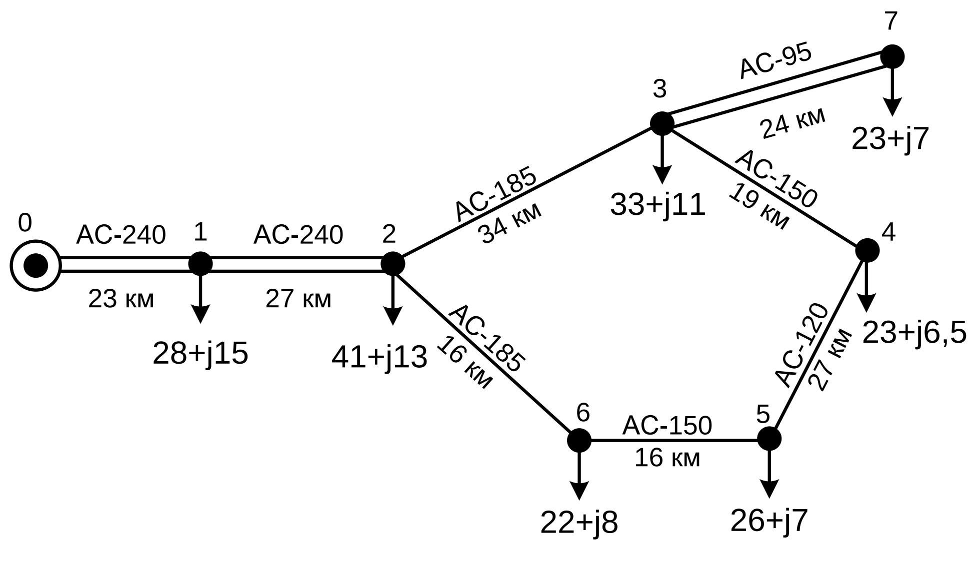
№19

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП 222e$^{j\,18}$ кВ.



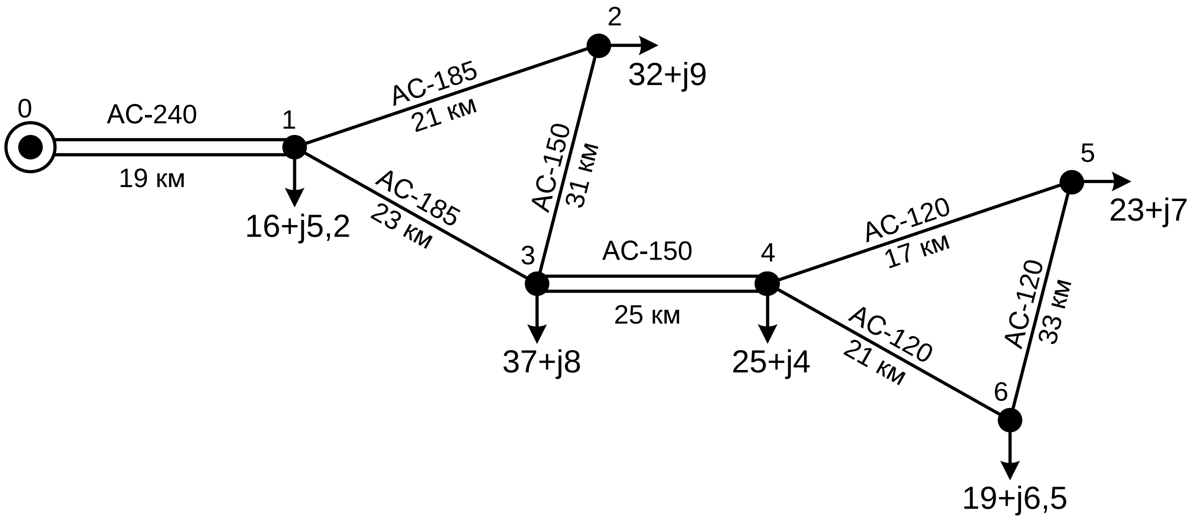
№20

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП 120e$^{j\,7}$ кВ.



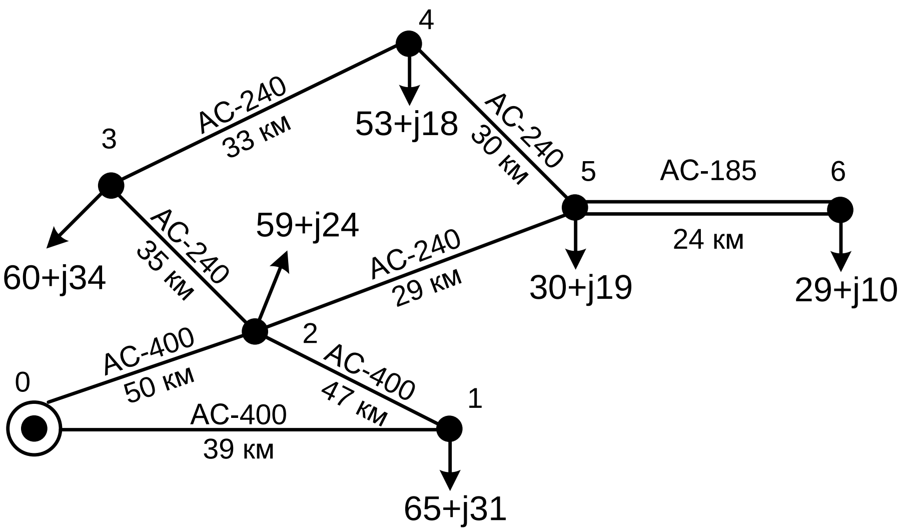
№21

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $119e^{j\,9}$ кВ.



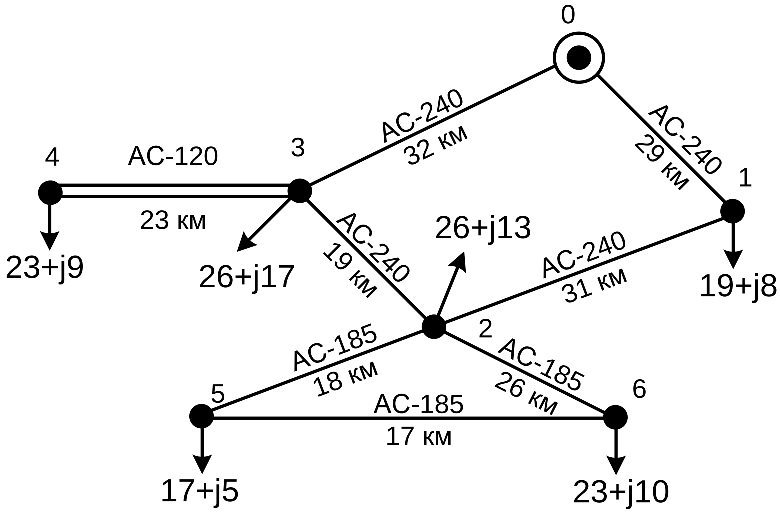
№ 22

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $223e^{j\,19}$ кВ.



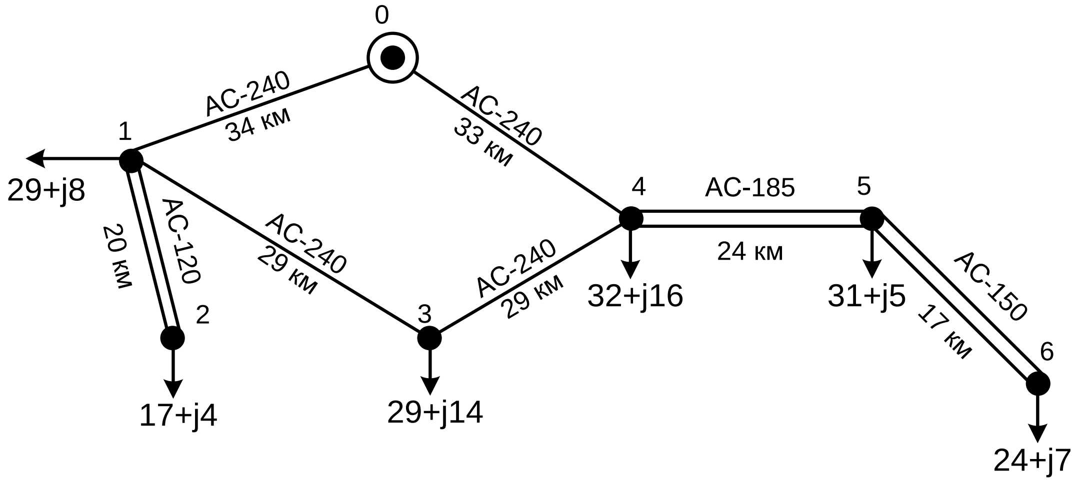
№ 23

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП 110e$^{j\,17}$ кВ.



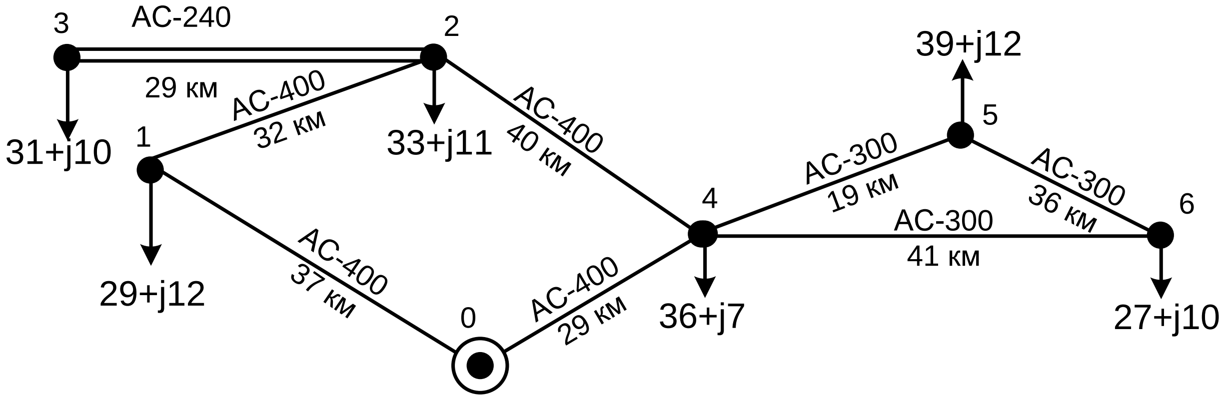
№ 24

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП 113e$^{j\,29}$ кВ.



№ 25

Рассчитать установившийся режим в схеме. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжение ИП $224e^{j\,19}$ 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 учетом уравнительной мощности, обусловленной неодинаковостью напряжений источников питания.

Исходя из вышесказанного, алгоритм расчета сети с двухсторонним питанием следующий:

1. Рассчитываются потоки мощности на головных участках сети при равенстве напряжений источников питания по выражениям (3.1), (3.2), $\underline{S}_{ГУ}$.

2. Определяется уравнительная мощность от источника питания с большим напряжением к источнику питания с меньшим напряжением

$$\underline{S}_{УР} = \frac{U^*_{ИП\,1} - U^*_{ИП\,2}}{Z^*_{A'-A''}} \cdot U_{ном} \qquad (3.11)$$

3. Уточняются потоки мощности на головных участках с учетом уравнительной мощности $\underline{S}_{УР}$.

Для головного участка, питаемого от источника с большим напряжением:

$$\underline{S}^{факт}_{ГУ} = \underline{S}_{ГУ} + \underline{S}_{УР}. \qquad (3.12)$$

Для головного участка, питаемого от источника с меньшим напряжением:

$$\underline{S}^{факт}_{ГУ} = \underline{S}_{ГУ} - \underline{S}_{УР}. \qquad (3.13)$$

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. 3.6);
- к разомкнутой сети в одном или нескольких узлах подключены кольцевые сети (рис. 3.7);
- к сети с двухсторонним питанием в одном или нескольких узлах подключены разветвленные разомкнутые сети (рис. 3.8);
- к сети с двухсторонним питанием подключена кольцевая сеть (рис. 3.9).

Последовательность расчета таких сетей показан на рис. 3.6 – 3.9.

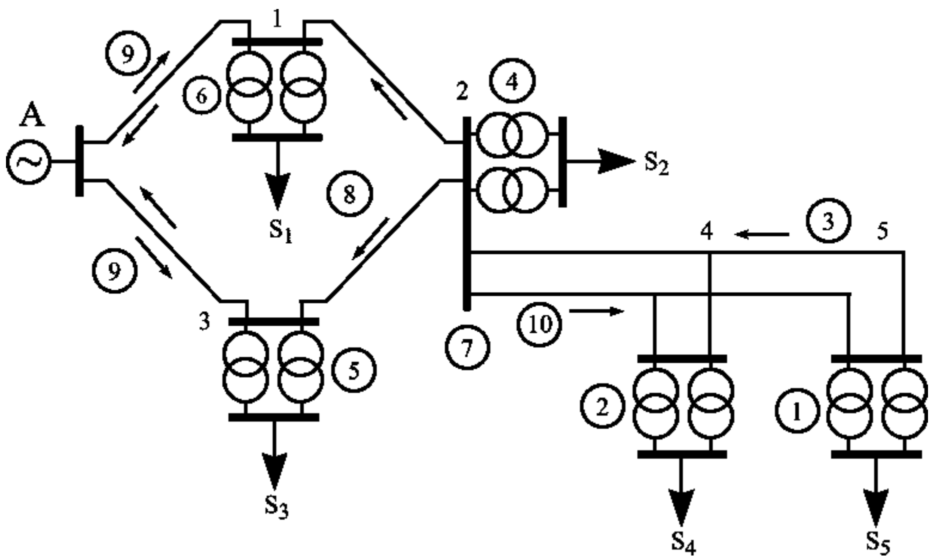


Рис. 3.6. Схема сети, содержащей кольцо и разветвленную разомкнутую сеть

Порядок расчета сети, приведенной на рис. 3.6.

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.

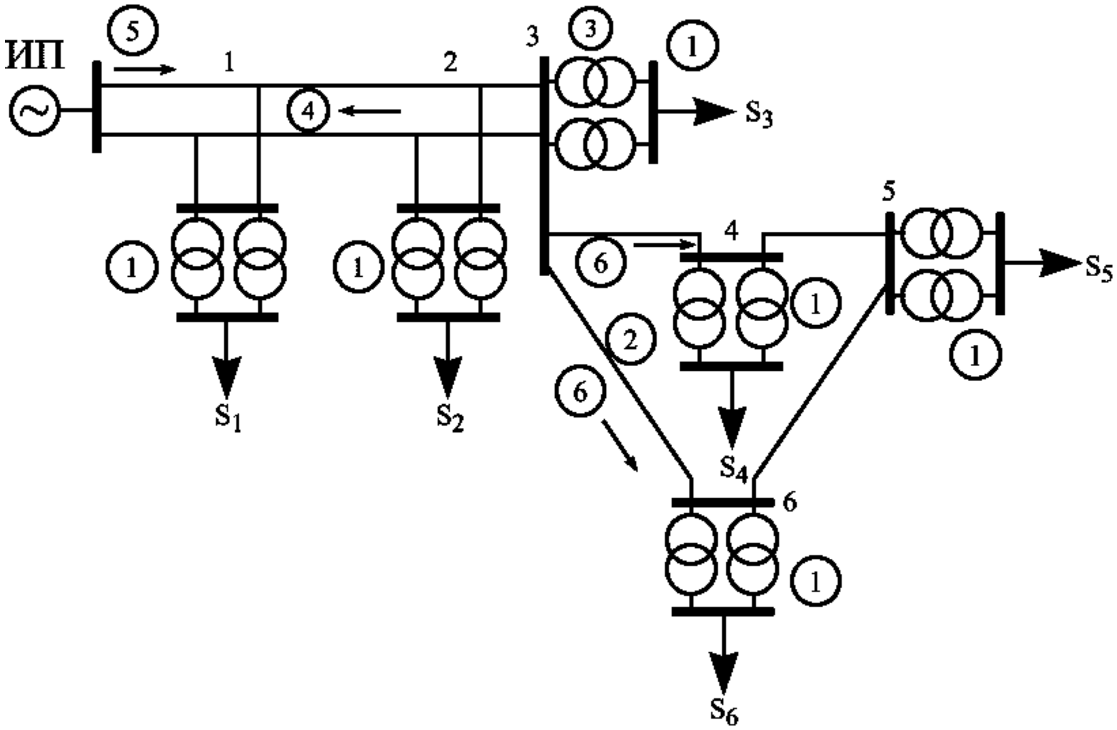


Рис. 3.7. Схема сети, содержащей разомкнутую сеть и питаемое от нее кольцо

Порядок расчета сети, приведенной на рис. 3.7.

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.

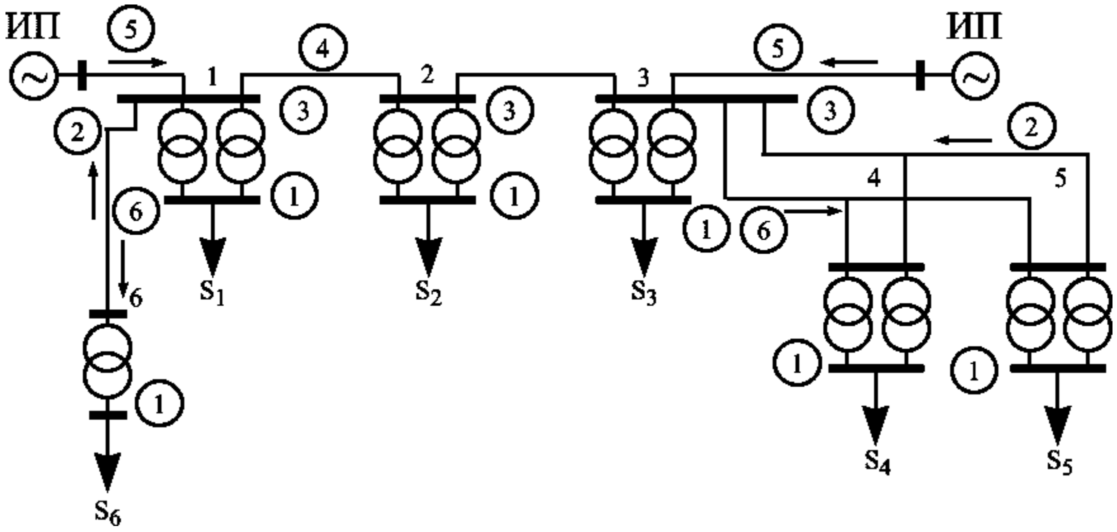


Рис. 3.8. Схема сети, содержащей магистраль с двухсторонним питанием и разомкнутую сеть

Порядок расчета сети, приведенной на рис. 3.8.

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.

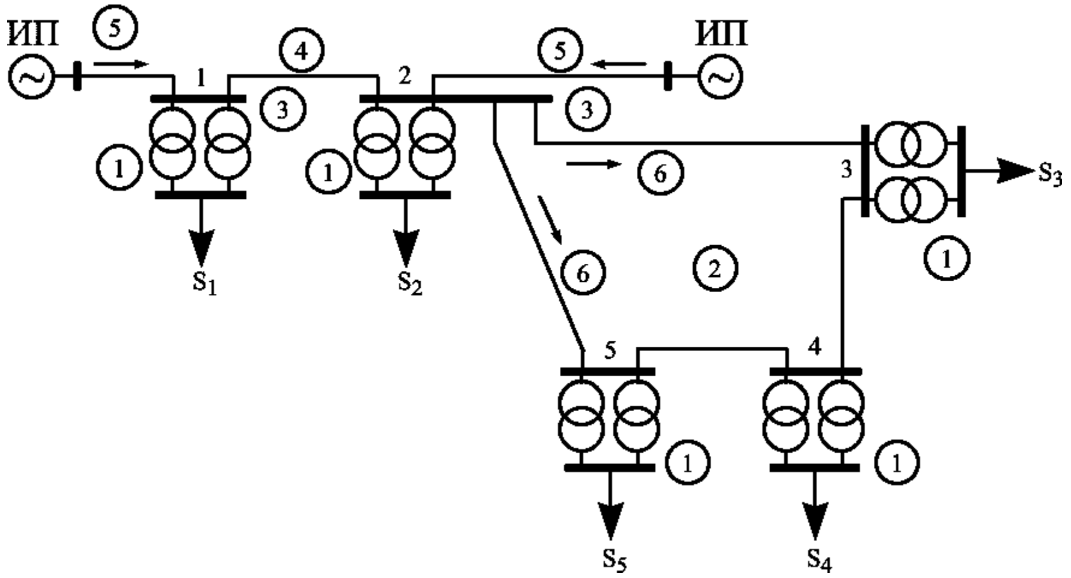


Рис. 3.9. Схема сети, содержащей магистраль с двухсторонним питанием и питаемое от нее кольцо

Порядок расчета сети, приведенной на рис. 3.9.

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 разделах 2 и 3.

Примечание: порядок расчета сети (см. рис. 3.6 – 3.9) в тексте показан относительно цифр в кружках, приведенных на рисунках.

Примеры решения задач

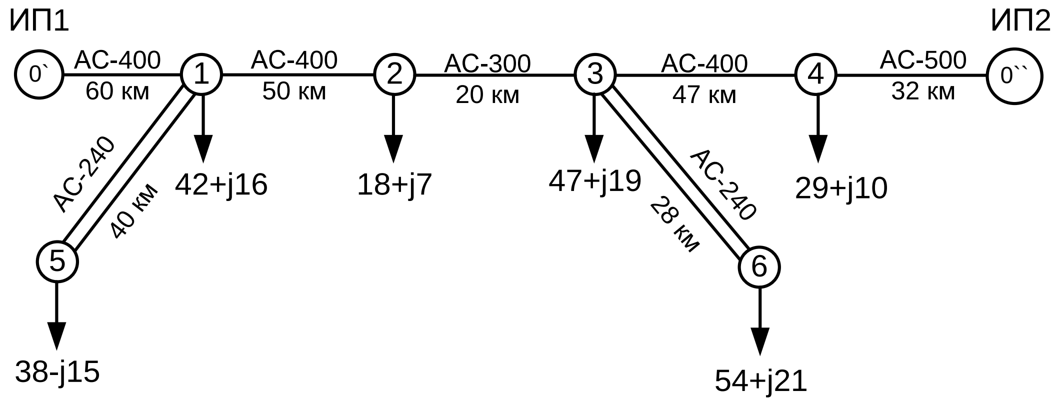
Листинг

примеров решения задач по подразделу 3.3

в программе MathCad фирмы MathSoft

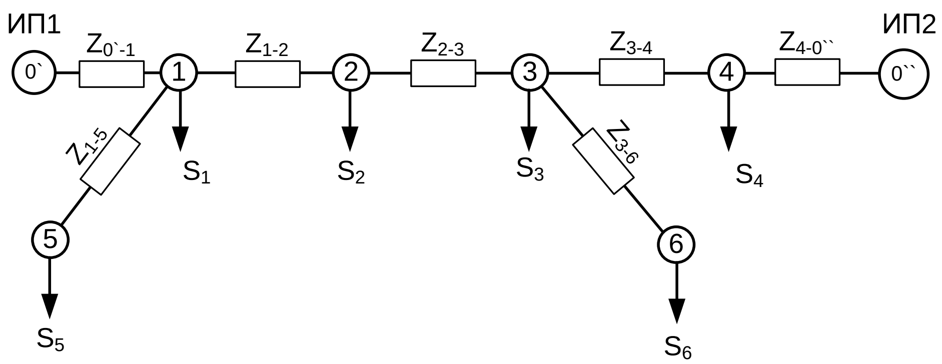
Пример 3.3.

Рассчитать установившийся режим в сети, схема которой приведена на рисунке. В узлах задана приведенная нагрузка в МВА. Напряжения источников питания: первого $\mathbf{236 \cdot e^{j \cdot 18}}$ кВ, второго $\mathbf{240 \cdot e^{j \cdot 20}}$ кВ.



$\mathbf{U_{i1} := 236 \cdot e^{j \cdot deg \cdot 18}}$ **кВ** $\qquad$ $\mathbf{U_{i2} := 240 \cdot e^{j \cdot deg \cdot 20}}$ **кВ**

Составляем схему замещения, в которой показаны расчетные нагрузки узлов.



Находим параметры схемы замещения.

Сопротивления участков сети определим по погонным параметрам:

$\mathbf{z_{0'1} := 0.075 \cdot 60 + j \cdot 0.42 \cdot 60}$ $\qquad$ $\mathbf{z_{0'1} = 4.5 + 25.2i}$ **Ом**

$\mathbf{z_{12} := 0.075 \cdot 50 + j \cdot 0.42 \cdot 50}$ $\qquad$ $\mathbf{z_{12} = 3.75 + 21i}$ **Ом**

$z_{23} := 0.098 \cdot 20 + j \cdot 0.429 \cdot 20$ $\qquad z_{23} = 1.96 + 8.58i$ **Ом**

$z_{34} := 0.075 \cdot 47 + j \cdot 0.42 \cdot 47$ $\qquad z_{34} = 3.525 + 19.74i$ **Ом**

$z_{15} := \frac{1}{2} \cdot (0.121 \cdot 40 + j \cdot 0.406 \cdot 40)$ $\qquad z_{15} = 2.42 + 8.12i$ **Ом**

$z_{36} := \frac{1}{2} \cdot (0.121 \cdot 28 + j \cdot 0.409 \cdot 28)$ $\qquad z_{36} = 1.694 + 5.726i$ **Ом**

$z_{40''} := 0.06 \cdot 32 + j \cdot 0.413 \cdot 32$ $\qquad z_{40''} = 1.92 + 13.216i$ **Ом**

Емкостные проводимости участков сети также определим по справочным данным.

$b_{o0'1} := 2.7 \cdot 10^{-6}$ **См** $\qquad b_{o12} := 2.7 \cdot 10^{-6}$ **См** $\qquad b_{o23} := 2.64 \cdot 10^{-6}$ **См**

$b_{o34} := 2.7 \cdot 10^{-6}$ **См** $\qquad b_{o15} := 2 \cdot 2.6 \cdot 10^{-6}$ **См** $\qquad b_{o36} := 2 \cdot 2.6 \cdot 10^{-6}$ **См**

$b_{o40''} := 2.74 \cdot 10^{-6}$ **См**

Активные и индуктивные сопротивления

$R_{01} := 4.5$ **Ом** $\qquad X_{01} := 25.2$ **Ом**

$R_{12} := 3.75$ **Ом** $\qquad X_{12} := 21$ **Ом**

$R_{23} := 1.96$ **Ом** $\qquad X_{23} := 8.58$ **Ом**

$R_{34} := 3.525$ **Ом** $\qquad X_{34} := 19.74$ **Ом**

$R_{15} := 2.42$ **Ом** $\qquad X_{15} := 8.12$ **Ом**

$R_{36} := 1.694$ **Ом** $\qquad X_{36} := 5.726$ **Ом**

$R_{40''} := 1.92$ **Ом** $\qquad X_{40''} := 13.216$ **Ом**

Находим зарядные мощности, принимая напряжения в узлах равными номинальному.

$Q_{c0'1} := \frac{220^2 \cdot b_{o0'1} \cdot 60}{2}$ $\qquad Q_{c0'1} = 3.92$ **Мвар**

$Q_{c12} := \frac{220^2 \cdot b_{o12} \cdot 50}{2}$ $\qquad Q_{c12} = 3.267$ **Мвар**

$$Q_{c23} := \frac{220^2 \cdot b_{o23} \cdot 20}{2} \qquad Q_{c23} = 1.278 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c34} := \frac{220^2 \cdot b_{o34} \cdot 47}{2} \qquad Q_{c34} = 3.071 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c36} := \frac{220^2 \cdot b_{o36} \cdot 28}{2} \qquad Q_{c36} = 3.524 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c15} := \frac{220^2 \cdot b_{o15} \cdot 40}{2} \qquad Q_{c15} = 5.034 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c40''} := \frac{220^2 \cdot b_{o40''} \cdot 32}{2} \qquad Q_{c40''} = 2.122 \quad \text{Мвар}$$

Находим расчетные мощности нагрузок узлов.

$$S_1 := 42 + j \cdot 16 - j \cdot Q_{c0'1} - j \cdot Q_{c12} - j \cdot Q_{c15} \qquad S_1 = 42 + 3.779i \quad \text{МВА}$$

$$S_2 := 18 + j \cdot 7 - j \cdot Q_{c12} - j \cdot Q_{c23} \qquad S_2 = 18 + 2.455i \quad \text{МВА}$$

$$S_3 := 47 + j \cdot 19 - j \cdot Q_{c23} - j \cdot Q_{c34} - j \cdot Q_{c36} \qquad S_3 = 47 + 11.128i \quad \text{МВА}$$

$$S_4 := 29 + j \cdot 10 - j \cdot Q_{c34} - j \cdot Q_{c40''} \qquad S_4 = 29 + 4.807i \quad \text{МВА}$$

$$S_5 := 38 + j \cdot 15 - j \cdot Q_{c15} \qquad S_5 = 38 + 9.966i \quad \text{МВА}$$

$$S_6 := 54 + j \cdot 21 - j \cdot Q_{c36} \qquad S_6 = 54 + 17.476i \quad \text{МВА}$$

Определяем потери мощности на участках 1-5 и 3-6 и находим суммарную нагрузку первого и третьего узлов сети.

$$P_5 := 38 \ \text{МВт} \qquad Q_5 := 9.966 \ \text{Мвар}$$

$$\delta S_{15} := \frac{P_5^2 + Q_5^2}{220^2} \cdot Z_{15} \qquad \delta S_{15} = 0.077 + 0.259i \quad \text{МВА}$$

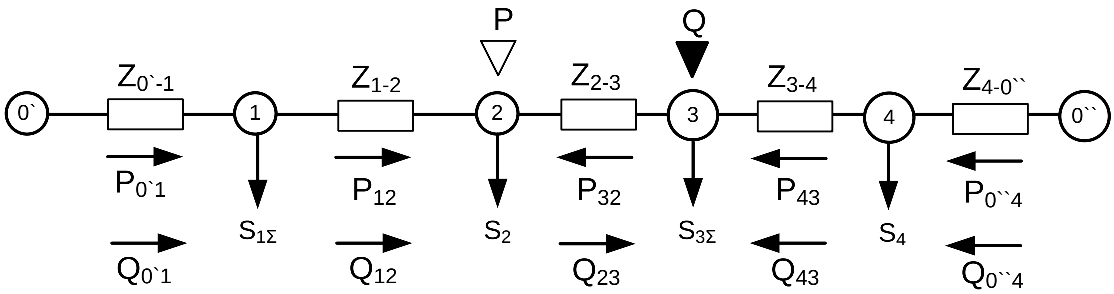
$$S_{1\Sigma} := S_1 + S_5 + \delta S_{15} \qquad S_{1\Sigma} = 80.077 + 14.004i \quad \text{МВА}$$

$$P_6 := 54 \ \text{МВт} \qquad Q_6 := 17.476 \ \text{Мвар}$$

$$\delta S_{36} := \frac{P_6^2 + Q_6^2}{220^2} \cdot Z_{36} \qquad \delta S_{36} = 0.113 + 0.381i \quad \text{МВА}$$

$S_{3\Sigma} := S_3 + S_6 + \delta S_{36}$ $\qquad\qquad$ $S_{3\Sigma} = 101.113 + 28.985i$ **МВА**

Схема замещения примет вид:



Находим потоки мощности на головных участках, определив предварительно суммарные сопротивления участков сети.

$z_{0'0''} := z_{0'1} + z_{12} + z_{23} + z_{34} + z_{40''}$

$z_{40'} := z_{34} + z_{23} + z_{12} + z_{0'1}$ $\qquad\qquad$ $z_{10''} := z_{12} + z_{23} + z_{34} + z_{40''}$

$z_{30'} := z_{23} + z_{12} + z_{0'1}$ $\qquad\qquad$ $z_{20''} := z_{23} + z_{34} + z_{40''}$

$z_{20'} := z_{12} + z_{0'1}$ $\qquad\qquad$ $z_{30''} := z_{34} + z_{40''}$

$z_{10'} := z_{0'1}$ $\qquad\qquad$ $z_{40''} := z_{40''}$

$$S_{0'1} := \frac{S_{1\Sigma}\cdot\overline{z_{10''}} + S_2\cdot\overline{z_{20''}} + S_{3\Sigma}\cdot\overline{z_{30''}} + S_4\cdot\overline{z_{40''}}}{\overline{z_{0'0''}}}$$

$S_{0''1} = 107.998 + 22.096i$ **МВА**

$$S_{0''4} := \frac{S_4\cdot\overline{z_{40'}} + S_{3\Sigma}\cdot\overline{z_{30'}} + S_2\cdot\overline{z_{20'}} + S_{1\Sigma}\cdot\overline{z_{10'}}}{\overline{z_{0'0''}}}$$

$S_{0'4} = 120.192 + 28.156i$ **МВА**

Находим уравнительную мощность, протекающую в сети из-за неравенства напряжений источников питания.

$$S_{ur} := \frac{\overline{U_{i2}} - \overline{U_{i1}}}{\overline{z_{0'0''}}}\cdot 220$$ $\qquad\qquad$ $S_{ur} = 22.719 - 1.354i$ **МВА**

Определяем фактическую мощность на головных участках сети.

$S_{0'1f} := S_{0'1} - S_{ur}$ $\quad$ $S_{0''1f} = 85.279 + 23.449i$ МВА

$S_{0''4f} := S_{0''4} + S_{ur}$ $\quad$ $S_{0'4f} = 142.911 + 26.803i$ МВА

Ищем точку потокораздела.

$S_{12} := S_{0'1f} - S_{1\Sigma}$ $\quad$ $S_{12} = 5.202 + 9.445i$ МВА

$S_{23} := S_{12} - S_{2}$ $\quad$ $S_{23} = -12.798 + 6.99i$ МВА

$S_{34} := S_{23} - S_{3\Sigma}$ $\quad$ $S_{34} = -113.911 - 21.995i$ МВА

$S_{43} := S_{0''4f} - S_{4}$ $\quad$ $S_{43} = 113.911 + 21.995i$ МВА

$S_{32} := S_{43} - S_{3\Sigma}$ $\quad$ $S_{32} = 12.798 - 6.99i$ МВА

В схеме сети две точки потокораздела: по активной мощности узел 2, по реактивной - узел 3.

Определим потери мощности на участке сети между точками потокораздела.

$P_{23} := 12.798$ МВт $\quad$ $Q_{23} := 6.99$ Мвар

$$\delta S_{23} := \frac{P_{23}^2 + Q_{23}^2}{220^2} \cdot Z_{23} \qquad \delta S_{23} = 8.612 \cdot 10^{-3} + 0.038i \text{ МВА}$$

Разрезаем сеть по точкам потокораздела и определяем нагрузку в конце последнего участка каждой разомкнутой сети.

$P_{12} := 5.202$ МВт $\quad$ $Q_{12} := 9.445$ Мвар

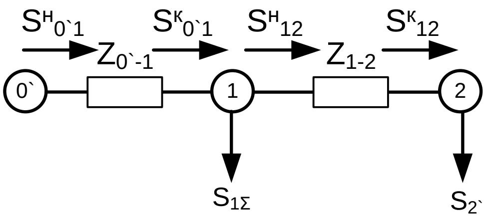
$\delta P_{23} := 8.612 \cdot 10^{-3}$ МВт $\quad$ $\delta Q_{23} := 0.038$ Мвар

$P_{43} := 113.911$ МВт $\quad$ $Q_{43} := 21.995$ Мвар

$S_{2'} := P_{12} + i \cdot (Q_{12} + \delta Q_{23})$ $\quad$ $S_{2'} = 5.202 + 9.483i$ МВА

$S_{3'} := P_{43} + \delta P_{23} + i \cdot Q_{43}$ $\quad$ $S_{3'} = 113.92 + 21.995i$ МВА

Расчет потоков мощности в разомкнутой сети 0'-1-2.



$P_{2'} := 5.202$ МВт $\qquad Q_{2'} := 9.483$ Мвар

$$\delta S_{12} := \frac{P_{2'}^2 + Q_{2'}^2}{220^2} \cdot Z_{12}$$

$$\delta S_{12} = 9.064 \cdot 10^{-3} + 0.051i \quad \text{МВА}$$

$S_{12n} := S_{2'} + \delta S_{12}$ $\qquad S_{12n} = 5.211 + 9.534i$ МВА

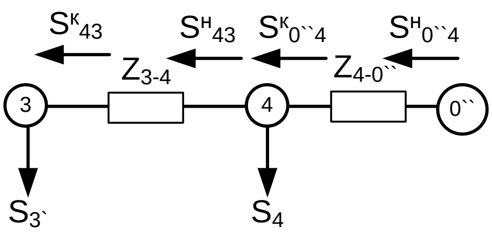
$S_{0'1k} := S_{12n} + S_{1\Sigma}$ $\qquad S_{0'1k} = 85.288 + 23.538i$ МВА

$P_{0'1k} := 85.288$ МВт $\qquad Q_{0'1k} := 23.538$ Мвар

$$\delta S_{0'1} := \frac{P_{0'1k}^2 + Q_{0'1k}^2}{220^2} \cdot Z_{0'1} \qquad \delta S_{0'1} = 0.728 + 4.076i \quad \text{МВА}$$

$S_{0'1n} := S_{0'1k} + \delta S_{0'1}$ $\qquad S_{0'1n} = 86.016 + 27.614i$ МВА

Расчет потоков мощности в разомкнутой сети 0"-4-3.



