

Министерство образования и науки Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

С.В. РОДЫГИНА

ПРОЕКТИРОВАНИЕ
И ЭКСПЛУАТАЦИЯ СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

ОТ ТЕОРИИ К ПРАКТИКЕ

Утверждено
Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2018

УДК 621.311.1+621.315.05](075.8)
Р 617

Рецензенты
канд. техн. наук, доцент *Д.А. Павлюченко*
канд. техн. наук, доцент *М.А. Купарев*

Работа подготовлена на кафедре систем электроснабжения

Родыгина С.В.

Р 617 Проектирование и эксплуатация систем электроснабжения. От теории к практике: учебное пособие / С.В. Родыгина. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 100 с.

ISBN 978-5-7782-3628-8

Одной из основных задач данного пособия является закрепление у студентов знаний теоретического курса, изучаемого в первом семестре I курса. Кроме того, решение практических задач поможет лучше понять и представить физические процессы, происходящие в электрических сетях при передаче и распределении электроэнергии.

Предназначено для студентов электроэнергетических специальностей направления 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения.

УДК 621.311.1+621.315.05](075.8)

ISBN 978-5-7782-3628-8

© Родыгина С.В., 2018
© Новосибирский государственный
технический университет, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Практическое занятие 1. Составление схемы замещения ВЛ 10 кВ. Определение параметров схем замещения.....	5
Практическое занятие 2. Составление схемы замещения ВЛ и КЛ 0,38–35 кВ. Воздушные ЛЭП 110–220 кВ. Определение параметров схем замещения.....	15
Практическое занятие 3. Двухобмоточные трансформаторы в элек- трических сетях. Определение характеристик параметров схем замещения. Двухобмоточные трансформаторы с расщепленной вторичной обмоткой.....	33
Практическое занятие 4. Трехобмоточные трансформаторы и автотрансформаторы в схемах ЭЭС. Определение параметров схемы замещения при различном задании исходных данных.....	46
Практическое занятие 5. Расчет установившегося режима линии элек- тропередачи при различном способе задания исходных данных.....	57
Практическое занятие 6. Расчет установившегося режима сети, содержащей несколько промежуточных нагрузок	69
Практическое занятие 7. Расчет электрического режима сети, содержащей различные номинальные напряжения.....	78
Практическое занятие 8. Расчет установившегося режима замкнутой электрической сети.....	82
Библиографический список	99

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Проектирование и эксплуатация систем электроснабжения» необходима для формирования профессиональной подготовки магистров направления 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования.

Представленное учебное пособие по практическим занятиям дисциплины «Проектирование и эксплуатация систем электроснабжения» предназначено для студентов электроэнергетических специальностей направления 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Автор стремился показать наиболее типичные задачи, возникающие при расчетах, анализе работы и проектировании сетей электрических систем. Это, в первую очередь, представление в схемах замещения элементов электрических сетей с определением их параметров, основные инженерные методы расчета установившихся нормальных режимов на примерах разомкнутых и простых замкнутых сетей. Отдельно выделены задачи расчета режима линий электропередачи, работающей на холостом ходе, электропередачи с несколькими промежуточными нагрузками и электропередачи, содержащей различные номинальные напряжения. В каждой задаче проанализированы полученные результаты, что способствует лучшему усвоению материала. Материал изложен достаточно простым и понятным языком.

Данное учебное пособие поможет студентам в изучении теоретического курса и закреплении знаний при подготовке к экзамену.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 1

СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ВЛ 10 кВ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

Задача 1.1. Требуется определить погонные параметры кабельной линии (КЛ) длиной 5 км с номинальным напряжением 10 кВ, прокладываемой в земле и выполненной кабелем марки СБ 10–3×25, и вычислить параметры схемы замещения этой линии.

Решение

Погонные параметры кабеля СБ 10–3×25 с медными жилами сечением 25 мм² и номинальным напряжением 10 кВ находим по справочным данным:

$$R_0 = 0,740 \text{ Ом/км}, X_0 = 0,099 \text{ Ом/км}, q_0 = 8,6 \text{ квар/км}.$$

Принимая среднее значение удельного сопротивления для электро-технической меди $\rho = 17,5 \div 18,5 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{км}}$, рассчитываем погонное активное сопротивление кабеля:

$$R_0 = \frac{\rho}{F} = \frac{18,0}{25} = 0,720 \text{ Ом/км}.$$

Используя табличные данные для всей линии, имеем

$$R = 0,740 \cdot 5,0 = 3,70 \text{ Ом};$$

$$X = 0,099 \cdot 5,0 = 0,50 \text{ Ом};$$

$$Q = 8,6 \cdot 5,0 = 43,0 \text{ квар}.$$

Для оценки целесообразности учета емкостной проводимости в схеме замещения

$$B_c = \frac{43,0}{10^2} 10^{-3} = 4,3 \cdot 10^{-6} \text{ См}$$

сопоставим зарядную мощность, определяемую этой проводимостью, с длительно допустимой нагрузкой.

Длительно допустимый ток по нагреву для рассматриваемого кабеля равен 120 А [16].

Этому току соответствует полная мощность

$$S_{\text{макс}} = \sqrt{3} \cdot 10,0 \cdot 120 = 2078 \text{ кВА.}$$

Следовательно,

$$\frac{Q_c}{S_{\text{макс}}} = \frac{43,0}{2078} 100 \% = 2,07 \%$$

Полученная величина зарядной мощности не может оказать заметного влияния на результаты расчетов электрических режимов распределительной сети 10 кВ, хотя и соизмерима с мощностью небольших потребителей этих сетей. Поэтому можно эту мощность не учитывать и исключить из схемы замещения емкостную проводимость.

Для индуктивного сопротивления имеем

$$\frac{X}{R} = \frac{0,50}{3,70} 100 \% = 13,5 \%$$

Индуктивное сопротивление представляет заметную величину, поэтому должно быть учтено в схеме замещения (рис. 1.1), содержащей продольные активное и индуктивное сопротивления.

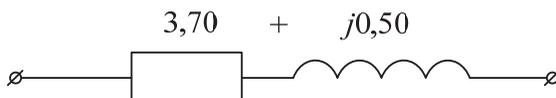


Рис. 1.1. Схема замещения КЛ 10 кВ

Влияние индуктивного сопротивления может быть существенным на потери напряжения в КЛ, питающей потребителей с низким коэффициентом мощности.

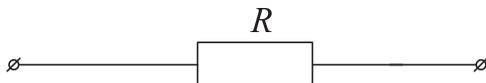


Рис. 1.2. Схема замещения КЛ с жилами относительно небольшого сечения

При меньших сечениях кабелей, особенно с алюминиевыми жилами, величина индуктивного сопротивления не превышает 10 %, поэтому может не учитываться. В таких условиях кабельная линия представляется схемой замещения, содержащей только активное сопротивление (рис. 1.2).

Задача 1.2. В связи с реконструкцией распределительной сети на участке длиной 10,0 км планируется замена воздушной линии (ВЛ) с номинальным напряжением 6 кВ, выполненной проводом А 50, на ВЛ 10 кВ с проводом АС 50/8. Демонтируемая ВЛ 6 кВ сооружена на одностоечных цельных деревянных опорах с расположением проводов по вершинам равнобедренного треугольника (рис. 1.3, а), новая ВЛ 10 кВ спроектирована на одностоечных деревянных опорах с железобетонными приставками и металлическими траверсами, с расположением проводов по вершинам равностороннего треугольника (рис. 1.3, б).

Требуется сопоставить погонные параметры ВЛ 6 кВ и 10 кВ и их допустимые мощности.

Решение

Определим параметры схемы замещения линий, руководствуясь физическими характеристиками проводов и данными конструкции ВЛ. Расчетные параметры сопоставим с табличными.

Примем среднее значение удельного активного сопротивления для алюминиевой проволоки $\rho = 30 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{км}$ из диапазона 29,0... 31,5 Ом·мм²/км. Тогда погонное активное сопротивление приближенно можно определить по формуле

$$R_0 = \frac{\rho}{F} = \frac{30}{50} = 0,600 \text{ Ом/км.}$$

Это значение равнопригодно для проводов А 50 и АС 50/8, так как сопротивление стального троса ($\rho = 30 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{км}$) значительно больше алюминиевой части провода, несущей подавляющую токовую

нагрузку. Для меньших сечений, например А 25 и АС 25, различие R_0 более ощутимо.

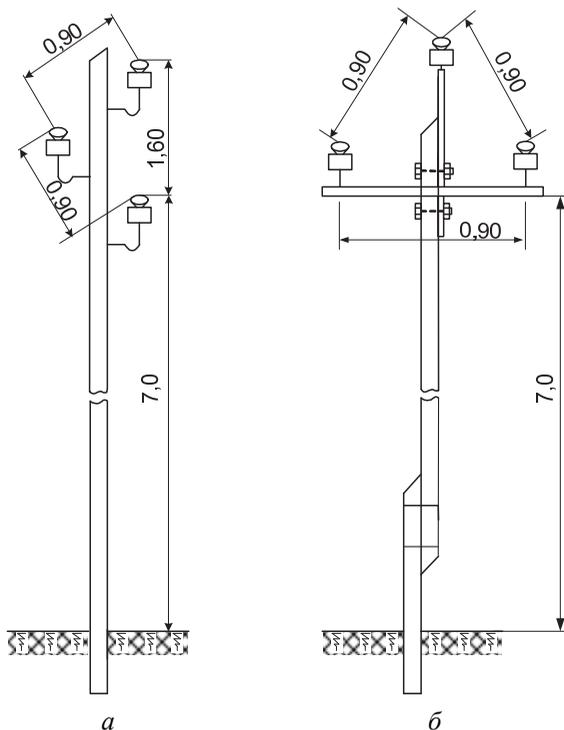


Рис 1.3. Промежуточные одноэтажные опоры ВЛ на напряжение 6–10 кВ (размеры в метрах) с расположением проводов по вершинам:

a – равнобедренного треугольника; *б* – равностороннего

Уточним значение R_0 по известной марке электротехнической проволоки. Например, для проволоки марки АПТ (полутвердая) имеем $\rho \approx 29,3 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{км}$.

Отметим, что фактическая площадь сечения многопроволочных проводов составляет около 98...99 % от номинальной [16]. В данном случае для проводов А 50 и АС 50/8 имеем $F_{\text{факт}} = 48,2 \text{ мм}^2$. Тогда с учетом увеличения фактической длины многопроволочных проводов

на 2...3 % из-за скрутки и удлинения на 1...2 % вследствие провеса имеем

$$R_0 = (1,03 \div 1,05) \frac{\rho}{F_{\text{факт}}} \approx 1,04 \frac{29,3}{48,2} = 0,632 \text{ Ом/км},$$

что незначительно отличается от расчетного значения, полученного по усредненным и номинальным данным.

Из сопоставления расчетного значения $R_0 = 0,60$ Ом/км с табличными значениями различных источников [16], лежащих в пределах $R_0 = 0,592...0,65$, видно, что изменение расчетного значения R_0 находится в пределах погрешности исходных данных о ВЛ, а его величина может быть принята в качестве фактического значения погонного активного сопротивления.

Определим реактивные параметры ВЛ.

Среднегеометрическое расстояние между фазами:

– для ВЛ 6 кВ (рис. 1.3, а)

$$D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{1,60 \cdot 0,90 \cdot 0,90} = 1,09 \text{ м};$$

– для ВЛ 10 кВ (рис. 1.3, б)

$$D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{0,90 \cdot 0,90 \cdot 0,90} = 0,90 \text{ м}.$$

Не используя справочных данных, фактический радиус многопроволочных проводов можно определить непосредственно по суммарной площади алюминиевой и стальной части проводов, увеличив ее (из-за скрутки многопроволочных проводов) на 10...15 %, для АС 50/8 получим

$$r_{\text{пр}} = 1,15 \sqrt{\frac{50+8}{3,14}} = 4,94 \text{ мм},$$

что соответствует фактическим данным провода:

$$r_{\text{пр}} = \frac{9,6}{2} = 4,8 \text{ мм}.$$

Для провода А 50 имеем

$$r_{\text{пр}} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{50}{3,14}} = 4,59 \text{ мм},$$

а фактические данные $r_{\text{пр}} = 4,5 \text{ мм}$ [16].

С учетом найденных расчетных значений $D_{\text{ср}}$ и $r_{\text{пр}}$, определим погонные индуктивные сопротивления:

– для ВЛ 6 кВ

$$X_0 = 0,144 \cdot \lg \frac{1,09 \cdot 10^3}{4,59} + 0,016 = 0,358 \text{ Ом/км};$$

– для ВЛ 10 кВ

$$X_0 = 0,144 \cdot \lg \frac{0,90 \cdot 10^3}{4,94} + 0,016 = 0,342 \text{ Ом/км}.$$

С достаточной точностью для обеих ВЛ можно принять $X_0 = 0,35 \text{ Ом/км}$.

Из сопоставления этого результата с табличными значениями для наиболее часто используемых сечений алюминиевых и сталеалюминевых проводов сечением 35, 50, 70 мм² для различных конструкций ВЛ 6 и 10 кВ ($D_{\text{ср}} \approx 1 \text{ м}$) [16] видно, что реактивное сопротивление линии X_0 можно рассматривать как константу, характерное значение которой можно принять около 0,35...0,36 Ом/км, не выполняя расчетов, часто требующих оперативно недоступных данных о конструкции конкретной ВЛ, а главное – не дающих для практики значимых уточнений результатов.

Дадим оценку емкостной проводимости линий.

Для ВЛ 6 кВ имеем

$$b_0 = \frac{7,58}{\lg \frac{1,09 \cdot 10^3}{4,59}} \cdot 10^{-6} = 3,19 \cdot 10^{-6} \text{ См/км};$$

для ВЛ 10 кВ

$$b_0 = \frac{7,58}{\lg \frac{0,90 \cdot 10^3}{4,94}} \cdot 10^{-6} = 3,35 \cdot 10^{-6} \text{ См/км.}$$

Примем среднее значение $b_0 \approx 3,27 \cdot 10^{-6}$ См/км. Найденная емкостная проводимость в $86/3,35 = 25,7$ раза меньше емкостной проводимости кабельной линии того же номинального напряжения.

Зарядная мощность ВЛ будет также в 25,7 раза меньше зарядной мощности КЛ того же класса напряжения, влияние которой на режим этой линии оценивается как незначительное. Следовательно, в схеме замещения воздушных линий этим влиянием с еще большим основанием можно пренебречь. Данный вывод с достаточным основанием может быть распространен на ВЛ до 35 кВ включительно.

Индуктивное сопротивление как в этом случае

$$\frac{X_0}{R_0} = \frac{0,35}{0,60} \cdot 100 \% = 58,3 \%,$$

так и для всего диапазона сечений проводов (25...95 мм²), применяемых для ВЛ 6,10 кВ, соизмеримо с активным сопротивлением

$$\frac{X_0}{R_0} = \frac{0,35}{0,35 - 1,38} \cdot 100 \% = 25 \cdot 100 \%,$$

поэтому оно должно быть учтено в схеме замещения, представляемой в рассматриваемых условиях (рис. 1.4) продольными активным и индуктивным сопротивлениями:

$$\underline{Z} = (0,06 + j0,35) \cdot 10,0 = 6,0 + j3,5 \text{ Ом.}$$



Рис. 1.4. Схема замещения ВЛ 6–10 кВ

Рассматриваемые ВЛ 6 кВ и 10 кВ характеризуются практически одинаковыми параметрами схемы замещения и предельным током по условиям нагрева, равным $210 \div 215$ А. Этому току соответствует полная мощность для ВЛ 6 кВ $S_{\max} = \sqrt{3} \cdot 6,0 \cdot 210 \cdot 10^{-3} = 2,18$ МВА, а для ВЛ 10 кВ $S_{\max} = \sqrt{3} \cdot 10,0 \cdot 210 \cdot 10^{-3} = 3,64$ МВА.

Таким образом, в данном случае перевод ВЛ с 6 на 10 кВ при неизменном сечении проводов на две трети увеличивает предельную мощность электропередачи.

Задача 1.3. Определить потребность в проводе АС 50/8 для монтажа (реконструкции) ВЛ 10 кВ протяженностью 5,0 км.

Решение

Потребность проводникового материала определяется в виде общего веса и суммарной протяженности проводов трех фаз на основе оценки (приближенного расчета) по расчетным (каталожным) данным или по расчетам физико-геометрических характеристик провода.

1. Найдем расчетный вес сталеалюминиевого провода АС 50/8, он составляет $G_0 = 196$ кг/км. Тогда общий вес проводов трех фаз $G = 3G_0L = 3 \cdot 196 \cdot 5,0 = 2940$ кг.

С учетом провеса, затрат провода на монтажные концы и вязки, расход провода увеличивается на 2...3 %. В итоге суммарная протяженность провода

$$L_{\Sigma} = 1,02 \cdot 3 \cdot L = 1,02 \cdot 3 \cdot 5,0 = 15,3 \text{ км}$$

с общим весом $G_{\Sigma} = 1,02 \cdot G = 1,02 \cdot 2940 \cdot 10^{-3} = 3,00$ т.

2. Определим вес провода на основе физико-геометрических характеристик.

Объем алюминиевой части проводов фаз

$$V_{Al} = 3 \cdot F_{Al} \cdot L = 3 \cdot 50 \cdot 5,0 \cdot 10^{-6} = 750 \cdot 10^6 \text{ мм}^3.$$

Плотность (объемный вес) составляет $\delta_{Al} = 2,7$ г/см³. Определим вес фаз:

$$G_{Al} = V_{Al} \cdot \delta_{Al} = 750 \cdot 2,7 = 2025 \text{ кг.}$$

Объем стального троса

$$V_{\text{ст}} = 3 \cdot F_{\text{ст}} \cdot L = 3 \cdot 8,0 \cdot 5,0 \cdot 10^6 = 120 \cdot 10^6 \text{ мм}^3.$$

Вес стального троса ($\delta_{\text{ст}} = 7,9 \text{ г/см}^3$) составит

$$G_{\text{ст}} = V_{\text{ст}} \cdot \delta_{\text{ст}} = 120 \cdot 7,9 = 948 \text{ кг}.$$

Общий вес проводов фаз

$$G = G_{A1} + G_{\text{ст}} = 2025 + 948 = 2973 \text{ кг}.$$

Действительная длина проводов фаз возрастает из-за их провеса f (рис. 1.5), с учетом которого протяженность провода L в пролете ВЛ определяется уравнением параболы.

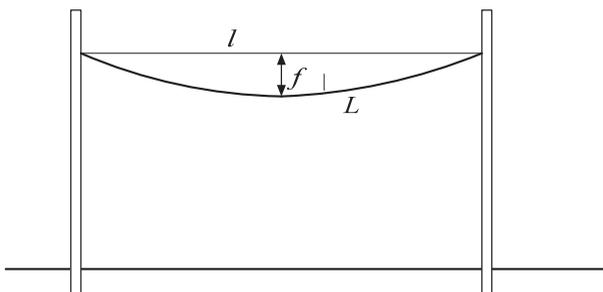


Рис. 1.5. Кривая провеса проводов

Приняв для ВЛ 10 кВ среднее расстояние между опорами около 70 м и максимальную стрелу провеса f до 1,5 м, определим

$$l = 70 + \frac{8}{3} \cdot \frac{1,5^2}{70} \approx 70,1 \text{ м},$$

что незначительно превышает длину пролета

$$\frac{70,1 - 70}{70} \cdot 100 \% = 0,14 \%$$

Более заметно увеличение расхода провода на монтажные концы и вязки, с учетом которых общий вес провода составит

$$G_{\Sigma} = 1,02G = 1,02 \cdot 2973 \cdot 10^{-3} \approx 3,03 \text{ т},$$

что практически совпадает с предыдущей оценкой.

Задача 1.4. Определить активное и индуктивное сопротивления ВЛ длиной 2,0 км с номинальным напряжением 10 кВ, выполненной стальными проводами марки ПС 70, при токах нагрузки $I_1 = 30$ А и $I_2 = 150$ А.

Провода расположены на одностоечных опорах по вершинам равностороннего треугольника, расстояние между проводами 1,0 м, диаметр провода $d = 11,5$ мм.

Решение

Активное сопротивление R_0 и внутреннее индуктивное сопротивление X_0'' , соответствующие указанным токовым нагрузкам, определим по справочным данным.

Внешнее индуктивное сопротивление X_0' , зависящее от конструкции ВЛ, при заданном расположении фазных проводов $D_{\text{ср}} = D = 1,0$ м определяется по формуле

$$X_0' = 0,144 \lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{пр}}} = 0,144 \lg \frac{1,0 \cdot 10^3}{5,75} = 0,323 \text{ Ом}.$$

Расчет сопротивлений сведем в таблице.

Изменение сопротивлений в зависимости от тока нагрузки

I , А	R_0 , Ом/км	$R = R_0 L$, Ом	X_0' , Ом/км	X_0'' , Ом/км	$X_0 = X_0' + X_0''$, Ом/км	$X = X_0 L$, Ом	\underline{Z} , Ом
30	1,77	3,54	0,323	0,30	0,623	1,25	$3,54 + j1,25 =$ $= 3,75 \angle 19,5^\circ$
150	2,38	4,76	0,323	0,73	1,053	2,11	$4,76 + j2,11 =$ $= 5,21 \angle 23,9^\circ$

Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод: увеличение токовой нагрузки в 5 раз сопровождается ростом сопротивления проводов линии в $\frac{5,21}{3,75} = 1,39$ раз.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 2

СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ВЛ И КЛ 0,38–35 кВ. ВОЗДУШНЫЕ ЛЭП 110–220 кВ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

Задача 2.1. Электроснабжение предприятия осуществляется по кабельной и воздушной линиям напряжением 35 кВ (рис. 2.1), выполненным соответственно кабелем ОАБ 35 × 3 × 70 и проводом АС 70/11. Протяженность каждой линии составляет 10,0 км.

Определить и сопоставить параметры схем замещения кабельной и воздушной линий электропередачи.

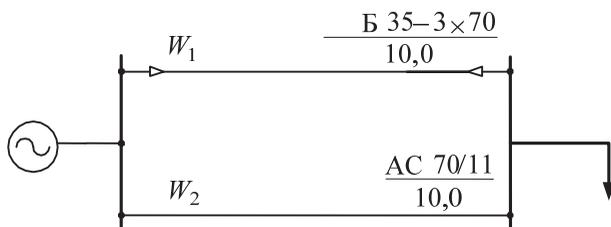


Рис. 2.1. Принципиальная схема электроснабжения

Решение

Из справочных данных имеем следующие удельные (погонные) параметры для КЛ:

$$R_0 = 0,443 \text{ Ом/км}, \quad X_0 = 0,137 \text{ Ом/км}, \quad q_0 = 86 \text{ квар/км.}$$

Для ВЛ имеем [16]

$$R_0 = 0,428 \text{ Ом/км}, \quad X_0 = 0,432 \text{ Ом/км.}$$

Определим параметры КЛ.

Полное сопротивление

$$\underline{Z}^{\text{КЛ}} = \underline{Z}_0^{\text{КЛ}} \cdot L = (0,443 + j0,137) \cdot 10,0 = 4,43 + j1,37 \text{ Ом.}$$

Удельную (погонную) емкостную проводимость рассчитаем по известному значению мощности q_0 квар/км при номинальном напряжении $q_0 = U_{\text{ном}}^2 \cdot b_0$.

Отсюда погонная проводимость

$$b_0 = \frac{q_0}{U^2} = \frac{86}{35^2} \cdot 10^{-3} = 70,2 \cdot 10^{-6} \text{ См/км.}$$

А полная емкостная проводимость

$$B_c^{\text{КЛ}} = b_0 \cdot L = 70,2 \cdot 10^{-6} \cdot 10,0 = 702 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Определим результирующие параметры ВЛ.

