

ЧАСТЬ I

РАСЧЕТ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ И АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Глава 1

Моделирование элементов энергосистем в расчетах установившихся режимов

§ 1.1. Рациональная запись уравнений источников и приемников электрической энергии

В расчетах установившихся режимов источники и приемники электрической энергии, включенные в узлах схемы, могут быть представлены реальными источниками ЭДС, реальными источниками тока, идеальными источниками тока (задающими токами) и шунтами сопротивления или проводимости.

Для источников и приемников в теории электрических машин используют различные формы записи уравнений [1]. Для источников, основным режимом которых является режим генерации, принимают форму записи, которая дает положительное значение активной мощности, отдаваемой в сеть, ее можно назвать генераторной формой записи. Для приемников, основным режимом которых является режим потребления, применяют нагрузочную форму записи, которая дает положительное значение активной мощности, потребляемой из сети. Эти формы записи различаются выбором условных положительных направлений тока и ЭДС, рис. 1.1.

Источник и приемник обладают активными сопротивлениями $r_{и}$, $r_{п}$ и собственными индуктивными сопротивлениями, учитывающими ЭДС самоиндукции $-jx_{и}\dot{I}$ и $-jx_{п}\dot{I}$. Кроме того, в цепях источника и приемника действуют ЭДС взаимной индукции от других, не изображенных на рисунке электрических цепей.

Для цепи на рис. 1.1 по второму закону Кирхгофа можно записать уравнение

$$\dot{E}_{и} - (r_{и} + jx_{и})\dot{I} = \dot{U} = -\dot{E}_{п} + (r_{п} + jx_{п})\dot{I}.$$

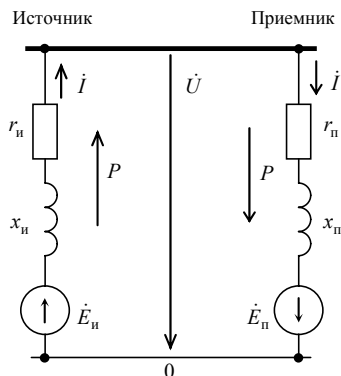


Рис. 1.1. Цепь переменного тока, состоящая из источника и приемника электрической энергии

В левой части уравнения сгруппированы члены, соответствующие элементам источника, а в правой части – члены, соответствующие элементам приемника. Левая часть уравнения определяет фазное напряжение \dot{U} на выводах источника, равное ЭДС взаимной индукции минус падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника $Z_{и} = r_{и} + jx_{и}$. Это напряжение приложено к выводам приемника. Правая часть уравнения показывает, что приложенное напряжение уравновешивается падением напряжения на внутреннем сопротивлении приемника $Z_{п} = r_{п} + jx_{п}$ и ЭДС взаимной индукции от других цепей.

Таким образом, источник и приемник замещаются реальными источниками ЭДС, у которых при одинаковом условном положительном направлении \dot{U} от узла к точке нулевого потенциала положительные направления P , \dot{i} и \dot{E} противоположны: у источника – к узлу, у приемника – от узла.

Рассматривая источник и приемник по отдельности, уравнение источника можно записать в виде $\dot{U} = \dot{E} - Z\dot{I}$ или

$$\dot{E} = \dot{U} + Z\dot{I} \quad (1.1)$$

уравнение приемника можно записать в виде $\dot{U} = -\dot{E} + Z\dot{I}$ или

$$-\dot{E} = \dot{U} - Z\dot{I} \quad (1.2)$$

Рациональной формой записи уравнений источников и приемников является комплексная форма записи, которая обеспечивает:

1. Автоматическое формирование правильного знака у реальных и мнимых частей комплексов тока, мощности, сопротивления и

проводимости, независимо от выбранной формы записи уравнений и от режима работы источников и приемников электрической энергии.

2. Автоматическое согласование знаков переменных при переходе из комплексной плоскости во вращающуюся прямоугольную систему координат и обратно.

Чтобы выполнить эти условия, необходимо принять следующие соглашения [2]:

1. За положительное направление отсчета углов векторов и между векторами на векторных диаграммах принимается направление против часовой стрелки. Угол, отсчитываемый по часовой стрелке, является отрицательным.
2. При записи уравнений и проведении вычислений в комплексном виде используется нормальная, принятая в математике форма записи комплексов со знаком плюс перед символом мнимой единицы, знак минус перед символом мнимой единицы используется только в сопряженных комплексах.
3. Комплекс полной мощности источников и приемников определяется через сопряженный комплекс напряжения

$$\dot{S} = P + jQ = 3\dot{U}\dot{I} = 3UIe^{j(\psi_I - \psi_U)} = 3UI(\cos \varphi + j \sin \varphi), \quad (1.3)$$

где ψ_I и ψ_U – угол вектора тока и угол вектора напряжения на комплексной плоскости, отсчитываемый от оси вещественных против часовой стрелки, $\varphi = \psi_I - \psi_U$ – угол между векторами тока и напряжения, отсчитываемый против часовой стрелки от вектора напряжения к вектору тока.

Первое соглашение соответствует принятому в математике взаимному расположению осей комплексной плоскости и правилу отсчета аргумента комплексного числа от оси вещественных против часовой стрелки и обеспечивает автоматическое формирование правильного знака реальной и мнимой частей комплекса при проецировании конца вектора на оси комплексной плоскости. Это соглашение соответствует также принятому в § 4.2 соглашению о положительном направлении вращения d, q осей и отсчета углов между осями при моделировании источников и приемников по уравнениям Парка-Горева, что необходимо для автоматического согласования знаков переменных при переходе во вращающуюся систему координат или обратно с использованием формул линейных преобразований координат.

Второе соглашение обеспечивает автоматическое формирование знаков мнимых частей комплексных чисел при проведении вычислений в комплексных числах. Оно нарушает некоторые традиции, поэтому требует

пояснений. Комплекс проводимости в соответствии с этим соглашением нужно записать так

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{r + jx} = g + jb,$$

$$\text{где } g = \frac{r}{r^2 + x^2}, \quad b = \frac{-x}{r^2 + x^2},$$

знак минус отнесен к значению реактивной проводимости (к проекции вектора проводимости на ось мнимых), аргументы комплексных Z и Y имеют противоположные знаки. В сопряженном комплексе $\hat{Y} = g - jb$ при том же самом значении реактивной проводимости перед символом мнимой единицы записывается знак минус.

Традиционное определение проводимости в учебниках по ТОЭ [3] и по электрическим системам [4] имеет вид

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{r + jx} = \frac{1}{ze^{j\varphi}} = ye^{-j\varphi} = y \cos \varphi - jy \sin \varphi = g - jb,$$

$$\text{где } z = \sqrt{r^2 + x^2}, \quad y = \frac{1}{z}, \quad g = y \cos \varphi = \frac{r}{z^2}, \quad b = y \sin \varphi = \frac{x}{z^2}.$$

Аргумент сопротивления неудачно обозначен символом φ , который ассоциируется с общепринятым обозначением угла между векторами тока и напряжения. Аргумент проводимости тоже обозначен символом φ , а знак минус вынесен перед символом мнимой единицы. Создается видимость равенства аргументов сопротивления и проводимости, хотя в действительности их знаки противоположны.

По форме записи проводимость является сопряженным комплексом, но это не оговаривается и в обозначениях не отражается. Поэтому такое определение комплекса проводимости несовместимо с правилами выполнения операций над комплексными числами. Непосредственное его использование в операциях с комплексными числами является ошибкой, которая приводит к неверным знакам мнимых частей комплексных. В этом можно убедиться, если попытаться преобразовать реальный источник ЭДС, например (1.1), в реальный источник тока, для чего левую и правую части уравнения нужно разделить на Z

$$\dot{J} = \dot{I} + Y\dot{U}, \quad (1.4)$$

$$\text{где } \dot{J} = \frac{\dot{E}}{Z} = Y\dot{E}, \quad Y = \frac{1}{Z}.$$

Правильные знаки мнимых частей комплексных задающего тока \dot{J} и тока $Y\dot{U}$ источника можно получить, если записывать преобразования в развернутом виде в виде операций над реальной и мнимой час-

тями комплексов с учетом знаков, или, если пользоваться формулой (1.4), изменить знак реактивной проводимости b , т. е. перейти от сопряженного комплекса к основному. Учитывая поддержку комплексных чисел в математических программах и в языках программирования, целесообразно преобразования и вычисления организовывать в комплексном виде, что обеспечивает компактность алгоритма. Если при этом отказаться от некорректной традиционной формы записи проводимости, то не нужно контролировать знак мнимых частей комплексов, что и обеспечивает второе соглашение.