$P_{3'} := 113.92$ МВт $\qquad Q_{3'} := 21.995$ Мвар

$$\delta S_{43} := \frac{P_{3'}^2 + Q_{3'}^2}{220^2} \cdot Z_{34} \qquad \delta S_{43} = 0.98 + 5.49i \quad \text{МВА}$$

$S_{43n} := S_{3'} + \delta S_{43}$ $\qquad S_{43n} = 114.9 + 27.486i$ МВА

$S_{0''4k} := S_{43n} + S_4$ $\quad S_{0''4k} = 143.9 + 32.293i$ МВА

$P_{0''4k} := 143.9$ МВт $\quad Q_{0''4k} := 32.293$ Мвар

$$\delta S_{0''4} := \frac{P_{0''4k}^{\;2} + Q_{0''4k}^{\;2}}{220^2} \cdot Z_{40''} \qquad \delta S_{0''4} = 0.863 + 5.939i \text{ МВА}$$

$S_{0''4n} := S_{0''4k} + \delta S_{0''4}$ $\quad S_{0''4n} = 144.763 + 38.232i$ МВА

Находим напряжения во всех узлах схемы.

$P_{0'1n} := 86.016$ МВт $\quad Q_{0'1n} := 27.614$ Мвар

$P_{12n} := 5.211$ МВт $\quad Q_{12n} := 9.534$ Мвар

$P_{0''4n} := 144.763$ МВт $\quad Q_{0''4n} := 38.232$ Мвар

$P_{43n} := 114.9$ МВт $\quad Q_{43n} := 27.486$ Мвар

$$U_1 := U_{i1} - \left(\frac{P_{0'1n} \cdot R_{01} + Q_{0'1n} \cdot X_{01}}{\overline{U_{i1}}} + i \cdot \frac{P_{0'1n} \cdot X_{01} - Q_{0'1n} \cdot R_{01}}{\overline{U_{i1}}} \right)$$

$U_1 = 222.761 + 63.276i$ кВ

$$U_2 := U_1 - \left(\frac{P_{12n} \cdot R_{12} + Q_{12n} \cdot X_{12}}{\overline{U_1}} + i \cdot \frac{P_{12n} \cdot X_{12} - Q_{12n} \cdot R_{12}}{\overline{U_1}} \right)$$

$U_2 = 221.935 + 62.71i$ кВ

$$U_4 := U_{i2} - \left(\frac{P_{0''4n} \cdot R_{40''} + Q_{0''4n} \cdot X_{40''}}{\overline{U_{i2}}} + i \cdot \frac{P_{0''4n} \cdot X_{40''} - Q_{0''4n} \cdot R_{40''}}{\overline{U_{i2}}} \right)$$

$U_4 = 225.081 + 73.766i$ кВ

$$U_3 := U_4 - \left(\frac{P_{43n} \cdot R_{34} + Q_{43n} \cdot X_{34}}{\overline{U_4}} + i \cdot \frac{P_{43n} \cdot X_{34} - Q_{43n} \cdot R_{34}}{\overline{U_4}} \right)$$

$U_3 = 224.135 + 63.808i$ кВ

$S_{32n} := S_{32} + \delta P_{23}$ $\quad S_{32n} = 12.807 - 6.99i$ МВА

$P_{32n} := 12.807$ МВт $\quad Q_{32n} := 6.99$ Мвар

$$U_{2'} := U_3 - \left(\frac{P_{32n} \cdot R_{23} + Q_{32n} \cdot X_{23}}{\overline{U_3}} + i \cdot \frac{P_{32n} \cdot X_{23} - Q_{32n} \cdot R_{23}}{\overline{U_3}} \right)$$

$U_{2'} = 224.424 + 63.339i$ кВ

$$\varepsilon := \frac{|U_2| - |U_{2'}|}{|U_2|} \cdot 100 \qquad \varepsilon = -1.113 \quad \%$$

Потоки мощности в начале участков 1-5 и 3-6.

$$S_{15n} := S_5 + \delta S_{15} \qquad S_{15n} = 38.077 + 10.225i \quad \text{МВА}$$

$$S_{36n} := S_6 + \delta S_{36} \qquad S_{36n} = 54.113 + 17.858i \quad \text{МВА}$$

$P_{15n} := 38.077$ МВт $\qquad Q_{15n} := 10.225$ Мвар

$P_{36n} := 54.113$ МВт $\qquad Q_{36n} := 17.858$ Мвар

$$U_5 := U_1 - \left(\frac{P_{15n} \cdot R_{15} + Q_{15n} \cdot X_{15}}{\overline{U_1}} + i \cdot \frac{P_{15n} \cdot X_{15} - Q_{15n} \cdot R_{15}}{\overline{U_1}} \right)$$

$U_5 = 213.005 + 94.85i$ кВ

$$U_6 := U_3 - \left(\frac{P_{36n} \cdot R_{36} + Q_{36n} \cdot X_{36}}{\overline{U_3}} + i \cdot \frac{P_{36n} \cdot X_{36} - Q_{36n} \cdot R_{36}}{\overline{U_3}} \right)$$

$U_6 = 223.663 + 62.427i$ кВ

$$\varepsilon := \frac{|U_5| - 220}{|U_5|} \qquad \varepsilon = 0.056 \quad \%$$

$$\varepsilon := \frac{|U_6| - 220}{|U_6|} \qquad \varepsilon = 0.053 \quad \%$$

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.

$U_{i1} := 230 \cdot e^{j \cdot deg \cdot 15}$ кВ $\qquad U_{i2} := 242 \cdot e^{j \cdot deg \cdot 20}$ кВ

До нахождения уравнительной мощности и точек потокораздела расчет будет полностью аналогичен приведенному выше расчету этого примера, поэтому здесь он не приводится.

Находим уравнительную мощность, протекающую в сети из-за неравенства напряжений источников питания.

$$S_{ur} := \frac{\overline{U_{i2}} - \overline{U_{i1}}}{\overline{z_{0'0''}}} \cdot 220 \qquad S_{ur} = 58.751 + 2.663i \quad \text{МВА}$$

Определяем фактическую мощность на головных участках сети

$$S_{0'1f} := S_{0'1} - S_{ur} \qquad S_{0'1f} = 49.247 + 19.433i \quad \text{МВА}$$

$$S_{0''4f} := S_{0''4} + S_{ur} \qquad S_{0''4f} = 178.943 + 30.819i \quad \text{МВА}$$

Ищем точку потокораздела

$$S_{12} := S_{0'1f} - S_{1\Sigma} \qquad S_{12} = -30.83 + 5.429i \quad \text{МВА}$$

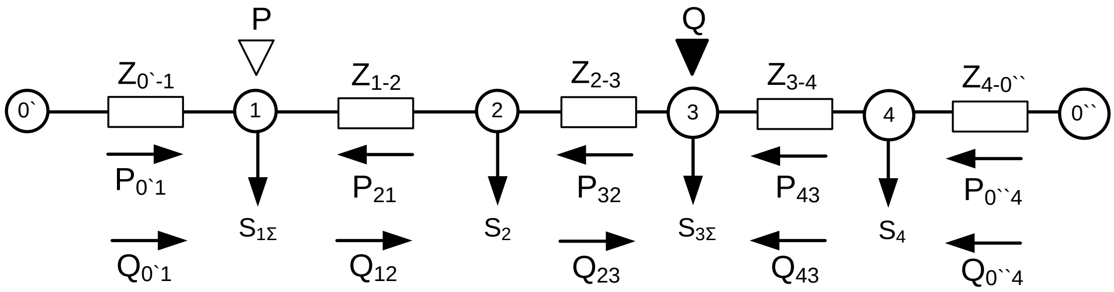
$$S_{23} := S_{12} - S_{2} \qquad S_{23} = -48.83 + 2.973i \quad \text{МВА}$$

$$S_{34} := S_{23} - S_{3\Sigma} \qquad S_{34} = -149.943 - 26.012i \quad \text{МВА}$$

$$S_{43} := S_{0''4f} - S_{4} \qquad S_{43} = 149.943 + 26.012i \quad \text{МВА}$$

$$S_{32} := S_{43} - S_{3\Sigma} \qquad S_{32} = 48.83 - 2.973i \quad \text{МВА}$$

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.

$$P_{12} := 30.83 \ \text{МВт} \qquad Q_{12} := 5.429 \ \text{Мвар}$$

$$P_{23} := 48.83 \ \text{МВт} \qquad Q_{23} := 2.973 \ \text{Мвар}$$

$$\delta S_{12} := \frac{P_{12}^{2} + Q_{12}^{2}}{220^{2}} \cdot Z_{12} \qquad \delta S_{12} = 0.076 + 0.425i \quad \text{МВА}$$

$$\delta S_{23} := \frac{P_{23}^{2} + Q_{23}^{2}}{220^{2}} \cdot Z_{23} \qquad \delta S_{23} = 0.097 + 0.424i \quad \text{МВА}$$

Разрезаем сеть по точкам потокораздела и определяем нагрузку в конце последнего участка каждой разомкнутой сети.

$P_{0'1f} := 49.247$ МВт $\quad Q_{0'1f} := 19.433$ Мвар

$\delta P_{12} := 0.076$ МВт $\quad \delta Q_{12} := 0.425$ Мвар

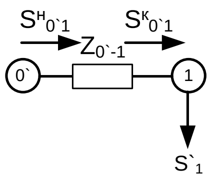
$\delta P_{23} := 0.097$ МВт $\quad \delta Q_{23} := 0.424$ Мвар

$P_{43} := 149.943$ МВт $\quad Q_{43} := 26.012$ Мвар

$S_{1'} := P_{0'1f} + i \cdot (Q_{0'1f} + \delta Q_{12} + \delta Q_{23}) \quad S_{1'} = 49.247 + 20.282i$ МВА

$S_{3'} := P_{43} + \delta P_{23} + \delta P_{12} + i \cdot Q_{43} \quad S_{3'} = 150.116 + 26.012i$ МВА

Расчет потоков мощности в разомкнутой сети 0'1

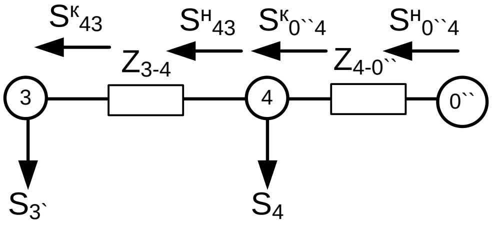


$P_{1'} := 49.247$ МВт $\quad Q_{1'} := 20.282$ Мвар

$$\delta S_{0'1} := \frac{P_{1'}^2 + Q_{1'}^2}{220^2} \cdot Z_{0'1} \qquad \delta S_{0'1} = 0.264 + 1.477i \text{ МВА}$$

$$S_{0'1n} := S_{1'} + \delta S_{0'1} \qquad S_{0'1n} = 49.511 + 21.759i \text{ МВА}$$

Расчет потоков мощности в разомкнутой сети 0"-4-3



$P_{3'} := 150.116$ МВт $\quad Q_{3'} := 26.012$ Мвар

$$\delta S_{43} := \frac{P_{3'}^2 + Q_{3'}^2}{220^2} \cdot Z_{34} \qquad \delta S_{43} = 1.69 + 9.467i \text{ МВА}$$

$$S_{43n} := S_{3'} + \delta S_{43} \qquad S_{43n} = 151.806 + 35.479i \text{ МВА}$$

$$S_{0''4k} := S_{43n} + S_4 \qquad S_{0''4k} = 180.806 + 40.286i \quad \text{МВА}$$

$$P_{0''4k} := 180.806 \ \text{МВт} \qquad Q_{0''4k} := 40.286 \ \text{Мвар}$$

$$\delta S_{0''4} := \frac{P_{0''4k}^{\,2} + Q_{0''4k}^{\,2}}{220^2} \cdot Z_{40''} \qquad \delta S_{0''4} = 1.361 + 9.37i \quad \text{МВА}$$

$$S_{0''4n} := S_{0''4k} + \delta S_{0''4} \qquad S_{0''4n} = 182.167 + 49.656i \quad \text{МВА}$$

Находим напряжения во всех узлах схемы

$$P_{0'1n} := 49.511 \ \text{МВт} \qquad Q_{0'1n} := 21.759 \ \text{Мвар}$$

$$P_{0''4n} := 182.167 \ \text{МВт} \qquad Q_{0''4n} := 49.656 \ \text{Мвар}$$

$$P_{43n} := 151.806 \ \text{МВт} \qquad Q_{43n} := 35.479 \ \text{Мвар}$$

$$U_1 := U_{i1} - \left(\frac{P_{0'1n} \cdot R_{01} + Q_{0'1n} \cdot X_{01}}{\overline{U_{i1}}} + i \cdot \frac{P_{0'1n} \cdot X_{01} - Q_{0'1n} \cdot R_{01}}{\overline{U_{i1}}} \right)$$

$$U_1 = 220.218 + 53.832i \quad \text{кВ}$$

$$U_4 := U_{i2} - \left(\frac{P_{0''4n} \cdot R_{40''} + Q_{0''4n} \cdot X_{40''}}{\overline{U_{i2}}} + i \cdot \frac{P_{0''4n} \cdot X_{40''} - Q_{0''4n} \cdot R_{40''}}{\overline{U_{i2}}} \right)$$

$$U_4 = 226.767 + 72.369i \quad \text{кВ}$$

$$U_3 := U_4 - \left(\frac{P_{43n} \cdot R_{34} + Q_{43n} \cdot X_{34}}{\overline{U_4}} + i \cdot \frac{P_{43n} \cdot X_{34} - Q_{43n} \cdot R_{34}}{\overline{U_4}} \right)$$

$$U_3 = 225.49 + 59.298i \quad \text{кВ}$$

Уточним потоки мощности на "вырезанных" участках сети 1-2 и 2-3.

$$S_{32n} := S_{32} + \delta P_{23} + \delta P_{12} \qquad S_{32n} = 49.003 - 2.973i \quad \text{МВА}$$

$$S_{12n} := S_{12} + \delta Q_{23} + \delta Q_{12} \qquad S_{12n} = -29.981 + 5.429i \quad \text{МВА}$$

$$P_{32n} := 49.003 \ \text{МВт} \qquad Q_{32n} := 2.973 \ \text{Мвар}$$

$$P_{12n} := -29.981 \ \text{МВт} \qquad Q_{12n} := 5.429 \ \text{Мвар}$$

$$U_{2'} := U_3 - \left(\frac{P_{32n} \cdot R_{23} + Q_{32n} \cdot X_{23}}{\overline{U_3}} + i \cdot \frac{P_{32n} \cdot X_{23} - Q_{32n} \cdot R_{23}}{\overline{U_3}} \right)$$

$$U_{2'} = 227.87 + 49.058i \quad \text{кВ}$$

$$U_2 := U_1 - \left(\frac{P_{12n} \cdot R_{12} + Q_{12n} \cdot X_{12}}{\overline{U_1}} + i \cdot \frac{P_{12n} \cdot X_{12} - Q_{12n} \cdot R_{12}}{\overline{U_1}} \right)$$

$U_2 = 219.531 + 56.615i$ кВ

$|U_{2'}| = 233.091$ кВ $\qquad |U_2| = 226.714$ 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

$S_{15n} := S_5 + \delta S_{15}$ $\qquad S_{15n} = 38.077 + 10.225i$ МВА

$S_{36n} := S_6 + \delta S_{36}$ $\qquad S_{36n} = 54.113 + 17.858i$ МВА

$P_{15n} := 38.077$ МВт $\qquad Q_{15n} := 10.225$ Мвар

$P_{36n} := 54.113$ МВт $\qquad Q_{36n} := 17.858$ Мвар

$$U_5 := U_1 - \left(\frac{P_{15n} \cdot R_{15} + Q_{15n} \cdot X_{15}}{\overline{U_1}} + i \cdot \frac{P_{15n} \cdot X_{15} - Q_{15n} \cdot R_{15}}{\overline{U_1}} \right)$$

$U_5 = 211.454 + 86.432i$ кВ

$$U_6 := U_3 - \left(\frac{P_{36n} \cdot R_{36} + Q_{36n} \cdot X_{36}}{\overline{U_3}} + i \cdot \frac{P_{36n} \cdot X_{36} - Q_{36n} \cdot R_{36}}{\overline{U_3}} \right)$$

$U_6 = 224.991 + 57.927i$ кВ

$$\varepsilon := \frac{|U_5| - 220}{|U_5|} \qquad \varepsilon = 0.037 \quad \%$$

$$\varepsilon := \frac{|U_6| - 220}{|U_6|} \qquad \varepsilon = 0.053 \quad \%$$

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 $\mathbf{227 \cdot e^{j \cdot 18}}$

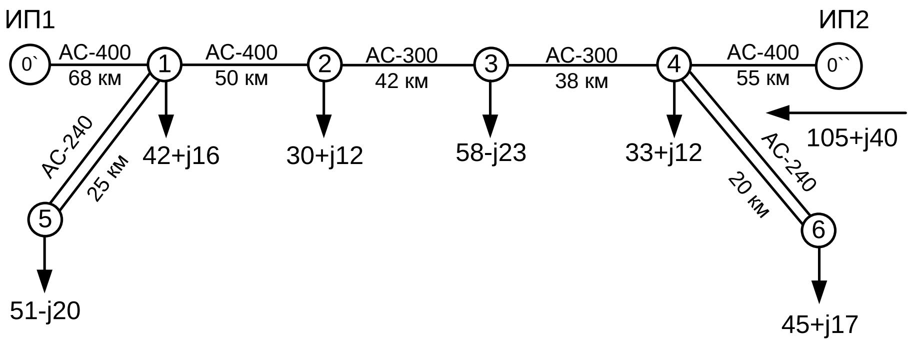
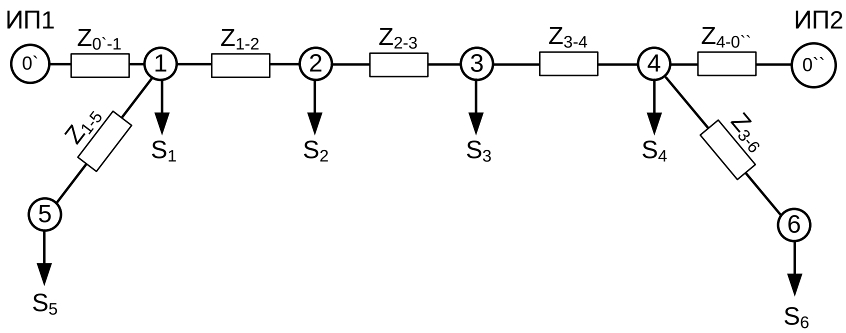


Схема замещения сети



где S_i – расчетные нагрузки узлов.

$\mathbf{U_{i1} := 227 \cdot e^{j \cdot deg \cdot 18}}$ **кВ**

Находим параметры схемы замещения по справочным данным.

$$r_{0\_240} := 0.13 \ \frac{Ом}{км} \quad x_{0\_240} := 0.422 \ \frac{Ом}{км}$$

$$r_{0\_300} := 0.105 \ \frac{Ом}{км} \quad x_{0\_300} := 0.414 \ \frac{Ом}{км}$$

$$r_{0\_400} := 0.078 \ \frac{Ом}{км} \quad x_{0\_400} := 0.406 \ \frac{Ом}{км}$$

Полные сопротивления участков сети равны:

$$Z_{01} := r_{0\_400} \cdot 68 + i \cdot x_{0\_400} \cdot 68 \qquad z_{0'1} = 5.304 + 27.618j \quad Ом$$

$$Z_{12} := r_{0\_400} \cdot 50 + i \cdot x_{0\_400} \cdot 50 \qquad z_{12} = 3.9 + 20.308j \quad Ом$$

$Z_{23} := r_{0\_300} \cdot 42 + i \cdot x_{0\_300} \cdot 42$ $\quad z_{23} = 4.41 + 17.402j$ Ом

$Z_{34} := r_{0\_300} \cdot 38 + i \cdot x_{0\_300} \cdot 38$ $\quad z_{34} = 3.99 + 15.745j$ Ом

$Z_{15} := \left(r_{0\_240} \cdot 25 + i \cdot x_{0\_240} \cdot 25\right) \cdot \frac{1}{2}$ $\quad z_{15} = 1.625 + 5.278j$ Ом

$Z_{46} := \left(r_{0\_240} \cdot 20 + i \cdot x_{0\_240} \cdot 20\right) \cdot \frac{1}{2}$ $\quad z_{46} = 1.3 + 4.223j$ Ом

$Z_{40''} := r_{0\_400} \cdot 55 + i \cdot x_{0\_400} \cdot 55$ $\quad z_{40''} = 4.29 + 22.338j$ Ом

Емкостные проводимости участков сети равны:

$b_{o0'1} = 2.805 \cdot 10^{-6}$ См

$b_{o15} = 5.388 \cdot 10^{-6}$ См

$b_{o12} = 2.805 \cdot 10^{-6}$ См

$b_{o46} = 5.388 \cdot 10^{-6}$ См

$b_{o23} = 2.748 \cdot 10^{-6}$ См

$b_{o40''} = 2.805 \cdot 10^{-6}$ См

$b_{o34} = 2.748 \cdot 10^{-6}$ См

Активные и индуктивные сопротивления в участках сети:

$R_{01} := 5.304$ Ом $\quad X_{01} := 27.608$ Ом

$R_{12} := 3.9$ Ом $\quad X_{12} := 20.3$ Ом

$R_{15} := 1.625$ Ом $\quad X_{15} := 5.275$ Ом

$R_{23} := 4.41$ Ом $\quad X_{23} := 17.388$ Ом

$R_{34} := 3.99$ Ом $\quad X_{34} := 15.732$ Ом

$R_{46} := 1.3$ Ом $\quad X_{46} := 4.22$ Ом

$R_{40''} := 2.625$ Ом $\quad X_{40''} := 22.33$ Ом

Находим зарядные мощности линий.

$$Q_{c0'1} := \frac{220^2 \cdot b_{o0'1} \cdot 68}{2} \qquad Q_{c0'1} = 4.616 \text{ Мвар}$$

$$Q_{c12} := \frac{220^2 \cdot b_{o12} \cdot 50}{2} \qquad Q_{c12} = 3.394 \text{ Мвар}$$

$$Q_{c23} := \frac{220^2 \cdot b_{o23} \cdot 42}{2} \qquad Q_{c23} = 2.793 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c34} := \frac{220^2 \cdot b_{o34} \cdot 38}{2} \qquad Q_{c34} = 2.527 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c46} := \frac{220^2 \cdot b_{o46} \cdot 20}{2} \qquad Q_{c46} = 2.608 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c15} := \frac{220^2 \cdot b_{o15} \cdot 25}{2} \qquad Q_{c15} = 3.26 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c40''} := \frac{220^2 \cdot b_{o40''} \cdot 55}{2} \qquad Q_{c40''} = 3.734 \quad \text{Мвар}$$

Находим расчетные мощности нагрузок узлов.

$$S_1 := 42 + j \cdot 16 - j \cdot Q_{c0'1} - j \cdot Q_{c12} - j \cdot Q_{c15} \qquad S_1 = 42 + 4.73j \quad \text{МВА}$$

$$S_2 := 30 + j \cdot 12 - j \cdot Q_{c12} - j \cdot Q_{c23} \qquad S_2 = 30 + 5.813j \quad \text{МВА}$$

$$S_3 := 58 + j \cdot 23 - j \cdot Q_{c23} - j \cdot Q_{c34} \qquad S_3 = 58 + 17.681j \quad \text{МВА}$$

$$S_4 := 33 + j \cdot 12 - j \cdot Q_{c34} - j \cdot Q_{c40''} - j \cdot Q_{c46} \qquad S_4 = 33 + 3.132j \quad \text{МВА}$$

$$S_5 := 51 + j \cdot 20 - j \cdot Q_{c15} \qquad S_5 = 51 + 16.74j \quad \text{МВА}$$

$$S_6 := 45 + j \cdot 17 - j \cdot Q_{c46} \qquad S_6 = 45 + 14.392j \quad \text{МВА}$$

Находим суммарные мощности в первом и четвертом узлах.

Потери мощности на участке 1-5.

$P_5 := 51$ МВт $\qquad Q_5 := 16.74$ Мвар

$P_6 := 45$ МВт $\qquad Q_6 := 14.392$ Мвар

$$dP_{15} := \frac{P_5^2 + Q_5^2}{220^2} \cdot R_{15} \qquad \delta P_{15} = 0.097 \quad \text{МВт}$$

$$dQ_{15} := \frac{P_5^2 + Q_5^2}{220^2} \cdot X_{15} \qquad \delta Q_{15} = 0.314 \quad \text{Мвар}$$

Суммарная мощность узла 1.

$$S_{1\Sigma} := S_1 + S_5 + \delta P_{15} + j \cdot \delta Q_{15} \qquad S_{1\Sigma} = 93.097 + 21.784j \quad \text{МВА}$$

Потери мощности на участке 4-6.

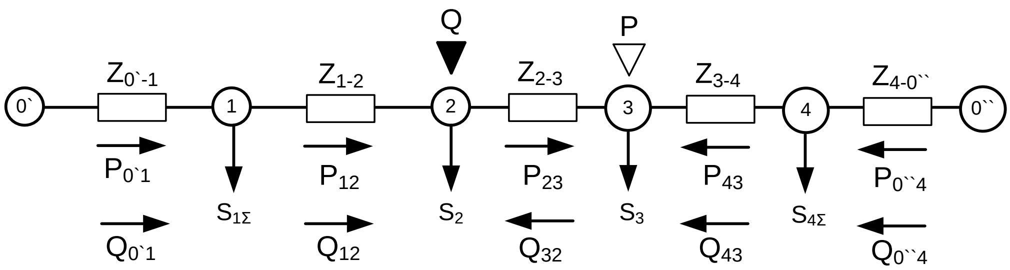
$$dP_{46} := \frac{P_6{}^2 + Q_6{}^2}{220^2} \cdot R_{46} \qquad \delta P_{46} = 0.06 \quad \textbf{МВт}$$

$$dQ_{46} := \frac{P_6{}^2 + Q_6{}^2}{220^2} \cdot X_{46} \qquad \delta Q_{46} = 0.195 \quad \textbf{Мвар}$$

Суммарная мощность узла 4.

$$S_{4\Sigma} := S_4 + S_6 + \delta P_{46} + j \cdot \delta Q_{46} \qquad S_{4\Sigma} = 78.06 + 17.719j \quad \textbf{МВА}$$

Находим мощности на головных участках, считая напряжения источников питания равными между собой.



$$z_{0'0''} := z_{0'1} + z_{12} + z_{23} + z_{34} + z_{40''}$$

$$z_{40'} := z_{34} + z_{23} + z_{12} + z_{0'1} \qquad z_{10''} := z_{12} + z_{23} + z_{34} + z_{40''}$$

$$z_{30'} := z_{23} + z_{12} + z_{0'1} \qquad z_{20''} := z_{23} + z_{34} + z_{40''}$$

$$z_{20'} := z_{12} + z_{0'1} \qquad z_{30''} := z_{34} + z_{40''}$$

$$z_{10'} := z_{0'1} \qquad z_{40''} := z_{40''}$$

$$S_{0'1} := \frac{S_{1\Sigma} \cdot \overline{z_{10''}} + S_2 \cdot \overline{z_{20''}} + S_3 \cdot \overline{z_{30''}} + S_{4\Sigma} \cdot \overline{z_{40''}}}{\overline{z_{0'0''}}}$$

$$S_{0'1} = 122.54 + 29.979j \quad \textbf{МВА}$$

$$S_{0''4} := \frac{S_{4\Sigma} \cdot \overline{z_{40'}} + S_3 \cdot \overline{z_{30'}} + S_2 \cdot \overline{z_{20'}} + S_{1\Sigma} \cdot \overline{z_{10'}}}{\overline{z_{0'0''}}}$$

$$S_{0''4} = 136.617 + 33.017j \quad \textbf{МВА}$$

Находим напряжение на втором источнике питания.

Определим уравнительную мощность.

$$S_{ur} := S_{0''4} - (105 + j\cdot 40) \qquad S_{ur} = 31.617 - 6.983j \quad \text{МВА}$$

Из выражения (3.11) находим напряжение второго источника питания.

$$U_{i2} := \frac{-1}{220}\cdot\left(S_{ur} - \frac{220}{\overline{z_{0'0''}}}\cdot\overline{U_{i1}}\right)\cdot\overline{z_{0'0''}} \qquad U_{i2} = 216.026 - 54.59j \quad \text{кВ}$$

$$\left|U_{i2}\right| = 222.816 \quad \text{кВ}$$

Находим фактические мощности на головных участках.

$$S_{0'1f} := S_{0'1} + S_{ur} \qquad S_{0'1f} = 154.157 + 22.996j \quad \text{МВА}$$

$$S_{0''4f} := S_{0''4} - S_{ur} \qquad S_{0''4f} = 105 + 40j \quad \text{МВА}$$

Находим точки потокораздела.

$$S_{12} := S_{0'1f} - S_{1\Sigma} \qquad S_{12} = 61.06 + 1.212j \quad \text{МВА}$$

$$S_{23} := S_{12} - S_{2} \qquad S_{23} = 31.06 - 4.601j \quad \text{МВА}$$

$$S_{34} := S_{23} - S_{3} \qquad S_{34} = -26.94 - 22.281j \quad \text{МВА}$$

$$S_{43} := S_{0''4f} - S_{4\Sigma} \qquad S_{43} = 26.94 + 22.281j \quad \text{МВА}$$

$$S_{32} := S_{43} - S_{3} \qquad S_{32} = -31.06 + 4.601j \quad \text{МВА}$$

Точки потокораздела: по активной мощности - узел 3, по реактивной мощности - узел 2.

Разрезаем сеть с двухсторонним питанием по точкам потокораздела 2 и 3.

Потери мощности на участке 2-3

$$P_{23} := 31.06 \quad \text{МВт} \qquad Q_{23} := 4.601 \quad \text{Мвар}$$

$$dP_{23} := \frac{P_{23}^{\,2} + Q_{23}^{\,2}}{220^2}\cdot R_{23} \qquad \delta P_{23} = 0.09 \quad \text{МВт}$$

$$dQ_{23} := \frac{P_{23}^{\,2} + Q_{23}^{\,2}}{220^2}\cdot X_{23} \qquad \delta Q_{23} = 0.354 \quad \text{Мвар}$$

Нагрузки конечных узлов разомкнутых сетей: 0'-1-2 и 0"-4-3.

$P_{12} := 61.06$ МВт $\quad Q_{12} := 1.212$ Мвар

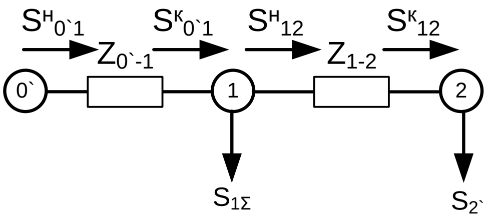
$P_{43} := 26.94$ МВт $\quad Q_{43} := 22.281$ Мвар

$\delta P_{23} := 0.09$ МВт $\quad \delta Q_{23} := 0.354$ Мвар

$S_{3'} := P_{43} + i\cdot\left(Q_{43} + \delta Q_{23}\right)$ $\qquad S_{3'} = 26.94 + 22.636j$ МВА

$S_{2'} := P_{12} + \delta P_{23} + i\cdot Q_{12}$ $\qquad S_{2'} = 61.15 + 1.212j$ МВА

Рассчитываем две разомкнутые сети.



Находим потоки мощности на всех участках схемы сети 0'-1-2.

$P_{2'} := 61.15$ МВт $\quad Q_{2'} := 1.212$ Мвар

$$\delta S_{12} := \frac{P_{2'}^{2} + Q_{2'}^{2}}{220^2}\cdot Z_{12} \qquad \delta S_{12} = 0.301 + 1.57j \text{ МВА}$$

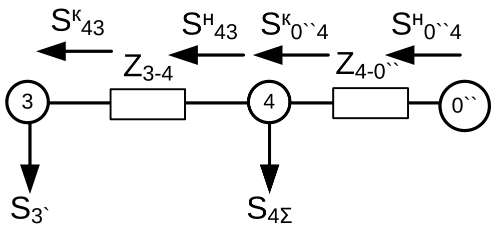
$S_{12n} := S_{2'} + \delta S_{12}$ $\qquad S_{12n} = 61.451 + 2.782j$ МВА

$S_{0'1k} := S_{12n} + S_{1\Sigma}$ $\qquad S_{0'1k} = 154.548 + 24.566j$ МВА

$$\delta S_{0'1} := \frac{P_{0'1k}^{2} + Q_{0'1k}^{2}}{220^2}\cdot Z_{01} \qquad \delta S_{0'1} = 2.684 + 13.974j \text{ МВА}$$

$S_{0'1n} := S_{0'1k} + \delta S_{0'1}$ $\qquad S_{0'1n} = 157.232 + 38.54j$ МВА

Находим потоки мощности в сети 3-4-0".



$\delta S_{43} := \dfrac{P_{3'}{}^2 + Q_{3'}{}^2}{220^2} \cdot Z_{34}$ $\qquad \delta S_{43} = 0.102 + 0.403j$ **МВА**

$S_{43n} := S_{3'} + \delta S_{43}$ $\qquad S_{43n} = 27.042 + 23.039j$ **МВА**

$S_{0''4k} := S_{43n} + S_{4\Sigma}$ $\qquad S_{0''4k} = 105.102 + 40.757j$ **МВА**

$P_{0''4k} := 105.102$ **МВт** $\qquad Q_{0''4k} := 40.757$ **Мвар**

$\delta S_{0''4} := \dfrac{P_{0''4k}{}^2 + Q_{0''4k}{}^2}{220^2} \cdot Z_{40''}$ $\qquad \delta S_{0''4} = 1.126 + 5.865j$ **МВА**

$S_{0''4n} := S_{0''4k} + \delta S_{0''4}$ $\qquad S_{0''4n} = 106.228 + 46.622j$ **МВА**

Рассчитываем напряжения в узлах схемы по известным напряжениям источников питания.

$P_{0'1n} := 157.232$ **МВт** $\qquad Q_{0'1n} := 38.54$ **Мвар**

$P_{12n} := 61.451$ **МВт** $\qquad Q_{12n} := 2.782$ **Мвар**

$P_{0''4n} := 106.228$ **МВт** $\qquad Q_{0''4n} := 46.622$ **Мвар**

$P_{43n} := 27.042$ **МВт** $\qquad Q_{43n} := 23.039$ **Мвар**

$$U_1 := U_{i1} - \left(\frac{P_{0'1n} \cdot R_{01} + Q_{0'1n} \cdot X_{01}}{\overline{U_{i1}}} + i \cdot \frac{P_{0'1n} \cdot X_{01} - Q_{0'1n} \cdot R_{01}}{\overline{U_{i1}}} \right)$$

$U_1 = 213.569 + 50.226j$ **кВ**

$$U_2 := U_1 - \left(\frac{P_{12n} \cdot R_{12} + Q_{12n} \cdot X_{12}}{\overline{U_1}} + i \cdot \frac{P_{12n} \cdot X_{12} - Q_{12n} \cdot R_{12}}{\overline{U_1}} \right)$$

$U_2 = 213.546 + 44.428j$ **кВ**

$$U_4 := U_{i2} - \left(\frac{P_{0''4n} \cdot R_{40''} + Q_{0''4n} \cdot X_{40''}}{\overline{U_{i2}}} + i \cdot \frac{P_{0''4n} \cdot X_{40''} - Q_{0''4n} \cdot R_{40''}}{\overline{U_{i2}}} \right)$$

$U_4 = 207.122 - 62.399j$ кВ

$$U_3 := U_4 - \left(\frac{P_{43n} \cdot R_{34} + Q_{43n} \cdot X_{34}}{\overline{U_4}} + i \cdot \frac{P_{43n} \cdot X_{34} - Q_{43n} \cdot R_{34}}{\overline{U_4}} \right)$$

$U_3 = 204.593 - 63.249j$ кВ

$S_{23n} := S_{23} + \delta P_{23}$ $\qquad$ $S_{23n} = 31.15 - 4.601j$ МВА

$P_{23n} := 31.15$ МВт $\qquad$ $Q_{23n} := 4.601$ Мвар

$$U_{3'} := U_2 - \left(\frac{P_{23n} \cdot R_{23} + Q_{23n} \cdot X_{23}}{\overline{U_2}} + i \cdot \frac{P_{23n} \cdot X_{23} - Q_{23n} \cdot R_{23}}{\overline{U_2}} \right)$$

$U_{3'} = 213.814 + 41.85j$ кВ

$$\varepsilon_3 := \frac{|U_3| - |U_{3'}|}{|U_3|} \cdot 100 \qquad \varepsilon_3 = -1.739 \ \%$$

Находим мощность и напряжения в 5 и 6 узлах.