Полное сопротивление

$$\underline{Z}^{\text{ВЛ}} = \underline{Z}_0^{\text{ВЛ}} \cdot L = (0,428 + j0,432) \cdot 10,0 = 4,28 + j4,32 \text{ Ом.}$$

Удельную емкостную проводимость можно определить, используя данные $D_{\text{ср}}$ для ВЛ 35 кВ для расположения проводов треугольником:

$$b_0 = \frac{7,58}{\lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{пр}}}} \cdot 10^{-6} = \frac{7,58}{\lg \frac{3,0 \cdot 10^3}{5,7}} \cdot 10^{-6} = 2,79 \cdot 10^{-6} \text{ См/км.}$$

Полная емкостная проводимость

$$B_c^{\text{ВЛ}} = b_0 \cdot L = 2,79 \cdot 10^{-6} \cdot 10,0 = 27,9 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Сопротивления двух параллельно работающих линий характеризуются высокой степенью неоднородности:

$$\frac{X^{\text{ВЛ}}}{R^{\text{КЛ}}} \neq \frac{X^{\text{ВЛ}}}{R^{\text{ВЛ}}}.$$

Определим параметры эквивалентной схемы замещения параллельно включенных линий (ВЛ и КЛ). С учетом одинаковой протяженности линий, имеем

$$\begin{aligned} \underline{Z}^{\text{ЭКВ}} &= \frac{\underline{Z}^{\text{КЛ}} \cdot \underline{Z}^{\text{ВЛ}}}{\underline{Z}^{\text{КЛ}} + \underline{Z}^{\text{ВЛ}}} = \frac{\underline{Z}_0^{\text{КЛ}} \cdot \underline{Z}_0^{\text{ВЛ}}}{\underline{Z}_0^{\text{КЛ}} + \underline{Z}_0^{\text{ВЛ}}} L = \underline{Z}_0^{\text{ЭКВ}} \cdot L = \\ &= \frac{(0,443 + j0,137)(0,428 + j0,432)}{0,443 + j0,137 + 0,428 + j0,432} 10,0 = \\ &= (0,236 + j0,133) \cdot 10,0 = 2,36 + j1,33 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Эквивалентная проводимость линий

$$\begin{aligned} B^{\text{ЭКВ}} &= (b_0^{\text{КЛ}} + b_0^{\text{ВЛ}}) L = b_0^{\text{ЭКВ}} \cdot L = (70,2 + 2,79) \cdot 10^{-6} \cdot 10,0 = \\ &= 72,99 \cdot 10^{-6} \cdot 10,0 = 730 \cdot 10^{-6}. \end{aligned}$$

Проводимость B_c кабельной линии значительно превышает проводимость воздушной линии, что позволяет в итоге принять эквивалентное значение равным $B_c^{\text{ЭКВ}} \approx B_c^{\text{КЛ}} = 702 \cdot 10^{-6}$ См.

Волновое сопротивление линий:

$$\begin{aligned} \text{– КЛ } Z_B &= \sqrt{\frac{X_0}{b_0}} = \sqrt{\frac{0,137}{70,2 \cdot 10^{-6}}} = 44,2 \text{ Ом,} \\ \text{– ВЛ } Z_B &= \sqrt{\frac{X_0}{b_0}} = \sqrt{\frac{0,432}{2,79 \cdot 10^{-6}}} = 386,0 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Натуральная мощность линий:

$$\begin{aligned} \text{– КЛ } P_c &= \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{Z_B} = \frac{35,0^2}{44,2} = 27,84 \text{ МВт,} \\ \text{– ВЛ } P_c &= \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{Z_B} = \frac{35,0^2}{386,0} = 3,17 \text{ МВт.} \end{aligned}$$

Оценим необходимость учета емкостной проводимости в схеме замещения ВЛ 35 кВ, сопоставив с проводимостью КЛ 35 кВ:

$$\frac{b_0^{\text{ВЛ}}}{b_0^{\text{КЛ}}} = \frac{2,79 \cdot 10^{-6}}{70,2 \cdot 10^{-6}} = 0,0397,$$

т. е. менее 4 % проводимости кабеля. Естественно, что в таком же соотношении находятся и зарядные токи (мощности) рассматриваемых линий. Значения зарядных (емкостных) мощностей ВЛ 35 кВ в справочных данных не приводятся ввиду их незначительности. Так, значение емкостного тока воздушной линии 35 кВ

$$I_c = \frac{1}{\sqrt{3}} U_{\text{ном}} b_0 L = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 35,0 \cdot 2,79 \cdot 10^{-6} \cdot 10,0 \cdot 10^3 = 0,563 \text{ А},$$

генерируемая линией зарядная мощность

$$Q_c = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} I_c = \sqrt{3} \cdot 35,0 \cdot 0,563 = 34,1 \text{ кВА}.$$

Для КЛ зарядную мощность можно определить по справочным данным:

$$Q_c = q_0 L = 86 \cdot 10,0 = 860 \text{ квар},$$

откуда емкостный ток

$$I_c = \frac{Q_c}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{860}{\sqrt{3} \cdot 35,0} = 14,2 \text{ А},$$

что больше аналогичных величин для ВЛ 35 кВ более чем в 25 раз.

При сопоставлении зарядной мощности с натуральной имеем:

$$\text{для КЛ 35 кВ } \frac{Q_c}{P_{\text{нат}}} = \frac{860}{27,84 \cdot 10^3} \cdot 100 \% = 3,09 \% ;$$

$$\text{для ВЛ 35 кВ } \frac{Q_c}{P_{\text{нат}}} = \frac{34,1}{3,17 \cdot 10^3} \cdot 100 \% = 1,08 \% .$$

Экономическая мощность КЛ и ВЛ различается менее заметно, чем натуральная, и составляет для кабеля $P_3 = 6,4$ МВт [15, табл. 7.28]. Предельная экономическая нагрузка на одну цепь для ВЛ с проводом АС 70 равна $I_3 = 75$ А [15, табл. 7.9]. Откуда

$$P_3 = \sqrt{3} \cdot 35,0 \cdot 75 \cdot 10^{-3} = 4,55 \text{ МВт.}$$

Следовательно,

$$\text{для КЛ 35 кВ } \frac{Q_c}{P_3} = \frac{860}{6,4 \cdot 10^3} \cdot 100 \% = 13,4 \% ;$$

$$\text{для ВЛ 35 кВ } \frac{Q_c}{P_3} = \frac{34,1}{4,55 \cdot 10^3} \cdot 100 \% = 0,75 \% .$$

Таким образом, влияние емкостной проводимости и соответственно зарядной мощности на общее потокораспределение ВЛ 35 кВ незначительно и не превосходит ошибок исходных данных. Доля зарядной мощности КЛ 35 кВ в общей нагрузке весьма ощутима. Такая мощность должна быть учтена в расчете режима линии. Поэтому схема замещения рассматриваемой электропередачи содержит емкостную проводимость только для кабельной линии (рис. 2.2).

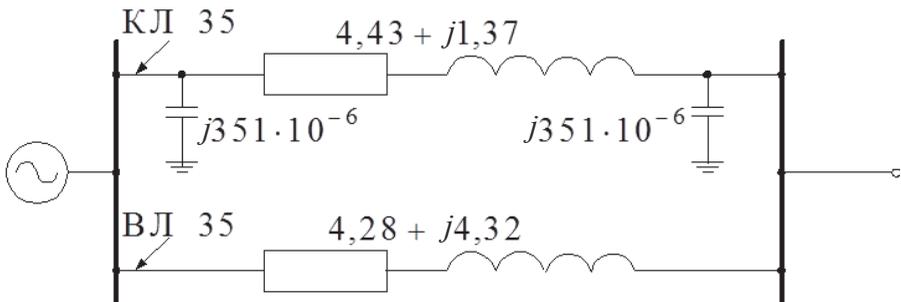


Рис. 2.2. Исходная схема замещения КЛ и ВЛ 35 кВ

Следовательно, и в эквивалентной схеме замещения линий (рис. 2.3) поперечная ветвь моделируется только проводимостью кабеля.

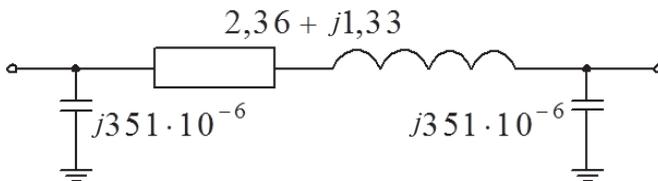


Рис. 2.3. Эквивалентная схема замещения КЛ и ВЛ 35 кВ

Задача 2.2. Электроснабжение района осуществляется по двум ВЛ 110 кВ с проводами марки АС 120/19. Одна линия выполнена на деревянных П-образных опорах с горизонтальным расположением проводов и расстоянием между проводами 4,0 м, другая линия смонтирована на унифицированных железобетонных опорах с расположением проводов по вершинам равнобедренного треугольника со сторонами 5,5; 3,2; 5,5 м (рис. 2.4).

Требуется сопоставить погонные параметры воздушных линий и определить эквивалентные параметры схемы замещения двух цепей длиной 100 км.

Решение

Среднегеометрические расстояния между проводами линий составляют:

– для линии 1 (рис. 2.4, а) $D_{\text{ср}} = 1,26 \cdot 4,0 = 5,04$ м;

– для линии 2 (рис. 2.4, б) $D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{5,5 \cdot 3,2 \cdot 5,5} = 4,59$ м.

Для значений $D_{\text{ср}} = 5,0$ м и $D_{\text{ср}} = 4,5$ м находим для провода марки АС 120/19 искомые параметры [16]:

– для линии 1

$$R_0 = 0,270 \text{ Ом/км}, X_0 = 0,423 \text{ Ом/км}, b_0 = 2,69 \cdot 10^{-6} \text{ См/км};$$

– для линии 2

$$R_0 = 0,270 \text{ Ом/км}, X_0 = 0,416 \text{ Ом/км}, b_0 = 2,74 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}.$$

Эти же параметры вычислим приближенно.

Активное сопротивление равно

$$R_0 = \frac{\rho}{F} = \frac{30,0}{120} = 0,250 \text{ Ом/км}.$$

Уточним активное сопротивление. С учетом увеличения фактической длины из-за скрутки многопроволочных проводов и удлинения провода вследствие провиса до 5 %,

$$R_0 = 1,05 \cdot 0,25 = 0,262 \text{ Ом/км.}$$

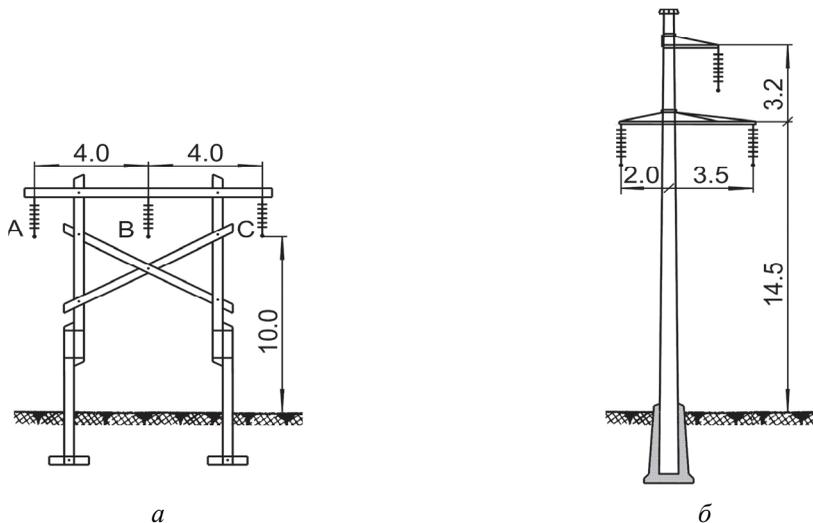


Рис. 2.4. Промежуточные опоры одноцепных линий напряжением 110 кВ:
а – деревянная; б – унифицированная железобетонная

Зная суммарное сечение провода АС 120/19, определяем наружный диаметр провода:

$$d_{\text{пр}} = 1,10 \sqrt{\frac{4 \cdot (F_{\text{ал}} + F_{\text{ст}})}{\pi}} = 1,10 \sqrt{\frac{4 \cdot (120 + 19)}{3,14}} = 14,6 \text{ мм.}$$

Находим индуктивное сопротивление:
– для линии 1

$$\begin{aligned} X_0 &= 0,144 \cdot \lg \frac{2 \cdot D_{\text{ср}}}{d} + 0,016 = \\ &= 0,144 \cdot \lg \frac{2 \cdot 5,04 \cdot 10^3}{14,6} + 0,016 = 0,429 \text{ Ом/км;} \end{aligned}$$

– для линии 2

$$X_0 = 0,144 \cdot \lg \frac{2 \cdot 4,59 \cdot 10^3}{14,6} + 0,016 = 0,419 \text{ Ом/км.}$$

Определяем емкостную проводимость для линии 1:

$$b_0 = \frac{7,58}{\lg \frac{2 \cdot D_{\text{cp}}}{d}} \cdot 10^{-6} = \frac{7,58}{\lg \frac{2 \cdot 5,04 \cdot 0^3}{14,6}} \cdot 10^{-6} = 2,67 \cdot 10^{-6} \text{ См/км.}$$

Определяем емкостную проводимость для линии 2:

$$b_0 = \frac{7,58}{\lg \frac{2 \cdot D_{\text{cp}}}{d}} \cdot 10^{-6} = \frac{7,58}{\lg \frac{2 \cdot 4,59 \cdot 10^3}{14,6}} \cdot 10^{-6} = 2,71 \cdot 10^{-6} \text{ См/км.}$$

Сопоставив погонные параметры при различном расположении фазных проводов на опорах с табличными значениями, отметим, что отличие составляет менее 2...3 % и не превышает погрешности исходных данных. Поэтому в практическом инженерном анализе режимных показателей электрических сетей можно не учитывать исполнение ВЛ и принимать погонные параметры, характерные для данного класса напряжения.

Результирующие параметры схем замещения линии длиной 100,0 км определим по следующим выражениям:

$$R_1 = R_2 = 0,270 \cdot 100 = 27,0 \text{ Ом;}$$

$$X_1 = 0,423 \cdot 100 = 42,3 \text{ Ом;}$$

$$X_2 = 0,416 \cdot 100 = 41,6 \text{ Ом;}$$

$$B_1 = 2,69 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 269 \cdot 10^{-6} \text{ См;}$$

$$B_2 = 2,74 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 274 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Определим параметры эквивалентной схемы замещения (рис. 2.5):

$$\begin{aligned} \underline{Z}_3 &= \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = \frac{(27,0 + j42,3) \cdot (27,0 + j41,6)}{(27,0 + j42,3) + (27,0 + j41,6)} = \\ &= 13,50 + j20,98 \text{ Ом}; \end{aligned}$$

$$\frac{B_3}{2} = \frac{1}{2}(B_1 + B_2) = \frac{1}{2}(269 + 274) \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

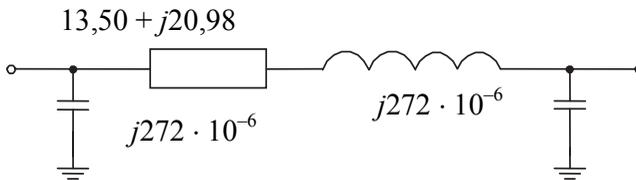


Рис. 2.5. Эквивалентная схема замещения двух ВЛ 110 кВ

Суммарная емкостная проводимость линий определяет зарядную мощность:

$$Q_c = B_3 \cdot U_{\text{НОМ}}^2 = 272 \cdot 10^{-6} \cdot 110^2 = 6,58 \text{ Мвар.}$$

Сопоставим Q_c с натуральной мощностью двух ВЛ 110 кВ. Волновое сопротивление равно

$$Z_B = \sqrt{\frac{X_0^3}{b_0^3}} = \sqrt{\frac{0,210}{5,43 \cdot 10^{-6}}} \approx 197 \text{ Ом,}$$

где $X_0^3 = \frac{X_3}{L} = \frac{20,98}{100} = 0,210 \text{ Ом/км.}$

Натуральная мощность

$$P_{\text{нат}} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{Z_B} = \frac{110^2}{197} = 61,4 \text{ МВт.}$$

Зарядная мощность

$$\frac{Q_c}{P_{\text{нат}}} = \frac{6,58}{61,4} \cdot 100 \% = 10,7 \%$$

Зарядная мощность соизмерима с натуральной мощностью и должна быть учтена при анализе режима линии. Поэтому схема замещения рассматриваемой электропередачи должна включать активное и реактивное сопротивления и емкостную проводимость (рис. 2.5).

Задача 2.3. Определить, как изменятся погонные параметры и пропускная способность линии электропередачи 220 кВ при горизонтальном расположении проводов и междуфазном расстоянии 7,0 м, если вместо провода АС 600/72 в каждой фазе подвесить два провода АС 300/48 с расстоянием между ними $a_{\text{ср}} = 40$ см (рис. 2.6).

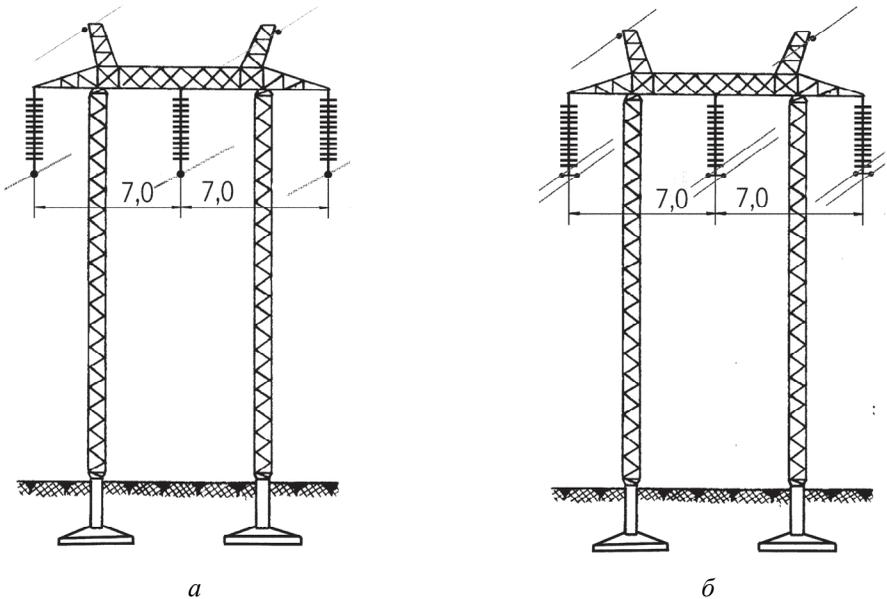


Рис. 2.6. Промежуточные металлические опоры ВЛ 220 кВ:
a – с нерасщепленной фазой; *б* – с расщепленной фазой

Решение

1. Определяем среднегеометрическое расстояние между фазными проводами:

$$D_{\text{ср}} = 1,26D = 1,26 \cdot 7,0 = 8,82 \text{ м.}$$

Диаметр провода АС 600/72 $2r_{\text{пр}} = 33,1$ мм, погонные параметры нерасщепленной фазы $R_0 = 0,055$ Ом/км; $X_0 = 0,40$ Ом/км; $b_0 = 2,8 \cdot 10^{-6}$ Ом/км.

Эти же параметры оценим аналитически.

Активное погонное сопротивление провода

$$R_0 \sim 1,05 \frac{\rho}{F} = 1,05 \frac{30}{600} = 0,052 \text{ Ом/км.}$$

Индуктивное погонное сопротивление фазы

$$\begin{aligned} X_0 &= 0,144 \cdot \lg \left(\frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{пр}}} \right) + 0,016 = \\ &= 0,144 \cdot \lg \left(\frac{8,82 \cdot 10^3}{16,55} \right) + 0,016 = 0,409 \text{ Ом/км.} \end{aligned}$$

Полное погонное сопротивление провода

$$\underline{Z}_0 = R_0 + jX_0 = 0,052 + j0,409 = 0,412 \text{ Ом/км.}$$

Погонная емкостная проводимость этого провода

$$\begin{aligned} Z_{\epsilon} &= \sqrt{X_0/b_0} = \sqrt{0,409/2,78 \cdot 10^{-6}} = 384 \text{ Ом;} \\ b_0 &= \frac{7,58}{\lg \left(\frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{пр}}} \right)} \cdot 10^{-6} = \frac{7,58}{\lg \left(\frac{8,82 \cdot 10^3}{16,55} \right)} \cdot 10^{-6} = 2,78 \cdot 10^{-6} \text{ СМ/км.} \end{aligned}$$

Волновое сопротивление линии и ее натуральная мощность

$$P_{\text{нат}} = U_{\text{ном}}^2 / Z_{\text{в}} = 220^2 / 384 \approx 126 \text{ МВт.}$$

2. Рассчитываем погонные параметры фазы, расщепленной на два провода АС 300/48 (диаметр провода $2r_{\text{пр}} = 24,2$ мм):

– активное сопротивление

$$R_0 = 1,05 \cdot \frac{\rho}{2F} = 1,05 \cdot \frac{30}{2 \cdot 300} = 0,052 \text{ Ом/км};$$

– индуктивное сопротивление

$$\begin{aligned} X_0 &= 0,144 \cdot \lg\left(\frac{D_{\text{ср}}}{r_3}\right) + \frac{0,016}{n} = \\ &= 0,144 \cdot \lg\left(\frac{8,82 \cdot 10^3}{69,6}\right) + \frac{0,016}{2} = 0,311 \text{ Ом/км}, \end{aligned}$$

где эквивалентный радиус провода равен

$$r_3 = \sqrt[n]{r_{\text{пр}} \cdot a_{\text{ср}}^{n-1}} = \sqrt{12,1 \cdot 400} = 69,9 \text{ мм}.$$

Полное удельное сопротивление

$$Z_0 = \sqrt{R_0^2 + X_0^2} = \sqrt{0,052^2 + 0,311^2} = 0,315 \text{ Ом/км}.$$

Емкостная проводимость

$$b_0 = \frac{7,58}{\lg\left(\frac{D_{\text{ср}}}{r_3}\right)} \cdot 10^{-6} = \frac{7,58}{\lg\left(\frac{8,82 \cdot 10^3}{69,6}\right)} \cdot 10^{-6} = 3,60 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}.$$

Полученные погонные параметры незначительно отличаются от значений, принятых по справочным [16]:

$$R_0 = 0,054 \text{ Ом/км}, \quad X_0 = 0,30 \text{ Ом/км}, \quad b_0 = 3,7 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}.$$

Волновое сопротивление с расщепленной фазой

$$Z_{\text{В}} = \sqrt{X_0/b_0} = \sqrt{0,311/3,60 \cdot 10^{-6}} = 294 \text{ Ом}.$$

Натуральная мощность

$$P_{\text{нат}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{Z_B} = \frac{220^2}{294} = 165 \text{ МВт.}$$

3. Сопоставим параметры линий. При расщеплении фазы на два провода погонное индуктивное сопротивление составит

$$\frac{0,311}{0,409} \cdot 100 \% = 76,0 \% \text{ от } X_0,$$

т. е. на 24,0 % меньше, а погонная емкостная проводимость будет

$$\frac{3,60 \cdot 10^{-6}}{2,78 \cdot 10^{-6}} \cdot 100 \% = 129,5 \% \text{ от } b_0,$$

т. е. увеличится на 29,5 %.

Расщепление фазы позволяет увеличить идеальный предел ВЛ 220 кВ по передаваемой мощности:

$$P_{\text{пр}} = U_{\text{ном}}^2 / Z_0 L$$

в соотношении

$$\frac{Z_0}{Z'_0} = \frac{0,412}{0,315} = 1,31 \text{ раз.}$$

Таким образом, расщепление фазы на два провода позволяет, не увеличивая суммарное сечение проводов, увеличить пропускную способность ВЛ 220 кВ примерно на одну треть:

$$\frac{P_{\text{нат}}^3}{P_{\text{нат}}} = \frac{165}{126} \cdot 100 \% = 131 \%, \text{ т. е. на } 31 \%.$$

Задача 2.4. Определить параметры одноцепной ВЛ напряжением 500 кВ, длиной 600 км, выполненной проводом марки АС 500/64.

Линия выполнена проводом марки АС 500/64 с расщеплением фазы на три провода. Расстояние между центрами расщепленных фаз по горизонтали 12,0 м, расщепленные провода расположены по вершинам равностороннего треугольника со стороной 40 см.

Линию представить:

- 1) цепочной схемой замещения;
- 2) П-образной схемой замещения;
- 3) пассивным четырехполюсником.

Решение

1. Определим параметры цепочной схемы замещения.

Среднегеометрическое расстояние между центрами расщепленных фаз

$$D_{\text{ср}} = 1,26D = 1,26 \cdot 12,0 = 15,12 \text{ м.}$$

По справочным данным находим диаметр провода 30,2 мм, погонное активное сопротивление $R_0 = 0,065 \text{ Ом/км}$.