Третье соглашение также требует пояснений, поскольку традиционно [4, 5] полную мощность определяют через сопряженный комплекс тока

$$\dot{S} = P + jQ = 3\dot{U}\dot{I} = 3UIe^{j(\psi_U - \psi_I)} = 3UI(\cos \varphi + j \sin \varphi), \quad (1.5)$$

где $\varphi = \psi_U - \psi_I$ – угол между векторами тока и напряжения, отсчитываемый против часовой стрелки от вектора тока к вектору напряжения.

Формулы (1.3) и (1.5) для одного и того же режима источника или приемника дают сопряженные комплексы полной мощности, которые различаются знаками реактивной мощности. Следует подчеркнуть, что эти формулы неявно определяют разные правила отсчета угла между векторами тока и напряжения. На это редко обращают внимание и на векторных диаграммах направление отсчета углов и знаки углов не показывают. При построении алгоритма в комплексной форме неизбежно возникает задача выбора адекватной формулы расчета полной мощности. В качестве основной для определения комплекса полной мощности следует выбрать такую формулу, которая удовлетворяет условиям рациональной записи уравнений источников и приемников электрической энергии.

Положение векторов на комплексной плоскости, углы векторов, углы между векторами, знаки углов, знаки и значения проекций комплексов напряжения, тока и полной мощности на координатные оси, являются взаимосвязанными величинами. Для иллюстрации на рис. 1.2 представлена векторная диаграмма источника электрической энергии, работающего с отстающим от напряжения током. Направление векторов $\dot{r}I$ и $j\dot{x}I$ на диаграмме соответствует формуле (1.1). Для простоты вектор напряжения совмещен с осью вещественных, $\psi_U = 0$, при этом проекции вектора тока на оси комплексной плоскости одновременно являются активной и реактивной составляющими тока. На рис. 1.2, a знак угла φ соответствует формуле (1.3), а на рис. 1.2, b – формуле (1.5).

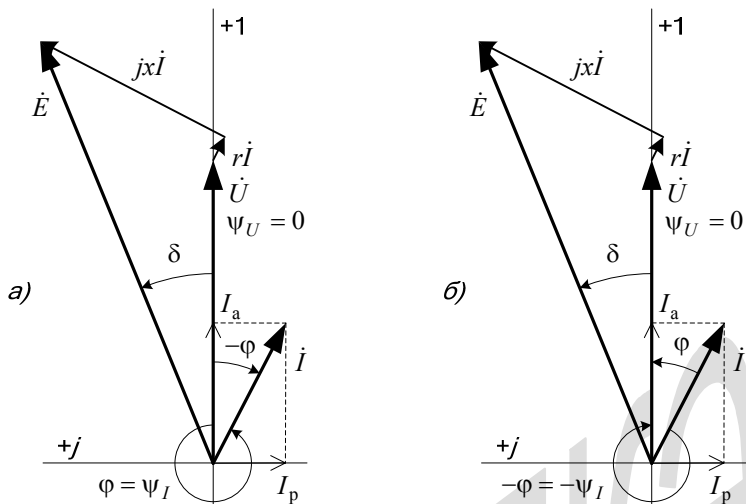


Рис. 1.2. Векторная диаграмма источника ЭДС

Как следует из векторной диаграммы на рис. 1.2, а,

$$\frac{3\pi}{2} < \varphi < 2\pi, \quad -\frac{\pi}{2} < (-\varphi) < 0,$$

при этом

$$\cos \varphi = \cos(-\varphi) > 0, \quad \sin \varphi = \sin(-\varphi) < 0,$$

следовательно,

$$I_a = I \cos \varphi > 0, \quad P = 3UI \cos \varphi = 3UI_a > 0,$$

$$I_p = I \sin \varphi < 0, \quad Q = 3UI \sin \varphi = 3UI_p < 0.$$

Знаки активной и реактивной составляющих комплекса тока совпадают со знаками активной и реактивной мощностей комплекса полной мощности и соответствуют знакам проекций вектора тока на оси комплексной плоскости.

При определении полной мощности по формуле (1.3), если ток по углу отстает от напряжения, то $\pi \leq \varphi \leq 2\pi$ или $-\pi \leq (-\varphi) \leq 0$, значение реактивной мощности $Q = \text{Im}(\dot{S}) < 0$, ее знак соответствует знаку реактивной составляющей тока на векторной диаграмме. Таким образом, знаки углов, положение векторов на векторной диаграмме, знаки и значения переменных, определяемых как проекции векторов на координатные оси, согласованы. При построении векторной диаграммы или при анализе установившегося режима с использованием векторной диаграммы противоречий не возникает.

Как следует из векторной диаграммы на рис. 1.2, б,

$$0 < \varphi < \frac{\pi}{2}, \quad -2\pi < (-\varphi) < -\frac{3\pi}{2},$$

при этом

$$\cos \varphi = \cos(-\varphi) > 0, \quad \sin \varphi = \sin(-\varphi) > 0,$$

тогда

$$I_a = I \cos \varphi > 0, \quad P = 3UI \cos \varphi = 3UI_a > 0,$$

$$I_p = I \sin \varphi > 0, \quad Q = 3UI \sin \varphi = 3UI_p > 0.$$

Знаки реактивного тока и мощности одинаковы и совпадают со знаком реактивной мощности, который дает формула (1.5), $Q = \text{Im}(\dot{S}) > 0$. Однако знак реактивного тока (мощности) не соответствует реальному положению вектора тока на векторной диаграмме. Реактивный ток является проекцией вектора тока на ось мнимых, поскольку $I_p > 0$, вектор тока должен опережать вектор напряжения и находиться во втором квадранте комплексной плоскости, в то время как вектор тока отстает от напряжения и находится в первом квадранте, его проекция на ось мнимых отрицательна. И наоборот, если ток источника будет опережать напряжение, то в этом режиме формула (1.5) дает отрицательное значение угла φ , реактивного тока и мощности, не соответствующее положению вектора тока во втором квадранте.

Это несоответствие мешает построению векторной диаграммы и препятствует автоматическому формированию знаков мнимых частей комплексов тока и полной мощности по знакам проекций векторов на координатные оси, что, в свою очередь, нарушает автоматическое согласование знаков переменных при линейных преобразованиях координат, § 4.2. Кроме того, это несоответствие проявляется также при эквивалентных преобразованиях схем замещения источников и приемников.

Как было отмечено выше, источник и приемник могут быть замещены шунтом (сопротивлением или проводимостью) с постоянными (не зависящими от режима сети) или переменными (зависящими от режима сети) параметрами. Уравнения шунтов можно получить из уравнений (1.1) и (1.2) для источника и приемника, полагая $\dot{E} = 0 + j0$. Уравнения шунта, замещающего источник, можно представить в виде

$$\dot{U} = -Zi, \quad i = -\frac{\dot{U}}{Z} = -Y\dot{U}, \quad (1.6)$$

или

$$Z = r + jx = -\frac{\dot{U}}{\dot{I}}, \quad Y = \frac{1}{Z} = g + jb = -\frac{\dot{I}}{\dot{U}}.$$

Шунт, замещающий приемник, описывается уравнениями

$$\dot{U} = Z\dot{I}, \quad \dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z} = Y\dot{U}, \quad (1.7)$$

или

$$Z = r + jx = \frac{\dot{U}}{\dot{I}}, \quad Y = \frac{1}{Z} = g + jb = \frac{\dot{I}}{\dot{U}}.$$

Комплексы сопротивлений и проводимостей шунтов содержат информацию об угле между током шунта и напряжением, приложенным к шунту, и знаке этого угла.

