

## 5. Расчет параметров установившихся режимов линий электропередачи. Классификация сетей по методам расчета

Общей задачей расчета режимов работы электрических сетей является определение напряжений, потоков активной и реактивной мощности и потерь в ее звеньях.

При расчетах рабочих режимов все элементы сети представляются схемами замещения с соответствующими параметрами. Электрическую сеть изображают в виде условной однолинейной схемы, т.е. предполагают, что рабочий режим является симметричным и синусоидальным.

Электрические расчеты выполняют для следующих установившихся режимов:

- нормальный режим наибольших нагрузок;
- нормальный режим наименьших нагрузок;
- послеаварийные режимы, в которых в результате аварии отключен тот или иной элемент сети;
- иногда требуется проведение расчетов для ремонтных режимов.

Результаты электрических расчетов могут использоваться для решения целого ряда частных задач, среди которых можно отметить:

- выбор необходимых средств регулирования напряжения;
- анализ величины потерь мощности и электроэнергии в элементах сети;
- выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии и мощности и др.

Из сказанного выше, следует, что при электрических расчетах необходимо определить:

- величины потоков мощности или токов на отдельных участках сети, для оценки их допустимости с точки зрения нагрева токоведущих частей элементов сети таких, как провода воздушных линий, жилы кабелей и т.д.;
- значения напряжений во всех узлах сети, для анализа возможности существования такого режима с точки зрения устойчивости системы и возможности работы потребителей с полученными уровнями напряжений.

Исходными данными для проведения таких расчетов являются:

- схема электрической сети;
- параметры схем замещения элементов сети (сопротивления и проводимости);
- параметры нагрузок и источников питания (токи или мощности);
- величины и фазы напряжений в характерных узлах, определяющих режим.

В настоящее время существует значительное количество различных методов расчета. Каждый из них обладает соответствующими достоинствами и недостатками и имеет определенную область применения. Правильный выбор целесообразного метода расчета является весьма важным моментом, т.к. при этом может быть существенно сокращен объем вычислений. В некоторых случаях при неправильно выбранном методе расчет невозможен вообще. Кроме того, различают замкнутые и разомкнутые сети, при расчетах которых необходимо учитывать некоторые особенности. Особенности расчетов замкнутых сетей рассмотрены в отдельном разделе. Перед рассмотрением методик расчетов разомкнутых сетей целесообразно начать с принятой классификации.

Как отмечалось выше, все линии электропередачи по методам расчета можно разделить на 3 группы:

1. Дальние ЛЭП  $U_{НОМ} \geq 330$  кВ с протяженностью  $l \geq 500$  км и передаваемой мощностью  $S \geq 500$  МВ·А.
2. Районные ЛЭП  $U_{НОМ} \geq 35$  кВ и передаваемой мощностью  $S \geq 10$  МВ·А.
3. Местные ЛЭП  $U_{НОМ} \leq 10$  кВ.

Для каждой группы характерны вполне определенные особенности, как при составлении схем замещения, так и в степени детализации параметров режима. Различаются эти группы и по задачам, которые ставятся перед расчетчиками. Для первой группы, например, необходимо учитывать распределенность параметров вдоль линии, должны учитываться волновые процессы и т.д. Для третьей группы можно ввести довольно большое количество упрощений, не оказывающих существенного влияния на результаты расчетов. Проиллюстрировать физические про-

цессы, происходящие в линиях, без лишней их детализации целесообразно на примере рассмотрения методик расчета линий, относящихся ко второй группе, т.е. на примере районных ЛЭП.

## 5.1 Методы расчета разомкнутых районных ЛЭП

### 5.1.1 Расчет линии электропередачи по току нагрузки

Задача состоит в определении тока и напряжения в начале линии с равномерно распределенными параметрами по заданному току  $\underline{I}_2$  и напряжению  $\underline{U}_2$  в конце линии. При этом известными также являются длина  $l$  и параметры линии  $r_0$ ;  $x_0$ ;  $g_0$ ;  $b_0$ . Необходимо определить значения (рис. 5.1):

$\underline{I}_1$  – ток в начале линии;

$\underline{U}_1$  – напряжение в начале линии;

$d$  - угол между векторами напряжения  $\underline{U}_1$  и  $\underline{U}_2$ .

Перед построением векторной диаграммы составляют П-образную схему замещения линии (рис. 5.1) и производят расчет ее параметров:

$$\underline{Z}_{\text{Л}} = r_{\text{Л}} + jx_{\text{Л}}; \underline{Y}_{\text{Л}} = g_{\text{Л}} - jb_{\text{Л}},$$

$$r_{\text{Л}} = r_0 \cdot l; x_{\text{Л}} = x_0 \cdot l; g_{\text{Л}} = g_0 \cdot l; b_{\text{Л}} = b_0 \cdot l.$$

Построение векторной диаграммы токов и напряжений начинают с откладывания на комплексной координатной плоскости вектора напряжения в точке 2. Вектор фазного напряжения  $\underline{U}_{2\phi}$ , совмещают с положительным направлением оси действительных чисел (рис. 5.2). Ток в конце линии  $\underline{I}_{\text{Л}}$  (рис. 5.1) определяется по выражению:

$$\underline{I}_{\text{Л}} = \underline{I}_2 + \underline{I}_{y2},$$

где  $\underline{I}_2$  - ток нагрузки;  $\underline{I}_{y2}$  - ток в проводимости конца линии ( $\underline{Y}_2/2 = \underline{Y}_{\text{Л}}/2$ ), который имеет активную и реактивную составляющие:

$$\underline{I}_{y2} = I_{g2} - jI_{b2},$$

где  $I_{g2}$  – ток в активной проводимости конца линии  $g_{\text{Л}}/2$ ;

$I_{b2}$  – ток в емкостной проводимости конца линии  $b_{\text{Л}}/2$ :

$$I_{g2} = U_2 \frac{g_{\text{Л}}}{2}; I_{b2} = U_2 \frac{b_{\text{Л}}}{2}.$$

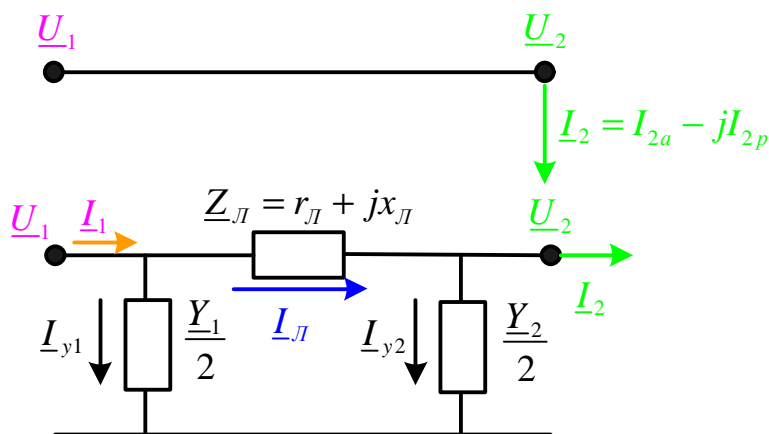


Рис.5.1 – Расчет линии по току нагрузки

Вектор активной составляющей в проводимости  $I_{g2}$  совпадает с вектором напряжения  $\underline{U}_{2\phi}$ , а вектор реактивной (емкостной) составляющей тока в проводимости  $I_{b2}$  опережает вектор  $\underline{U}_{2\phi}$  на  $90^\circ$ . Ток  $\underline{I}_{\text{Л}}$  в конце линии, в отличие от  $\underline{I}_2$  - тока нагрузки, называется **током линии**.

Для определения напряжения в начале линии воспользуемся методом наложения, строя отдельно векторы падения напряжения от токов  $\underline{I}_2$ ;  $I_{g2}$ ;  $I_{b2}$ , а не от суммарного тока линии  $\underline{I}_{\text{Л}}$ .

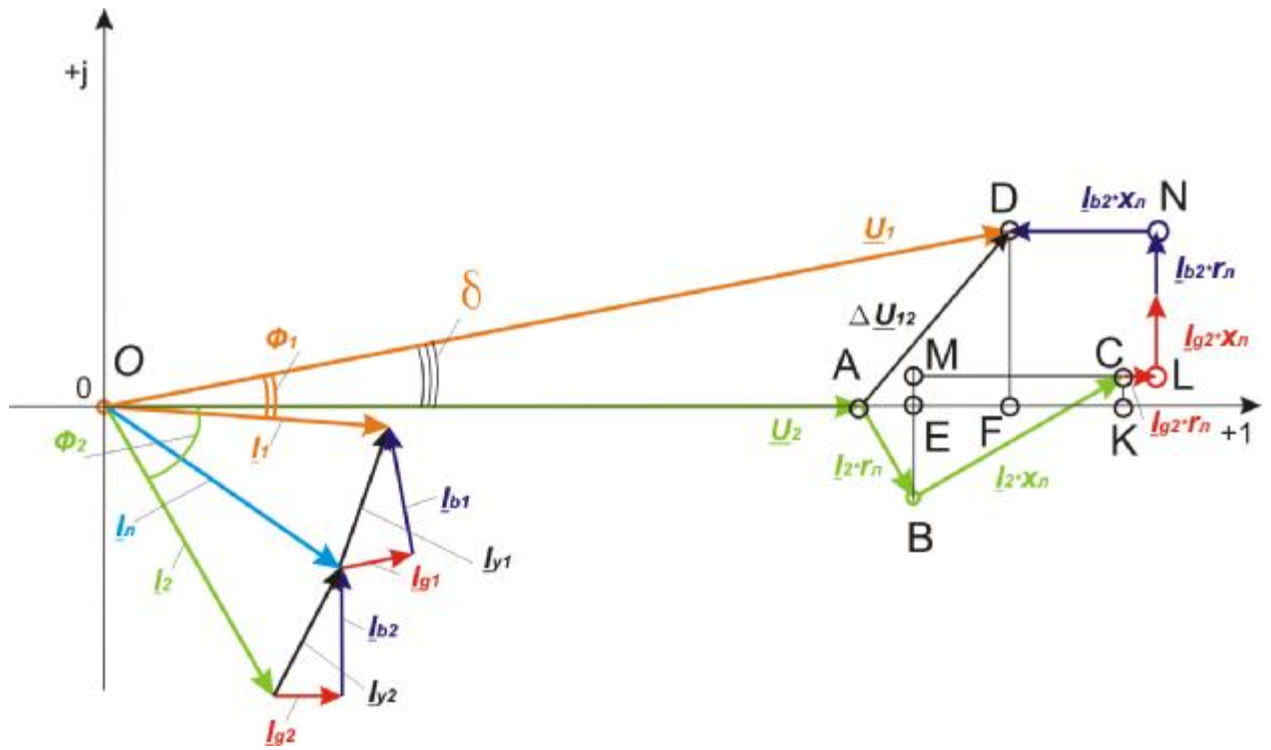


Рис.5.2 – Векторная диаграмма линии электропередачи

К концу вектора  $\underline{U}_{2\phi}$  пристраивается вектор  $\underline{AB} = \underline{I}_2 \cdot r_{\text{Л}}$ , представляющий собой падение напряжения в активном сопротивлении линий  $r_{\text{Л}}$  от тока нагрузки  $\underline{I}_2$ . От конца этого вектора строим вектор  $\underline{BC} = \underline{I}_2 \cdot x_{\text{Л}}$  (падение напряжения в реактивном сопротивлении линии  $x_{\text{Л}}$  от протекания в нем тока нагрузки  $\underline{I}_2$ ), опережающий вектор  $\underline{AB}$  на  $90^\circ$ .

Строя из точки C векторы:  $\underline{I}_{g2} \cdot r_{\text{Л}}$ ;  $\underline{I}_{b2} \cdot r_{\text{Л}}$ ;  $\underline{I}_{g2} \cdot x_{\text{Л}}$ ;  $\underline{I}_{b2} \cdot x_{\text{Л}}$  (падения напряжения от активной и реактивной составляющей тока проводимости конца линии в активном и реактивном сопротивлениях линии), получим точку D. Вектор  $\underline{OD}$  представляет собой фазное напряжение в начале линии  $\underline{U}_{1\phi}$ .

Ток в начале линии  $\underline{I}_1$  будет определяться так:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{\text{Л}} + \underline{I}_{y1},$$

где  $\underline{I}_{y1} = \underline{I}_{g2} - j\underline{I}_{b1}$ , где в свою очередь:  $\underline{I}_{g1} = \underline{U}_1 \frac{g_{\text{Л}}}{2}$ ;  $\underline{I}_{b1} = \underline{U}_1 \frac{b_{\text{Л}}}{2}$ .

Первый из них активный ток, совпадает по фазе с напряжением в начале линии, а вектор емкостного тока опережает  $\underline{U}_{1\phi}$  на  $90^\circ$ .

Падение напряжения в активных сопротивлениях линии  $\underline{I}_{g2} \cdot r_{\text{Л}}$ ;  $\underline{I}_{b2} \cdot r_{\text{Л}}$ ;  $\underline{I}_2 \cdot r_{\text{Л}}$  - называются активными составляющими падения напряжения.

Падение напряжения в реактивных сопротивлениях линии  $\underline{I}_{g2} \cdot x_{\text{Л}}$ ;  $\underline{I}_{b2} \cdot x_{\text{Л}}$ ;  $\underline{I}_2 \cdot x_{\text{Л}}$  - называют реактивными составляющими падения напряжения.

Полное падение напряжения в фазе линии, как следует из векторной диаграммы, равно:

$$\Delta \underline{U}_{12} = \underline{AD} = \underline{U}_{1\phi} - \underline{U}_{2\phi}, \quad (5.1)$$

т.е. геометрической разности векторов напряжений  $\underline{U}_{1\phi}$  и  $\underline{U}_{2\phi}$  в начале и в конце линии.

Работа приёмников электроэнергии зависит только от величины подведённого напряжения и не зависит от его фазы. Расхождение векторов напряжения в начале и конце линии (угол  $d$ ) имеет значение при рассмотрении вопросов устойчивости работы электрических систем. В большинстве случаев для суждения о работе электрических сетей достаточно определить алгебраическую разность напряжений в начале и конце участка сети, то есть потерю напряжения.

Потеря напряжения в линии составит:

$$\Delta U_{12} = U_{1\phi} - U_{2\phi} \quad (5.2)$$



$$U_{1\phi} = \sqrt{(U_{2\phi} + \Delta U_{\phi})^2 + (dU_{\phi})^2} \quad (5.6)$$

При построении векторной диаграммы линии можно откладывать линейное напряжение линии в конце  $\underline{U}_2$ , активные и реактивные составляющие падения напряжения, отнесенные к линейному напряжению  $\sqrt{3} \cdot I_2 \cdot r_{л1}$  и  $\sqrt{3} \cdot I_2 \cdot x_{л1}$  и т.д. В этом случае вектор  $OD$  дает величину линейного напряжения в начале линии:

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U)^2 + (dU)^2}, \quad (5.7)$$

где  $DU$  и  $\delta U$  - продольная и поперечная составляющие падения напряжения, отнесенные к линейному напряжению.

Аналитические методы расчета линии основаны на определении указанных выше величин по формулам (5.4-5.7).

Если имеется сеть, состоящая из нескольких участков с несколькими нагрузками (рис.5.4), то определение потери напряжения производится отдельно по участкам. Каждый участок при этом представляется своей схемой замещения. После этого, следуя от конца сети к ее началу, находят напряжение в точке  $B$ , а затем в точке  $A$ .

Векторная диаграмма сети приведена на рис. 5.5. Ток  $I_{л2}$  равен сумме токов нагрузки в точке  $D$  ( $I_{нд}$ ) и в проводимости  $\frac{Y_{л2}}{2}$  конца участка № 2 ( $I_{y2}$ ):  $I_{л2} = I_{нд} + I_{y2}$

Продольная составляющая падения напряжения  $DU_{л2}$  для участка № 2 совпадает с вектором фазного напряжения  $\underline{U}_d$ , а поперечная  $\delta U_{л2}$  перпендикулярна ему.

Ток линии  $I_{л1}$  определяется как сума токов:

$$I_{л1} = I_{л2} + I_{nb} + I_{y2} + I_{y1},$$

где  $I_{nb}$  – ток нагрузки, приложенной в точке  $B$ ;

$I_{y2}$  – ток проводимости начала линии  $Л-2$ ;

$I_{y1}$  – ток проводимости конца линии  $Л-1$ .

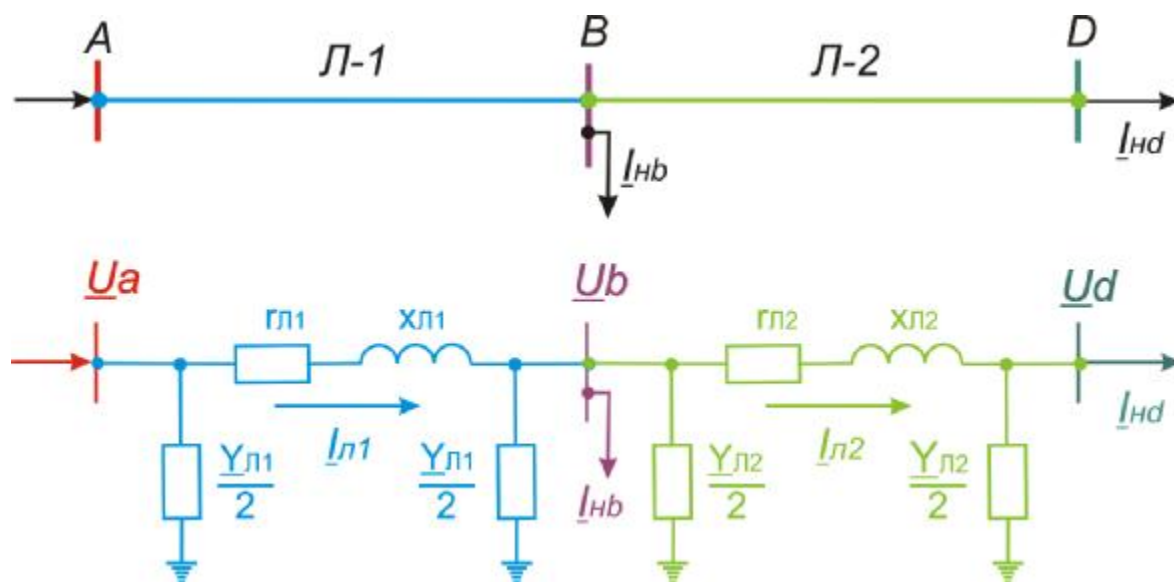


Рис.5.4

Вектор  $\underline{U}_a$  – вектор напряжения в начале линии  $Л-1$ . Продольная составляющая падения напряжения  $DU_{л1}$  совпадает по фазе с вектором напряжения  $\underline{U}_b$  в точке  $B$  рассматриваемой сети, поперечная составляющая  $\delta U_{л1}$  перпендикулярна  $\underline{U}_b$ .

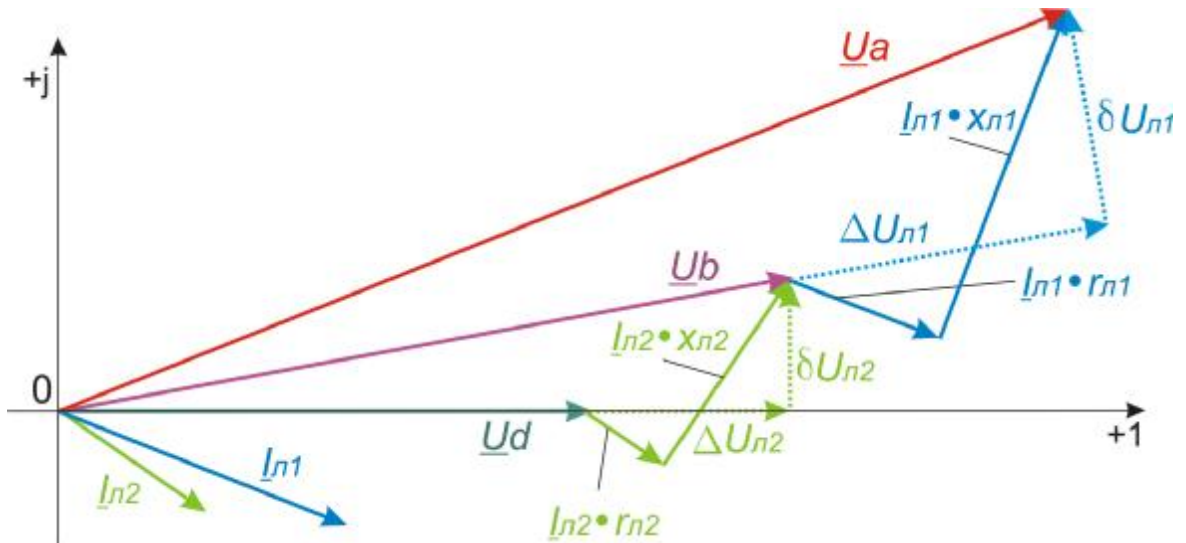


Рис. 5.5 – Векторная диаграмма сети, изображенной на рис. 5.4

### 5.1.2 Расчет линий по мощности нагрузки

Как следует из положений, приведенных в разделе 3 данной методической разработки, потребитель, получающий питание по рассчитываемой сети, может быть задан значением потребляемой им мощности. Для вывода зависимостей и анализа основных соотношений между параметрами линии и параметрами ее режима целесообразно рассмотреть векторную диаграмму токов и напряжений для «идеализированной» линии («линии без потерь»), т.е. для линии, у которой активное сопротивление равно нулю ( $r=0$ ) и проводимости также равны нулю ( $y=0$ ). Векторная диаграмма для такой линии представлена на рис. 5.6.