Эквивалентный радиус расщепленной фазы

$$r_{\text{ЭКВ}} = \sqrt[n]{r_{\text{пр}} a^{n-1}} = \sqrt[3]{15,1 \cdot 400^2} = 134 \text{ мм.}$$

Погонные активное, индуктивное сопротивления и емкостная проводимость с учетом расщепления:

$$R_0 = \frac{R_0}{n} = \frac{0,065}{3} = 0,022 \text{ Ом/км;}$$

$$X_0 = 0,144 \cdot \lg \left(\frac{D_{\text{ср}}}{r_3} \right) + \frac{0,016}{n} =$$

$$0,144 \cdot \lg \left(\frac{15,12 \cdot 10^{-3}}{134} \right) + \frac{0,016}{3} = 0,301 \text{ Ом/км;}$$

$$b_0 = \frac{7,58}{\lg \left(\frac{D_{\text{ср}}}{r_3} \right)} \cdot 10^{-6} = \frac{7,58}{\lg \left(\frac{15,12 \cdot 10^3}{134} \right)} \cdot 10^{-6} = 3,69 \cdot 10^{-6}.$$

Протяженную ВЛ 500 кВ представляем цепочной схемой замещения с двумя звеньями (участками) длиной по 300 км, при которой отказ от учета распределенности параметров не вызывает значительной

погрешности в расчетах. Параметры каждого звена, моделируемого эквивалентной Π -образной схемой замещения, определим в виде

$$\underline{Z}' = \underline{Z}_0 L = (0,022 + j0,301) \cdot 300 = 6,60 + j90,3 \text{ Ом};$$

$$B'_c = \frac{1}{2} b_0 L' = \frac{1}{2} 3,69 \cdot 10^{-6} \cdot 300 = 553,3 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Потери активной мощности на корону по участкам схемы представим в виде нагрузки между участками. Приняв потери активной мощности при хорошей погоде около 10 кВт/км, получим нагрузки звеньев на корону:

$$\Delta P'_k = \frac{1}{2} \Delta P_k^0 L' \cdot 10^{-3} = \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot 300 \cdot 10^{-3} = 1,50 \text{ МВт.}$$

С учетом параметров каждого звена составим цепочную схему замещения в виде рис. 2.7.

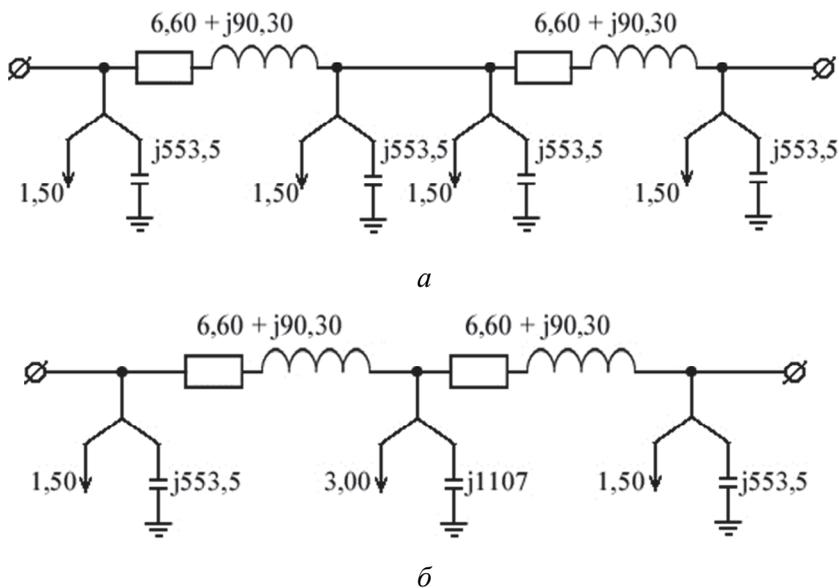


Рис. 2.7. Цепочная схема замещения ВЛ 500 кВ:

а – исходная; б – эквивалентная

2. Представим электропередачу П-образной схемой замещения.

При длине ВЛ свыше 300 ÷ 350 км необходим учет ее равномерной распределенности параметров. Удобно использовать поправочные коэффициенты:

$$k_R = 1 - \frac{1}{3} \cdot X_0 b_0 L^2 = 1 - \frac{1}{3} \cdot 0,301 \cdot 3,69 \cdot 10^{-6} \cdot 600^2 = 0,867 ;$$

$$k_X = 1 - \frac{1}{6} \cdot X_0 b_0 \left(1 - \frac{R_0'^2}{X_0'^2} \right) L^2 =$$

$$= 1 - \frac{1}{6} \cdot 0,301 \cdot 3,69 \cdot 10^{-6} \cdot \left(1 - \frac{0,022^2}{0,301^2} \right) \cdot 600^2 = 0,934 ;$$

$$k_B = 1 + \frac{1}{12} \cdot X_0 b_0 L^2 = 1 + \frac{1}{12} \cdot 0,301 \cdot 3,69 \cdot 10^{-6} \cdot 600 = 1,033.$$

Уточним сосредоточенные параметры схемы замещения:

$$R = R_0' L k_R = 0,022 \cdot 600 \cdot 0,867 = 11,44 \text{ Ом};$$

$$X = X_0' L k_X = 0,301 \cdot 600 \cdot 0,934 = 168,68 \text{ Ом};$$

$$B = B_0' L k_B = 3,69 \cdot 10^{-6} \cdot 600 \cdot 1,033 = 2,29 \cdot 10^{-3} \text{ См.}$$

Определим полные сопротивления и проводимости:

$$\underline{Z} = R + jX = 11,44 + j168,68 = 169,07 e^{j86,12} \text{ Ом};$$

$$\underline{Y} = jB = 2,29 \cdot 10^{-3} e^{j86,12} \text{ См,}$$

используемые в П-образной или Т-образной схемах замещения ЛЭП.

3. Представим ЛЭП пассивным четырехполюсником с постоянными коэффициентами A, B, C, D .

Определим постоянные четырехполюсника на основании найденных параметров П-образной схемы замещения:

$$\underline{A} = \underline{D} = 1 + \frac{\underline{ZY}}{2} = 1 + \frac{169,07e^{86,12} \cdot 2,29 \cdot 10^{-3} e^{j90}}{2} =$$

$$= 0,806 + j0,013 = 0,803e^{j0,92};$$

$$\underline{B} = \underline{Z} = 169,07e^{j86,1} \text{ Ом};$$

$$\underline{C} = \underline{Y} \left(1 + \frac{\underline{ZY}}{4} \right) = 2,29 \cdot 10^{-3} e^{j90} \left(1 + \frac{169,07e^{j86,1} \cdot 2,29 \cdot 10^{-3} e^{j90}}{4} \right) =$$

$$= 2,07 \cdot 10^{-3} e^{j90,4} \text{ См.}$$

Для определения постоянных четырехполюсника необходимо рассчитать волновые параметры линии.

Волновое сопротивление

$$\underline{Z}_B = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}} = \sqrt{\frac{0,302e^{j85,8}}{3,69 \cdot 10^{-6} e^{j90}}} = 286,1e^{-j2,1} \text{ Ом.}$$

Коэффициент распространения электромагнитной волны вдоль линии

$$\underline{\gamma}_0 = \sqrt{\underline{Z}_0 \underline{Y}_0} = \sqrt{0,302e^{j85,8} \cdot 3,69 \cdot 10^{-6} e^{j90}} =$$

$$= 1,056 \cdot 10^{-3} e^{j87,9} = (0,0387 + j1,055) \cdot 10^{-3} \text{ 1/км.}$$

Отсюда коэффициент затухания $\beta_0 = 0,0387 \cdot 10^{-3} \text{ 1/км}$, коэффициент фазы $\alpha_0 = 1,055 \cdot 10^{-3} \text{ рад/км}$.

Для удобства вычисления переведем радианы в градусы:

$$\alpha_0 = \frac{\alpha_0 \cdot 180^\circ}{\pi} = \frac{1,055 \cdot 10^{-3} \cdot 180^\circ}{3,14} = 0,0605 \text{ град/км.}$$

Натуральная мощность

$$P_{\text{нат}} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{Z_B} = \frac{500^2}{281,1} = 873,9 \text{ МВт.}$$

Гиперболические функции комплексного переменного:

$$\operatorname{sh}(\underline{\gamma}_0 L) = \operatorname{sh}(\beta_0 + j\alpha_0)L = \operatorname{sh}(\beta_0 L) \cdot \cos(\alpha_0 L) + j \operatorname{ch}(\beta_0 L) \cdot \sin(\alpha_0 L)$$

$$\operatorname{ch}(\underline{\gamma}_0 L) = \operatorname{ch}(\beta_0 + j\alpha_0)L = \operatorname{ch}(\beta_0 L) \cdot \cos(\alpha_0 L) + j \operatorname{sh}(\beta_0 L) \cdot \sin(\alpha_0 L).$$

Для линий до 1000 км можно принять, что $\operatorname{ch}(\beta_0 L) \approx 1$, $\operatorname{sh}(\beta_0 L) \approx \beta_0 L$, тогда

$$\begin{aligned} \operatorname{sh}(\underline{\gamma}_0 L) &= \beta_0 L \cos(\alpha_0 L) + j \sin(\alpha_0 L) = \\ &= 0,0387 \cdot 600 \cdot \cos(0,0605 \cdot 600) + j \sin(0,0605 \cdot 600) = \\ &= 0,0187 + j0,592 = 0,592e^{j88,2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \operatorname{ch}(\underline{\gamma}_0 L) &= \cos(\alpha_0 L) + j \cdot \beta_0 L \sin(\alpha_0 L) = \\ &= \cos(0,0605 \cdot 600) + j0,0387 \cdot 600 \cdot \sin(0,0605 \cdot 600) = \\ &= 0,806 + j0,014 = 0,806e^{j1,0}; \end{aligned}$$

$$\underline{A} = \underline{D} = \operatorname{ch}(\underline{\gamma}_0 L) = 0,806e^{j1,0};$$

$$\underline{B} = \underline{Z}_B \cdot \operatorname{sh}(\underline{\gamma}_0 L) = 286,1e^{-j2,1} \cdot 0,592e^{j88,2} = 169,35e^{j86,1} \text{ Ом};$$

$$\underline{C} = \frac{\operatorname{sh}(\underline{\gamma}_0 L)}{\underline{Z}_B} = \frac{0,592e^{j88,2}}{286,98e^{j2,1}} = 2,07e^{j90,3} \text{ 1/Ом}.$$

Расхождение в значении констант, найденных двумя способами, находится в пределах погрешности исходных данных (менее 3 %).

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 3

ДВУХОБОМОТОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ. ДВУХОБОМОТОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ С РАСЩЕПЛЕННОЙ ВТОРИЧНОЙ ОБМОТКОЙ

Задача 3.1. Трехфазный двухобмоточный трансформатор типа ТМ выпускают на два класса напряжения (10 и 6 кВ). Определить параметры схем замещения трансформаторов ТМ-100/10 и ТМ-100/6 (рис. 3.1, *a*) и проанализировать, как влияет при одинаковой номинальной мощности класс напряжения обмотки ВН на сопротивление и проводимость трансформатора.

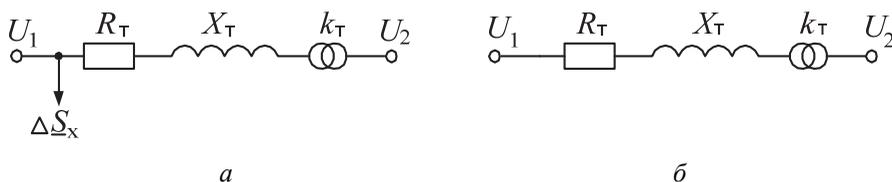


Рис. 3.1. Упрощенные схемы замещения двухобмоточных трансформаторов:
a – с учетом поперечной ветви; *б* – без учета поперечной ветви

Решение

1. Паспортные данные для трансформатора ТМ-100/10 [16]:

$$S_{\text{ном}} = 100 \text{ кВА}, U_{\text{ВН}} = 10 \text{ кВ}, U_{\text{НН}} = 0,4 \text{ кВ},$$

$$\Delta P_K = 1,97 \text{ кВт}, \Delta P_X = 0,36 \text{ кВт}, u_K = 4,5 \%, I_X = 2,6 \%$$

Определим параметры продольной ветви схемы замещения. Активное сопротивление трансформатора, приведенное к напряжению высшей обмотки,

$$R = \frac{\Delta P_K U_H^2}{S_{\text{НОМ}}^2} \cdot 10^{-3} = \frac{1,97 \cdot 10^2}{100^2} \cdot 10^3 = 19,7 \text{ Ом.} \quad (3.1)$$

Полное сопротивление

$$Z = \frac{u_K \cdot U_H^2 \cdot 10^3}{100 \cdot S_{\text{НОМ}}} = \frac{4,5 \cdot 10^2}{100 \cdot 100} \cdot 10^3 = 45,0 \text{ Ом.} \quad (3.2)$$

Реактивное сопротивление

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{45,0^2 - 19,7^2} = 40,5 \text{ Ом.}$$

Идеальный трансформатор в схеме замещения характеризуется коэффициентом трансформации, принимающим номинальное значение в центральном положении переключателя (ПБВ $\pm 2 \times 2,5 \%$)

$$k_{\text{НОМ}}^T = \frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{НН}}} = \frac{10}{0,4} = 25$$

и изменяющимся в трансформаторе с ответвлениями

$$U_{\text{min}}^{\text{ОТВ}} = 9,5 \text{ кВ} \quad \text{и} \quad U_{\text{max}}^{\text{ОТВ}} = 10,5 \text{ кВ}$$

в интервале

$$k_{\text{min}}^T \div k_{\text{max}}^T = \frac{9,5}{0,4} \div \frac{10,5}{0,4} = 23,75 \div 26,25.$$

При расчете электрических режимов на ЭВМ номинальная трансформация задается в виде

$$k_{\text{НОМ}}^T = U_{\text{НН}} / U_{\text{ВН}} = 0,4 / 10 = 0,04.$$

Смена положения ПБВ, выполняемая, как правило, сезонно, изменяет количество рабочих витков обмотки ВН и, следовательно, зна-

чения сопротивлений R , X трансформатора. С учетом выражений (3.1) и (3.2) наибольшее изменение сопротивлений составит $\delta Z_T = (1,05^2 - 0,95^2)Z_T \approx 0,2Z_T$, т. е. каждое переключение на одно ответвление изменяет сопротивления трансформатора примерно на 5 % и может оказать существенное влияние на режим в низковольтных сетях.

Параметры поперечной ветви:

– активная проводимость

$$G = \frac{\Delta P_x}{U_H^2} \cdot 10^{-3} = \frac{0,36}{10^2} \cdot 10^{-3} = 3,60 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

– реактивные потери холостого хода

$$\Delta Q_x = \frac{I_x \cdot S_{\text{НОМ}}}{100} = \frac{2,6 \cdot 100}{100} = 2,60 \text{ квар};$$

– реактивная (индуктивная) проводимость

$$B = \frac{\Delta Q_x}{U_H^2} \cdot 10^{-3} = \frac{2,60}{10^2} \cdot 10^{-3} = 26,0 \cdot 10^{-6}.$$

Потери холостого хода трансформатора при номинальном питающем напряжении

$$\Delta S_x = \Delta P_x + j\Delta Q_x = 0,36 + j2,60 \text{ кВА}.$$

2. Паспортные данные трансформатора ТМ-100/6 отличаются только номинальным напряжением обмотки ВН, равным 6,3 кВ.

Активное и индуктивное сопротивления

$$R = \frac{\Delta P_k \cdot U_H^2 \cdot 10^3}{S_{\text{НОМ}}^2} = \frac{1,97 \cdot 6,3^2}{100^2} \cdot 10^3 = 7,82 \text{ Ом}.$$

Потеря напряжения на активном сопротивлении трансформатора

$$u_{\text{ка}} = \frac{S_{\text{НОМ}} \cdot R}{U_H^2 \cdot 10^3} \cdot 100 = \frac{100 \cdot 7,82}{6,3^2 \cdot 10^3} \cdot 100 = 1,97 \text{ \%}.$$

Потеря напряжения на реактивном сопротивлении трансформатора

$$u_{кр} = \sqrt{4,5^2 - 1,97^2} = 4,05 \%$$

Индуктивное сопротивление трансформатора

$$X = \frac{u_{кр} \cdot U_H^2 \cdot 10^3}{100 \cdot S_{НОМ}} = \frac{4,05 \cdot 6,3^2}{100 \cdot 100} \cdot 10^3 = 16,1 \text{ Ом.}$$

Активная и индуктивная проводимости:

$$G = \frac{\Delta P_{xx} \cdot 10^{-3}}{U_H^2} = \frac{0,36}{6,3^2} \cdot 10^{-3} = 9,07 \cdot 10^{-6} \text{ См;}$$

$$B = \frac{\Delta Q_{xx} \cdot 10^{-3}}{U_H^2} = \frac{2,60}{6,3^2} \cdot 10^{-3} = 65,5 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Моделируя ветвь холостого хода проводимостями (шунтами на землю), потери мощности можно выразить в виде

$$\Delta S_{xx} = (G + jB)U^2 = (9,07 + j65,5) \cdot 6,3^2 \cdot 10^{-3} = 0,36 + j2,60 \text{ кВА ,}$$

что позволяет определить потери мощности холостого режима при питающем напряжении U , отличном от номинального.

Из расчетов видно, что активное сопротивление соизмеримо с реактивным (примерно в 2 раза меньше для трансформаторов рассматриваемых классов напряжения). Аналогично, активная проводимость в 7,2 раза меньше реактивной.

С уменьшением класса напряжения с 10 до 6 кВ сопротивления трансформаторов уменьшились, а проводимости увеличились в 2,5 раза.

Задача 3.2. Чирчикский трансформаторный завод выпускает трансформаторы марки ТМЗ. Это силовые трехфазные двухобмоточные трансформаторы, без устройства РПН, без расширителя, герметичные, с азотной подушкой. Сезонное изменение напряжения осуществляется на стороне ВН с помощью устройства ПБВ. Определить параметры схемы замещения с учетом трансформации (рис. 3.2) трансформатора ТМЗ-1000/10 со следующими паспортными данными:

$$S_{\text{НОМ}} = 1000 \text{ кВА}, U_{\text{ВН}} = 10 \text{ кВ}, U_{\text{НН}} = 0,4 \text{ кВ},$$

$$\Delta P_{\text{К}} = 12,2 \text{ кВт}, \Delta P_{\text{X}} = 2,45 \text{ кВт}, U_{\text{К}} = 5,5 \%, I_{\text{X}} = 1,4 \%$$

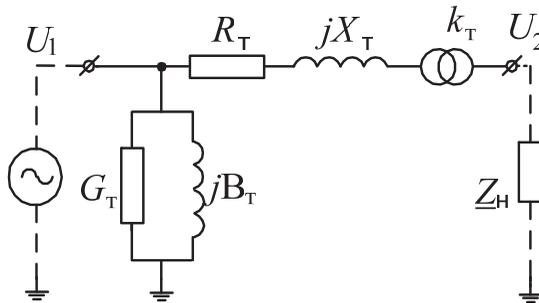


Рис. 3.2. Схема замещения двухобмоточного трансформатора

Решение

Активное сопротивление

$$R = \frac{\Delta P_{\text{К}} \cdot U_{\text{Н}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2} \cdot 10^3 = \frac{12,2 \cdot 10^2}{1000^2} \cdot 10^3 = 1,22 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление

$$Z = \frac{u_{\text{К}} \cdot U_{\text{Н}}^2 \cdot 10^3}{100 \cdot S_{\text{НОМ}}} = \frac{5,5 \cdot 10^2}{100 \cdot 1000} \cdot 10^3 = 5,50 \text{ Ом.}$$

Реактивное сопротивление

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{5,05^2 - 1,22^2} = 5,36 \text{ Ом}$$

незначительно отличается от полного сопротивления

$$\underline{Z} = R + jX = 1,22 + j5,36 \text{ Ом.}$$

Активная проводимость

$$G = \frac{\Delta P_{\text{X}}}{U_{\text{Н}}^2} = \frac{2,45}{10^2} \cdot 10^{-3} = 24,5 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Реактивная проводимость

$$B = \frac{\Delta Q_X}{U_H^2} = \frac{I_X \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot 10^{-3}}{100 \cdot U_H^2} = \frac{1,4 \cdot 1000}{100 \cdot 10^2} \cdot 10^{-3} = 140 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Полная проводимость трансформатора

$$\underline{Y} = G - jB = (24,5 - j140) \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Номинальный коэффициент трансформации

$$k_{\text{НОМ}} = \frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{НН}}} = \frac{10}{0,4} = 25.$$

Найденные параметры схемы замещения приведены к ВН. Со стороны НН параметры можно определить путем их пересчета через коэффициент трансформации:

$$\underline{Z}' = \underline{Z} \frac{1}{k_{\text{НОМ}}^2} = (1,22 + j5,36) \frac{1}{25^2} = (1,25 + j8,58) \cdot 10^{-3} \text{ Ом,}$$

$$\underline{Y}' = \underline{Y} \cdot k_{\text{НОМ}}^2 = (24,5 - j140) \cdot 25^2 = (15,3 - j87,5) \cdot 10^{-3} \text{ См,}$$

или непосредственно по приведенным выше выражениям, используя вместо номинального напряжение обмотки НН.

В данной задаче рассматривался трансформатор того же класса напряжения, что и в предыдущей, только более мощный. С увеличением номинальной мощности трансформаторов возрастает (в данном случае до 4,5 раз) соотношение между индуктивным и активным сопротивлениями и для трансформаторов мощностью более 1000 кВА с приемлемой погрешностью можно принять $X \approx Z$.

Задача 3.3. На подстанции установлены два понижающих двухобмоточных трансформатора типа ТДН-16000/110, которые имеют следующие паспортные данные:

$$S_{\text{НОМ}} = 16000 \text{ кВА, } U_{\text{ВН}} = 110 \text{ кВ, } U_{\text{НН}} = 6,6 \text{ кВ,}$$

$$\Delta P_K = 85 \text{ кВт, } \Delta P_X = 19 \text{ кВт, } U_K = 10,5 \%, I_X = 0,7 \%.$$

Определить параметры эквивалентной схемы замещения (рис. 3.3, б) двух параллельно работающих трансформаторов.

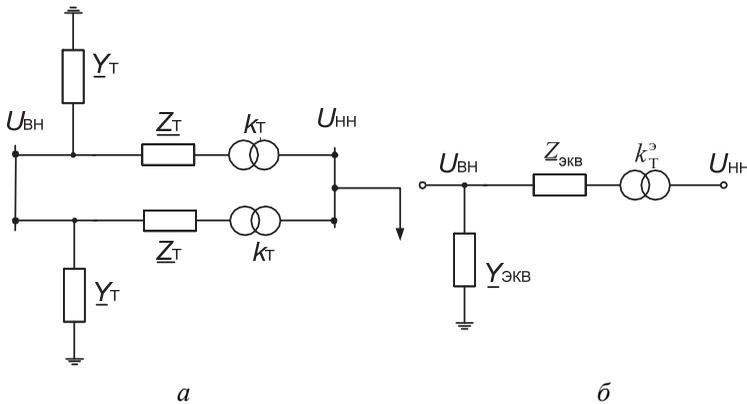


Рис. 3.3. Схемы замещения двух понижающих трансформаторов:
а – исходная; б – эквивалентная

Решение

Определим сопротивления трансформаторов по параметрам опыта короткого замыкания:

$$R = \frac{\Delta P_k U_H^2 \cdot 10^3}{S_{НОМ}^2} = \frac{85 \cdot 110^2}{16000^2} \cdot 10^3 = 4,02 \text{ Ом},$$

$$X = \frac{U_k \cdot U_H^2 \cdot 10^3}{100 \cdot S_{НОМ}} = \frac{10,5 \cdot 110^2}{100 \cdot 16000} \cdot 10^3 = 79,41 \text{ Ом}.$$

Номинальный коэффициент трансформации

$$k_{НОМ} = \frac{U_{ВН}}{U_{НН}} = \frac{110}{6,6} = 16,7.$$

Проводимость определяется по результатам опыта холостого хода.
Активная проводимость

$$G = \frac{\Delta P_x}{U_H^2} = \frac{19}{110^2} \cdot 10^3 = 1,57 \cdot 10^{-6} \text{ См}.$$

Реактивная проводимость

$$B = \frac{\Delta Q_x}{U_H^2} = \frac{I_x \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot 10^{-3}}{100 \cdot U_H^2} = \frac{0,7 \cdot 16000}{100 \cdot 110^2} \cdot 10^{-3} = 9,26 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Определим полное эквивалентное сопротивление для двух параллельно работающих трансформаторов (рис. 3.3, б):

$$\underline{Z}_{\text{ЭКВ}} = \frac{\underline{Z}}{n_T} = \frac{R + jX}{2} = \frac{4,02 + j79,71}{2} = 2,01 + j39,86 \text{ Ом.}$$

Эквивалентная проводимость

$$\underline{Y}_{\text{ЭКВ}} = n_T \cdot \underline{Y} = 2(1,57 - j9,26) \cdot 10^{-6} = (3,14 - j18,52) \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

На параллельную работу включаются трансформаторы с одинаковыми коэффициентами трансформации ($k_T^3 = k = 16,7$).