Часто параметры шунта, который замещает источник или приемник, определяют по заданным значениям комплекса полной мощности и модуля напряжения. Выразив комплекс тока из формулы (1.3) или (1.5) и подставив полученное выражение в формулы (1.6) и (1.7), можно получить формулы для расчета комплексов сопротивления и проводимости шунта через мощность и напряжение.

Формула (1.3) корректно согласуется с уравнениями шунтов. Ток шунта $\dot{I} = \frac{\dot{S}}{3\dot{U}}$ равен току, вычисленному по формулам (1.6) и (1.7).

Сопротивление и проводимость шунта источника равны:

$$Z = -\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = -\frac{3\dot{U}\dot{U}}{\dot{S}} = -\frac{3U^2}{\dot{S}}, \quad Y = -\frac{\dot{I}}{\dot{U}} = -\frac{\dot{S}}{3U^2}, \quad (1.8)$$

параметры шунта приемника отличаются знаком:

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{3\dot{U}\dot{U}}{\dot{S}} = \frac{3U^2}{\dot{S}}, \quad Y = \frac{\dot{I}}{\dot{U}} = \frac{\dot{S}}{3U^2}. \quad (1.9)$$

Если известно напряжение, приложенное к шунту, и параметры шунта, можно найти мощность источника

$$\dot{S} = -\frac{3U^2}{Z} = -3U^2Y, \quad (1.10)$$

и приемника

$$\dot{S} = \frac{3U^2}{Z} = 3U^2Y. \quad (1.11)$$

Все комплексы, характеризующие источник или приемник, в формулах (1.1)÷(1.4), (1.6)÷(1.11) полностью согласованы, при проведении вычислений обеспечивается автоматическое формирование знаков реальной и мнимой частей комплексов. Результаты вычислений полной мощности

по формулам (1.3) и (1.10), (1.11) одинаковы. Учитывая, что электрические машины обратимы и могут работать и источником, и приемником электрической энергии, для приемника можно применить генераторную форму записи уравнений, при этом в режиме потребления знак полной мощности (и активной, и реактивной составляющих) будет противоположным генераторному режиму. Для источника можно применить нагрузочную форму записи, в режиме генерации знак полной мощности источника будет противоположным. Согласованность знаков комплексов при изменении формы записи уравнений и/или режима работы источников и приемников не нарушается.

Если применить для расчета полной мощности формулу (1.5), то при построении уравнений шунтов возникают затруднения и противоречия. Непосредственно из самой формулы нельзя получить выражение для комплекса тока, что не позволяет выразить параметры шунта через комплекс полной мощности и модуль напряжения. С одной стороны параметры шунтов должны быть такими, чтобы корректно связывать комплексы тока и напряжения в уравнениях (1.6) и (1.7) и на векторной диаграмме. С другой стороны параметры шунтов должны быть такими, чтобы значения полной мощности, вычисленные по формулам (1.10) и (1.11), совпадали бы со значением, полученным по формуле (1.5). Эти требования несовместны.

Анализ показывает, что условиям рациональной записи уравнений отвечает только определение комплекса полной мощности по формуле (1.3), что и зафиксировано в третьем соглашении.

Далее в книге используется рациональная форма записи уравнений в комплексном виде, она предохраняет от ошибок и обеспечивает корректный переход от комплексных переменных к переменным во вращающихся прямоугольных d, q осях или обратно по формулам линейных преобразований координат, что упрощает разработку алгоритмов с использованием комплексных чисел. При использовании такой записи уравнений знаки реактивных составляющих некоторых комплексов могут не совпадать с их традиционными знаками или со знаками, predeterminedными директивными форматами данных [6]. Необходимую коррекцию знаков легко осуществить при вводе данных и при визуализации результатов расчета.

Форма записи уравнений статической и динамической модели источника или приемника электрической энергии должна быть одинаковой. Если в динамической модели энергосистемы для двигателей использовать генераторную форму записи уравнений Парка-Горева с целью унификации математических моделей вращающихся машин, § 4.2, то и в алгоритме расчета установившихся режимов для приемников следует применить генераторную форму записи уравнений. При

внешнем представлении информации знаки тока и полной мощности приемников можно изменить на противоположные, чтобы они соответствовали классической нагрузочной форме записи уравнений.

§ 1.2. Моделирование элементов сети энергосистемы в расчетах установившихся режимов

Стандартной моделью линии электропередачи является П-схема замещения, рис. 1.3. Т-схема замещения не используется, поскольку добавляет в схему сети фиктивный узел.

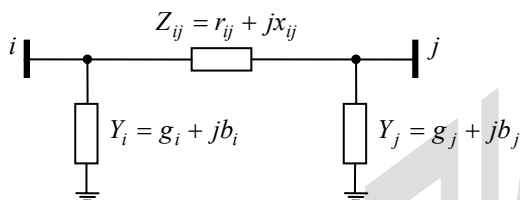


Рис. 1.3. П-схема замещения линии электропередачи

Схема замещения связывает токи и напряжения по концам линии. Для линий длиной до 300 км параметры элементов схемы замещения определяются по формулам

$$Z_{ij} = \dot{z}_0 l, \quad Y_i = Y_j = \frac{1}{2} \dot{y}_0 l, \quad (1.12)$$

где $\dot{z}_0 = r_0 + jx_0$, $\dot{y}_0 = g_0 + jb_0$ – параметры линии на единицу длины, l – длина линии.

Активная поперечная проводимость g_0 учитывает потери на корону, иногда потери на корону учитывают мощностью потерь P_k в нагрузке узлов.

При длине линии более 300 км параметры П-схемы замещения учитывают волновые свойства линии

$$Z_{ij} = Z_B \operatorname{sh}(\dot{\gamma}_0 l), \quad Y_i = Y_j = \frac{1}{Z_B} \operatorname{th}\left(\dot{\gamma}_0 \frac{l}{2}\right), \quad (1.13)$$

где $Z_B = \sqrt{\frac{\dot{z}_0}{\dot{y}_0}}$ – волновое сопротивление линии, $\dot{\gamma}_0 = \sqrt{\dot{z}_0 \dot{y}_0}$ – постоянная распространения электромагнитной волны.

Если необходимо определить режим линии не только в начале и в конце, но и в промежуточных точках, например, распределение токов

и напряжений по длинной линии, линию разбивают на участки и замещают каждый участок П-схемой.

Соотношения между токами и напряжениями по концам линии и падение напряжения на линии зависят от ее параметров и перетока мощности. На рис. 1.4 показана линия длиной менее 300 км, включенная в питающий узел 1, к концу линии в узле 2 подключена нагрузка. Условные положительные направления токов показаны стрелками.

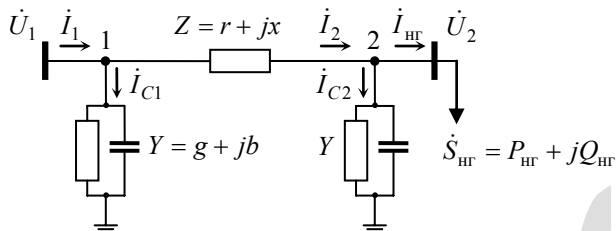


Рис. 1.4. К анализу режимов линии

На рис. 1.5 построены векторные диаграммы при различной нагрузке линии по известным значениям напряжения \dot{U}_2 конца линии и мощности нагрузки $\dot{S}_{\text{нг}}$. Потери на корону не учитываются, активная проводимость $g = 0$, вектор напряжения \dot{U}_2 совмещен с осью вещественных комплексной плоскости.