$S_{15n} := S_{0'1k} - S_1 - S_{12n}$ $\qquad$ $S_{15n} = 51.097 + 17.054i$ МВА

$S_{46n} := S_{0''4k} - S_4 - S_{34n}$ $\qquad$ $S_{46n} = 45.06 + 14.586i$ МВА

$P_{15n} := 51.097$ МВт $\qquad$ $Q_{15n} := 17.054$ Мвар

$P_{46n} := 45.06$ МВт $\qquad$ $Q_{46n} := 14.586$ Мвар

$$U_5 := U_1 - \left(\frac{P_{15n} \cdot R_{15} + Q_{15n} \cdot X_{15}}{\overline{U_1}} + i \cdot \frac{P_{15n} \cdot X_{15} - Q_{15n} \cdot R_{15}}{\overline{U_1}} \right)$$

$U_5 = 213.112 + 48.726i$ кВ

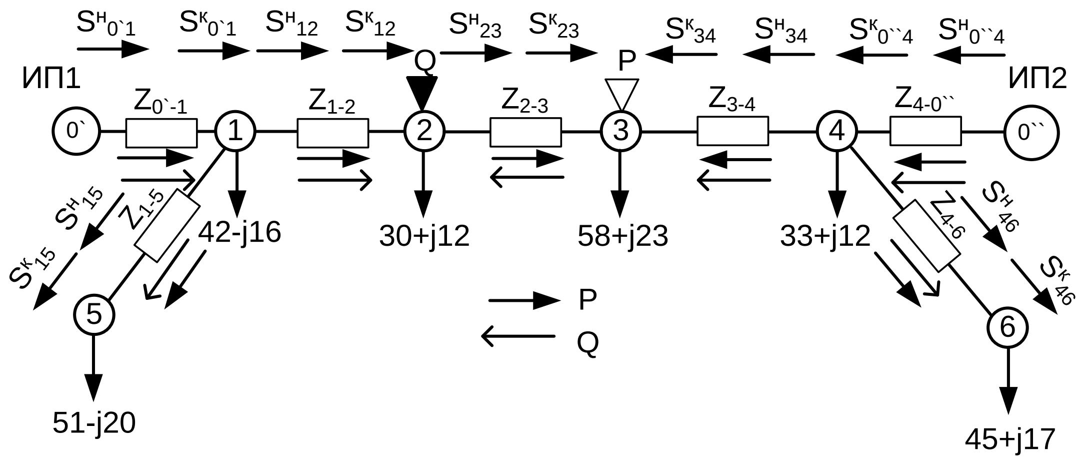
$$U_6 := U_4 - \left(\frac{P_{46n} \cdot R_{46} + Q_{46n} \cdot X_{46}}{\overline{U_4}} + i \cdot \frac{P_{46n} \cdot X_{46} - Q_{46n} \cdot R_{46}}{\overline{U_4}} \right)$$

$U_6 = 206.869 + 61.313i$ кВ

$$\varepsilon_5 := \frac{|U_5| - 220}{|U_5|} \cdot 100 \qquad \varepsilon_5 = -0.635 \quad \%$$

$$\varepsilon_6 := \frac{|U_6| - 220}{|U_6|} \cdot 100 \qquad \varepsilon_6 = -1.963 \quad \%$$

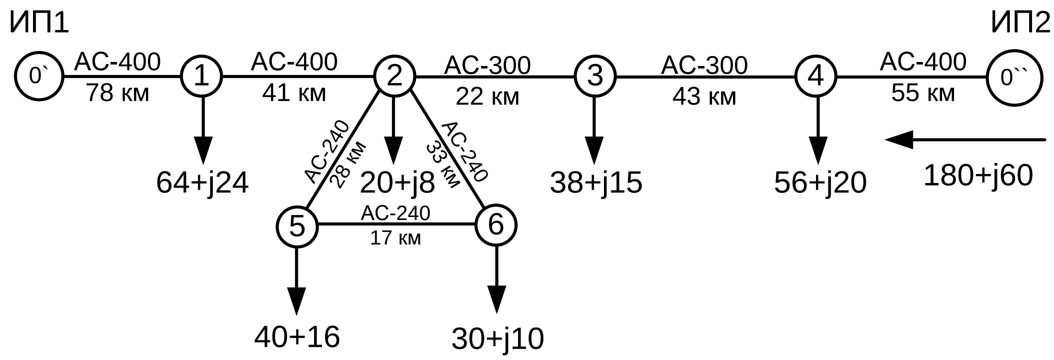
Распределение потоков мощности после расчета режима показано на рисунке ниже



Пример 3.5.

Рассчитать установившийся режим в сети с двухсторонним питанием. Исходные данные показаны на рисунке.

$\mathbf{U_{i2} := 240 \cdot e^{j \cdot deg \cdot 12}}$ **кВ**



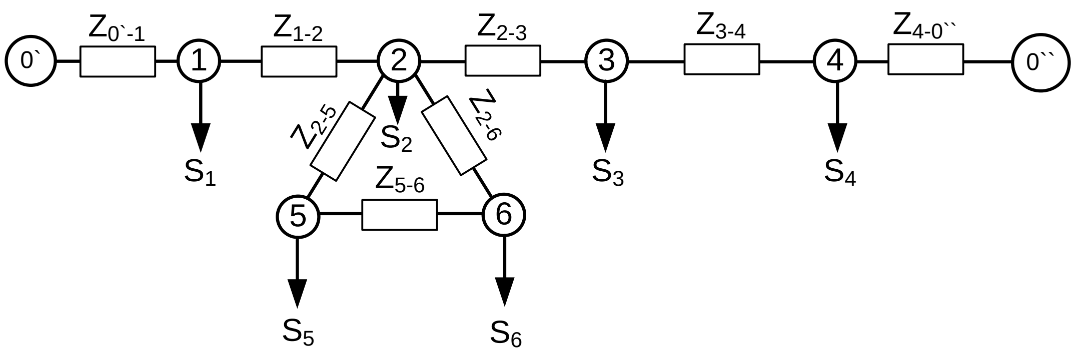
Составляем схему замещения с расчетными нагрузками узлов.

Параметры схемы замещения принимаем по примеру 3.4, т.к. они одинаковы.

Сопротивления участков сети равны:

$\mathbf{Z_{01} := 5.85 + j \cdot 32.76}$ **Ом** $\mathbf{Z_{40'} := 4.125 + j \cdot 23.1}$ **Ом**

$\mathbf{Z_{12} := 3.075 + j \cdot 17.22}$ **Ом** $\mathbf{Z_{25} := 3.388 + j \cdot 12.18}$ **Ом**



$\mathbf{Z_{23} := 2.156 + j \cdot 9.438}$ **Ом** $\mathbf{Z_{26} := 3.993 + j \cdot 14.355}$ **Ом**

$\mathbf{Z_{34} := 4.214 + j \cdot 18.447}$ **Ом** $\mathbf{Z_{56} := 2.057 + j \cdot 7.395}$ **Ом**

Зарядные мощности участков сети.

$\mathbf{Q_{c01} := 0.5 \cdot 220^2 \cdot 2.7 \cdot 10^{-6} \cdot 78}$ $\mathbf{Q_{c01} = 5.097}$ **Мвар**

$\mathbf{Q_{c12} := 0.5 \cdot 220^2 \cdot 2.7 \cdot 10^{-6} \cdot 41}$ $\mathbf{Q_{c12} = 2.679}$ **Мвар**

$\mathbf{Q_{c23} := 0.5 \cdot 220^2 \cdot 2.64 \cdot 10^{-6} \cdot 22}$ $\mathbf{Q_{c23} = 1.406}$ **Мвар**

$Q_{c34} := 0.5 \cdot 220^2 \cdot 2.64 \cdot 10^{-6} \cdot 43$ $\quad Q_{c34} = 2.747$ Мвар

$Q_{c40'} := 0.5 \cdot 220^2 \cdot 2.7 \cdot 10^{-6} \cdot 55$ $\quad Q_{c40'} = 3.594$ Мвар

$Q_{c25} := 0.5 \cdot 220^2 \cdot 2.6 \cdot 10^{-6} \cdot 28$ $\quad Q_{c25} = 1.762$ Мвар

$Q_{c26} := 0.5 \cdot 220^2 \cdot 2.6 \cdot 10^{-6} \cdot 33$ $\quad Q_{c26} = 2.076$ Мвар

$Q_{c56} := 0.5 \cdot 220^2 \cdot 2.6 \cdot 10^{-6} \cdot 17$ $\quad Q_{c56} = 1.07$ Мвар

Определяем расчетную нагрузку узлов.

$S_{1r} := 64 + j \cdot \left(24 - Q_{c01} - Q_{c12}\right)$ $\quad S_{1r} = 64 + 16.225j$ МВА

$S_{2r} := 20 + j \cdot \left(8 - Q_{c12} - Q_{c23} - Q_{c26} - Q_{c25}\right)$ $\quad S_{2r} = 20 + 0.077j$ МВА

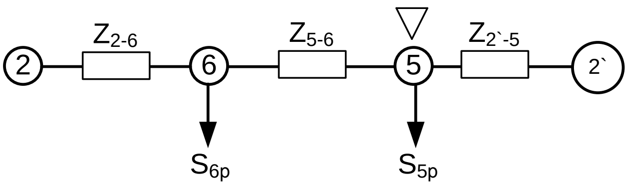
$S_{3r} := 38 + j \cdot \left(15 - Q_{c23} - Q_{c34}\right)$ $\quad S_{3r} = 38 + 10.847j$ МВА

$S_{4r} := 56 + j \cdot \left(20 - Q_{c34} - Q_{c40'}\right)$ $\quad S_{4r} = 56 + 13.659j$ МВА

$S_{5r} := 40 + j \cdot \left(16 - Q_{c25} - Q_{c56}\right)$ $\quad S_{5r} = 40 + 13.169j$ МВА

$S_{6r} := 30 + j \cdot \left(10 - Q_{c26} - Q_{c56}\right)$ $\quad S_{6r} = 30 + 6.854j$ МВА

Рассчитываем кольцо 2-6-5-2', разрезая его по узлу 2, принятому за источник питания.



Находим потоки мощностей на головных участках, принимая $Z_{2'5}=Z_{25}$

$$S_{26} := \frac{S_{6r} \cdot \left(\overline{Z_{56}} + \overline{Z_{25}}\right) + S_{5r} \cdot \left(\overline{Z_{25}}\right)}{\overline{Z_{26}} + \overline{Z_{25}} + \overline{Z_{56}}} \qquad S_{26} = 31.667 + 8.681j \text{ МВА}$$

$$S_{2'5} := \frac{S_{5r} \cdot \left(\overline{Z_{56}} + \overline{Z_{26}}\right) + S_{6r} \cdot \left(\overline{Z_{26}}\right)}{\overline{Z_{26}} + \overline{Z_{25}} + \overline{Z_{56}}} \qquad S_{2'5} = 38.333 + 11.341j \text{ МВА}$$

Потоки мощностей на остальных участках схемы.

$S_{65} := S_{26} - S_{6r}$ $\quad S_{65} = 1.667 + 1.827j$ МВА

$S_{52'} := S_{65} - S_{5r}$ $\quad S_{52'} = -38.333 - 11.341j$ МВА

Точка потокораздела - узел 5.

Разрезаем кольцо по точке потокораздела на две разомкнутые сети и рассчитываем в них потоки мощности.

$P_{2'5} := 38.333$ **МВт** $\qquad Q_{2'5} := 11.341$ **Мвар**

$$\Delta S_{2'5} := \frac{P_{2'5}^{2} + Q_{2'5}^{2}}{220^{2}} \cdot Z_{25} \qquad \Delta S_{2'5} = 0.112 + 0.402j \quad \text{МВА}$$

$$S_{2'5n} := S_{2'5} + \Delta S_{2'5} \qquad S_{2'5n} = 38.445 + 11.743j \quad \text{МВА}$$

$P_{65} := 1.667$ **МВт** $\qquad Q_{65} := 1.827$ **Мвар**

$$\Delta S_{65} := \frac{P_{65}^{2} + Q_{65}^{2}}{220^{2}} \cdot Z_{56} \qquad \Delta S_{65} = 2.6 \cdot 10^{-4} + 9.346j \cdot 10^{-4} \quad \text{МВА}$$

$$S_{65n} := S_{65} + \Delta S_{65} \qquad S_{65n} = 1.667 + 1.828j \quad \text{МВА}$$

$$S_{26k} := S_{65n} + S_{6r} \qquad S_{26k} = 31.667 + 8.682j \quad \text{МВА}$$

$P_{26} := 31.667$ **МВт** $\qquad Q_{26} := 8.681$ **Мвар**

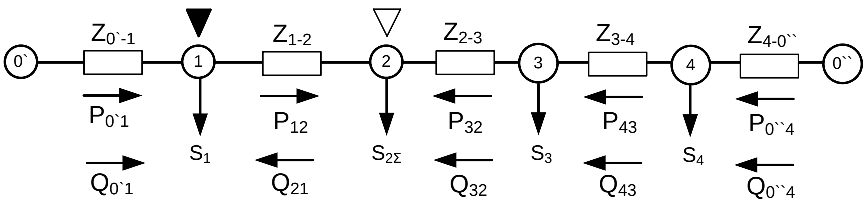
$$\Delta S_{26} := \frac{P_{26}^{2} + Q_{26}^{2}}{220^{2}} \cdot Z_{26} \qquad \Delta S_{26} = 0.089 + 0.32j \quad \text{МВА}$$

$$S_{26n} := S_{26k} + \Delta S_{26} \qquad S_{26n} = 31.756 + 9.002j \quad \text{МВА}$$

Находим суммарную мощность второго узла.

$$S'_{2} := S_{26n} + S_{2'5n} + S_{2r} \qquad S'_{2} = 90.201 + 20.823j \quad \text{МВА}$$

Рассчитываем магистраль с двухсторонним питанием.



Определяем потоки мощности на головных участках магистрали с двухсторонним питанием, считая напряжения ИП равными между собой.

$$S_{01gu} := \frac{S_{1r} \cdot \left(\overline{Z_{12}} + \overline{Z_{23}} + \overline{Z_{34}} + \overline{Z_{40'}}\right) + S'_{2} \cdot \left(\overline{Z_{23}} + \overline{Z_{34}} + \overline{Z_{40'}}\right) + S_{3r} \cdot \left(\overline{Z_{34}} + \overline{Z_{40'}}\right) + S_{4r} \cdot \left(\overline{Z_{40'}}\right)}{\overline{Z_{12}} + \overline{Z_{23}} + \overline{Z_{34}} + \overline{Z_{40'}} + \overline{Z_{01}}}$$

$$S_{01gu} = 117.19 + 29.928j \quad \text{МВА}$$

$$S_{0'4gu} := \frac{S_{4r} \cdot \left(\overline{Z_{12}} + \overline{Z_{23}} + \overline{Z_{34}} + \overline{Z_{01}}\right) + S_{3r} \cdot \left(\overline{Z_{23}} + \overline{Z_{12}} + \overline{Z_{01}}\right) + S'_{2} \cdot \left(\overline{Z_{01}} + \overline{Z_{12}}\right) + S_{1r} \cdot \left(\overline{Z_{01}}\right)}{\overline{Z_{12}} + \overline{Z_{23}} + \overline{Z_{34}} + \overline{Z_{40'}} + \overline{Z_{01}}}$$

$S_{0'4gu} = 131.011 + 31.626j$ **МВА**

Определяем уравнительную мощность и напряжение первого ИП.

$S_{ur} := 180 + j \cdot 60 - S_{0'4gu}$ $\qquad$ $S_{ur} = 48.989 + 28.374j$ **МВА**

$$U_{i1} := \overline{U_{i2}} - \frac{S_{ur} \cdot \overline{\left(Z_{12} + Z_{23} + Z_{34} + Z_{40'} + Z_{01}\right)}}{220}$$

$U_{i1} := \overline{U_{i1}}$ $\qquad$ $U_{i1} = 217.409 + 29.921j$ **кВ**

Определяем уточненные потоки мощности в сети с учетом уравнительной мощности.

$S_{01} := S_{01gu} - S_{ur}$ $\qquad$ $S_{01} = 68.201 + 1.554j$ **МВА**

$S_{43} := S_{0'4gu} + S_{ur} - S_{4r}$ $\qquad$ $S_{43} = 124 + 46.341j$ **МВА**

$S_{32} := S_{43} - S_{3r}$ $\qquad$ $S_{32} = 86 + 35.494j$ **МВА**

$S_{21} := S_{32} - S'_{2}$ $\qquad$ $S_{21} = -4.201 + 14.671j$ **МВА**

$S_{12} := S_{01} - S_{1r}$ $\qquad$ $S_{12} = 4.201 - 14.671j$ **МВА**

$S_{10} := S_{21} - S_{1r}$ $\qquad$ $S_{10} = -68.201 - 1.554j$ **МВА**

Находим точки потокораздела (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 потокораздела.

$P_{21} := 4.201$ **МВт** $\qquad$ $Q_{21} := 14.671$ **Мвар**

$$\Delta S_{12} := \frac{P_{21}^{2} + Q_{21}^{2}}{220^{2}} \cdot Z_{12} \qquad \Delta S_{12} = 0.015 + 0.083j \ \textbf{МВА}$$

Определяем нагрузки в конце каждой разомкнутой сети.

$P_{01} := 68.201$ **МВт** $\qquad$ $Q_{01} := 1.554$ **Мвар**

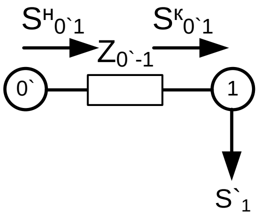
$P_{32} := 86$ **МВт** $\qquad$ $Q_{32} := 35.494$ **Мвар**

$\Delta P_{12} := 0.015$ **МВт** $\qquad$ $\Delta Q_{12} := 0.083$ **Мвар**

$S_{1'} := P_{01} + \Delta P_{12} + i \cdot Q_{01}$ $\qquad$ $S_{1'} = 68.216 + 1.554j$ **МВА**

$S_{2'} := P_{32} + i\cdot\left(Q_{32} + \Delta Q_{12}\right)$ $\qquad S_{2'} = 86 + 35.576j$ МВА

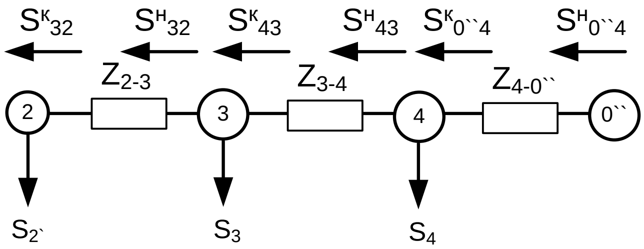
Определяем потоки мощности в разомкнутых сетях.



$P_{1'} := 68.216$ МВт $\qquad Q_{1'} := 1.554$ Мвар

$$\Delta S_{01} := \frac{P_{1'}^2 + Q_{1'}^2}{220^2}\cdot Z_{01} \qquad \Delta S_{01} = 0.563 + 3.151j \text{ МВА}$$

$S_{01n} := S_{1'} + \Delta S_{01}$ $\qquad S_{01n} = 68.779 + 4.705j$ МВА



$P_{2'} := 86$ МВт $\qquad Q_{2'} := 35.576$ Мвар

$$\Delta S_{32} := \frac{P_{2'}^2 + Q_{2'}^2}{220^2}\cdot Z_{23} \qquad \Delta S_{32} = 0.386 + 1.689j \text{ МВА}$$

$S_{32n} := S_{2'} + \Delta S_{32}$ $\qquad S_{32n} = 86.386 + 37.265j$ МВА

$S_{43k} := S_{32n} + S_{3r}$ $\qquad S_{43k} = 124.386 + 48.113j$ МВА

$P_{43k} := 124.386$ МВт $\qquad Q_{43k} := 48.113$ Мвар

$$\Delta S_{43} := \frac{P_{43k}^2 + Q_{43k}^2}{220^2}\cdot Z_{34} \qquad \Delta S_{43} = 1.549 + 6.779j \text{ МВА}$$

$S_{43n} := S_{43k} + \Delta S_{43}$ $\qquad S_{43n} = 125.934 + 54.892j$ МВА

$S_{0'4k} := S_{43n} + S_{4r}$ $\qquad S_{0'4k} = 181.934 + 68.551j$ МВА

$P_{0'4k} := 181.934$ МВт $\quad Q_{0'4k} := 68.551$ Мвар

$$\Delta S_{0'4} := \frac{P_{0'4k}^{\ 2} + Q_{0'4k}^{\ 2}}{220^2} \cdot Z_{40'}$$

$\Delta S_{0'4} = 3.222 + 18.041j$ МВА

$S_{0'4n} := S_{0'4k} + \Delta S_{0'4}$ $\quad S_{0'4n} = 185.156 + 86.592j$ МВА

$S_{12n} := S_{12} + \Delta P_{12}$ $\quad S_{12n} = 4.216 - 14.671i$ МВА

Рассчитываем напряжения в узлах.

$P_{01n} := 68.779$ МВт $\quad Q_{01n} := 4.705$ Мвар

$P_{0'4n} := 185.156$ МВт $\quad Q_{0'4n} := 86.592$ Мвар

$P_{43n} := 125.934$ МВт $\quad Q_{43n} := 54.892$ Мвар

$P_{32n} := 86.386$ МВт $\quad Q_{32n} := 37.265$ Мвар

$P_{12n} := 4.216$ МВт $\quad Q_{12n} := 14.671$ Мвар

$P_{26n} := 31.756$ МВт $\quad Q_{26n} := 9.002$ Мвар

$P_{65n} := 1.667$ МВт $\quad Q_{65n} := 1.828$ Мвар

$P_{2'5n} := 38.445$ МВт $\quad Q_{2'5n} := 11.743$ Мвар

$R_{01} := 5.85$ Ом $\quad R_{40'} := 4.125$ Ом

$R_{12} := 3.075$ Ом $\quad R_{25} := 3.388$ Ом

$R_{23} := 2.156$ Ом $\quad R_{26} := 3.993$ Ом

$R_{34} := 4.214$ Ом $\quad R_{56} := 2.057$ Ом

$X_{01} := 32.76$ Ом $\quad X_{40'} := 23.1$ Ом

$X_{12} := 17.22$ Ом $\quad X_{25} := 12.18$ Ом

$X_{23} := 9.438$ Ом $\quad X_{26} := 14.355$ Ом

$X_{34} := 18.447$ Ом $\quad X_{56} := 7.395$ Ом

$$\Delta U_{01} := \frac{P_{01n} \cdot R_{01} + Q_{01n} \cdot X_{01}}{\overline{U_{i1}}} + i \cdot \frac{P_{01n} \cdot X_{01} - Q_{01n} \cdot R_{01}}{\overline{U_{i1}}}$$

$\Delta U_{01} = 1.129 + 10.393j$ кВ

$U_1 := U_{i1} - \Delta U_{01}$ $\quad U_1 = 216.28 + 19.528j$ кВ

$$\Delta U_{04} := \frac{P_{0'4n} \cdot R_{40'} + Q_{0'4n} \cdot X_{40'}}{\overline{U_{i2}}} + i \cdot \frac{P_{0'4n} \cdot X_{40'} - Q_{0'4n} \cdot R_{40'}}{\overline{U_{i2}}}$$

$\Delta U_{0'4} = 7.869 + 18.371j$ кВ

$U_4 := U_{i2} - \Delta U_{0'4}$ $U_4 = 226.886 + 31.528j$ кВ

$$\Delta U_{43} := \frac{P_{43n} \cdot R_{34} + Q_{43n} \cdot X_{34}}{\overline{U_4}} + i \cdot \frac{P_{43n} \cdot X_{34} - Q_{43n} \cdot R_{34}}{\overline{U_4}}$$

$\Delta U_{43} = 5.416 + 9.972j$ кВ

$U_3 := U_4 - \Delta U_{43}$ $U_3 = 221.47 + 21.556j$ кВ

$$\Delta U_{32} := \frac{P_{32n} \cdot R_{23} + Q_{32n} \cdot X_{23}}{\overline{U_3}} + i \cdot \frac{P_{32n} \cdot X_{23} - Q_{32n} \cdot R_{23}}{\overline{U_3}}$$

$\Delta U_{32} = 2.086 + 3.522j$ кВ

$U_2 := U_3 - \Delta U_{32}$ $U_2 = 219.384 + 18.034j$ кВ

$$\Delta U_{12} := \frac{P_{12n} \cdot R_{12} + Q_{12n} \cdot X_{12}}{\overline{U_1}} + i \cdot \frac{P_{12n} \cdot X_{12} - Q_{12n} \cdot R_{12}}{\overline{U_1}}$$

$U_{2'} := U_1 - \Delta U_{12}$ $U_{2'} = 215.913 + 19.219j$ кВ

$\varepsilon_2 := \dfrac{\left|U_2\right| - \left|U_{2'}\right|}{\left|U_2\right|} \cdot 100$ $\varepsilon_2 = 1.525$ %

$$\Delta U_{26} := \frac{P_{26n} \cdot R_{26} + Q_{26n} \cdot X_{26}}{\overline{U_2}} + i \cdot \frac{P_{26n} \cdot X_{26} - Q_{26n} \cdot R_{26}}{\overline{U_2}}$$

$\Delta U_{26} = 1.003 + 1.996j$ кВ

$U_6 := U_2 - \Delta U_{26}$ $U_6 = 218.381 + 16.038j$ кВ

$$\Delta U_{56} := \frac{P_{65n} \cdot R_{56} + Q_{65n} \cdot X_{56}}{\overline{U_6}} + i \cdot \frac{P_{65n} \cdot X_{56} - Q_{65n} \cdot R_{56}}{\overline{U_6}}$$

$\Delta U_{56} = 0.074 + 0.045j$ кВ

$U_{5'} := U_6 - \Delta U_{56}$ $U_{5'} = 218.306 + 15.993j$ кВ

$$\Delta U_{2'5} := \frac{P_{2'5n} \cdot R_{26} + Q_{2'5n} \cdot X_{25}}{\overline{U_2}} + i \cdot \frac{P_{2'5n} \cdot X_{25} - Q_{2'5n} \cdot R_{25}}{\overline{U_2}}$$

$\Delta U_{2'5} = 1.078 + 2.042j$ кВ

$$U_{5''} := U_2 - \Delta U_{2'5} \qquad U_{5''} = 218.306 + 15.993j \quad \text{кВ}$$

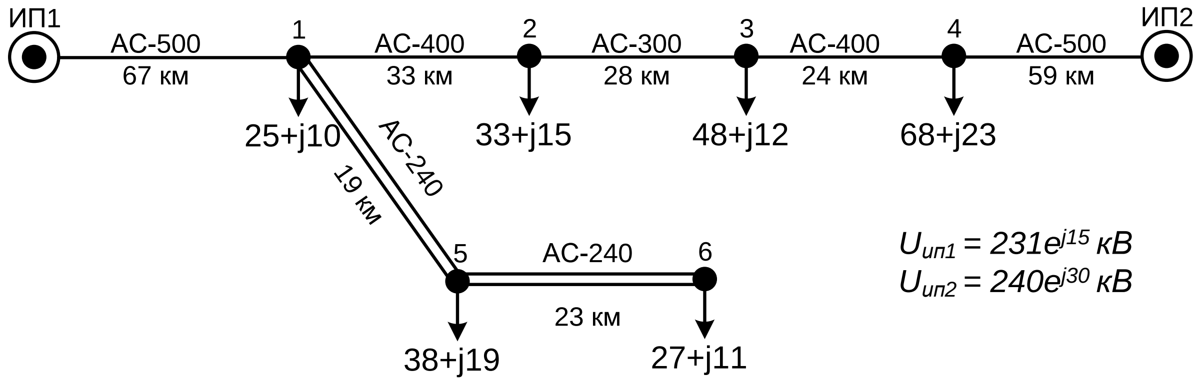
$$\frac{220 - \left| U_{5'} \right|}{220} \cdot 100 = 2.161 \quad \%$$

Так как напряжения в точке 5, рассчитанные с двух 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 2,16 %.

Задачи для самостоятельного решения

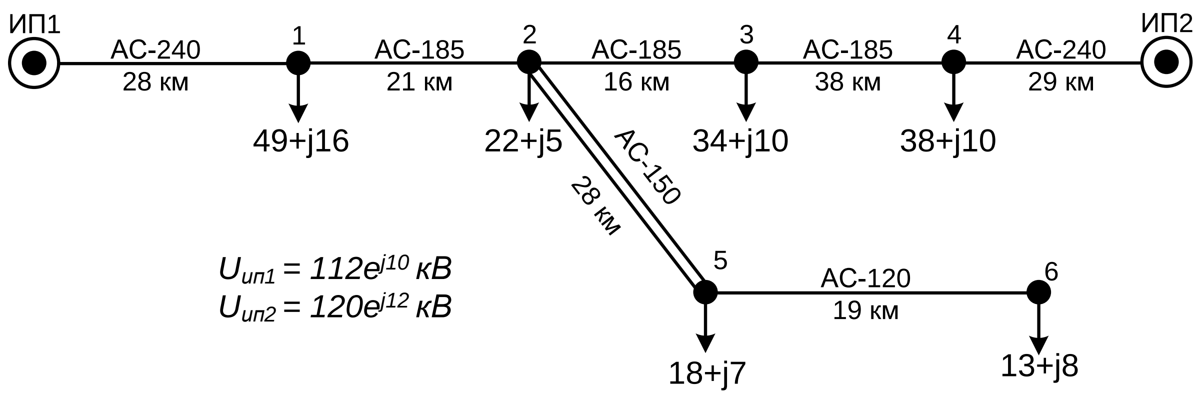
№1

Рассчитать установившийся режим в схеме, приведенной на рисунке. В узлах задана приведенная мощность в МВА.



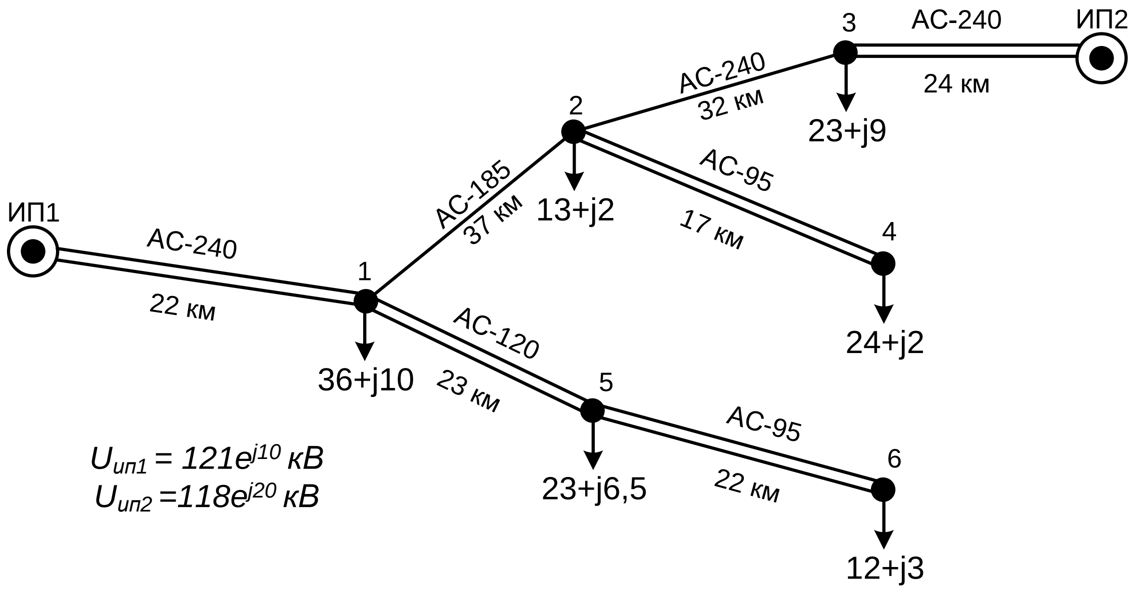
№ 2

Рассчитать потокораспределение мощности и напряжения в узлах сети. Нагрузки заданы в МВА.



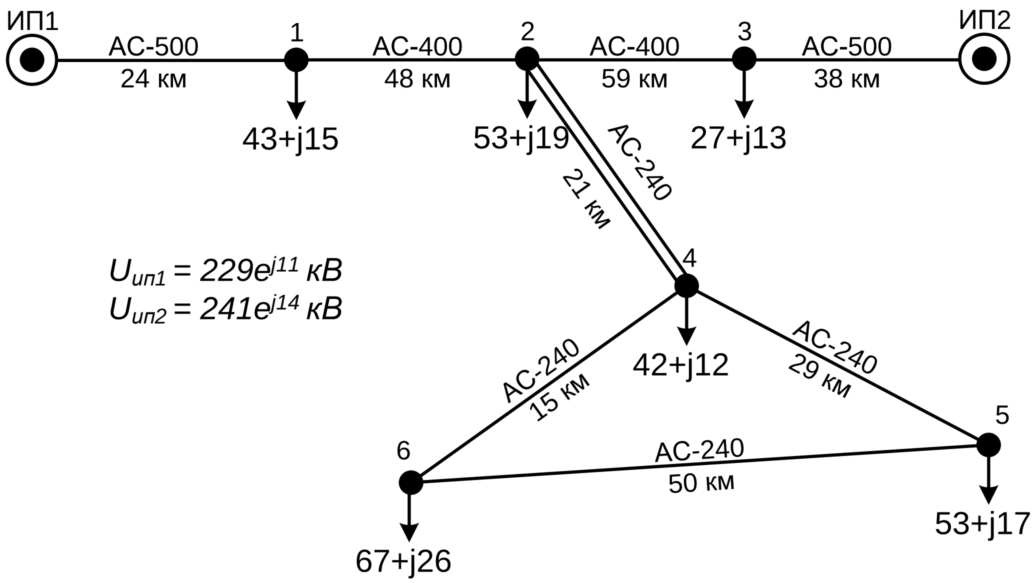
№3

Рассчитать установившийся режим в сети. В узлах заданы приведенные нагрузки в МВА.



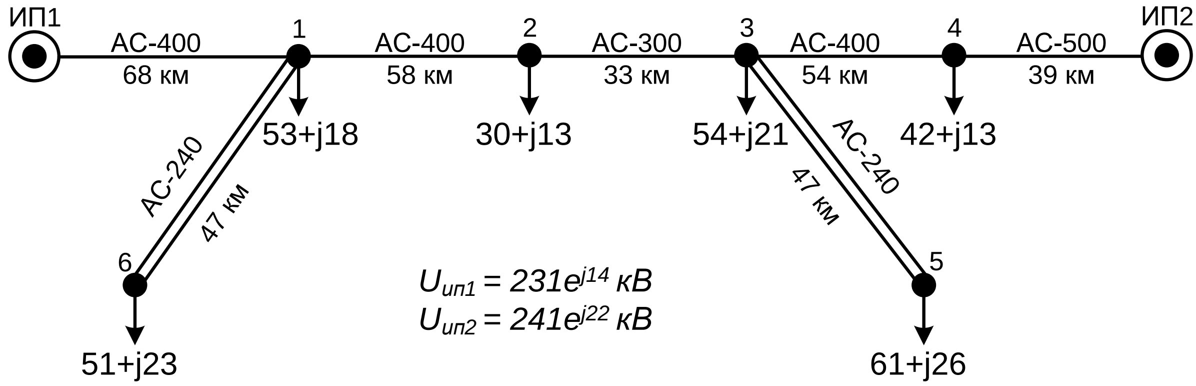
№4

Рассчитать установившийся режим в сети. В узлах заданы приведенные мощности нагрузок в МВА.



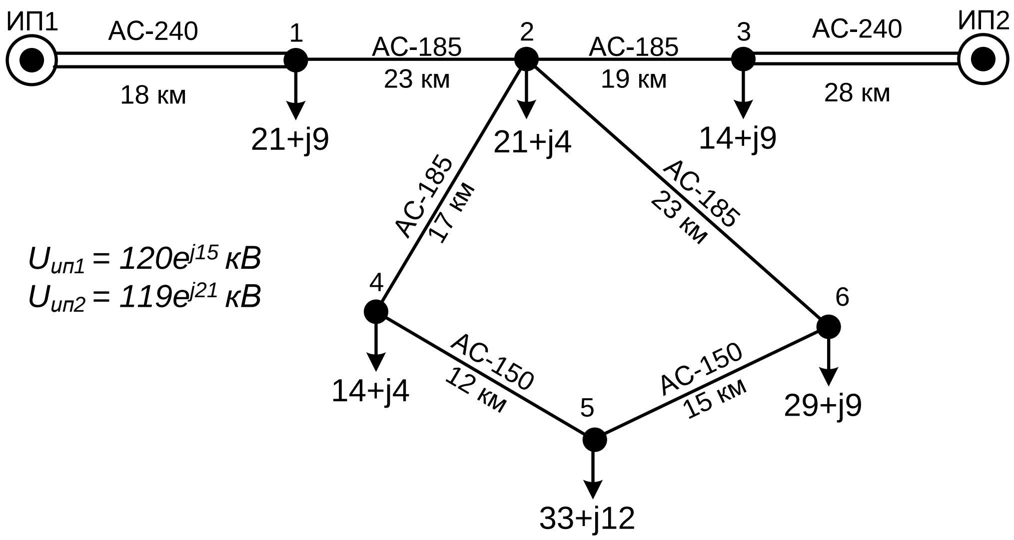
№5

Рассчитать установившийся режим сети, схема которой приведена на рисунке. Нагрузки заданы в МВА.