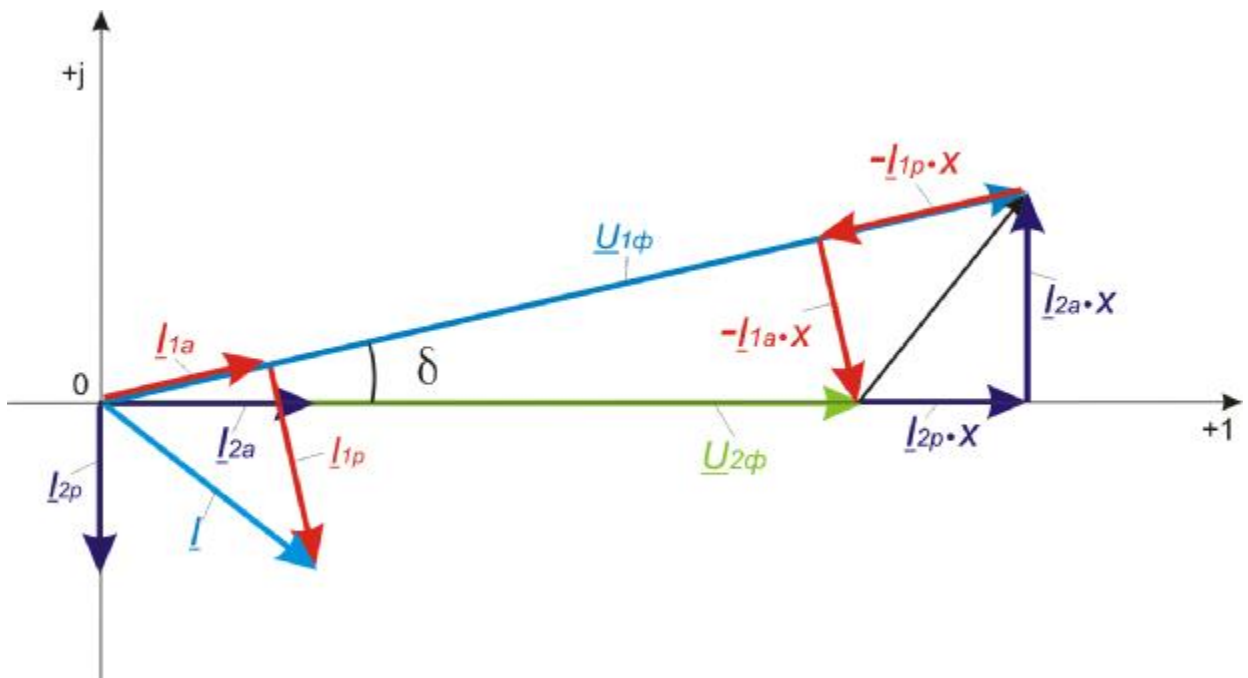


Рис. 5.6 – Векторная диаграмма «линии без потерь»

Произведя простейшие геометрические преобразования, можно записать следующее:

$$I_{2a} \cdot x = U_{1\phi} \cdot \sin d; \quad I_{2a} = \frac{U_{1\phi} \cdot \sin d}{x}$$

$$P_2 = 3 \cdot I_{2a} \cdot U_{2\phi} = \frac{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \sin d \cdot U_{2\phi}}{x} = \frac{U_1 \cdot U_2 \cdot \sin d}{x}$$

$$U_{1\phi} \cdot \cos d = U_{2\phi} + I_{2p} \cdot x$$

$$I_{2p} = \frac{U_{1\phi} \cdot \cos d - U_{2\phi}}{x}$$

$$Q_2 = 3 \cdot U_{2\phi} \cdot I_{2p} \text{ или } Q_2 = \frac{U_2 \cdot U_1 \cdot \cos d}{x} - \frac{U_2^2}{x}$$

Аналогичные выражения можно вывести и для параметров, характеризующих начало линии:

$$P_1 = 3 \cdot I_{1a} \cdot U_{1\phi}, \text{ но } I_{1a} \cdot x = U_{2\phi} \cdot \sin d \Rightarrow I_{1a} = \frac{U_{2\phi} \cdot \sin d}{x}.$$

$$P_1 = \frac{U_1 \cdot U_2 \cdot \sin d}{x};$$

$$U_{2\phi} \cdot \cos d = U_{1\phi} + I_{1p} \cdot x;$$

$$Q_1 = \frac{U_1^2}{x} - \frac{U_2 \cdot U_1 \cos d}{x}.$$

Анализируя полученные выражения, можно сделать ряд выводов, которые определяют характерные особенности работы линии. Так из приведенных выражений следует, что активная мощность начала линии равна активной мощности, протекающей в конце линии ( $P_1 = P_2$ ), что очевидно, т.к. векторная диаграмма и выведенные формулы соответствуют «линии без потерь». Векторные диаграммы позволяют также установить, что при передаче по линии мощности, изменяется не только напряжение, но и мощность. Очевидно, что при условии  $r \neq 0$  равенство ( $P_1 = P_2$ ) соблюдаться не будет. При этом величина активной мощности в начале линии будет больше ее значения в конце на величину потерь мощности в активном сопротивлении линии. Поэтому можно записать:

$$P_1 = P_2 + \Delta P,$$

где  $\Delta P$  – потери активной мощности в сопротивлении линии, расходуемые на нагрев проводников.

Можно говорить и о потере реактивной мощности в линии  $DQ$  при передаче энергии по линии от ее начала к ее концу. Эти потери определяются реактивным сопротивлением линии. Следовательно можно записать:

$$Q_1 = Q_2 + \Delta Q,$$

где  $DQ$  – потери реактивной мощности в индуктивном сопротивлении линии.

Однако следует помнить, что под влиянием зарядной мощности линии реактивная мощность в конце схемы замещения линии  $Q_2$  уменьшается, т.к. имеют место отрицательные потери реактивной мощности из-за емкостного характера проводимости конца линии. Т.е.  $Q_2 < Q_{НАГР}$ . Следовательно, протекающая по линии реактивная мощность  $Q_2$ , меньше, чем реактивная мощность отдаваемая нагрузке  $Q_{НАГР}$ . То же самое происходит и в начале линии  $Q_{ИСТ.} < Q_1$ . Реактивная мощность, получаемая от внешнего источника  $Q_{ИСТ.}$ , оказывается меньше, чем величина реактивной мощности, протекающей по сопротивлению линии  $Q_1$ .

Поэтому ветви емкостной проводимости, определяющие в схеме замещения линии протекание зарядной мощности можно рассматривать как генератор реактивной мощности. В этом смысле принято говорить, что в линии как генерируется реактивная мощность ( $Q_C$ ), так и теряется ( $DQ$ ).

Исходя из сказанного выше, можно заключить, что в схеме замещения линии следует различать полную мощность до сопротивления  $\underline{z}$  и после него. Тогда можно записать:

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_2 + \Delta \underline{S}.$$

Аналогичные выводы можно сделать и для других элементов сети, чьи схемы замещения обладают комплексными сопротивлениями ветвей.

Полученные выражения также показывают, что передача активной мощности через чисто индуктивное сопротивление, а, следовательно, и через комплексное сопротивление возможна лишь при наличии сдвига векторов напряжения в начале передачи  $U_1$  по отношению к вектору



напряжения в конце передачи  $U_2$ . Если при этом реактивная составляющая сопротивления носит индуктивный характер, то мощность передается от точки с «опережающим» напряжением к точке с «отстающим» напряжением, а в случае емкостного характера сопротивления - наоборот, т.е. мощность будет передаваться от точки с «отстающим вектором» к точке с «опережающим вектором» напряжения.

В случаях, когда требуется производить расчеты режимов линии по мощностям, могут иметь место различные сочетания начальных условий (исходных данных). При этом все задачи расчета линии по мощности можно разделить на три основные группы, называемые условно:

- 1) задача №1 – расчет по данным, приведенным к концу линии;
- 2) задача №2 - расчет по данным, приведенным к началу линии;
- 3) задача №3 – расчет при известном напряжении начала и мощности в конце линии.

Задача № 1. (по данным конца).

В такой задаче известными являются величины, отнесенные к точке 2, т.е. к концу линии. Задано:  $U_2$ ;  $S_2 = P_2 + jQ_2$ ; погонные параметры  $r_0$ ;  $x_0$ ;  $g_0$ ;  $b_0$  и длина линии  $l$ . Необходимо определить остальные параметры, а именно: напряжение в начале линии (точка 1)  $U_1$ ; мощность, потребляемую линией от источника  $S_1$ ; угол между векторами напряжения в начале и в конце линии  $\delta$ .

Принимая для линии П-образную схему замещения (рис.5.7), для решения задачи в общем виде, можно записать, что

$$S_2 = P_2 + jQ_2, \text{ а } S'' = S_2 + \Delta S_2, \quad (5.8)$$

где  $S_2$  - нагрузка в конце линии;

$\Delta S_2$  - потери мощности в проводимости  $Y_{л}/2$ , включенной в конце линии.

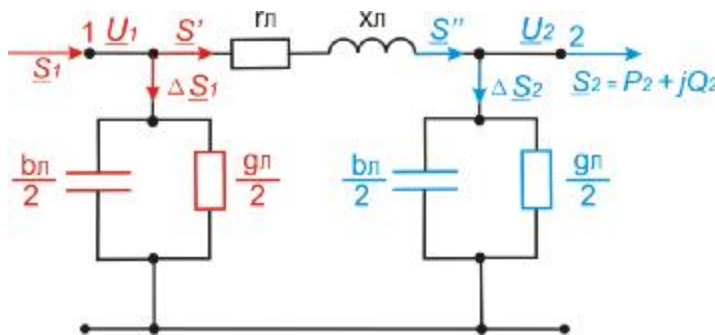


Рис. 5.7 Схема замещения линии для расчетов режима линии по мощности

Потери в проводимости конца линии, в свою очередь, определяются так:

$$\Delta S_2 = \Delta P_2 - j\Delta Q_2; \quad \Delta P_2 = U_2^2 \cdot g_0 \cdot \frac{l}{2}; \quad \Delta Q_2 = U_2^2 \cdot b_0 \cdot \frac{l}{2}. \quad (5.9)$$

По своей сути потери реактивной мощности в емкостной проводимости  $\Delta Q_2$  являются зарядной мощностью половины длины линии  $Q_C/2$ .

Поэтому можно записать:

$$S'' = P_2 + jQ_2 + (\Delta P_2 - j\Delta Q_2) = P_2'' + jQ_2''. \quad (5.10)$$

Мощность в начале линии  $S'$  отличается от мощности в конце линии на величину потерь мощность в линии, обусловленную активным  $r_l$  и реактивным  $x_l$  сопротивлением линии:

$$S' = S'' + \Delta S_1; \quad \Delta P_1 = \frac{(P'')^2 + (Q'')^2}{U_2^2} \cdot r_0 \cdot l; \quad \Delta Q_1 = \frac{(P'')^2 + (Q'')^2}{U_2^2} \cdot x_0 \cdot l; \quad (5.11)$$

$$S' = P' + jQ' + \Delta P_1 + j\Delta Q_1. \quad (5.12)$$

Для определения мощности  $S_1$  необходимо к мощности  $S'$  прибавить мощность, потребляемую в проводимости  $Y_{л}/2$ , включенной в начале линии ( $\Delta S_1$ ). Однако для определения указанной величины необходимо знать напряжение  $U_1$  в начале линии, т.к. под воздействием именно этого напряжения в проводимости начала линии протекает мощность  $\Delta S_1$ . Зависимость между фазными напряжениями точек 1 и 2 выразится уравнением:



$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \Delta \underline{U}_2, \quad (5.13)$$

где  $\Delta U_2$  – падение напряжения в сопротивлении линии  $z_{Л}$  на участке 1-2. Тогда можно записать:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \frac{P'' r_{л} + Q'' x_{л}}{U_2} + j \frac{P'' x_{л} - Q'' r_{л}}{U_2}. \quad (5.14)$$

Модуль вектора напряжения  $\underline{U}_1$  можно определить из треугольника напряжений по формуле (5.7):

$$\begin{aligned} U_1 &= \sqrt{(U_2 + \Delta U_2)^2 + dU_2^2}; \\ \Delta U_2 &= \frac{P'' r_{л} + Q'' x_{л}}{U_2}; \\ dU_2 &= \frac{P'' r_{л} - Q'' x_{л}}{U_2}. \end{aligned} \quad (5.15)$$

Угол между векторами напряжения в начале  $\underline{U}_1$  и в конце  $\underline{U}_2$  линии определяется по формуле:

$$\delta = \arctg \left( \frac{\delta U_2}{U_2 + \Delta U_2} \right). \quad (5.16)$$

Тогда мощность  $\underline{S}_1$  определяется :

$$\underline{S}_1 = \underline{S}' + \Delta \underline{S}_1; \quad \Delta \underline{S}_1 = \Delta P_1 - j \Delta Q_1; \quad (5.17)$$

$$\Delta P_1 = U_1^2 \cdot g_0 \frac{l}{2}; \quad \Delta Q_1 = U_1^2 \cdot b_0 \frac{l}{2}; \quad (5.18)$$

$$\underline{S}_1 = P' + jQ' + \Delta P_1 - j \Delta Q_1. \quad (5.19)$$

Задача № 2. (по данным начала)

В такой задаче известными являются параметры линии  $r_0$ ;  $x_0$ ;  $g_0$ ;  $b_0$ ;  $l$ , а также напряжение  $\underline{U}_1$ ; мощность  $\underline{S}_1 = P_1 + jQ_1$  (т.е. параметры начала линии). Необходимо определить остальные параметры, а именно: напряжение в конце линии (точка 2)  $\underline{U}_2$ ; мощность, потребляемую нагрузкой  $\underline{S}_2$ ; угол между векторами напряжения в начале и в конце линии  $\delta$ .

Схема замещения и обозначения соответствуют рис.5.7.

Мощность в начале линии  $\underline{S}'$  определяется по правилу Кирхгофа, примененному для узла 1, и составит:

$$\underline{S}' = \underline{S}_1 - \Delta \underline{S}_1; \quad \Delta \underline{S}_1 = \Delta P_1 - j \Delta Q_1; \quad (5.20)$$

$$\Delta P_1 = U_1^2 \cdot g_0 \frac{l}{2}; \quad \Delta Q_1 = U_1^2 \cdot b_0 \frac{l}{2}.$$

$$\underline{S}' = P_1 + jQ_1 - (\Delta P_1 - j \Delta Q_1) = P' + jQ'. \quad (5.21)$$

Мощность в начале линии  $\underline{S}'$  отличается от мощности в конце линии на величину потерь мощность в линии, обусловленную активным  $r_{Л}$  и реактивным  $x_{Л}$  сопротивлением линии, поэтому можно записать:

$$\underline{S}'' = \underline{S}' - \Delta \underline{S}_{л} = P' + jQ' - (\Delta P_{л} - j \Delta Q_{л}); \quad (5.22)$$

$$\Delta P_{л} = \frac{(S')^2}{U_1^2} \cdot r_0 \cdot l; \quad \Delta Q_{л} = \frac{(S')^2}{U_1^2} \cdot x_0 \cdot l. \quad (5.23)$$

Напряжение в точке 2 определится как разность между напряжением в точке 1 и падением напряжения в сопротивлениях линии:

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 - \frac{P' r_{Л} + Q' x_{Л}}{U_1} - j \frac{P' x_{Л} - Q' r_{Л}}{U_1}. \quad (5.24)$$

Модуль вектора напряжения  $\underline{U}_2$  можно определить из треугольника напряжений по формуле:

$$U_2 = \sqrt{(U_1 - \Delta U_1)^2 + dU_1^2}; \quad (5.25)$$

$$\Delta U_1 = \frac{P' r_{л} + Q' x_{л}}{U_1}; \quad (5.26)$$

$$dU_1 = \frac{P' x_{л} - Q' r_{л}}{U_1}.$$

Угол между векторами напряжения в начале  $\underline{U}_1$  и в конце  $\underline{U}_2$  линии определяется по формуле:

$$\delta = \arctg \left( \frac{\delta U_1}{U_1 - \Delta U_1} \right). \quad (5.27)$$

По величине напряжения  $\underline{U}_2$  и параметрам проводимости линии  $\underline{Y}_{л}/2$ , отнесенным к точке 2 можно определить величину потерь мощности в проводимости конца линии и мощность, потребляемую нагрузкой:

$$\begin{aligned} \Delta \underline{S}_2 &= \Delta P_2 - j \Delta Q_2; \quad \Delta P_2 = U_2^2 \cdot g_0 \cdot \frac{l}{2}; \quad \Delta Q_2 = U_2^2 \cdot b_0 \cdot \frac{l}{2}; \\ \underline{S}_2 &= \underline{S}'' - \Delta \underline{S}_2 = P_2'' + j Q_2'' - (\Delta P_2 - j \Delta Q_2) = P_2 + j Q_2. \end{aligned} \quad (5.28)$$

Задача № 3.

В такой задаче известными являются параметры линии  $r_0; x_0; g_0; b_0; l$ , а также напряжение  $\underline{U}_1$ ; мощность  $\underline{S}_2 = P_2 + j Q_2$  (т.е. параметры режима приведены для различных точек линии). Необходимо определить: напряжение в конце линии (точка 2)  $\underline{U}_2$ ; мощность, потребляемую линией от источника  $\underline{S}_1$ ; угол между векторами напряжения в начале и в конце линии  $\delta$ .

В данном случае расчеты не могут быть проведены «впрямую», поэтому необходимо применять специальные методики, одной из которых является метод последовательных приближений.

Каждое приближение состоит из двух этапов. На первом этапе задаются определенными параметрами (например, напряжением) и производят расчеты линии по мощности, следуя из конца сети в начало. На втором этапе следуют из начала сети в ее конец, т.е. к потребителю, рассчитывая напряжения во всех точках сети.

Так в качестве первого этапа принимается условие, согласно которому напряжение во всех узловых точках равны номинальному значению  $U_{НОМ}$ . При этом условии находится распределение мощностей в сети. Зарядные мощности и потери мощности в сопротивлениях линии определяется по номинальному напряжению  $U_{НОМ}$ .

$$\Delta Q_2 = \Delta Q_1 = U_{НОМ}^2 \cdot b_0 \cdot \frac{l}{2}; \quad \Delta P_2 = \Delta P_1 = U_{НОМ}^2 \cdot g_0 \cdot \frac{l}{2}. \quad (5.29)$$

$$\Delta P_{л} = \frac{(P'')^2 + (Q'')^2}{U_{НОМ}^2} r_{л}; \quad \Delta Q_{л} = \frac{(P'')^2 + (Q'')^2}{U_{НОМ}^2} x_{л}. \quad (5.30)$$

В результате расчетов на первом этапе находят мощность в начале линии  $\underline{S}'$  и мощность, потребляемую от источника  $\underline{S}_1$ .

На втором этапе расчетов определяются напряжения в узлах схемы. Исходными служат найденные на первом этапе мощности  $\underline{S}', \underline{S}_1$  и заданное в условиях задачи напряжение  $\underline{U}_1$ .

$$U_2 = \sqrt{(U_1 - \Delta U_1)^2 + dU_1^2};$$

$$\Delta U_1 = \frac{P' r_{л} + Q' x_{л}}{U_1};$$

$$dU_1 = \frac{P' x_{л} - Q' r_{л}}{U_1}.$$

Угол между векторами напряжения в начале  $\underline{U}_1$  и в конце  $\underline{U}_2$  линии определяется по формуле:

$$\delta = \arctg \left( \frac{\delta U_1}{U_1 - \Delta U_1} \right).$$

По сути на первом этапе расчетов решается задача №1 (по данным конца) в отношении мощностей, а на втором - задача №2 (по данным начала) в отношении напряжений.

Для расчетов, выполняемых «вручную» оказывается вполне достаточно одного приближения, т.е. довольствуются результатами расчетов двух этапов. В случае использования указанного алгоритма в программных продуктах таких приближений может быть довольно много. Их количество определяется несколькими факторами, в том числе и сходимостью процесса итерации.

Для проведения расчетов задачи №3 при большой разветвленности сети в схему целесообразно вместо действительных нагрузок вводить расчетные нагрузки подстанций. Для пояснения данного понятия на рис. 5.8 представлена схема сети из трех линий и трех подстанций. Для такой сети, схема замещения которой представлена на рис.5.9,а, проводить расчет режимов оказывается достаточно сложной задачей. Поэтому для упрощения расчетов вводят понятие расчетной нагрузки подстанции.

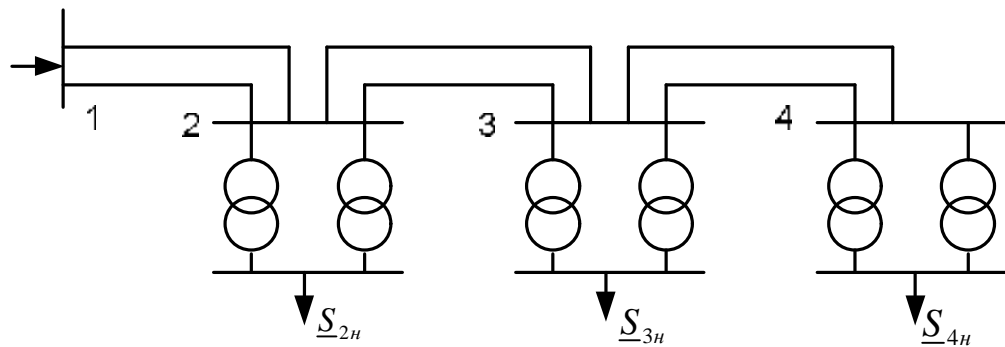
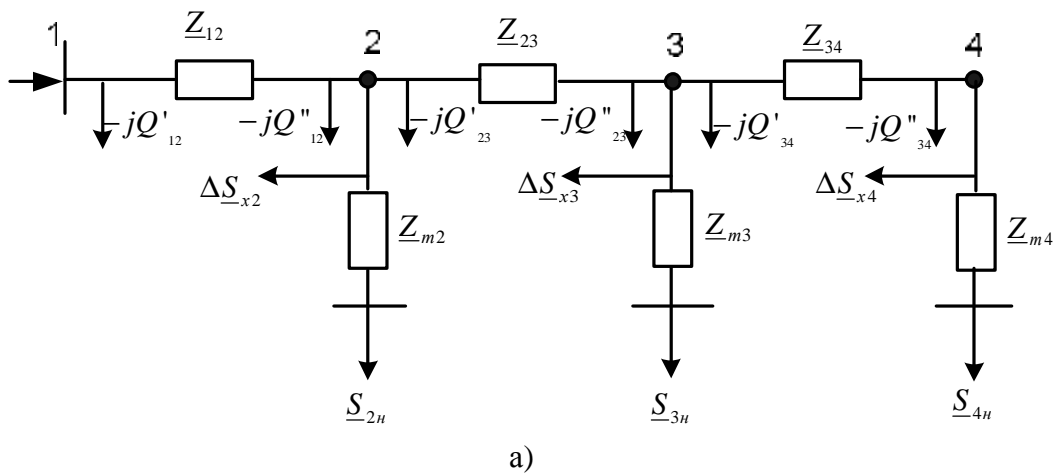
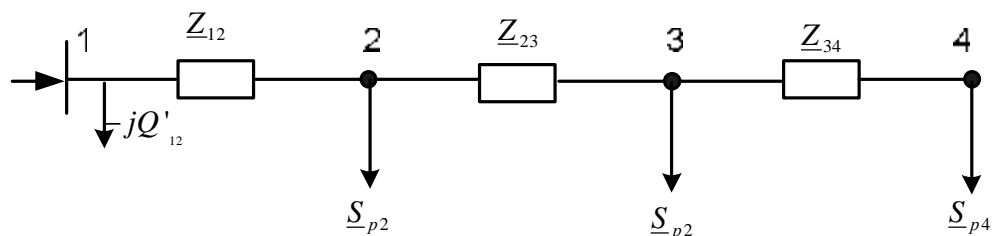


Рис. 5.8 Расчетная схема сети для иллюстрации понятия «расчетная нагрузка подстанции»



а)



б)

Рис. 5.9 Схемы замещения сети а) исходная;  
б) с использованием понятия «расчетная нагрузка подстанции»

Расчетная нагрузка для подстанции №2 определяется по формуле:

$$\underline{S}_{p2} = \underline{S}_{2H} + \Delta \underline{S}_{T2} + \Delta \underline{S}_{x2} - jQ'_{23} - jQ''_{12},$$

где  $\underline{S}_{2H}$  - мощность нагрузки подстанции №2;

$\Delta \underline{S}_{T2}$  - потери в обмотках трансформаторов подстанции №2;

$\Delta \underline{S}_{x2}$  - потери холостого хода трансформаторов подстанции №2;

$jQ'_{23}$  - реактивная мощность, генерируемая емкостными проводимостями, отнесенными к началу линии 2-3;

$jQ''_{12}$  - реактивная мощность, генерируемая емкостными проводимостями, отнесенными к концу линии 1-2.