Построение векторных диаграмм производится в следующем порядке. Определяются векторы тока нагрузки, емкостного тока и фиктивного тока в конце линии

$$\dot{I}_{\text{нг}} = \frac{\dot{S}_{\text{нг}}}{\sqrt{3}\dot{U}_2}, \quad \dot{I}_{C2} = Y\dot{U}_2, \quad \dot{I}_2 = \dot{I}_{\text{нг}} + \dot{I}_{C2}.$$

Далее формируются вектор падения напряжения на сопротивлении линии и вектор напряжения в узле 1

$$\Delta\dot{U} = Z\dot{I}_2, \quad \dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \Delta\dot{U},$$

затем определяются векторы емкостного и полного токов в начале линии

$$\dot{I}_{C1} = Y\dot{U}_1, \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_{C1}.$$

Векторная диаграмма на рис. 1.5, а показывает, что при индуктивном характере нагрузки емкостная мощность линии компенсирует в определенной степени индуктивную мощность нагрузки и способствует уменьшению падения напряжения на линии.

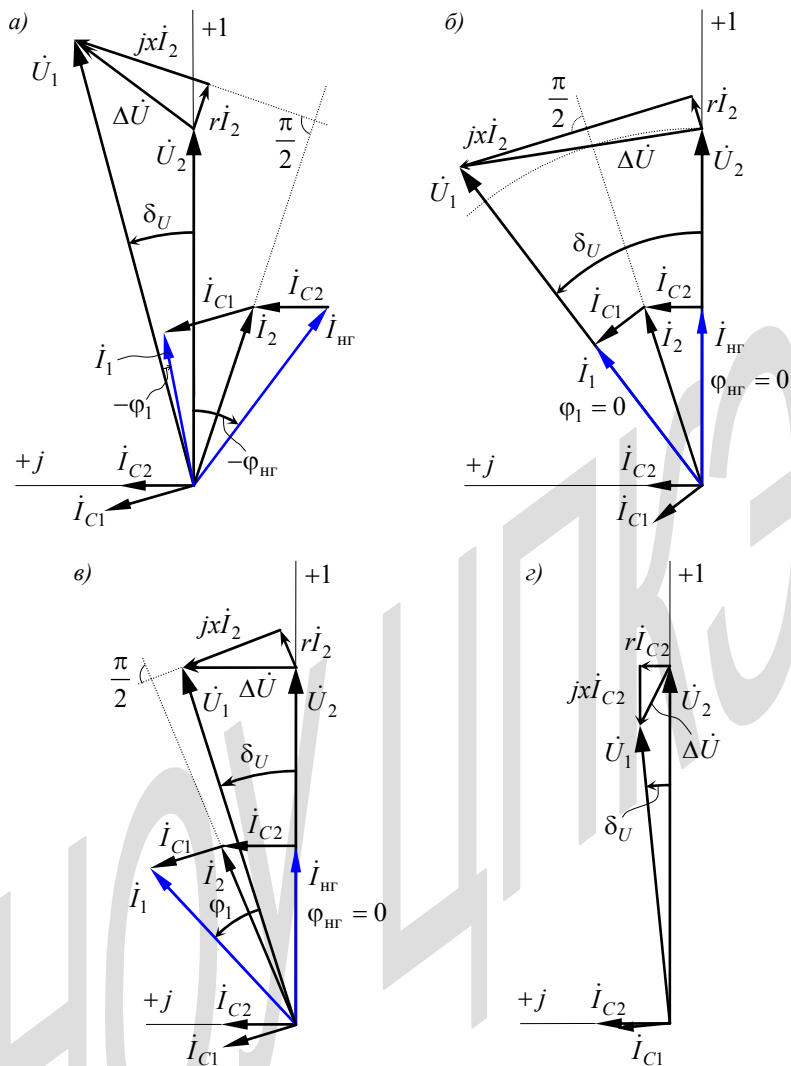


Рис. 1.5. Векторные диаграммы линии электропередачи в различных режимах:
 а – активно-индуктивная нагрузка; б – передача натуральной мощности;
 в – передача активной мощности меньше натуральной; г – холостой ход

В зависимости от соотношения активной мощности нагрузки и натуральной мощности линии, а также реактивных мощностей линии и

нагрузки ток в начале линии может отставать по фазе от напряжения или опережать его.

В режиме передачи натуральной мощности ($P_{нг} = P_{нат}$, $Q_{нг} = 0$) ток совпадает по фазе с напряжением и в начале, и в конце линии, рис. 1.5, б. Падение напряжения на линии определяется ее активным сопротивлением. С увеличением передаваемой активной мощности сверх натуральной падение напряжения на линии будет расти, ток в начале линии будет отставать по фазе от напряжения.

При передаче активной мощности меньше натуральной и $Q_{нг} = 0$, рис. 1.5, в, ток в начале линии опережает по фазе напряжение, падение напряжения на линии уменьшается. При некотором соотношении активной мощности нагрузки и натуральной мощности линии модули напряжений по ее концам будут равны, а при дальнейшем уменьшении мощности нагрузки модуль напряжения в узле 2 будет больше модуля напряжения в узле 1. На холостом ходе напряжение в конце линии больше напряжения в начале, рис. 1.5, г.

Векторные диаграммы показывают, что при формировании электрического режима схема линии является параметрическим регулятором напряжения.

В расчетах электрических режимов применяют две схемы замещения двухобмоточного трансформатора:

- Г-образную с идеальным трансформатором, рис. 1.6, а,
- активную П-схему замещения без трансформаторных связей, рис. 1.6, б.

которые позволяют вести расчет режима в именованных единицах и получать натуральные значения напряжений в узлах и токов ветвей на различных ступенях трансформации сети.

Параметры Г-схемы определяются по каталожным данным трансформаторов. Активная и реактивная проводимости ветви намагничивания $Y_{\mu} = g_{\mu} + jb_{\mu}$ учитывают потери холостого хода $\Delta P_{x,x}$ и ток намагничивания $I_{x,x}$ и вычисляются по формулам:

$$g_{\mu} = \frac{\Delta P_{x,x}}{U_{ВНн}^2},$$

$$b_{\mu} = \sqrt{y_{\mu}^2 - g_{\mu}^2},$$

$$y_{\mu} = \frac{I_{x,x}[\%]}{100} \cdot \frac{S_{н}}{U_{ВНн}^2}.$$

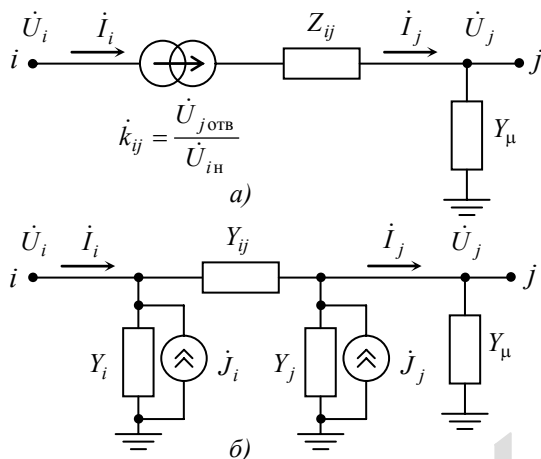


Рис. 1.6. Схемы замещения трансформаторных ветвей

Активное и индуктивное сопротивления продольной ветви $Z_{ij} = (r + jx)_{ij}$, приведенные к стороне высшего напряжения (ВН), вычисляются по формулам

$$r_{ij} = \frac{\Delta P_{к.з} U_{ВНн}^2}{S_H^2},$$

$$x_{ij} = \sqrt{z_{ij}^2 - r_{ij}^2},$$

$$z_{ij} = \frac{u_{к[\%]} U_{отв}^2}{100 S_H},$$

$$U_{отв} = U_{ВНн} \left(1 \pm n_{отв} \frac{\Delta U_{отв[\%]}}{100} \right),$$

где $\Delta P_{к.з}$ – потери короткого замыкания, $u_{к[\%]}$ – напряжение короткого замыкания для выбранной отпайки с напряжением $U_{отв}$, если известны значения $u_{к}$ на различных отпайках, в противном случае используется значение $u_{к}$ для основного (номинального) вывода, $n_{отв}$, $\Delta U_{отв}$ – номер отпайки РПН/ПБВ, отсчитываемый от основного вывода, и ступень регулирования напряжения.