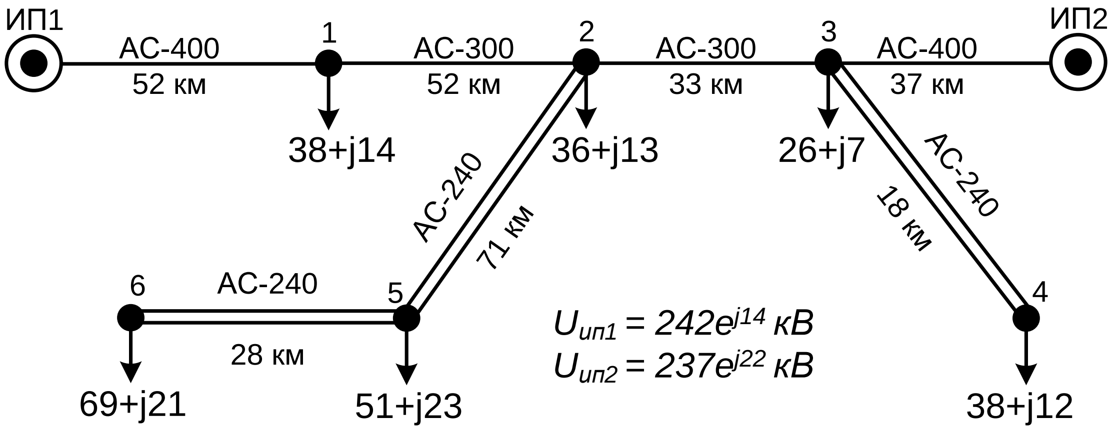
№6

Рассчитать установившийся режим сети. Нагрузки заданы в МВА.



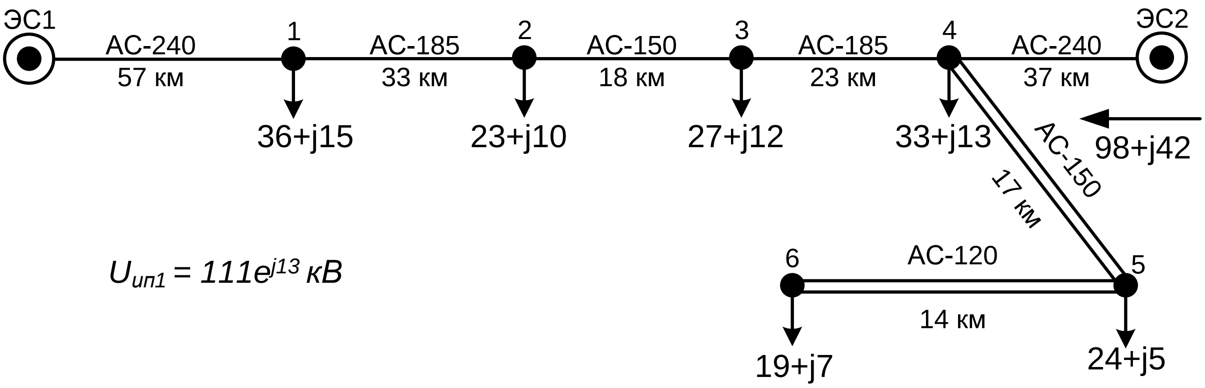
№7

Рассчитать установившийся режим сети. Нагрузки заданы в МВА.



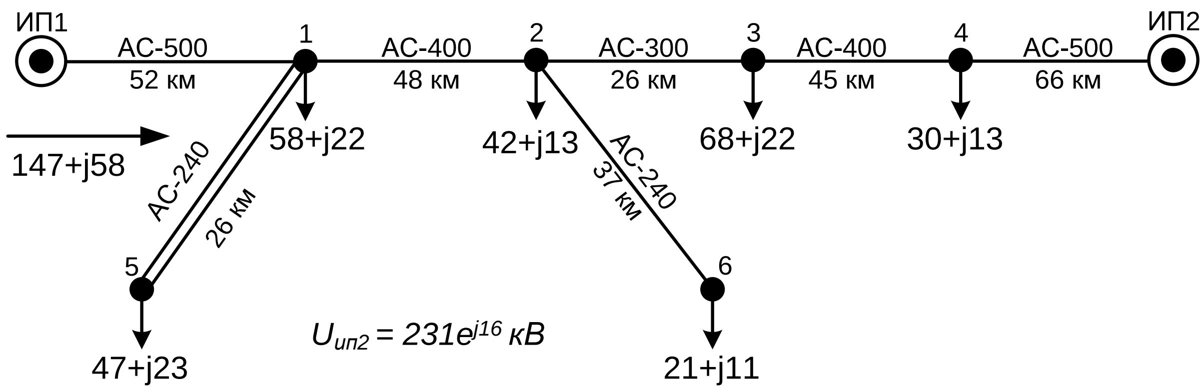
№8

Определить напряжение на шинах электростанции 2 и потоки мощности в сети. Нагрузки заданы в МВА.



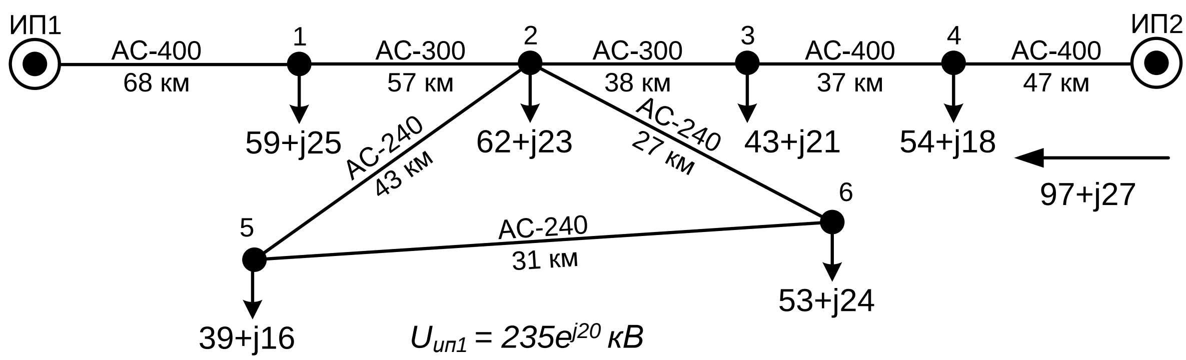
№9

Рассчитать потокораспределение мощности в сети и напряжение у первого ИП. Нагрузки заданы в МВА.



№10

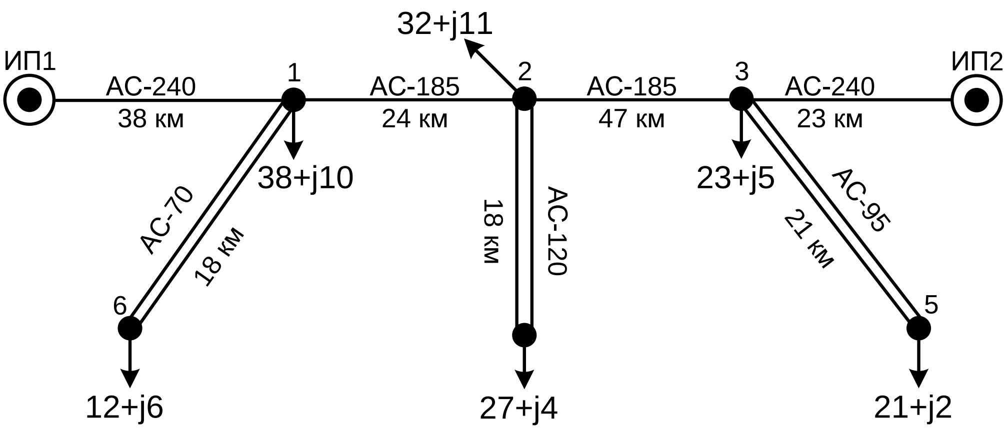
Рассчитать установившийся режим в сети и напряжение второго ИП. Нагрузки в узлах заданы в МВА.



№11

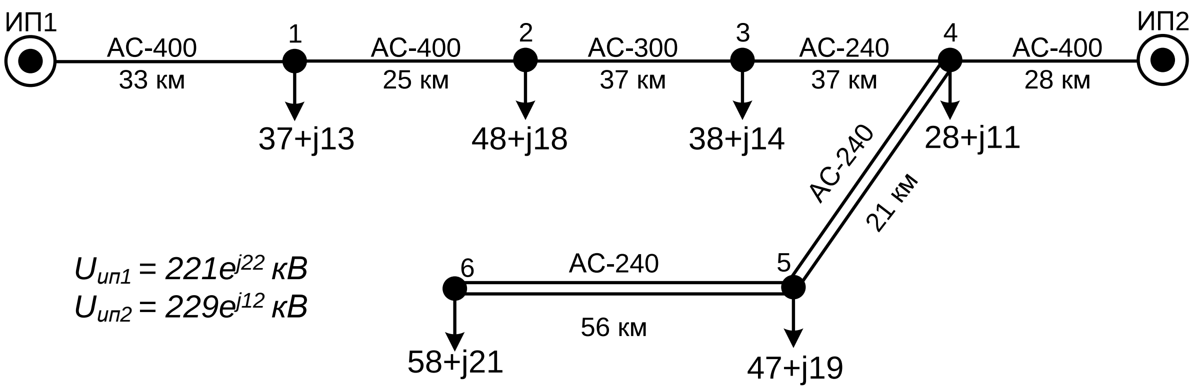
Рассчитать установившийся режим в сети. Нагрузки заданы в МВА.

$$U_{ип1} = 120e^{j12}\ кВ$$
$$U_{ип2} = 119e^{j12}\ кВ$$



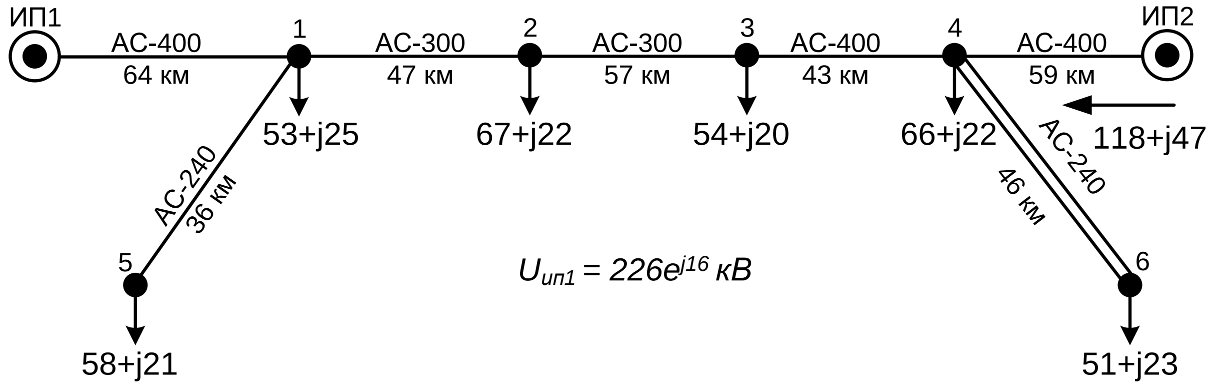
№12

Рассчитать установившийся режим в сети. Нагрузки заданы в МВА.



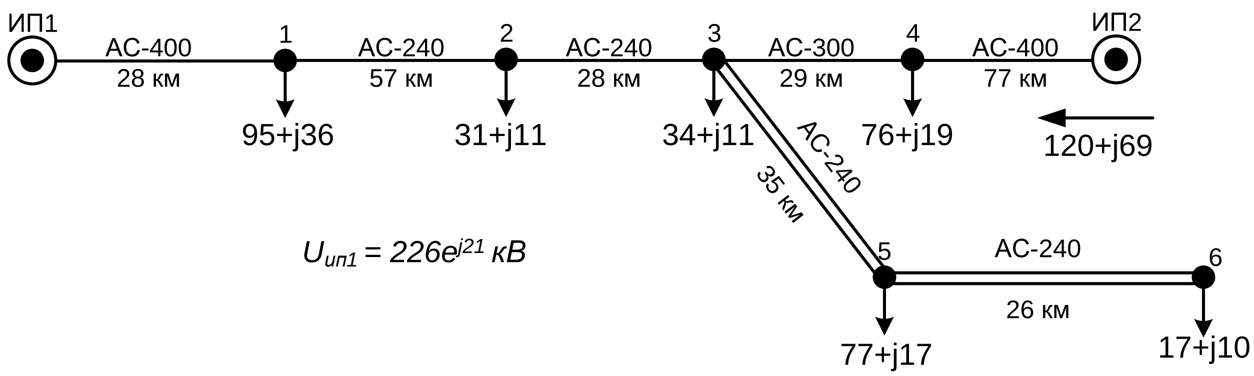
№ 13

Рассчитать установившийся режим в сети. Определить напряжение второго ИП. Нагрузки в узлах заданы в МВА.



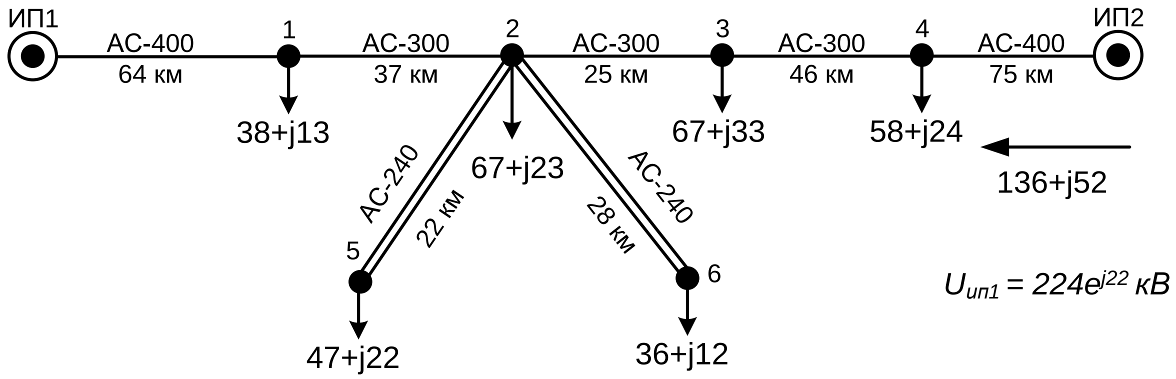
№ 14

Рассчитать установившийся режим в сети. Определить напряжение второго ИП. Нагрузки в узлах заданы в МВА.



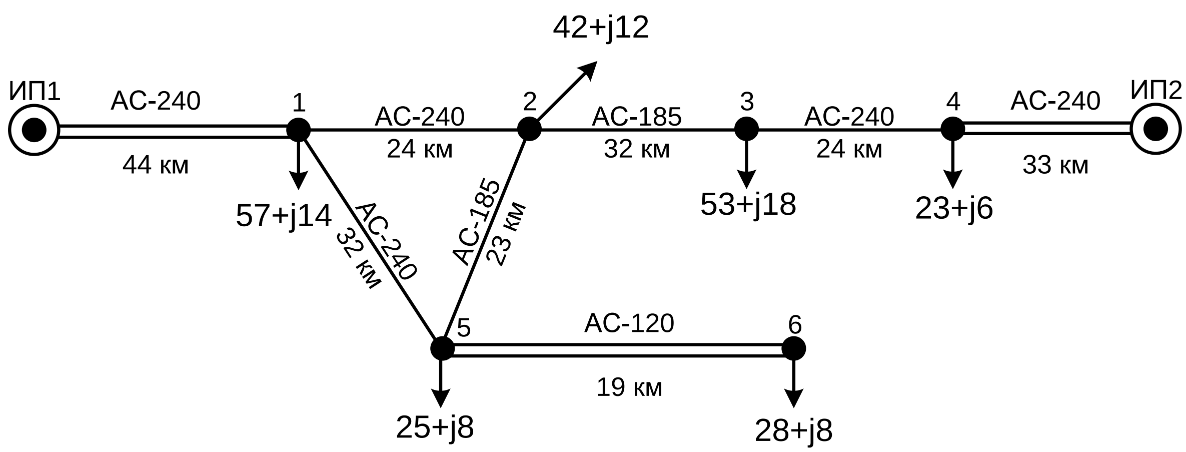
№15

Рассчитать установившийся режим в сети и определить напряжение второго ИП. Нагрузки в узлах заданы в МВА.



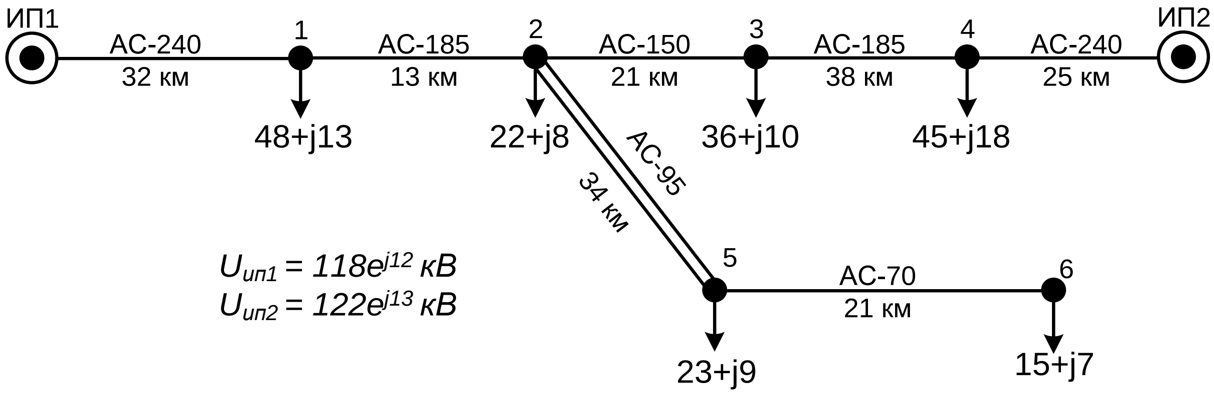
№16

Рассчитать установившийся режим в сети. Нагрузки заданы в МВА.



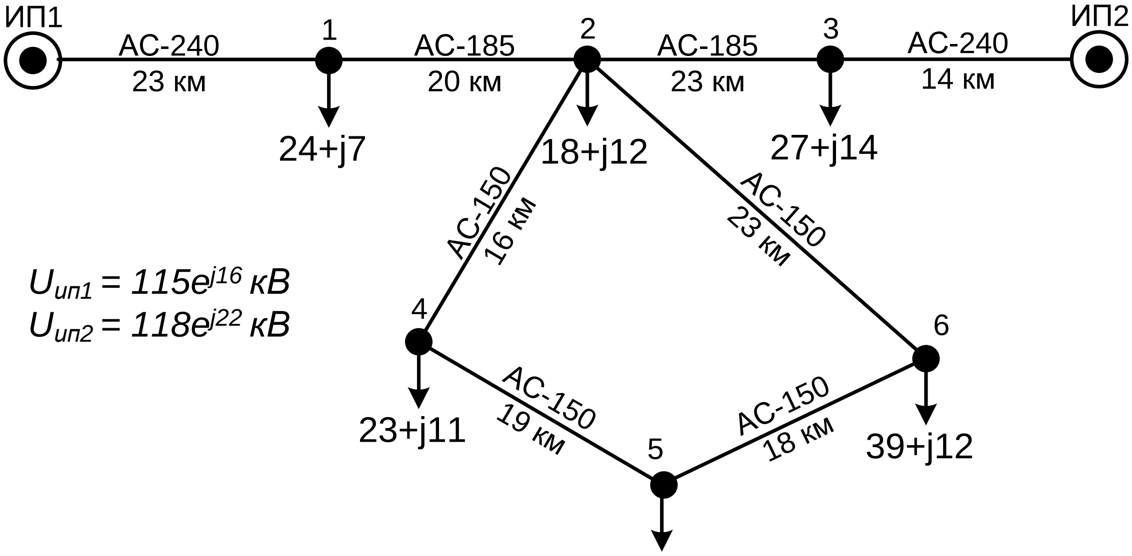
№ 17

Рассчитать установившийся режим в сети. Нагрузки заданы в МВА.



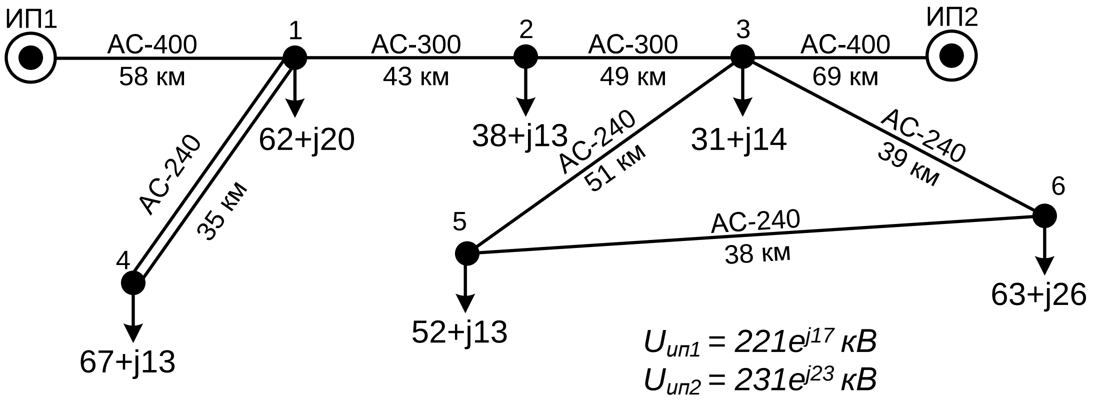
№18

Рассчитать установившийся режим сети. Нагрузки заданы в МВА.



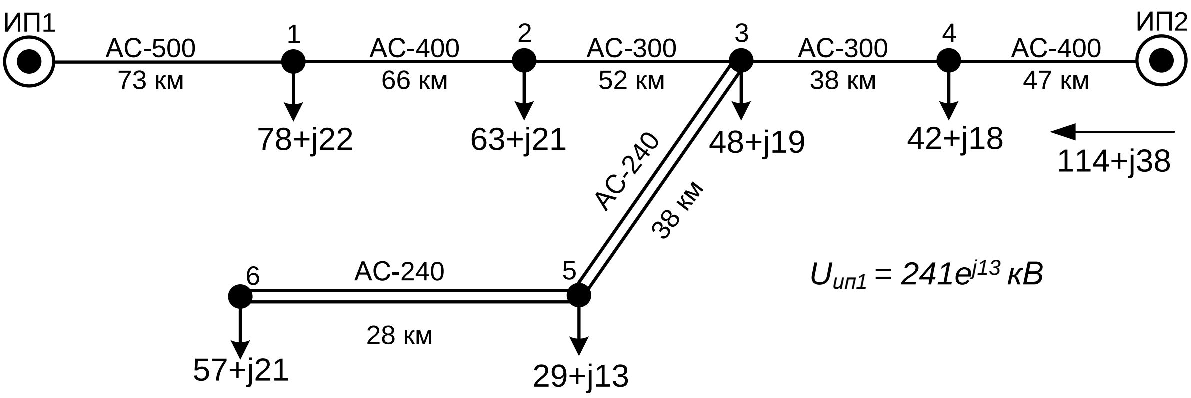
№ 19

Рассчитать установившийся режим в сети. Нагрузки заданы в МВА.



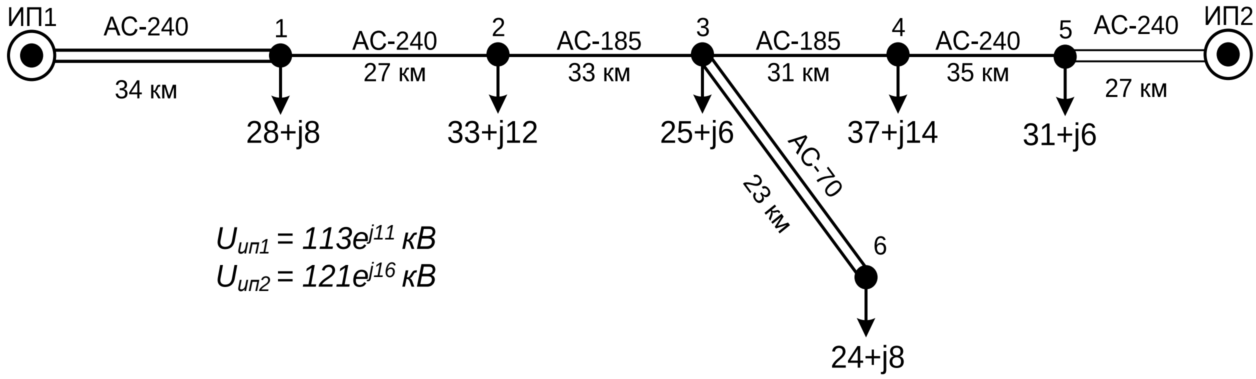
№20

Рассчитать установившийся режим в сети. Нагрузки заданы в МВА.



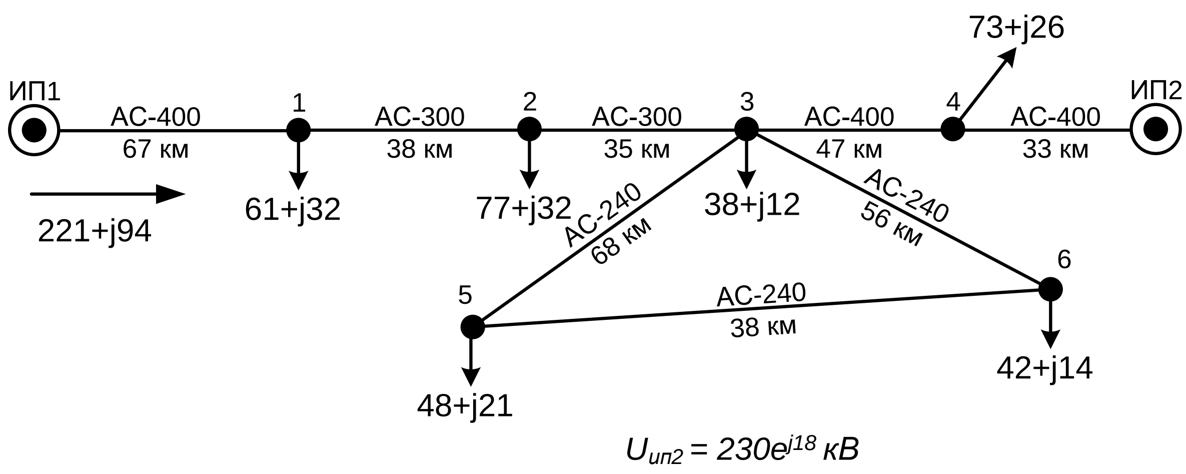
№21

Рассчитать установившийся режим в сети. Нагрузки заданы в МВА.



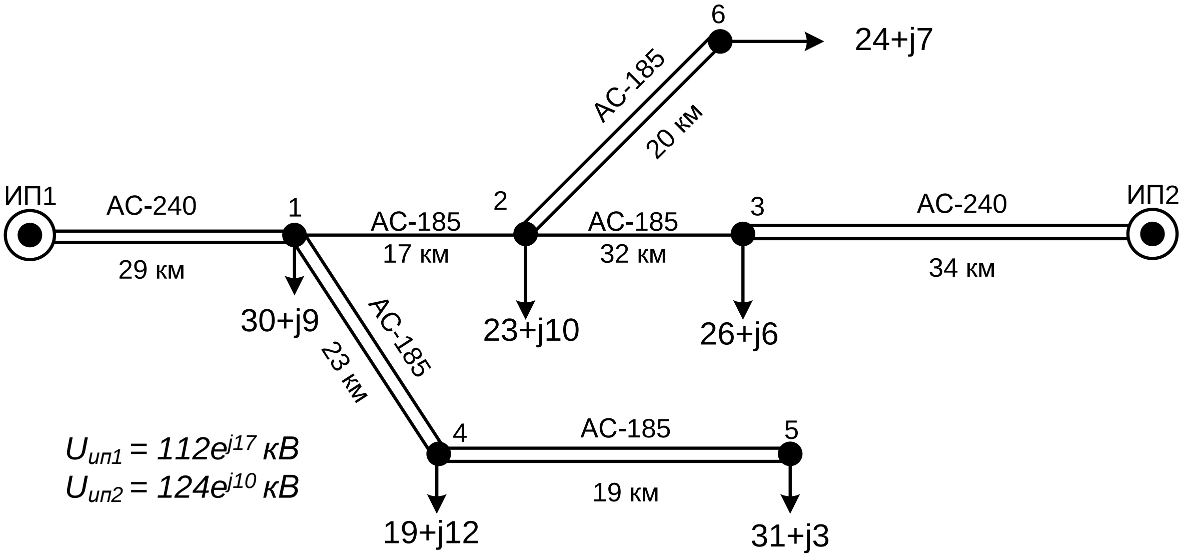
№ 22

Рассчитать установившийся режим в сети и напряжение первого ИП. Нагрузки заданы в МВА.



№ 23

Рассчитать установившийся режим в сети. Нагрузки заданы в МВА.



$U_{ип1} = 112e^{j17}$ кВ

$U_{ип2} = 124e^{j10}$ кВ

4. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ СЕТЕЙ С РАЗНЫМИ НОМИНАЛЬНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ. РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ

4.1. Определение напряжения на стороне низшего напряжения подстанций

Ранее мы рассматривали методы расчета установившихся режимов в сетях одного класса номинального напряжения. В условиях эксплуатации имеется необходимость оценивать режимную ситуацию в сетях нескольких классов номинального напряжения. Для этого нужно знать, как определять напряжение на стороне низкого напряжения (НН) подстанции при известном напряжении на стороне высокого напряжения (ВН). В этом случае в схему замещения силовых трансформаторов вводится идеальный трансформатор (см. рис. 4.1).

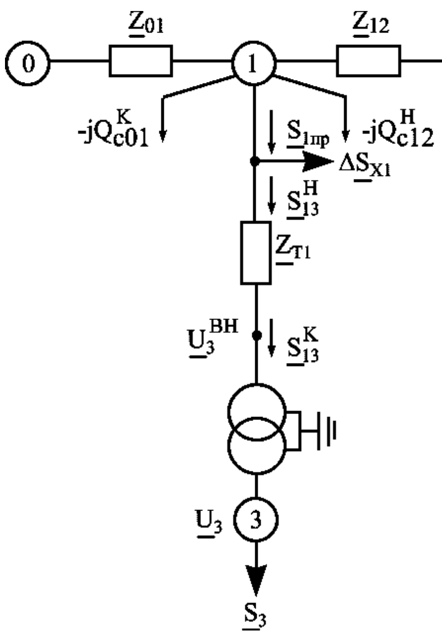


Рис. 4.1. Схема замещения силового трансформатора для определения напряжения на низкой стороне трансформатора

На рис. 4.1 силовой трансформатор представлен в виде двух элементов: первый – сопротивление трансформатора $\underline{Z}_{T1}$, второй – идеальный трансформатор. Идеальный трансформатор не имеет сопротивления, но обладает коэффициентом трансформации:

$$\kappa_T = \frac{U_{Вном}}{U_{Нном}}. \qquad (4.1)$$

Введем обозначения:

$\underline{U}_3^{ВН}$ - приведенное к стороне ВН напряжение на шинах НН;

$\underline{U}_3$ - действительное напряжение на шинах НН.

Расчет напряжения на шинах НН подстанции осуществляется в следующем порядке:

Определяется поток мощности, выходящий из обмотки НН силового трансформатора

$$\underline{S}_{13}^{К} = \underline{S}_3 \qquad (4.2)$$

где $\underline{S}_3$ - суммарная мощность нагрузки на шинах НН подстанции.

Определяется мощность, входящая в обмотку ВН силового трансформатора:

$$\underline{S}_{13}^{Н} = \underline{S}_{13}^{К} + \Delta\underline{S}_{T1}, \qquad (4.3)$$

По известным напряжению узла $\underline{U}_1$ и мощности $S_{13}^{Н}$ легко определить напряжение низкой стороны трансформатора, приведенное к высокой $\underline{U}_3^{ВН}$ в конце сопротивления $\underline{Z}_{T1}$:

$$\underline{U}_3^{ВН} = \underline{U}_1 - \frac{P_{13}^{Н} \cdot R_{T1} + Q_{13}^{Н} \cdot X_{T1}}{U_1^*} - j \cdot \frac{P_{13}^{Н} \cdot X_{T1} - Q_{13}^{Н} \cdot R_{T1}}{U_1^*}. \qquad (4.4)$$

Модуль и фаза этого напряжения равны

$$U_3^{ВН} = \sqrt{\left(U_1 - \frac{P_{13}^{Н} \cdot R_{T1} + Q_{13}^{Н} \cdot X_{T1}}{U_1}\right)^2 + \left(\frac{P_{13}^{Н} \cdot X_{T1} - Q_{13}^{Н} \cdot R_{T1}}{U_1}\right)^2}; \qquad (4.5)$$

$$tg\varphi = \frac{P_{13}^{Н} \cdot X_{T1} - Q_{13}^{Н} \cdot R_{T1}}{U_1 - \left(P_{13}^{Н} \cdot R_{T1} + Q_{13}^{Н} \cdot X_{T1}\right)}. \qquad (4.6)$$

Чтобы найти действительное напряжение на шинах НН подстанции, т.е. $\underline{U}_3$, надо $\underline{U}_3^{ВН}$ разделить на коэффициент трансформации κ_T:

$$U_3 = \frac{U_3^{ВН}}{k_T}. \qquad (4.7)$$

4.2. Порядок расчета сети с разными номинальными напряжениями

Рассмотрим последовательность расчета сети с разными номинальными напряжениями на примере сети с двумя номинальными напряжениями $\boldsymbol{U_{ВН}}$, $\boldsymbol{U_{СН}}$ (см. рис. 4.2). Здесь трехобмоточный трансформатор является трансформатором связи между сетями разного номинального напряжения.

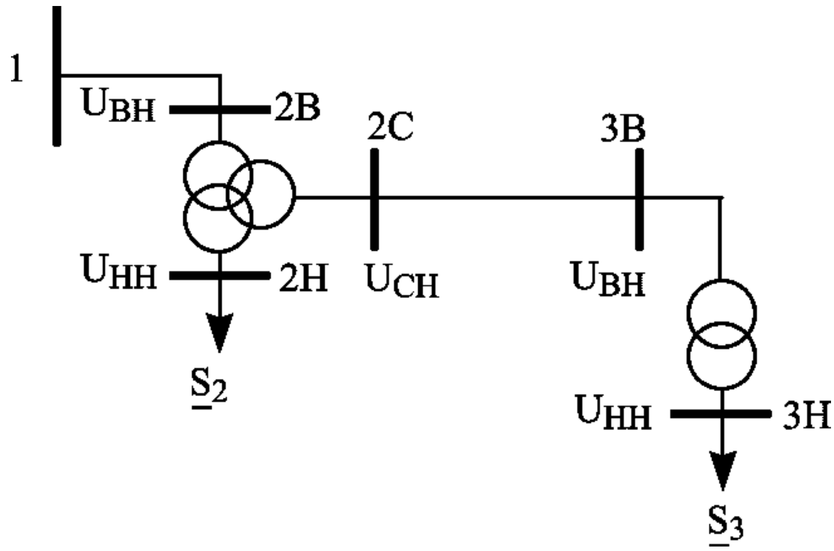
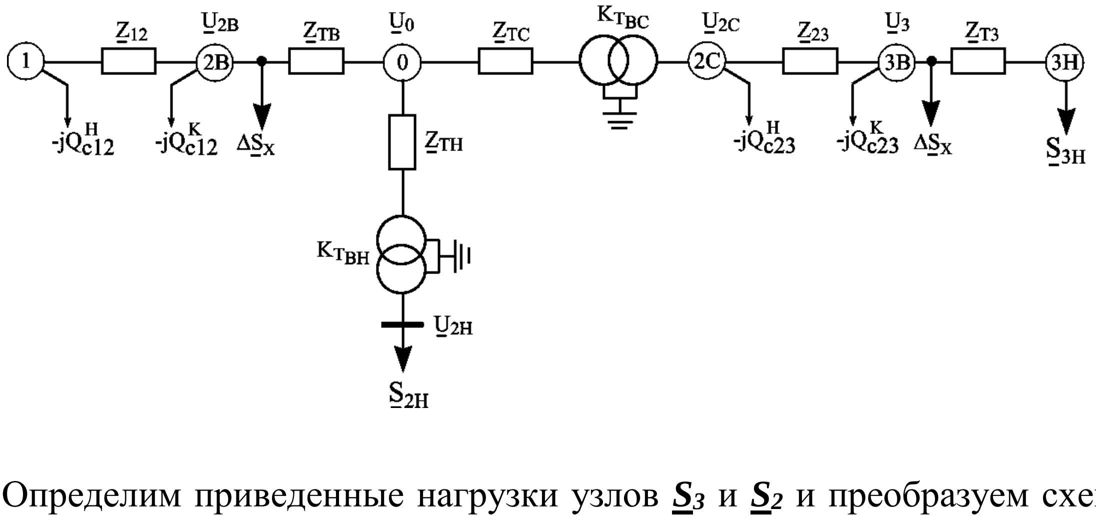


Рис. 4.2. Схема сети с двумя номинальными напряжениями

На рис. 4.3 показана схема замещения сети с идеальными трансформаторами.



Определим приведенные нагрузки узлов $\underline{\boldsymbol{S}}_3$ и $\underline{\boldsymbol{S}}_2$ и преобразуем схему замещения к виду, показанному на рис. 4.4.

На рис. 4.4 представлен один идеальный силовой трансформатор, соответствующий преобразованию напряжения от высокого к среднему.

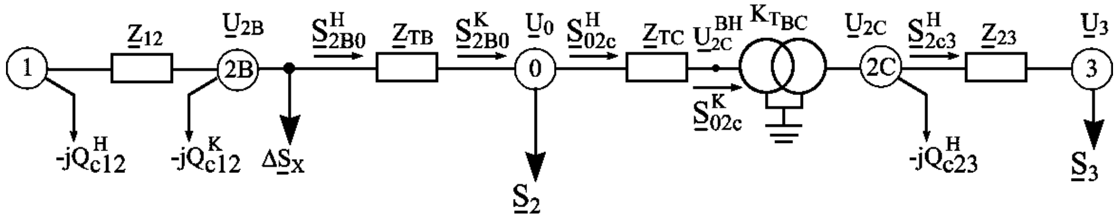


Рис. 4.4. Преобразованная схема замещения сети

Таким образом, в схеме, приведенной на рис. 4.4, показаны $\underline{Z}_{TC}$ – сопротивление обмотки СН трансформатора и идеальный силовой трансформатор, не имеющий сопротивления, но обладающий коэффициентом трансформации:

$$K_{TBC}=\frac{U_{BH}}{U_{CH}}. \qquad (4.8)$$

В узле 3 показана расчетная нагрузка.