Аналогичным образом можно записать формулы для определения расчетных нагрузок для подстанций №3 и №4.

$$\underline{S}_{p3} = \underline{S}_{3H} + \Delta \underline{S}_{T3} + \Delta \underline{S}_{x3} - jQ'_{34} - jQ''_{23},$$

$$\underline{S}_{p4} = \underline{S}_{4H} + \Delta \underline{S}_{T4} + \Delta \underline{S}_{x4} - jQ''_{34}.$$

Таким образом, расчетная нагрузка подстанции включает помимо мощности нагрузки, потери в стали и обмотках трансформаторов подстанции, реактивную мощность, генерируемую половиной емкости линий, соединенной с данной подстанцией.

Использование расчетных нагрузок существенно упрощает расчет, но введение расчетной нагрузки приводит к определенной погрешности в расчетах. Это связано с тем, что при определении потерь мощности в элементах сети  $\Delta \underline{S}$  и величины  $Q_C$  линий используется номинальное напряжение  $U_{НОМ}$ , вместо неизвестных напряжений в узловых точках. Однако эта погрешность находится в диапазоне допустимых значений для ручного расчета.

Существуют задачи расчета режима сети, в которых необходим более строгий учет нелинейности характеристик элементов электрической сети. Одним из таких элементов может являться нагрузка, задаваемая с помощью статических характеристик.

Разберем такой случай на примере схемы, изображенной на рис. 5.10:

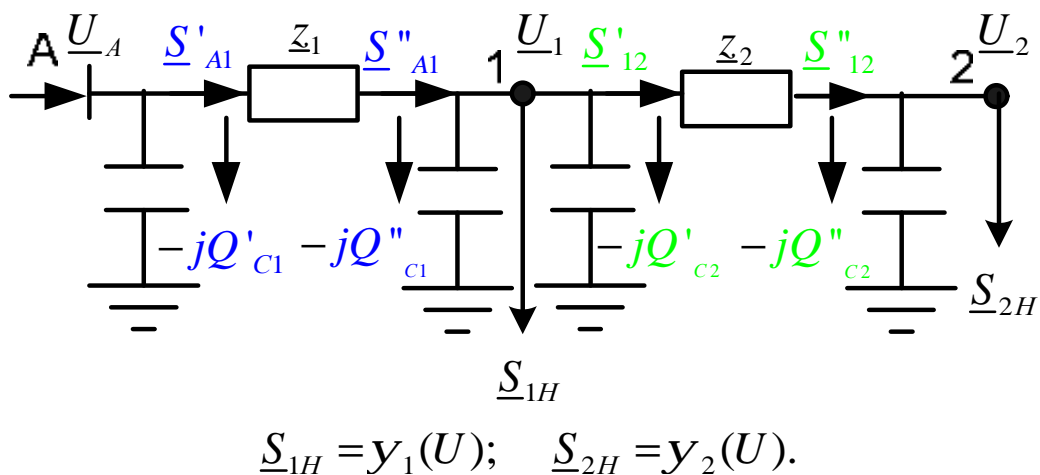


Рис. 5.10

Известными являются параметры линий, а также напряжение  $\underline{U}_A$ . Нагрузки заданы мощностями с помощью статических характеристик:

$$\underline{S}_{1H} = y_1(U) \text{ и } \underline{S}_{2H} = y_2(U).$$

Необходимо определить  $\underline{S}_A$ , а также напряжения  $\underline{U}_1$  и  $\underline{U}_2$ .

В данном случае, как и в задаче №3 расчеты не могут быть проведены «впрямую», поэтому необходимо применять специальные методики, например, метод последовательных приближений. Однако при использовании метода последовательных приближений, расчеты окажутся громоздкими, то есть потребуются большое число итераций, а возможно, решение не будет найдено вообще. Данное обстоятельство объясняется необходимостью учета изменения мощностей

при изменении напряжения на зажимах потребителей. При ручном счете более целесообразно решать задачу методом систематизированного подбора, суть которого заключается в следующем:

1. Задаются произвольно значением напряжения в точке 2  $\underline{U}_{2(1)}$ .

2. По статической характеристике  $\underline{S}_{2H} = \underline{y}_2(U)$  определяют мощность нагрузки:

$$\underline{S}_{2H(1)} = P_{2H(1)} + jQ_{2H(1)}.$$

Далее расчет ведут по алгоритму задачи №1, т.е. следуют из конца сети в начало.

3. По напряжению  $\underline{U}_{2(1)}$  определяют мощность, обусловленную половиной емкостной проводимости линии 2, отнесенной к ее концу:

$$Q''_{c2(1)} = U_{2(1)}^2 \frac{b_{02} \cdot l_2}{2}.$$

4. По этим данным определяют мощность в конце участка 1-2.

$$\underline{S}''_{12(1)} = \underline{S}''_{H2(1)} + (-jQ''_{c2(1)}) = P_{H2(1)} + j(Q_{H2(1)} - Q''_{c2(1)}) = P''_{12(1)} + jQ''_{12(1)}.$$

5. Тогда напряжение в точке 1  $\underline{U}_{1(1)}$  определится по формуле:

$$\underline{U}_{1(1)} = \underline{U}_{2(1)} + \frac{P''_{12(1)} \cdot r_2 + Q''_{12(1)} \cdot x_2}{U_{2(1)}} + j \frac{P''_{12(1)} \cdot x_2 - Q''_{12(1)} \cdot r_2}{U_{2(1)}},$$

$$U_{1(1)} = \sqrt{\left( U_{2(1)} + \frac{P''_{12(1)} \cdot r_2 + Q''_{12(1)} \cdot x_2}{U_{2(1)}} \right)^2 + \left( \frac{P''_{12(1)} \cdot x_2 - Q''_{12(1)} \cdot r_2}{U_{2(1)}} \right)^2}.$$

6. Потери мощности на участке 1-2 и мощность в начале линии 2 определяются по выражениям:

$$\Delta \underline{S}_{2(1)} = \frac{(P''_{12(1)})^2 + (Q''_{12(1)})^2}{U_{2(1)}^2} (r_2 + jx_2) = \Delta P_{2(1)} + j\Delta Q_{2(1)},$$

$$\underline{S}'_{12(1)} = \underline{S}''_{12(1)} + \Delta \underline{S}_{2(1)} = (P''_{12(1)} + \Delta P_{2(1)}) + j(Q''_{12(1)} + \Delta Q_{2(1)}) = P'_{12(1)} + jQ'_{12(1)}.$$

7. Зарядные мощности начала участка 1-2 и конца участка А-1 обусловлены напряжением  $\underline{U}_{1(1)}$ . Поэтому их величины составят:

$$Q''_{c1(1)} = U_{1(1)}^2 \frac{b_{01} \cdot l_1}{2}; \quad Q'_{c2(1)} = U_{1(1)}^2 \frac{b_{02} \cdot l_2}{2}.$$

8. По статической характеристике  $\underline{S}_{1H} = \underline{y}_1(U)$  определяют мощность нагрузки:

$$\underline{S}_{1H(1)} = P_{1H(1)} + jQ_{1H(1)}.$$

Тогда:

$$\underline{S}''_{A(1)} = \underline{S}'_{12(1)} + \underline{S}_{1H(1)} - j(Q'_{c2(1)} + Q''_{c1(1)}) = P''_{A(1)} + jQ''_{A(1)}.$$

9. Аналогичные расчеты проводят для участка А-1.

$$\Delta \underline{S}_{1(1)} = \frac{(P''_{A(1)})^2 + (Q''_{A(1)})^2}{U_{1(1)}^2} (r_1 + jx_1) = \Delta P_{1(1)} + j\Delta Q_{1(1)},$$

$$\underline{S}'_{A(1)} = \underline{S}''_{A(1)} + \Delta \underline{S}_{1(1)} = (P''_{A(1)} + \Delta P_{1(1)}) + j(Q''_{A(1)} + \Delta Q_{1(1)}) = P'_{A(1)} + jQ'_{A(1)},$$

$$\underline{U}_{A(1)} = \underline{U}_{1(1)} + \frac{P''_{A(1)} \cdot r_1 + Q''_{A(1)} \cdot x_1}{U_{1(1)}} + j \frac{P''_{A(1)} \cdot x_1 - Q''_{A(1)} \cdot r_1}{U_{1(1)}},$$

$$U_{A(1)} = \sqrt{\left( U_{1(1)} + \frac{P''_{A(1)} \cdot r_1 + Q''_{A(1)} \cdot x_1}{U_{1(1)}} \right)^2 + \left( \frac{P''_{A(1)} \cdot x_1 - Q''_{A(1)} \cdot r_1}{U_{1(1)}} \right)^2}.$$

10. В итоге определяют величину напряжения в точке А ( $\underline{U}_{A(1)}$ ). Как правило,  $\underline{U}_{A(1)} \neq \underline{U}_A$ . Поэтому расчеты проводят вновь для нового значения  $\underline{U}_{2(2)}$ .

Обычно достаточно задаться тремя значениями напряжения для построения зависимостей  $U_A = x_1(U_2)$  и  $U_1 = x_2(U_2)$  (рис. 5.11). Точность результатов расчета таким методом определяется количеством полученных в ходе расчетов точек.

По найденным значениям напряжений  $U_{2иск}$  и  $U_{1иск}$  проводят расчеты вновь, то есть определяют потоки мощности и потери мощности на участках сети.

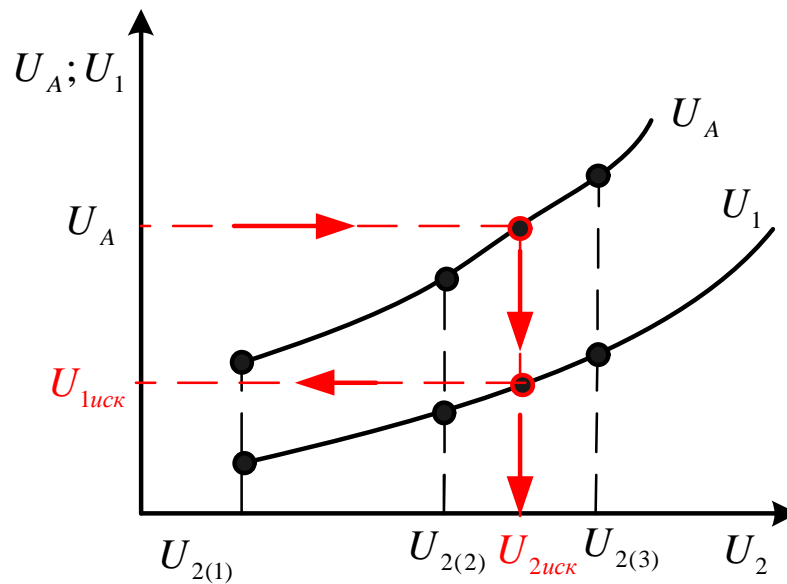


Рис. 5.11

### 5.1.3 Частные случаи расчетов режима линии и некоторые характерные режимы

При решении рассматриваемых задач следует помнить о некоторых особенностях расчетов линий в частных случаях. Правильная оценка ситуации позволяет значительно упростить расчеты без увеличения погрешностей в результатах. Наиболее распространенными частными случаями являются задачи расчета режима линии при характерных соотношениях ее параметров. Для иллюстрации целесообразно рассмотреть соотношения между падением и потерей напряжения для линий с характерным соотношением активного и реактивного сопротивления. С этой целью ниже приведены две векторные диаграммы. Первая построена для линии, в которой активное сопротивление  $r$  имеет величину, сопоставимую с величиной индуктивного сопротивления  $x$  (рис. 5.12). Т.е. по-сути принято условие  $r=x$ . Вторая векторная диаграмма (рис. 5.13) построена из условия большого отличия значений  $r$  и  $x$ , причем  $r \ll x$ .

Для первой векторной диаграммы (рис. 5.12) характерно то, что вектор падения напряжения имеет малую поперечную составляющую  $\delta U$ . В этих условиях сдвиг векторов по концам передачи мал.

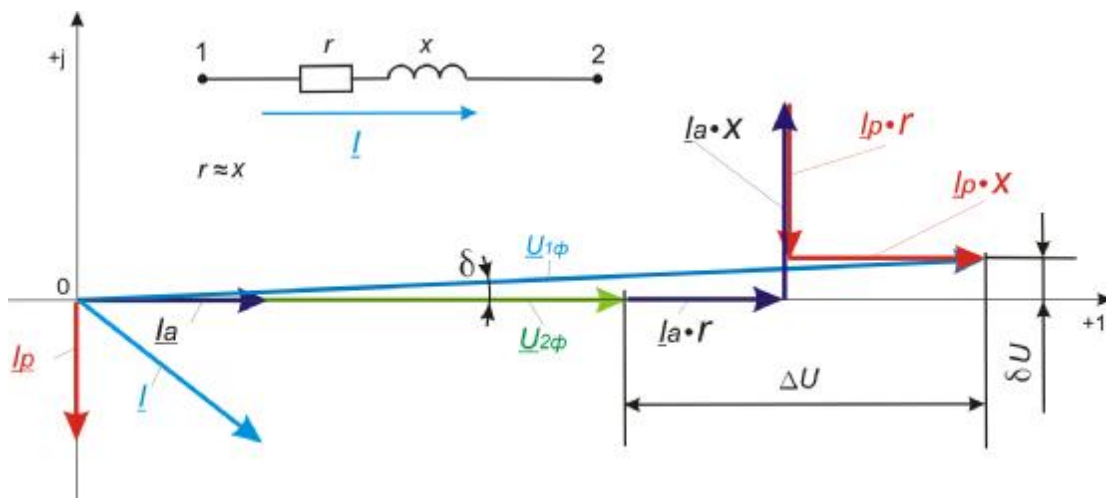


Рис. 5.12 Векторная диаграмма линии при равенстве активного и реактивного сопротивлений



Для второго случая (рис. 5.13) видно, что падение напряжения в линии имеет сопоставимые по величине продольную и поперечную составляющие, поэтому различия по фазе  $U_1$  и  $U_2$  оказываются существенными.

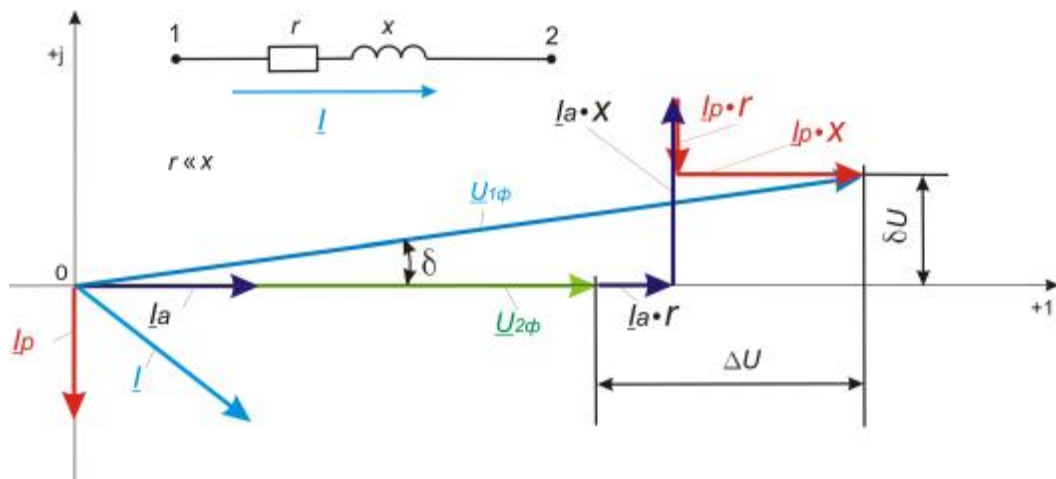


Рис. 5.13 Векторная диаграмма линии при условии  $r \ll x$

Определение напряжений по формулам:

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U)^2 + dU^2}; \quad U_2 = \sqrt{(U_1 - \Delta U)^2 + dU^2}$$

может потребовать выполнения значительных счетных работ. Поэтому в инженерных расчетах пользуются приближенными методами, позволяющими найти  $U_1$  и  $U_2$  с наименьшей затратой времени и обеспечивающих достаточную точность расчетов.

При разложении формул в ряд Тейлора можно записать:

$$U_1 = (U_2 + \Delta U) \cdot \sqrt{1 + \frac{dU^2}{(U_2 + \Delta U)^2}}; \quad \sqrt{1 + a} = 1 + \frac{a}{2} + \dots$$

$$U_1 = U_2 + \Delta U \cdot \left( 1 + \frac{dU^2}{2(U_2 + \Delta U)^2} \right) = U_2 + \Delta U + \frac{1}{2} \frac{dU^2}{(U_2 + \Delta U)}.$$

Полученное выражение дает высокую степень точности и может применяться при всех инженерных расчетах. Однако эта формула довольно громоздка. Продольные составляющие  $dU$  в большинстве случаев оказываются малы по сравнению с напряжением  $U$  ( $dU \gg 0,05, 0,1U$ ), поэтому можно пренебречь влиянием  $dU$  в третьем члене, тогда:

$$U_1 = U_2 + \Delta U + \frac{1}{2} \frac{dU^2}{U_2}.$$

Учитывая, что для большинства инженерных расчетов допустимая погрешность составляет 5%, можно предположить, что при расчетах сетей с соотношением  $r \gg x$  допустимо отказаться от учета поперечной составляющей падения напряжения  $\delta U$ . И действительно, для сетей  $U_{НОМ}$  до 220 кВ расчет напряжения можно производить по формуле:

$$U_1 = U_2 + \Delta U.$$

Падение и потеря напряжения в линии с соотношением сопротивлений  $r \ll x$ , характерным для линий 220 кВ и выше, заметно отличаются друг от друга, поэтому при определении модуля вектора напряжения  $U_1$  необходимо воспользоваться уравнением:

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U)^2 + dU^2}.$$

В ходе расчетов режимов линий могут возникать ситуации, сопряженные с необходимостью проведения анализа параметров при изменении начальных данных. Такие задачи должны решаться как на стадиях проектирования, так и в процессе эксплуатации существующих линий. Поэтому важно рассмотреть некоторые наиболее характерные режимы, описывающие общие

закономерности и позволяющие проводить анализ режимов без проведения детальных расчетов. Для анализа режимов принимают П-образную схему замещения линии (рис.5.14).

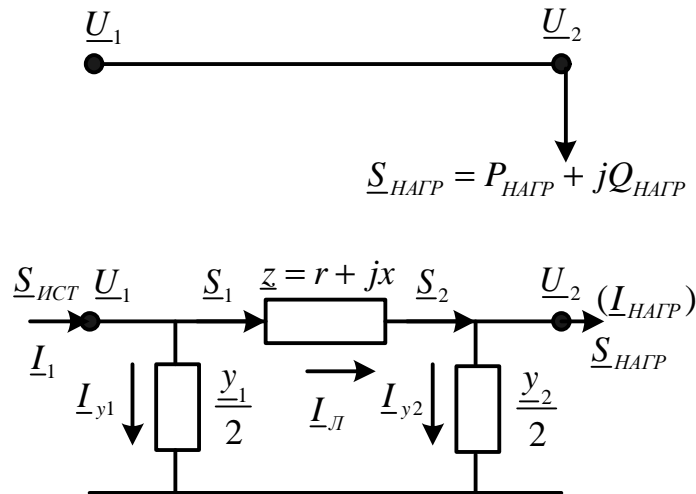


Рис. 5.14

Поскольку для большинства линий потери мощности на корону и утечки через изоляцию малы, то активная проводимость в схеме замещения линии  $g$  существенно меньше реактивной проводимости  $b$ , поэтому в расчетах  $g$  можно не учитывать. Следовательно, можно считать, что  $y = -jb$ .

Режим холостого хода линии.

Под режимом холостого хода линии понимают такой режим, при котором вся нагрузка линии отключена, т.е.  $S_{НАГР} = 0$  ( $I_{НАГР} = 0$ ).