Действительный коэффициент трансформации равен

$$k_{ij} = \frac{U_{отв}}{U_{ВНн}}.$$

Комплексный коэффициент трансформации используется при наличии поперечного регулирования напряжения (по углу). Изменение фазы напряжения трансформаторами со схемой соединения обмоток Y/Δ в расчетах обычно не учитывается.

Параметры активной П-схемы замещения двухобмоточного трансформатора можно определить, зная параметры Г-схемы. Эти схемы будут эквивалентными в том случае, если при одинаковых напряжениях в узлах i и j входные и выходные токи (до ветви намагничивания), условные положительные направления направления которых показаны на рис. 1.6 стрелками, будут равны:

$$\dot{U}_i \frac{k_{ij}^2}{Z_{ij}} - \dot{U}_j \frac{k_{ij}^2}{\dot{k}_{ij} Z_{ij}} = Y_{ij}(\dot{U}_i - \dot{U}_j) - \dot{J}_i + Y_i \dot{U}_i,$$

$$\dot{U}_i \frac{\dot{k}_{ij}}{Z_{ij}} - \dot{U}_j \frac{1}{Z_{ij}} = Y_{ij}(\dot{U}_i - \dot{U}_j) + \dot{J}_j - Y_j \dot{U}_j,$$

где k_{ij} , \dot{k}_{ij} – модуль и комплекс коэффициента трансформации.

Анализ этих выражений дает следующие формулы расчета параметров активной П-схемы замещения трансформатора:

$$Y_{ij} = \frac{k_{ij}}{Z_{ij}}, \quad (1.14)$$

$$Y_i = Y_{ij}(k_{ij} - 1), \quad \dot{J}_i = Y_{ij} \left(\frac{k_{ij}}{\dot{k}_{ij}} - 1 \right) \dot{U}_j, \quad (1.15)$$

$$Y_j = \frac{(1 - k_{ij})}{Z_{ij}}, \quad \dot{J}_j = Y_{ij} \left(\frac{\dot{k}_{ij}}{k_{ij}} - 1 \right) \dot{U}_i. \quad (1.16)$$

Если коэффициент трансформации действительный, то задающие токи \dot{J}_i и \dot{J}_j реальных источников тока, включенных в узлах i и j , равны нулю и П-схема замещения становится пассивной.

Задающие токи активной П-схемы трансформатора зависят от напряжений в узлах, однако этот недостаток легко преодолевается. При итеративном расчете установившегося режима определение задающих токов производится одновременно с коррекцией источников тока, замещающих нагрузки и генераторы в узлах схемы. В расчетах электро-механических переходных процессов можно использовать значения задающих токов с предыдущего шага интегрирования.

Для n -обмоточных трансформаторов ($n \geq 3$) применяются схемы замещения в виде n -лучевой звезды [7]. Для таких трансформаторов

после расчета по каталожным данным параметров n -лучевой звезды каждый луч между фиктивным узлом схемы замещения и узлами различных ступеней напряжения, кроме луча к узлу высшего напряжения, представляется Г- или П-схемой.

Активная П-схема замещения трансформатора является универсальной, она позволяет заменить параллельно включенные трансформаторные ветви с различными параметрами одной эквивалентной ветвью.

Для расчета электрического режима ветвей, представленных П-схемой замещения, необходимо принять соглашение об условных положительных направлениях токов в элементах схемы, рис. 1.7.

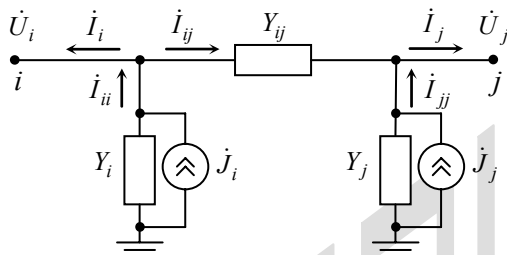


Рис. 1.7. Условные положительные направления токов в элементах П-схемы замещения

Начальным узлом ветви является узел i , конечным – узел j . За положительное направление фиктивного тока между узлами \dot{I}_{ij} принимаем направление от начального к конечному узлу. Положительным направлением токов источников тока является направление к узлу i или j . За положительное направление токов по концам схемы принято направление к узлу.

В соответствии с выбранными положительными направлениями токов продольный фиктивный ток равен

$$\dot{I}_{ij} = (\dot{U}_i - \dot{U}_j)Y_{ij}. \quad (1.17)$$

Токи источников тока в узлах i и j вычисляются по формулам

$$\dot{I}_{ii} = \dot{J}_i - Y_i \dot{U}_i, \quad \dot{I}_{jj} = \dot{J}_j - Y_j \dot{U}_j. \quad (1.18)$$

Для линий и трансформаторов без поперечного регулирования напряжения следует положить $\dot{J}_i = \dot{J}_j = 0 + j0$, пассивная П-схема замещения является частным случаем активной.

Токи по концам ветви равны

$$\dot{I}_i = \dot{I}_{ii} - \dot{I}_{ij}, \quad \dot{I}_j = \dot{I}_{jj} + \dot{I}_{ij}. \quad (1.19)$$

Полная мощность в начале и конце ветви определяются по формулам

$$\dot{S}_i = 3\widehat{U}_i \dot{I}_i, \quad \dot{S}_j = 3\widehat{U}_j \dot{I}_j, \quad (1.20)$$

а потери мощности равны

$$\Delta \dot{S}_{ij} = \dot{S}_i + \dot{S}_j. \quad (1.21)$$

При анализе режима ветви необходимо учитывать принятые положительными направления токов по концам схемы. При передаче активной мощности от начального узла i к конечному узлу j активная мощность в начале ветви $P_i < 0$, в конце ветви $P_j > 0$, причем $|P_i| > |P_j|$, если в линии есть потери активной мощности. При передаче активной мощности в противоположном направлении от узла j к узлу i , наоборот, $P_i > 0$, $P_j < 0$, $|P_j| \geq |P_i|$. Целесообразно для обоих концов ветви использовать одинаковое соглашение о знаках. Тогда при передаче активной мощности как от начального узла к конечному, так и в обратном направлении потери активной мощности в ветви, вычисленные по формуле (1.21), получаются отрицательными, $\Delta P_{ij} = \text{Re}(\Delta \dot{S}_{ij}) < 0$. Это означает, что ветвь потребляет активную мощность. При внешнем представлении информации о режиме ветви знаки токов и мощностей можно скорректировать.

Для неуправляемых шунтирующих реакторов и батарей конденсаторов традиционно используются схемы замещения в виде шунтов, постоянные параметры которых определяются на основе каталожных данных по формулам (1.7), (1.9), (1.11). Мощность неуправляемых реакторов и батарей конденсаторов при изменении режима сети можно изменять только ступенчато, коммутируя их выключателями.

Для моделирования управляемых шунтирующих реакторов (УШР) с подмагничиванием (УШРП) и реакторов трансформаторного типа с вытеснением магнитного поля (УШРТ) можно применить шунт с переменными параметрами. В ходе итеративного балансирования установившегося режима параметры шунта изменяются в соответствии с принятым законом управления. Например, управляемый реактор может поддерживать заданное напряжение в узле или регулировать реактивный ток линии. При этом УШРТ в отличие от УШРП работают в режиме компенсатора двустороннего действия [8]. Емкостную мощность в пределах 5÷10 % от номинальной индуктивной мощности реактора при разомкнутой обмотке управления дают фильтры 5 и 7 гармоник компенсирующей обмотки. В специальных УШРТ емкостная мощность может быть равна его индуктивной мощности.

