

# ГЛАВА 6. РАСЧЕТ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ ПРОСТЕЙШИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Цель изучения:

научиться рассчитывать установившиеся режимы электрических сетей с учетом их особенностей

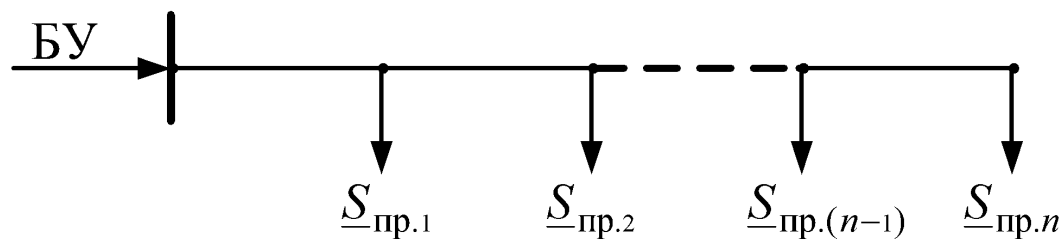
## Простейшими электрическими передачами считаются

- разомкнутые магистральные, радиальные и разветвленные сети с одним источником питания
- замкнутые сети при наличии одного контура и линии с двухсторонним питанием.

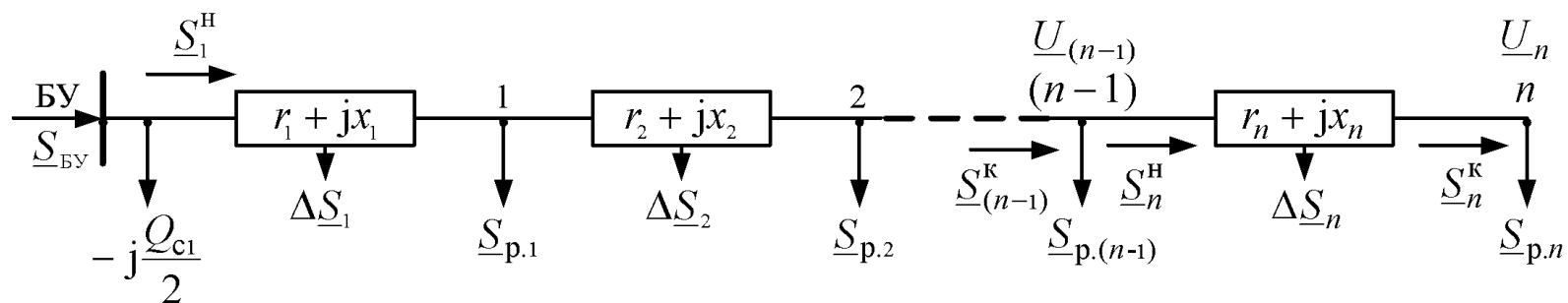
**Напряжение для рассматриваемых сетей:**

$$U_{\text{НОМ}} \leq 220 \text{ кВ}$$

Схема простейшей разомкнутой сети:



Расчетная схема замещения разомкнутой сети:



Расчет сети по заданному напряжению на шинах последнего потребителя («расчет по данным конца передачи»):

- Заданное напряжение совмещается с действительной осью

$$\underline{U}_n = \underline{U}_n^* = U_n.$$

- Расчет ведется последовательно от последнего участка к началу линии. Для  $n$ -го участка расчетные формулы:

$$\underline{S}_n^K = \underline{S}_{p.n}$$

$$\Delta \underline{S}_n = \left( \frac{S_n^K}{U_n} \right)^2 \underline{z}_n$$

$$\underline{S}_n^H = \underline{S}_n^K + \Delta \underline{S}_n$$

$$\underline{S}_{(n-1)}^K = \underline{S}_n^H + \underline{S}_{p.(n-1)}$$

$$\Delta \underline{U}_n = \Delta U_n^K + j\delta U_n^K$$

$$\Delta U_n^K = \frac{P_n^K r_n + Q_n^K x_n}{U_n}$$

$$\delta U_n^K = \frac{P_n^K x_n - Q_n^K r_n}{U_n}$$

$$\underline{U}_{(n-1)} = U_{\Pi} + \Delta U_n^K + j\delta U_n^K$$

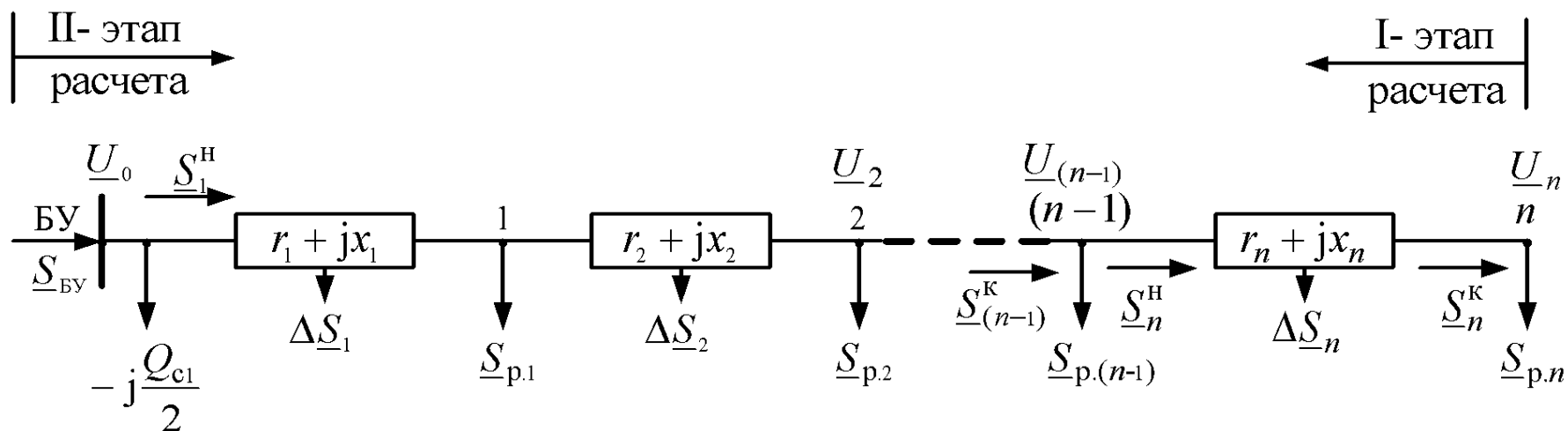
$$\delta_n = \arctg \left( \frac{\delta U_n^K}{U_n + \Delta U_n^K} \right)$$

$$U_{(n-1)} = \sqrt{(U_n + \Delta U_n^K)^2 + (\delta U_n^K)^2}$$



Расчет сети по заданному напряжению на шинах источника электроэнергии («расчет по данным начала передачи»):

Расчетная схема замещения разомкнутой сети



Расчет параметров режима производится методом последовательных приближений.

- В первом приближении принимаем для всех узлов сети

$$\underline{U}_n = \underline{U}_{n-1} = \dots = \underline{U}_2 = \underline{U}_1 = U_{\text{НОМ}}$$

Рассчитываем распределение потоков мощности в сети с учетом потерь мощности, идем от конца к началу передачи.

$$\underline{S}_n^{\text{К}} = \underline{S}_{\text{п.н}} \quad \Delta \underline{S}_n = \left( \frac{S_n^{\text{К}}}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2 \underline{z}_n \quad \underline{S}_n^{\text{H}} = \underline{S}_n^{\text{К}} + \Delta \underline{S}_n \quad \underline{S}_{(n-1)}^{\text{К}} = \underline{S}_n^{\text{H}} + \underline{S}_{\text{п.}(n-1)} \quad \underline{S}_{\text{БУ}} = \underline{S}_1^{\text{H}} - \text{j} \frac{Q_{\text{с1}}}{2}$$

- Во втором приближении находятся действительные напряжения на подстанциях, при этом расчет ведется от базисного узла к концу передачи.