Последовательность расчета режима сети и использованием алгоритма расчета установившихся режимов по данным начала

I этап

1. Определение потоков мощности с учетом потерь в сети СН. Необходимо отметить, что в этой сети потери мощности определяются по номинальному напряжению средней стороны трансформатора. Итогом выполнения этого пункта является определение суммарной мощности на шинах СН, $\boldsymbol{S_{2c}}$.

2. Определение потока мощности, входящего в обмотку СН:

$$\underline{S}^{K}_{02c}=\underline{S}_{2c} \qquad (4.9)$$

3. Определение потерь мощности в обмотке СН с использованием номинального напряжения высокой стороны

$$\Delta\underline{S}_{02c}=\frac{(P^{K}_{02c})^2+(Q^{K}_{02c})^2}{U^2_{BH}}\underline{Z}_{TC} \qquad (4.10)$$

4. Определение потока мощности, входящего в обмотку СН трансформатора

$$\underline{S}^{H}_{02c}=\underline{S}^{K}_{02c}+\Delta\underline{S}_{02c} \qquad (4.11)$$

5. Определение потока мощности, выходящего из обмотки ВН

$$\underline{S}^{K}_{2BO} = \underline{S}^{H}_{02c} + \underline{S}_{2} \qquad (4.11)$$

6. Далее определяются потери мощности в обмотке ВН

$$\Delta\underline{S}_{2B0} = \frac{(P^{K}_{2B0})^2 + (Q^{K}_{2B0})^2}{U^2_{BH}}\underline{Z}_{TB} \qquad (4.12)$$

7. Определяется поток мощности, входящий в обмотку ВН трансформатора

$$\underline{S}^{H}_{2B0} = \underline{S}^{K}_{2B0} + \Delta\underline{S}_{2B0} \qquad (4.13)$$

8. Определяется приведенная мощность силового трансформатора и осуществляется определение потоков мощности с учетом потерь в сети ВН – так же, как для сети с одним номинальным напряжением, вплоть до определения потоков мощности в началах головных участков сети ВН.

II этап

9. Определяются напряжения в узлах сети ВН по заданному напряжению источника питания и рассчитанным потокам мощности в начале каждого участка сети.

10. Определяется напряжение в нейтрали (нулевой точке) трансформатора U_0:

$$\underline{U}_{0} = \underline{U}_{2B} - \underline{U}_{\Delta 2B0}\ , \qquad (4.14)$$

где $\underline{U}_{\Delta 2B0}$ – падение напряжения в обмотке ВН трансформатора:

$$\underline{U}_{\Delta 2B0} = \frac{P^{H}_{2B0} \cdot R_{TB} + Q^{H}_{2B0} \cdot X_{TB}}{U_{2B}} + j\frac{P^{H}_{2B0} \cdot X_{TB} - Q^{H}_{2B0} \cdot R_{TB}}{U_{2B}}.$$

11. Затем рассчитывается напряжение средней стороны, приведенное к высокой стороне

$$\underline{U}^{BH}_{2C} = \underline{U}_{0} - \underline{U}_{\Delta 02C}\ , \qquad (4.15)$$

где $\underline{U}_{\Delta 02C}$ – падение напряжения в обмотке СН трансформатора.

$$\underline{U}_{\Delta 02C} = \frac{P^{H}_{02C} \cdot R_{TC} + Q^{H}_{02C} \cdot X_{TC}}{U_{0}} + j\frac{P^{H}_{02C} \cdot X_{TC} - Q^{H}_{02C} \cdot R_{TC}}{U_{0}}.$$

12. После этого находится действительное напряжение средней стороны силового трансформатора.

$$\boldsymbol{U}_{2C} = \frac{\boldsymbol{U}_{2C}^{BH}}{\boldsymbol{K}_{TBC}} = \boldsymbol{U}_{2C}^{BH} \cdot \frac{\boldsymbol{U}_{CH}}{\boldsymbol{U}_{BH}}. \qquad (4.16)$$

13. Затем рассчитываются напряжения в узлах сети среднего напряжения по значению $\underline{\boldsymbol{U}}_{2C}$ как напряжения источника питания.

Если в сети есть несколько различных трансформаторов связи, то коэффициенты трансформации учитываются аналогичным образом.

4.3. Выбор ответвлений РПН трансформаторов и линейных регуляторов

Под регулированием напряжения понимают принудительное изменение режима напряжения в сети и у электроприемников с целью обеспечить требования стандарта по качеству электроэнергии ГОСТ 32144-2013 или оптимальный режим по напряжению.

Рассмотрим алгоритм выбора номера ответвлений (отпаек) 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

$$\boldsymbol{U}_{HH}^{BH} = \boldsymbol{U}_{BH} - \Delta\boldsymbol{U}_{T}, \qquad (4.17)$$

где $\boldsymbol{U}_{BH}$ - фактическое напряжение на стороне ВН, полученное в результате расчета режима сети высокого напряжения;

$\Delta\boldsymbol{U}_{T}$ – модуль падения напряжения в силовом трансформаторе.

2. Определение желаемого коэффициента трансформации

$$K_{TBH}^{жел} = \frac{U_{HH}^{BH}}{U_{HH}^{жел}}, \qquad (4.18)$$

где $U_{HH}^{жел}$ - желаемое напряжение на стороне НН силового трансформатора.

3. Выбор желаемого номера отпайки РПН.

Условием выбора номера отпайки РПН является его попадание в диапазон регулирования напряжения, т.е.

$$-N \le n \le +N, \qquad (4.19)$$

где $\pm N$ - крайние номера отпаек РПН (даются в справочниках, – например, $\pm 9 \times 1{,}78\ \%$);

n - номер отпайки.

Шаг регулирования t задается в процентах, – например, 1,78%.

Диапазон регулирования напряжения равен:

$$\pm N \cdot t, \qquad (4.20)$$

например, ±16 %.

Желаемый номер отпайки определяется выражением

$$n_{жел} = \left(\frac{K_{TBH}^{жел}}{K_{TBH}^{ном}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{t_*} = \left(\frac{U_{HH}^{BH}}{U_{HH}^{жел} \cdot K_{TBH}^{ном}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{t_*}. \qquad (4.21)$$

Полученный номер отпайки округляется до ближайшего целого, $n_{станд}$.

По найденному $n_{станд}$ определяется фактическое напряжение низкой стороны $U_{HH}^{факт}$:

$$U_{HH}^{факт} = \frac{U_{HH}^{BH}}{K_{TBH}^{ном} \cdot \left(1 + n_{станд} \cdot t_*\right)}. \qquad (4.22)$$

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:

$$\boldsymbol{K_{TBH} = K_{TBH}^{ном} \cdot \left(1 + n_p \cdot t_{p_*}\right)}, \tag{4.23}$$

$$\boldsymbol{K_{TBC} = K_{TBC}^{ном} \cdot \frac{1 + n_p \cdot t_{p_*}}{1 + n_n \cdot t_{n_*}}}, \tag{4.24}$$

где $\boldsymbol{n_p, t_{p_*}}$ - номер отпайки и шаг регулирования устройства РПН в относительных единицах;

$\boldsymbol{n_n, t_{n_*}}$ - номер отпайки и шаг регулирования устройства ПБВ в относительных единицах.

Порядок выбора

Определяется напряжение низшей стороны трансформатора, приведенное к стороне высшего напряжения:

$$\boldsymbol{U_{HH}^{BH} = U_{BH} - \Delta U_{TB} - \Delta U_{TH}}, \tag{4.25}$$

где $\boldsymbol{U_{BH}}$ – фактическое напряжение высокой стороны трансформатора, полученное в результате расчета режима сети высшего напряжения;

$\boldsymbol{\Delta U_{TB}, \Delta U_{TH}}$ – соответственно модули падения напряжения в обмотке ВН и обмотке НН силового трансформатора.

Рассчитывается напряжение средней стороны трансформатора, приведенное к стороне высшего напряжения:

$$\boldsymbol{U_{CH}^{BH} = U_{BH} - \Delta U_{TB} - \Delta U_{TC}}, \tag{4.26}$$

где $\boldsymbol{\Delta U_{TC}}$ – модуль падения напряжения в обмотке СН трансформатора.

Определяются желаемые коэффициенты трансформации напряжения с высокой на низкую и с высокой на среднюю стороны трансформатора.

$$K_{ТВН}^{жел} = \frac{U_{НН}^{ВН}}{U_{НН}^{жел}}; \qquad K_{ТВС}^{жел} = \frac{U_{СН}^{ВН}}{U_{СН}^{жел}}, \tag{4.27}$$

где $U_{НН}^{жел}$, $U_{СН}^{жел}$ – соответственно желаемые напряжения низкой и средней сторон трансформатора.

Выбирается номер отпайки РПН, $n_p^{жел}$, со стороны высшего напряжения, обеспечивающий желаемое напряжение на шинах НН (трансформатор рассматривается как двухобмоточный с обмотками высшего и низшего напряжения):

$$n_p^{жел} = \left(\frac{K_{ТВН}^{жел}}{K_{ТВН}^{ном}} - 1\right) \cdot \frac{1}{t_{p_*}} = \left(\frac{U_{НН}^{ВН}}{U_{НН}^{жел} \cdot K_{ТВН}^{ном}} - 1\right) \cdot \frac{1}{t_{p_*}}. \tag{4.28}$$

Полученный номер округляется до ближайшего целого $n_p^{станд}$.

Выбирается номер ответвления ПБВ, $n_п^{жел}$, со стороны среднего напряжения, обеспечивающий желаемое напряжение на средней стороне трансформатора:

$$\begin{aligned} n_п^{жел} &= \left(\frac{K_{ТВС}^{ном} \cdot \left(1 + n_p^{станд} \cdot t_{p_*}\right)}{K_{ТВС}^{жел}} - 1\right) \cdot \frac{1}{t_{п_*}} = \\ &= \left(\frac{K_{ТВС}^{ном} \cdot \left(1 + n_p^{станд} \cdot t_{p_*}\right) \cdot U_{СН}^{жел}}{U_{СН}^{ВН}} - 1\right) \cdot \frac{1}{t_{п_*}}. \end{aligned} \tag{4.29}$$

Полученный номер округляется до ближайшего целого $n_п^{станд}$.

Рассчитываются действительные значения напряжения на шинах низшего и среднего напряжения:

$$U_{НН}^{факт} = \frac{U_{НН}^{ВН}}{K_{ТВН}^{ном} \cdot (1 + n_p^{станд} \cdot t_{p_*})}, \tag{4.30}$$

$$U_{СН}^{факт} = \frac{U_{СН}^{ВН} \cdot (1 + n_п^{станд} \cdot t_{п_*})}{K_{ТВС}^{ном} \cdot (1 + n_p^{станд} \cdot t_{p_*})}. \tag{4.31}$$

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:

$$n_{ЛР}^{жел}=\left(\frac{U_{СН}^{жел}-U_{СН}^{факт}}{U_{ЛР}^{ном}}\right)\frac{1}{t_{ЛР_*}},\qquad(4.32)$$

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:

$$U_{СН}^{действ}=U_{СН}^{факт}+n_{ЛР}^{станд}\cdot t_{ЛР_*}\cdot U_{ЛР}^{ном},\qquad(4.33)$$

где $U_{СН}^{факт}$ - определяется по выражению (4.31);

Автотрансформаторы

Автотрансформаторы могут иметь устройство регулирования напряжения под нагрузкой в нейтрали или со стороны среднего либо со стороны высшего напряжения. 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.

Номинальные коэффициенты автотрансформатора равны:

$$K_{ВС}^{ном}=\frac{U_{ВН}^{ном}}{U_{СН}^{ном}};\qquad K_{ВН}^{ном}=\frac{U_{ВН}^{ном}}{U_{НН}^{ном}}=const,\qquad(4.34)$$

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:

$$K_{ВС}^{факт} = \frac{U_{ВН}^{ном}}{U_{СН}^{ном} \cdot \left(1 + n_p \cdot t_{p*}\right)} = \frac{K_{ВС}^{ном}}{1 + n_p \cdot t_{p*}}. \qquad (4.35)$$

Номер отпайки РПН автотрансформатора выбирается с целью обеспечения желаемого напряжения средней стороны автотрансформатора по следующему алгоритму:

определяются напряжения низкой и средней сторон, приведенные к высшей стороне автотрансформатора, по выражениям (4.25), (4.26);

выбирается желаемый номер отпайки РПН:

$$n_{жел} = \left(\frac{K_{ВС}^{ном}}{K_{ВС}^{жел}} - 1\right) \cdot \frac{1}{t_{p*}} = \left(\frac{K_{ВС}^{ном} \cdot U_{СН}^{жел}}{U_{СН}^{ВН}} - 1\right) \cdot \frac{1}{t_{p*}}; \qquad (4.36)$$

номер отпайки РПН округляется до ближайшего целого, $n_{станд}$;

определяются действительные уровни напряжения средней и низшей сторон автотрансформатора:

$$U_{СН}^{факт} = \frac{U_{СН}^{ВН}}{K_{ВС}^{факт}} = \frac{U_{СН}^{ВН} \cdot \left(1 + n_{станд} \cdot t_{p*}\right)}{K_{ВС}^{ном}}; \qquad (4.37)$$

$$U_{НН}^{факт} = \frac{U_{НН}^{ВН}}{K_{ВН}^{ном}}. \qquad (4.38)$$

Если действительное значение напряжения не удовлетворяет желаемому, то со стороны низшего напряжения автотрансформатора устанавливается линейный регулятор (рис. 4.5), номер ответвления которого определяется по формуле:

$$n_{ЛР} = \left(\frac{U_{НН}^{жел}}{U_{НН}^{факт}} - 1 \right) \frac{1}{t_{ЛР_*}} \tag{4.39}$$

и округляется до ближайшего целого, $n_{ЛР}^{станд}$.

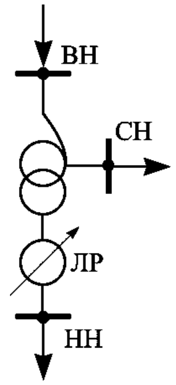


Рис. 4.5. Установка линейного регулятора со стороны НН автотрансформатора

Определяется действительное напряжение на шинах НН равно:

$$U_{НН}^{факт} = U_{НН}^{расч} + n_{ЛР}^{станд} \cdot U_{ЛР}^{ном} \cdot t_{ЛР_*}, \tag{4.40}$$

где

$$U_{НН}^{расч} = \frac{U_{НН}^{ВН}}{K_{ВН}^{ном}}. \tag{4.41}$$

Устройство РПН установлено в обмотке СН автотрансформатора, линейный регулятор – в нейтрали обмотки ВН автотрансформатора.

Желаемый номер ответвления линейного регулятора равен:

$$n_{ЛР}^{жел} = \left(\frac{K_{ВН}^{жел}}{K_{ВН}^{ном}} - 1 \right) \frac{1}{t_{ЛР_*}}. \tag{4.42}$$

Округляем расчетное значение до ближайшего целого, $n_{ЛР}^{станд}$, и определяем фактическое напряжение низкой стороны

$$U_{НН}^{факт} = \frac{U_{НН}^{ВН}}{K_{ВН}^{ном}\left(1 + n_{ЛР} \cdot t_{ЛР_*}\right)} = \frac{U_{НН}^{ВН} \cdot U_{НН}^{ном}}{U_{ВН}^{ном}\left(1 + n_{ЛР} \cdot t_{ЛР_*}\right)}, \tag{4.43}$$

где $U_{НН}^{ВН}$ определяется по выражению (4.25).

Определяется желаемый номер отпайки РПН

$$n_p^{жел} = \left(\frac{K_{ВС}^{ном}\left(1 + n_{ЛР}^{станд} \cdot t_{ЛР_*}\right)}{K_{ВС}^{жел}} - 1 \right) \frac{1}{t_{p_*}} = \\ = \left(\frac{K_{ВС}^{ном}\left(1 + n_{ЛР}^{станд} \cdot t_{ЛР_*}\right) \cdot U_{СН}^{жел}}{U_{СН}^{ВН}} - 1 \right) \frac{1}{t_{p_*}}, \tag{4.44}$$

где $U_{СН}^{ВН}$ определяется по выражению (4.26).

Полученный номер ответвления округляется до ближайшего целого, $n_p^{станд}$.

Рассчитывается действительное значение напряжения на средней стороне автотрансформатора:

$$U_{СН}^{факт} = \frac{U_{СН}^{ВН} \cdot \left(1 + n_p^{станд} \cdot t_{p_*}\right)}{K_{ВС}^{ном} \cdot \left(1 + n_{ЛР} \cdot t_{ЛР_*}\right)}. \tag{4.45}$$

Устройство РПН установлено в нейтрали автотрансформатора.

Чтобы выбрать номер отпайки РПН, обеспечивающий желаемое напряжение средней стороны, необходимо по выражению (4.26) определить напряжение средней стороны, приведенное к высшей, $U_{СН}^{ВН}$, затем вычислить желаемый коэффициент трансформации между высшим и средним напряжением по выражению (4.27).

Номер отпайки РПН определяется по выражению:

$$n_p^{жел} = \frac{1 - \dfrac{K_{ВС}^{жел}}{K_{ВС}^{ном}}}{\left(K_{ВС}^{жел} - 1\right) \cdot t_{p_*}}. \tag{4.46}$$

Найденный номер отпайки РПН округляется до ближайшего целого $n_p^{станд}$ и по нему рассчитывается напряжение средней стороны автотрансформатора:

$$U_{СН}^{факт} = \frac{U_{СН}^{ВН} \cdot \left(\dfrac{1}{K_{ВС}^{ном}} + n_p^{станд} \cdot t_{p_*} \right)}{1 + n_p^{станд} \cdot t_{p_*}}. \tag{4.47}$$

Действительное напряжение на шинах НН в этом случае равно:

$$U_{НН}^{факт}=\frac{U_{НН}^{ВН}}{K_{ВН}^{ном}\cdot\left(1+n_{р}^{станд}\cdot t_{р*}\right)}. \qquad (4.48)$$

Если действительное значение напряжения низкой стороны автотрансформатора не соответствует желаемому, то со стороны обмотки НН устанавливается линейный регулятор, номер ответвления которого рассчитывается по формуле (4.39).

Действительное напряжение на шинах НН при установке линейного регулятора равно:

$$U_{НН}^{действ}=U_{НН}^{факт}\left(1+n_{ЛР}^{станд}\cdot t_{ЛР*}\right), \qquad (4.49)$$

где $U_{НН}^{факт}$ определяется по выражению (4.25).

Устройство РПН установлено в обмотке ВН автотрансформатора.

Номер отпайки РПН, обеспечивающий желаемое напряжение на средней стороне равен:

$$n_{р}^{жел}=\left(\frac{K_{ВС}^{жел}}{K_{ВС}^{ном}}-1\right)\frac{1}{t_{р*}}, \qquad (4.50)$$

где $K_{ВС}^{жел}$ определяется по выражению (4.27).

При округлении его до ближайшего целого, $n_{р}^{станд}$, действительное напряжение на шинах СН определяется как

$$U_{СН}^{факт}=\frac{U_{СН}^{ВН}}{K_{ВС}^{ном}\cdot\left(1+n_{р}^{станд}\cdot t_{р*}\right)}. \qquad (4.51)$$

Действительное напряжение на шинах НН равно

$$U_{НН}^{факт}=\frac{U_{НН}^{ВН}}{K_{ВН}^{ном}\cdot\left(1+n_{р}^{станд}\cdot t_{р*}\right)}. \qquad (4.52)$$

Если действительное напряжение на шинах НН не соответствует желаемому, со стороны НН устанавливается линейный регулятор, номер ответвления которого определяется по выражению:

$$n_{ЛР}^{жел}=\left(\frac{U_{НН}^{жел}-U_{НН}^{факт}}{U_{ЛР}^{ном}}\right)\cdot\frac{1}{t_{ЛР*}}, \qquad (4.53)$$

а действительное напряжение на шинах НН после установки линейного регулятора - по выражению:

$$U_{НН}^{действ} = U_{НН}^{факт} + n_{ЛР}^{станд} \cdot t_{ЛР_*} \cdot U_{ЛР}^{ном}. \qquad (4.54)$$

Таким образом, рассмотрены все возможные случаи установки РПН в автотрансформаторе в сочетании с линейным регулятором для обеспечения желаемых напряжений на сторонах СН и НН.

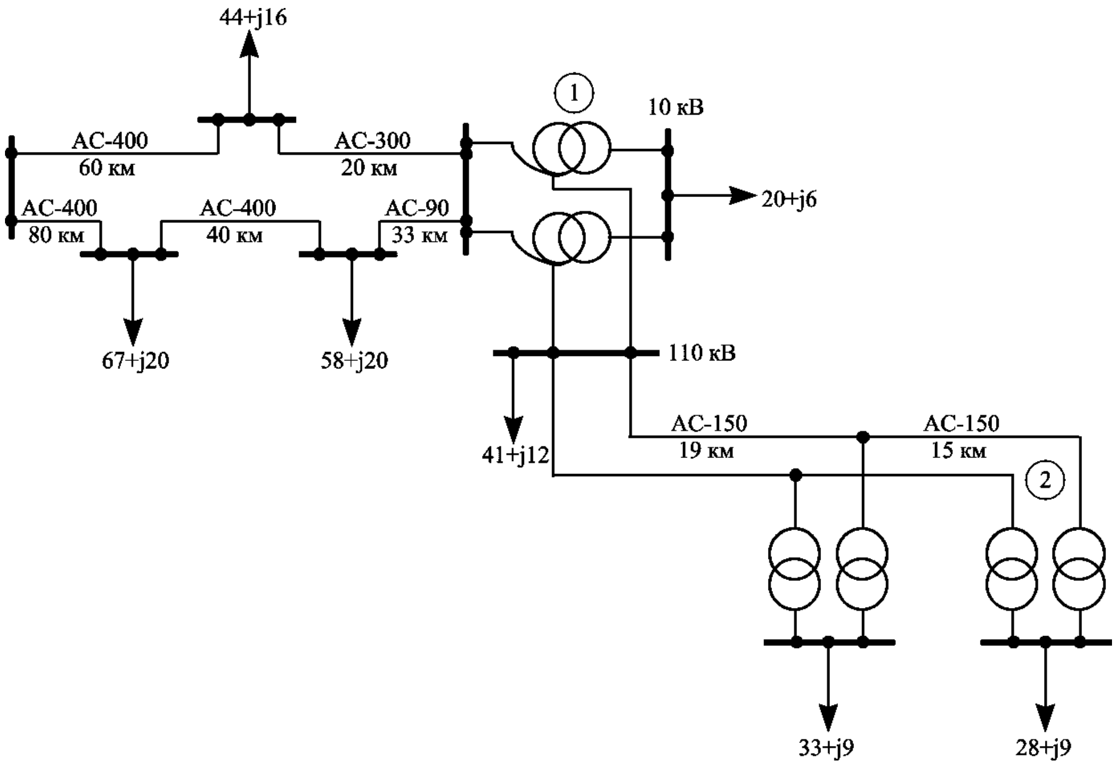
Примеры решения задач

Листинг

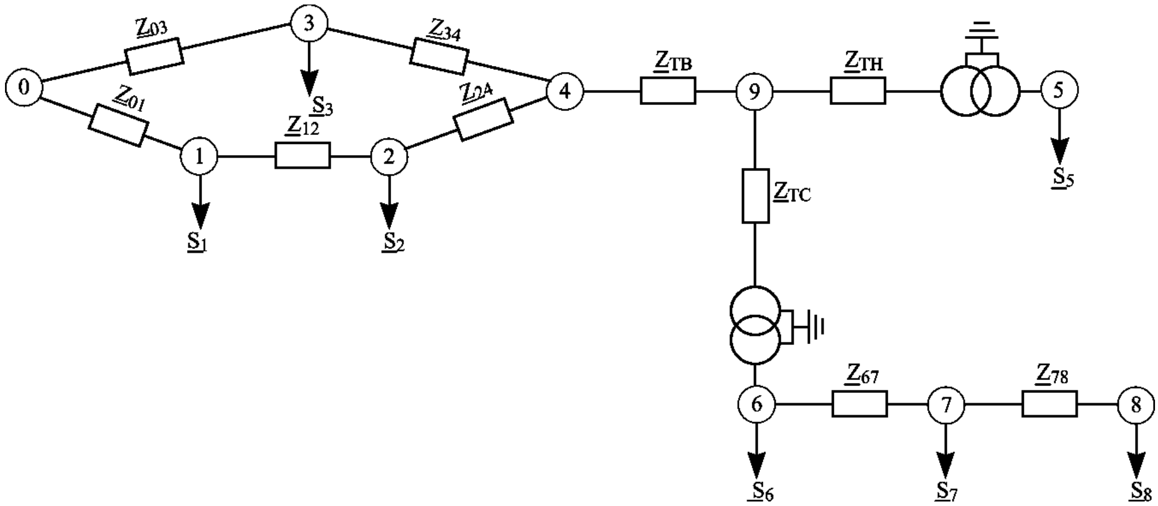
расчета примеров по разделу 4 в программе MathCad фирмы MathSoft

Пример 4.1.

Рассчитать установившийся режим в сети двух напряжений 220 и 110 кВ. Выбрать номера отпаек 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 аналогично примерам раздела 3:

$Z_{01} := 6 + 33.6j$ Ом; $Z_{03} := 4.5 + 25.2j$ Ом; $Z_{12} := 3 + 16.8j$ Ом;

$Z_{24} := 2.475 + 13.86j$ Ом; $Z_{34} := 1.96 + 8.58j$ Ом; $Z_{76} := 1.881 + 9.99j$ Ом;

$Z_{78} := 1.485 + 3.15j$ Ом.

$Q_{c01} := \frac{1}{2} \cdot 220^2 \cdot 2.7 \cdot 10^{-6} \cdot 80$ $\qquad Q_{c01} = 5.227$ Мвар

$Q_{c03} := \frac{1}{2} \cdot 220^2 \cdot 2.7 \cdot 10^{-6} \cdot 60$ $\qquad Q_{c03} = 3.92$ Мвар

$Q_{c12} := \frac{1}{2} \cdot 220^2 \cdot 2.7 \cdot 10^{-6} \cdot 40$ $\qquad Q_{c12} = 2.614$ Мвар

$Q_{c24} := \frac{1}{2} \cdot 220^2 \cdot 2.7 \cdot 10^{-6} \cdot 33$ $\qquad Q_{c24} = 2.156$ Мвар

$Q_{c34} := \frac{1}{2} \cdot 220^2 \cdot 2.64 \cdot 10^{-6} \cdot 20$ $\qquad Q_{c34} = 1.278$ Мвар

$Q_{c67} := 220^2 \cdot 2.7 \cdot 10^{-6} \cdot 19$ $\qquad Q_{c67} = 2.483$ Мвар

$Q_{c78} := 220^2 \cdot 2.7 \cdot 10^{-6} \cdot 15$ $\qquad Q_{c78} = 1.96$ Мвар

Заданные мощности нагрузок и напряжение источника питания:

$S_1 := 67 + 20j$ МВА; $S_2 := 58 + 20j$ МВА; $S_3 := 44 + 16j$ МВА;

$S_5 := 20 + 6j$ МВА; $S_6 := 41 + 12j$ МВА; $S_7 := 33 + 9j$ МВА;

$S_8 := 28 + 9j$ МВА.

$U_0 := 238$ кВ.

Выбираем трансформаторы для узлов 7 и 8.

Определяем расчетную мощность трансформатора

$$S_p = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{N_т \cdot к_з},$$

где $N_т$ - число трансформаторов,

$к_з$ - коэффициент загрузки.

$$S_{r8} := \frac{\sqrt{28^2 + 9^2}}{2 \cdot 0.7} \qquad S_{r8} = 21.008 \quad \text{МВА.}$$

Выбираем трансформатор ТРДН-25000/110, работающий как двухобмоточный трансформатор.

$$S_{r7} := \frac{\sqrt{33^2 + 9^2}}{2 \cdot 0.7} \qquad S_{r7} = 24.432 \quad \text{МВА.}$$

Выбираем трансформатор ТРДН-25000/110.

Определяем параметры схемы замещения трансформатора: мощность холостого хода и сопротивление.

$S_{hh} := 0.027 + 0.175j$ МВА; $\qquad Z_{tr} := 2.54 + 55.9j$ Ом.

Находим потери мощности в трансформаторах и расчетные нагрузки узлов 7 и 8.

$P_8 := 28$ МВт $\qquad Q_8 := 9$ Мвар

$$\Delta S_{tr8} := \frac{\left(\frac{P_8}{2}\right)^2 + \left(\frac{Q_8}{2}\right)^2}{110^2} \cdot Z_{tr} \qquad \Delta S_{tr8} = 0.045 + 0.999i \quad \text{МВА}$$

$$S_{pr8} := S_8 + \left(\Delta S_{tr8} + S_{hh}\right) \cdot 2$$

$S_{pr8} = 28.145 + 11.348i$ МВА

$$S_{8r} := S_8 + \left(\Delta S_{tr8} + S_{hh}\right) \cdot 2 - j \cdot Q_{c78} \qquad S_{8r} = 28.145 + 9.388i \quad \text{МВА}$$

$P_7 := 33$ МВт $\qquad Q_7 := 9$ Мвар

$$\Delta S_{tr7} := \frac{\left(\frac{P_7}{2}\right)^2 + \left(\frac{Q_7}{2}\right)^2}{110^2} \cdot Z_{tr} \qquad \Delta S_{tr7} = 0.061 + 1.351i \quad \text{МВА}$$

$$S_{7r} := S_7 + \left(\Delta S_{tr7} + S_{hh}\right) \cdot 2 - j \cdot \left(Q_{c78} + Q_{c67}\right) \qquad S_{7r} = 33.177 + 7.609i \quad \text{МВА}$$

Рассчитываем потокораспределение в разомкнутой сети 6-7-8 номинального напряжения 110 кВ, начиная с дальнего участка.

$P_{8r} := 28.145$ МВт $\qquad Q_{8r} := 9.388$ Мвар

$$\Delta S_{78} := \frac{P_{8r}^{\ 2} + Q_{8r}^{\ 2}}{110^2} \cdot Z_{78} \qquad \Delta S_{78} = 0.108 + 0.229i \quad \text{МВА}$$

$S_{78n} := S_{8r} + \Delta S_{78}$ $\qquad S_{78n} = 28.253 + 9.617i$ МВА

$S_{67k} := S_{78n} + S_{7r}$ $\qquad S_{67k} = 61.43 + 17.227i$ МВА

$P_{67k} := 61.43$ МВт $\qquad Q_{67k} := 17.227$ Мвар

$$\Delta S_{67} := \frac{P_{67k}^{2} + Q_{67k}^{2}}{110^{2}} \cdot Z_{76} \qquad \Delta S_{67} = 0.633 + 3.361i \text{ МВА}$$

$S_{67n} := S_{67k} + \Delta S_{67}$ $\qquad S_{67n} = 62.062 + 20.587i$ МВА

$S_{6n} := S_{67k} + \Delta S_{67} + S_6 - j \cdot Q_{c67}$ $\qquad S_{6n} = 103.062 + 30.104i$ МВА

Выбираем автотрансформатор и определяем параметры его схемы замещения.

$P_{6n} := 103.062$ МВт $\qquad Q_{6n} := 30.104$ Мвар

$P_5 := 20$ МВт $\qquad Q_5 := 6$ Мвар

$$S_{rat} := \frac{\sqrt{(P_{6n} + P_5)^2 + (Q_{6n} + Q_5)^2}}{0.7 \cdot 2} \qquad S_{rat} = 91.607 \text{ МВА}$$

Выбираем автотрансформатор АТДЦТН-125000/220/110.

Сопротивление обмоток автотрансформатора и потери мощности холостого хода.

$Z_{tv} := 0.5 + 48.6j$ Ом $\qquad Z_{ts} := 0.5$ Ом $\qquad Z_{tn} := 1 + 82.5j$ Ом

$\Delta Shh2 := 0.085 + 0.625j$ МВА

Определяем потери мощности в обмотках среднего и низкого напряжения автотрансформатора.

$$\Delta S_{69} := \frac{P_{6n}^{2} + Q_{6n}^{2}}{220^{2}} \cdot \frac{1}{2} \cdot Z_{ts} \qquad \Delta S_{69} = 0.061 \text{ МВт}$$

$$\Delta S_{59} := \frac{P_{5}^{2} + Q_{5}^{2}}{220^{2}} \cdot \frac{1}{2} \cdot Z_{tn} \qquad \Delta S_{59} = 4.504 \cdot 10^{-3} + 0.372i \text{ МВА}$$

Рассчитываем потоки мощности, втекающие в обмотки НН и СН.

$S_{59n} := S_5 + \Delta S_{59}$ $\qquad$ $S_{59n} = 20.005 + 6.372i$ **МВА**

$S_{69n} := S_{6n} + \Delta S_{69}$ $\qquad$ $S_{69n} = 103.122 + 30.104i$ **МВА**

Определяем мощность, вытекающую из обмотки высокого напряжения автотрансформатора.

$S_{49k} := S_{6n} + \Delta S_{69} + S_5 + \Delta S_{59}$ $\qquad$ $S_{49k} = 123.127 + 36.476i$ **МВА**

Потери мощности в обмотке ВН.

$P_{49k} := 123.127$ **МВт** $\qquad$ $Q_{49k} := 36.476$ **Мвар**

$$\Delta S_{49} := \frac{P_{49k}^2 + Q_{49k}^2}{220^2} \cdot \frac{1}{2} \cdot Z_{tv}$$

$\Delta S_{49} = 0.085 + 8.279i$ **МВА**

Находим расчетные мощности нагрузок узлов 1, 2, 3, 4.

$S_{4r} := S_{49k} + \Delta S_{49} + 2 \cdot \Delta Shh2 - j \cdot (Q_{c24} + Q_{c34})$

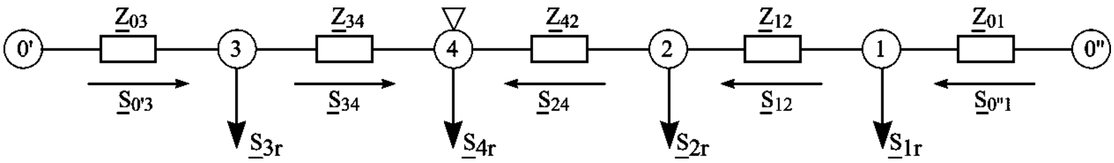
$S_{4r} = 123.382 + 42.571i$ **МВА**

$S_{1r} := S_1 - j \cdot (Q_{c01} + Q_{c12})$ $\qquad$ $S_{1r} = 67 + 12.159i$ **МВА**

$S_{2r} := S_2 - j \cdot (Q_{c12} + Q_{c24})$ $\qquad$ $S_{2r} = 58 + 15.23i$ **МВА**

$S_{3r} := S_3 - j \cdot (Q_{c03} + Q_{c34})$ $\qquad$ $S_{3r} = 44 + 10.802i$ **МВА**

Расчет кольца 0-3-4-2-1-0.



Находим мощности на головных участках, принимая $Z_{0''1} = Z_{01}$ и $Z_{0'3} = Z_{03}$

$$S_{03} := \frac{S_{3r} \cdot \left(\overline{Z_{34}} + \overline{Z_{24}} + \overline{Z_{12}} + \overline{Z_{01}}\right) + S_{4r} \cdot \left(\overline{Z_{24}} + \overline{Z_{12}} + \overline{Z_{01}}\right) + S_{2r} \cdot \left(\overline{Z_{12}} + \overline{Z_{01}}\right) + S_{1r} \cdot \overline{Z_{01}}}{\overline{Z_{03}} + \overline{Z_{34}} + \overline{Z_{24}} + \overline{Z_{12}} + \overline{Z_{01}}}$$

$S_{03} = 166.401 + 47.38i$ **МВА**

$$S_{01} := \frac{S_{1r} \cdot \left(\overline{Z_{34}} + \overline{Z_{24}} + \overline{Z_{12}} + \overline{Z_{03}}\right) + S_{2r} \cdot \left(\overline{Z_{24}} + \overline{Z_{34}} + \overline{Z_{03}}\right) + S_{4r} \cdot \left(\overline{Z_{34}} + \overline{Z_{03}}\right) + S_{3r} \cdot \overline{Z_{03}}}{\overline{Z_{03}} + \overline{Z_{34}} + \overline{Z_{24}} + \overline{Z_{12}} + \overline{Z_{01}}}$$

$S_{01} = 125.98 + 33.383i$ **МВА**

Определяем мощности на остальных участках схемы и находим точку потокораздела.