УШР можно охарактеризовать параметрами, представленными в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Параметры УШР

Параметр	Ед. изм.	Обозначение
– номинальное напряжение реактора, линейное	кВ	U_H
– номинальная реактивная мощность реактора	Мвар	Q_H
– минимальная реактивная мощность УШРП или номинальная емкостная мощность УШРТ	Мвар	Q_{\min} Q_{C_H}
– номинальная полная мощность реактора	МВ·А	S_H
– номинальный ток сетевой обмотки	А	I_H
– потери активной мощности в обмотках реактора в номинальном режиме	кВт	$\Delta P_{к.н}$
– потери активной мощности в стали реактора	кВт	$\Delta P_{х.х}$
– ток сетевой обмотки в режиме максимального сопротивления или в номинальном емкостном режиме	А	I_{\min} I_{C_H}
– активное сопротивление обмоток реактора	Ом	r
– максимальное индуктивное сопротивление реактора или сопротивление УШРТ при генерации максимальной емкостной мощности	Ом	x_{\max} x_{C_H}
– номинальное индуктивное сопротивление реактора (равно минимальному сопротивлению)	Ом	$x_H = x_{\min}$
– активная проводимость, учитывающая потери в стали	См	g_μ

В отличие от трансформаторов для УШР нет понятия тока холостого хода. УШРП характеризуется минимальной реактивной мощностью и минимальным током сетевой обмотки при максимальном сопротивлении. УШРТ двустороннего действия характеризуется номинальными мощностью, током и сопротивлением в индуктивном и емкостном режимах.

Параметры реактора при использовании единиц измерений, указанных в табл. 1.1, связаны следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \dot{S}_H &= (\Delta P_{к.н} + \Delta P_{х.х})10^{-3} + jQ_H, \\ S_H &= \sqrt{((\Delta P_{к.н} + \Delta P_{х.х})10^{-3})^2 + Q_H^2}, \quad I_H = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_H}, \\ g_\mu &= \frac{\Delta P_{х.х} 10^{-3}}{U_H^2}, \quad r = \frac{\Delta P_{к.н} 10^3}{3I_H^2}, \end{aligned}$$

$$z_{\text{H}} = z_{\text{min}} = \frac{S_{\text{H}}}{3I_{\text{H}}^2}, \quad x_{\text{H}} = x_{\text{min}} = \sqrt{z_{\text{H}}^2 - r^2},$$

$$x_{\text{max}} = \frac{U_{\text{H}}^2}{Q_{\text{min}}} = \frac{U_{\text{H}}}{\sqrt{3}I_{\text{min}}10^{-3}}, \quad x_{\text{CH}} = \frac{U_{\text{H}}^2}{Q_{\text{CH}}} = \frac{U_{\text{H}}}{\sqrt{3}I_{\text{CH}}10^{-3}}.$$

Полное сопротивление реактора равно

$$Z = r + jx, \quad x_{\text{H}} \leq x \leq x_{\text{max}} \quad \text{или} \quad x_{\text{H}} \leq x \leq x_{\text{CH}}.$$

Допустимо пренебречь сравнительно небольшими потерями в меди обмоток УШР, тогда

$$r = 0, \quad \Delta P_{\text{к.н}} \approx 0, \quad x_{\text{H}} \approx z_{\text{H}} = \frac{U_{\text{H}}^2}{Q_{\text{H}}}.$$

Потери в стали УШР зависят от режима. Поскольку зависимость потерь от режима реактора обычно не определена, для упрощения модели реактора потери в стали можно принять постоянными, равными максимальным потерям, тогда $g_{\mu} = \text{const}$. Если потери в стали сердечника реактора относительно невелики, можно пренебречь этими потерями, тогда

$$g_{\mu} = 0, \quad \Delta P_{\text{x.x}} = 0, \quad Q_{\text{H}} = S_{\text{H}}.$$

Моделирование обоих типов УШР можно осуществить на основе одной схемы замещения, представленной на рис. 1.8.

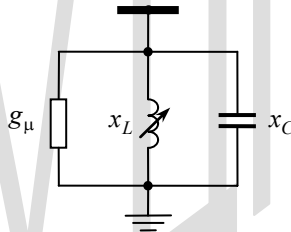


Рис. 1.8. Схема замещения управляемого шунтирующего реактора

Проводимость шунтирующего реактора при текущем значении индуктивного сопротивления x_L определяется по формуле

$$Y = g_{\mu} + \left(\frac{1}{jx_L} + \frac{1}{jx_C} \right). \quad (1.22)$$

Диапазон изменения переменного индуктивного сопротивления x_L и значение постоянного емкостного сопротивления x_C схемы замещения определяются на основе параметров УШР.

Для УШРП емкостное сопротивление равно бесконечности, тогда

$$x_H \leq x_L \leq x_{L \max}.$$

Для УШРТ двустороннего действия, зная x_{CH} и x_H , необходимо определить значение x_C и диапазон изменения индуктивного сопротивления $x_{LH} \leq x_L \leq x_{L \max}$, при условии, что известно соотношение

$$k_{\max} = \frac{x_{L \max}}{x_{LH}}. \quad (1.23)$$

Для УШРТ без стального сердечника внутри обмотки управления $k_{\max} = 2 \div 4$, при наличии стального сердечника $k_{\max} \approx 200$ [8].

В номинальном индуктивном режиме реактора реактивность x_L имеет номинальное (минимальное) значение x_{LH} , а в номинальном емкостном режиме максимальное значение $x_{L \max} = k_{\max} x_{LH}$. При этом справедливы следующие соотношения между параметрами реактора и его схемы замещения

$$\frac{1}{x_H} = \frac{1}{x_{LH}} + \frac{1}{x_C}, \quad \frac{1}{x_{CH}} = \frac{1}{k_{\max} x_{LH}} + \frac{1}{x_C},$$

откуда следуют формулы для расчета параметров схемы замещения:

$$x_{LH} = \frac{k_{\max} - 1}{k_{\max}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{x_H} - \frac{1}{x_{CH}}}, \quad (1.24)$$

$$x_C = \frac{1}{\frac{1}{x_{CH}} - \frac{1}{x_{L \max}}}. \quad (1.25)$$

УШР в энергосистемах могут быть использованы для компенсации избыточной зарядной мощности линий и регулирования напряжения, для разгрузки генераторов, работающих на длинные линии, от емкостного тока, для регулирования коэффициента мощности нагрузки [8]. В расчетах установившихся режимов модель УШР должна обеспечить различные законы управления реактивным сопротивлением реактора в ходе итеративного балансирования режима в зависимости от назначения реактора. Различные методы расчета установившегося режима предоставляют разные возможности по управлению реакторами непосредственно в ходе балансирования установившегося режима.

При решении системы узловых уравнений методом Ньютона, § 2.2, сравнительно просто можно реализовать только возможность регулирования напряжения при помощи УШР. Реактор рассматривается как иде-

альный источник реактивного тока (QU -генератор), для которого нужно задать уставку напряжения и ограничения по реактивной мощности в узле, в котором включен УШР. Однако при этом возникают затруднения с точным соблюдением ограничений режима реактора, как и для PU -генераторов, § 1.4. Компенсация реактивного тока линии при помощи УШР или изменение мощности реактора в зависимости от перетока активной мощности по длинной линии при итеративном решении системы узловых уравнений вызывает затруднения.

При использовании для расчета установившегося режима метода эквивалентных преобразований, § 2.3, регулирование реакторов осуществляется одновременно с регулированием PEq -генераторов, § 1.4. Можно реализовать различные законы управления реактором в ходе итеративного балансирования режима. Непосредственное изменение реактивного сопротивления реактора требует специальной обработки резонанса токов УШРТ при смене знака реактивного сопротивления, когда сопротивление реактора $x \rightarrow \infty$. Управление УШРТ упрощается, если представить реактор переменной ЭДС за постоянным сопротивлением, § 2.3, по аналогии с синхронными компенсаторами. Для контроля ограничений реактивного сопротивления реактора источник ЭДС преобразуется в эквивалентный шунт по формуле (1.8) или (1.9).