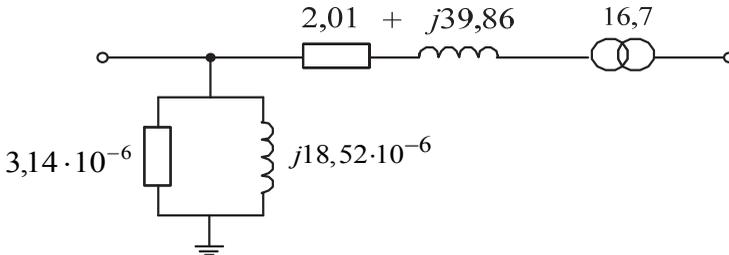


Рис. 3.4. Эквивалентная схема замещения двух параллельно включенных двухобмоточных трансформаторов

Из полученных результатов видно, что с увеличением напряжения и мощности трансформаторов возрастает соотношение между реактивным и активным сопротивлениями, и в данном случае оно составляет уже 19,8 раза. Увеличение различия между значениями активной и реактивной проводимостей с ростом номинальной мощности и напряжения не столь существенно.

Задача 3.4. На повышающей подстанции установлен трансформатор типа ТД-10000/35 с пределами регулирования $\pm 2 \times 2,5 \%$ (рис. 3.5, а),

а на понижающей – ТМН-10000/35 с пределами регулирования $\pm 9 \times 1,78\%$ (рис. 3.5, б).

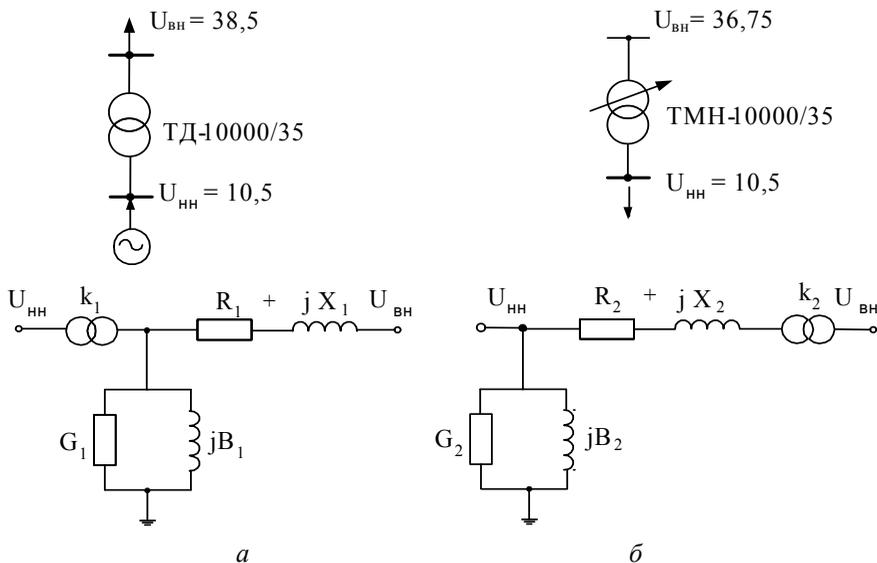


Рис. 3.5. Схемы подстанций и соответствующие им схемы замещения:
а – для повышающего трансформатора; б – для понижающего

Определить и сравнить параметры схем замещения двух трансформаторов.

Паспортные данные для трансформаторов можно взять из [16].

Для повышающего трансформатора

$$S_{\text{НОМ}} = 10\,000 \text{ кВА}, U_{\text{ВН}} = 38,5 \text{ кВ}, U_{\text{НН}} = 10,5 \text{ кВ},$$

$$\Delta P_{\text{к}} = 65 \text{ кВт}, \Delta P_{\text{х}} = 14,5 \text{ кВт}, U_{\text{к}} = 7,5\%, I_{\text{х}} = 0,8\%.$$

Для понижающего трансформатора

$$S_{\text{НОМ}} = 10\,000 \text{ кВА}, U_{\text{ВН}} = 36,75 \text{ кВ}, U_{\text{НН}} = 10,5 \text{ кВ},$$

$$\Delta P_{\text{к}} = 65 \text{ кВт}, \Delta P_{\text{х}} = 14,5 \text{ кВт}, U_{\text{к}} = 7,5\%, I_{\text{х}} = 0,8\%.$$

Решение

Активные сопротивления трансформаторов:

$$R_1 = \frac{\Delta P_K U_H^2}{S_{\text{НОМ}}^2} = \frac{65 \cdot 38,5^2}{10\,000^2} \cdot 10^3 = 0,96 \text{ Ом};$$

$$R_2 = \frac{\Delta P_K U_H^2}{S_{\text{НОМ}}^2} = \frac{65 \cdot 36,75^2}{10\,000^2} \cdot 10^3 = 0,88 \text{ Ом}.$$

Индуктивные сопротивления трансформаторов:

$$X_1 = \frac{U_K \cdot U_H^2}{100 \cdot S_{\text{НОМ}}} = \frac{7,5 \cdot 38,5^2}{100 \cdot 10\,000} \cdot 10^3 = 11,1 \text{ Ом};$$

$$X_2 = \frac{U_K \cdot U_H^2}{100 \cdot S_{\text{НОМ}}} = \frac{7,5 \cdot 36,75^2}{100 \cdot 10\,000} \cdot 10^3 = 10,1 \text{ Ом}.$$

Потери мощности холостого хода для данных трансформаторов одинаковые:

$$\begin{aligned} \Delta \underline{S}_X &= \Delta P_X + j \Delta Q_X = \Delta P_X + j \frac{I_X \cdot S_{\text{НОМ}}}{100} = \\ &= 14,5 + j \frac{0,8 \cdot 10\,000}{100} = 14,5 + j80 \text{ кВА}. \end{aligned}$$

Активные проводимости трансформаторов:

$$G_1 = \frac{\Delta P_X}{U_{\text{ВН1}}^2} \cdot 10^{-3} = \frac{14,5}{38,5^2} \cdot 10^{-3} = 9,78 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

$$G_2 = \frac{\Delta P_X}{U_{\text{ВН2}}^2} \cdot 10^{-3} = \frac{14,5}{36,75^2} \cdot 10^{-3} = 10,7 \cdot 10^{-6} \text{ См}.$$

Реактивные проводимости трансформаторов:

$$B_1 = \frac{\Delta Q_X}{U_{\text{ВН1}}^2} = \frac{80}{38,5^2} \cdot 10^{-3} = 54,0 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

$$B_2 = \frac{\Delta Q_x}{U_{ВН2}^2} = \frac{80}{36,75^2} \cdot 10^{-3} = 59,2 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Коэффициенты трансформации:

$$k_1 = \frac{U_{ВН1}}{U_{НН1}} = \frac{38,5}{10,5} = 3,67,$$

$$k_1 = \frac{U_{ВН2}}{U_{НН2}} = \frac{36,75}{10,5} = 3,50.$$

Так как номинальное напряжение обмотки ВН у повышающих трансформаторов на 10 % больше номинального напряжения сети, а у понижающих – на 5 %, то первые обладают большим сопротивлением и меньшей проводимостью.

Задача 3.5. На понижающей подстанции установлен трансформатор с расщепленной обмоткой низкого напряжения ТРДН-40000/110. Рассчитать параметры схемы замещения трансформатора (рис. 3.6).

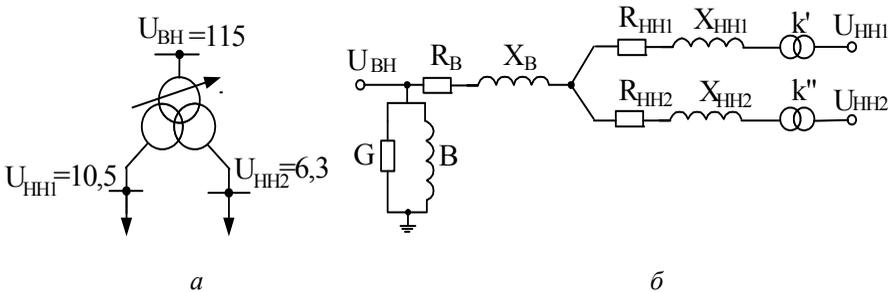


Рис. 3.6. Схемы трансформатора с расщепленной обмоткой низкого напряжения:

a – схема подстанции; *б* – схема замещения

Каталожные данные понижающего трансформатора:

$$S_{НОМ} = 40\,000 \text{ кВА}, U_{ВН} = 115 \text{ кВ}, U_{НН} = 10,5 / 6,3 \text{ кВ},$$

$$\Delta P_K = 175 \text{ кВт}, \Delta P_X = 36 \text{ кВт}, U_K = 10,5 \%, I_X = 0,7 \%.$$

Решение

Определим сопротивления трансформатора.

Сквозное (общее) сопротивление

$$R = \frac{\Delta P_K U_H^2}{S_{НОМ}^2} = \frac{175 \cdot 115^2}{40\,000^2} \cdot 10^3 = 1,45 \text{ Ом};$$

$$X = \frac{U_K \cdot U_H^2}{100 \cdot S_{НОМ}} = \frac{10,5 \cdot 115^2}{100 \cdot 40\,000} \cdot 10^3 = 34,7 \text{ Ом}$$

распределяется между лучами схемы замещения (обмотками) трансформатора (рис. 3.6, б) в следующем соотношении:

$$R_B = 0,5R = 0,5 \cdot 1,45 = 0,725 \text{ Ом};$$

$$X_B = 0,125X = 0,125 \cdot 34,7 = 4,34 \text{ Ом};$$

$$R_{НН1} = R_{НН2} = R = 1,45 \text{ Ом};$$

$$X_{НН1} = X_{НН2} = 1,75 \cdot X_B = 1,75 \cdot 4,34 = 7,59 \text{ Ом}.$$

Если приближенно принять, что $\underline{Z}_B = 0$ и все сопротивление трансформатора сосредоточено в обмотке НН:

$$\underline{Z}_{НН1} = \underline{Z}_{НН2} = 2 \cdot \underline{Z} = 2(1,45 + j34,7) = 2,90 + j69,4 \text{ Ом},$$

то схему замещения в продольной части можно рассматривать как двухлучевую звезду (рис. 3.7).

Реактивные потери мощности холостого хода:

$$\Delta Q_x = \frac{I_x \cdot S_{НОМ}}{100} = \frac{0,7 \cdot 40\,000}{100} = 280 \text{ квар.}$$

Проводимости трансформатора:

$$G = \frac{\Delta P_x}{U_{ВН}^2} \cdot 10^{-3} = \frac{36}{115^2} \cdot 10^{-3} = 2,72 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

$$B = \frac{\Delta Q_x}{U_{ВН}^2} = \frac{280}{115^2} \cdot 10^{-3} = 21,2 \cdot 10^{-6} \text{ См}.$$

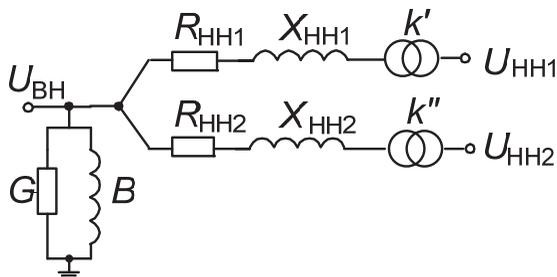


Рис. 3.7. Упрощенная схема замещения понижающего трансформатора с расщепленной обмоткой низкого напряжения

Коэффициенты трансформации:

$$k' = \frac{U_{ВН}}{U_{НН1}} = \frac{115}{10,5} = 10,95;$$

$$k'' = \frac{U_{ВН}}{U_{НН2}} = \frac{115}{6,3} = 18,25.$$

Главная особенность трансформатора заключается в повышенном значении сопротивления цепи между шинами НН₁–НН₂ (в пределах от 3,5 до 4,0 Z) и цепи между шинами ВН–НН₁₍₂₎ (от 1,88 до 2,0 Z), что служит естественным способом (без установки токоограничивающих реакторов) ограничения токов короткого замыкания. Наличие двух секций шин позволяет осуществлять раздельное питание неоднородных потребителей и способствует улучшению резервирования электроснабжения.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 4

ТРЕХОБМОТОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ И АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ В СХЕМАХ ЭЭС. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНОМ ЗАДАНИИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Задача 4.1. Определить параметры схемы замещения трехфазной группы мощностью 399 000 кВА, состоящей из трех однофазных двухобмоточных повышающих трансформаторов типа ОДЦГ133000/500 / $\sqrt{3}$.
Паспортные данные трансформатора:

$$S_{\text{НОМ}} = 133 \text{ МВА}, U_{\text{ВН}} = 525 / \sqrt{3} \text{ кВ}, U_{\text{НН}} = 13,8 / \sqrt{3} \text{ кВ},$$

$$\Delta P_{\text{К}} = 513 \text{ кВт}, \Delta P_{\text{Х}} = 430 \text{ кВт}, U_{\text{К}} = 13,4 \%, I_{\text{Х}} = 3,0 \%$$

Решение

Так как группа состоит из однофазных трансформаторов, возможны два пути расчета: 1) с использованием междуфазного напряжения, утроенных потерь мощности короткого замыкания и трехфазной мощности; 2) с использованием фазного напряжения, заданных потерь короткого замыкания и мощности одной фазы:

$$1) R_1 = \frac{\Delta P_{\text{К}} U_{\text{Н}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2} = \frac{3 \cdot 513 \cdot 525^2}{399^2} \cdot 10^3 = 2,67 \text{ Ом};$$

$$2) R_2 = \frac{\Delta P_K U_H^2}{S_{НОМ}^2} = \frac{513 \cdot \left[\frac{525}{\sqrt{3}} \right]^2}{133^2} \cdot 10^{-3} = 2,67 \text{ Ом.}$$

Естественно, что оба расчета дают одинаковый результат. Расчет индуктивного сопротивления производим аналогично:

$$1) X_1 = \frac{U_K U_H^2}{100 S_{НОМ}} = \frac{13,4 \cdot 525^2}{100 \cdot 399} = 92,56 \text{ Ом;}$$

$$2) X_2 = \frac{U_K U_H^2}{100 S_{НОМ}} = \frac{13,4 \cdot \left[\frac{525}{\sqrt{3}} \right]^2}{100 \cdot 133} = 92,56 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление рассматриваемого трансформатора значительно превышает активное, поэтому учет только активных сопротивлений мощных трансформаторов не внесет заметной ошибки в расчеты электрических режимов электрической сети. Необходимость учета активных сопротивлений возникает при анализе потерь активной мощности и электроэнергии в сети.

Потери холостого хода группы однофазных повышающих трансформаторов

$$\begin{aligned} \Delta \underline{S}_x &= 3 \left(\Delta P_x^\phi + j \Delta Q_x^\phi \right) = 3 \left(430 + j \frac{3}{100} \cdot 133\,000 \right) = \\ &= 1290 + j 11970 \text{ кВА.} \end{aligned}$$

Проводимости трансформатора:

$$G = \frac{\Delta P_x}{U_{ВН}^2} \cdot 10^{-3} = \frac{1290}{525^2} \cdot 10^{-3} = 4,68 \cdot 10^{-6} \text{ См;}$$

$$B = \frac{\Delta Q_x}{U_{ВН}^2} = \frac{11970}{525^2} \cdot 10^{-3} = 43,4 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Трансформация генераторного напряжения в сеть 500 кВ представляется в схеме замещения идеальным трансформатором с коэффициентом трансформации

$$k = \frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{НН}}} = \frac{525}{13,8} = 38,0.$$

Рассмотренная трехфазная группа однофазных повышающих трансформаторов учитывается схемой замещения, соответствующей трехфазному трансформатору.

Задача 4.2. Трехобмоточные трансформаторы типа ТДТН-40000/220/35 имеют соотношения мощностей обмоток 100/100/100 % и 100/100/66,7 %. Каталожные данные трансформатора представлены в таблице.

Каталожные данные трансформатора

Номинальное напряжение обмоток, кВ			$U_k, \%$			$\Delta P_k, \text{кВт}$			$\Delta P_x, \text{кВт}$	$I_x, \%$
ВН	СН	НН	В-Н	В-Н	С-Н	В-С	В-Н	С-Н	55	1,1
230	38,5	6,6	12,5	22	9,5	220	–	–		

Требуется определить параметры схемы замещения двух параллельно работающих трансформаторов первого и второго типа исполнения.

Решение

1. Определим параметры схемы замещения для первого исполнения трансформаторов.

При одинаковой мощности обмоток их активные сопротивления равны

$$R_B = R_C = R_H = \frac{1}{2} R_{\text{общ}} = \frac{1}{2} \frac{\Delta P_k U_H^2}{S_{\text{ном}}^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{220 \cdot 230^2}{40\,000^2} \cdot 10^3 = 3,60 \text{ Ом}.$$

Найдем индуктивные сопротивления ветвей схемы замещения:

$$X_{1-2} = X_{B-C} = \frac{U_{K_{B-C}}}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_{НОМ}} \cdot 10^3 = \frac{12,5}{100} \cdot \frac{230^2}{40\,000} \cdot 10^3 = 165,3 \text{ Ом};$$

$$X_{1-3} = X_{B-H} = \frac{U_{K_{B-H}}}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_{НОМ}} \cdot 10^3 = \frac{22}{100} \cdot \frac{230^2}{40\,000} \cdot 10^3 = 291,0 \text{ Ом};$$

$$X_{2-3} = X_{C-H} = \frac{U_{K_{C-H}}}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_{НОМ}} \cdot 10^3 = \frac{9,5}{100} \cdot \frac{230^2}{40\,000} \cdot 10^3 = 125,6 \text{ Ом}.$$

Индуктивное сопротивление для каждой обмотки определим следующим образом:

$$\begin{aligned} X_1 = X_B &= 0,5(X_{B-C} + X_{B-H} - X_{C-H}) = \\ &= 0,5(165,3 + 291,0 - 125,6) = 165,4 \text{ Ом}; \end{aligned}$$

$$X_2 = X_C = 0,5(X_{B-C} + X_{C-H} - X_{B-H}) = 0,5(165,3 + 125,6 - 291,0) \approx 0$$

$$\begin{aligned} X_3 = X_H &= 0,5(X_{B-H} + X_{C-H} - X_{B-C}) = \\ &= 0,5(291,0 + 125,6 - 165,3) = 125,7 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Комплексные сопротивления двух параллельно работающих трансформаторов $\underline{Z} = \frac{1}{n_T} (R + jX)$:

$$\underline{Z}_B = \frac{1}{2} (R_B + jX_B) = \frac{1}{2} (3,60 + j165,3) = 1,80 + j82,7 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_C = \frac{1}{2} (R_C + jX_C) = \frac{1}{2} (3,60 + j0) = 1,80 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_H = \frac{1}{2} (R_H + jX_H) = \frac{1}{2} (3,60 + j125,7) = 1,80 + j62,85 \text{ Ом}.$$

Эквивалентная комплексная проводимость

$$\begin{aligned} \underline{Y} &= n_T(g - jb) = n_T \left(\frac{\Delta P_x}{U_H^2} - j \frac{\Delta Q_x}{U_H^2} \right) = n_T \left(\frac{\Delta P_x}{U_H^2} - j \frac{I_x S_{\text{НОМ}}}{100 U_H^2} \right) = \\ &= 2 \left(\frac{55}{230^2} - j \frac{1,1 \cdot 40000}{100 \cdot 230^2} \right) 10^{-3} = (2,08 - j16,64) \cdot 10^{-6} \text{ См.} \end{aligned}$$

2. Определим параметры схемы замещения для второго исполнения трансформаторов.

Сопrotивления двух одинаковых по мощности обмоток ВН и СН с известными общими потерями короткого замыкания $\Delta P_{\text{КВ-Н}}$ определим аналогично предыдущему случаю:

$$R_B = R_C = \frac{R_{\text{В-С}}}{2} = \frac{\Delta P_{\text{КВ-С}} U_H^2}{2 S_{\text{НОМ}}^2} \cdot 10^{-3} = \frac{220 \cdot 230^2}{2 \cdot 40^2} \cdot 10^{-3} = 3,60 \text{ Ом.}$$

Учитывая, что сопротивления и мощности обмоток связаны обратно пропорциональной зависимостью

$$\frac{S_{\text{ВН}}}{S_{\text{НН}}} = \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{В}}} = \frac{100}{66,7} \approx 1,50,$$

сопротивление обмотки НН определим в виде

$$R_{\text{Н}} = 1,50 R_{\text{В}} = 1,50 \cdot 3,60 = 5,40 \text{ Ом.}$$

Так как значения напряжения короткого замыкания даются в каталогах приведенными к номинальной мощности трансформаторов, индуктивные сопротивления обмоток первого и второго исполнения принимают одинаковыми. Поэтому имеем

$$\underline{Z}_{\text{В}} = \frac{1}{2}(R_{\text{В}} + jX_{\text{В}}) = \frac{1}{2}(3,60 + j165,4) = 1,80 + j82,7 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{\text{С}} = \frac{1}{2}(R_{\text{С}} + jX_{\text{С}}) = \frac{1}{2}(3,60 + j0) = 1,80 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{\text{Н}} = \frac{1}{2}(R_{\text{Н}} + jX_{\text{Н}}) = \frac{1}{2}(5,40 + j125,7) = 2,7 + j62,85 \text{ Ом.}$$

Трансформации учитывают идеальными коэффициентами трансформации:

с высшего на среднее напряжение

$$k_{\text{В-С}} = \frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{СН}}} = \frac{230}{38,5} = 5,94;$$

с высшего на низшее напряжение

$$k_{\text{В-Н}} = \frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{НН}}} = \frac{230}{6,6} = 34,85.$$

Задача 4.3. Электропередача (рис. 4.1) напряжением 220 кВ имеет на понижающей подстанции два автотрансформатора, каждый мощностью по 32 000 МВА. Мощность обмотки низшего напряжения составляет 50 % номинальной мощности автотрансформатора. Потери мощности короткого замыкания, указанные в паспортных данных, приведенные к номинальной мощности обмотки низшего напряжения, напряжения короткого замыкания – к номинальной мощности трансформатора. Определить параметры схемы замещения автотрансформаторов (рис. 4.2), представленных в схеме замещения данной сети.

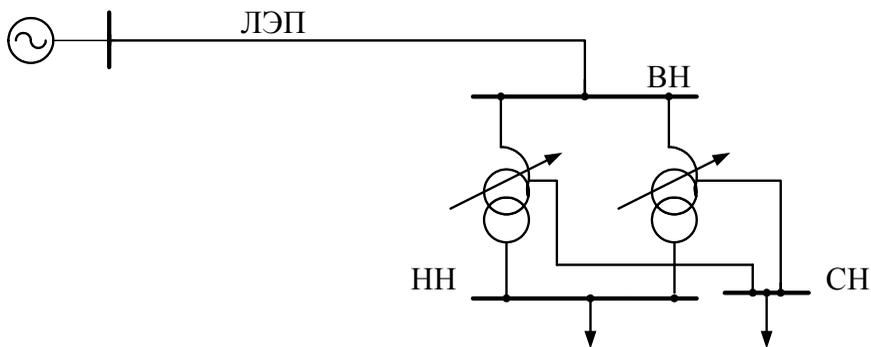


Рис. 4.1. Схема электропередачи напряжением 220 кВ

Решение

Паспортные данные автотрансформаторов принимаем из справочной литературы для АДЦТН-32000/220/110 [16]:

$$U_B = 230 \text{ кВ}, U_C = 121 \text{ кВ}, U_H = 6,6 \text{ кВ};$$

$$U_{\text{КВ-С}} = 11 \%, U_{\text{КВ-Н}} = 34 \%, U_{\text{КС-Н}} = 21 \%;$$

$$\Delta P_{\text{КВ-Н}} = 145 \text{ кВт}, \Delta P_X = 32 \text{ кВт}, I_X = 0,6 \ %.$$

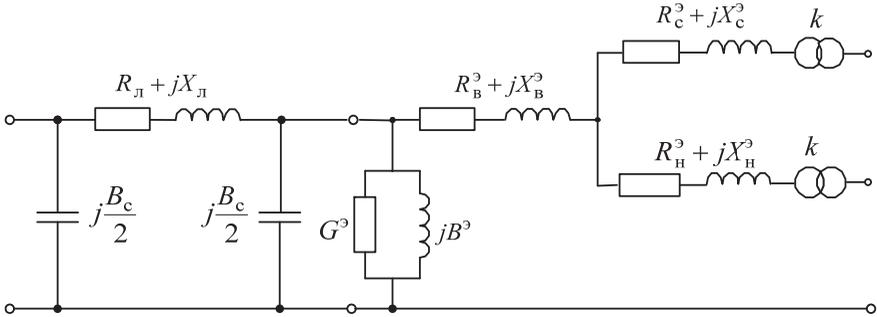


Рис. 4.2. Схема замещения электропередачи 220 кВ

Для определения активных сопротивлений обмоток автотрансформатора необходимо $\Delta P_{\text{КВ-Н}}$ привести к номинальной мощности через коэффициент приведения (пересчета):

$$\alpha = \frac{S_{\text{НН}}}{S_{\text{ВН}}} = \frac{50}{100} = 0,50;$$

$$\Delta P'_{\text{КВ-Н}} = \frac{\Delta P_{\text{КВ-Н}}}{\alpha^2} = \frac{145}{0,50^2} = 580 \text{ кВт}.$$

Далее определим активные сопротивления ветвей схемы замещения.