Для рассматриваемого режима векторная диаграмма приведена на рис. 5.15. При этом вектор фазного напряжения конца линии  $U_{2\phi}$  построен из предположения, что он совпадает с положительным направлением оси действительных чисел. Нагрузочный ток, согласно исходных данных, отсутствует  $I_{НАГР} = 0$ , но по сопротивлениям линии будет протекать ток, обусловленный реактивной проводимостью конца линии, которая имеет емкостный характер. Его величина определяется:

$$\underline{I}_L = \underline{I}_{НАГР} + \underline{I}_{y2}; \quad \underline{I}_L = \underline{I}_{y2} = U_{2\phi} \cdot \frac{b_0 l}{2}.$$

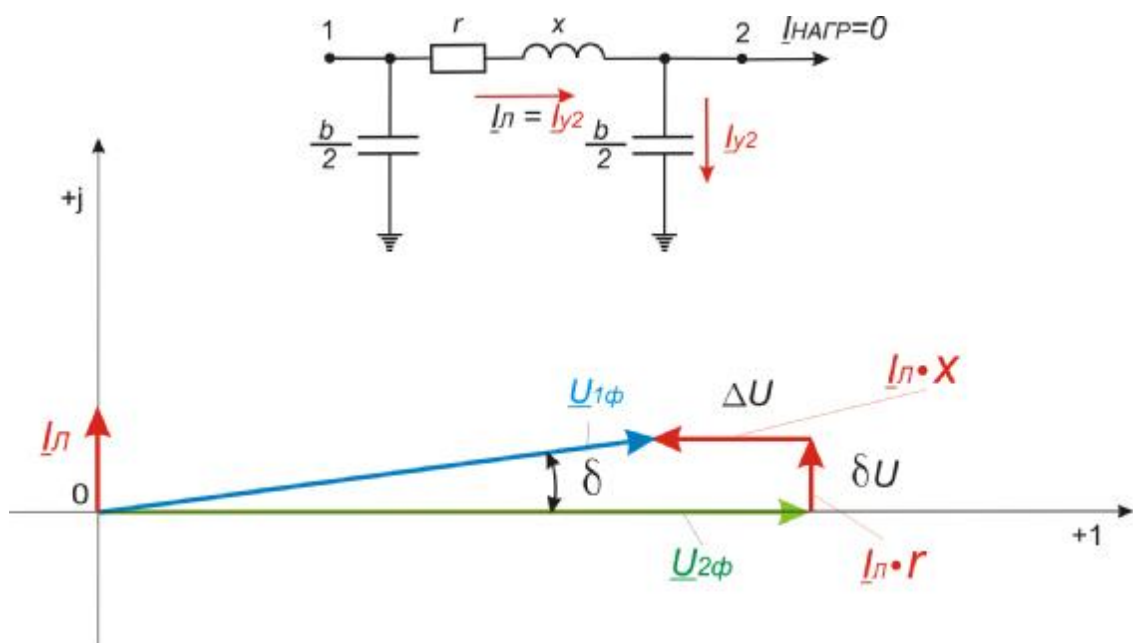


Рис. 5.15 Векторная диаграмма линии, работающей в режиме холостого хода



Рассмотрению подлежат три случая:

1. Мощность нагрузки носит чисто активный характер, т.е.  $\cos j = 1$  и  $\underline{S}_2 = P_2 = P_{\text{НАГР}}$ .
2. Мощность нагрузки носит активно-емкостный характер  $\underline{S}_2' = P_2 - jQ_2'$  (активно-емкостный ток  $\underline{I}_l' = I_a + jI_p$ ).
3. Мощность нагрузки носит активно-индуктивный характер  $\underline{S}_2'' = P_2 + jQ_2''$  (активно-индуктивный ток  $\underline{I}_l'' = I_a - jI_p$ )

Из векторной диаграммы следует, что при фиксированном значении напряжения в конце линии  $U_2$  конец вектора напряжения в начале линии  $U_1$  будет располагаться на прямой  $AB$  (рис. 5.16). Данное обстоятельство позволяет утверждать, что потребление реактивной мощности нагрузкой (активно-индуктивный характер нагрузки) увеличивает потерю и падение напряжения по сравнению с чисто активной нагрузкой. Генерация реактивной мощности при активно-емкостном характере нагрузки уменьшает различие в модулях векторов напряжений в начале  $U_1$  и в конце  $U_2$  линии. Следовательно, меняя величину и знак реактивной мощности нагрузки при неизменном напряжении  $U_2$ , получаем различные значения  $U_1$ . Поэтому справедливо и другое - при неизменном напряжении в начале линии  $U_1$ , изменением  $Q_{\text{НАГР}}$  можно изменять напряжение в конце линии  $U_2$ . Это свойство может использоваться для поддержания напряжения в конце линии в нужных пределах.

Режим изменяющейся мощности нагрузки при постоянном значении коэффициента мощности.

Довольно часто встречаются ситуации, в которых нагрузка изменяет свое значение в широком диапазоне, при этом значение  $\cos j$  остается практически неизменным из-за работы синхронных компенсаторов или использования специальных автоматических устройств компенсации реактивной мощности в узле нагрузки.

Для схемы на рис. 5.14 величина  $\underline{S}_{\text{НАГР}} = P_{\text{НАГР}} + jQ_{\text{НАГР}}$  будет изменяться, а значение  $\cos j = \text{const}$ . Векторная диаграмма линии представлена на рис. 5.17. Построение произведено для двух значений мощности нагрузки. Причем  $S'_{\text{НАГР}} < S''_{\text{НАГР}}$ . Значению  $\underline{S}'_{\text{НАГР}}$  соответствует ток в линии  $\underline{I}'_l$ , а нагрузке  $\underline{S}''_{\text{НАГР}}$ , соответствует  $\underline{I}''_l$ .

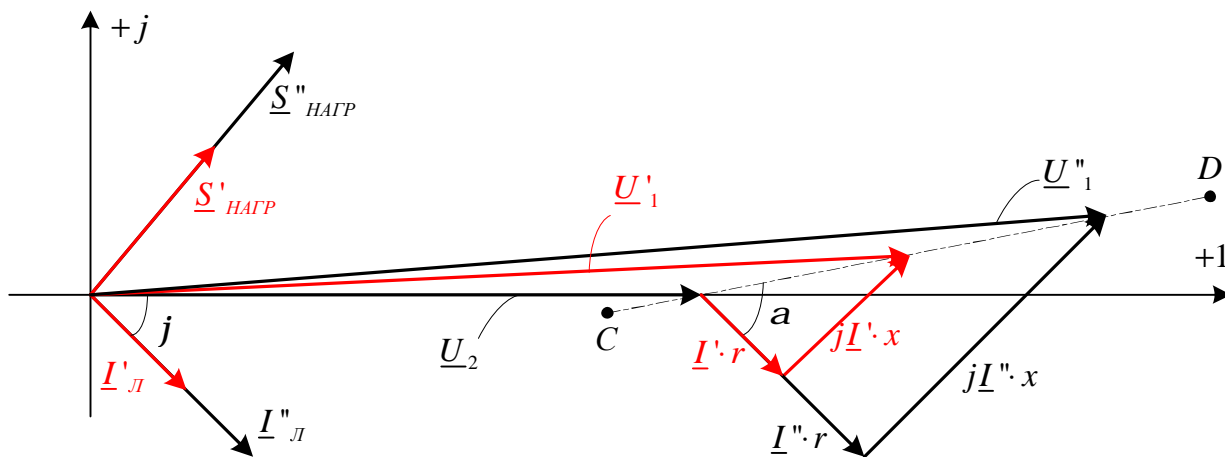


Рис.5.17 Векторная диаграмма линии при изменяющейся нагрузке с  $\cos j = \text{const}$

Из векторной диаграммы (рис. 5.17) следует, что с изменением величины мощности, потребляемой нагрузкой, изменяются значения падения и потери напряжения в линии. Причем, при фиксированном значении вектора напряжения в конце линии  $U_2$  положение конца вектора  $U_1$  определяется прямой  $CD$ . Как следует из векторной диаграммы, точки, принадлежащие прямой  $CD$ , имеют положение, определяемое углом  $\alpha$ , который называется углом полного сопротивления линии. Его величина определяется соотношением реактивного и активного сопротивлений линии по выражению:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{x}{r}$$

### 5.1.4 Особенности расчетов сетей с несколькими номинальными напряжениями

Работа электроэнергетических систем связана с одновременной эксплуатацией сетей нескольких номинальных напряжений, при этом связь между такими сетями осуществляется с помощью трансформаторов и автотрансформаторов. Очевидно, что по элементам сетей различных напряжений при одинаковых передаваемых мощностях будут протекать токи, имеющие различающиеся значения, а в узловых точках сетей будут различающиеся напряжения. Эти различия обусловлены трансформацией мощности. Поэтому при расчетах таких схем необходимо руководствоваться принципами эквивалентности мощности при ее трансформации, которые заключаются в том, что при передаче мощности через идеализированный трансформатор происходит преобразование параметров мощности, таких как ток и напряжение в соответствии с коэффициентом трансформации, без изменения значения самой мощности.

Совместный расчет сетей с разными номинальными напряжениями можно проводить двумя способами: с приведением и без приведения параметров сети к одному «базовому» напряжению  $U_б$ .

Приведенные значения сопротивлений  $\underline{Z}'$  и проводимостей  $\underline{Y}'$  определяются так:

$$\underline{Z}' = \underline{Z}_i \cdot \left( \frac{U_\delta}{U_{НОМ i}} \right)^2; \quad \underline{Y}' = \underline{Y}_i \cdot \left( \frac{U_{НОМ i}}{U_\delta} \right)^2,$$

где  $U_б$  – базовое напряжение;

$U_{НОМ i}$  – номинальное напряжение обмотки трансформатора, к которому приведены значения сопротивлений  $\underline{Z}_i$  и проводимостей  $\underline{Y}_i$ .

За базовое напряжение можно принять любое значение, в том числе и значение, отличающееся от номинальных напряжений сетей. Однако в таком случае приходится производить пересчет параметров всех элементов схемы. Как правило, для уменьшения количества расчетных операций, за базовое напряжение принимается ступень номинального напряжения той части схемы, которая имеет большее количество элементов (является более развитой). Поэтому практически пересчет сопротивлений и проводимостей производится через квадрат коэффициента трансформации того трансформатора или автотрансформатора, который связывает между собой соответствующие сети различных номинальных напряжений, т.е. через квадрат отношения номинальных напряжений обмоток трансформатора или автотрансформатора.

Приведенная таким образом схема сети рассматривается как схема одного номинального напряжения, и все расчеты для нее производятся по алгоритму, описанному выше. Однако для получения окончательных результатов, полученные в ходе расчетов параметры режима необходимо привести к соответствующим ступеням напряжения, т.е. пересчитать их через принятые ранее коэффициенты пересчета. При этом действительные напряжения и токи  $\underline{U}_i$  и  $\underline{I}_i$  определяются по формулам:

$$\underline{U}_i = \underline{U}' \cdot \left( \frac{U_{НОМ i}}{U_\delta} \right); \quad \underline{I}_i = \underline{I}' \cdot \left( \frac{U_\delta}{U_{НОМ i}} \right),$$

где  $U_б$  – базовое напряжение, к которому приведены значения  $\underline{U}'$  и  $\underline{I}'$ ;

$U_{НОМ i}$  – номинальное напряжение обмотки трансформатора, к которому приводятся искомые параметры.

Второй способ расчета, выполняемый без приведения сети к одному напряжению, рассмотрен на примере решения задачи 1.

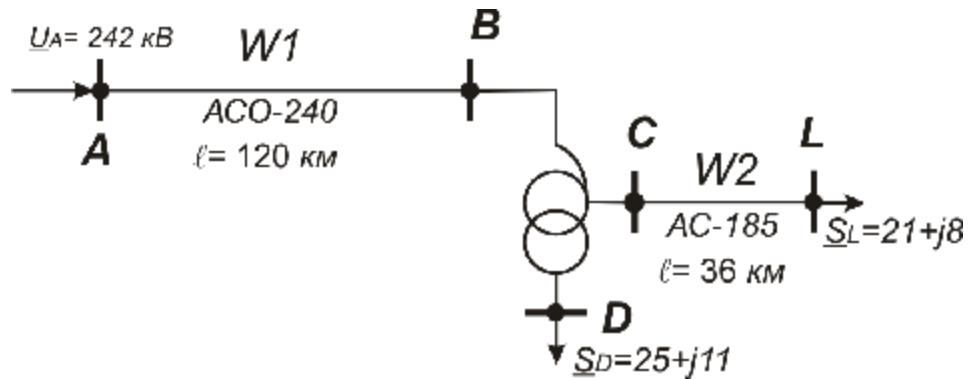
#### Примеры решения задач

##### Задача 1.

Электрическая сеть состоит из линий электропередачи 220 и 110 кВ и подстанции, на которой установлен автотрансформатор АТДЦТН-63000/220.

Определить мощность, поступающую в сеть, и напряжение в узлах. Воздушная линия W1 номинальным напряжением 220 кВ выполнена проводом АСО-240, W2 (110 кВ) - проводом

АС-185. Длины линий в километрах и мощности нагрузок в МВ·А указаны на рисунке. Напряжение источника  $U_A = 242$  кВ.



Решение:

1. Определение параметров схемы замещения.

Схема замещения сети и ее параметры определяются в соответствии с алгоритмами, приведенными выше.

Линия W1. Из [ 2 ] для АСО-240 ВЛ 220 кВ погонные параметры равны:  $r_0 = 0,121$  Ом/км,  $x_0 = 0,42$  Ом/км,  $b_0 = 2,7 \cdot 10^{-6}$  См/км.

Параметры схемы замещения W1:

$$r_{AB} = 0,121 \cdot 120 = 14,52 \text{ Ом},$$

$$x_{AB} = 0,42 \cdot 120 = 50,4 \text{ Ом},$$

$$b_{AB} = 2,7 \cdot 10^{-6} \cdot 120 = 324 \cdot 10^{-6} \text{ См}.$$

Линия W2. Для провода АС-185 при номинальном напряжении 110 кВ погонные параметры равны:  $r_0 = 0,157$  Ом/км,  $x_0 = 0,4$  Ом/км,  $b_0 = 2,84 \cdot 10^{-6}$  См/км.

Параметры схемы замещения W2 будут равны:

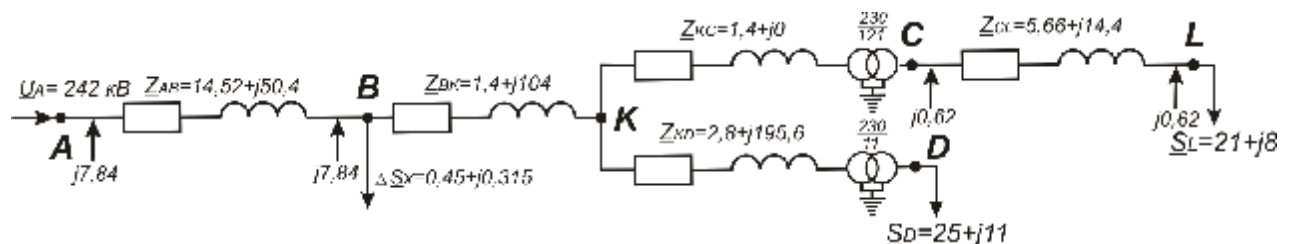
$$r_{CL} = 5,67 \text{ Ом}, \quad x_{CL} = 14,4 \text{ Ом}, \quad b_{CL} = 102,2 \cdot 10^{-6} \text{ См}.$$

Автотрансформатор. Параметры схемы замещения автотрансформатора определяются из [2]:

$$r_{BK} = r_b = 1,4 \text{ Ом}, \quad r_{KC} = r_c = 1,4 \text{ Ом}, \quad r_{KD} = r_n = 2,8 \text{ Ом},$$

$$x_{BK} = x_b = 104 \text{ Ом}, \quad x_{KC} = x_c = 0 \text{ Ом}, \quad x_{KD} = x_n = 195,6 \text{ Ом},$$

$$DP_x = 45 \text{ кВт}, \quad DQ_x = 315 \text{ квар}.$$



2. Определение потокораспределения в сети.

На первом этапе расчета определяются потери мощности в каждой ветви схемы замещения по номинальному напряжению этой ветви. Следует отметить, что все параметры схемы замещения автотрансформатора приведены к  $U_{НОМ} = 220$  кВ. Все мощности при решении задачи выражены в МВт, Мвар и МВ·А, а напряжения и падения напряжения - в кВ.

Мощность, потребляемая с шин 10 кВ (точка D):  $\underline{S}_D = 25 + j11$ .

Потери мощности в обмотке низшего напряжения автотрансформатора:

$$DS_{KD} = \frac{25^2 + 11^2}{220^2} (2,8 + j195,6) = 0,04 + j3,01.$$

Мощность, поступающая в обмотку низшего напряжения (мощность начала звена KD):

$$\underline{S}_{KD}^H = 25 + j11 + 0,04 + j3,01 = 25,04 + j14,01.$$



Зарядная мощность линии W2:

$$jQ_{CL} = j110^2 \cdot 102,2 \cdot 10^{-6} = j1,24.$$

Мощность конца звена линии W2:

$$\underline{S}_{CL}^k = 21 + j \left( 8 - \frac{1,24}{2} \right) = 21 + j7,38.$$

Потери мощности в линии W2:

$$D\underline{S}_{CL} = \frac{21^2 + 7,38^2}{110^2} \cdot (5,65 + j14,4) = 0,23 + j0,59.$$

Мощность начала звена линии W2:

$$\underline{S}_{CL}^h = 21 + 0,23 + j(7,38 + 0,59) = 21,23 + j7,97.$$

Мощность, потребляемая с шин 110 кВ автотрансформатора:

$$\underline{S}_{KC}^k = 21,23 + j \left( 7,97 - \frac{1,24}{2} \right) = 21,23 + j7,35.$$

Потери мощности в обмотке среднего напряжения автотрансформатора:

$$D\underline{S}_{KC} = \frac{21,23^2 + 7,35^2}{220^2} (1,4 + j0) = 0,01 + j0.$$

Мощность в начале обмотки среднего напряжения автотрансформатора:

$$\underline{S}_{KC}^h = 21,23 + j7,35 + 0,01 = 21,24 + j7,35.$$

Мощность в конце обмотки высшего напряжения автотрансформатора:

$$\underline{S}_{BK}^k = 25,04 + j14,01 + 21,24 + j7,35 = 46,28 + j21,36.$$

Потери мощности в обмотке высшего напряжения автотрансформатора:

$$\Delta\underline{S}_{BK} = \frac{46,28^2 + 21,36^2}{220^2} (1,4 + j104) = 0,07 + j5,58.$$

Мощность в начале обмотки высшего напряжения автотрансформатора:

$$\underline{S}_{BK}^h = 46,28 + j21,36 + 0,07 + j5,58 = 46,35 + j26,94.$$

Зарядная мощность W1:

$$jQ_{cAB} = j220^2 \cdot 324 \cdot 10^{-6} = j15,68.$$

Мощность конца звена W1:

$$\underline{S}_{AB}^k = 46,35 + j26,94 + 0,045 + j0,315 - j \frac{15,68}{2} \approx 46,39 + j19,41.$$

Потери мощности в W1:

$$\Delta\underline{S}_{AB} = \frac{46,39^2 + 19,41^2}{220^2} (14,52 + j50,4) = 0,76 + j2,63.$$

Мощность начала звена W1:

$$\underline{S}_{AB}^h = 46,39 + j19,41 + 0,76 + j2,63 = 47,15 + j22,04.$$

Мощность, поступающая в схему сети:

$$\underline{S}_A = 47,15 + j22,04 - j7,84 = 47,15 + j14,2.$$

### 3. Определение напряжения в узлах.

По известному напряжению в узле А и найденным на предыдущем этапе расчету значению мощности  $\underline{S}_{AB}^h$  определяются продольная и поперечная составляющие падения напряжения в сопротивлениях линии W1:

$$DU_{AB} = \frac{47,15 \cdot 14,52 + 22,04 \cdot 50,4}{242} = 7,42,$$

$$dU_{AB} = \frac{47,15 \cdot 50,4 - 22,04 \cdot 14,52}{242} = 8,5.$$

Напряжение в узле  $B$  равно:

$$U_B = \sqrt{(242 - 7,42)^2 + 8,5^2} = 234,73.$$

Аналогично определяются напряжения в узлах  $K$ ,  $C$ ,  $D$ , приведенные к ступени напряжения 220 кВ. Указанные напряжения соответственно равны:

$$U_K = 223,5; \quad U'_C = 223,4; \quad U'_D = 212,05.$$

Действительное напряжение на шинах среднего и низшего напряжения подстанции можно определить по номинальным коэффициентам трансформации:

$$U_{C\partial} = 223,4 \cdot \frac{121}{230} = 117,53, \quad U_{D\partial} = 212,05 \cdot \frac{11}{230} = 10,14.$$

При определении потери напряжения в линии 110 кВ можно пренебречь поперечной составляющей падения напряжения, тогда потеря напряжения будет равна продольной составляющей падения напряжения:

$$DU_{CL} = \frac{21,23 \cdot 5,66 + 7,97 \cdot 14,4}{117,53} = 2,0.$$

Напряжение в узле  $L$  равно:  $U_L = 117,53 - 2,0 = 115,53$ .

## 5.2 Особенности расчета местных сетей.

Распределительные (местные) электрические сети – это сети с воздушными линиями напряжением 35 кВ и ниже и кабельными линиями 10 кВ и ниже. Они содержат большое количество линий, трансформаторов и узлов нагрузок, что делает расчеты их режимов объемными. Вместе с тем такие сети имеют ряд особенностей, учет которых позволяет существенно упростить расчет их режимов. Электрический расчет местных сетей ведется на основе следующих упрощений:

1. Проводимостью линии пренебрегают вообще, так как при небольших длинах сетей и сравнительно невысоких напряжениях ее влияние на результаты расчетов незначительно.

2. В большинстве случаев напряжение в отдельных точках сети и у потребителей не определяют, ограничиваясь лишь расчетом потерь напряжения и сравнением его с допустимой величиной. При необходимости расчет напряжений в узлах ведется по потере напряжения, которую определяют по номинальному напряжению, т.е. пренебрегают поперечной составляющей падения напряжения.

3. Сопротивления и проводимости трансформаторов также не учитывают, т.к. их величина соизмерима с погрешностью, с которой задаются мощности в узлах нагрузки. При этом полагают, что потери напряжения в трансформаторах уже отражены задаваемыми допустимыми значениями потерь напряжения в сети. Потери холостого хода и потери в обмотках учитываются лишь при подсчете потерь активной мощности и электроэнергии во всей сети.

4. При расчете потоков мощности допустимо не учитывать потери мощности в сопротивлениях линий. При этом считают, что мощность в конце и начале линии одинакова. Данное допущение эквивалентно тому, что величины напряжения во всех узлах сети одного номинального напряжения имеют одинаковые значения. Однако потери мощности в линиях обязательно учитываются при оценке потерь мощности и энергии в сети.

5. В некоторых случаях при расчете кабельных сетей пренебрегают их индуктивными сопротивлениями, так как они малы по сравнению с соответствующими сопротивлениями воздушных линий из-за малых расстояний между фазами. Кроме этого, местные сети выполняются, в основном, проводниками небольших сечений, поэтому в них активное сопротивление значительно превышает индуктивное

Обычно расчет режима местной электрической сети сводится к определению мощностей (токов) на участках линий и напряжений в узлах. Из напряжений интерес представляет точка с наиболее низким значением, которое должно быть не меньше допустимого. Для местных сетей нашел широкое применение метод расчета сети по допустимой потере напряжения, которая установлена (с некоторой степенью точности) для различных категорий и видов сетей. Поэтому

вместо определения самого низкого из напряжений в узлах обычно находят наибольшую потерю напряжения, под которой понимают разницу между напряжениями источника питания и узла с самым низким напряжением. При этом источниками питания для местных сетей являются либо шины генераторного напряжения электростанций, либо шины вторичного напряжения районных подстанций. Условием нормальной работы сети можно считать выполнение условия:

$$\Delta U_{НБ} \leq \Delta U_{доп}, \quad (5.31)$$

где  $\Delta U_{НБ}$  – величина потери напряжения от источника питания до электрически наиболее удаленной точки сети (наибольшая потеря напряжения),

$\Delta U_{доп}$  – допустимая величина потерь напряжения в рассматриваемой сети (обычно задается в условиях задачи или принимается в диапазоне  $(0,06 \div 0,08)U_{НОМ}$ ).