§ 1.3. Моделирование нагрузки

Мощность нагрузки зависит от напряжения и частоты. Зависимости $P_{нг} = p(U, f)$, $Q_{нг} = q(U, f)$ при медленных изменениях напряжения и частоты называются статическими характеристиками нагрузки (СХН). СХН можно задать в виде таблиц и аппроксимировать полиномами или аналитическими выражениями.

Различные типы потребителей (освещение, асинхронные и синхронные двигатели, печи, нагревательные приборы и др.) имеют индивидуальные СХН [5], которые в практических расчетах используются редко, комплексная нагрузка узлов 6–10 кВ и выше учитывается в целом, без деления на типы потребителей.

В расчетах установившихся режимов энергосистем свойства комплексной нагрузки, состоящей из потребителей различных типов, учитывают при помощи СХН, полученных по данным натурных испытаний. Такие СХН зависят от ступени напряжения, на которой измеряют мощность нагрузки при изменении условий питания, от состава комплексной нагрузки и потерь в сети.

После отклонений напряжения и частоты происходит процесс адаптации нагрузки к новым условиям питания, и потребители могут

полностью или частично восстановить свою производительность. Режим может измениться под воздействием автоматических регуляторов напряжения на шинах трансформаторных подстанций (АРНТ), или команд оперативного персонала. Поэтому СХН зависят также от времени между испытательным возмущением и временем измерений. Различают естественные СХН, отражающие первоначальную реакцию потребителей на отклонения напряжения и частоты, СХН с учетом регулирования напряжения и СХН для длительных режимов [9].

Естественные СХН используют для расчетов режимов, устанавливающихся непосредственно после возмущения исходного режима, без учета регулирования напряжения. Для области допустимых напряжений, в которой сохраняется устойчивость двигательной нагрузки (напряжение на нагрузке больше критического $U > U_{кр}$), естественные СХН при номинальной частоте аппроксимируют, как правило, полиномами второй степени

$$P_{нг} = P_{нг.н} \left(a_0 + a_1 \frac{U}{U_{нг.н}} + a_2 \left(\frac{U}{U_{нг.н}} \right)^2 \right), \quad (1.26)$$

$$Q_{нг} = Q_{нг.н} \left(b_0 + b_1 \frac{U}{U_{нг.н}} + b_2 \left(\frac{U}{U_{нг.н}} \right)^2 \right). \quad (1.27)$$

где a_i, b_i – коэффициенты, $a_0 + a_1 + a_2 = 1,0$, $b_0 + b_1 + b_2 = 1,0$.

Если СХН неизвестны, используют обобщенные типовые СХН [10], представленные в таблице 1.3. Типовые СХН в программах расчета режимов энергосистем обычно встроены.

Таблица 1.3

Значения коэффициентов СХН

Вид характеристики	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2
Типовая на ступени 35 кВ и ниже	0,83	-0,3	0,47	4,9	-10,1	6,2
Типовая на ступени 110-220 кВ	0,83	-0,3	0,47	3,7	-7,0	4,3
Постоянная мощность	1	0	0	1	0	0
Постоянный задающий ток	0	1	0	0	1	0
Постоянная проводимость	0	0	1	0	0	1

При аппроксимации статических характеристик нагрузки полиномами изменение поведения нагрузки при отклонениях напряжения можно учитывать, изменяя значения коэффициентов полиномов. В табл. 1.3 приведены значения коэффициентов при постоянной мощности нагрузки и при изменении мощности нагрузки пропорционально напряжению и пропорционально квадрату напряжения.

Типовые характеристики для напряжений $U < U_{кр}$ не пригодны.

Для адекватного воспроизведения поведения нагрузки при изменении напряжения в широких пределах можно применить смену значений коэффициентов полиномов СХН, или воспользоваться набором из нескольких полиномов для различных диапазонов напряжений, или использовать табличное представление СХН.

Для узлов с большой долей синхронных двигателей при проведении расчетов следует учитывать способ регулирования возбуждения двигателей. В [9] предложена универсальная СХН для $Q_{нг}$ и формулы расчета ее коэффициентов в зависимости от способа регулирования возбуждения синхронных двигателей.

Автоматическое и/или оперативное поддержание напряжения на шинах потребителей приводит к тому, что в пределах регулировочного диапазона, достаточного для компенсации отклонений напряжения, активную и реактивную мощности нагрузки можно считать постоянными. Если регулировочный диапазон исчерпан, при дальнейшем отклонении напряжения потребление изменяется по естественным СХН. Такой процесс изменения, например, реактивной мощности нагрузки можно описать при помощи СХН вида

$$Q_{нг} = \begin{cases} Q_{нг.н} \left(b_0 + b_1 \frac{U - \Delta U_+}{U_{нг.н}} + b_2 \left(\frac{U - \Delta U_+}{U_{нг.н}} \right)^2 \right), & \text{если } U > (U_{нг.н} + \Delta U_+), \\ Q_{нг.н}, & \text{если } (U_{нг.н} - \Delta U_-) \leq U \leq (U_{нг.н} + \Delta U_+), \\ Q_{нг.н} \left(b_0 + b_1 \frac{U + \Delta U_-}{U_{нг.н}} + b_2 \left(\frac{U + \Delta U_-}{U_{нг.н}} \right)^2 \right), & \text{если } U < (U_{нг.н} - \Delta U_-), \end{cases}$$

где ΔU_- , ΔU_+ – отклонения напряжения от номинального значения в сторону уменьшения и увеличения, компенсируемые АРНТ и/или действиями оперативного персонала.

Если автоматическое и оперативное регулирование напряжения распространяется не более чем на 20 – 30% потребителей, допустимо использовать естественные характеристики [9].

В длительных режимах процессы адаптации нагрузки к отклонениям напряжения и частоты приводят к тому, что даже при недостатке средств регулирования напряжения активная мощность нагрузки практически восстанавливается [9]. В расчетах длительных режимов допущение $P_{нг} \approx \text{const}$ с учетом погрешностей исходной информации считается приемлемым. Ориентировочно полагают также, что и уровень

напряжений на шинах потребителей устанавливается близким к нормальному, тогда $Q_{нг} \approx \text{const}$.

Руководящие указания [11] рекомендуют нагрузку в расчетах установившихся режимов представлять, как правило, независимыми от напряжения значениями активной и реактивной мощности. СХН с учетом действия АРНТ рекомендуется использовать в расчетах послеаварийных режимов.

Зависимость нагрузки от частоты необходимо учитывать в расчетах режимов при неноминальной частоте [11]. Для учета изменения активной мощности нагрузки при отклонениях частоты от номинальной в полиномы СХН (1.26) и (1.27) вводят дополнительные члены, пропорциональные отклонению частоты Δf от номинальной. Используют и другие варианты:

$$P_{нг} = P_{нг.н} \left(1 + K_{нг} \frac{\Delta f}{f_n} \right), \quad (1.28)$$

где $K_{нг} = \frac{\partial P_{нг}}{\partial f} + \frac{\partial P_{нг}}{\partial U} \frac{\partial U}{\partial f}$ – полный регулирующий эффект нагрузки по частоте с учетом изменения напряжения, вызванного изменением частоты. Или

$$P_{нг} = P_{нг}(U) \left(1 + k_{нг} \frac{\Delta f}{f_n} \right), \quad (1.29)$$

здесь $k_{нг} = \frac{\partial P_{нг}}{\partial f}$ – регулирующий эффект нагрузки по частоте при постоянстве напряжения в узле нагрузки.

Зависимость реактивной мощности нагрузки от частоты либо не учитывают, считая мощность постоянной, либо определяют как $Q_{нг} \approx P_{нг} \text{tg}\varphi_{нг}$, $\varphi_{нг} \approx \varphi_{нг.н} \approx \text{const}$, по рекомендации [11] для расчетов предельных режимов.