$$\Delta U_1^{\text{H}} = \frac{P_1^{\text{H}} r_1 + Q_1^{\text{H}} x_1}{U_0}$$

$$\delta U_1^{\text{H}} = \frac{P_1^{\text{H}} x_1 - Q_1^{\text{H}} r_1}{U_0}$$

$$\delta_1 = \arctg \left( \frac{-\delta U_1^{\text{H}}}{U_1 - \Delta U_1^{\text{H}}} \right)$$

$$\Delta \underline{U}_1 = \Delta U_1^{\text{H}} + \text{j} \delta U_1^{\text{H}}$$

$$\underline{U}_1 = U_0 - \Delta U_1^{\text{H}} - \text{j} \delta U_1^{\text{H}}$$

$$U_1 = \sqrt{(U_0 - \Delta U_1^{\text{H}})^2 + (\delta U_1^{\text{H}})^2}$$

Рассчитывая  $U_2$ , необходимо  $U_1$  совместить с действительной осью. И так для каждого последующего узла.

- Полученные напряжения сравниваются с номинальными значениями для всех узлов:

$$|U_i - U_{\text{НОМ}}| < \varepsilon$$

Если разница не превышает заранее заданной точности расчета, расчет заканчивают. Иначе необходимо повторить вычисления в первом и втором приближении, взяв за исходные полученные значения напряжения.

Углы  $\delta_i$  между векторами напряжений соседних узлов суммируются.



Для сетей с номинальным напряжением 110 кВ характерно примерное равенство активного и индуктивного сопротивлений. Поэтому допустимо в расчетах принимать:  $\delta U_i = 0$ . Отсюда

$$U_{i\pm 1} = U_i \pm \Delta U_i$$

Здесь знак + соответствует напряжению  $U_i$ , заданному в конце участка сети, знак –, если напряжение  $U_i$  задано в начале участка.

## 6.3 Расчет режима местной электрической сети

$$U_{\text{ном}} \leq 35 \text{ кВ}$$

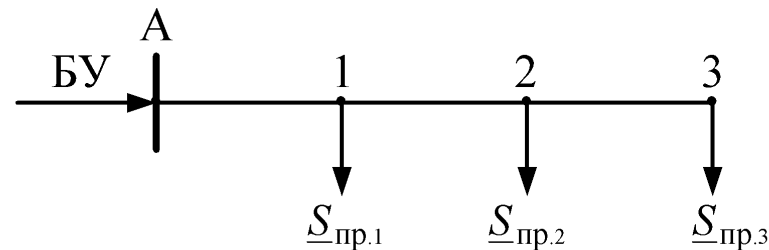
Допущения:

- в схеме замещения проводимости не учитываются, так как не происходит ионизации воздуха, не наблюдается корона на проводах ( $g_o=0$ ) и зарядная мощность линии значительно меньше рабочей ( $b_o=0$ );
- потребители могут быть включены непосредственно в сеть (6, 10 кВ), поэтому изменения напряжения ограничиваются допустимыми отклонениями напряжения для потребителей. Эти отклонения незначительны, поэтому можно считать во всех узлах  $U=U_{\text{ном}}$ , что позволяет пренебречь потерями мощности в сети.

Принятые допущения позволяют расчет режима местной сети свести к определению наибольшей потери напряжения в сети.

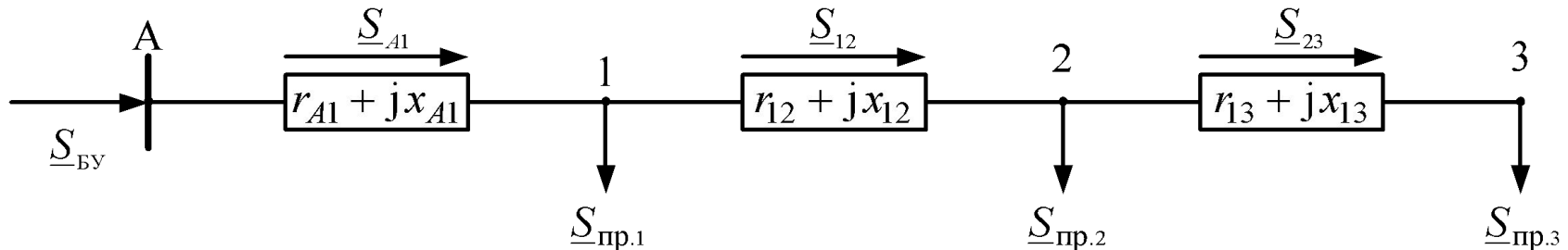
**Наибольшей потерей напряжения** считается потеря напряжения между источником и наиболее удаленным потребителем.