Так как при определении мощностей на участках сети не учитываются потери мощности, то мощность в конце участка равна мощности в начале. Мощности, протекающие на участках сети, определяются из уравнения первого закона Кирхгофа.

Потери мощности в сопротивлениях линии электропередачи можно определить по формуле:

$$\Delta S_{ij} = \frac{S_{ij}^2}{U_{НОМ}^2} (r_{ij} + j \cdot x_{ij}), \quad (5.32)$$

а потери напряжения:

$$\Delta U_{ij} = \frac{P_{ij}r_{ij} + Q_{ij}x_{ij}}{U_{НОМ}} \quad (5.33)$$

Если нагрузки заданы комплексными значениями токов, то формулы (5.32) и (5.33) будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \Delta S_{ij} &= 3 \cdot I_{ij}^2 \cdot (r_{ij} + j \cdot x_{ij}), \\ \Delta U_{ij} &= \sqrt{3} (I_{a ij} r_{ij} + I_{p ij} x_{ij}), \end{aligned} \quad (5.34)$$

где  $I_{a ij}$  – активная составляющая тока  $I_{ij}$ ,

$I_{p ij}$  – реактивная составляющая тока  $I_{ij}$ .

При расчете местных сетей, часто встречаются случаи равномерно распределенной нагрузки, то есть такой нагрузки, когда приемники с приблизительно одинаковой мощностью расположены на приблизительно одинаковых расстояниях друг от друга.

В большинстве практических случаев, приходится иметь дело с чисто активной равномерно распределенной нагрузкой (например, осветительной), поэтому рассмотрим метод расчета по потере напряжения трехфазной линии, имеющих одинаково сечение проводов по всей длине с чисто активной нагрузкой.

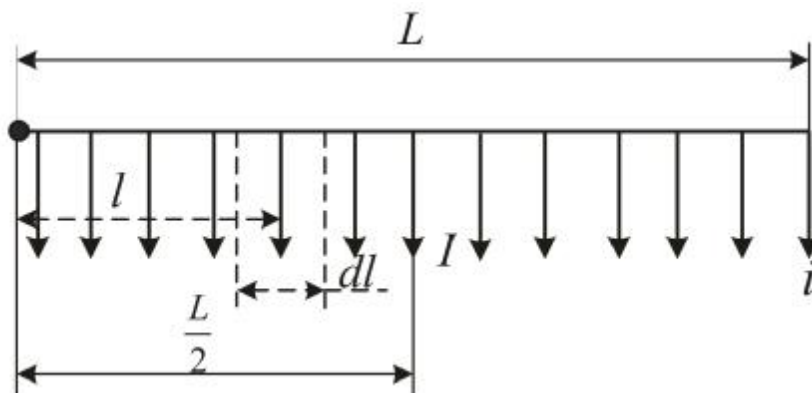


Рис.5.18 Равномерно распределенная нагрузка

Нагрузки линии на единицу длины в амперах обозначим через  $i$ . Нагрузка, питающаяся от линии на бесконечно малом отрезке  $dl$ , расположенной на расстоянии  $l$  от начала линии, будет  $i \cdot dl$ .

Потеря напряжения, которая создается этим током по длине линии  $l$ , при ее сопротивлении будет:

$$d(\Delta U) = \sqrt{3} \cdot i \cdot (L-l) \cdot r_0 \cdot dl$$

Потеря напряжения на всей длине  $L$ , определяемая выражением:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot r_0 \cdot i \int_0^L (L-l) dl = -\sqrt{3} \cdot r_0 \cdot i \frac{(L-l)^2}{2} \Big|_0^L = \sqrt{3} \cdot r_0 \cdot i \frac{L^2}{2}$$

Суммарная нагрузка на всей длине линии длиной  $L$  равна:

$$I = i \cdot L \Rightarrow i = \frac{I}{L}, \text{ тогда } \Delta U = \sqrt{3} \cdot r_0 \cdot I \frac{L}{2}.$$

Для сосредоточенной нагрузки величиной  $I$ , приложенной в конце участка, потеря напряжения составит:

$$\Delta U = \sqrt{3} r_0 I \cdot l, \text{ что в два раза больше, чем полученное для распределенной нагрузки.}$$

Следовательно, равномерно распределенную нагрузку можно заменить эквивалентной сосредоточенной нагрузкой, приложенной в середине рассматриваемой линии.

Если расчет ведется в мощностях и  $p$  – активная нагрузка на единицу длины:

$$p = \sqrt{3} \cdot i \cdot U,$$

А полная активная нагрузка:

$$P = p \cdot L,$$

$$P = \sqrt{3} \cdot I \cdot U,$$

Тогда:

$$d(\Delta U) = \frac{p(L-l)r_0 dl}{U_{НОМ}}$$

$$\Delta U = \int_0^L \frac{p(L-l)r_0 dl}{U_{НОМ}} = \frac{p \cdot r_0}{U_{НОМ}} \frac{(L-l)^2}{2} \Big|_0^L = \frac{p \cdot r_0 \cdot L^2}{2 \cdot U_{НОМ}} = \frac{P \cdot r_0 \cdot L}{2 \cdot U_{НОМ}}.$$

Но потеря напряжения  $\Delta U'$  для сосредоточенной нагрузки, приложенной к концу участка определится по формуле:

$$\Delta U' = \frac{p r_0 L}{U_{НОМ}}.$$

Следовательно, значения  $\Delta U'$  и  $\Delta U$ , отличаются в 2 раза. Поэтому эквивалентную сосредоточенную нагрузку  $P$  для расчета потери напряжения прикладывают в точке  $L/2$ .

Это правило справедливо и для более сложных схем сетей, а также для расчета потерь мощности. Однако, если в случае определения потерь напряжения, эквивалентная сосредоточенная нагрузка прикладывается к середине участка с равномерно распределенной нагрузкой, то при расчете потерь мощности эквивалентная сосредоточенная нагрузка должна быть приложена на расстоянии  $L/3$ .

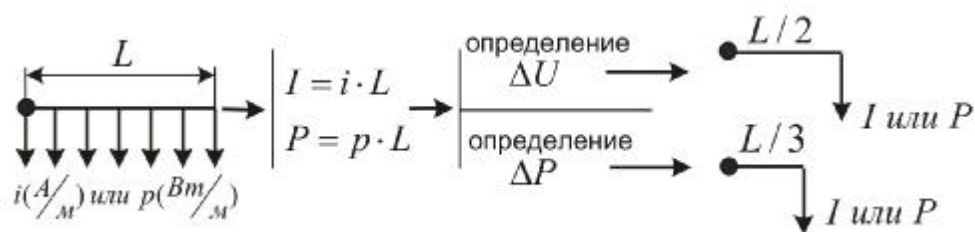


Рис.5.19 Эквивалентирование равномерно распределенной нагрузки при решении различных задач

Данное положение легко доказывается. Для случая, когда нагрузка задана единичными токами  $i$ :

$$d(\Delta P) = 3(i(L-l))^2 r_0 \cdot dl$$

$$\Delta P = \int_0^L 3 \cdot r_0 (i(L-l))^2 dl = -3 \cdot r_0 \cdot i^2 \frac{(L-l)^3}{3} \Big|_0^L = r_0 \cdot i^2 \cdot L^3 = I^2 \cdot r_0 \cdot L$$

Для сосредоточенной нагрузки, приложенной в конце участка длиной  $L$ :

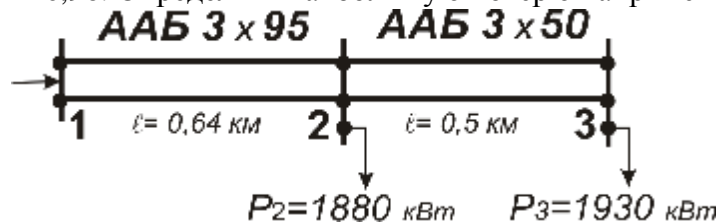
$$\Delta P' = 3 \cdot I^2 \cdot r_0 \cdot L.$$

Следовательно,  $\Delta P'$  отличается от  $\Delta P$  в 3 раза. Поэтому эквивалентную сосредоточенную нагрузку  $I$  прикладывают в точке  $L/3$ . Указанное положение справедливо и для случая, когда нагрузка задана единичными мощностями  $p$ .

### Примеры решения задач

#### Задача 1.

Электрическая сеть напряжением 10 кВ выполнена кабельными линиями. Коэффициенты мощности нагрузки  $\cos \phi = 0,96$ . Определить наибольшую потерю напряжения в сети.



Решение:

1. Погонные сопротивления кабельных линий определены по соответствующим справочным таблицам [2, 5]:

ААБ-3×95:  $r_0 = 0,326$  Ом/км,  $x_0 = 0,083$  Ом/км,

ААБ-3×50:  $r_0 = 0,620$  Ом/км,  $x_0 = 0,090$  Ом/км.

2. Активные и реактивные сопротивления линий:

$$r_{12} = r_{012} \cdot l_{12} \cdot \frac{1}{2}, \quad r_{12} = 0,326 \cdot 0,64 \cdot \frac{1}{2} = 0,104 \text{ (Ом)},$$

$$x_{12} = x_{012} \cdot l_{12} \cdot \frac{1}{2}, \quad x_{12} = 0,083 \cdot 0,64 \cdot \frac{1}{2} = 0,027 \text{ (Ом)},$$

$$r_{23} = r_{023} \cdot l_{23} \cdot \frac{1}{2}, \quad r_{23} = 0,62 \cdot 0,5 \cdot \frac{1}{2} = 0,155 \text{ (Ом)},$$

$$x_{23} = x_{023} \cdot l_{23} \cdot \frac{1}{2}, \quad x_{23} = 0,09 \cdot 0,5 \cdot \frac{1}{2} = 0,022 \text{ (Ом)}.$$

3. По первому закону Кирхгофа активные мощности, передаваемые по линиям, без учета потерь мощности на участках:

$$P_{12} = P_2 + P_3, \quad P_{12} = 1880 + 1930 = 3810 \text{ (кВт)},$$

$$P_{23} = P_3 = 1930 \text{ (кВт)}.$$

4. По активным мощностям и  $\cos \phi$  определим реактивные мощности в линиях:

$$Q_{12} = P_{12} \cdot \operatorname{tg} \phi, \quad Q_{12} = 3810 \cdot 0,292 = 1113 \text{ (квар)},$$

$$Q_{23} = P_{23} \cdot \operatorname{tg} \phi, \quad Q_{23} = 1930 \cdot 0,292 = 564 \text{ (квар)}.$$

5. Потери напряжения в линиях:

$$\Delta U_{23} = \frac{P_{23} r_{23} + Q_{23} x_{23}}{U_{НОМ}}, \quad \Delta U_{23} = \frac{1930 \cdot 0,155 + 564 \cdot 0,022}{10} = 31,2 \text{ (В)},$$

$$\Delta U_{12} = \frac{P_{12} r_{12} + Q_{12} x_{12}}{U_{НОМ}}, \quad \Delta U_{12} = \frac{3810 \cdot 0,104 + 1113 \cdot 0,027}{10} = 42,6 \text{ (В)}.$$

6. Наибольшая потеря напряжения в сети будет равна:

$$\Delta U_{НБ} = \Delta U_{12} + \Delta U_{23}, \quad \Delta U_{НБ} = 31,2 + 42,6 = 73,8 \text{ (В)}.$$

$$\Delta U_{НБ\%} = \frac{\Delta U_{НБ} \cdot 100\%}{U_{НОМ}}, \quad \Delta U_{НБ\%} = \frac{0,0738}{10} \cdot 100 = 0,738 \text{ \%}.$$

### Задача 2.

Для схемы, показанной на рисунке, требуется определить наибольшую потерю напряжения и сопоставить ее с допустимой  $\Delta U_{ДОП} = 7\%$ . Сеть напряжением 380 В, выполнена алюминиевыми проводами. Провода расположены в вершинах равностороннего треугольника со стороной 600 мм. Магистраль 1-5 выполнена проводом А-50. Участок 2-6 выполнен проводом А-16, а участок 4-7 - проводом А-25.

Погонные сопротивления проводов:

$$\text{А-50: } r_0 = 0,63 \text{ Ом/км, } x_0 = 0,325 \text{ Ом/км,}$$

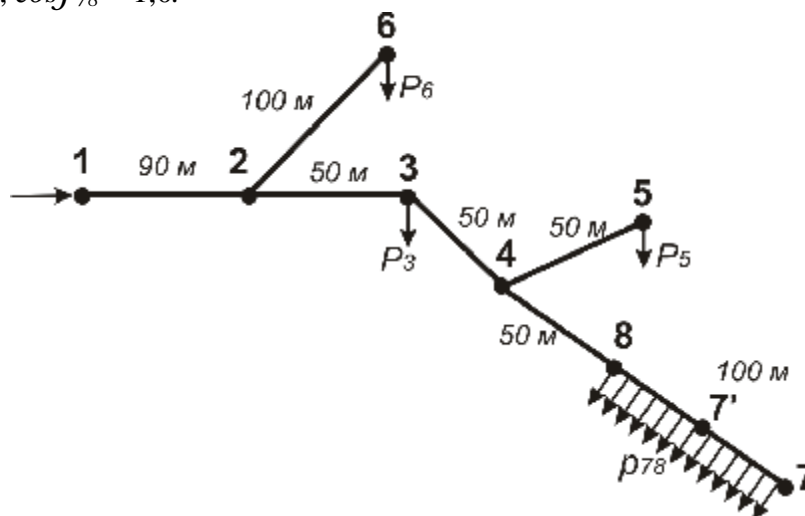
$$\text{А-25: } r_0 = 1,27 \text{ Ом/км, } x_0 = 0,345 \text{ Ом/км,}$$

$$\text{А-16: } r_0 = 1,96 \text{ Ом/км, } x_0 = 0,358 \text{ Ом/км.}$$

Мощности нагрузок:

$$P_6 = 20 \text{ кВт, } \cos \varphi_6 = 0,8; P_3 = 25 \text{ кВт, } \cos \varphi_3 = 1,0; P_5 = 15 \text{ кВт, } \cos \varphi_5 = 0,8;$$

$$p_{78} = 0,15 \text{ кВт/м, } \cos \varphi_{78} = 1,0.$$



Решение:

1. Мощности, протекающие по участкам сети, и мощности нагрузок определяются следующим образом:

$$\underline{S}_3 = P_3 = 25 + j0 \text{ (кВ}\cdot\text{А)},$$

$$\underline{S}_5 = 15 + j15 \cdot 0,75 = 15 + j11,25 \text{ (кВ}\cdot\text{А)},$$

$$\underline{S}_6 = 20 + j20 \cdot 0,75 = 20 + j15 \text{ (кВ}\cdot\text{А)},$$

$$\underline{S}_{78} = p_{78} \cdot l_{78}, \quad \underline{S}_{78} = 0,15 \cdot 100 = 15 + j0 \text{ (кВ}\cdot\text{А)}.$$

2. Распределенную нагрузку участка 8-7 можно представить в виде сосредоточенной и приложенной к середине участка.

Тогда:

$$\underline{S}_{12} = 75 + j16,25 \text{ (кВ}\cdot\text{А)},$$

$$\underline{S}_{23} = 55 + j11,25 \text{ (кВ}\cdot\text{А)},$$

$$\underline{S}_{34} = 30 + j11,25 \text{ (кВ}\cdot\text{А)},$$

$$\underline{S}_{26} = \underline{S}_6 = 20 + j15 \text{ (кВ}\cdot\text{А)},$$

$$\underline{S}_{45} = \underline{S}_5 = 15 + j11,25 \text{ (кВ}\cdot\text{А)},$$

$$\underline{S}_{47'} = \underline{S}_{78} = 15 + j0 \text{ (кВ}\cdot\text{А)}.$$



3. Потери напряжения в магистрали 1-5:

$$\begin{aligned} \Delta U_{15} &= \Delta U_{12} + \Delta U_{23} + \Delta U_{34} + \Delta U_{45} = \frac{P_{12}r_{12} + Q_{12}x_{12}}{U_{НОМ}} + \\ &+ \frac{P_{23}r_{23} + Q_{23}x_{23}}{U_{НОМ}} + \frac{P_{34}r_{34} + Q_{34}x_{34}}{U_{НОМ}} + \frac{P_{45}r_{45} + Q_{45}x_{45}}{U_{НОМ}}, \\ \Delta U_{15} &= \left( \frac{75 \cdot 0,63 \cdot 0,09 + 16,25 \cdot 0,325 \cdot 0,09}{380} + \right. \\ &+ \frac{55 \cdot 0,63 \cdot 0,05 + 11,25 \cdot 0,325 \cdot 0,05}{380} + \\ &+ \frac{30 \cdot 0,63 \cdot 0,05 + 11,25 \cdot 0,325 \cdot 0,05}{380} + \\ &+ \left. \frac{15 \cdot 0,63 \cdot 0,05 + 11,25 \cdot 0,325 \cdot 0,05}{380} \right) \cdot 10^3 = \\ &= 12,4 + 5 + 3 + 1,7 = 22,1 \text{ (В)}. \end{aligned}$$

4. Потери напряжения от центра питания - точка 1 до узлов 6 и 7' соответственно:

$$\begin{aligned} \Delta U_{16} &= \Delta U_{12} + \Delta U_{26} = \Delta U_{12} + \frac{P_{26} \cdot r_{26} + Q_{26} \cdot x_{26}}{U_{НОМ}}, \\ \Delta U_{16} &= 12,4 + \left( \frac{20 \cdot 1,96 \cdot 0,10 + 15 \cdot 0,358 \cdot 0,10}{380} \right) \cdot 10^3 = \\ &= 12,4 + 11,7 = 24,1 \text{ (В)}; \\ \Delta U_{17'} &= \Delta U_{12} + \Delta U_{23} + \Delta U_{34} + \Delta U_{47'} = \\ &= \Delta U_{14} + \frac{P_{47'} \cdot r_{47'} + Q_{47'} \cdot x_{47'}}{U_{НОМ}}, \\ \Delta U_{17'} &= 20,4 + \frac{15 \cdot 1,27 \cdot 0,1}{380} \cdot 10^3 = 20,4 + 5 = 25,4 \text{ (В)}. \end{aligned}$$

5. Наибольшая потеря напряжения в сети составляет:

$$\Delta U_{НБ} = \Delta U_{17'} = 25,4 \text{ (В)}. \quad \Delta U_{НБ\%} = \frac{\Delta U_{НБ} \cdot 100\%}{U_{НОМ}}, \quad \Delta U_{НБ\%} = \frac{25,5}{380} \cdot 100\% = 6,68 \%,$$

что не превышает допустимого значения  $DU_{ДОП} = 7\%$ .

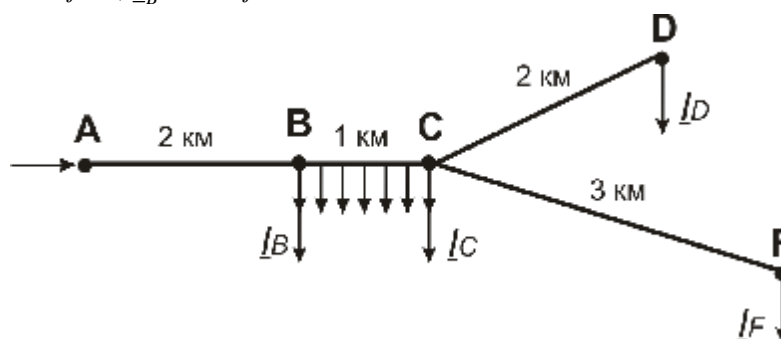
### Задача 3.

Определить напряжения у приемников электрической энергии, расположенных в пунктах В, С, D и F разомкнутой сети трехфазного переменного тока, схема которой изображена на рисунке. Номинальное напряжение сети  $U_{НОМ} = 10 \text{ кВ}$ , сеть выполнена проводом марки АС-70. Напряжение в пункте А равно  $10,7 \text{ кВ}$ .

Провод марки АС-70:  $r_0 = 0,45 \text{ Ом/км}$ ,  $x_0 = 0,36 \text{ Ом/км}$ .

$I_F = 35 - j15 \text{ А}$ ,  $I_D = 15 - j5 \text{ А}$ ,

$i_{BC} = 0,02 \text{ А/м}$ ,  $I_C = 10 - j8 \text{ А}$ ,  $I_B = 28 - j10 \text{ А}$ .

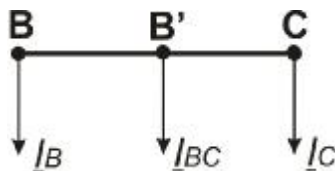


Решение.

- Токи, протекающие по участкам сети, можно определить, заменив распределенную нагрузку участка BC сосредоточенной и приложенной в середине участка:

$$\underline{I}_{AB} = \underline{I}_B + \underline{I}_C + \underline{I}_{BC} + \underline{I}_D + \underline{I}_F,$$

$$\underline{I}_{AB} = (28 + 10 + 20 + 15 + 35) - j(10 + 8 + 0 + 5 + 15) = 108 - j38 \text{ А.}$$



$$\underline{I}_{BB'} = \underline{I}_{AB} - \underline{I}_B,$$

$$\underline{I}_{BB'} = (108 - 28) - j(38 - 10) = 80 - j28 \text{ А;}$$

$$\underline{I}_{B'C} = \underline{I}_{BB'} - \underline{I}_{BC},$$

$$\underline{I}_{B'C} = (80 - 20) - j28 = 60 - j28 \text{ А.}$$

- Потери напряжения на участках можно определить по формуле (5.34):

$$\Delta U_{AB} = \sqrt{3}(108 \cdot 0,45 \cdot 2 + 38 \cdot 0,36 \cdot 2) = 215,7 \text{ В,}$$

$$\Delta U_{BB'} = \sqrt{3}(80 \cdot 0,45 \cdot 0,5 + 28 \cdot 0,36 \cdot 0,5) = 39,9 \text{ В,}$$

$$\Delta U_{B'C} = \sqrt{3}(60 \cdot 0,45 \cdot 0,5 + 28 \cdot 0,36 \cdot 0,5) = 32,1 \text{ В,}$$

$$\Delta U_{CD} = \sqrt{3}(15 \cdot 0,45 \cdot 2 + 5 \cdot 0,36 \cdot 2) = 29,6 \text{ В,}$$

$$\Delta U_{CF} = \sqrt{3}(35 \cdot 0,45 \cdot 3 + 15 \cdot 0,36 \cdot 3) = 109,9 \text{ В.}$$

- Напряжения в пунктах B, C, D и F:

$$U_B = U_A - \Delta U_{AB}, \quad U_B = 10,7 - 0,216 = 10,484 \text{ кВ;}$$

$$U_C = U_B - \Delta U_{BC} = U_B - (\Delta U_{BB'} + \Delta U_{B'C}),$$

$$U_C = 10,484 - (0,04 + 0,03) = 10,414 \text{ кВ,}$$

$$U_D = U_C - \Delta U_{CD}, \quad U_D = 10,414 - 0,03 = 10,384 \text{ кВ,}$$

$$U_F = U_C - \Delta U_{CF}, \quad U_F = 10,414 - 0,11 = 10,304 \text{ кВ.}$$

## 5.3 Особенности расчетов линий электропередачи сверхвысокого напряжения.

### 5.3.1 Общая характеристика ЛЭП сверхвысокого напряжения.

Линии электропередачи номинальным напряжением 330-1150 кВ имеют несколько различных названий. Их называют дальними линиями, линиями сверхвысокого напряжения, межсистемными линиями, системообразующими линиями. А в случаях, когда необходимо подчеркнуть условия регулирования параметров режима таких линий в процессе эксплуатации их называют управляемыми линиями.