Если программа предназначена для расчетов установившихся и переходных режимов энергосистем, то балансирование установившихся режимов при неноминальной частоте целесообразно проводить на динамической модели энергосистемы, § 9.2, которая позволяет сбалансировать режим с учетом действия автоматических регуляторов и реального изменения активной и реактивной мощности асинхронной и синхронной составляющих комплексной нагрузки узлов при изменениях частоты.

В алгоритме расчета установившегося режима нагрузку можно представить шунтом, идеальным или реальным источником тока и ре-

альным источником ЭДС, рис. 1.9, где условные направления токов и ЭДС соответствуют нагрузочной форме записи уравнений.

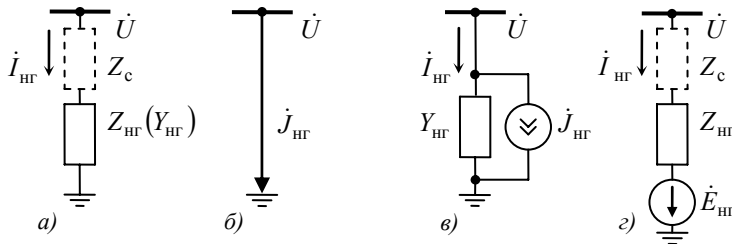


Рис. 1.9. Модели нагрузки:

а – шунт; б – идеальный источник тока; в – реальный источник тока; г – реальный источник ЭДС

Шунт используется редко, в случае, если мощность нагрузки изменяется пропорционально квадрату напряжения. При этом параметры шунта постоянны и определяются по формуле (1.9) для номинального напряжения нагрузки. При использовании шунта имеется возможность корректно уменьшить число узлов схемы замещения за счет добавления сопротивления связи Z_c нагрузки с узлом к сопротивлению нагрузки, тогда

$$Y_{\text{нг}} = \frac{1}{Z_{\text{нг}} + Z_c}.$$

При формировании и решении системы узловых уравнений методом Ньютона основной моделью нагрузки является идеальный источник тока

$$j_{\text{нг}} = \frac{\dot{S}_{\text{нг}}}{3U}. \quad (1.30)$$

В расчетах установившихся режимов методом эквивалентных преобразований идеальный источник тока использовать нельзя, § 2.3, комплексную нагрузку необходимо моделировать или шунтом с переменными параметрами, если в узле нет двигательной нагрузки, или реальными источником тока и ЭДС. Задающий ток реального источника тока определяется по формуле

$$j_{\text{нг}} = \frac{\dot{S}_{\text{нг}}}{3U} - Y_{\text{нг}}\dot{U}, \quad (1.31)$$

где $Y_{\text{нг}} = \frac{1}{Z_c + Z_{\text{нг}}}.$

Сопротивление нагрузки можно определить, если задан состав комплексной нагрузки (доли статической, асинхронной и синхронной составляющих), или использовать значение из диапазона

$$Z_{\text{нг}} \cong jx_{\text{нг}} \cong j(0,5 \div 1,0) \frac{U_{\text{нг.н}}^2}{S_{\text{нг.н}}}$$

Замещение нагрузки реальным источником ЭДС позволяет корректно уменьшить число узлов схемы, рис. 1.9, з, за счет добавления сопротивления связи нагрузки с узлом Z_c к внутреннему сопротивлению нагрузки.

§ 1.4. Моделирование генераторов

При балансировании установившегося режима энергосистемы генерация приводится в соответствие с нагрузкой и потерями в сети. В зависимости от поведения генераторов в процессе балансирования режима генераторы могут быть регулируемыми и изменить свою активную и/или реактивную мощность в схеме, или нерегулируемыми с фиксированными значениями полной мощности. Различают следующие типы генераторов:

- *PQ*-генератор. Нерегулируемый генератор с заданными значениями генерации активной и реактивной мощности, не зависящими от напряжения в узле (от режима сети). Свободными параметрами режима генераторного узла, которые определяются расчетом, являются модуль и угол напряжения в узле, т. е. вектор напряжения.
- *PU*-генератор. Регулируемый генератор с заданными уставками активной мощности и модуля напряжения в узле. Активная мощность генератора постоянна и не зависит от режима сети. Для поддержания заданного модуля напряжения изменяется реактивная мощность генератора в пределах регулировочного диапазона от Q_{\min} до Q_{\max} . Свободными параметрами режима являются реактивная мощность генератора и угол напряжения узла. При выходе на ограничения по реактивной мощности фиксируется ее граничное значение (изменяется тип генератора на PQ_{\min} или PQ_{\max}), свободными параметрами режима становятся модуль и угол напряжения. *PU*-генераторы участвуют в сведении баланса реактивной мощности в схеме.
- *PEq*-генератор. Регулируемый генератор с заданными уставками активной мощности и модуля напряжения в узле, участвует в регулировании баланса реактивной мощности в схеме. Для этого типа генератора дополнительно должны быть заданы синхронные

индуктивные сопротивления по осям d и q . При изменении режима сети изменяется возбуждение генератора (модуль синхронной ЭДС E_q) в пределах регулировочного диапазона от $E_{q \min}$ до $E_{q \max}$ и угол между векторами ЭДС и напряжения узла таким образом, чтобы получить заданные значения активной мощности и модуля напряжения. Свободными параметрами режима генераторного узла, которые определяются расчетом, являются реактивная мощность генератора и угол напряжения узла. При выходе на ограничения $E_{q \min}$ или $E_{q \max}$ модуль E_q фиксируется, при этом свободным параметром режима становится модуль напряжения в узле, а реактивная мощность генератора и угол напряжения остаются свободными параметрами режима. Если ток якоря генератора превышает номинальный ток, то, если не достигнуты ограничения по возбуждению, изменяется E_q таким образом, чтобы уменьшить ток якоря до номинального, в противном случае уменьшается активная мощность генератора. Следует подчеркнуть, что при регулировании PEq -генератора, в отличие от PU -генератора, учитывается взаимосвязь процессов регулирования активной и реактивной мощности, изменение модуля вектора синхронной ЭДС влияет на угол нагрузки генератора ($\dot{E}_q \wedge \dot{U}$) и наоборот.

В схеме замещения электрической сети генератор можно представить шунтом, идеальным или реальным источником тока и реальным источником ЭДС, рис. 1.10.

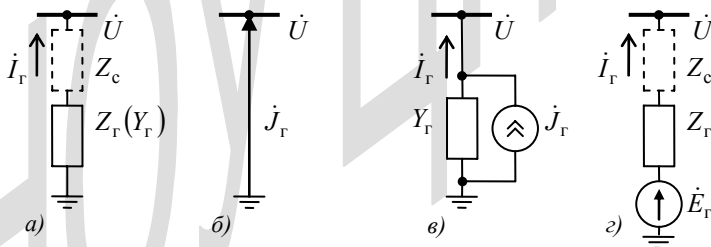


Рис. 1.10. Модели генераторов:

- a – шунт; b – идеальный источник тока; v – реальный источник тока;
- z – реальный источник ЭДС

Замещение генератора шунтом по формулам (1.8) используется редко, например, при эквивалентировании схемы. При формировании

и решении системы узловых уравнений методом Ньютона основной моделью PQ - и PU -генераторов является идеальный источник тока

$$j_r = \frac{\dot{S}_r}{3\dot{U}}. \quad (1.32)$$

В расчетах установившихся режимов методом эквивалентных преобразований применяются реальные источники тока (1.4) и ЭДС (1.1). Если известны мощность генератора и напряжение, задающий ток генератора можно найти по формуле

$$J_r = \frac{\dot{S}_r}{3\dot{U}} + Y_r \dot{U}. \quad (1.33)$$

Замещение генератора источником ЭДС позволяет корректно уменьшить число узлов схемы, рис. 1.10, з, за счет добавления сопротивления связи генератора с узлом Z_c к внутреннему сопротивлению генератора.