*Схема местной разомкнутой сети*



### Порядок расчета следующий:

- составляем схему замещения



- не учитывая потери, находим распределение потоков мощности по участкам сети:

$$\underline{S}_{23} = \underline{S}_{\text{пр.3}}$$

$$\underline{S}_{12} = \underline{S}_{\text{пр.2}} + \underline{S}_{\text{пр.3}}$$

$$\underline{S}_{A1} = \underline{S}_{\text{пр.1}} + \underline{S}_{\text{пр.2}} + \underline{S}_{\text{пр.3}}$$

- для каждого участка сети определяем потерю напряжения:

$$\Delta U_{A1} = \frac{P_{A1} r_{A1} + Q_{A1} x_{A1}}{U_{\text{НОМ}}}$$

$$\Delta U_{12} = \frac{P_{12} r_{12} + Q_{12} x_{12}}{U_{\text{НОМ}}}$$

$$\Delta U_{23} = \frac{P_{23} r_{23} + Q_{23} x_{23}}{U_{\text{НОМ}}}$$

- находим наибольшее значение потери напряжения:

$$\Delta U_{\text{нб}} = U_{A3} = \Delta U_{A1} + \Delta U_{12} + \Delta U_{23}$$

- При проведении технико-экономических расчетов, необходимо оценить суммарные потери мощности:

$$\Delta P_{\Sigma} = \sum \frac{S_{ij}^2}{U_{\text{НОМ}}^2} r_{ij}$$

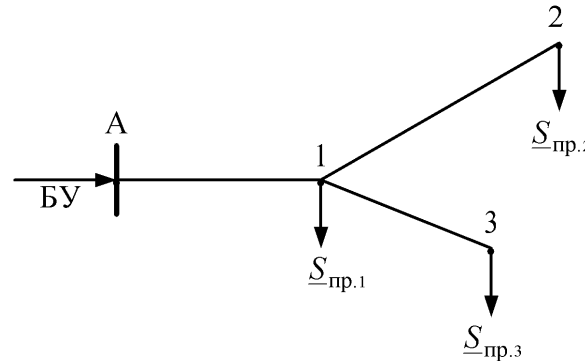
$$\Delta Q_{\Sigma} = \sum \frac{S_{ij}^2}{U_{\text{НОМ}}^2} x_{ij}$$

- Мощность в балансирующем узле:

$$\underline{S}_{\text{БУ}} = \underline{S}_{A1}$$

## 6.4 Расчет режима местной разветвленной сети

Схема разветвленной местной сети



Расчет режима заключается в определении наибольшей потери напряжения и проводится в следующем порядке:

- составим схему замещения;
- не учитывая потери, находим потоки мощности на участках сети;
- для каждого участка сети определяем потерю напряжения;
- далее сравниваем:  $\left. \begin{array}{l} \Delta U_{A1} + \Delta U_{12} \\ \Delta U_{A1} + \Delta U_{13} \end{array} \right\}$

большая из полученных сумм и есть наибольшая потеря напряжения.