Для таких линий характерны большая протяженность (более 300-500 км) и значительная передаваемая мощность (более 500 МВт). Поэтому основные характерные исключительно для таких линий особенности можно сформулировать следующим образом:

- При анализе режимов таких линий необходимо учитывать распределенность параметров вдоль длины линии.
- Волновой характер передачи мощности на расстояния, характерные для таких линий, предполагает учет волновых свойств самой линии.
- В процессе эксплуатации таких линий существуют задачи, связанные с необходимостью повышения пропускной способности линий, регулированием параметров режима по напряже-

нию и т.д. Для решения таких задач необходимы специальные средства и аппараты, подключаемые к характерным точкам линии. Поэтому алгоритмы расчетов должны учитывать возможность введения в расчетные модели таких элементов.

Ток и напряжение в линии непрерывно изменяются по ее длине. Ток из-за наличия проводимости, а напряжение за счет падения напряжения в сопротивлениях линии. Изменения напряжения и тока при волновом характере передачи энергии по линии описываются известными из курса ТОЭ уравнениями длинной линии, которые при конечной длине линии дают соотношения между напряжениями  $\underline{U}_1$  и  $\underline{U}_2$  и токами  $\underline{I}_1$  и  $\underline{I}_2$  в начале и в конце линии:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \cdot ch(\gamma_0 l) + \sqrt{3} \cdot \underline{I}_2 \cdot \underline{z}_C \cdot sh(\gamma_0 l) \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_2 \cdot ch(\gamma_0 l) + \frac{1}{\sqrt{3} \cdot \underline{z}_C} \underline{U}_2 \cdot sh(\gamma_0 l) \end{aligned} \right\}, \quad (5.35)$$

где  $l$  - длина линии электропередачи, км;

$\underline{z}_C$  - волновое сопротивление линии, Ом;

$\gamma_0$  - коэффициент распространения, 1/км.

Волновое сопротивление в общем случае определяется по формуле:

$$\underline{z}_C = \sqrt{\frac{r_0 + jx_0}{g_0 + jb_0}} = \sqrt{\frac{\underline{z}_0}{\underline{y}_0}}. \quad (5.36)$$

Для идеализированной линии без потерь энергии (при  $r_0=g_0=0$ ) волновое сопротивление определяется по формуле:

$$\underline{z}_C = \sqrt{\frac{x_0}{b_0}} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}. \quad (5.37)$$

Коэффициент распространения  $\gamma_0$  определяется по выражению:

$$\underline{\gamma}_0 = \sqrt{\underline{z}_0 \cdot \underline{y}_0} = \alpha_0 + j\beta_0, \quad (5.38)$$

где  $\alpha_0$  - коэффициент затухания амплитуды волны напряжения или тока, 1/км;

$\beta_0$  - коэффициент фазы волны напряжения или тока, град/км.

Значения указанных выше коэффициентов при частоте 50 Гц и традиционном исполнении линии находятся в диапазоне:

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= (3+5) \times 10^{-5} \text{ 1/км;} \\ \beta_0 &= 0,06-0,065 \text{ град/км.} \end{aligned}$$

### 5.3.2 Основные способы представления и расчета режима дальних ЛЭП

Как известно, линию любой длины можно представить эквивалентной схемой замещения с сосредоточенными параметрами. Как указывалось выше, наиболее часто линию представляют П-образной схемой замещения с сопротивлением звена  $\underline{z}=r+jx$  и проводимостями  $\underline{y}/2=g/2+jb/2$ .

При расчете линии по такой схеме замещения необходимо вводить поправочные коэффициенты:

$$K_z = \frac{sh(\gamma_0 l)}{\gamma_0 l} \text{ и } K_y = \frac{2 \cdot (ch(\gamma_0 l) - 1)}{\gamma_0 l}.$$

Эти коэффициенты представляют собой связь между параметрами линии, представленной уравнениями длинной линии и параметрами ее схемы замещения. Численные значения этих коэффициентов можно получить с той или иной степенью точности путем разложения гиперболических функций в бесконечные ряды:

$$\begin{aligned} K_z &= 1 + \frac{(\gamma_0 l)^2}{6} + \frac{(\gamma_0 l)^4}{120} + \dots \\ K_y &= 1 - \frac{(\gamma_0 l)^2}{12} + \frac{(\gamma_0 l)^4}{120} + \dots \end{aligned} \quad (5.39)$$

Очевидно, что при малых длинах (до 300 км для ВЛ и 50 км для КЛ) значения поправочных коэффициентов очень близки к единице. Поэтому при расчетах линий «малой» длины распределенностью параметров линии можно пренебречь. При расчетах линий «большой» протяженности и отсутствии у них специальных средств регулирования для выявления основных характеристик линии допускается применение П-образной схемы замещения ко всей длине линии, если вводятся поправочные коэффициенты, учитывающие распределенность параметров:

$$\begin{aligned}
 r &= r_0 \cdot l \cdot K_r, & K_r &= 1 - \frac{1}{3} \cdot l^2 \cdot x_0 \cdot b_0, \\
 x &= x_0 \cdot l \cdot K_x, & K_x &= 1 - \frac{1}{6} \cdot l^2 \cdot x_0 \cdot b_0 \left(1 - \frac{r_0^2}{x_0^2}\right), \\
 b &= b_0 \cdot l \cdot K_b, & K_b &= 1 + \frac{1}{12} \cdot l^2 \cdot x_0 \cdot b_0, \\
 g_0 &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{5.40}$$

Как указывалось выше, при «малых» протяженностях линий поправочные коэффициенты обращаются в единицу (5.39). Поэтому, используя данное обстоятельство, можно разбить длинную линию на несколько участков, на которых выполняется указанное условие. Отказ от учета распределенности параметров в таком случае не вызовет значительной погрешности в расчетах. Каждый такой участок моделируется П-образной схемой замещения без каких-либо поправочных коэффициентов и в результате образуется «цепочечная» схема замещения длинной линии (рис. 5.20). Расчет такой схемы ведется последовательно от одного участка к другому с использованием известных методик, применяемых для расчета «районных» линий. Потери мощности, обусловленные активной проводимостью линии (коронный разряд и утечки через изоляцию) можно представлять в виде активной нагрузки, включаемой в конце каждого участка линии.

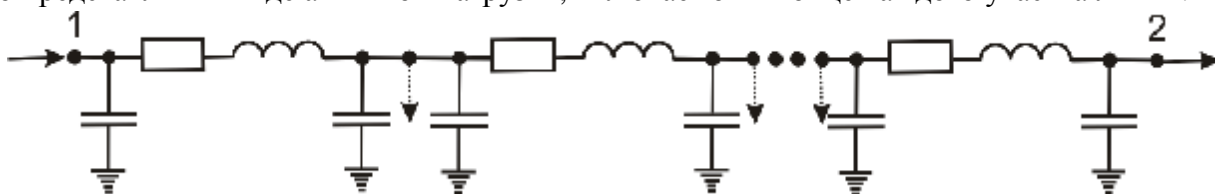


Рис.5.20 «Цепочечная» схема замещения длинной линии

Как указывалось ранее, линии электропередачи напряжением 330 кВ и выше в некоторых режимах (например, в режиме минимальных нагрузок) нуждаются в регулировании параметров. Для режима минимальных нагрузок таких линий характерна повышенная генерация реактивной мощности  $Q_C$ . Для компенсации этой избыточной реактивной мощности по концам линии и вдоль нее на специально организованных переключательных пунктах устанавливают шунтовые реакторы. Эти аппараты в схему замещения линии могут вводиться в виде индуктивных проводимостей (рис. 5.21).

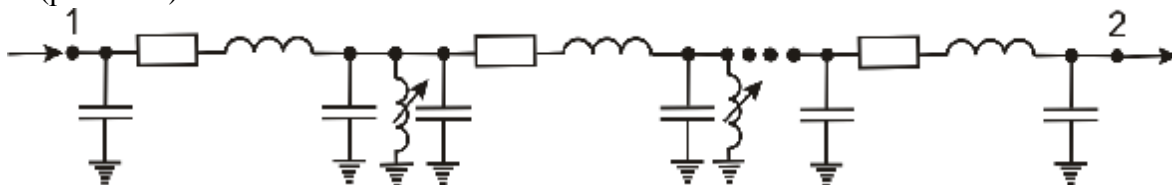


Рис.5.21 «Цепочечная» схема замещения длинной линии с учетом мест установки шунтовых реакторов

### 5.3.3 Режим натуральной мощности

На величину реактивной мощности в линии электропередачи оказывает влияние ее зарядная мощность  $Q_C$ , определяемая по формуле (3.11):

$$Q_C = U^2 \cdot b_0 \cdot l$$

Очевидно, что при сравнительно невысоких значениях напряжения величина  $Q_C$  также относительно невелика. При увеличении номинального напряжения и длины линии значение  $Q_C$  достигает значительных величин и оказывает существенное влияние на параметры режима.

Из формулы (3.11) следует, что величину  $Q_C$  можно считать условно независимой от нагрузки линии, т.к. ее значение определяется напряжением. В тоже время, в индуктивном сопротивлении линии имеют место потери реактивной мощности  $DQ$ , которые можно определить по выражению:

$$\Delta Q = \frac{S_{\text{НАГР}}^2}{U^2} \cdot x_0 \cdot l = \frac{P_{\text{НАГР}}^2 + Q_{\text{НАГР}}^2}{U^2} \cdot x_0 \cdot l.$$

Следовательно, величина  $DQ$  пропорциональна квадрату передаваемой по линии мощности.

Можно предположить, что при некотором значении передаваемой по линии мощности, сложится ситуация, когда потери реактивной мощности в индуктивном сопротивлении линии  $DQ$  окажутся равны величине реактивной мощности, генерируемой в емкостной проводимости линии  $Q_C$ . Т.е. они будут полностью компенсировать друг друга. В этом случае можно записать:

$$3 \cdot I^2 \cdot x_0 = 3 \cdot U_{\phi}^2 \cdot b_0.$$

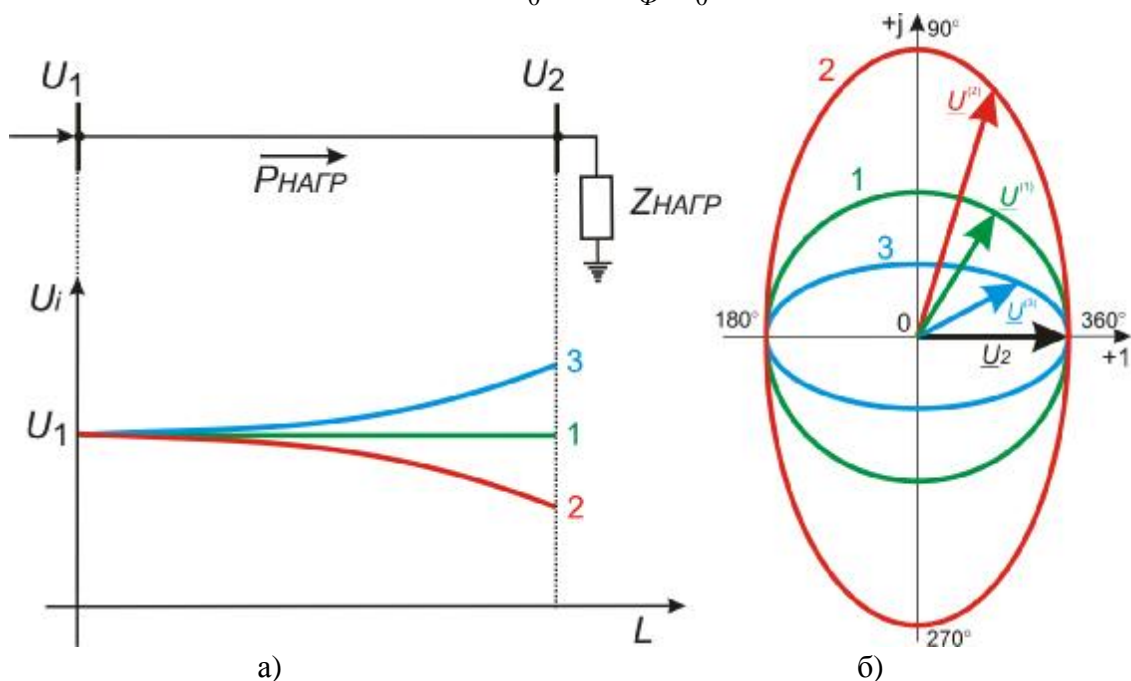


Рис.5.22 Распределение напряжения вдоль длины линии при протекании по ней мощности:

1)  $P_{\text{НАГР}}=P_C$  ; 2)  $P_{\text{НАГР}}>P_C$  ; 3)  $P_{\text{НАГР}}<P_C$  .

а) изменение модуля напряжения при  $U_1=const$ ;

б) изменение фазы и модуля вектора напряжения при  $U_2=const$ .

Если в указанной ситуации по линии будет передаваться исключительно активная мощность ( $\cos j = 1$ ), то передача будет происходить с наименьшими потерями мощности. Такой режим работы линии называют режимом натуральной мощности. Численно величина натуральной мощности может быть определена по выражению (5.41):

$$P_C = \frac{U^2}{\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}} = \frac{U^2}{z_C}, \quad (5.41)$$

где  $z_C$  – волновое сопротивление линии.

Величины натуральных мощностей линий различных номинальных напряжений и исполнения приведены в справочных изданиях.

Если провести анализ характера изменения модуля напряжения при протекании мощности вдоль линии при различных значениях мощности нагрузки, то можно получить зависимости, приведенные на рис 5.22.

### Примеры решения задач

#### Задача 1.

Определить величину натуральной мощности воздушной линии напряжением 500 кВ, выполненной проводами 3×АС-300/66 с эквивалентными параметрами:

$$x_0 = 0,31 \text{ Ом/км}; b_0 = 3,97 \times 10^{-6} \text{ См/км}.$$

Решение.

Волновое сопротивление линии определяется по формуле (5.37) и составит:

$$z_C = \sqrt{\frac{0,31}{3,97 \cdot 10^{-6}}} = 279,44 \text{ (Ом)}.$$

Натуральная мощность линии определяется по формуле (5.41) и равна:

$$P_C = \frac{500^2}{279,44} = 894,65 \text{ (МВт)}.$$

### 5.4. Основы методов расчета режимов замкнутых электрических сетей

Замкнутыми сетями называют сети, в которых электроэнергия к потребителям подается не менее чем с двух сторон. В качестве источников питания могут служить электростанции или шины подстанций, связанные сетью с электростанциями системы.

Различают простые замкнутые сети и сложные замкнутые сети. К простым замкнутым сетям относятся сети, состоящие из одного контура в которых присоединенные к ним нагрузки питаются не более чем с двух сторон (рис. 5.23,а). К сложным замкнутым сетям относятся сети, содержащие несколько контуров. Причем в контуры могут входить линии как одного, так и нескольких номинальных напряжений (рис. 5.23,б,в). В таких сетях, к узловым точкам электроэнергия может подаваться не менее чем с трех сторон.

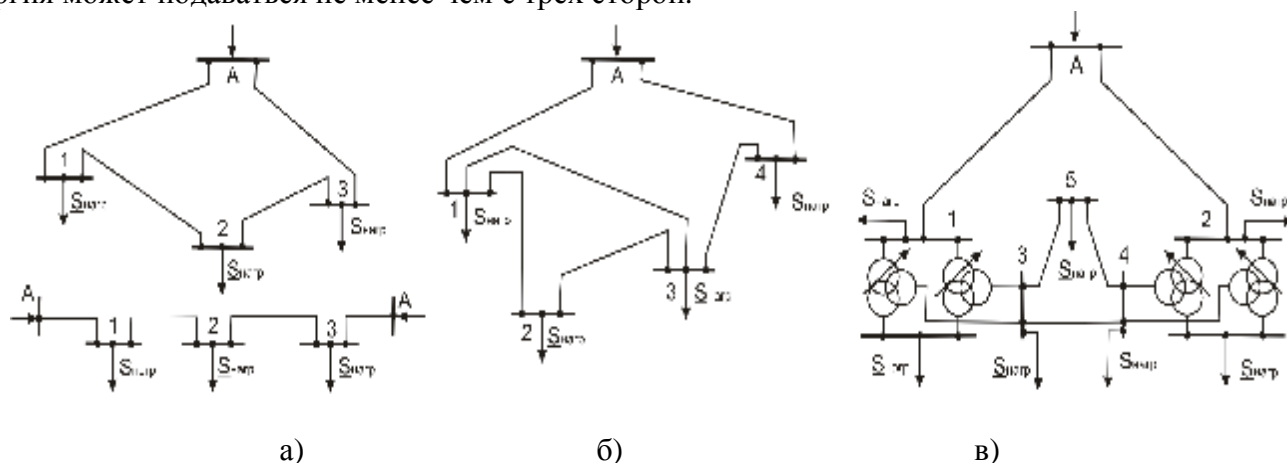


Рис. 5.23

Простая замкнутая сеть может иметь один источник питания, и тогда она выполняется в виде замкнутого кольца и называется кольцевой сетью, либо два источника питания, питающих линию с двух сторон, и тогда она называется сетью с двусторонним питанием.

Кольцевую сеть можно превратить в сеть с двусторонним питанием, разрезав ее по источнику питания.

К основным преимуществам замкнутых сетей по сравнению с разомкнутыми, при прочих равных условиях, относятся:

- более высокая надежность электроснабжения потребителей;
- повышенная экономичность из-за меньших потерь активной мощности.



Недостатком является их удорожание из-за большого числа участков и линий, а также усложнение эксплуатации.

Расчеты режимов замкнутых электрических сетей сложнее, чем разомкнутых. В разомкнутых сетях мощности на отдельных участках находят простым последовательным суммированием нагрузок и потерь мощности. В замкнутых сетях распределение мощностей по ветвям схемы не очевидно и зависит от длин и сечений проводов участков, величин нагрузок узлов и режимов напряжений источников питания. Поэтому для расчета замкнутых сетей применяют специальные методы.

Как и для разомкнутых сетей, электрические расчеты замкнутых сетей выполняют, как правило, для наиболее характерных нормальных установившихся режимов наибольших и наименьших нагрузок. Однако, в отличие от разомкнутых, при анализе замкнутых сетей дополнительно требуется проведение расчетов послеаварийных режимов при отключении отдельных участков сети. Это связано с тем, что отключение участка замкнутой сети может вызвать существенное изменение режима напряжений и потоков мощности, которые могут оказаться недопустимыми.

Большинство практических расчетов замкнутых сетей выполняют с помощью вычислительной техники. С одной стороны, это объясняется большими сложностями расчетов из-за разветвленности реальных сетей, содержащих большое количество контуров, узлов и участков сети. С другой стороны, для таких расчетов созданы достаточно эффективные алгоритмы и компьютерные программы. Освоение методов расчета замкнутых сетей необходимо для понимания физической сущности процессов, связанных с режимами электрической сети, и условий, при которых проводятся расчеты.

#### 5.4.1 Расчеты сетей с двусторонним питанием.

Линия с двусторонним питанием является частным случаем замкнутой сети. В виде такой линии может быть представлена одноконтурная сеть, если ее разрезать по источнику питания, тогда напряжения обоих питающих узлов будут равны.

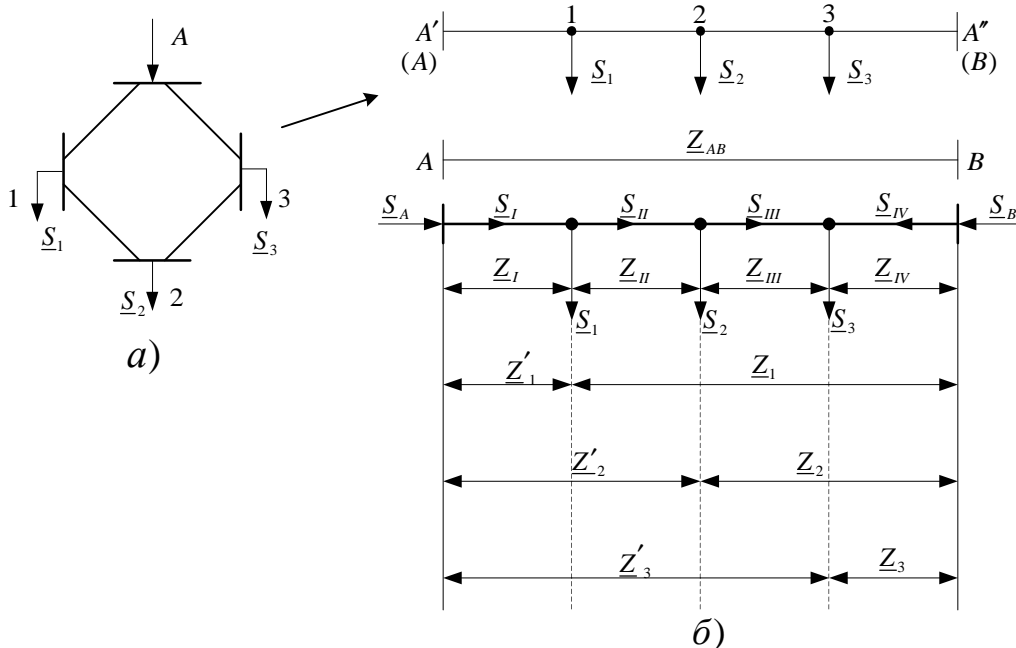


Рис. 5.24

Известными величинами при выполнении расчета режима сети с двусторонним питанием являются напряжение источника питания  $U_{ист}$  и мощности нагрузок ( $S_1, S_2, \dots, S_j$ ). Поскольку напряжение и мощности заданы для разных точек сети, то расчет должен выполняться методом последовательных приближений. Однако, согласно алгоритму, описанному выше, на первом этапе этого метода следует определять значения мощностей на участках сети, последовательно

двигаясь из конца сети в ее начало. При этом возникает проблема, связанная с определением точки сети, являющейся конечной, т.е. точки, являющейся наиболее электрически удаленной от источника питания. Для ее нахождения необходимо произвести ряд вычислений, связанных с определением перетоков мощностей по участкам сети.