Суммарное активное сопротивление обмоток высшего и низшего напряжений

$$R = \frac{\Delta P'_{\text{КВ-Н}} U_{\text{ВН}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2} \cdot 10^{-3} = \frac{580 \cdot 230^2}{32^2} \cdot 10^{-3} = 30,0 \text{ Ом}.$$

Учитывая, что активные сопротивления обратно пропорциональны мощностям соответствующих обмоток, имеем соотношение

$$\frac{S_{\text{НОМ}}}{S_{\text{НН}}} = \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{В}}} = \frac{100}{50} = 2,0,$$

с учетом которого получим

$$R_{\text{В-Н}} = R_{\text{В}} + R_{\text{Н}} = 3R_{\text{В}} = 30,0 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{В}} = R_{\text{С}} = 10,0 \text{ Ом}; R_{\text{Н}} = 20,0 \text{ Ом}.$$

Правильность расчета можно проверить, найдя по параметрам схемы замещения паспортные значения потерь активной мощности при замыкании накоротко обмотки низшего напряжения:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{КВ-Н}} &= \Delta P'_{\text{КВ-Н}} \alpha^2 = \frac{S_{\text{НОМ}}^2}{U_{\text{ВН}}^2} R_{\text{В-Н}} \alpha^2 = \\ &= \frac{32^2}{230^2} \cdot 30,0 \cdot 0,50^2 \cdot 10^3 = 145 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

По напряжениям короткого замыкания отдельных обмоток

$$U_{\text{КВ}} = 0,5(U_{\text{КВ-Н}} + U_{\text{КВ-Н}} - U_{\text{КС-Н}}) = 0,5(11 + 34 - 21) = 12,0 \text{ %};$$

$$U_{\text{КС}} = 0,5(U_{\text{КВ-С}} + U_{\text{КС-Н}} - U_{\text{КВ-Н}}) = 0,5(11 + 21 - 34) = 1,0 \text{ %};$$

$$U_{\text{КН}} = 0,5(U_{\text{КВ-Н}} + U_{\text{КС-Н}} - U_{\text{КВ-С}}) = 0,5(34 + 21 - 11) = 22,0 \text{ %}$$

вычислим индуктивные сопротивления ветвей схемы замещения:

$$X_{\text{В}} = \frac{U_{\text{КВ}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ВН}}^2}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{12,0 \cdot 230^2}{100 \cdot 32} = 198 \text{ Ом};$$

$$X_{\text{С}} = 0;$$

$$X_{\text{Н}} = \frac{U_{\text{КН}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ВН}}^2}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{22,0 \cdot 230^2}{100 \cdot 32} = 363 \text{ Ом}.$$

Определим параметры поперечной ветви схемы замещения.
Потери реактивной мощности в режиме холостого хода

$$\Delta Q_x = \frac{I_x}{100} S_{\text{ном}} \cdot 10^3 = \frac{0,6}{100} \cdot 32 \cdot 10^3 = 192 \text{ квар.}$$

На основе мощностей холостого хода, потребляемых при номинальном питающем напряжении, определим активную и реактивную проводимости автотрансформатора:

$$\begin{aligned} \underline{Y} &= G - jB = (\Delta P_x - j\Delta Q_x) \frac{10^{-3}}{U_{\text{ВН}}^2} = \\ &= (32 - j192) \frac{10^{-3}}{230^2} = (0,605 - j3,65) 10^{-6} \text{ См.} \end{aligned}$$

Найдем эквивалентные параметры схемы замещения двух одинаковых автотрансформаторов. Сопротивления обмоток уменьшаются, а проводимости увеличиваются в два раза. На параллельной работе трансформирующие устройства должны иметь одинаковые коэффициенты трансформации, номинальные значения которых составляют

$$K_{\text{В-С}} = \frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{СН}}} = \frac{230}{121} = 1,90; \quad K_{\text{В-Н}} = \frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{НН}}} = \frac{230}{6,6} = 34,8.$$

Задача 4.4. На крупной узловой подстанции энергосистемы установлены два автотрансформатора типа АТДЦТН-250000/330/150 со следующими каталожными данными:

$$U_{\text{В}} = 330 \text{ кВ}, \quad U_{\text{С}} = 158 \text{ кВ}, \quad U_{\text{Н}} = 38,5 \text{ кВ},$$

$$U_{\text{КВ-С}} = 10,5 \%, \quad U_{\text{КВ-Н}} = 54 \%, \quad U_{\text{КС-Н}} = 42 \%,$$

$$\Delta P_{\text{КВ-С}} = 660 \text{ кВт}, \quad \Delta P_{\text{КВ-Н}} = 490 \text{ кВт}, \quad \Delta P_{\text{КС-Н}} = 400 \text{ кВт},$$

$$\Delta P_x = 165 \text{ кВт}, \quad I_x = 0,5 \%.$$

Мощность обмотки НН составляет 40 % от номинальной. Потери активной мощности короткого замыкания для обмоток ВН–СН и СН–НН даны для обмотки НН.

Определить параметры схемы замещения двух параллельно включенных автотрансформаторов.

Решение

Сначала необходимо привести значения потерь короткого замыкания для обмоток ВН–СН и СН–НН к номинальной мощности трансформатора:

$$\alpha = \frac{40}{100} = 0,40;$$

$$\Delta P_{\text{кв-н}} = \frac{490}{0,40^2} = 3062 \text{ кВт}, \quad \Delta P_{\text{кс-н}} = \frac{400}{0,40^2} = 2500 \text{ кВт}.$$

Рассчитаем потери активной мощности и напряжения короткого замыкания, соответствующие лучам схемы замещения:

$$\Delta P_{\text{кв}} = 0,5(660 + 3062 - 2500) = 611 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{\text{кс}} = 0,5(660 + 2500 - 3062) = 49 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{\text{кн}} = 0,5(3062 + 2500 - 660) = 2451 \text{ кВт};$$

$$U_{\text{кв}} = 0,5(10,5 + 54 - 42) = 11,25 \text{ \%};$$

$$U_{\text{кс}} = 0,5(10,5 + 42 - 54) \approx 0 \text{ \%};$$

$$U_{\text{кн}} = 0,5(54 + 42 - 10,5) = 42,75 \text{ \%}.$$

Определим комплексные сопротивления лучей схемы замещения двух параллельно включенных автотрансформаторов:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\text{в}}^{\text{э}} = R_{\text{в}}^{\text{э}} + jX_{\text{в}}^{\text{э}} &= \frac{1}{2} \left(\frac{611 \cdot 330^2}{250 \ 000^2} + j \frac{11,25 \cdot 330^2}{100 \cdot 250 \ 000} \right) \cdot 10^3 = \\ &= 0,53 + j24,5 \text{ Ом}; \end{aligned}$$

$$\underline{Z}_c^3 = R_c^3 + jX_c^3 = \frac{1}{2} \left(\frac{49 \cdot 330^2}{250\,000^2} + j0 \right) \cdot 10^3 = 0,04 + j0 \text{ Ом};$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_H^3 &= R_H^3 + jX_H^3 = \frac{1}{2} \left(\frac{2451 \cdot 330^2}{250\,000^2} + j \frac{42,75 \cdot 330^2}{100 \cdot 250\,000} \right) \cdot 10^3 = \\ &= 2,14 + j186,2 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Суммарные потери холостого хода двух автотрансформаторов

$$\Delta \underline{S} = 2 \left(165 + j \frac{0,5 \cdot 250\,000}{100} \right) \cdot 10^{-3} = 0,33 + j2,50 \text{ МВА.}$$

Убедимся, что мощность обмотки НН составляет 40 % от номинального значения.

Определим номинальный ток обмотки ВН:

$$I_B = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}U_B} = \frac{250\,000}{\sqrt{3} \cdot 330} = 437,4 \text{ А};$$

$$I_B = I_C, \text{ а } I_H = 40 \% \text{ от } I_B, \text{ т. е. } I_H = 0,40 \cdot 437,4 = 174,95 \text{ А.}$$

По полученным результатам можно вычислить потери короткого замыкания для каждой пары обмоток, заданные в условии задачи:

$$\Delta P_{B-C} = 3 \cdot I_C^2 \cdot R_{B-C} = 3 \cdot 437,4^2 \cdot 2 \cdot (0,53 + 0,04) \approx 660 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{B-H} = 3 \cdot I_H^2 \cdot R_{B-H} = 3 \cdot 174,95^2 \cdot 2 \cdot (0,53 + 2,14) \approx 490 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{C-H} = 3 \cdot I_H^2 \cdot R_{C-H} = 3 \cdot 174,95^2 \cdot 2 \cdot (0,04 + 2,14) \approx 400 \text{ кВт}.$$

Равенство расчетных и заданных потерь короткого замыкания следует рассматривать в качестве признака правильности учета данного соотношения мощностей обмоток автотрансформатора.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 5

РАСЧЕТ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПРИ РАЗЛИЧНОМ СПОСОБЕ ЗАДАНИЯ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Задача 5.1. Для воздушной линии 220 кВ с нагрузкой в конце $\underline{S}_2 = 200 + j100$ МВА известны параметры схемы замещения: сопротивление звена $\underline{Z} = 10 + j40$ Ом и емкостная проводимость $B_c = 1,00 \cdot 10^{-3}$ См.

Требуется выполнить электрический расчет линии электропередачи и определить конструктивные параметры ВЛ: сечение проводов, количество цепей и протяженность ЛЭП.

Решение

Рассмотрим три случая расчета режимных параметров начала и конца ветви.

Первый случай. Заданы напряжение и мощность в конце линии (рис. 5.1) $U_2 = 205$ кВ, $\underline{S}_2 = 200 + j100$ МВА. Требуется определить напряжение \dot{U}_1 и мощность \underline{S}_1 в начале линии.

Известные в конце линии значения мощности \underline{S}_2 и напряжения \dot{U}_2 позволяют однозначно точно определить величину тока нагрузки

$$\dot{I}_2 = \frac{\underline{S}_2^*}{\sqrt{3} \cdot U_2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{200 - j100}{205} = 0,563 - j0,282 \text{ кА,}$$

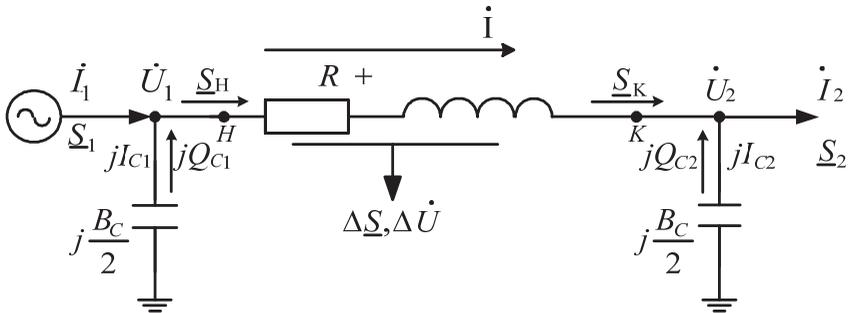


Рис. 5.1. Схема замещения и параметры режима линии

поэтому расчет всех других параметров режима и расчет электрического режима схемы в целом выполняют в один этап от конца к началу звена. Алгоритм расчета имеет прямой (точный) характер.

Зарядная мощность

$$Q_{c2} = \frac{1}{2} U_2^2 B_c = \frac{1}{2} \cdot 205^2 \cdot 1,00 \cdot 10^{-3} = 21,0 \text{ Мвар.}$$

Емкостный ток в конце схемы

$$I_{c2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_2}{\sqrt{3}} \cdot B_c = \frac{1}{2} \cdot \frac{205}{\sqrt{3}} \cdot 1,00 \cdot 10^{-3} = 0,059 \text{ кА.}$$

Мощность в конце звена

$$\underline{S}_k = \underline{S}_2 - jQ_{c2} = 200 + j100 - j21,0 = 200 + j79,0 \text{ МВт,}$$

с учетом которой ток линии по данным конца участка

$$\dot{I} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\underline{S}_k^*}{U_2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{200 - j79,0}{205} = 0,563 - j0,222 \text{ кА,}$$

или по балансу токов в конце схемы

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \dot{I}_2 + jI_{c2} = 0,563 - j0,282 + j0,059 = \\ &= 0,565 - j0,223 \text{ кА.} \end{aligned}$$

Вектор падения напряжения, вычисленный через ток линии:

$$\Delta \dot{U} = \sqrt{3} \cdot \dot{I} \underline{Z} = \sqrt{3} \cdot (0,563 - j0,222) \cdot (10 + j40) = 25,2 + j35,2 \text{ кВ},$$

или по данным конца участка в виде

$$\Delta \dot{U}_2 = \frac{S_{\text{к}}^*}{U_2} \cdot \underline{Z} = \frac{200 - j79}{205} \cdot (10 + j40) = 25,2 + j35,2 \text{ кВ},$$

ориентирован относительно вектора напряжения \dot{U}_2 в конце участка.

$$\text{Модуль } |\Delta \dot{U}_2| = \sqrt{25,2^2 + 35,2^2} = 43,3 \text{ кВ}.$$

Вектор напряжения в начале линии

$$\begin{aligned} U_1 &= U_2 + \Delta U_2' = U_2 + \Delta U_2' + j\delta U_2'' = \\ &= 205 + 25,2 + j35,2 = 230,2 + j35,2 \end{aligned}$$

характеризуется модулем

$$\begin{aligned} |\dot{U}_1| &= U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_2')^2 + (\delta U_2'')^2} = \\ &= \sqrt{(205 + 25,2)^2 + 35,2^2} = 232,8 \text{ кВ} \end{aligned}$$

и фазой напряжения

$$\delta_1 = \arctg \frac{\delta U_2''}{U_2 \Delta U_2'} = \arctg \frac{35,2}{205 + 25,2} = 8,698^\circ.$$

Вычислим напряжение в начале линии без учета поперечной составляющей падения напряжения:

$$U_1 = U_2 + \Delta U_2' = 205 + 25,2 = 230,2 \text{ кВ}.$$

Отсюда видно, что пренебрежение поперечной составляющей падения напряжения вносит ошибку (230,2 и 232,8 кВ), соответствующую погрешности исходных данных. Влияние поперечной составляющей на потери напряжения можно учесть приближенно:

$$\Delta U_2 + \Delta U'_2 + \frac{(\delta U_2'')^2}{2(U_2 + \Delta U'_2)} = 25,2 + \frac{35,2^2}{2(205 + 25,2)} = 27,9 \text{ кВ},$$

что позволяет определить одинаковые значения модуля напряжения:

$$U_1 = U_2 + \Delta U'_2 = 205 + 27,9 = 232,9 \text{ кВ}.$$

На величину потерь мощности

$$\Delta S = \left(\frac{S_{\text{к}}}{U_2} \right)^2 \underline{Z} = \frac{200^2 + 79^2}{205^2} (10 + j40) = 11,0 + j44,0 \text{ МВА}$$

поток мощности в начале линии больше потока в конце:

$$\underline{S}_{\text{н}} = \underline{S}_{\text{к}} + \Delta \underline{S} = 200 + j79,0 + 11,0 + j44,0 = 211,0 + j123,0 \text{ МВА}.$$

Вычисление тока линии по данным начала и конца участка дает одинаковый результат:

$$\dot{I} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{S_{\text{н}}^*}{U_1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{211,0 - j123,0}{230,2 - j35,2} = 0,563 - j0,222 \text{ кА}.$$

Зарядная мощность

$$Q_{c1} = \frac{1}{2} U_1^2 B_c = \frac{1}{2} \cdot 232,8^2 \cdot 1,00 \cdot 10^{-3} = 27,1 \text{ Мвар}.$$

Емкостный ток в начале схемы

$$I_{c1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_1}{\sqrt{3}} \cdot B_c = \frac{1}{2} \cdot \frac{232,8}{\sqrt{3}} \cdot 1,00 \cdot 10^{-3} = 0,067 \text{ кА}.$$

Учитывая зарядные (емкостные) мощности и ток в начале линии, определяем по балансовым соотношениям ток и мощность, потребляемые линией от питающего источника:

$$\dot{I}_1 = \dot{I} + jI_{c1} = 0,563 - j0,222 + j0,067 = 0,563 - j0,155 \text{ кА},$$

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_{\text{н}} - jQ_{c1} = 211,0 + j123,0 - j27,1 = 211,0 + j95,9 \text{ МВА}.$$

Второй случай. Заданы напряжение U_1 и мощность \underline{S}_1 в начале схемы, равные полученным при расчете первого случая: $U_1 = 232,8$ кВ, $\underline{S}_1 = 211,0 + j95,9$ МВА. Требуется определить напряжение \dot{U}_2 и мощность \underline{S}_2 в конце схемы.

Как и в предыдущем случае, данные мощность \underline{S}_1 и напряжение \dot{U}_1 в начале линии позволяют однозначно определить значение тока:

$$\dot{I}_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\underline{S}_1^*}{U_1^*} = \frac{211,0 - j95,9}{\sqrt{3} \cdot 232,8} = 0,523 - j0,238 \text{ кА},$$

поэтому расчет выполняют в один этап, в данном случае – от начала к концу схемы.

Ток линии с учетом емкостного тока проводимости (см. первый случай)

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + jI_{c1} = 0,523 - j0,238 - j0,067 = 0,523 - j0,305 \text{ кА}$$

и мощность в начале звена с учетом зарядной мощности

$$\underline{S}_H = \underline{S}_1 + jQ_{c1} = 211,0 + j95,9 + j27,1 = 211,0 + j123,0 \text{ МВА}$$

определяют величину вектора падения напряжения на линии:

$$\Delta U_1 = \sqrt{3} \cdot \dot{I} \underline{Z} = \sqrt{3} (0,523 - j0,305) \cdot (10 + j40) = 30,3 + j31,0 \text{ кВ},$$

или в виде вектора

$$\Delta \dot{U}_1 = \frac{\underline{S}_H^*}{U_1^*} \underline{Z} = \frac{211,0 - j95,9}{\sqrt{3} \cdot 232,8} (10 + j40) = 30,2 + j31,0 \text{ кВ},$$

ориентированного (вычисленного) относительно известного вектора напряжения \dot{U}_1 .

Векторы падения напряжения

$$\Delta \dot{U}_1 = \Delta U_1' + j\delta U_1'' \quad \text{и} \quad \Delta \dot{U}_2 = \Delta U_2' + j\delta U_2'',$$

ориентированные относительно векторов напряжения соответственно \dot{U}_1 и \dot{U}_2 , отличаются продольной $\Delta U_1' \neq \Delta U_2'$ и поперечной $\delta U_1'' \neq \delta U_2''$ составляющими (рис. 5.2), однако оба вектора падения напряжения $\Delta \dot{U}_1$ и $\Delta \dot{U}_2$ одинаковы по модулю:

$$\left| \Delta \dot{U}_1 \right| = \Delta U_1 = \sqrt{(\Delta U_2')^2 + (\delta U_2'')^2} = \sqrt{30,2^2 + 31,0^2} = 43,3 \text{ кВ.}$$

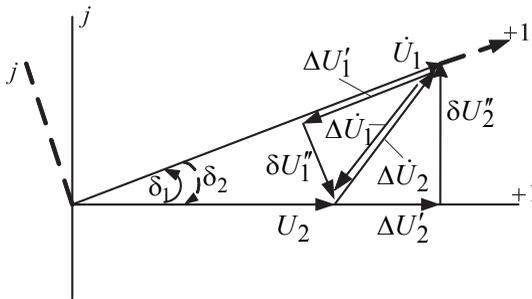


Рис. 5.2. Векторная диаграмма напряжений

Для вектора напряжения в конце линии

$$\dot{U}_2 = U_1 - \Delta \dot{U}_1 = 232,8 - 30,2 - j31,0 = 202,6 - j31,0 \text{ кВ}$$

определим модуль

$$\begin{aligned} |\dot{U}_2| &= U_2 = \sqrt{(U_1 - \Delta U_1')^2 + (\delta U_1'')^2} = \\ &= \sqrt{(232,8 - 30,2)^2 + 31,0^2} = 205,0 \text{ кВ} \end{aligned}$$

и фазу напряжения

$$\delta_1 = \arctg \frac{\delta U_1''}{U_1 + \Delta U_1'} = \arctg \frac{-31,0}{232,8 - 30,2} = -8,699^\circ,$$

т. е. напряжение получилось равным заданному напряжению U_2 при расчете первого случая, а фазы $\delta_1 = -\delta_2$ одинаковы по модулю и противоположны по знаку. Векторная диаграмма напряжений показана на рис. 5.2, при ее построении в целях наглядности не соблюден масштаб векторов.

Модуль напряжения в конце линии можно найти также приближенно через потерю напряжения, значение которой, с учетом влияния поперечной составляющей падения напряжения, определим в виде

$$\Delta U_1 = \Delta U_1' - \frac{(\delta U_1'')^2}{2 \cdot (U_1 - \Delta U_1')} = 30,2 - \frac{31,0^2}{2 \cdot (232,8 - 30,2)} = 27,8 \text{ кВ.}$$

Тогда получим результат

$$U_2 = U_1 - \Delta U_1 = 232,8 - 27,8 = 205,0 \text{ кВ,}$$

одинаковый с предыдущим.

Потери мощности вычислим по формуле

$$\Delta \underline{S} = 3I^2 \underline{Z} = 3 \cdot (0,523^2 + 0,305^2)(10 + j40) = 11,0 + j44,0 \text{ МВА}$$

или в виде

$$\Delta S = \left(\frac{S_H}{U_1} \right)^2 \underline{Z} = \frac{211,0^2 + 123,0^2}{232,8^2} (10 + j40) = 11,0 + j44,0 \text{ МВА.}$$

Поток мощности в конце звена меньше потока в ее начале на величину потерь:

$$\underline{S}_K = \underline{S}_H - \Delta \underline{S} = 211,0 + j123,0 - 11,0 - j44,0 = 200,0 + j79,0 \text{ МВА.}$$

Учет емкостного шунта в конце линии позволяет определить ток

$$\dot{I}_2 = \dot{I} + jI_{C2} = 0,523 - j0,305 - j0,059 = 0,523 - j0,364 \text{ кА}$$

и мощность на выходе линии (мощность потребителей)

$$\underline{S}_2 = \underline{S}_K + jQ_{C2} = 200,0 + j79,0 + j21,0 = 200 + j100 \text{ МВА.}$$

Таким образом, мощность получилась также равной заданной мощности \underline{S}_2 при расчете первого случая вследствие равенства потерь

активной и реактивной мощности ($\Delta \underline{S} = 11,0 + j44,0$ МВА) и генерации мощности емкостной проводимостью ВЛ 220 кВ ($Q_{C2} = 21,0$ Мвар).

Третий случай. Задана мощность в конце линии $\underline{S}_2 = 200 + j100$ МВА и напряжение в начале $U_1 = 232,8$ кВ. Требуется найти напряжение \dot{U}_2 в конце линии и мощность \underline{S}_1 в начале.

Расчет электрического режима начинается с узла схемы с заданной мощностью \underline{S}_2 (см. рис. 5.1). Так как напряжение в конце линии неизвестно, ток нагрузки

$$\dot{I}_2 = \frac{\underline{S}_2^*}{\sqrt{3} \cdot U_2^{(0)}} = \frac{200 - j100}{\sqrt{3} \cdot 200} = 0,525 - j0,262 \text{ кА}$$

и другие параметры, зависящие от напряжения, вычисляют приближенно через начальное значение $U_2^{(0)}$ методом последовательных приближений (методом итераций). Итерационный процесс расчета электрического режима складывается из прямого и обратного ходов. Прямой ход включает определение токо- и потокораспределения в линии с учетом потерь мощности, обратный ход связан с расчетом напряжения узла 2.