$S_{34} := S_{03} - S_{3r}$ $\qquad S_{34} = 122.401 + 36.578i$ **МВА**

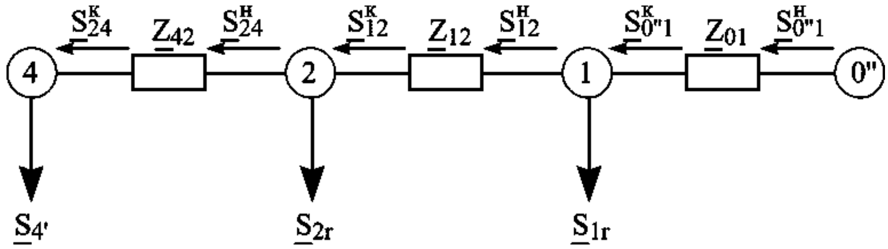
$S_{42} := S_{34} - S_{4r}$ $\qquad S_{42} = -0.98 - 5.993i$ **МВА**

$S_{12} := S_{01} - S_{1r}$ $\qquad S_{12} = 58.98 + 21.223i$ **МВА**

$S_{24} := S_{12} - S_{2r}$ $\qquad S_{24} = 0.98 + 5.993i$ **МВА**

Точка потокораздела - узел 4.

Рассчитываем потокораспределение в разомкнутой сети 0-1-2-4.



Здесь $S_{4'} = S_{24}$.

Определяем потери мощности на участке 2-4.

$P_{42} := 0.98$ **МВт** $\qquad Q_{42} := 5.993$ **Мвар**

$$\Delta S_{24} := \frac{P_{42}^2 + Q_{42}^2}{220^2} \cdot Z_{24} \qquad \Delta S_{24} = 1.886 \cdot 10^{-3} + 0.011i \ \textbf{МВА}$$

Находим поток мощности в начале участка 2-4.

$S_{24n} := -S_{42} + \Delta S_{24}$ $\qquad S_{24n} = 0.982 + 6.004i$ **МВА**

Находим поток мощности в конце участка 1-2.

$S_{12k} := S_{24n} + S_{2r}$ $\qquad S_{12k} = 58.982 + 21.234i$ **МВА**

Определяем потери мощности на участке 1-2.

$P_{12k} := 58.982$ **МВт** $\qquad Q_{12k} := 21.234$ **Мвар**

$$\Delta S_{12} := \frac{P_{12k}^2 + Q_{12k}^2}{220^2} \cdot Z_{12} \qquad \Delta S_{12} = 0.244 + 1.364i \ \textbf{МВА}$$

Находим поток мощности в начале участка 1-2.

$S_{12n} := S_{12k} + \Delta S_{12}$ $\qquad S_{12n} = 59.226 + 22.598i$ **МВА**

Находим поток мощности в конце участка 0-1.

$S_{01k} := S_{12n} + S_{1r}$ $\qquad S_{01k} = 126.226 + 34.757i$ МВА

Определяем потери мощности на участке 0-1.

$P_{01k} := 126.226$ МВт $\qquad Q_{01k} := 34.757$ Мвар

$$\Delta S_{01} := \frac{P_{01k}^2 + Q_{01k}^2}{220^2} \cdot Z_{01} \qquad \Delta S_{01} = 2.125 + 11.9i \text{ МВА}$$

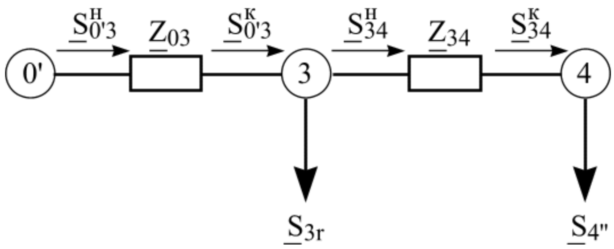
Находим поток мощности в начале участка 0-1.

$S_{01n} := S_{01k} + \Delta S_{01}$ $\qquad S_{01n} = 128.351 + 46.657i$ МВА

С учетом зарядной мощности он равен

$S_{g01} := S_{01n} - j \cdot Q_{c01}$ $\qquad S_{g01} = 128.351 + 41.43i$ МВА.

Аналогично рассчитываем разомкнутую сеть 0'-3-4.



Здесь $S_{4''}=S_{34}$.

$P_{34} := 122.401$ МВт $\qquad Q_{34} := 36.578$ Мвар

$$\Delta S_{34} := \frac{P_{34}^2 + Q_{34}^2}{220^2} \cdot Z_{34} \qquad \Delta S_{34} = 0.661 + 2.893i \text{ МВА}$$

$S_{34n} := S_{34} + \Delta S_{34}$ $\qquad S_{34n} = 123.062 + 39.471i$ МВА

$S_{03k} := S_{34n} + S_{3r}$ $\qquad S_{03k} = 167.062 + 50.273i$ МВА

$P_{03k} := 167.062$ МВт $\qquad Q_{03k} := 50.273$ Мвар

$$\Delta S_{03} := \frac{P_{03k}^2 + Q_{03k}^2}{220^2} \cdot Z_{03} \qquad \Delta S_{03} = 2.83 + 15.847i \text{ МВА}$$

$S_{03n} := S_{03k} + \Delta S_{03}$ $\qquad S_{03n} = 169.892 + 66.12i$ МВА

Определяем поток мощности с учетом зарядной мощности линии 0-3.

$S_{g03} := S_{03n} - j \cdot Q_{c03}$ $\qquad S_{g03} = 169.892 + 62.2i$ МВА

Находим мощность, отпускаемую с шин источника питания.

$S_g := S_{g01} + S_{g03}$ $\qquad S_g = 298.243 + 103.629i$ МВА

Находим напряжения в узлах кольцевой схемы сети.

Активные и индуктивные сопротивления и перетоки активных и реактивных мощностей по участкам, равны:

$R_{01} := 6$ Ом $\qquad R_{34} := 1.96$ Ом

$R_{12} := 3$ Ом $\qquad R_{76} := 1.881$ Ом

$R_{03} := 4.5$ Ом $\qquad R_{78} := 1.485$ Ом

$R_{24} := 2.475$ Ом

$X_{01} := 33.6$ Ом $\qquad X_{34} := 8.58$ Ом

$X_{12} := 16.8$ Ом $\qquad X_{76} := 9.99$ Ом

$X_{03} := 25.2$ Ом $\qquad X_{78} := 3.15$ Ом

$X_{24} := 13.86$ Ом

$P_{01n} := 128.351$ МВт $\qquad Q_{01n} := 46.657$ Мвар

$P_{12n} := 59.226$ МВт $\qquad Q_{12n} := 22.598$ Мвар

$P_{24n} := 0.982$ МВт $\qquad Q_{24n} := 6.004$ Мвар

$P_{03n} := 169.892$ МВт $\qquad Q_{03n} := 66.12$ Мвар

$P_{34n} := 123.062$ МВт $\qquad Q_{34n} := 39.471$ Мвар

$$U_1 := U_0 - \left(\frac{P_{01n} \cdot R_{01} + Q_{01n} \cdot X_{01}}{\overline{U_0}} + i \cdot \frac{P_{01n} \cdot X_{01} - Q_{01n} \cdot R_{01}}{\overline{U_0}} \right)$$

$U_1 = 228.177 - 16.944i$ кВ

$$U_2 := U_1 - \left(\frac{P_{12n} \cdot R_{12} + Q_{12n} \cdot X_{12}}{\overline{U_1}} + i \cdot \frac{P_{12n} \cdot X_{12} - Q_{12n} \cdot R_{12}}{\overline{U_1}} \right)$$

$U_2 = 225.448 - 20.805i$ кВ

$$U_4 := U_2 - \left(\frac{P_{24n} \cdot R_{24} + Q_{24n} \cdot X_{24}}{\overline{U_2}} + i \cdot \frac{P_{24n} \cdot X_{24} - Q_{24n} \cdot R_{24}}{\overline{U_2}} \right)$$

$U_4 = 225.072 - 20.765i$ кВ

$$U_3 := U_0 - \left(\frac{P_{03n} \cdot R_{03} + Q_{03n} \cdot X_{03}}{\overline{U_0}} + i \cdot \frac{P_{03n} \cdot X_{03} - Q_{03n} \cdot R_{03}}{\overline{U_0}} \right)$$

$U_3 = 227.787 - 16.738i$ кВ

$$U_{4'} := U_3 - \left(\frac{P_{34n} \cdot R_{34} + Q_{34n} \cdot X_{34}}{\overline{U_3}} + i \cdot \frac{P_{34n} \cdot X_{34} - Q_{34n} \cdot R_{34}}{\overline{U_3}} \right)$$

$U_{4'} = 224.941 - 20.825i$ кВ

$$\varepsilon_4 := \frac{|U_4| - |U_{4'}|}{|U_4|} \cdot 100$$

$\varepsilon_4 = 0.055$ %

Выбор отпаек РПН автотрансформатора АТДЦТН-125000/220/110, у которого пределы регулирования напряжения равны ±6·2%, а устройство РПН установлено на стороне СН (в обмотке СН).

Номинальные напряжения автотрансформатора:

$U_{vn} := 230$ кВ $\quad U_{sn} := 121$ кВ $\quad U_{nn} := 11$ кВ

Номинальные коэффициенты трансформации:

$$k_{tvn} := \frac{230}{11} \qquad k_{tvn} = 20.909$$

$$k_{tvs} := \frac{230}{121} \qquad k_{tvs} = 1.901$$

Определим напряжение нулевой точки автотрансформатора (узел 9).

$S_{49n} := S_{49k} + \Delta S_{49}$ $\quad S_{49n} = 123.212 + 44.755i$ МВА

$P_{49n} := 123.212$ МВт $\quad Q_{49n} := 44.755$ Мвар

$R_{tv} := 0.5$ Ом $\quad X_{tv} := 48.6$ Ом

$$U_9 := U_4 - \left(\frac{P_{49n} \cdot R_{tv} + Q_{49n} \cdot X_{tv}}{\overline{U_4}} + i \cdot \frac{P_{49n} \cdot X_{tv} - Q_{49n} \cdot R_{tv}}{\overline{U_4}} \right)$$

$U_9 = 212.793 - 46.138i$ кВ

Рассчитываем напряжение средней стороны автотрансформатора, приведенное к высокой стороне.

$P_{69n} := 103.122$ МВт $\quad Q_{69n} := 30.104$ Мвар

$R_{ts} := 0.5$ Ом $\quad X_{ts} := 0$ Ом

$$U_{CHBH} := U_9 - \left(\frac{P_{69n} \cdot R_{ts} + Q_{69n} \cdot X_{ts}}{\overline{U_9}} + i \cdot \frac{P_{69n} \cdot X_{ts} - Q_{69n} \cdot R_{ts}}{\overline{U_9}} \right)$$

$$\left| U_{CHBH} \right| = 217.501 \quad кВ$$

Определим напряжение средней стороны автотрансформатора:

$$U_6 := \frac{U_{CHBH}}{k_{tvs}} \qquad \left| U_6 \right| = 114.425 \quad кВ$$

Аналогично определим напряжение низкой стороны автотрансформатора:

$$U_{HHBH} := U_9 - \left(\frac{P_{59n} \cdot R_{tn} + Q_{59n} \cdot X_{tn}}{\overline{U_9}} + i \cdot \frac{P_{59n} \cdot X_{tn} - Q_{59n} \cdot R_{tn}}{\overline{U_9}} \right)$$

$$\left| U_{HHBH} \right| = 215.364 \quad кВ$$

$$U_5 := \frac{U_{HHBH}}{k_{tvn}} \qquad \left| U_5 \right| = 10.3 \quad кВ$$

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 (4.27).

$$k_{tvsjel} := \frac{\left| U_{CHBH} \right|}{116} \qquad k_{tvsjel} = 1.875$$

Желаемый номер отпайки РПН находится по формуле (4.36).

$$n_{vsjel} := \left(\frac{k_{tvs}}{k_{tvsjel}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{0.02} \qquad n_{vsjel} = 0.688$$

Округляем до стандартного, равного 1.

Фактическое напряжение на шинах СН автотрансформатора.

$$U_{vsf} := \frac{\left| U_{CHBH} \right| \cdot (1 + 1 \cdot 0.02)}{k_{tvs}} \qquad U_{vsf} = 116.713 \quad кВ$$

Рассчитываем напряжения в узлах сети среднего напряжения, не учитывая поперечную составляющую падения напряжения ввиду ее малости.

$U_6 := 116.713$ **кВ**

$P_{67n} := 62.062$ МВт $\qquad Q_{67n} := 20.587$ Мвар

$P_{78n} := 28.253$ МВт $\qquad Q_{78n} := 9.617$ Мвар

$$U_7 := U_6 - \frac{P_{67n} \cdot R_{76} + Q_{67n} \cdot X_{76}}{U_6} \qquad U_7 = 114.173 \text{ кВ}$$

$$U_8 := U_7 - \frac{P_{78n} \cdot R_{78} + Q_{78n} \cdot X_{78}}{U_7} \qquad U_8 = 113.54 \text{ кВ}$$

Определим номер отпайки РПН двухобмоточного трансформатора: узла 8.

Потеря напряжения в трансформаторе:

$P_{pr8} := 28.145$ МВт $\qquad Q_{pr8} := 9.388$ Мвар

$R_{tr} := 2.54$ Ом $\qquad X_{tr} := 55.9$ Ом

$$\Delta U_t := \frac{P_{pr8} \cdot R_{tr} + Q_{pr8} \cdot X_{tr}}{U_8} \qquad \Delta U_t = 6.217 \text{ кВ}$$

Напряжение низкой стороны, приведенное к высокой:

$$U_{ННВН} := U_8 - \Delta U_t \qquad U_{ННВН} = 107.323 \text{ кВ}$$

Номинальные напряжения высшей и низшей сторон трансформатора:

$U_{nn} := 10.5$ кВ $\qquad U_{vn} := 115$ кВ

Номинальный коэффициент трансформации:

$$k_{vnn} := \frac{U_{vn}}{U_{nn}} \qquad k_{vnn} = 11.524$$

Определение желаемого коэффициента трансформации.

$$k_{vnjel} := \frac{U_{ННВН}}{10.1} \qquad k_{vnjel} = 10.626$$

Желаемый номер отпайки (151):

$$n_{vnjel} := \left(\frac{k_{vnjel}}{k_{vnn}} - 1\right) \cdot \frac{1}{0.0178} \qquad n_{vnjel} = -4.377$$

округляется до ближайшего стандартного, равного -4.

Фактическое напряжение на шинах НН трансформатора узла 8 (4.28):

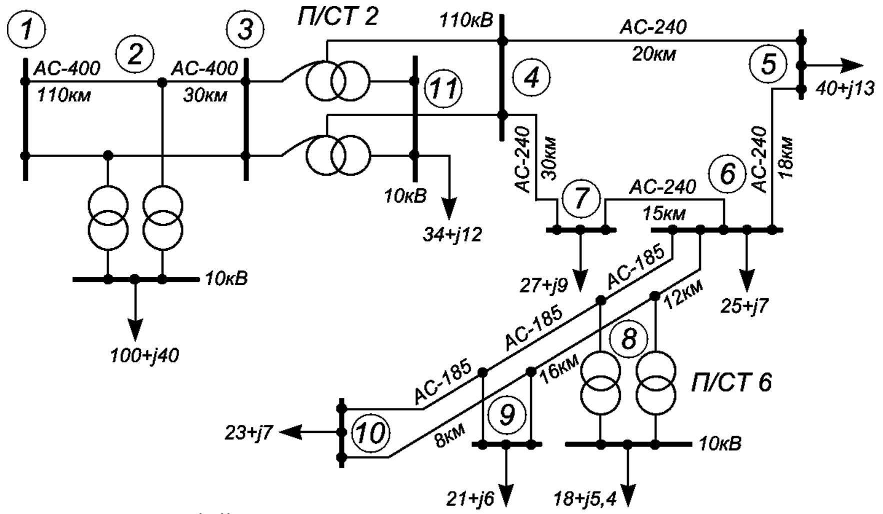
$$U_{vnf} := \frac{U_{HHBH}}{k_{vnn}\cdot(1 - 4\cdot 0.0178)} \qquad U_{vnf} = 10.027 \quad кВ$$

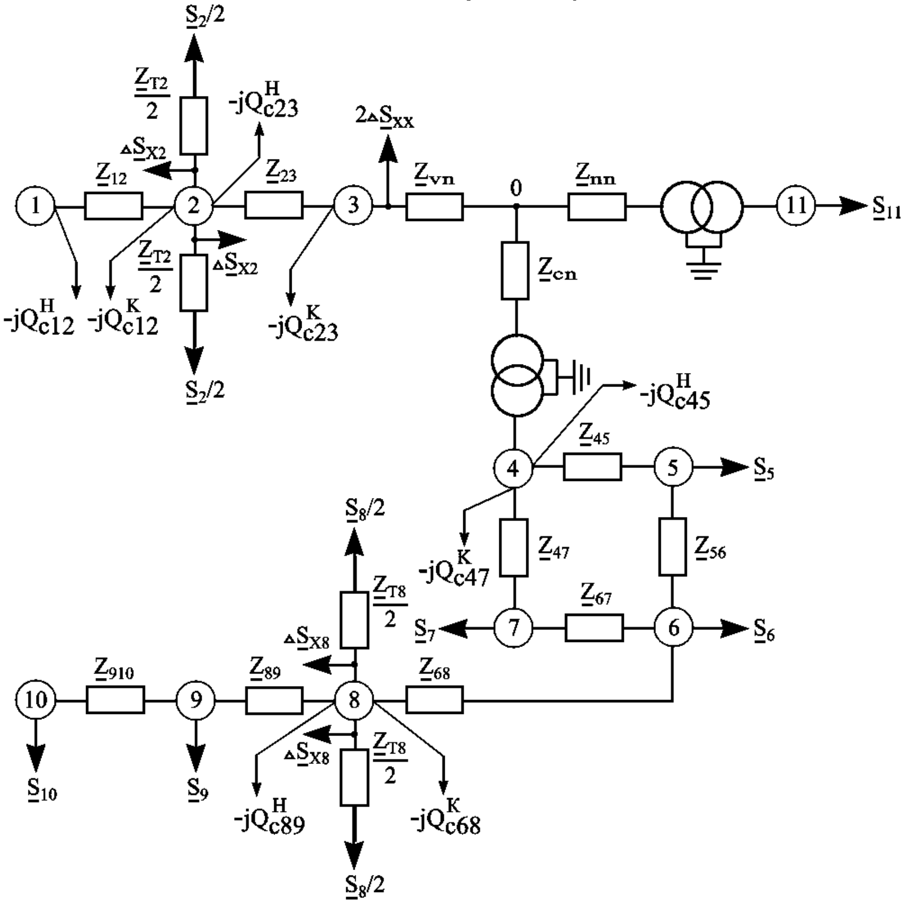
Рассчитанное фактическое напряжение совпало с желаемым, - следовательно, расчет проведен правильно.

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. $\mathbf{U_1} := \mathbf{241}$ кВ.

Составляем схему замещения





Примечание: в узлах 5, 6, 7, 9, 10 показана расчетная мощность нагрузки.

Находим сопротивления и проводимости линий по справочным данным аналогично примеру 4.1.

$z_{12} := \frac{0.075 \cdot 110 + j \cdot 0.42 \cdot 110}{2}$ $z_{12} = 4.125 + 23.1i$ Ом

$z_{23} := \frac{0.075 \cdot 30 + j \cdot 0.42 \cdot 30}{2}$ $z_{23} = 1.125 + 6.3i$ Ом

$z_{45} := 0.121 \cdot 20 + j \cdot 0.405 \cdot 20$ $z_{45} = 2.42 + 8.1i$ Ом

$z_{56} := 0.121 \cdot 18 + j \cdot 0.405 \cdot 18$ $z_{56} = 2.178 + 7.29i$ Ом

$z_{67} := 0.121 \cdot 15 + j \cdot 0.405 \cdot 15$ $z_{67} = 1.815 + 6.075i$ Ом

$z_{47} := 0.121 \cdot 30 + j \cdot 0.405 \cdot 30$ $z_{47} = 3.63 + 12.15i$ Ом

$z_{68} := \frac{0.162 \cdot 12 + j \cdot 0.413 \cdot 12}{2}$ $z_{68} = 0.972 + 2.478i$ Ом

$z_{89} := \frac{0.162 \cdot 16 + j \cdot 0.413 \cdot 16}{2}$ $z_{89} = 1.296 + 3.304i$ Ом

$z_{910} := \frac{0.162 \cdot 8 + j \cdot 0.413 \cdot 8}{2}$ $z_{910} = 0.648 + 1.652i$ Ом

$b_{o12} := 2.7 \cdot 10^{-6} \cdot 2$ См $b_{o23} := 2.7 \cdot 10^{-6} \cdot 2$ См $b_{o45} := 2.81 \cdot 10^{-6}$ См

$b_{o56} := 2.81 \cdot 10^{-6}$ См $b_{o67} := 2.81 \cdot 10^{-6}$ См $b_{o47} := 2.81 \cdot 10^{-6}$ См

$b_{o68} := 2.75 \cdot 10^{-6} \cdot 2$ См $b_{o89} := 2.75 \cdot 10^{-6} \cdot 2$ См $b_{o910} := 2.75 \cdot 10^{-6} \cdot 2$ См

Находим зарядные мощности.

$Q_{c12} := \frac{220^2 \cdot b_{o12} \cdot 110}{2}$ $Q_{c12} = 14.375$ Мвар

$Q_{c23} := \frac{220^2 \cdot b_{o23} \cdot 30}{2}$ $Q_{c23} = 3.92$ Мвар

$Q_{c45} := \frac{110^2 \cdot b_{o45} \cdot 20}{2}$ $Q_{c45} = 0.34$ Мвар

$Q_{c56} := \frac{110^2 \cdot b_{o56} \cdot 18}{2}$ $Q_{c56} = 0.306$ Мвар

$$Q_{c67} := \frac{110^2 \cdot b_{o67} \cdot 15}{2} \qquad Q_{c67} = 0.255 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c47} := \frac{110^2 \cdot b_{o47} \cdot 30}{2} \qquad Q_{c47} = 0.51 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c68} := \frac{110^2 \cdot b_{o68} \cdot 12}{2} \qquad Q_{c68} = 0.399 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c89} := \frac{110^2 \cdot b_{o89} \cdot 16}{2} \qquad Q_{c89} = 0.532 \quad \text{Мвар}$$

$$Q_{c910} := \frac{110^2 \cdot b_{o910} \cdot 8}{2} \qquad Q_{c910} = 0.266 \quad \text{Мвар}$$

Определяем расчетную мощность трансформаторов подстанции узла 8.

$$S_{trash8} := \frac{\sqrt{18^2 + 5.4^2}}{2 \cdot 0.7} \qquad S_{trash8} = 13.423 \quad \text{МВА}.$$

Выбираем трансформатор типа ТДН-16000/110 и его параметры.

Определяем потери мощности в трансформаторе.

$$\Delta P_{tr8} := \frac{\left(\frac{18}{2}\right)^2 + \left(\frac{5.4}{2}\right)^2}{110^2} \cdot 4.38 + 0.019 \qquad \Delta P_{tr8} = 0.051 \quad \text{МВт}$$

$$\Delta Q_{tr8} := \frac{\left(\frac{18}{2}\right)^2 + \left(\frac{5.4}{2}\right)^2}{110^2} \cdot 86.7 + 0.112 \qquad \Delta Q_{tr8} = 0.745 \quad \text{Мвар}$$

Рассчитаем приведенную нагрузку узла 8.

$$S_{pr8} := 18 + j \cdot 5.4 + 2 \cdot \left(\Delta P_{tr8} + j \cdot \Delta Q_{tr8}\right) \qquad S_{pr8} = 18.102 + 6.889i \quad \text{МВА}$$

Определяем расчетную мощность трансформаторов подстанции узла 2.

$$S_{trash2} := \frac{\sqrt{100^2 + 40^2}}{2 \cdot 0.7} \qquad S_{trash2} = 76.931 \quad \text{МВА}.$$

В узле 2 устанавливаем трансформатор ТДЦ-80000/220. Определяем справочные данные по нему.

$$\Delta P_{tr2} := \frac{\left(\frac{100}{2}\right)^2 + \left(\frac{40}{2}\right)^2}{220^2}\cdot 2.64 + 0.105 \qquad \Delta P_{tr2} = 0.263 \quad \text{МВт}$$

$$\Delta Q_{tr2} := \frac{\left(\frac{100}{2}\right)^2 + \left(\frac{40}{2}\right)^2}{220^2}\cdot 72.8 + 0.480 \qquad \Delta Q_{tr2} = 4.842 \quad \text{Мвар}$$

Определим приведенную нагрузку 2 узла.

$$S_{pr2} := 100 + j\cdot 40 + \left(\Delta P_{tr2} + j\cdot\Delta Q_{tr2}\right)\cdot 2 \qquad S_{pr2} = 100.526 + 49.684i \quad \text{МВА}$$

Расчетные нагрузки узлов:

$$S_2 := S_{pr2} - j\cdot\left(Q_{c12} + Q_{c23}\right) \qquad S_2 = 100.526 + 31.389i \quad \text{МВА}$$

$$S_5 := 40 + j\cdot 13 - j\cdot\left(Q_{c56} + Q_{c45}\right) \qquad S_5 = 40 + 12.354i \quad \text{МВА}$$

$$S_6 := 25 + j\cdot 7 - j\cdot\left(Q_{c56} + Q_{c67} + Q_{c68}\right) \qquad S_6 = 25 + 6.04i \quad \text{МВА}$$

$$S_7 := 27 + j\cdot 9 - j\cdot\left(Q_{c47} + Q_{c67}\right) \qquad S_7 = 27 + 8.235i \quad \text{МВА}$$

$$S_8 := S_{pr8} - j\cdot\left(Q_{c68} + Q_{c89}\right) \qquad S_8 = 18.102 + 5.958i \quad \text{МВА}$$

$$S_9 := 21 + j\cdot 6 - j\cdot\left(Q_{c89} + Q_{c910}\right) \qquad S_9 = 21 + 5.201i \quad \text{МВА}$$

$$S_{10} := 23 + j\cdot 7 - j\cdot Q_{c910} \qquad S_{10} = 23 + 6.734i \quad \text{МВА}$$

Находим потоки мощности в разомкнутой сети 6-8-9-10.

$$P_{10} := 23 \quad \text{МВт} \qquad Q_{10} := 6.734 \quad \text{Мвар}$$

$$\Delta S_{910} := \frac{P_{10}^2 + Q_{10}^2}{110^2}\cdot Z_{910} \qquad \Delta S_{910} = 0.031 + 0.078i \quad \text{МВА}$$

$$S_{910n} := S_{10} + \Delta S_{910} \qquad S_{910n} = 23.031 + 6.812i \quad \text{МВА}$$

$$S_{89k} := S_{910n} + S_9 \qquad S_{89k} = 44.031 + 12.014i \quad \text{МВА}$$

$$P_{89k} := 44.031 \quad \text{МВт} \qquad Q_{89k} := 12.014 \quad \text{Мвар}$$

$$\Delta S_{89} := \frac{P_{89k}^2 + Q_{89k}^2}{110^2}\cdot Z_{89} \qquad \Delta S_{89} = 0.223 + 0.569i \quad \text{МВА}$$

$$S_{89n} := S_{89k} + \Delta S_{89} \qquad S_{89n} = 44.254 + 12.582i \quad \text{МВА}$$

$S_{68k} := S_{89n} + S_8$ $\qquad S_{68k} = 62.356 + 18.54i$ **МВА**

$P_{68k} := 62.356$ **МВт** $\qquad Q_{68k} := 18.54$ **Мвар**

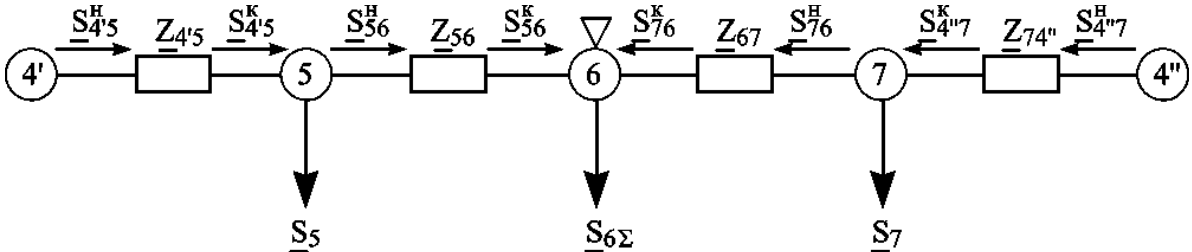
$$\Delta S_{68} := \frac{P_{68k}^{\,2} + Q_{68k}^{\,2}}{110^2}\cdot Z_{68} \qquad \Delta S_{68} = 0.34 + 0.867i \ \textbf{МВА}$$

$S_{68n} := S_{68k} + \Delta S_{68}$ $\qquad S_{68n} = 62.696 + 19.407i$ **МВА**

Суммарная нагрузка узла 6.

$S_{6\Sigma} := S_{68n} + S_6$ $\qquad S_{6\Sigma} = 87.696 + 25.446i$ **МВА**

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:

$z_{74''} := z_{47}$ $\qquad z_{54'} := z_{45}$

$z_{64''} := z_{67} + z_{47}$ $\qquad z_{64'} := z_{56} + z_{45}$

$z_{54''} := z_{56} + z_{67} + z_{47}$ $\qquad z_{74'} := z_{67} + z_{56} + z_{45}$

$$z_{4'4''} := z_{45} + z_{56} + z_{67} + z_{47}$$

$$S_{4'5} := \frac{S_5\cdot\overline{z_{54''}} + S_{6\Sigma}\cdot\overline{z_{64''}} + S_7\cdot\overline{z_{74''}}}{\overline{z_{4'4''}}} \qquad S_{4'5} = 87.666 + 26.15i \ \textbf{МВА}$$

$$S_{4''7} := \frac{S_7\cdot\overline{z_{74'}} + S_{6\Sigma}\cdot\overline{z_{64'}} + S_5\cdot\overline{z_{54'}}}{\overline{z_{4'4''}}} \qquad S_{4''7} = 67.029 + 19.885i \ \textbf{МВА}$$

Находим точку потокораздела:

$S_{56} := S_{4'5} - S_5$ $\qquad S_{56} = 47.666 + 13.796i$ **МВА**

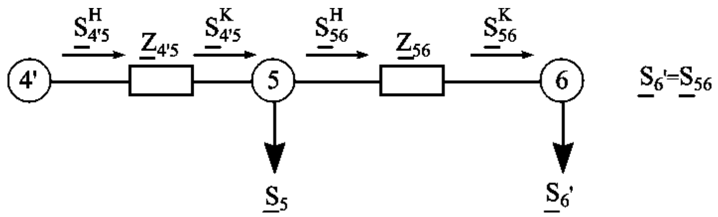
$S_{67} := S_{56} - S_{6\Sigma}$ $\qquad S_{67} = -40.029 - 11.65i$ **МВА**

$S_{76} := S_{4''7} - S_7$ $\qquad S_{76} = 40.029 + 11.65i$ **МВА**

Точка потокораздела 6.

Разрезаем сеть по точке потокораздела и рассчитываем две разомкнутые сети.

Сеть 4'-5-6:



$P_{56} := 47.666$ **МВт** $\qquad Q_{56} := 13.796$ **Мвар**

$$\Delta S_{56} := \frac{P_{56}^2 + Q_{56}^2}{110^2} \cdot Z_{56}$$ $\qquad \Delta S_{56} = 0.443 + 1.484i$ **МВА**

$S_{56n} := S_{56} + \Delta S_{56}$ $\qquad S_{56n} = 48.11 + 15.279i$ **МВА**

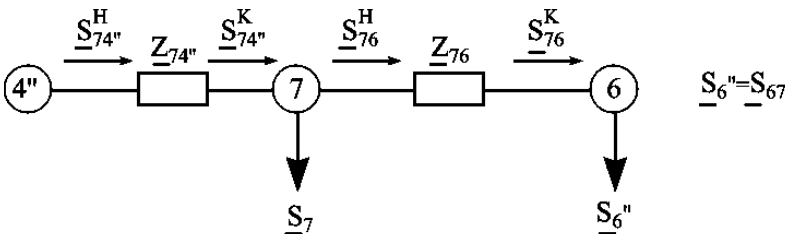
$S_{4'5k} := S_{56n} + S_5$ $\qquad S_{4'5k} = 88.11 + 27.633i$ **МВА**

$P_{4'5k} := 88.11$ **МВт** $\qquad Q_{4'5k} := 27.633$ **Мвар**

$$\Delta S_{4'5} := \frac{P_{4'5k}^2 + Q_{4'5k}^2}{110^2} \cdot Z_{45}$$ $\qquad \Delta S_{4'5} = 1.705 + 5.708i$ **МВА**

$S_{4'5n} := S_{4'5k} + \Delta S_{4'5}$ $\qquad S_{4'5n} = 89.815 + 33.341i$ **МВА**

Сеть 4"-7-8



$P_{76} := 40.029$ **МВт** $\qquad Q_{76} := 11.65$ **Мвар**

$$\Delta S_{76} := \frac{P_{76}^2 + Q_{76}^2}{110^2} \cdot Z_{67}$$ $\qquad \Delta S_{76} = 0.261 + 0.873i$ **МВА**

$S_{76n} := S_{76} + \Delta S_{76}$ $\quad$ $S_{76n} = 40.29 + 12.523i$ МВА

$S_{4''7k} := S_{76n} + S_7$ $\quad$ $S_{4''7k} = 67.29 + 20.758i$ МВА

$P_{4''7k} := 67.29$ МВт $\quad$ $Q_{4''7k} := 20.758$ Мвар

$$\Delta S_{4''7} := \frac{P_{4''7k}^2 + Q_{4''7k}^2}{110^2} \cdot Z_{47} \qquad \Delta S_{4''7} = 1.488 + 4.979i \text{ МВА}$$

$S_{4''7n} := S_{4''7k} + \Delta S_{4''7}$ $\quad$ $S_{4''7n} = 68.778 + 25.737i$ МВА

Суммарная нагрузка узла 4:

$S_4 := S_{4'5n} + S_{4''7n} - j\cdot\left(Q_{c45} + Q_{c47}\right)$ $\quad$ $S_4 = 158.593 + 58.229i$ МВА

Суммарная нагрузка автотрансформатора:

$S'_{rash} := S_4 + 34 + j\cdot 12$ $\quad$ $S'_{rash} = 192.593 + 70.229i$ МВА

$P'_{rash} := 192.593$ МВт $\quad$ $Q'_{rash} := 70.229$ Мвар

$$S_{rash} := \frac{\sqrt{P'^2_{rash} + Q'^2_{rash}}}{2\cdot 0.7} \qquad S_{rash} = 146.427 \text{ МВА}$$

Выбираем трансформатор АТДЦТН-200000/220/110.

По справочным данным находим сопротивления обмоток автотрансформатора.