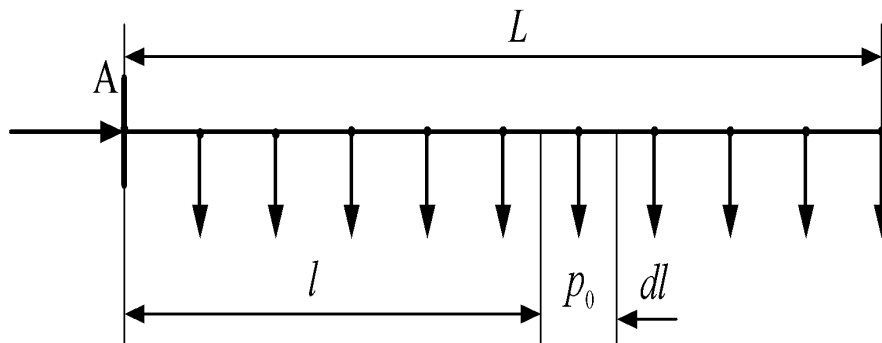
Необходимые при технико-экономических расчетах потери мощности рассчитываются как суммарные потери для всех трех участков.

## 6.5 Расчет режима сети с равномерно распределенной нагрузкой

Рассмотрим случай, когда по всей длине линии на равных расстояниях подключены одинаковые нагрузки (например, городское уличное освещение).

Справедливы все допущения, принятые для расчета местной сети. Будем считать, что реактивная мощность в сети не протекает.

*Схема сети с равномерно распределенной нагрузкой*



$P$  – полная суммарная нагрузка,  
 $p_o$  – нагрузка на единицу длины  
 линии,  
 $dl$  – элемент длины линии на  
 расстоянии  $l$  от ее начала,  
 $r_o$  – активное сопротивление  
 единицы длины линии.

Полная суммарная нагрузка:

$$P = \int_0^L p_0 dl = p_0 L$$

Общее сопротивление линии:

$$R = r_0 L$$

Потеря напряжения в элементе  $dl$ :

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

Наибольшая потеря напряжения в линии:

$$\Delta U = \int_0^L d(\Delta U) dl = \frac{P r_0}{L U_{\text{НОМ}}} \int_0^L (L-l) dl = \frac{P r_0 L^2}{2 L U_{\text{НОМ}}} = \frac{P R}{2 U_{\text{НОМ}}}$$

Равномерно распределенная нагрузка может быть заменена сосредоточенной нагрузкой, приложенной к середине нагруженного участка. Такая замена позволяет рассчитать наибольшую потерю напряжения по формуле

$$\Delta U = \frac{P R}{2 U_{\text{НОМ}}}$$

Потери мощности на элементе  $dl$  составят:

$$d(\Delta P) = \frac{[p_o(L-l)]^2 r_o dl}{U_{\text{НОМ}}^2}$$

Полные потери определяются:

$$\Delta P = \int_0^L d(\Delta P) dl = \frac{p_o^2 r_o}{U_{\text{НОМ}}^2} \int_0^L (L-l)^2 dl = \frac{p_o^2 r_o L^3}{3U_{\text{НОМ}}^2} = \frac{P^2 R}{3U_{\text{НОМ}}^2}$$

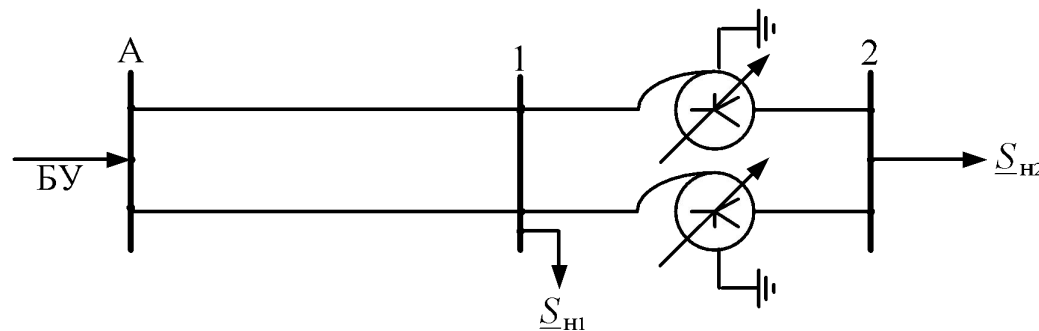
Таким образом, в линии с равномерно распределенной суммарной нагрузкой  $P$  потери мощности в 3 раза меньше, чем в линии такой же длины с сосредоточенной нагрузкой  $P$ .