Прямой ход. Примем начальное значение напряжения в конце линии равным номинальному $U_2^{(0)} = 220$ кВ. Емкостный ток шунта B_{C2}

$$I_{C2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_2^{(0)}}{\sqrt{3}} B_c = \frac{1}{2} \frac{220}{\sqrt{3}} 1,00 \cdot 10^{-3} = 0,0635 \text{ кА}$$

и зарядная мощность в конце линии

$$Q_{C2} = \sqrt{3} \cdot U_2^{(0)} I_{C2} = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,0635 = 24,2 \text{ Мвар}$$

формируют нагрузку линии:

$$\dot{I} = \dot{I}_2 + jI_{C2} = 0,525 - j0,262 + j0,064 = 0,525 - j0,198 \text{ кА},$$

$$\underline{S}_k = \underline{S}_2 - jQ_{C2} = 200 + j100 - j24,2 = 200 + j75,8 \text{ МВА},$$

от которой зависят потери мощности в линии, вычисляемые через ток звена

$$\Delta \underline{S} = 3 \cdot I^2 \underline{Z} = 3(0,525^2 + 0,198^2) \cdot (10 + j40) = 9,44 + j37,78 \text{ МВА}$$

или параметры в конце звена

$$\Delta \underline{S} = \left(\frac{S_{\text{к}}}{U_2^{(0)}} \right)^2 \underline{Z} = \frac{200^2 + 75,8^2}{220^2} \cdot (10 + j40) = 9,45 + j37,79 \text{ МВА.}$$

Мощность в начале схемы

$$\underline{S}_{\text{н}} = \underline{S}_{\text{к}} + \Delta \underline{S} = 200 + j75,8 + 9,44 + j37,78 = 209,4 + j113,6 \text{ МВА.}$$

Учитывая заданное напряжение в начале линии, можно уточнить ток звена

$$\dot{I} = \frac{\underline{S}_{\text{к}}^*}{\sqrt{3} \cdot U_1} = \frac{209,4 - j113,6}{\sqrt{3} \cdot 232,8} = 0,519 - j0,282 \text{ кА,}$$

определить емкостный ток

$$I_{\text{c1}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_1}{\sqrt{3}} \cdot B_c = \frac{1}{2} \cdot \frac{232,8}{\sqrt{3}} \cdot 1,00 \cdot 10^{-3} = 0,0672 \text{ кА}$$

и зарядную мощность в начале схемы

$$Q_{\text{c1}} = \sqrt{3} \cdot U_1 I_{\text{c1}} = \sqrt{3} \cdot 232,8 \cdot 0,0672 = 27,1 \text{ Мвар,}$$

образующие нагрузку источника питания

$$\dot{I}_1 = \dot{I} + jI_{\text{c1}} = 0,519 - j0,282 + j0,0672 = 0,525 - j0,215 \text{ кА,}$$

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_{\text{н}} - jQ_{\text{c1}} = 209,4 + 113,6 - j27,1 = 209,4 + j86,5 \text{ МВА.}$$

Обратный ход. На этом этапе уточняют напряжение узла 2. В соответствии с направлением потока (тока) напряжение узла 2 можно выразить через известное напряжение питающего узла U_1 и падение напряжения:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 - \Delta \dot{U} = U_1 - \Delta U' - j\delta U''.$$

Вектор падения напряжения вычисляем по формуле

$$\Delta \dot{U} = \sqrt{3} \cdot \dot{I} \underline{Z} = \sqrt{3} \cdot (0,519 - j0,282) \cdot (10 + j40) = 28,51 + j31,10 \text{ кВ}$$

или в виде

$$\Delta \dot{U} = \frac{S_H^*}{U_1} \underline{Z} = \frac{209,4 - j113,6}{232,8} (10 + j40) = 28,51 + j31,10 \text{ кВ.}$$

Вектор напряжения в конце линии

$$\dot{U}_2 = U_1 - \Delta \dot{U} = 232,8 - 28,5 - j31,1 = 204,3 - j31,1 \text{ кВ}$$

характеризуется модулем

$$\begin{aligned} |\dot{U}_2| = U_2 &= \sqrt{(U_1 - \Delta U')^2 + (\delta U'')^2} = \\ &= \sqrt{(232,8 - 28,5)^2 + 31,1^2} = 206,6 \text{ кВ} \end{aligned}$$

и фазой напряжения

$$\delta_2 = \arctg \frac{\delta U_2''}{U_1 + \Delta U_1'} = \arctg \frac{-31,1}{232,8 - 28,5} = -8,66^\circ.$$

Определены параметры электрического режима в первом приближении. Так, найденное напряжение $U_2^{(1)} = 206,6 \text{ кВ}$ не равно напряжению $U_2 = 205 \text{ кВ}$ при той же мощности из первого случая. Для получения большей точности результатов необходимо найти следующие приближения расчета, заменив, например, в ходе второй итерации значение $U_2^{(0)}$ на $U_2^{(1)}$, полученное из первого приближения.

Оценка конструктивных параметров ВЛ 220 кВ. Установим, что по данным схемы замещения исходя из характерных (средних) значений погонных реактивных параметров ЛЭП: индуктивное сопротивление $X_0 = 0,42 \text{ Ом/км}$, емкостная проводимость $b_0 = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}$; ВЛ 220 кВ монтируют проводами сечения от 240 до 500 мм² с количеством цепей в одном направлении до четырех.

Предположим, что ВЛ 220 кВ одноцепная, тогда при средних значениях X_0 получим

$$L = \frac{X}{X_0} = \frac{40}{0,42} = 95,2 \text{ км.}$$

Записав активное сопротивление линии в виде

$$R = \frac{\rho}{F} \cdot L = \frac{30 \cdot 95,2}{F} = 10,$$

получим расчетное сечение провода

$$F = \frac{30 \cdot 95,2}{10} = 286 \text{ мм}^2.$$

Предварительно примем провод АС 300. Однако из выражения суммарной емкостной проводимости получим

$$b_0 = \frac{B_c}{L} = \frac{1,00 \cdot 10^{-3}}{95,2} \approx 0,10 \cdot 10^{-6} \text{ См/км,}$$

что не соответствует $(0,10 \ll 2,70) \cdot 10^{-6}$ характерным значениям погонной проводимости, т. е. данные параметры схемы замещения не соответствуют одноцепной ВЛ 220 кВ.

Полагаем, что линия двухцепная с одинаковыми параметрами цепей. Тогда для одной цепи имеем

$$X' = X_n = 40 \cdot 2 = 80 \text{ Ом}$$

при протяженности

$$L = \frac{X'}{X_0} = \frac{80}{0,42} = 190 \text{ км.}$$

Сечение провода установим из соотношения

$$R = \frac{\rho}{F} \cdot \frac{L}{n} = \frac{30 \cdot 190}{F \cdot 2} = 10,$$

откуда

$$F = \frac{30 \cdot 190}{10 \cdot 2} = 285 \text{ мм}^2.$$

Приняв ближайшее стандартное сечение АС 300, оценим значение погонной емкостной проводимости двухцепной ВЛ:

$$b_0 = \frac{B_c}{n \cdot L} = \frac{1,00 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 190} = 2,63 \cdot 10^{-6} \text{ См/км,}$$

которое соответствует характерной величине.

Для решения данной задачи дополнительно можно привлечь результаты расчета электрического режима линии, в частности суммарную емкостную генерацию (первый случай)

$$Q_{c\Sigma} = Q_{c1} + Q_{c2} = 27,1 + 21,0 = 48,1 \text{ Мвар.}$$

С учетом средней генерации зарядной мощности на 100 км, составляющей около $Q_{c100} = 12,5$ Мвар, получим следующую оценку протяженности ВЛ 220кВ:

$$L = \frac{Q_{c\Sigma}}{Q_{c100}} = \frac{48,1}{12,5} \cdot 100 = 385 \text{ км,}$$

что совпадает с предыдущей оценкой.

Таким образом, установим, что анализируемые параметры схемы замещения соответствуют двухцепной ВЛ 220 кВ, выполненной проводом АС 300 и суммарной протяженностью около 380 км.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 6

РАСЧЕТ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА СЕТИ, СОДЕРЖАЩЕЙ НЕСКОЛЬКО ПРОМЕЖУТОЧНЫХ НАГРУЗОК

Задача 6.1. Выполнить расчет установившегося режима сети, показанной на рис. 6.1. Две параллельные ВЛ различны по конструктивному исполнению, смонтированы проводом АС 120/19 и имеют протяженность 100 км. Однотрансформаторная подстанция с понижающим трансформатором ТРДН-40000/110. Нагрузки в сети: $\underline{S}_1 = 15 + j5$ МВА, $\underline{S}_2 = 20 + j10$ МВА, $\underline{S}_3 = 8 + j6$ МВА; напряжение питающего (базисного) узла 120,0 кВ. Абсолютная погрешность нагрузок $\Delta = 0,1$ МВА.

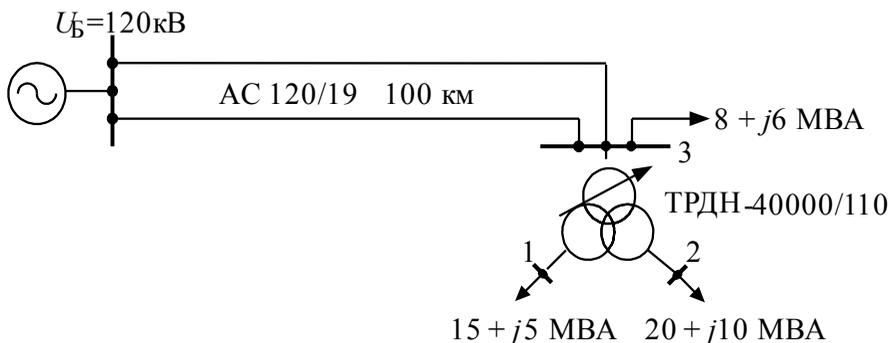


Рис. 6.1. Исходная схема сети

Решение

Расчет установившегося режима сети (рис. 6.1), в которой заданы мощности нагрузок в узлах и напряжение балансирующей станции (базисный по напряжению узел), сводится к итерационному процессу. Расчет режима сети произведем применительно к ее эквивалентной схеме замещения (рис. 6.2).

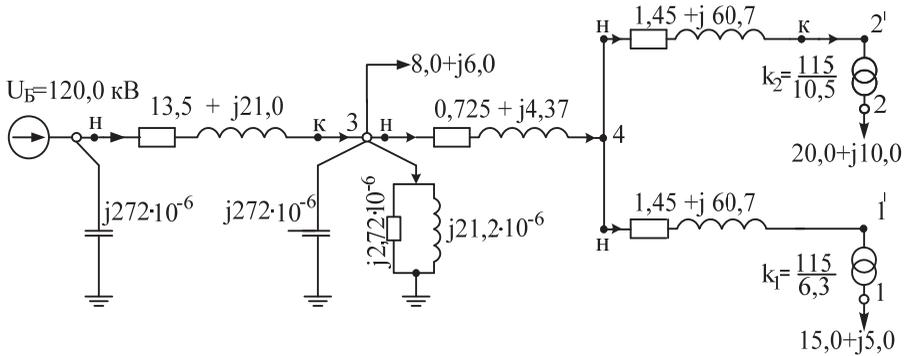


Рис. 6.2. Эквивалентная схема замещения сети

1. Двухцепная линия (участок Б–3) с проводом АС 120/19 имеет следующие эквивалентные параметры:

$$\underline{Z}_Л = \underline{Z}_{БЗ} = 13,5 + j21,0 \text{ Ом}, \quad B_c = 544 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

2. Трансформатор (ветви 3–4, 4–2; 4–1 и 3–0). Параметры трансформатора ТРДН-40000/110:

$$\underline{Z}_Т = 1,45 + j34,7 \text{ Ом}, \quad \underline{Z}_В = \underline{Z}_{ВН} = 0,725 + j4,37 \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_{нн1} = \underline{Z}_{нн2} = \underline{Z}_{41} = 1,45 + j60,7 \text{ Ом},$$

$$k_1 = 115 / 6,3, \quad k_2 = 115 / 10,5, \quad \underline{Y}_m = \underline{Y}_{30} = (2,72 - j21,2) \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Итерационный процесс расчета параметров режима электрической сети складывается из прямого и обратного ходов. Прямой ход включает определение потокораспределения в сети с учетом потерь мощности, обратный – связан с расчетом напряжений узлов сети.

Прямой ход первой итерации. Для выполнения расчета потоко-распределения необходимо задать начальное приближение в узлах сети. Пусть $U_1^{(0)} = U_2^{(0)} = 105$ кВ, $U_3^{(0)} = U_4^{(0)} = 110$ кВ.

Расчет начинается с конца схемы, т. е. с узла 1 или 2 (рис. 6.2). Потоки в конце участков 4–1' и 4–2' совпадают с нагрузками, так как участки 1–1' и 2–2' являются идеальными трансформаторами:

$$\underline{S}_{41'}^K = 15,0 + j5,0 \text{ МВА}, \quad \underline{S}_{42'}^K = 20,0 + j10,0 \text{ МВА}.$$

Потери мощности на участке 4–1' и 4–2' (в обмотках НН):

$$\Delta \underline{S}_{41'} = \left(\frac{\underline{S}_{41'}^K}{U_{1'}^{(0)}} \right)^2 \underline{Z}_{41'} = \frac{15,0^2 + 5,0^2}{105^2} (1,45 + j60,7) =$$

$$0,033 + j1,38 \text{ МВА},$$

$$\Delta \underline{S}_{42'} = \left(\frac{\underline{S}_{42'}^K}{U_{2'}^{(0)}} \right)^2 \underline{Z}_{42'} = \frac{20,0^2 + 10,0^2}{105^2} (1,45 + j60,7) =$$

$$= 0,066 + j2,75 \text{ МВА}.$$

Потоки мощности в начале звеньев 4–1' и 4–2' :

$$\underline{S}_{41'}^H = \underline{S}_{41'}^K + \Delta \underline{S}_{41'} = 15,0 + j5,0 + 0,03 + j1,38 =$$

$$= 15,03 + j6,38 \text{ МВА},$$

$$\underline{S}_{42'}^H = \underline{S}_{42'}^K + \Delta \underline{S}_{42'} = 20,0 + j10,0 + 0,07 + j2,75 =$$

$$20,07 + j12,75 \text{ МВА}.$$

Поток мощности в конце звена 3–4

$$\underline{S}_{34}^H = \underline{S}_{41'}^H + \Delta \underline{S}_{42'}^H = 15,03 + j6,38 + 20,07 + j12,75 =$$

$$= 35,10 + j19,13 \text{ МВА}$$

определяет потери мощности на участке 3–4 (в обмотке ВН):

$$\Delta \underline{S}_{34} = \left(\frac{S_{34}^K}{U_4^{(0)}} \right)^2 \underline{Z}_{34} = \frac{35,10^2 + 19,13^2}{110^2} (0,725 + j4,34) =$$

$$= 0,096 + j0,57 \text{ МВА.}$$

Поток мощности в начале звена 3–4

$$\underline{S}_{34}^H = \underline{S}_{34}^K + \Delta \underline{S}_{34} = 35,10 + j19,13 + 0,096 + j0,57 =$$

$$= 35,20 + j19,70 \text{ МВА.}$$

Потери мощности холостого хода трансформатора:

$$\Delta \underline{S}_x = \left(U_3^{(0)} \right)^2 Y_m^* = 110^2 (2,72 + j21,2) \cdot 10^{-6} = 0,033 + j0,26 \text{ МВА.}$$

Зарядная мощность в конце линии (мощность в емкостном шунте узла 3)

$$Q_{c3} = \frac{1}{2} \left(U_3^{(0)} \right)^2 B_c = \frac{1}{2} \cdot 110^2 \cdot 544 \cdot 10^{-6} = 3,29 \text{ Мвар.}$$

Поток мощности в конце звена Б–3 (в конце линии)

$$\underline{S}_{Б3}^K = \underline{S}_{34}^H + \underline{S}_3 + \Delta \underline{S}_x - jQ_{c3} = 35,20 + j19,70 + 8,0 +$$

$$+ j6,0 + 0,033 + j0,26 - j3,29 = 43,23 + j22,67 \text{ МВА}$$

определяет потери мощности на участке Б–3 (в линии):

$$\Delta \underline{S}_{Б3} = \left(\frac{S_{Б3}^K}{U_3^{(0)}} \right)^2, \quad \underline{Z}_{Б3} = \frac{43,23^2 + 22,67^2}{110^2} (13,5 + j21,0) =$$

$$= 2,66 + j4,14 \text{ МВА.}$$

Поток мощности в начале звена Б–3 (в начале линии)

$$\begin{aligned}\underline{S}_{Б3}^H &= \underline{S}_{Б3}^K + \Delta \underline{S}_{Б3} = 43,23 + j22,67 + 2,66 + j4,14 = \\ &= 45,89 + j26,81 \text{ МВА.}\end{aligned}$$

Генерация реактивной мощности в начале линии (мощность в емкостном шунте узла Б)

$$Q_{сБ} = \frac{1}{2} U_B^2 B_c = \frac{1}{2} \cdot 120^2 \cdot 544 \cdot 10^{-6} = 3,92 \text{ Мвар}$$

хотя и не влияет на значение напряжений в сети (узел Б – шины бесконечной мощности), однако уменьшает потребление мощности из балансирующего источника до величины

$$\underline{S}_B = \underline{S}_{Б3}^H - jQ_{сБ} = 45,89 + j26,81 - j3,92 = 45,89 + j22,89 \text{ МВА.}$$

На этом заканчивается прямой ход первой итерации.

Обратный ход первой итерации. Обратный ход позволяет уточнить напряжения узлов по найденному потокораспределению и заданному напряжению базисного узла Б.

Напряжение в конце линии (узел 3) меньше напряжения в источнике Б на величину падения напряжения на линии

$$\begin{aligned}\Delta U_{Б3} &= \Delta U'_{Б3} + j\delta U''_{Б3} = \frac{S_{Б3}^{*H}}{U_B} \cdot Z_{Б3} = \\ &= \frac{45,89 - j26,81}{120,0} (13,5 + j21,0) = 9,85 + j5,01 \text{ кВ,}\end{aligned}$$

с учетом которого получим вектор

$$\dot{U}_3 = U_B - \Delta \dot{U}_{Б3} = 120,0 - 9,85 - j5,01 = 110,15 - j5,01 \text{ кВ.}$$

Модуль вектора

$$\begin{aligned}|\dot{U}_3| = U_3 &= \sqrt{(U_B - \Delta U'_{Б3})^2 + (\delta U''_{Б3})^2} = \\ &= \sqrt{(120,0 - 9,85)^2 + 5,01^2} = 110,26 \text{ кВ,}\end{aligned}$$

его угол

$$\delta_3 = \operatorname{arctg} \frac{-\delta U''_{Б3}}{U_{Б} - \Delta U'_{Б3}} = \operatorname{arctg} \frac{-5,01}{120,0 - 9,85} = -2,60^\circ.$$

Таким образом, $\dot{U}_3 = 110,26 \angle -2,60^\circ$ кВ.

Связь напряжений $U_{Б}$ и \dot{U}_3 показана на диаграмме напряжений (рис. 6.3), изображенной на вращающейся с частотой ω комплексной плоскости.

Аналогично выполнен расчет напряжения узла 4 (нулевой точки звезды схемы замещения трансформатора) по отношению к \dot{U}_3 :

$$\dot{U}_4 = U_3 - \Delta \dot{U}_{34} = U_3 - \Delta U'_{34} - j\delta U''_{34}.$$

Падение напряжения на участке 3–4 (на обмотке ВН):

$$\Delta \dot{U}_{34} = \frac{S_{34}^*}{U_3} Z_{34} = \frac{35,20 - j19,70}{110,26} (0,725 + j4,34) = 1,01 + j1,26 \text{ кВ}.$$

Вектор напряжения

$$\dot{U}_4 = 110,26 - 1,01 - j1,26 = 109,25 - j1,26 \text{ кВ}$$

характеризуется модулем

$$|\dot{U}_4| = U_4 = \sqrt{109,25^2 + 1,26^2} = 109,26 \text{ кВ}$$

и углом

$$\delta'_4 = \operatorname{arctg} \frac{-1,26}{109,25} = -0,66^\circ.$$

Векторная диаграмма напряжений участка 3–4 показана на рис. 6.4 в новых осях ($+'$, $+j'$), совмещенных с вектором \dot{U}_3 .

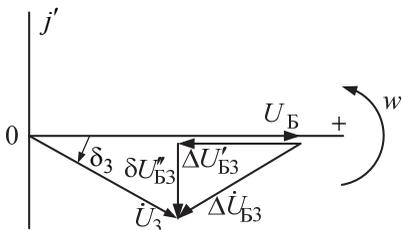


Рис. 6.3. Векторная диаграмма напряжений участка Б–3

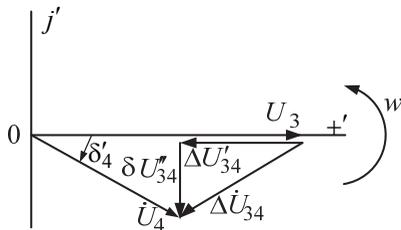


Рис. 6.4. Векторная диаграмма напряжений участка 3–4

Вектор напряжения \dot{U}_4 отстает от вектора напряжения U_B на угол

$$\delta_4 = \delta'_4 + \delta_3 = -0,66 - 2,60 = -3,26^\circ.$$

В итоге $\dot{U}_4 = 109,26 \angle -3,26^\circ$ кВ.

Аналогично предыдущему расчету вычитание векторов падения напряжения на участках 4–1 и 4–2:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{41} &= \Delta U'_{41} + j\delta U''_{41} = \frac{S_{41}^H}{U_4} \cdot Z_{41} = \\ &= \frac{15,03 - j6,38}{109,25} (1,45 + j60,7) = 3,74 + j8,27 \text{ кВ}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{42} &= \Delta U'_{42} + j\delta U''_{42} = \frac{S_{42}^H}{U_4} Z_{42} = \\ &= \frac{20,07 - j12,75}{109,25} (1,45 + j60,7) = 7,35 + j10,98 \text{ кВ} \end{aligned}$$

из вектора U_4 определяет векторы напряжений \dot{U}'_1 и \dot{U}'_2 (напряжения на шинах НН₁ и НН₂, приведенные к ВН):

$$\dot{U}'_1 = U_4 - \Delta \dot{U}_{41} = 109,26 - 3,74 - j8,27 =$$

$$= 105,52 - j8,27 = 105,84 \angle -4,48^\circ \text{ кВ},$$

$$\dot{U}'_2 = U_4 - \Delta \dot{U}_{42} = 109,26 - 7,35 - j10,95 =$$

$$= 101,91 - j10,95 = 102,49 \angle -6,13^\circ \text{ кВ}.$$

Векторная диаграмма напряжений участка 4–1' (аналогичная и для участка 4–2') приведена на рис. 6.5 в новых осях (+'' ,+ j''), совмещенных с вектором U_4 .

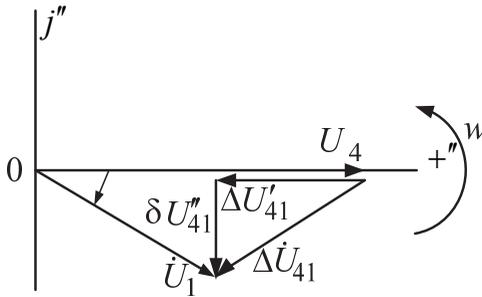


Рис. 6.5. Векторная диаграмма напряжений участка 4–1'

Векторные диаграммы участков Б–3, 3–4 и 4–1' совмещены на рис. 6.6. Там же показаны абсолютные (суммарные) углы напряжений по отношению к заданному базисному. В целях наглядности при построении векторных диаграмм не соблюден масштаб векторов.