На рис.5.24,а показана линия, в которой нагрузки в узлах заданы комплексными значениями мощностей  $\underline{S}_j$ . Известны также сопротивления участков линий  $\underline{Z}_{ij}$  и напряжения на шинах источника питания  $\underline{U}_A$ . Произведя некоторые преобразования, рассматриваемую сеть можно представить в виде, приведенном на рис. 5.24,б. При этом напряжение источника  $\underline{U}_A = \underline{U}_B$ .

На первом этапе расчета методом последовательных приближений предполагается, что напряжения во всех узлах сети равны  $U_{НОМ}$ . При этих допущениях токи, протекающие по отдельным участкам сети, определяются по формуле:

$$I_n = \frac{\underline{S}_n^*}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}}$$

Условия равенства напряжений по концам линии, означающее равенство нулю падения напряжения в схеме, на основании второго закона Кирхгофа может быть записано:

$$\frac{\underline{S}_I^*}{\sqrt{3}U_{НОМ}} \underline{Z}_I + \frac{\underline{S}_{II}^*}{\sqrt{3}U_{НОМ}} \underline{Z}_{II} + \frac{\underline{S}_{III}^*}{\sqrt{3}U_{НОМ}} \underline{Z}_{III} - \frac{\underline{S}_{IV}^*}{\sqrt{3}U_{НОМ}} \underline{Z}_{IV} = 0,$$

или 
$$\underline{S}_I \cdot \underline{Z}_I + \underline{S}_{II} \cdot \underline{Z}_{II} + \underline{S}_{III} \cdot \underline{Z}_{III} - \underline{S}_{IV} \cdot \underline{Z}_{IV} = 0. \quad (5.42)$$

Выразив  $\underline{S}_{II}$ ,  $\underline{S}_{III}$ ,  $\underline{S}_{IV}$ , через  $\underline{S}_I$  и мощности нагрузок  $\underline{S}_1$ ,  $\underline{S}_2$ ,  $\underline{S}_3$  принимая допущение об отсутствии потерь мощности на участках сети, можно записать следующие выражения:

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

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

По первому закону Кирхгофа:  $\underline{S}_{II} = \underline{S}_I - \underline{S}_1$ ;  $\underline{S}_{III} = \underline{S}_I - \underline{S}_1 - \underline{S}_2$ .

Подставив в исходное уравнение (5.42) после преобразований получим выражение:

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

Тогда выразим  $\underline{S}_I$  и  $\underline{S}_{IV}$ :

$$\underline{S}_A = \underline{S}_I = \frac{\underline{S}_1 \cdot \underline{Z}_1 + \underline{S}_2 \cdot \underline{Z}_2 + \underline{S}_3 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_{AB}}; \quad (5.43)$$

$$\underline{S}_B = \underline{S}_{IV} = \frac{\underline{S}_1 \cdot \underline{Z}'_1 + \underline{S}_2 \cdot \underline{Z}'_2 + \underline{S}_3 \cdot \underline{Z}'_3}{\underline{Z}_{AB}}. \quad (5.44)$$

В общем случае при  $n$  нагрузках кольцевой линии:

$$\underline{S}_A = \frac{\sum_{i=1}^n \underline{S}_i \cdot \underline{Z}_{iB}}{\underline{Z}_{AB}}; \quad (5.45)$$

$$\underline{S}_B = \frac{\sum_{i=1}^n \underline{S}_i \cdot \underline{Z}_{iA}}{\underline{Z}_{AB}}. \quad (5.46)$$

где  $\underline{Z}_{iA}$ ,  $\underline{Z}_{iB}$  - сопротивления линии от точки  $i$ , в которой включена некоторая промежуточная нагрузка  $\underline{S}_i$  до точек питания А и В соответственно.

После определения мощностей в головных участках сети, можно найти мощности на остальных её участках с помощью первого закона Кирхгофа, последовательно примененного для каждой точки включения нагрузки. В результате расчетов найдено распределение мощностей,

как показано на рис. 5.25. На рис. 5.25 в рассматриваемой сети среди всех узловых точек определена точка, к которой мощность поступает с двух сторон (точка 2). Такая точка в схемах называется точкой потокораздела (раздела мощностей).

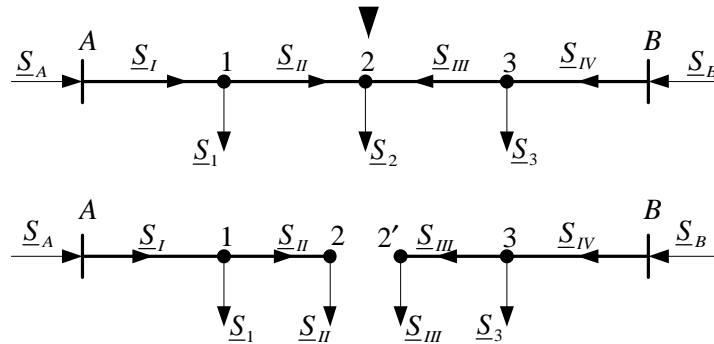


Рис.5.25

Исходную схему можно условно разделить по точке потокораздела. Такая операция не изменит распределения мощностей во всей сети в целом, если считать, что в точке 2 включена нагрузка с мощностью  $\underline{S}_{II}$ , а в точке 2' – нагрузка с мощностью  $\underline{S}_{III}$ .

Таким образом, сеть можно представить в виде двух независимых схем (A-1-2 и B-3-2'), каждая из которых является разомкнутой сетью с заданными параметрами (известны напряжения источников и мощности нагрузок). Расчет каждой из них ведется как для разомкнутой сети.

Особенности расчетов замкнутых районных сетей заключаются в том, что для таких сетей необходимо сначала определять уточненные значения мощностей, учитывающие потери мощности в линиях, а затем могут быть вычислены напряжения в узловых точках схемы (метод последовательных приближений).

Для местных сетей напряжения в узловых точках сети допускается рассчитывать без учета потерь мощности в линиях, т.е. по результатам предварительных расчетов по формулам 5.45 и 5.46.

Может оказаться, что первый этап расчета кольцевой сети выявит две точки потокораздела: одну для активной, а другую для реактивной мощности.

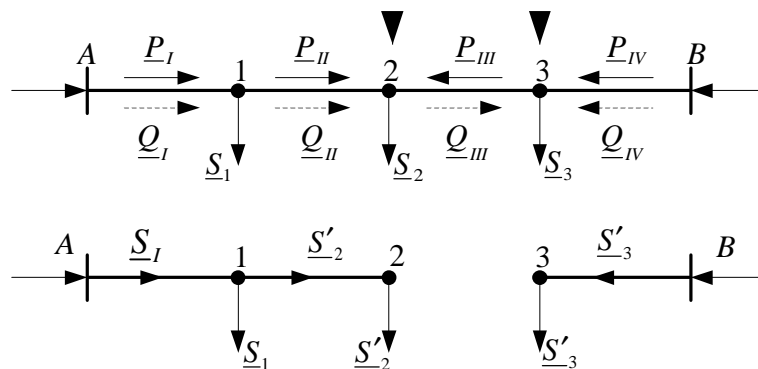


Рис. 5.26

В этом случае сеть для дальнейших расчетов также может быть разделена на две разомкнутые схемы по точкам потокораздела (рис 5.26). Однако при расчетах мощностей на прилегающих к точкам потокораздела участкам следует учесть потери мощности на участке, расположенном между точками потокораздела. При этом потери мощности на участке между точками потокораздела определяются следующим образом:

$$\Delta P_{III} = \frac{P_{III}^2 + Q_{III}^2}{U_{НОМ}^2} \cdot r_{III}; \quad (5.47)$$

$$\Delta Q_{III} = \frac{P_{III}^2 + Q_{III}^2}{U_{НОМ}^2} \cdot x_{III} \cdot \quad (5.48)$$

Тогда мощность нагрузки в точке 2 составит:

$$\underline{S}'_2 = P'_2 + jQ'_2 = P_{II} + j(Q_{II} + \Delta Q_{III}), \quad (5.49)$$

а мощность нагрузки в точке 3:

$$\underline{S}'_3 = P'_3 + jQ'_3 = (P_{IV} + \Delta P_{III}) + jQ_{IV}. \quad (5.50)$$

Как указывалось выше, при расчете районных сетей определение точек потококораздела является лишь предварительным этапом. Следующий этап заключается в уточнении потоков мощности по участкам сети, путем учета потерь мощности в сопротивлениях линий. При этом замкнутая сеть рассматриваются как совокупность двух разомкнутых сетей, связанных в точках потококораздела.

Завершающим этапом расчета, как и в случае с одной точкой потококораздела, является определение напряжений в узловых точках. Исходными данными для него служат напряжения на шинах источников питания и найденные в предыдущем этапе расчета уточненные значения мощности на участках сети.

### 5.4.2 Приближенные методы расчетов замкнутых сетей

Для определения распределения мощности в сети с двусторонним питанием в общем случае расчет производится по формулам 5.45 и 5.46, которые в комплексной форме можно записать следующим образом:

$$\underline{S}_A = P_A + jQ_A = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i + jQ_i) \cdot (r_{iB} - jx_{iB})}{r_{AB} - jx_{AB}} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i + jQ_i) \cdot (r_{iB} - jx_{iB})}{z_{AB}}. \quad (5.51)$$

Для проведения расчетов «вручную» при большом количестве узловых точек в замкнутом контуре приходится выполнять большое количество операций по умножению и сложению комплексных чисел. Такие операции сопряжены с преобразованием комплексных чисел из одной формы записи (алгебраической) в другую (показательную), что, в свою очередь, приводит к дополнительным погрешностям в расчетах и является весьма трудоемкой задачей.

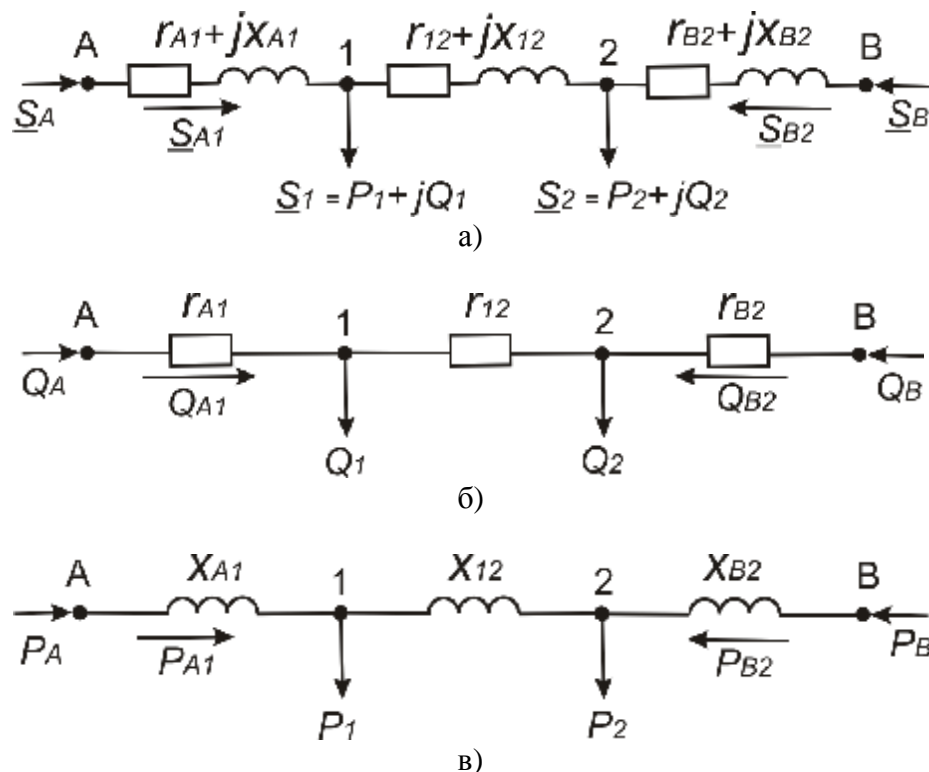


Рис. 5.27 Метод «расщепления схемы сети»

Для сетей, выполненных только воздушными или только кабельными линиями, в замкнутый контур которых не входят трансформаторы, расчет потококоразделения может быть вы-

полнен методом «расщепления схемы сети». Суть его заключается в следующем: схему замещения сети (рис.5.27,а) «расщепляют» на две схемы. Одна схема содержит активные сопротивления и реактивные нагрузки (рис.5.27,б), другая (рис.5.27,в) - реактивные сопротивления и активные нагрузки.

Таким образом, используя метод «расщепления схемы сети», потокораспределение активной мощности в сети с двусторонним питанием можно определить через реактивные сопротивления, а реактивной мощности через активные сопротивления участков сети по формулам:

$$P_A = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot x_{iB}}{x_{AB}}; P_B = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot x_{iA}}{x_{AB}}; \quad (5.52)$$

$$Q_A = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \cdot r_{iB}}{r_{AB}}; Q_B = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \cdot r_{iA}}{r_{AB}}; \quad (5.53)$$

$$\underline{S}_A = P_A + jQ_A; \underline{S}_B = P_B + jQ_B.$$

Таким образом, не выполняя действий с комплексными числами, можно определить значения полных мощностей на головных участках схемы  $\underline{S}_A$  и  $\underline{S}_B$ .

Как указывалось выше, применение рассматриваемого метода в общем случае приводит к дополнительной погрешности в расчетах. Величина погрешности зависит от соотношения активных и реактивных сопротивлений участков сети. Минимальная погрешность при расчетах методом «расщепления схемы сети» будет в том случае, если расчет ведется для сети, которая называется «однородной». И чем менее однородной является сеть, тем большие погрешности следует ожидать при расчетах указанным методом.

Однородными называются сети, в которых отношение активного сопротивления к реактивному сопротивлению является неизменным для каждого участка сети. Иными словами для каждого участка выполняется условие:

$$\frac{x_{ij}}{r_{ij}} = const. \quad (5.54)$$

Однако следует помнить, что в случае абсолютно однородной сети мощности на головных участках линии с двухсторонним питанием могут быть определены по активным сопротивлениям участков:

$$\underline{S}_A = \frac{\sum_{i=1}^n \underline{S}_i \cdot r_{iB}}{r_{AB}}; \quad (5.55)$$

$$\underline{S}_B = \frac{\sum_{i=1}^n \underline{S}_i \cdot r_{iA}}{r_{AB}}. \quad (5.56)$$

Данное обстоятельство можно проиллюстрировать следующим образом.

Если на всей длине линии провода расположены на опорах одинаково и имеют теоретически постоянное соотношение реактивного и активного сопротивления, то можно записать:

$$\frac{x}{r} = m.$$

Тогда формула для определения мощности на головном участке запишется так:

$$\underline{S}_A = \frac{\sum_{i=1}^n \underline{S}_i \cdot Z_{iB}^*}{Z_{AB}^*} = \frac{\sum_{i=1}^n \underline{S}_i \cdot (r_{iB} - jx_{iB})}{(r_{AB} - jx_{AB})}.$$

Подставив  $x_{iB} = r_{iB} \cdot m$ ;  $x_{AB} = r_{AB} \cdot m$  в выражение для определения  $\underline{S}_A$ , можно записать:

$$\underline{S}_A = \frac{\sum_{i=1}^n \underline{S}_i (1 - jm) r_{iB}}{(1 - jm) r_{AB}} = \frac{\sum_{i=1}^n \underline{S}_i \cdot r_{iB}}{r_{AB}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot r_{iB}}{r_{AB}} + j \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \cdot r_{iB}}{r_{AB}},$$

или

$$P_A = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot r_{iB}}{r_{AB}}, \quad Q_A = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \cdot r_{iB}}{r_{AB}}. \quad (5.57)$$

При одинаковом сечении проводов на всех участках сети, что часто встречается на практике, выполняется еще одно условие:

$$r_0 = const.$$

Очевидно, что такая сеть является частным случаем однородной сети. Поэтому можно записать:

$$r_{iB} = r_0 \cdot L_{iB}, \quad r_{AB} = r_0 \cdot L_{AB},$$

где  $L_{iB}$  - расстояние от соответствующих нагрузок до пункта  $B$ .

Данное обстоятельство позволяет записать:

$$\underline{S}_A = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot r_0 \cdot L_{iB}}{r_0 \cdot L_{AB}} + j \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \cdot r_0 \cdot L_{iB}}{r_0 \cdot L_{AB}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot L_{iB}}{L_{AB}} + j \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \cdot L_{iB}}{L_{AB}}. \quad (5.58)$$

В этом случае расчет можно вести по длинам участков, определяя распределение отдельно активных и реактивных нагрузок. Важно заметить, что данное обстоятельство позволяет определять распределение перетоков мощность в замкнутом контуре без учета сопротивлений проводов. Это широко используется в проектных расчетах, когда марки проводов по участкам схемы еще неизвестны.

### 5.4.3 Расчеты линий с двусторонним питанием при различающихся напряжениях источников питания

Для расчета таких сетей широко используют принцип наложения. То есть токи в ветвях цепи могут рассматриваться как результат суммирования ряда слагаемых, число которых равно числу независимых источников напряжения. Каждый из этих токов определяется действием лишь одного из источников напряжения при равенстве нулю напряжений других источников. Однако такой подход не всегда целесообразен, так как в нормальных установившихся режимах отличие напряжений источников бывает незначительным. Учитывая данное обстоятельство такую сеть (рис. 5.28) можно представить в виде двух независимых схем (рис. 5.29). Одна из них представляет собой сеть с двусторонним питанием с одинаковыми напряжениями источников, в другой действует дополнительная ЭДС  $\underline{DE}$ , равная:

$$\underline{\Delta E} = \underline{U}_B - \underline{U}_A.$$

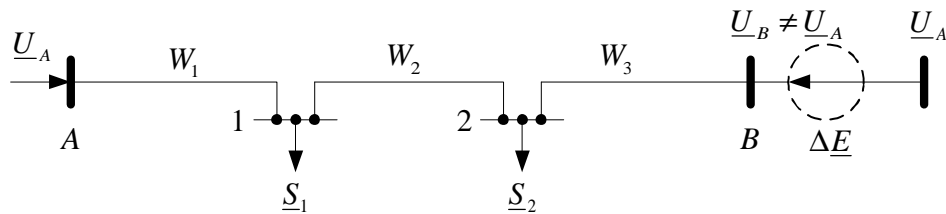


Рис. 5.28

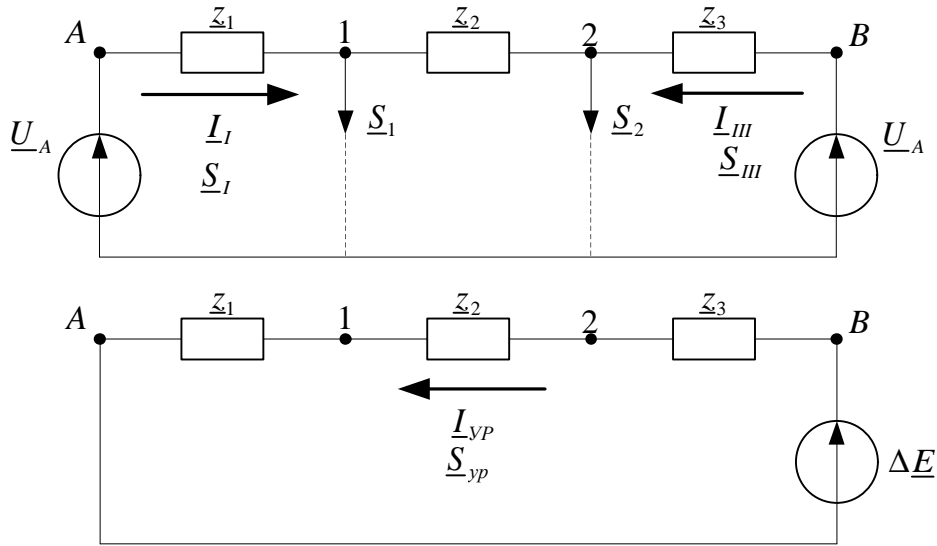


Рис. 5.29

Нагрузками во второй схеме можно пренебречь, а ток  $I_{yp}$ , называемый уравнивающим, определяется сопротивлениями участков линии и величиной ЭДС  $\Delta E$ :

$$I_{yp} = \frac{E}{\sqrt{3} \cdot (z_1 + z_2 + z_3)} = \frac{U_B - U_A}{\sqrt{3} \cdot z_{AB}}. \quad (5.59)$$

Для последней схемы нагрузки в точках 1 и 2 можно исключить, в связи с предположением о том, что  $\Delta E$  гораздо меньше  $U_A$  и следовательно, потери напряжения на участках сети, обусловленные протеканием  $I_{yp}$ , незначительны по сравнению с потерями от  $U_A$ .

Аналогично можно выразить величину уравнивающей мощности, обусловленную протеканием уравнивающего тока:

$$S_{yp} = \sqrt{3} \cdot I_{yp} \cdot U_{НОМ} \quad (5.60)$$

Следовательно, мощность на головных участках определится:

$$S_A = -S_{yp} + S_I;$$

$$S_B = S_{yp} + S_{III}.$$

$$S_A = -S_{yp} + \frac{1}{z_{AB}} \left( S_1 \cdot (z_2 + z_3) + S_2 \cdot z_3 \right); \quad (5.61)$$

$$S_B = S_{yp} + \frac{1}{z_{AB}} \left( S_1 \cdot z_1 + S_2 \cdot (z_1 + z_2) \right). \quad (5.62)$$

В общем виде при  $n$  нагрузках:

$$S_A = U_A \frac{U_A - U_B}{z_{AB}} + \frac{\sum_{i=1}^n S_i \cdot z_{iB}}{z_{AB}}; \quad (5.63)$$

$$S_B = U_B \frac{U_B - U_A}{z_{AB}} + \frac{\sum_{i=1}^n S_i \cdot z_{iA}}{z_{AB}}. \quad (5.64)$$



## Примеры решения задач

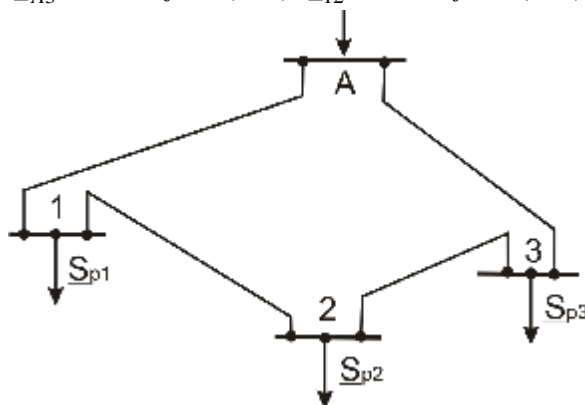
### Задача 1.