$z_{nn} := 1.15 + j\cdot 54$ $\quad$ $z_{nn} = 1.15 + 54i$ Ом

$$z_{cn} := \frac{0.2 + j\cdot 0}{2} \qquad z_{cn} = 0.1 \text{ Ом}$$

$$z_{vn} := \frac{0.39 + j\cdot 30.4}{2} \qquad z_{vn} = 0.195 + 15.2i \text{ Ом}$$

Находим потери мощности в обмотках низшего напряжения автотрансформаторов:

$$\Delta S'_{nn} := \frac{\left(\frac{34}{2}\right)^2 + \left(\frac{12}{2}\right)^2}{220^2} \cdot z_{nn} \qquad \Delta S'_{nn} = 7.722\cdot 10^{-3} + 0.363i \text{ МВА}$$

$\Delta S_{nn} := 2\cdot\Delta S'_{nn}$ $\quad$ $\Delta S_{nn} = 0.015 + 0.725i$ МВА

Находим потери мощности в обмотках среднего напряжения автотрансформаторов:

$P_4 := 158.593$ МВт $\qquad Q_4 := 58.229$ Мвар

$$\Delta S_{cn} := \frac{P_4^{\,2} + Q_4^{\,2}}{220^2} \cdot Z_{cn} \qquad \Delta S_{cn} = 0.059 \quad \text{МВА}$$

Потоки мощности, входящие в обмотки НН и СН:

$S_{011n} := 34 + j \cdot 12 + \Delta S_{nn}$ $\qquad S_{011n} = 34.015 + 12.725i$ МВА

$S_{04n} := S_4 + \Delta S_{cn}$ $\qquad S_{04n} = 158.622 + 58.229i$ МВА

Поток мощности, выходящий из обмотки ВН:

$S_{30k} := S_{011n} + S_{04n}$ $\qquad S_{30k} = 192.638 + 70.954i$ МВА

Потери мощности в обмотках ВН:

$P_{30k} := 192.638$ МВт $\qquad Q_{30k} := 70.954$ Мвар

$$\Delta S_{vn} := \frac{P_{30k}^{\,2} + Q_{30k}^{\,2}}{220^2} \cdot Z_{vn} \qquad \Delta S_{vn} = 0.17 + 13.239i \quad \text{МВА}$$

$\Delta S_{xx} := 2 \cdot (0.125 + j \cdot 1)$ $\qquad \Delta S_{xx} = 0.25 + 2i$ МВА

Находим расчетную нагрузку узла 3:

$S_{30n} := S_{30k} + \Delta S_{vn}$ $\qquad S_{30n} = 192.837 + 84.193i$ МВА

$S_3 := S_{30n} + \Delta S_{xx} - j \cdot Q_{c23}$ $\qquad S_3 = 193.087 + 82.272i$ МВА

Находим потоки мощности в разомкнутой сети 1-2-3:

$P_3 := 193.087$ МВт $\qquad Q_3 := 82.272$ Мвар

$$\Delta S_{23} := \frac{P_3^{\,2} + Q_3^{\,2}}{220^2} \cdot Z_{23} \qquad \Delta S_{23} = 1.024 + 5.734i \quad \text{МВА}$$

$S_{23n} := S_3 + \Delta S_{23}$ $\qquad S_{23n} = 194.111 + 88.006i$ МВА

$S_{12k} := S_{23n} + S_2$ $\qquad S_{12k} = 294.637 + 119.395i$ МВА

$P_{12k} := 294.637$ МВт $\qquad Q_{12k} := 119.395$ Мвар

$$\Delta S_{12} := \frac{P_{12k}^{\,2} + Q_{12k}^{\,2}}{220^2} \cdot Z_{12} \qquad \Delta S_{12} = 8.614 + 48.236i \quad \text{МВА}$$

$S_{12n} := S_{12k} + \Delta S_{12}$ $\qquad S_{12n} = 303.251 + 167.631i$ МВА

Определяем напряжения в узлах сети 220 кВ:

Сопротивления участков сети и обмоток трансформаторов, а также перетоки активной и реактивной мощности в начале участков равны:

$R_{12} := 4.125$	Ом	$R_{67} := 1.815$	Ом
$R_{23} := 1.125$	Ом	$R_{47} := 3.63$	Ом
$R_{45} := 2.42$	Ом	$R_{68} := 0.972$	Ом
$R_{56} := 2.178$	Ом	$R_{910} := 0.648$	Ом
$R_{89} := 1.296$	Ом	$R_{vn} := 0.195$	Ом
$R_{cn} := 0.1$	Ом	$R_{nn} := 1.15$	Ом
$X_{12} := 23.1$	Ом	$X_{67} := 6.075$	Ом
$X_{23} := 6.3$	Ом	$X_{47} := 12.15$	Ом
$X_{45} := 8.1$	Ом	$X_{68} := 2.478$	Ом
$X_{56} := 7.29$	Ом	$X_{910} := 1.652$	Ом
$X_{89} := 3.304$	Ом	$X_{vn} := 15.2$	Ом
$X_{cn} := 0$	Ом	$X_{nn} := 54$	Ом

$P_{12n} := 303.251$	МВт	$Q_{12n} := 167.631$	Мвар
$P_{23n} := 194.111$	МВт	$Q_{23n} := 88.006$	Мвар
$P_{30n} := 192.837$	МВт	$Q_{30n} := 84.193$	Мвар
$P_{04n} := 158.622$	МВт	$Q_{04n} := 58.229$	Мвар
$P_{011n} := 34.015$	МВт	$Q_{011n} := 12.725$	Мвар
$P_{4'5n} := 89.815$	МВт	$Q_{4'5n} := 33.341$	Мвар
$P_{56n} := 48.11$	МВт	$Q_{56n} := 15.279$	Мвар
$P_{4''7n} := 68.778$	МВт	$Q_{4''7n} := 25.737$	Мвар
$P_{76n} := 40.29$	МВт	$Q_{76n} := 12.523$	Мвар
$P_{68n} := 62.696$	МВт	$Q_{68n} := 19.407$	Мвар
$P_{89n} := 44.254$	МВт	$Q_{89n} := 12.582$	Мвар
$P_{910n} := 23.031$	МВт	$Q_{910n} := 6.812$	Мвар

$$U_2 := U_1 - \left(\frac{P_{12n} \cdot R_{12} + Q_{12n} \cdot X_{12}}{\overline{U_1}} + i \cdot \frac{P_{12n} \cdot X_{12} - Q_{12n} \cdot R_{12}}{\overline{U_1}} \right)$$

$U_2 = 219.742 - 26.198i$ кВ

$$U_3 := U_2 - \left(\frac{P_{23n} \cdot R_{23} + Q_{23n} \cdot X_{23}}{\overline{U_2}} + i \cdot \frac{P_{23n} \cdot X_{23} - Q_{23n} \cdot R_{23}}{\overline{U_2}} \right)$$

$U_3 = 215.673 - 30.827i$ кВ $\quad |U_3| = 217.865$ кВ

Рассчитываем падения напряжения в обмотках автотрансформаторов и напряжения средней и низкой сторон, приведенные к высшей стороне.

$$\Delta U_{vn} := \frac{P_{30n} \cdot R_{vn} + Q_{30n} \cdot X_{vn}}{\overline{U_3}} + i \cdot \frac{P_{30n} \cdot X_{vn} - Q_{30n} \cdot R_{vn}}{\overline{U_3}}$$

$\Delta U_{vn} = 7.879 + 12.388i$ кВ

$U_0 := U_3 - \Delta U_{vn}$ $\quad U_0 = 207.794 - 43.215i$ кВ

$$\Delta U_{cn} := \frac{P_{04n} \cdot R_{cn} + Q_{04n} \cdot X_{cn}}{\overline{U_0}} + i \cdot \frac{P_{04n} \cdot X_{cn} - Q_{04n} \cdot R_{cn}}{\overline{U_0}}$$

$\Delta U_{cn} = 0.068 - 0.042i$ кВ

Напряжение средней стороны, приведенное к высшей стороне

$U_{СНВН} := U_0 - \Delta U_{cn}$ $\quad U_{СНВН} = 207.727 - 43.173i$ кВ

$|U_{СНВН}| = 212.166$ кВ

$$\Delta U_{nn} := \frac{P_{011n} \cdot R_{nn} + Q_{011n} \cdot X_{nn}}{\overline{U_0}} + i \cdot \frac{P_{011n} \cdot X_{nn} - Q_{011n} \cdot R_{nn}}{\overline{U_0}}$$

$\Delta U_{nn} = 5.098 + 7.709i$ кВ

Напряжение низкой стороны, приведенное к высшей стороне

$U_{ННВН} := U_0 - \Delta U_{nn}$ $\quad U_{ННВН} = 202.696 - 50.924i$ кВ

$|U_{ННВН}| = 210.434$ кВ

$k_{VCn} := \frac{230}{121}$ - номинальный коэффициент трансформации напряжения с высшей стороны на среднюю.

Действительное напряжение на стороне СН:

$$U_{CH} := \frac{U_{CHBH}}{k_{VCn}} \qquad U_{CH} = 109.282 - 22.713i \quad кВ \qquad \left|U_{CH}\right| = 111.618 \quad кВ$$

$k_{VNn} := \dfrac{230}{11}$ - номинальный коэффициент трансформации напряжения с высшей стороны на низшую.

Действительное напряжение на стороне НН:

$$U_{HH} := \frac{U_{HHBH}}{k_{VNn}} \qquad U_{HH} = 9.694 - 2.436i \quad кВ \qquad \left|U_{HH}\right| = 9.995 \quad кВ$$

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 ±8×1,5 %. Определяем желаемый номер отпайки РПН для обеспечения напряжения средней стороны, равного 118 кВ. Для чего найдем желаемый коэффициент трансформации по (4.27).

$$k_{VCjel} := \frac{\left|U_{CHBH}\right|}{118} \qquad k_{VCjel} = 1.798$$

Тогда по (178)

$$n_{pjel} := \frac{1 - \dfrac{k_{VCjel}}{k_{VCn}}}{\left(k_{VCjel} - 1\right)\cdot 0.015} \qquad n_{pjel} = 4.519$$

Округляем полученный номер отпайки РПН до ближайшего целого

$n_p := 5$

Находим напряжение средней стороны автотрансформатора после регулирования напряжения:

$$U_{CHf} := \frac{U_{CHBH}\cdot\left(\dfrac{1}{k_{VCn}} + n_p\cdot 0.015\right)}{1 + n_p\cdot 0.015} \qquad \left|U_{CHf}\right| = 118.633 \quad кВ$$

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.

$$U_{HHf} := \frac{U_{HHBH}}{k_{VNn} \cdot \left(1 + n_p \cdot 0.015\right)} \qquad \left|U_{HHf}\right| = 9.298 \quad кВ.$$

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.

$$S_{rashnn} := \sqrt{34^2 + 12^2} \qquad S_{rashnn} = 36.056 \quad МВА$$

Принимаем к установке линейный регулятор ЛТДН – 40000/10 со следующими данными $S_{ном}$=40 МВА, $U_{ном}$=11 кВ с диапазоном регулирования ±10×1,5 % .

Номер ответвления линейного регулятора рассчитывается по выражению

$$n_{LRjel} := \left(\frac{10.5 - \left|U_{HHf}\right|}{11}\right) \cdot \frac{1}{0.015} \qquad n_{LRjel} = 7.285$$

Принимаем стандартное ответвление линейного регулятора $n_{LR} := 7$

Действительное напряжение на шинах НН найдем по выражению (4.49).

$$U_{HHd} := U_{HHf} + n_{LR} \cdot 0.015 \cdot U_{HH} \qquad \left|U_{HHd}\right| = 10.453 \quad кВ$$

где $U_{НН}$ – номинальное напряжение линейного регулятора.

Рассчитываем напряжения в узлах сети 110 кВ.

$$U_5 := U_{CHf} - \left(\frac{P_{4'5n} \cdot R_{45} + Q_{4'5n} \cdot X_{45}}{\overline{U_{CHf}}} + i \cdot \frac{P_{4'5n} \cdot X_{45} - Q_{4'5n} \cdot R_{45}}{\overline{U_{CHf}}}\right)$$

$$U_5 = 111.018 - 28.643i \quad кВ \qquad \left|U_5\right| = 114.654 \quad кВ$$

$$U_{6'} := U_5 - \left(\frac{P_{56n} \cdot R_{56} + Q_{56n} \cdot X_{56}}{\overline{U_5}} + i \cdot \frac{P_{56n} \cdot X_{56} - Q_{56n} \cdot R_{56}}{\overline{U_5}}\right)$$

$$U_{6'} = 108.501 - 30.852i \quad кВ$$

$$U_7 := U_{CHf} - \left(\frac{P_{4''7n} \cdot R_{47} + Q_{4''7n} \cdot X_{47}}{\overline{U_{CHf}}} + i \cdot \frac{P_{4''7n} \cdot X_{47} - Q_{4''7n} \cdot R_{47}}{\overline{U_{CHf}}} \right)$$

$U_7 = 110.236 - 29.301i$ кВ

$$U_{6''} := U_7 - \left(\frac{P_{76n} \cdot R_{67} + Q_{76n} \cdot X_{67}}{\overline{U_7}} + i \cdot \frac{P_{76n} \cdot X_{67} - Q_{76n} \cdot R_{67}}{\overline{U_7}} \right)$$

$U_{6''} = 108.37 - 31.232i$ кВ

Напряжения в узле 6, рассчитанные с двух сторон, практически совпали.

$$U_8 := U_{6'} - \left(\frac{P_{68n} \cdot R_{68} + Q_{68n} \cdot X_{68}}{\overline{U_{6'}}} + i \cdot \frac{P_{68n} \cdot X_{68} - Q_{68n} \cdot R_{68}}{\overline{U_{6'}}} \right)$$

$U_8 = 107.149 - 32.074i$ кВ

$$U_9 := U_8 - \left(\frac{P_{89n} \cdot R_{89} + Q_{89n} \cdot X_{89}}{\overline{U_8}} + i \cdot \frac{P_{89n} \cdot X_{89} - Q_{89n} \cdot R_{89}}{\overline{U_8}} \right)$$

$U_9 = 105.885 - 33.212i$ кВ

$$U_{10} := U_9 - \left(\frac{P_{910n} \cdot R_{910} + Q_{910n} \cdot X_{910}}{\overline{U_9}} + i \cdot \frac{P_{910n} \cdot X_{910} - Q_{910n} \cdot R_{910}}{\overline{U_9}} \right)$$

$U_{10} = 105.545 - 33.507i$ кВ

Выбор номера отпайки РПН двухобмоточного трансформатора в узле 8.

Определим напряжение низшей стороны, приведенное к высшей стороне:

$$S_{8pr} := \frac{S_{pr8} - 2 \cdot (0.019 + j \cdot 0.112)}{2}$$ $S_{8pr} = 9.032 + 3.333i$ МВА

$P_{8pr} := 9.032$ МВт $Q_{8pr} := 3.333$ Мвар

$$U_{HHBH8} := U_8 - \left(\frac{P_{8pr} \cdot 4.38 + Q_{8pr} \cdot 86.7}{\overline{U_8}} + i \cdot \frac{P_{8pr} \cdot 86.7 - Q_{8pr} \cdot 4.38}{\overline{U_8}} \right)$$

$U_{HHBH8} = 102.29 - 38.064i$ кВ $\left| U_{HHBH8} \right| = 109.143$ кВ

Определяем напряжения на шинах НН трансформатора:

$$k_{tVNn} := \frac{121}{11}$$

$$U_{NN} := \frac{\left|U_{HHBH8}\right|}{k_{tVNn}} \qquad U_{NN} = 9.922 \quad кВ$$

Т.к. полученное напряжение не соответствует желаемому, находим желаемый коэффициент трансформации:

$$k_{tvnjel} := \frac{\left|U_{HHBH8}\right|}{10.5} \qquad k_{tvnjel} = 10.395$$

Определяем желаемый номер отпайки РПН:

$$n := \left(\frac{k_{tvnjel}}{k_{tvnn}} - 1\right) \cdot \frac{1}{0.0178} \qquad n = -3.092$$

Полученный номер отпайки РПН округляем до ближайшего целого

$$n_{ct} := -3$$

Находим фактическое напряжение на шинах НН после регулирования напряжения и сравниваем с желаемым:

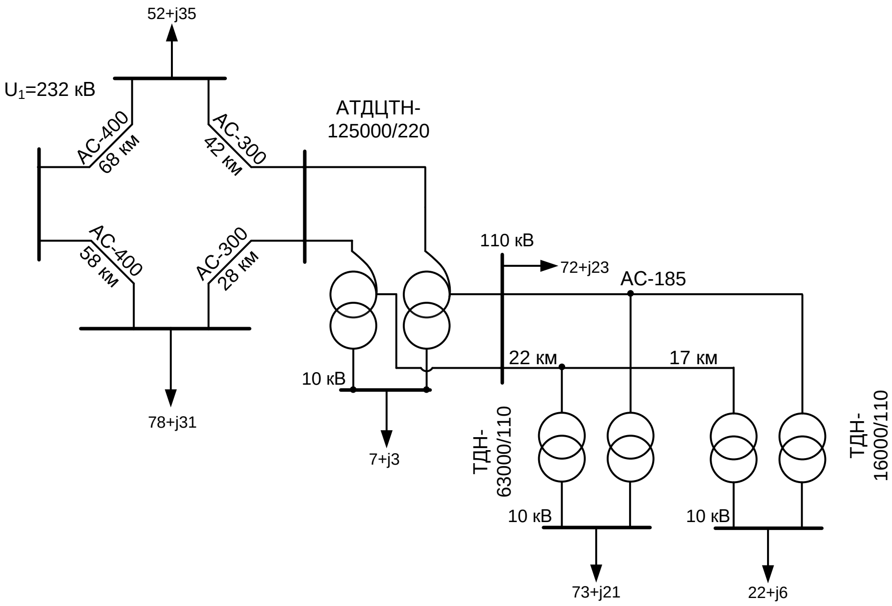
$$U_{HHf8} := \frac{U_{HHBH8}}{k_{tvnn} \cdot \left(1 + n_{ct} \cdot 0.0178\right)} \qquad \left|U_{HHf8}\right| = 10.482 \quad кВ$$

Фактическое напряжение практически совпало с желаемым, - следовательно, расчет проведен верно.

Задачи для самостоятельного решения

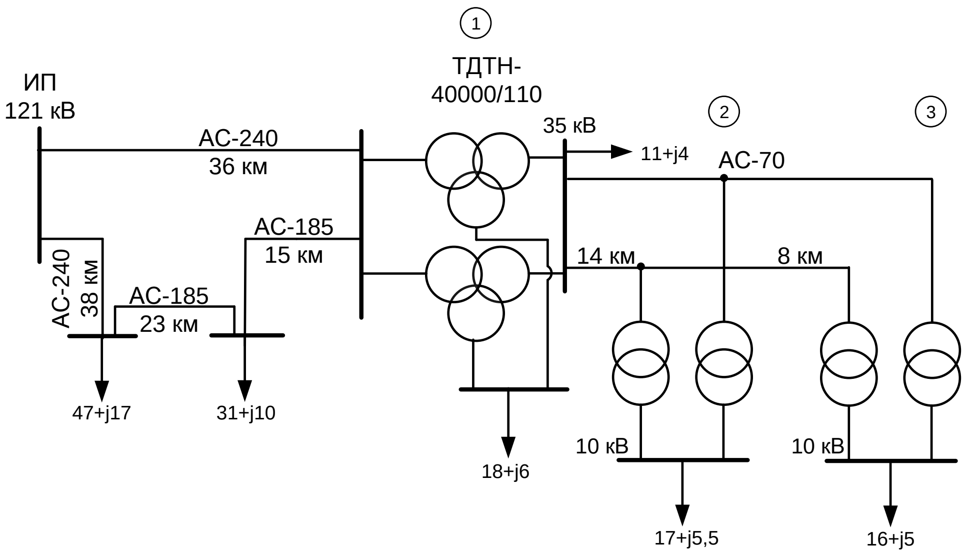
№ 1

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 10,3 кВ.



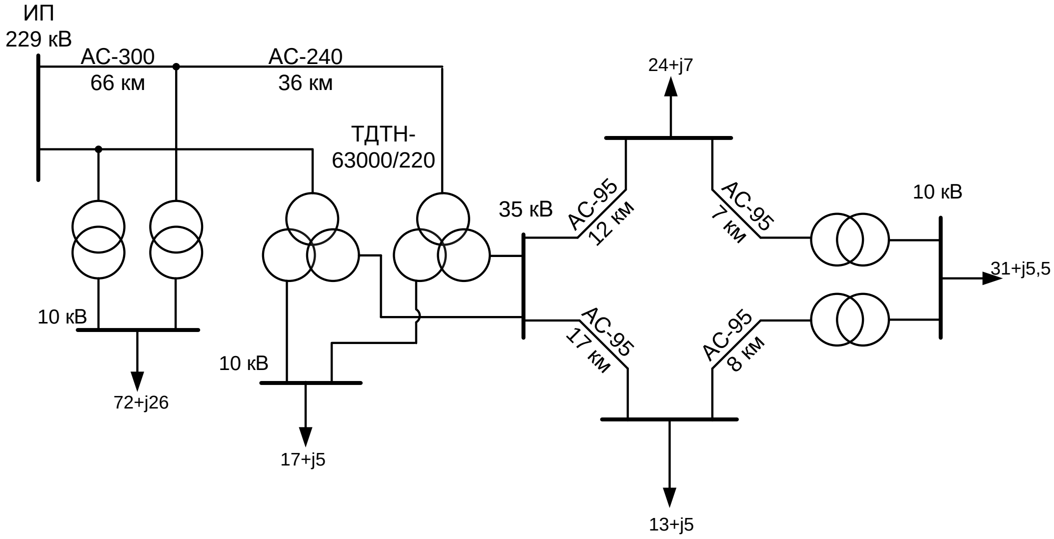
№ 2

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: 36 кВ и 10,3 кВ; подстанции 3 – 10,1 кВ.



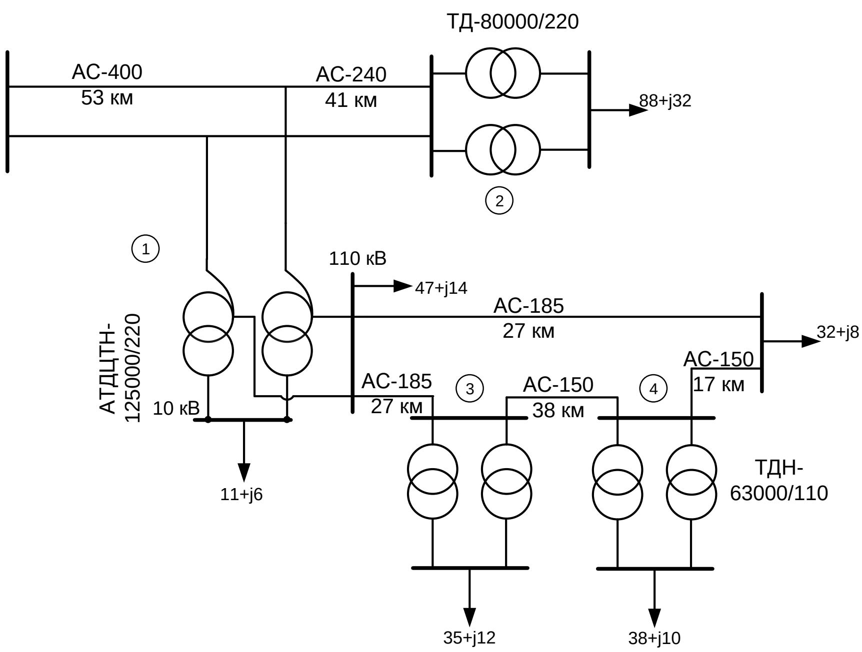
№ 3

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 35 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаек РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 10,3 кВ; подстанции 2 – 37,6 кВ и 10,5 кВ.



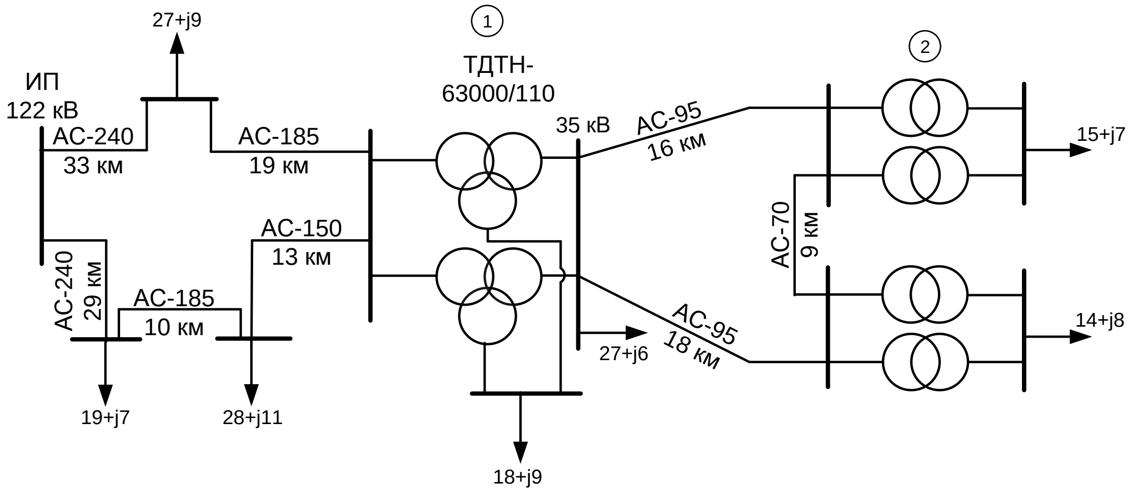
№ 4

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаек РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 121 кВ и 10,4 кВ; подстанции 4 – 10,5 кВ.



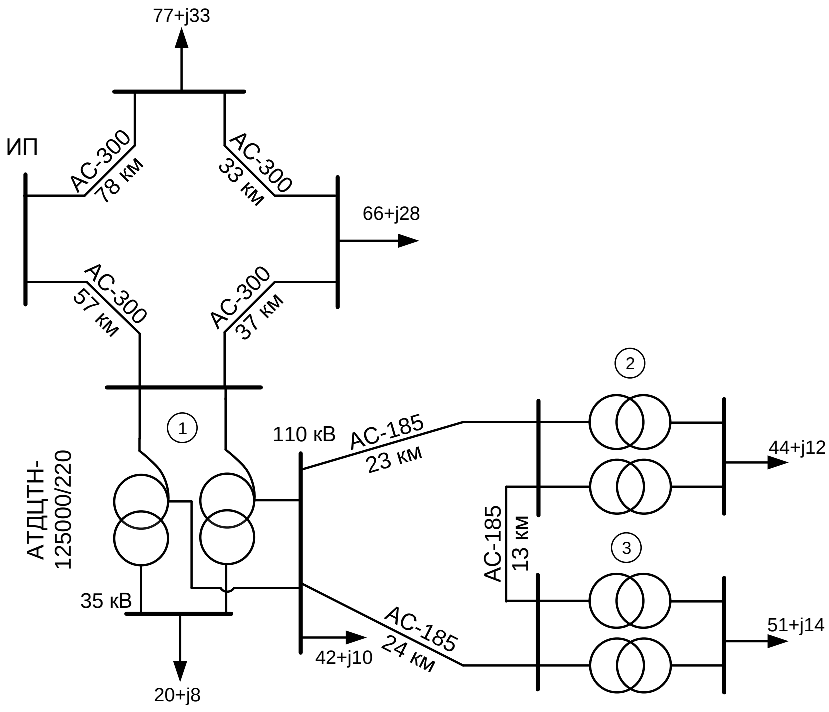
№ 5

Рассчитать режим сети двух напряжений 110 и 35 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаек РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 37,2 кВ и 10,3 кВ; подстанции 2 – 10,5 кВ.



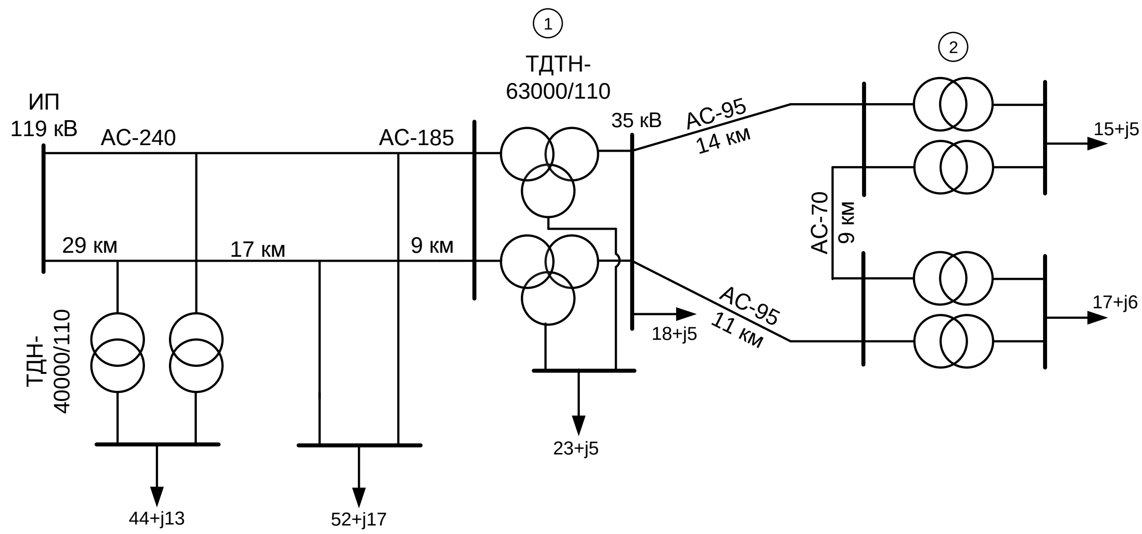
№6

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаек РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 119 кВ и 32,5 кВ; подстанции 3 – 10,1 кВ.



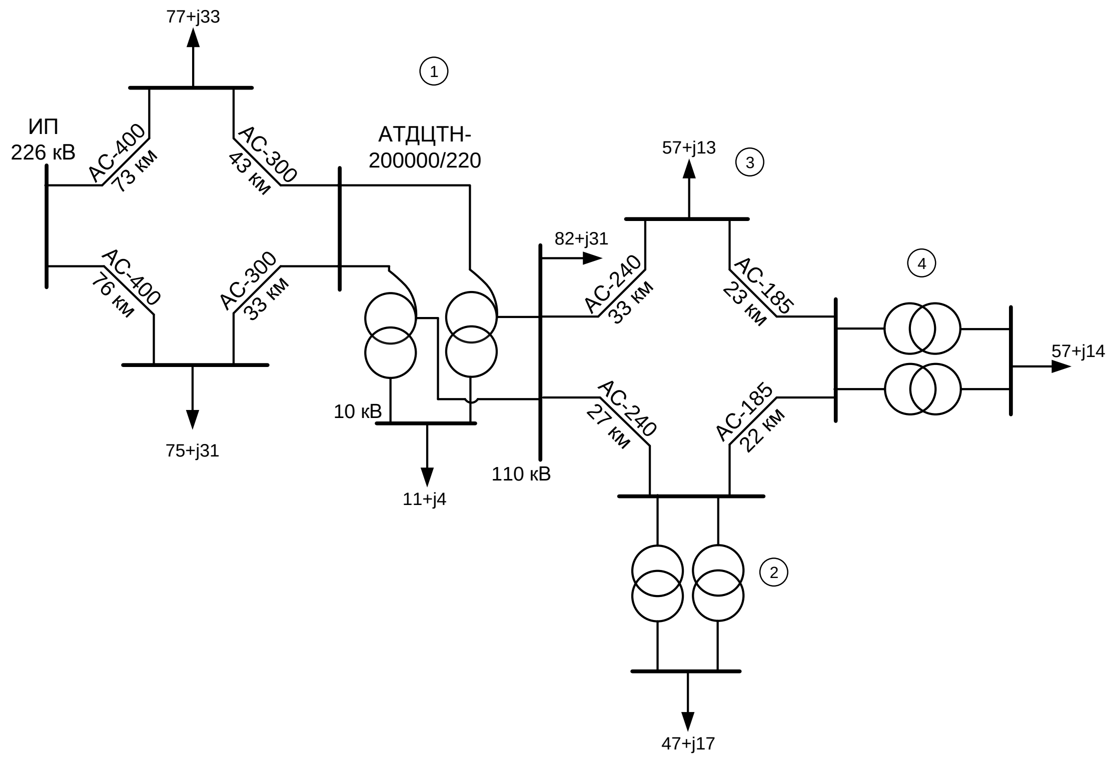
№ 7

Рассчитать режим сети двух напряжений 110 и 35 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаек РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 36 кВ и 10,4 кВ; подстанции 2 – 10,3 кВ.



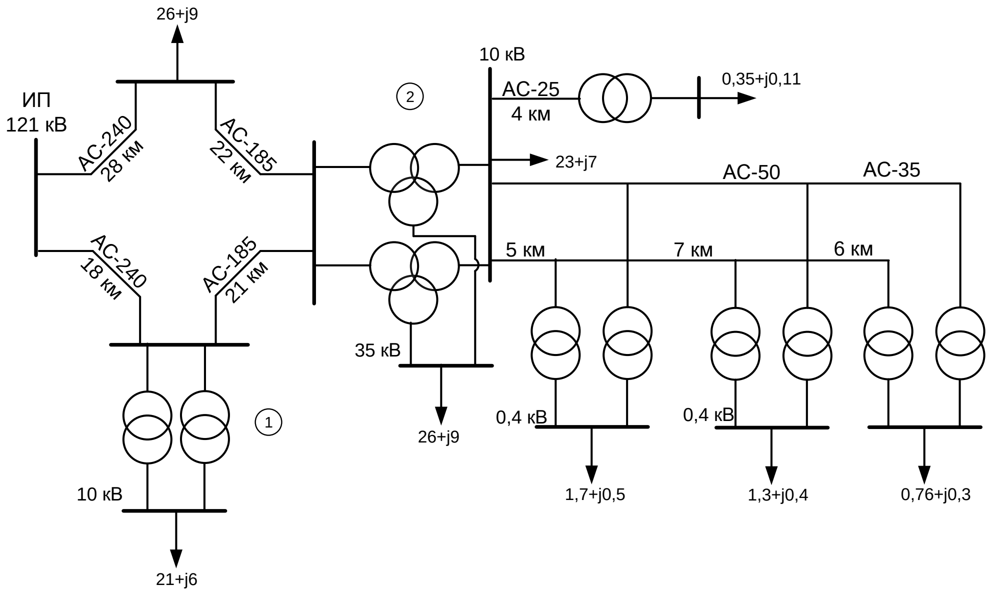
№ 8

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаек РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 120 кВ и 10,3 кВ; подстанции 4 – 10,1 кВ.



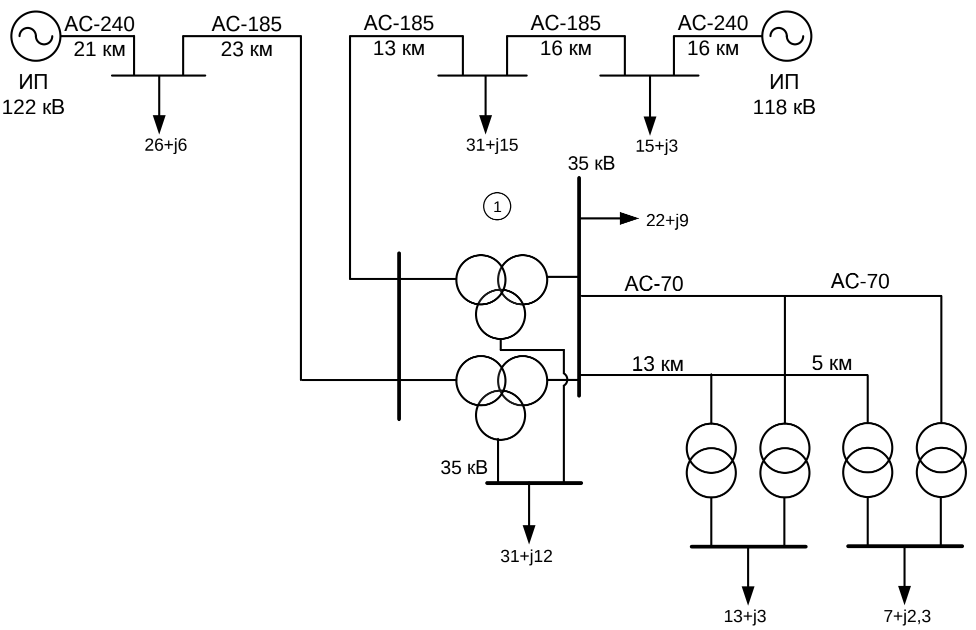
№ 9

Рассчитать режим сети двух напряжений 110 и 10 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаек РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 10,4 кВ ; подстанции 2 – 36,2 кВ и 10,2 кВ.



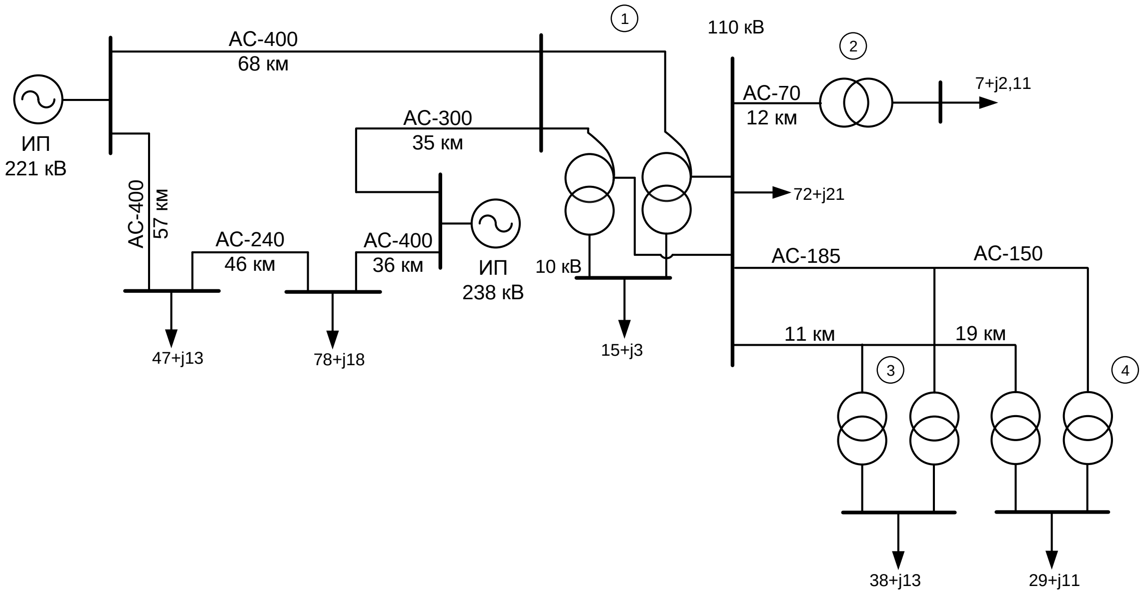
№ 10

Рассчитать режим сети двух напряжений 110 и 35 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаек РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 37,2 кВ и 10,5 кВ; подстанции 3 – 10,3 кВ.



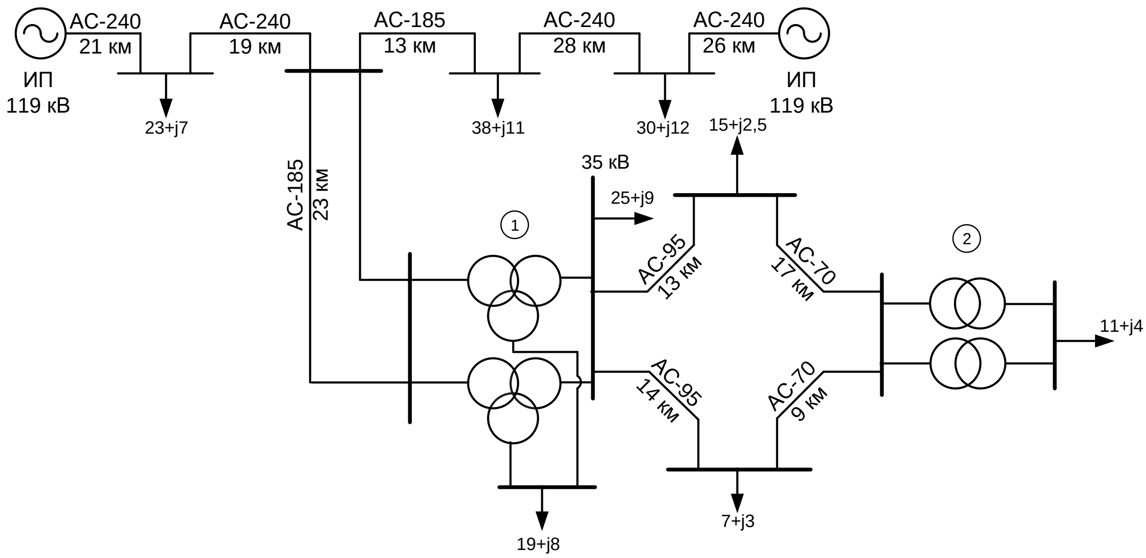
№11

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаек РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 117 кВ и 10,3 кВ; подстанции 4 – 10,4 кВ.