Векторы напряжения \dot{U}'_1 и \dot{U}'_2 имеют абсолютные углы, на которые они отстают от вектора напряжения U_B :

$$\delta_1 = \delta'_1 + \delta_4 = -4,48 - 3,26 = -7,74^\circ;$$

$$\delta_2 = \delta'_2 + \delta_4 = -6,13 - 3,26 = -9,39^\circ;$$

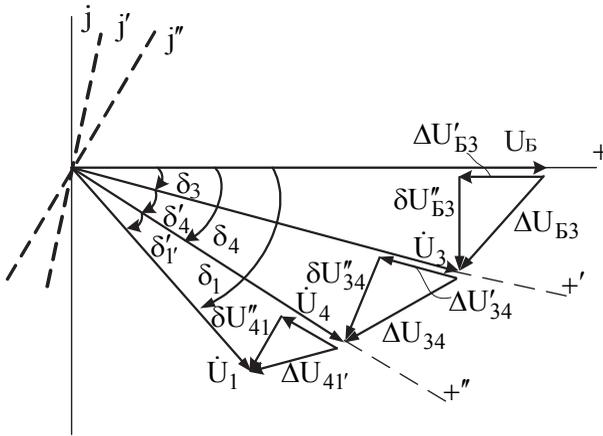


Рис. 6.6. Векторная диаграмма напряжений сети

Таким образом, получим

$$\dot{U}'_1 = 105,84 \angle -7,74^\circ \text{ кВ}, \quad \dot{U}'_2 = 102,49 \angle -9,39^\circ \text{ кВ}.$$

Напряжения на шинах низшего напряжения трансформатора:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{н2} = \frac{\dot{U}'_1}{k_{m1}} = \frac{105,84 \angle -7,74^\circ}{115 / 6,3} = 5,80 \angle -7,74^\circ \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_{н2} = \frac{\dot{U}'_2}{k_{т2}} = \frac{102,49 \angle -9,39^\circ}{115 / 10,5} = 9,34 \angle -9,39^\circ.$$

На этом закончена первая итерация расчета. Вторая итерация отличается от первой только тем, что начальные приближения напряжений $\bar{U}^{(0)}$ заменяются на полученные в первой итерации.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 7

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЖИМА СЕТИ, СОДЕРЖАЩЕЙ РАЗЛИЧНЫЕ НОМИНАЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Задача 7.1. Рассчитать рабочие режимы сети двух номинальных напряжений (рис. 7.1), участки которой связаны между собой посредством трансформатора типа ТДН–16000/110. Мощности, потребляемые нагрузками, марки использованных проводов и длины участков сети указаны на схеме. Напряжение в начале сети (в центре питания) поддерживается равным 117 кВ.

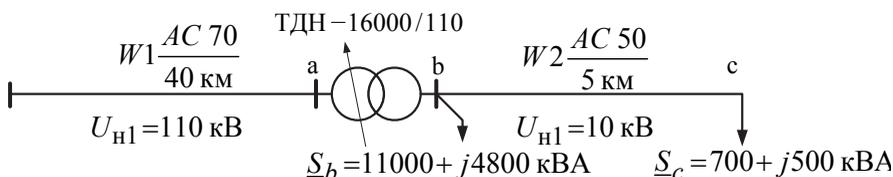


Рис. 7.1. Исходная схема

Решение

Составляем схему замещения сети (рис. 7.2) и определяем параметры ее элементов, найдя по справочной литературе погонные сопротивления, проводимости проводов и паспортные данные трансформатора:

$$W1: R_1 = R_0 L_1 = 0,425 \cdot 40 = 18,4 \text{ Ом}; X_1 = X_0 L_1 = 0,425 \cdot 40 = 17,0 \text{ Ом};$$

$$W2: R_2 = R_0 L_2 = 0,65 \cdot 5 = 17,0 \text{ Ом}; X_2 = X_0 L_2 = 0,33 \cdot 5 = 1,65 \text{ Ом};$$

$T: R_T = 4,4 \text{ Ом}; X_T = 86,7 \text{ Ом}; \Delta P_X = 21 \text{ кВт}; \Delta P_K = 85 \text{ кВт};$

$\Delta Q_X = 136 \text{ квар}; u_K = 10,5 \text{ \%}; U_B = 115 \text{ кВ}; U_H = 11 \text{ кВ}.$

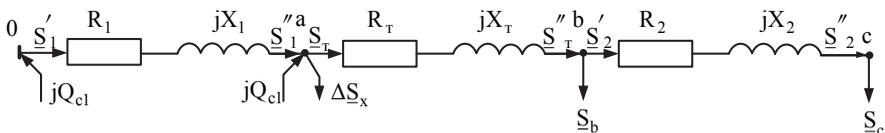


Рис. 7.2. Схема замещения

Поскольку в точках подключения нагрузок напряжения неизвестны, в качестве начального приближения в узлах a, b, c задаемся номинальным напряжением участков сети: первого – 110 кВ, второго – 10 кВ.

Определяем потери мощности на втором участке сети:

$$\Delta P_2 = \frac{P^2 + Q^2}{U_{H2}^2} R_2 = \frac{700^2 + 500^2}{10^2} 3,25 \approx 24 \text{ кВт};$$

$$\Delta Q_2 = \frac{P^2 + Q^2}{U_{H2}^2} X_2 = \frac{700^2 + 500^2}{10^2} 1,65 \approx 12 \text{ квар}.$$

Мощность в начале первого участка

$$\underline{S}'_2 = \underline{S}''_2 + \Delta P_2 + j\Delta Q_2 = (700 + j500 + 24 + j12) = 724 + j512 \text{ кВА}.$$

Мощность на стороне НН трансформатора

$$\underline{S}'_T = \underline{S}'_2 + \underline{S}_b = 724 + j512 + 11\,000 + j4800 = 11\,724 + j5312 \text{ кВА};$$

$$S_{TP} = 12871 \text{ кВА}.$$

Потери мощности в обмотках трансформатора:

$$\Delta P_T = \Delta P_K \frac{S_{TP}^2}{S_{HTP}^2} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{12871^2}{16\,000^2} = 55 \text{ кВт};$$

$$\Delta Q_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{S_{\text{ТР}}^2}{S_{\text{нТР}}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{12871^2}{16\,000} = 1087 \text{ квар.}$$

Мощность на стороне ВН трансформатора

$$\begin{aligned} \underline{S}'_{\text{ТР}} &= \underline{S}''_{\text{ТР}} + \Delta P_T + j\Delta Q_T = 11724 + j5312 + 55 + j1087 = \\ &= 11\,779 + j6399 \text{ кВА.} \end{aligned}$$

Мощность, генерируемая емкостной проводимостью первого участка сети,

$$Q_{c1} = U_{\text{н1}}^2 \cdot \frac{1}{2} B_1 = 110^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,04 \cdot 10^{-4} = 625 \text{ квар.}$$

Мощность в конце этого участка

$$\begin{aligned} \underline{S}'_1 &= \underline{S}'_{\text{ТР}} + \Delta P_x + j\Delta Q_x - jQ_{c1} = 11779 + j6399 + 21 + j136 - j625 = \\ &= 11\,800 + j5910 \text{ кВА.} \end{aligned}$$

Потери мощности в сопротивлениях первого участка сети:

$$\Delta P_1 = \frac{P^2 + Q^2}{U_{\text{н1}}^2} R_2 = \frac{11\,800^2 + 5910^2}{110^2} 18,4 \approx 264 \text{ кВт;}$$

$$\Delta Q_1 = \frac{P^2 + Q^2}{U_{\text{н1}}^2} X_2 = \frac{11\,800^2 + 5910^2}{110^2} 17 \approx 244 \text{ квар.}$$

Мощность в начале первого участка

$$\begin{aligned} \underline{S}'_1 &= \underline{S}'_1 + \Delta P_1 + j\Delta Q_1 - jQ_{c1} = 11800 + j5910 + 264 + j244 = \\ &= 12\,064 + j6154 \text{ кВА.} \end{aligned}$$

Мощность, генерируемая в начале этого участка сети,

$$Q_{c1} = U_0^2 \cdot \frac{1}{2} B_1 = 117^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,04 \cdot 10^{-4} = 712 \text{ квар.}$$

Мощность, получаемая от источника питания,

$$\underline{S}_0 = \underline{S}'_1 - jQ_{c1} = 12\,064 + j6154 - j712 = 12\,064 + j5442 \text{ кВА.}$$

Теперь известны напряжение и мощность в начале сети. Определим напряжения в узлах:

$$\begin{aligned}U_a &= U_0 - \Delta U_1 = U_0 - \frac{P'_1 R_1 + Q'_1 X_1}{U_0} = \\&= 117 - \frac{12064 \cdot 18,4 + 6154 \cdot 17}{117} = 114,2 \text{ кВ.}\end{aligned}$$

Определяем напряжение в точке b :

$$\begin{aligned}U_b &= U_a - \Delta U_{\text{ТР}} = U_a - \frac{P'_{\text{ТР}} R_{\text{ТР}} + Q'_{\text{ТР}} X_{\text{ТР}}}{U_a} = \\&= 114,2 - \frac{11779 \cdot 4,4 + 6399 \cdot 86,7}{114,2} = 108,8 \text{ кВ.}\end{aligned}$$

Действительное напряжение в точке b

$$U'_b = U_b \cdot \frac{1}{k_m} = 108,8 \cdot \frac{1}{10,45} = 10,4 \text{ кВ.}$$

Напряжение в точке c

$$\begin{aligned}U_c &= U_b - \Delta U_2 = U_b - \frac{P'_2 R_2 + Q'_2 X_2}{U_a} = \\&= 10,4 - \frac{724 \cdot 3,25 + 521 \cdot 1,65}{114,2} = 10,1 \text{ кВ.}\end{aligned}$$

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 8

РАСЧЕТ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЗАМКНУТОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Задача 8.1. Подстанция промышленного района с нагрузкой \underline{S}_1 подключена к одноцепной линии электропередачи напряжением 110 кВ, объединяющей на параллельную работу две электрические системы А и Б с известными напряжениями (рис. 8.1).

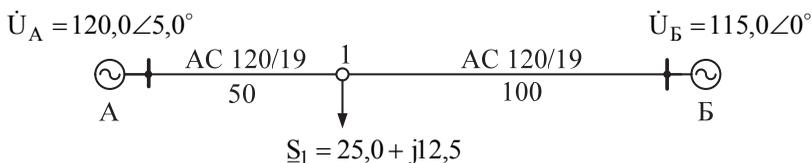


Рис. 8.1. Исходная схема сети

Нагрузка подстанции 1, МВА, напряжения на шинах систем, кВ, протяженность участков линии, км. Схема замещения сети и ее параметры, принятые по усредненным данным из задачи 2.1, приведены на рис. 8.2, а. Сопротивление участков, Ом, проводимости, См. Требуется определить параметры установившегося электрического режима сети с двусторонним питанием.

Решение

Первая итерация. Расчет начинаем с задания начального приближения в узле 1. Пусть $\dot{U}_1^{(0)} = 115,0 \angle 0^\circ$ кВ – суммарная проводимость шунта в узле 1:

$$Y_{ш1} = 1/2(Y_1 + Y_2) = j1/2(136 + 272)10^{-6} = j204 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Определение мощности в шунте по заданному приближению напряжения:

$$S_{ш1} = (U_1^{(0)})^2 Y_{ш1}^* = 115,0^2 (-j204 \cdot 10^{-6}) = -j2,70 \text{ МВА.}$$

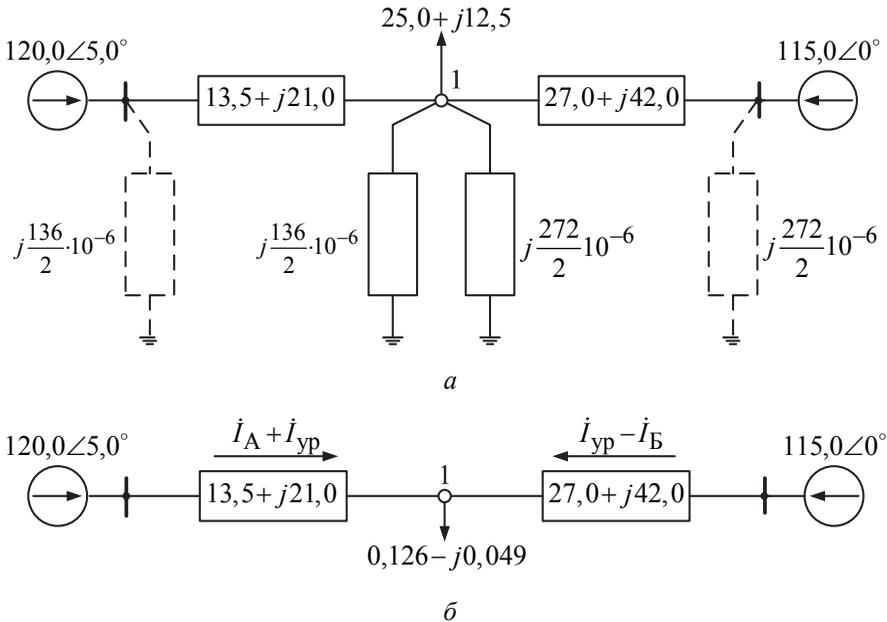


Рис. 8.2. Схема замещения сети:

a – исходная; *б* – без шунтов

Проводимости и мощности шунтов, примыкающих к балансирующему источнику, на режим сети не влияют и в дальнейшем не учитываются.

Вычисление эквивалентной (расчетной) нагрузки узла 1:

$$S_1^P = S_1 + S_{ш1} = 25,0 + j12,5 - j2,70 = 25,0 + j9,80 \text{ МВА.}$$

Определение тока нагрузки узла 1:

$$\begin{aligned} I_1^{(1)} &= S_1^P / \sqrt{3} \cdot U_1^{(0)} = (25,0 - j9,80) / \sqrt{3} \cdot 115,0 = \\ &= 0,126 - j0,049 \text{ кА}. \end{aligned}$$

Ток нагрузки на первой итерации показан на рис. 8.2, б.

Определение токов головных участков сети с двусторонним питанием в предположении равенства напряжений источников ($\dot{U}_A = \dot{U}_B$) с помощью правила моментов для токов:

$$\begin{aligned} j_1^{(1)} &= i_1^{(1)} \frac{\underline{Z}_{1Б}}{\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{1Б}} = (0,126 - j0,049) \cdot \frac{27,0 + j42,0}{13,5 + j21,0 + 27,0 + j42,0} = \\ &= 0,084 - j0,033 \text{ кА}. \end{aligned}$$

Обратим внимание на то, что головные токи могут быть определены в данном примере по длинам участков в связи с тем, что сеть выполнена проводами одинакового сечения, т. е. однородная: $\frac{X_1}{R_1} = \frac{X_2}{R_2}$

$$j_A^{(1)} = i_1^{(1)} \frac{L_{1Б}}{L_{A1} + L_{1Б}} = (0,126 - j0,049) \cdot \frac{100}{50 + 100} = 0,084 - j0,033 \text{ кА};$$

$$j_B^{(1)} = i_1^{(1)} \frac{L_{1А}}{L_{1А} + L_{1Б}} = (0,126 - j0,049) \cdot \frac{50}{50 + 100} = 0,042 - j0,016 \text{ кА}.$$

Для проверки правильности расчетов определяем:

$$j_A^{(1)} + j_B^{(1)} = 0,084 - j0,033 + 0,042 - j0,016 = 0,126 - j0,049 \text{ кА},$$

что совпадает с расчетной нагрузкой узла 1.

Вычисление уравнительного тока, обусловленного отличием действительных значений напряжений источников:

$$\Delta \dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B,$$

$$\Delta \dot{U}_{AB} = 120,0(\cos 5,0^\circ + j \sin 5,0^\circ) - 115,0 = 4,54 + j10,46 \text{ кВ};$$

$$\dot{i}_{\text{ур}} = \frac{\Delta \dot{U}_{\text{АБ}}}{\sqrt{3} \underline{Z}_{\text{АБ}}} = \frac{4,54 + j10,46}{\sqrt{3}(40,5 + j63,0)} = 0,087 + j0,014 \text{ кА}.$$

Определение токов в ветвях сети с учетом уравнительного тока:

$$\dot{i}_{\text{А1}}^{(1)} = \dot{i}_{\text{А}}^{(1)} + \dot{i}_{\text{ур}} = 0,084 - j0,033 + 0,087 + j0,014 = 0,171 - j0,019 \text{ кА},$$

$$\dot{i}_{\text{Б1}}^{(1)} = \dot{i}_{\text{Б}}^{(1)} - \dot{i}_{\text{ур}} = 0,042 - j0,016 - 0,087 - j0,014 = -0,045 - j0,030 \text{ кА}.$$

Уточнение напряжения узла 1 в соответствии с условным направлением токов (см. рис. 8.2, б):

$$\dot{U}_1^{(1)} = \dot{U}_{\text{А}} - \Delta \dot{U}_{\text{А1}}^{(1)};$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{\text{А1}}^{(1)} &= \sqrt{3} \dot{i}_{\text{А1}}^{(1)} \underline{Z}_{\text{А1}} = \sqrt{3} \cdot (0,171 - j0,019)(13,5 + j21,0) = \\ &= 4,69 + j5,78 \text{ кВ}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_1^{(1)} &= 120,0(\cos 5,0^\circ + j \sin 5,0^\circ) - 4,69 - j5,78 = \\ &= 114,85 + j4,68 = 114,94 \angle 2,333^\circ \text{ кВ}. \end{aligned}$$

Для проверки правильности расчета определим напряжение в узле Б и сопоставим его с заданными значениями:

$$\dot{U}_{\text{Б}}^{(1)} = \dot{U}_1^{(1)} - \Delta \dot{U}_{\text{Б1}}^{(1)};$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{\text{Б1}}^{(1)} &= \sqrt{3} \cdot \dot{i}_{\text{Б1}}^{(1)} \underline{Z}_{\text{Б1}} = \sqrt{3} \cdot (-0,045 - j0,030)(27,0 + j42,0) = \\ &= 0,08 - j4,68 \text{ кВ}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{Б}}^{(1)} &= 114,85 + j4,68 + 0,08 - j4,68 = 114,93 + j0,00 = \\ &= 114,93 \angle 0,00 \text{ кВ}. \end{aligned}$$

Проверка расчетного значения напряжения в узле Б иллюстрирует точность расчета токов в ветвях сети и напряжения узла 1, соответ-

ствующих исходному значению расчетного (эквивалентного) тока в узле 1, определенному по начальному приближению напряжения $U_1^{(0)}$.

Погрешность расчета модуля и фазы напряжения относительно их начальных приближений

$$\frac{U_1^{(0)} - U_1^{(1)}}{U_1^{(1)}} 100 \% = \frac{115,0 - 114,94}{114,94} 100 \% \approx 0,009 \%;$$

$$\frac{\delta_1^{(0)} + \delta_1^{(1)}}{\delta_1^{(1)}} 100 \% = \frac{0 + 2,333}{2,333} 100 \% = 100 \%$$

велика для фазы напряжения, и поэтому следует выполнить вторую итерацию расчета. Параметры электрического режима, полученные на первой итерации, показаны на рис. 8.3, а.

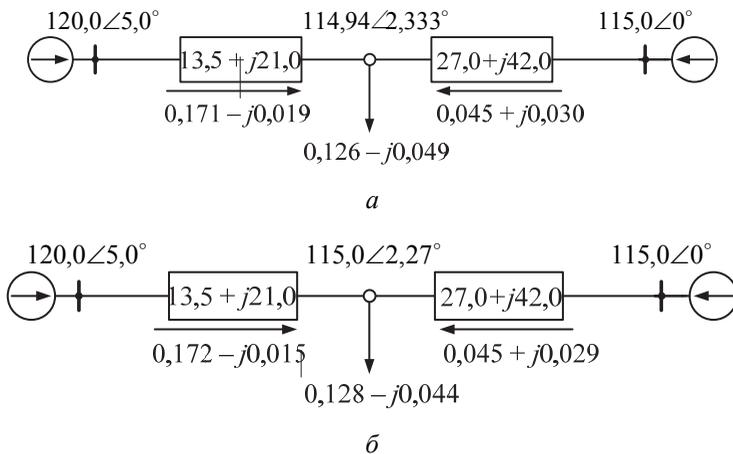


Рис. 8.3. Результаты расчета токов и напряжения:

а – первая итерация; б – вторая итерация

Вторая итерация. Исходным приближением является значение напряжения, полученное на первой итерации:

$$U_1^{(1)} = 114,94 \text{ кВ}, \quad \delta_1^{(1)} = 2,333^\circ.$$

Уточнение мощности в шунте

$$\underline{S}_{ш1} = 114,94^2(-j204 - 10^{-6}) = -j2,695 \text{ МВА}$$

не привело к заметному изменению эквивалентной нагрузки узла 1:

$$\underline{S}_1^p = 25,0 + j12,5 - 2,695 \approx 25,0 + j9,80 \text{ МВА} .$$

Ток нагрузки узла

$$j_1^{(2)} = \frac{25,0 - j9,80}{\sqrt{3} \cdot 114,94 \angle -2,333^\circ} = 0,128 - j0,044 \text{ кА} .$$

Токи головных участков сети в предположении, что $\dot{U}_A = \dot{U}_B$:

$$j_A^{(2)} = (0,128 - j0,044) \frac{100}{150} = 0,085 - j0,029 \text{ кА} ,$$

$$j_B^{(2)} = (0,128 - j0,044) \frac{50}{150} = 0,042 - j0,015 \text{ кА} .$$

Уравнительный ток вычислен в первой итерации точно и не изменяется при переходе к следующей:

$$j_{yp} = 0,087 + j0,014 \text{ кА} .$$

Токи в ветвях сети:

$$j_{A1}^{(2)} = 0,085 - j0,029 + 0,087 + 0,014 = 0,172 - j0,015 \text{ кА} ,$$

$$j_{B1}^{(2)} = 0,042 - j0,015 - 0,087 - 0,014 = -0,045 - j0,029 \text{ кА} .$$

Напряжение узла 1

$$\dot{U}_1^{(2)} = \dot{U}_A - \Delta \dot{U}_{A1}^{(2)} ,$$

$$\Delta \dot{U}_{A1}^{(2)} = \sqrt{3} \cdot (0,172 - j0,015)(13,5 + j21,0) = 4,58 + j5,90 \text{ кВ} ,$$

$$\dot{U}_A = 120,0(\cos 5,0^\circ + j \sin 5,0^\circ) = 119,54 + j10,46 \text{ кВ} ,$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_1^{(2)} &= 119,54 + j10,46 - 4,58 - j5,90 = \\ &= 114,96 + j4,56 = 115,05 \angle 2,27^\circ \text{ кВ.}\end{aligned}$$

Проверка правильности расчета по известному напряжению источника Б:

$$\dot{U}_B^{(2)} = \dot{U}_1 - \Delta \dot{U}_{B1}^{(2)},$$

$$\Delta \dot{U}_{B1}^{(2)} = \sqrt{3} \cdot (-0,045 - j0,028)(27,0 + j42,0) = 0,01 - j4,57 \text{ кВ},$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_B^{(2)} &= 114,96 + j4,56 + 0,01 - j4,57 = \\ &= 114,97 - j0,01 = 114,97 \angle -0,004^\circ \text{ кВ.}\end{aligned}$$

Погрешность расчета параметров режима после второй итерации:

$$\frac{U_1^{(1)} - U_1^{(2)}}{U_1^{(2)}} 100 \% = \frac{114,94 - 114,97}{114,97} 100 \% \approx 0,026 \%,$$

$$\frac{\delta_1^{(1)} - \delta_1^{(2)}}{\delta_1^{(2)}} \cdot 100 \% = \frac{2,333 - 2,27}{2,273} 100 \% = 2,8 \%.$$

Результаты расчета токов и напряжения после второй итерации приведены на рис. 8.3, б.