Для сети, изображенной на рисунке, требуется определить перетоки мощностей по участкам без учета потерь мощности в линиях и с учетом таких потерь. Определить напряжения в узлах схемы для обоих случаев. Номинальное напряжение сети  $U_{НОМ} = 10$  кВ. Напряжение на шинах подстанции А в рассматриваемом режиме равно 10,5 кВ. Расчетные мощности в узлах:

$$\underline{S}_{p1} = 1200 + j900 \text{ (кВ} \cdot \text{А)}, \quad \underline{S}_{p2} = 900 + j675 \text{ (кВ} \cdot \text{А)}, \quad \underline{S}_{p3} = 500 + j240 \text{ (кВ} \cdot \text{А)}.$$

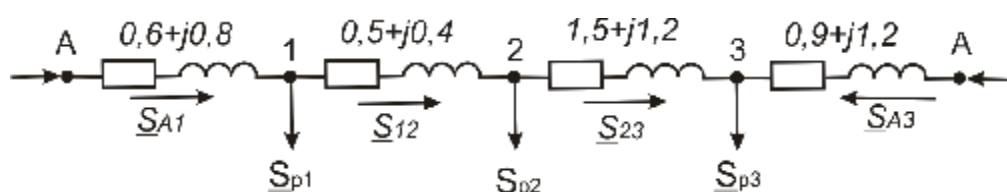
Сопротивления участков сети:

$$\underline{z}_{A1} = 0,6 + j0,8 \text{ (Ом)}, \quad \underline{z}_{A3} = 0,9 + j1,2 \text{ (Ом)}, \quad \underline{z}_{12} = 0,5 + j0,4 \text{ (Ом)}, \quad \underline{z}_{23} = 1,5 + j1,2 \text{ (Ом)}.$$



Решение:

1. Схема замещения будет иметь вид:



2. Представим мощности в узлах в показательной форме:

$$\underline{S}_{p1} = 1200 + j900 = 1500 \cdot e^{j36,9^\circ} \text{ (кВ} \cdot \text{А)},$$

$$\underline{S}_{p2} = 900 + j675 = 1125 \cdot e^{j36,9^\circ} \text{ (кВ} \cdot \text{А)},$$

$$\underline{S}_{p3} = 500 + j240 = 554,6 \cdot e^{j25,6^\circ} \text{ (кВ} \cdot \text{А)}.$$

3. Мощность, протекающая по головному участку А-1:

$$\underline{S}_{A1} = \frac{\underline{S}_{p1} \left( \begin{matrix} * & * & * \\ \underline{z}_{12} + \underline{z}_{23} + \underline{z}_{3A} \end{matrix} \right) + \underline{S}_{p2} \left( \begin{matrix} * & * \\ \underline{z}_{23} + \underline{z}_{3A} \end{matrix} \right) + \underline{S}_{p3} \cdot \underline{z}_{3A}}{\underline{z}_{A1} + \underline{z}_{12} + \underline{z}_{23} + \underline{z}_{3A}};$$

$$\begin{aligned} \underline{S}_{A1} &= \frac{1500e^{j36,9^\circ} \cdot 4e^{-j44^\circ} + 1125e^{j36,9^\circ} \cdot 3,4e^{-j45^\circ} + 554,6e^{j25,6^\circ} \cdot 1,5e^{-j53^\circ}}{5 \cdot e^{-j45,8^\circ}} = \\ &= \frac{10610 \cdot e^{-j9^\circ}}{5 \cdot e^{-j45,8^\circ}} = 2122 \cdot e^{j36,8^\circ} = 1700 + j1270 \text{ (кВ} \cdot \text{А)}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{matrix} * & * & * & * \\ \underline{z}_{A1} + \underline{z}_{12} + \underline{z}_{23} + \underline{z}_{3A} = 0,6 + 0,5 + 1,5 + 0,9 - j(0,8 + 0,4 + 1,2 + 1,2) = 3,5 - j3,6 = 5 \cdot e^{-j45,8^\circ}; \\ * & * & * \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} * & * \\ \underline{z}_{12} + \underline{z}_{23} + \underline{z}_{3A} = 0,5 + 1,5 + 0,9 - j(0,4 + 1,2 + 1,2) = 2,9 - j2,8 = 4 \cdot e^{-j44^\circ}; \\ * & * \end{matrix}$$

$$\underline{z}_{23} + \underline{z}_{3A} = 1,5 + 0,9 - j(1,2 + 1,2) = 2,4 - j2,4 = 3,4 \cdot e^{-j45^\circ};$$

\*

$$\underline{z}_{3A} = 0,9 - j1,2 = 1,5 \cdot e^{-j53^\circ}.$$

4. Мощность, протекающая по головному участку А-3:

$$\underline{S}_{A3} = \frac{\underline{S}_{p3} \left( \begin{matrix} * & * & * \\ \underline{z}_{32} + \underline{z}_{21} + \underline{z}_{1A} \end{matrix} \right) + \underline{S}_{p2} \left( \begin{matrix} * & * \\ \underline{z}_{21} + \underline{z}_{1A} \end{matrix} \right) + \underline{S}_{p1} \cdot \underline{z}_{1A}}{\underline{z}_{A1} + \underline{z}_{12} + \underline{z}_{23} + \underline{z}_{3A}};$$

$$\begin{aligned} \underline{S}_{A3} &= \frac{554,6e^{j25,6^\circ} \cdot 3,5e^{-j42,7^\circ} + 1125e^{j36,9^\circ} \cdot 1,6e^{-j47,5^\circ} + 1500e^{j36,9^\circ} \cdot 1e^{-j53^\circ}}{5 \cdot e^{-j45,8^\circ}} = \\ &= \frac{5260 \cdot e^{-j14,6^\circ}}{5 \cdot e^{-j45,8^\circ}} = 1052 \cdot e^{j31,2^\circ} = 900 + j545 \text{ (кВ} \cdot \text{А)}, \end{aligned}$$

где

\* \* \*

$$\underline{z}_{32} + \underline{z}_{21} + \underline{z}_{1A} = 1,5 + 0,5 + 0,6 - j(1,2 + 0,4 + 0,8) = 2,6 - j2,4 = 3,5 \cdot e^{-j42,7^\circ};$$

\* \*

$$\underline{z}_{21} + \underline{z}_{1A} = 0,5 + 0,6 - j(0,4 + 0,8) = 1,1 - j1,2 = 1,6 \cdot e^{-j47,5^\circ};$$

\*

$$\underline{z}_{1A} = 0,6 - j0,8 = 1 \cdot e^{-j53^\circ}.$$

5. Мощность, протекающая по участку 1-2, кВ·А:

$$\underline{S}_{12} = \underline{S}_{A1} - \underline{S}_{p1};$$

$$\underline{S}_{12} = 1700 + j1270 - (1200 + j900) = 500 + j370.$$

6. Мощность, протекающая по участку 2-3:

$$\underline{S}_{23} = \underline{S}_{12} - \underline{S}_{p2};$$

$$\underline{S}_{23} = 500 + j370 - (900 + j675) = -400 - j305 \text{ (кВ} \cdot \text{А)}.$$

7. Для проверки правильности решения можно определить мощность, протекающую по участку А-3, по первому закону Кирхгофа для узла 3:

$$\underline{S}_{A3} = \underline{S}_{p3} - \underline{S}_{23};$$

$$\underline{S}_{A3} = 500 + j240 - (-400 - j305) = 900 + j545 \text{ (кВ} \cdot \text{А)}.$$

8. Значения перетоков мощностей без учета потерь мощности в сопротивлениях линий:

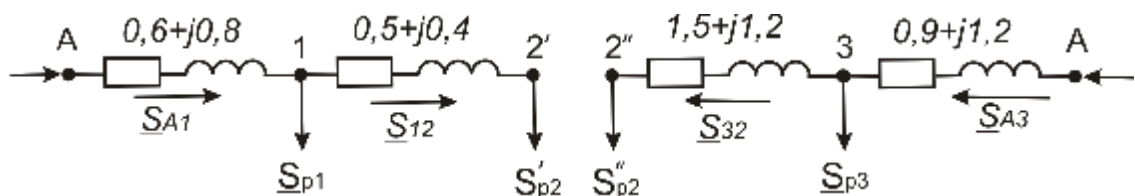
$$\underline{S}_{A1} = 1700 + j1270 \text{ (кВ} \cdot \text{А)};$$

$$\underline{S}_{12} = 500 + j370 \text{ (кВ} \cdot \text{А)};$$

$$\underline{S}_{A3} = 900 + j545 \text{ (кВ} \cdot \text{А)};$$

$$\underline{S}_{32} = 400 + j305 \text{ (кВ} \cdot \text{А)}.$$

9. Для определения этих значений с учетом потерь мощности в сопротивлениях линий, представим замкнутую сеть в виде двух разомкнутых, разрезав ее по точке потокораздела (точка 2):



$$\underline{S}'_{p2} = \underline{S}_{12}; \quad \underline{S}'_{p2} = 500 + j370 \text{ (кВ} \cdot \text{А)},$$

$$\underline{S}''_{p2} = \underline{S}_{32}; \quad \underline{S}''_{p2} = 400 + j305 \text{ (кВ} \cdot \text{А)}.$$

10. Мощность начала участка 1-2':

$$\underline{S}_{12}^H = \underline{S}_{12}^K + \Delta \underline{S}_{12},$$

$$\underline{S}_{12}^K = \underline{S}'_{p2}, \quad \Delta \underline{S}_{12} = \frac{P_{12}^2 + Q_{12}^2}{U_{НОМ}^2} (r_{12} + jx_{12}),$$

$$\underline{S}_{12}^H = 500 + j370 + \frac{500^2 + 370^2}{10^2} (0,5 + j0,4) \cdot 10^{-3} = 501,9 + j371,5 \text{ (кВ} \cdot \text{А)}.$$

11. Мощность конца участка А-1:

$$\underline{S}_{A1}^K = \underline{S}_{12}^H + \underline{S}_{p1};$$

$$\underline{S}_{A1}^K = 501,9 + j371,5 + 1200 + j900 = 1701,9 + j1271,5 \text{ (кВ} \cdot \text{А)}.$$

12. Мощность начала участка А-1:

$$\underline{S}_{A1}^H = \underline{S}_{A1}^K + \Delta \underline{S}_{A1};$$

$$\begin{aligned} \underline{S}_{A1}^H &= 1701,9 + j1271,5 + \frac{1701,9^2 + 1271,5^2}{10^2} (0,6 + j0,8) \cdot 10^{-3} = \\ &= 1729 + j1307,6 \text{ (кВ} \cdot \text{А)}. \end{aligned}$$

13. Для сети А-2'':

$$\underline{S}_{32}^H = \underline{S}_{32}^K + \Delta \underline{S}_{32};$$

$$\underline{S}_{32}^H = 400 + j305 + \frac{400^2 + 305^2}{10^2} (1,5 + j1,2) \cdot 10^{-3} = 403,8 + j308 \text{ (кВ} \cdot \text{А)}.$$

$$\underline{S}_{A3}^K = \underline{S}_{32}^H + \underline{S}_{p3};$$

$$\underline{S}_{A3}^K = 403,8 + j308 + 500 + j240 = 903,8 + j548 \text{ (кВ} \cdot \text{А)}.$$

$$\underline{S}_{A3}^H = \underline{S}_{A3}^K + \Delta \underline{S}_{A3};$$

$$\underline{S}_{A3}^H = 903,8 + j548 + \frac{903,8^2 + 548^2}{10^2} (0,9 + j1,2) \cdot 10^{-3} = 913,9 + j561,4 \text{ (кВ} \cdot \text{А)}.$$

14. Значения перетоков мощностей с учетом потерь мощности в сопротивлениях линий:

$$\underline{S}_{A1}^H = 1729 + j1307,6 \text{ (кВ} \cdot \text{А)};$$

$$\underline{S}_{12}^H = 501,9 + j371,5 \text{ (кВ} \cdot \text{А)};$$

$$\underline{S}_{A3}^H = 913,9 + j561,4 \text{ (кВ} \cdot \text{А)};$$

$$\underline{S}_{32}^H = 403,8 + j308 \text{ (кВ} \cdot \text{А)}.$$

При сравнении этих значений с величинами, полученными на предварительном этапе расчетов, можно сделать вывод о том, что погрешности вычислений не превышают 3%. Это еще раз доказывает правомочность положения о том, что при расчетах режимов работы распределительных сетей допустимо не учитывать потери мощности в сопротивлениях линий.

15. Потери напряжения на участках распределительной сети допустимо определять по номинальному напряжению. Тогда потери напряжения составят:

$$\Delta U_{A1} = \frac{1729 \cdot 0,6 + 1307,6 \cdot 0,8}{10} \approx 208 \text{ В};$$

$$\Delta U_{12} = \frac{501,9 \cdot 0,5 + 371,5 \cdot 0,4}{10} \approx 40 \text{ В};$$

$$\Delta U_{A3} = \frac{913,9 \cdot 0,9 + 561,4 \cdot 1,2}{10} \approx 150 \text{ В};$$

$$\Delta U_{32} = \frac{403,8 \cdot 1,5 + 308 \cdot 1,2}{10} \approx 98 \text{ В}.$$

16. Напряжения в узловых точках сети А-2':

$$U_1 = 10500 - 208 = 10292 \text{ В};$$

$$U_{2'} = 10292 - 40 = 10252 \text{ В.}$$

17. Напряжения в узловых точках сети А-2'':

$$U_3 = 10500 - 150 = 10350 \text{ В;}$$

$$U_{2''} = 10350 - 98 = 10252 \text{ В.}$$

18. Напряжение в точке 2 замкнутой сети (точке потокораздела) составляет:

$$U_2 = 10,252 \text{ кВ,}$$

а наибольшие потери в рассматриваемой сети:

$$\Delta U_{НБ} \approx 2,5 \text{ \%}.$$

### Задача 2.

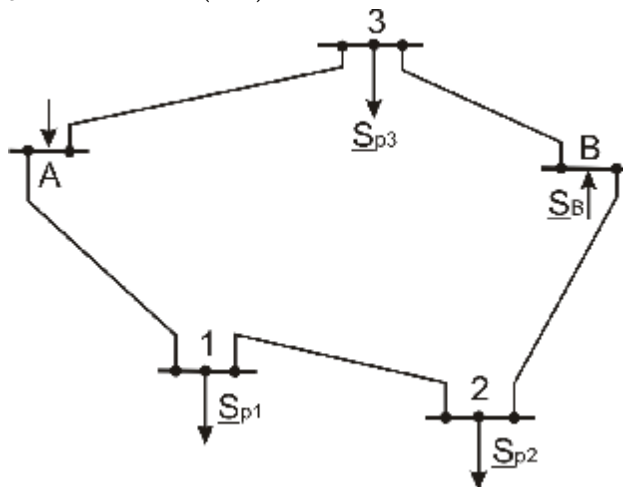
Потребители, установленные на подстанциях 1, 2 и 3, получают питание от двух источников: системной подстанции А и электростанции В. На рисунке показана сеть напряжением 110 кВ, которая соединяет источники питания и подстанции. Электрическая станция В выдает в сеть ограниченную мощность, равную  $\underline{S}_B = 30 + j20$  (МВ·А). Покрытие оставшейся части графика нагрузки потребителей происходит за счет передачи мощности в сеть с шин подстанции А. Расчетные мощности узлов 1, 2 и 3 соответственно равны:

$$\underline{S}_1 = 10 + j5 \text{ (МВ·А)}, \quad \underline{S}_2 = 35 + j21 \text{ (МВ·А)}, \quad \underline{S}_3 = 30 + j17 \text{ (МВ·А)}.$$

Сопrotивления линий:

$$\underline{Z}_{A3} = 5,4 + j8,5 \text{ (Ом)}, \quad \underline{Z}_{A1} = 8,1 + j12,7 \text{ (Ом)}, \quad \underline{Z}_{12} = 4,5 + j4,4 \text{ (Ом)},$$

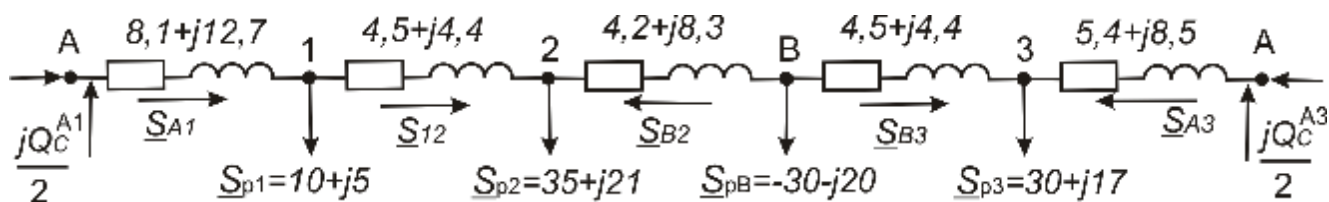
$$\underline{Z}_{2B} = 4,2 + j8,3 \text{ (Ом)}, \quad \underline{Z}_{3B} = 4,5 + j4,4 \text{ (Ом)}.$$



Требуется определить точки потокораздела сети. Расчет провести методом расщепления схемы сети.

Решение:

1. Мощность станции В представим в виде нагрузки, имеющей отрицательное значение, т.е.  $\underline{S}_{pB} = -(30 + j20)$  (МВ·А). Тогда схема замещения будет иметь вид:



2. Активная и реактивная мощности, протекающие по головному участку А3:

$$P_{A3} = \frac{P_{p3} \cdot (x_{3B} + x_{B2} + x_{21} + x_{1A}) + P_{pB} \cdot (x_{B2} + x_{21} + x_{1A}) + P_{p2} \cdot (x_{21} + x_{1A}) + P_{p1} \cdot x_{1A}}{x_{A1} + x_{12} + x_{2B} + x_{B3} + x_{3A}},$$

$$P_{A3} = \frac{30 \cdot (4,4 + 8,3 + 4,4 + 12,7) + (-30) \cdot (8,3 + 4,4 + 12,7) + 35 \cdot (4,4 + 12,7) + 10 \cdot 12,7}{12,7 + 4,4 + 8,3 + 4,4 + 8,5} =$$

$$= 22,4 \text{ (МВт)};$$

$$Q_{A3} = \frac{Q_{p3} \cdot (r_{3B} + r_{B2} + r_{21} + r_{1A}) + Q_{pB} \cdot (r_{B2} + r_{21} + r_{1A}) + Q_{p2} \cdot (r_{21} + r_{1A}) + Q_{p1} \cdot r_{1A}}{r_{A1} + r_{12} + r_{2B} + r_{B3} + r_{3A}},$$

$$Q_{A3} = \frac{17 \cdot (4,5 + 4,2 + 4,5 + 8,1) + (-20) \cdot (4,2 + 4,5 + 8,1) + 21 \cdot (4,5 + 8,1) + 5 \cdot 8,1}{8,1 + 4,5 + 4,2 + 4,5 + 5,4} =$$

$$= 12,4 \text{ (Мвар)}.$$

3. Активная и реактивная мощности, протекающие по головному участку А1:

$$P_{A1} = \frac{P_{p1} \cdot (x_{12} + x_{2B} + x_{B3} + x_{3A}) + P_{p2} \cdot (x_{2B} + x_{B3} + x_{3A}) + P_{pB} \cdot (x_{B3} + x_{3A}) + P_{p3} \cdot x_{3A}}{x_{A1} + x_{12} + x_{2B} + x_{B3} + x_{3A}},$$

$$P_{A1} = \frac{10 \cdot (4,4 + 8,3 + 4,4 + 8,5) + 35 \cdot (8,3 + 4,4 + 8,5) + (-30) \cdot (4,4 + 8,5) + 30 \cdot 8,5}{12,7 + 4,4 + 8,3 + 4,4 + 8,5} =$$

$$= 22,6 \text{ (МВт)};$$

$$Q_{A1} = \frac{Q_{p1} \cdot (r_{12} + r_{2B} + r_{B3} + r_{3A}) + Q_{p2} \cdot (r_{2B} + r_{B3} + r_{3A}) + Q_{pB} \cdot (r_{B3} + r_{3A}) + Q_{p3} \cdot r_{3A}}{r_{A1} + r_{12} + r_{2B} + r_{B3} + r_{3A}},$$

$$Q_{A1} = \frac{5 \cdot (4,5 + 4,2 + 4,5 + 5,4) + 21 \cdot (4,2 + 4,5 + 5,4) + (-20) \cdot (4,5 + 5,4) + 17 \cdot 5,4}{8,1 + 4,5 + 4,2 + 4,5 + 5,4} =$$

$$= 10,6 \text{ (Мвар)}.$$

4. Мощность участка В3 определяется по закону Кирхгофа:

$$\underline{S}_{B3} = \underline{S}_{p3} - \underline{S}_{A3};$$

$$\underline{S}_{B3} = 30 + j17 - (22,4 + j12,4) = 7,6 + j4,6 \text{ (МВ} \cdot \text{А)}.$$

5. Аналогично определяем мощности на оставшихся участках сети:

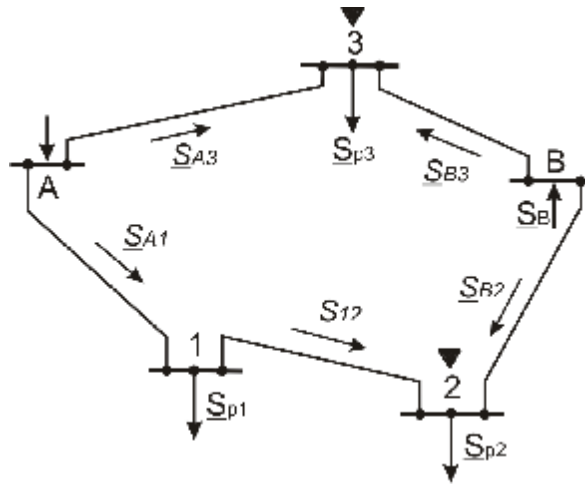
$$\underline{S}_{12} = \underline{S}_{A1} - \underline{S}_{p1},$$

$$\underline{S}_{12} = 22,6 + j10,6 - (10 + j5) = 12,6 + j5,6 \text{ (МВ} \cdot \text{А)};$$

$$\underline{S}_{B2} = \underline{S}_{p2} - \underline{S}_{12},$$

$$\underline{S}_{B2} = 35 + j21 - (12,6 + j5,6) = 22,4 + j15,4 \text{ (МВ} \cdot \text{А)}.$$

6. По результатам расчетов на схеме покажем направления перетоков мощности по участкам.



Следовательно, точками потокоораздела будут являться точки 3 и 2.