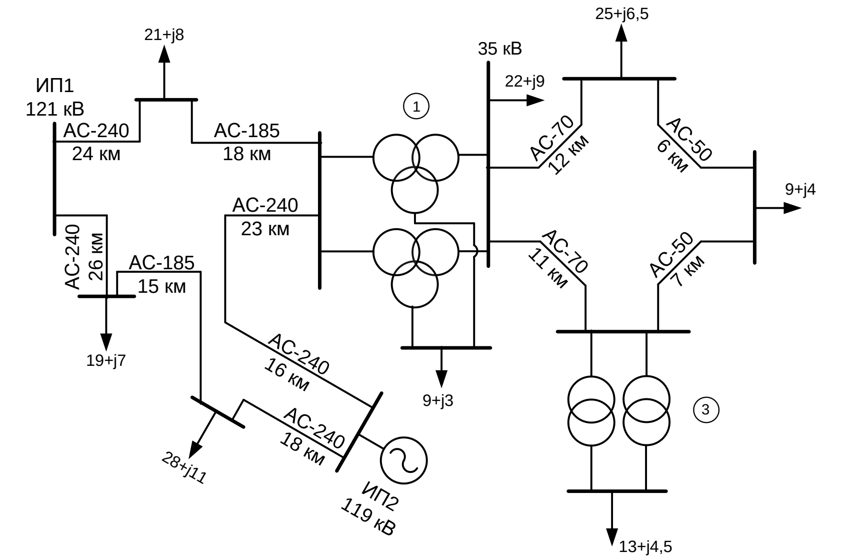
№ 12

Рассчитать режим сети двух напряжений 110 и 35 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаек РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 37,2 кВ и 10,4 кВ; подстанции 2 – 10 кВ.



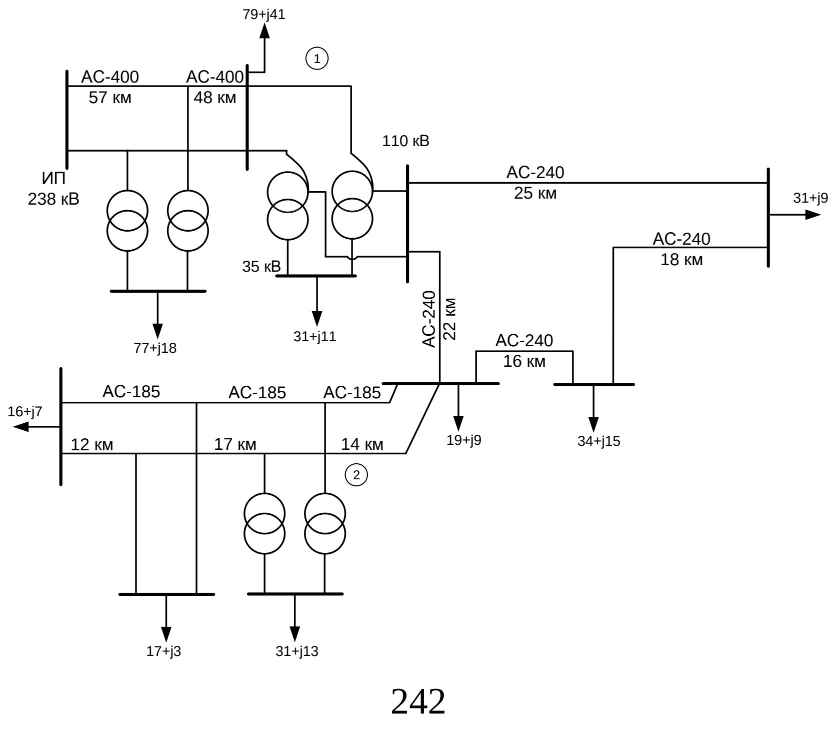
№13

Рассчитать режим сети двух напряжений 110 и 35 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаек РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 36,5 кВ и 10,5 кВ; подстанции 3 – 10,4 кВ.



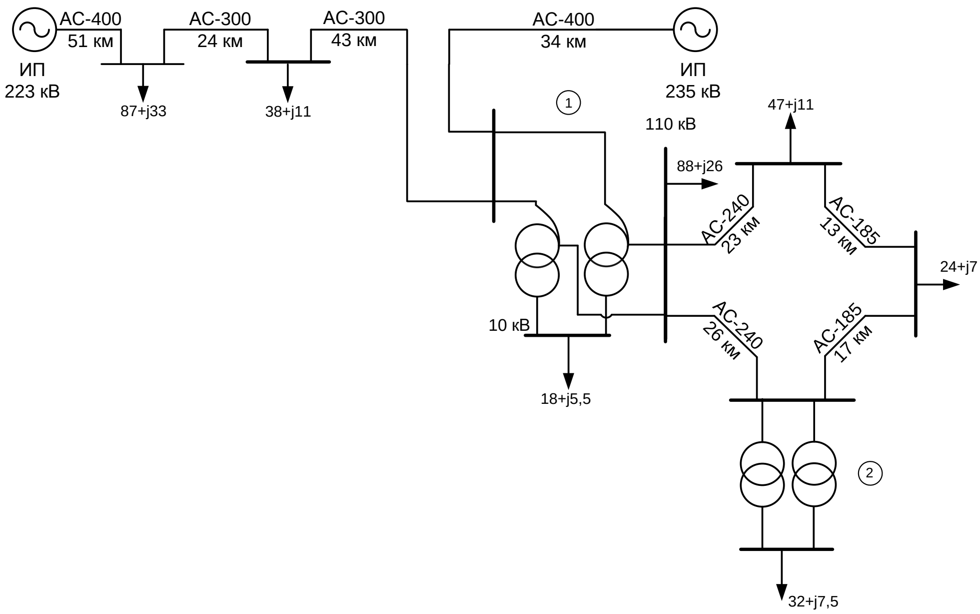
№14

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаек РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 118 кВ и 10,3 кВ; подстанции 2 – 10,2 кВ.



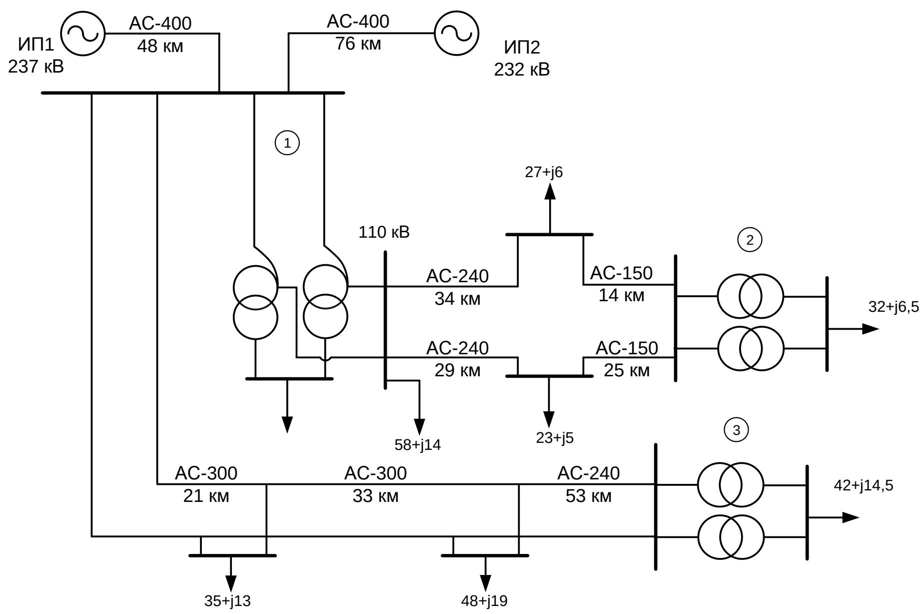
№ 15

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаек РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 118 кВ и 10,4 кВ; подстанции 2 – 10,3 кВ.



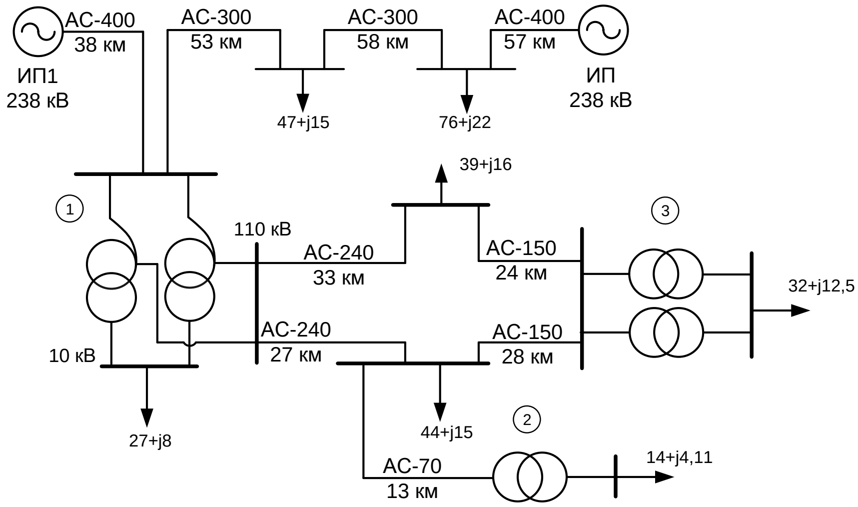
№ 16

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаек РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 117 кВ и 10,3 кВ; подстанции 3 – 10,2 кВ.



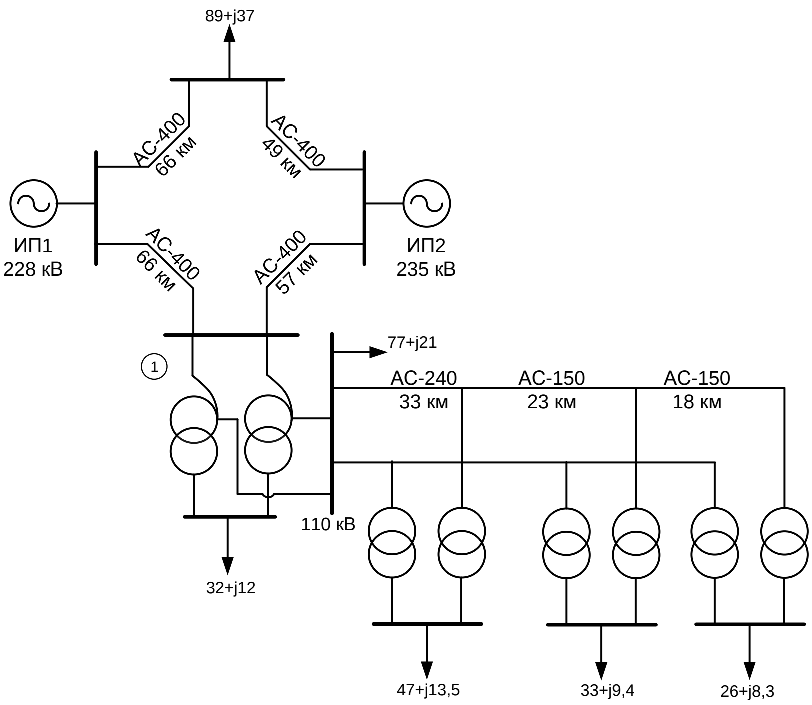
№ 17

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаек РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 115 кВ и 10,2 кВ; подстанции 3 – 10,3 кВ.



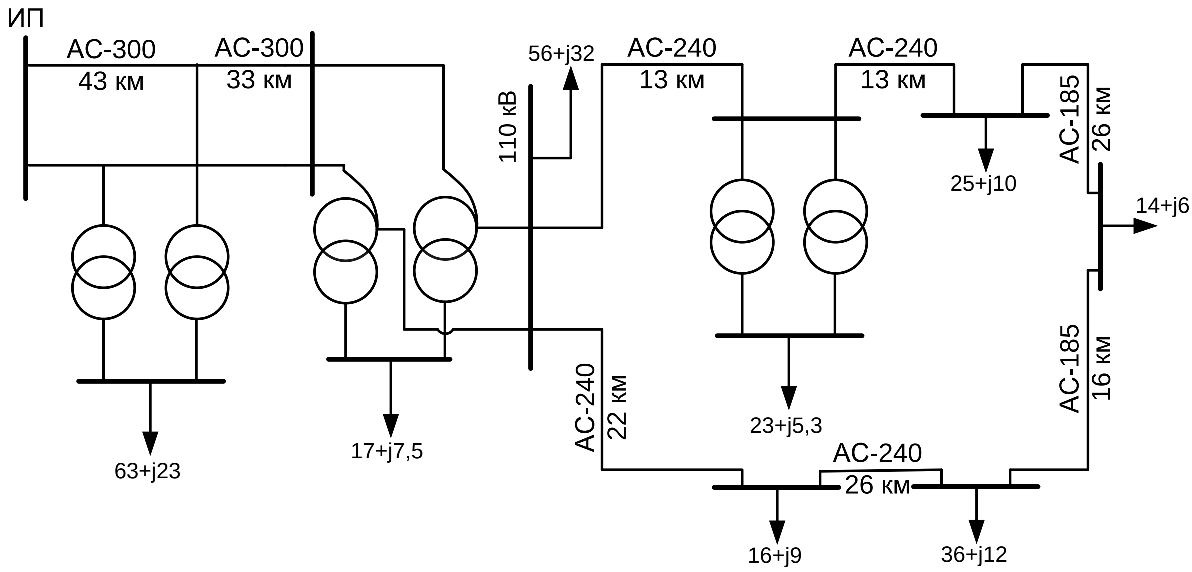
№ 18

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаек РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 118 кВ и 10,4 кВ; подстанции 2 – 10,2 кВ.



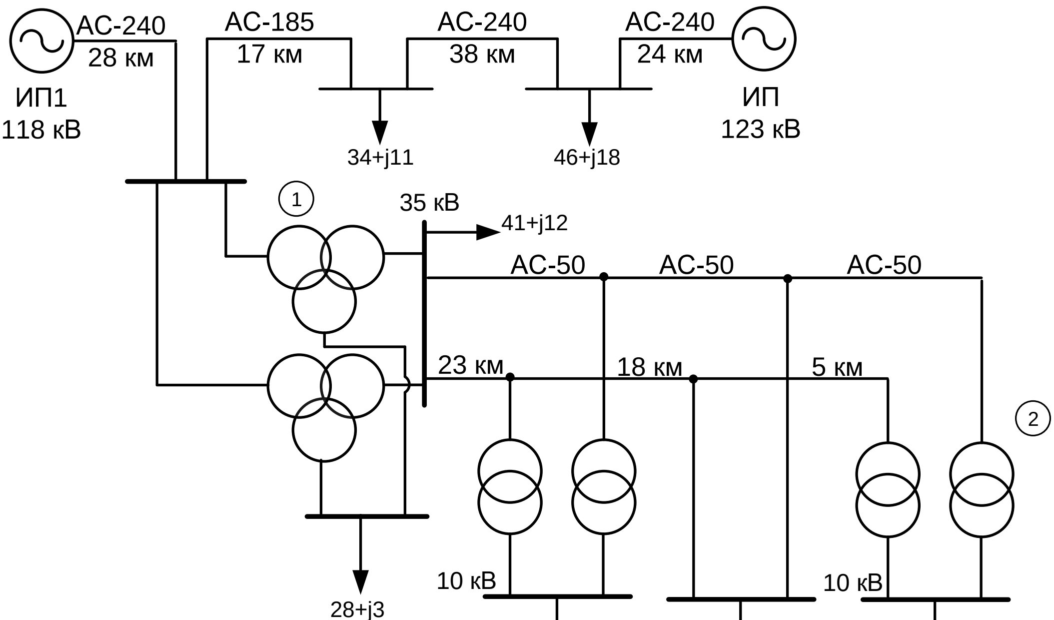
№ 19

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаек РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 122 кВ и 10,3 кВ; подстанции 4 – 10 кВ.



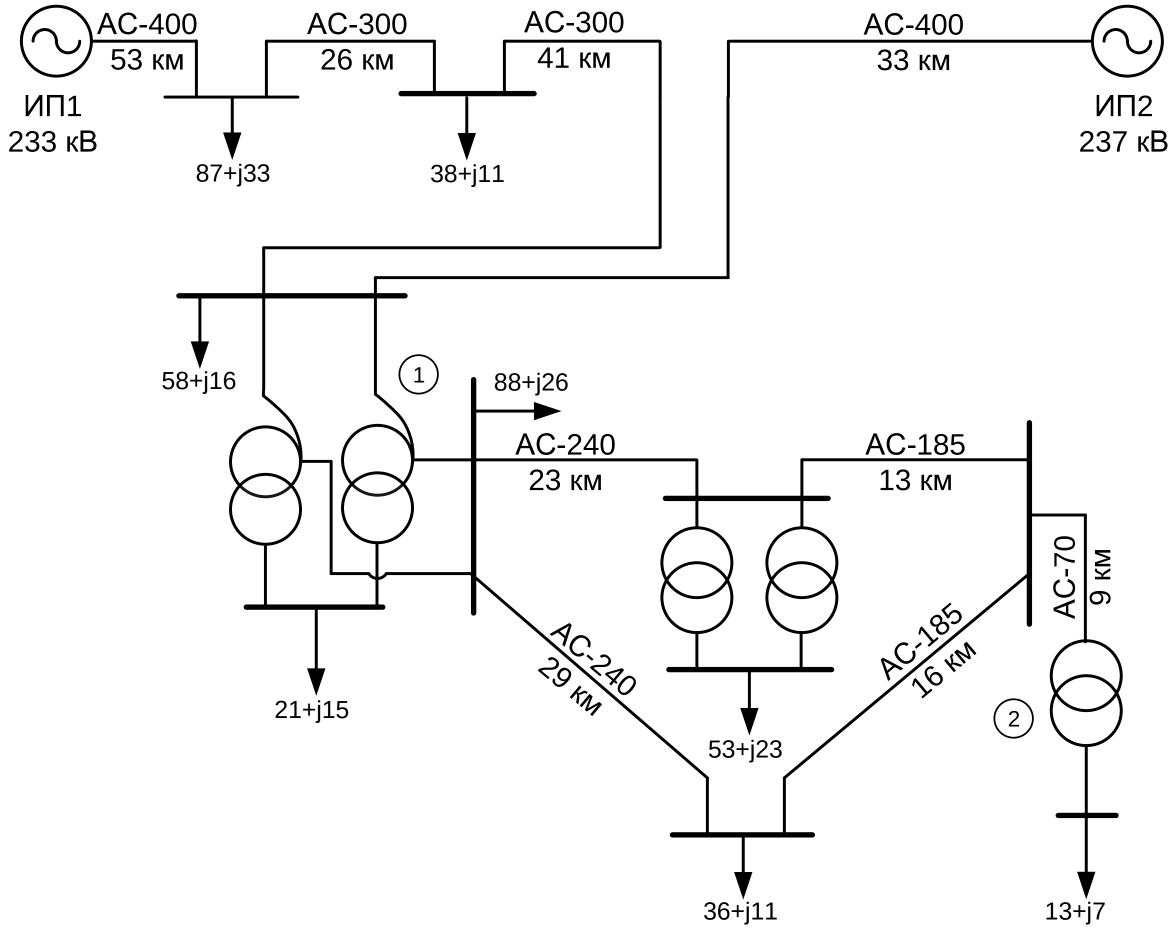
№ 20

Рассчитать режим сети двух напряжений 110 и 35 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаек РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 37 кВ и 10,4 кВ; подстанции 2 – 10,3 кВ.



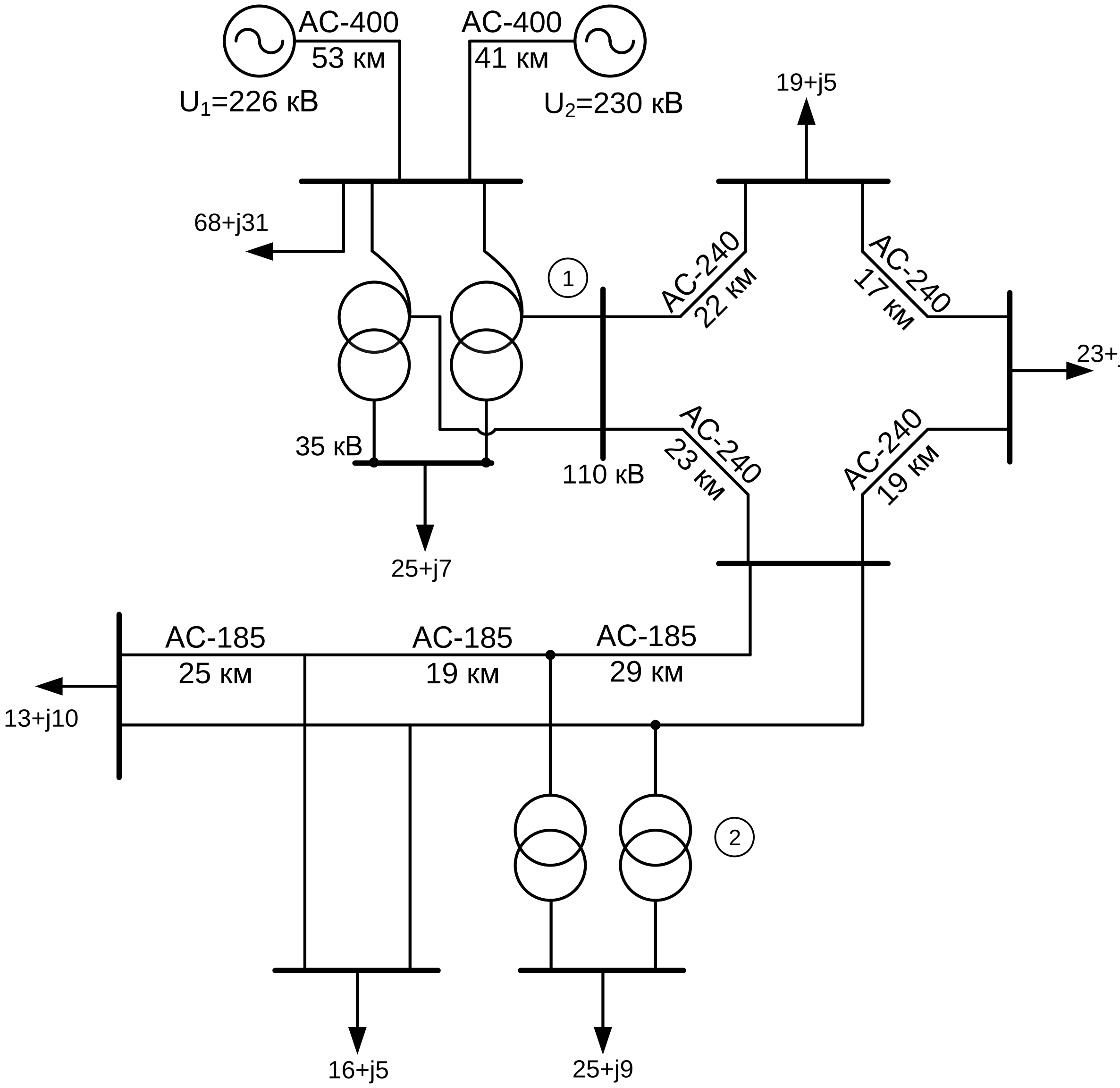
№21

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаек РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 120 кВ и 10,3 кВ; подстанции 2 – 10,3 кВ.



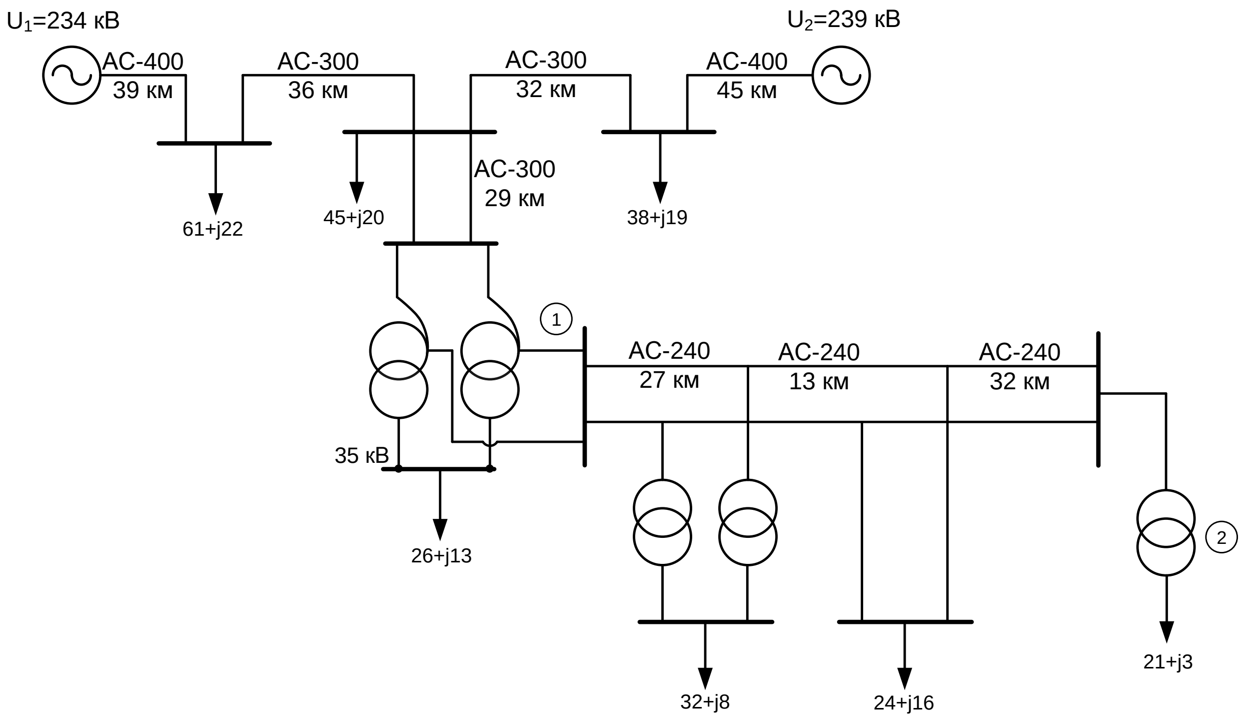
№ 22

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаек РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 119 кВ и 10,3 кВ; подстанции 2 – 10 кВ.



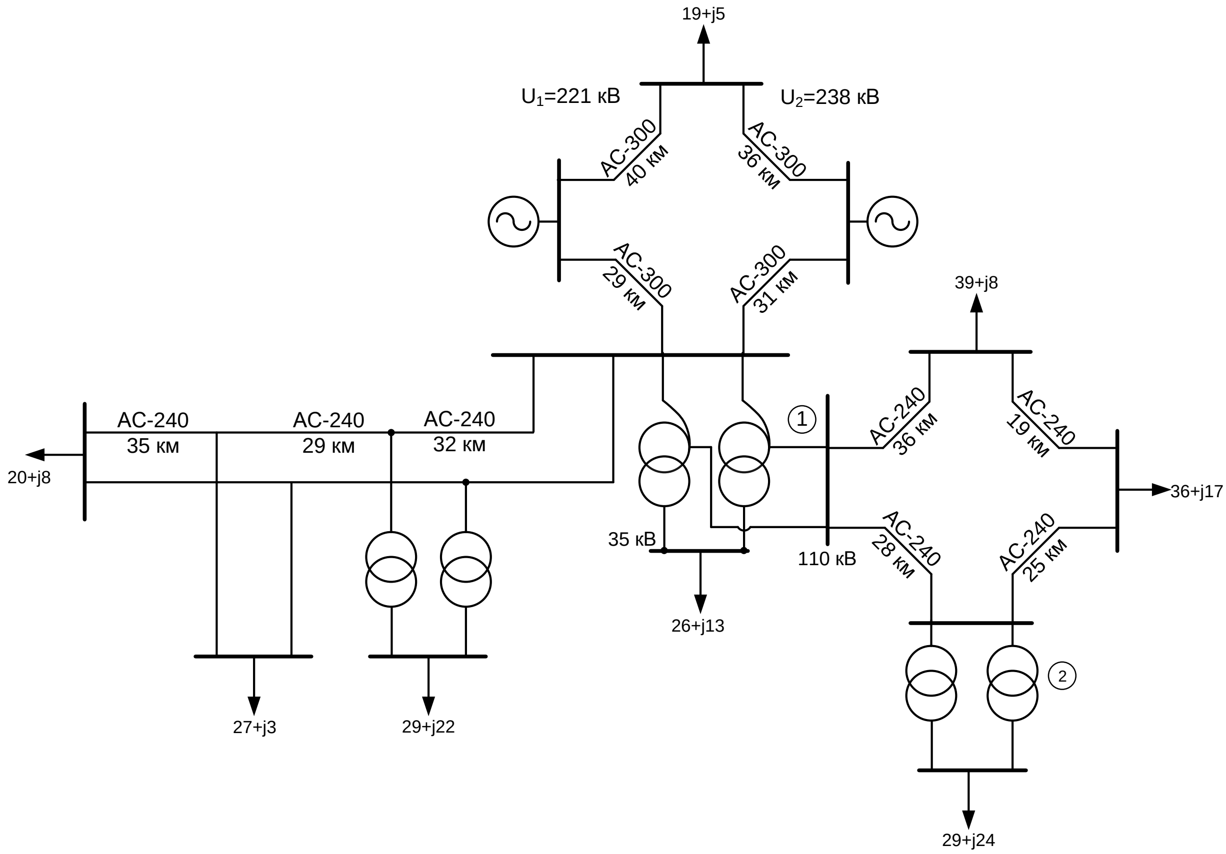
№ 23

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаек РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 120 кВ и 10,4 кВ; подстанции 2 – 10 кВ.



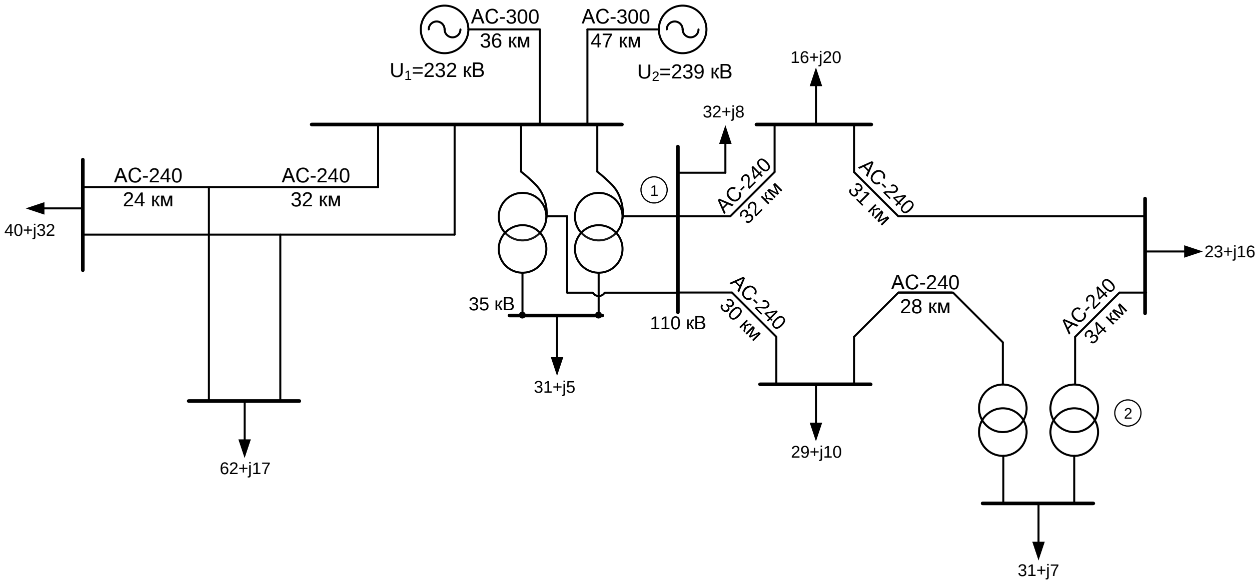
№ 24

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаек РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 121 кВ и 10,3 кВ; подстанции 2 – 10 кВ.



№ 25

Рассчитать режим сети двух напряжений 220 и 110 кВ для схемы, приведенной на рисунке. Выбрать номера отпаек РПН для поддержания уровней напряжения: на шинах подстанции 1 – 124 кВ и 10,2 кВ; подстанции 2 – 10 кВ.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При эксплуатации и проектировании электрических сетей одной из важных задач является оценка режимной ситуации. При этом рассматриваются установившиеся и переходные режимы. Режимы электрических сетей напрямую влияют на надежность и экономичность их функционирования. Параметры режима контролируются, по ним ведется управление электроэнергетической системой. Установившиеся режимы являются длительными. Исходя из вышесказанного, инженер-электрик должен уметь рассчитывать и анализировать эти режимы. Таким образом, бакалавру, обучающемуся по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника», необходимо получить навыки по расчету установившихся режимов сетей различной конфигурации, для чего и предназначено данное учебное пособие.

В пособии показано как составляются схемы замещения элементов электрических сетей и определяются их параметры. Дано понятие и область применения приведенной и расчетной нагрузки узлов. Приведены методы и алгоритмы расчета режимов разомкнутых и замкнутых сетей. Показано как обеспечить желаемое напряжение сети с помощью отпаек РПН и линейных регуляторов. По каждой из перечисленных тем приведены примеры расчета характерных электрических сетей различной конфигурацией с подробным объяснением каждого шага алгоритма расчета. Приведен анализ полученных результатов. Для проверки усвоения материала предложен по каждой теме банк задач.

Многочисленные примеры расчетов, приведенные в учебном пособии, позволят бакалавру сформировать профессиональную компетенцию «Способность рассчитывать режимы работы электроэнергетических установок различного назначения, определять состав оборудования и его параметры, схемы электроэнергетических объектов (ПК-16)» в соответствии с требованиями ФГОС ВПО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии : учеб. пособие: - М. : КНОРУС, 2012. – 648 с.
2. Идельчик В.И. Электрические системы и сети : учеб./ В. И. Идельчик. - 2-е изд., стер. - М. : Альянс, 2009. – 592 с. www.techliter.ru
3. Идельчик В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288с.
4. Лыкин А.В. Электрические системы и сети : учеб. Пособие. – М.: Университетская книга; Логос, 2006. – 254 с.
5. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 680с.
6. Основы современной энергетики в 2т. : Учеб. : рек. Мин. обр. РФ : Т2. Современная электроэнергетика / под ред. Е.В. Аметистова. – М.: Издат. дом МЭИ, 2010. – 632 с.
7. Пособие к курсовому и дипломному проектированию для электроэнергетических специальностей вузов : учеб. пособие / В.М. Блок, Г.К. Обушев, Л.В. Паперно; Ред. В.М. Блок. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Высш. шк., 1990. - 384 с.
8. Поспелов Г.Е. Электрические системы и сети: проектирование : учеб. пособие / Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин. - 2-е изд., испр. и доп. - Минск : Высш. шк., 1988. - 308 с.
9. Правила устройства электроустановок – 7-е изд.- М.: изд-во НЦ ЭНАС, 2003. – 704с.
10. Савина Н.В. Электрические сети в примерах и расчетах : учеб. пособие / Н.В. Савина, Ю.В. Мясоедов, Л.Н. Дудченко. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 1999.- 238 с.

11. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / Под ред. С.С. Рокотяна, И.М. Шапиро. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 352с.
12. Справочник по проектированию систем электроснабжения / Под ред. Ю.Г. Барыбина и др. – М.: Энергоатомиздат, 1990 – 576с.
13. Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций напряжением 35-750 кВ. Типовые решения, Энергосетьпроект, 2006 г.
14. Электрические системы. Электрические сети : Учеб. для электроэнерг. спец. вузов/ ред. В. А. Веников. -2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 1998. -512 с.
15. Электротехнический справочник : В 4 т./ Под общ. ред. В.Г. Герасимов, Под общ. ред. А.Ф. Дьяков, Под общ. ред. Н.Ф. Ильинский, Гл. ред. А.И. Попов Т. 3 : Производство, передача и распределение электрической энергии : справочное издание. -2002. - 964 с.
16. Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях. / Под ред. В.А. Веникова. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 504с.

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Савина Наталья Викторовна,

зав. кафедрой энергетики АмГУ, доктор техн. наук, профессор,

Мясоедов Юрий Викторович,

декан энергетического факультета АмГУ, канд. техн. наук, профессор,

Маркитан Василий Юрьевич,

ассистент кафедры энергетики АмГУ

Практикум по электрическим сетям. Учебное пособие.

Издательство АмГУ. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 15,9. Тираж 100. Заказ 599

Отпечатано в типографии АмГУ