После определения напряжения и токов с достаточной точностью можно определить другие параметры установившегося режима: потоки и потери мощностей указаны в вольт-амперах (МВА), токи в килоамперах (кА), напряжения в киловольтах (кВ), сопротивления в омах (Ом), проводимости в сименсах (См):

$$\begin{aligned}\underline{S}_{A1} &= \sqrt{3} \dot{U}_A I_{A1}^{(2)*} = \sqrt{3} \cdot 120,0 \angle 5,0^\circ \cdot (0,172 + j0,015) = \\ &= 35,35 + j6,22 \text{ МВА},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{S}_{1A} &= \sqrt{3} \dot{U}_1^{(2)} I_{A1}^{(2)*} = \sqrt{3} \cdot 115,05 \angle 2,27^\circ \cdot (0,172 + j0,015) = \\ &= 34,14 + j4,34 \text{ MBA}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \underline{S}_{A1} &= 3 \left(I_{A1}^{(2)} \right)^2 \underline{Z}_{A1} = 3(0,172^2 + 0,015^2)(13,5 + j21,0) = \\ &= 1,207 + j1,878 \text{ MBA}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{S}_{1B} &= \sqrt{3} \dot{U}_1^{(2)} I_{B1}^{(2)*} = \sqrt{3} \cdot 115,05 \angle 2,27^\circ \cdot (0,045 - j0,029) = \\ &= 9,18 - j5,42 \text{ MBA}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{S}_{B1} &= \sqrt{3} \dot{U}_B^{(2)} I_{B1}^{(1)*} = \sqrt{3} \cdot 115,0 \angle 2,27^\circ \cdot (0,045 - j0,029) = \\ &= 8,96 - j5,77 \text{ MBA}, \end{aligned}$$

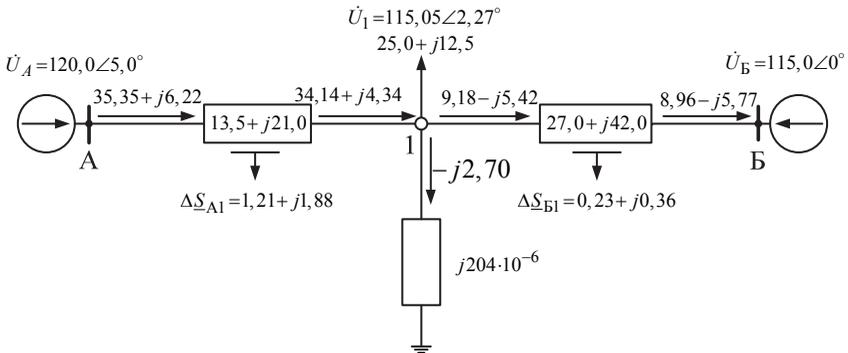


Рис. 8.4. Потокораспределение в сети после второй итерации расчета

$$\begin{aligned} \Delta \underline{S}_{B1} &= 3 \left(I_{B1}^{(2)} \right)^2 \underline{Z}_{B1} = 3(0,045^2 + 0,029^2)(27,0 + j42,0) = \\ &= 0,232 + j0,361 \text{ MBA}, \end{aligned}$$

$$\underline{S}_{\text{ш}} = \left(U_1^{(2)} \right)^2 Y_{\text{ш}1}^* = 115,05^2 \cdot (-j204 \cdot 10^{-6}) = -j2,70 \text{ МВА} .$$

Следует отметить, что при проверке баланса мощностей в узлах и по ветвям наблюдаются небольшие небалансы мощностей, которые объясняются неточностью расчета. Для уменьшения небаланса следует выполнить еще несколько итераций.

Задача 8.2. Для сети, представленной на рис. 8.5, выполнить расчет параметров установившегося режима методом моментов мощностей. Нагрузки в узлах принять за расчетные.

Абсолютная погрешность мощности $\Delta_S = 0,1$ МВт, напряжения $\Delta_U = 0,1$ кВ, сопротивлений $\Delta_z = 0,1$ Ом.

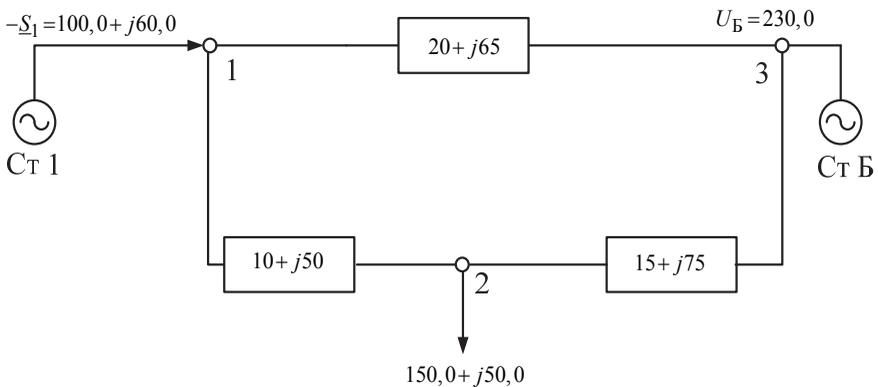


Рис. 8.5. Сеть с двусторонним питанием

Решение

Преобразуем кольцевую сеть, разомкнув ее по балансирующему источнику в сеть с двусторонним питанием (рис. 8.6).

Рассмотрим случай $\dot{U}_A = \dot{U}_B = 230,0$ кВ.

Потоки на головных участках определяем по правилу моментов для мощностей, т. е. без учета потерь мощности в ветвях:

$$\underline{S}_A = \frac{\sum_i^* \underline{S}_i Z_{iB}}{Z_{AB}} = \frac{(-100,0 - j60,0)(25,0 - j125,0) + (150,0 + j50,0) \times (15,0 - j15,0)}{45,0 - j190,0} =$$

$$= -7,21 - j19,34 \text{ МВА};$$

$$\underline{S}_B = \frac{\sum_i^* \underline{S}_i Z_{iA}}{Z_{AB}} = \frac{(-100,0 - j60,0)(20,0 - j60,0) + (150,0 + j50,0) \times (30,0 - j115,0)}{45,0 - j190,0} =$$

$$= 57,21 + j9,34 \text{ МВА}.$$

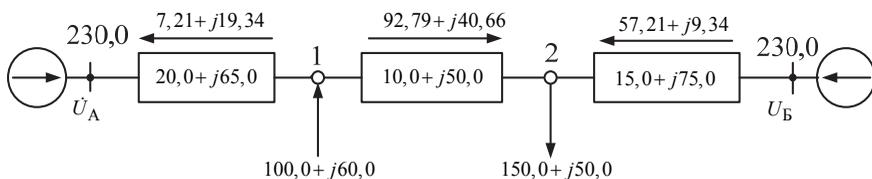


Рис. 8.6. Определение потоков без учета потерь мощности

Выполним проверку результатов расчета. Суммарная генерация в сеть

$$\underline{S}_A + \underline{S}_B = -7,21 - j19,34 + 57,21 + j9,31 = 50,00 - j10,00 \text{ МВА}$$

равна суммарной мощности в узлах:

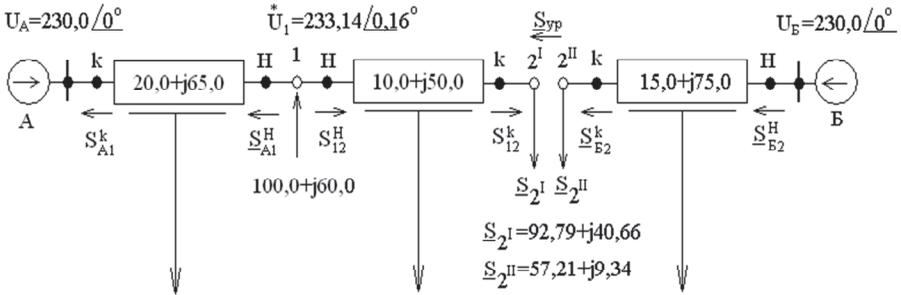
$$\underline{S}_1 + \underline{S}_2 = -100,0 - j60,0 + 150,0 + j50,0 = 50,00 - j10,00 \text{ МВА}.$$

На рис. 8.6 показаны действительные направления мощностей:

$$\underline{S}_{12} = \underline{S}_2 - \underline{S}_B = 150,0 + j50,0 - 57,21 - j9,34 = 92,79 + j40,66 \text{ МВА}.$$

Находим точку потокораздела в сети. В рассматриваемой схеме (рис. 8.6) точкой потокораздела является точка 2. В соответствии с правилами расчета сети в мощностях разделим сеть с двусторонним

питанием на две разомкнутые схемы и произведем их расчет независимо влево и вправо от точки потокораздела 2 (рис. 8.7).



$$\Delta S_{A1} = 0,05 + j0,15 \quad \Delta S_{12}^k = 1,94 + j9,70 \quad \Delta S_{B2} = 0,95 + j4,76$$

$$S_{A1}^H = 5,27 + j9,64 \quad S_{12}^k = 92,79 + j40,66 \quad S_{B2}^k = 57,21 + j9,34$$

$$S_{A1}^k = 5,22 + j9,49 \quad S_{12}^H = 94,73 + j50,36 \quad S_{B2}^H = 58,16 + j14,10$$

Рис. 8.7. Результаты первой итерации расчета без уравнительного потока

Расчет от точки 2' влево к источнику А:

$$S_{12'}^k = S_{2'} = S_{12'} = 92,79 + j40,66 \text{ МВА},$$

$$S_{12'}^H = S_{12}^k + \Delta S_{12},$$

$$\Delta S_{12} = \left(\frac{S_{12}^k}{U_{2'}^{(0)}} \right)^2 Z_{12} = \frac{92,79^2 + 40,66^2}{230,0^2} (10,0 + j50,0) = 1,94 + j9,70 \text{ МВА},$$

$$S_{12}^H = 92,79 + j40,66 + 1,94 + j9,70 = 94,73 + j50,36 \text{ МВА},$$

$$S_{A1}^H = S_1 - S_{12}^H = 100,0 + j60,0 - 94,73 - j50,36 = 5,27 + j9,64 \text{ МВА},$$

$$S_{A1}^k = S_{A1}^H - \Delta S_{A1},$$

$$\Delta \underline{S}_{A1} = \left(\frac{S_{A1}^H}{U_1^{(0)}} \right)^2 \underline{Z}_{A1} = \frac{5,27^2 + 9,64^2}{230,0^2} (20,0 + j65,0) =$$

$$= 0,05 + j0,15 \text{ MBA},$$

$$\underline{S}_{A1}^K = 5,27 + j9,64 - 0,05 - j0,15 = 5,22 + j9,49 \text{ MBA},$$

$$\dot{U}_1^{(1)} = U_A + \Delta \dot{U}_{A1}^{(1)}; \quad \Delta \dot{U}_{A1}^{(1)} = \Delta U'_{A1} + j\delta U''_{A1},$$

$$\Delta U'_{A1} = \frac{P_{A1}^K R_{A1} + Q_{A1}^K X_{A1}}{U_A} = \frac{5,22 \cdot 20,0 + 9,49 \cdot 65,0}{230,0} = 3,14 \text{ kB},$$

$$\delta U''_{A1} = \frac{P_{A1}^K X_{A1} - Q_{A1}^K R_{A1}}{U_A} = \frac{5,22 \cdot 65,0 - 9,49 \cdot 20,0}{230,0} = 0,65 \text{ kB},$$

$$U_1^{(1)} = \sqrt{(230,0 + 3,14)^2 + 0,65^2} = 233,14 \text{ kB},$$

$$\delta_1^{(1)} = \arctg \frac{0,65}{230,0 + 3,14} = 0,16^\circ,$$

$$\dot{U}_2^{(1)} = U_1^{(1)} - \Delta \dot{U}_{12}^{(1)}; \quad \Delta \dot{U}_{12}^{(1)} = \Delta U'_{12} + j\delta U''_{12},$$

$$\Delta U'_{12} = \frac{P_{12}^H R_{12} + Q_{12}^H X_{12}}{U_1^{(1)}} = \frac{94,73 \cdot 10,0 + 50,36 \cdot 50,0}{233,14} = 14,86 \text{ kB},$$

$$\delta U''_{12} = \frac{P_{12}^H X_{12} - Q_{12}^H R_{12}}{U_1^{(1)}} = \frac{94,73 \cdot 50,0 - 50,36 \cdot 10,0}{233,14} = 18,16 \text{ kB},$$

$$U_2^{(1)} = \sqrt{(233,14 - 14,86)^2 + 18,16^2} = 219,03 \text{ kB},$$

$$\delta_{12}^{(1)} = \arctg \frac{-18,16}{233,14 - 14,86} = -4,76^\circ.$$

Суммарный (абсолютный) угол напряжения $U_{2''}$ равен

$$\delta_2^{(1)} = \delta_1^{(1)} + \delta_{12}^{(1)},$$

тогда

$$\dot{U}_{2'}^{(1)} = 219,03 \angle (0,16 - 4,76)^\circ = 219,03 \angle -4,60^\circ \text{ кВ}.$$

Расчет от точки $2''$ вправо к источнику Б:

$$\underline{S}_{Б2}^K = \underline{S}_{2''} = \underline{S}_Б = 57,21 + j9,34 \text{ МВА},$$

$$\underline{S}_{Б2}^H = \underline{S}_{Б2}^K + \Delta \underline{S}_{Б2},$$

$$\begin{aligned} \Delta \underline{S}_{Б2} &= \left(\frac{S_{Б2}^K}{U_2^{(0)}} \right)^2 Z_{Б2} = \frac{57,21^2 + 9,34^2}{230,0^2} (15,0 + j75,0) = \\ &= 0,95 + j4,76 \text{ МВА}, \end{aligned}$$

$$\underline{S}_{Б2}^H = 57,219 + j9,34 + 0,95 + j4,76 = 58,16 + j14,10 \text{ МВА},$$

$$\dot{U}_{2''}^{(1)} = U_Б^{(1)} - \Delta \dot{U}_{Б2}^{(1)}; \Delta \dot{U}_{Б2}^{(1)} = \Delta U'_{Б2} + j\delta U''_{Б2},$$

$$\Delta U'_{Б2} = \frac{P_{Б2}^H R_{Б2} + Q_{Б2}^H X_{Б2}}{U_Б} = \frac{58,16 \cdot 15,0 + 14,10 \cdot 75,0}{230,0} = 8,39 \text{ кВ},$$

$$\delta U''_{Б2} = \frac{P_{Б2}^H X_{Б2} - Q_{Б2}^H R_{Б2}}{U_Б} = \frac{58,16 \cdot 75,0 - 14,10 \cdot 15,0}{230,0} = 18,05 \text{ кВ},$$

$$U_{2''}^{(1)} = \sqrt{(230,0 - 8,39)^2 + 18,05^2} = 222,34 \text{ кВ},$$

$$\delta_{2''}^{(1)} = \arctg \frac{-18,05}{230,0 - 8,39} = -4,66^\circ,$$

$$\dot{U}_{2''}^{(1)} = 222,34 \angle -4,66^\circ \text{ кВ}.$$

Отличие напряжения в узле 2 при расчете слева и справа обусловлено допущениями метода, а именно, при расчете потоков по правилу моментов не учитываются потери мощности в ветвях сети. Результаты расчета показаны на рис. 8.7.

Расчет уравнительного потока за счет отличия напряжения в узле 2 слева и справа при направлении этого потока от узла 2'' к узлу 2' :

$$\underline{S}_{\text{ур}} = \frac{\Delta U_2}{Z_{\text{АБ}}} \dot{U}_{2\text{ср}}^*$$

$$\Delta \dot{U}_2 = U_{2''}^{(1)} - U_{2'}^{(1)} = 222,34 \angle -4,66^\circ - 219,03 \angle -4,60^\circ = 3,29 - j0,49 \text{ кВ}$$

$$\dot{U}_{2\text{ср}} = \frac{1}{2} (U_{2'}^{(1)} + U_{2''}^{(1)}) =$$

$$= \frac{1}{2} (219,03 \angle -4,60^\circ + 222,34 \angle -4,66^\circ) = 220,68 \angle -4,68^\circ \text{ кВ},$$

$$\underline{S}_{\text{ур}} = \frac{3,29 + j0,49}{45 - j190} \cdot 220,68 \angle -4,63^\circ = 0,62 + j3,71 \text{ МВА}.$$

Пересчет потоков в точке потокоораздела:

$$\underline{S}_{2'} = \underline{S}_{12}^{\text{К}} = 92,79 + j40,66 - 0,62 - j3,71 = 92,17 + j36,95 \text{ МВА},$$

$$\underline{S}_{2''} = \underline{S}_{\text{Б}2}^{\text{К}} = 57,21 + j9,34 + 0,62 + j3,71 = 57,83 + j13,05 \text{ МВА}.$$

Далее произведем пересчет режима двух разомкнутых частей схемы при неизменных расчетных мощностях узлов.

Пересчет от точки 2' влево к источнику А (рис. 8.7):

$$\underline{S}_{12}^{\text{К}} = 92,17 + j36,95 \text{ МВА},$$

$$\Delta \underline{S}_{12} = \frac{92,17^2 + 36,95^2}{220,68^2} (10,0 + j50,0) = 2,02 + j10,12 \text{ МВА},$$

$$\underline{S}_{12}^H = 92,17 + j36,95 + 2,02 + j10,12 = 94,19 + j47,07 \text{ MBA},$$

$$\underline{S}_{A1}^H = 100,0 + j60,0 - 94,19 - j47,07 = 5,81 + j12,93 \text{ MBA},$$

$$\Delta \underline{S}_{A1} = \frac{5,81^2 + 12,93^2}{233,14^2} (20,0 + j65,0) = 0,07 + j0,24 \text{ MBA},$$

$$\underline{S}_{A1}^K = 5,81 + j12,93 - j0,07 - j0,24 = 5,74 + j12,69 \text{ MBA},$$

$$\dot{U}_1^{(1)} = U_A^{(1)} - \Delta \dot{U}_{A1}^{(1)}; \quad \Delta \dot{U}_{A1}^{(1)} = \Delta U'_{A1} + j\delta U''_{A1},$$

$$\Delta U'_{A1} = \frac{5,74 \cdot 20,0 + 12,69 \cdot 65,0}{230,0} = 4,09 \text{ kB},$$

$$\delta U''_{A1} = \frac{5,74 \cdot 65,0 - 12,69 \cdot 20,0}{230,0} = 0,52 \text{ kB},$$

$$\dot{U}_1^{(1)} = 230,0 + 4,09 + j0,52 = 234,09 \angle 0,13^\circ \text{ kB},$$

$$\dot{U}_1^{(1)} = U_1^{(1)} - \Delta \dot{U}_{12}^{(1)}; \quad \Delta \dot{U}_{12}^{(1)} = \Delta U'_{12} + j\delta U''_{12},$$

$$\Delta U'_{12} = \frac{94,19 \cdot 10,0 + 47,07 \cdot 50,0}{234,09} = 14,08 \text{ kB},$$

$$\delta U''_{12} = \frac{94,19 \cdot 50,0 - 47,07 \cdot 10,0}{234,09} = 18,11 \text{ kB},$$

$$U_{2'}^{(1)} = \sqrt{(234,00 - 14,08)^2 + 18,11^2} = 220,75 \text{ kB},$$

$$\delta_{12'}^{(1)} = \arctg \frac{-18,11}{234,09 - 14,08} = -4,71^\circ,$$

$$\delta_{2'}^{(1)} = \delta_1^{(1)} + \delta_{12'}^{(1)} = 0,13 - 4,71 = -4,58^\circ,$$

$$\dot{U}_{2'}^{(1)} = 220,75 \angle -4,58^\circ \text{ кВ.}$$

Пересчет от точки 2'' вправо к источнику Б (см. рис. 8.7):

$$\underline{S}_{Б2}^K = 57,83 + j13,05 \text{ МВА},$$

$$\Delta \underline{S}_{Б2} = \frac{57,83^2 + 13,05^2}{220,68^2} (15,0 + j75,0) = 1,08 + j5,41 \text{ МВА},$$

$$\underline{S}_{Б2}^H = 57,83 + j13,05 + 1,08 + j5,41 = 58,91 + j18,46 \text{ МВА},$$

$$\dot{U}_{2''}^{(1)} = U_B - \Delta \dot{U}_{Б2}^{(1)}; \Delta \dot{U}_{Б2}^{(1)} = \Delta U'_{Б2} + j\delta U''_{Б2},$$

$$\Delta U'_{Б2} = \frac{58,91 \cdot 15,0 + 18,46 \cdot 75,0}{230,0} = 9,86 \text{ кВ},$$

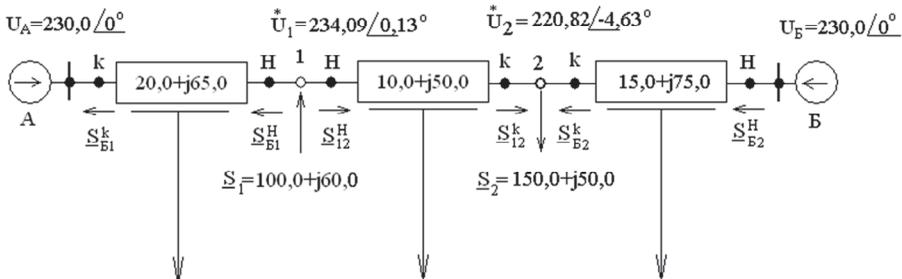
$$\delta U''_{Б2} = \frac{58,91 \cdot 75,0 - 18,46 \cdot 15,0}{230,0} = 18,01 \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{2''}^{(1)} = 230,0 - 9,86 - j18,01 = 220,88 \angle -4,68^\circ \text{ кВ.}$$

Сопоставление найденных напряжений в узле 2 слева и справа (2'' и 2') показывает, что точность расчета достаточно высока:

$$\dot{U}_{2'}^{(1)} = 220,75 \angle -4,58^\circ \text{ кВ}; \dot{U}_{2''}^{(1)} = 220,88 \angle -4,68^\circ \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{2\text{ср}}^{(1)} = 220,82 \angle -4,63^\circ \text{ кВ.}$$



$\Delta \underline{S}_{A1} = 0,07 + j0,24$	$\Delta \underline{S}_{12}^K = 2,02 + j10,12$	$\Delta \underline{S}_{B2} = 1,08 + j6,41$
$\underline{S}_{A1}^H = 5,81 + j12,93$	$\underline{S}_{12}^K = 92,17 + j36,95$	$\underline{S}_{B2}^K = 57,83 + j13,05$
$\underline{S}_{A1}^K = 5,74 + j12,69$	$\underline{S}_{12}^H = 94,19 + j47,07$	$\underline{S}_{B2}^H = 58,91 + j18,46$

Рис. 8.8. Результаты первой итерации расчета

Результаты первой итерации показаны на рис. 8.8.

Вторая итерация расчета отличается от первой только более точным учетом потерь мощности с использованием напряжений, полученных в первой итерации расчета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электрические системы и сети / Н.В. Буслова, В.Н. Винославский, Г.И. Денисенко, В.С. Перхач; под ред. Г.И. Денисенко. – Киев: Вища школа, 1986. – 584 с.
2. Солдаткина Л.И. Электрические сети и системы / Л.И. Солдаткина. – М.: Энергия, 1978(72). – 216 с.
3. Идельчик В.И. Расчеты установившихся режимов электрических систем / В.И. Идельчик. – М.: Энергия, 1977. – 189 с.
4. Жуков Л.А. Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем / Л.А. Жуков, И.П. Стратан. – М.: Энергия, 1979. – 415 с.
5. Липес А.В. Расчеты установившихся режимов электрических систем на ЦВМ / А.В. Липес, С.К. Окуловский. – Свердловск, УПИ. 1986. – 86 с.
6. Герасименко А.А. Применение ЭЦВМ в электроэнергетических расчетах / А.А. Герасименко. – Красноярск, КрПИ, 1983. – 116 с.
7. Программно-вычислительный комплекс расчета установившихся режимов электрических систем / А.Э. Бобров, А.А. Герасименко, В.Н. Гиренко, В.В. Нешатаев. – Красноярск, КГТУ, 1995. – 112 с.
8. Электрические системы. Электрические сети / В.А. Веников, А.А. Глазунов, Л.А. Жуков и др.; под ред. В.А. Веникова и В.А. Строева. – М.: Высшая школа, 1998. – 512 с.
9. Идельчик В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем / В.И. Идельчик. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
10. Герасименко А.А. Математические методы решения инженерных задач электроэнергетики / А.А. Герасименко. – Красноярск, КГТУ, 1995. – 160 с.
11. Ананичева С.С. Методы анализа и расчета замкнутых электрических сетей / С.С. Ананичева, А.Л. Мызин. – Екатеринбург, УГТУ, 2000. – 102 с.
12. Глазунов А.А. Электрические сети и системы / А.А. Глазунов, А.А. Глазунов. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 368 с.
13. Герасименко А.А. Качество электрической энергии в электрических сетях / А.А. Герасименко, Т.И. Поликарпова. – Красноярск, КГТУ, 2002. – 116 с.
14. Шубенко В.А. Регулирование напряжения в электроэнергетических системах / В.А. Шубенко. – Красноярск, КрПИ, 1971. – 76 с.
15. Герасименко А.А. Проектирование районной электрической системы / А.А. Герасименко, В.М. Таюрский. – Красноярск: КрПИ, 1982. – 120 с.
16. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / В.В. Ершевич, А.Н. Зейлигер, Г.А. Илларионов и др.; под ред. С.С. Рокотяна, И.М. Шапиро. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 380 с.

Родыгина Светлана Викторовна

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

ОТ ТЕОРИИ К ПРАКТИКЕ

Учебное пособие

Редактор *М.О. Мокишанова*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*
Компьютерная верстка *Н.В. Гаврилова*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 18.07.2018. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная
Тираж 150 экз. Уч.-изд. л. 5,81. Печ. л. 6,25. Изд. 72. Заказ № 1047
Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20