Поэтому при расчетах потерь мощности линию с равномерно распределенной нагрузкой заменяют линией с сосредоточенной нагрузкой, приложенной на  $1/3$  части длины линии



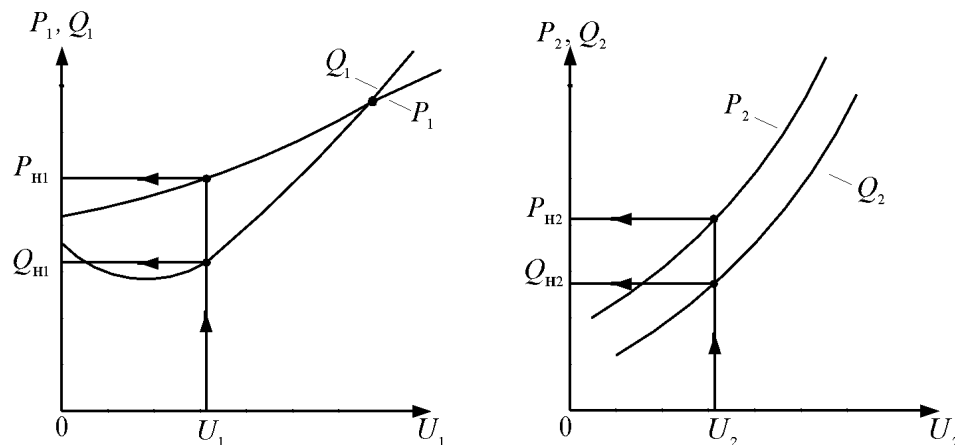
## 6.6. Расчет режима электрической сети с $U_{\text{НОМ}} \geq 220 \text{ кВ}$

Схема сети с  $U_{\text{НОМ}} \geq 220 \text{ кВ}$

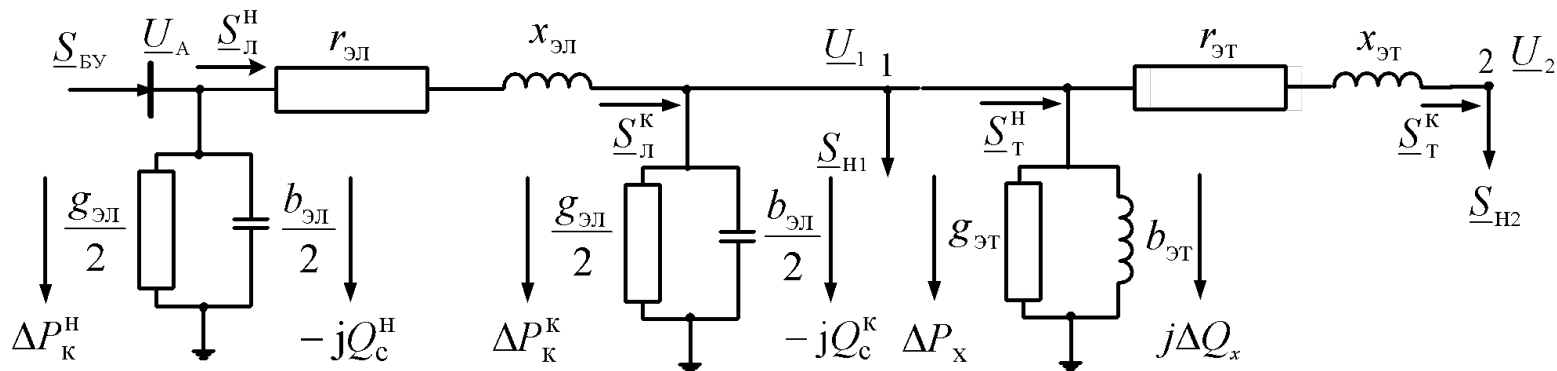


В таких сетях необходимо учитывать реальные потери мощности в поперечных элементах схемы замещения, то есть потери на корону, зарядные мощности линий и потери в магнитопроводе трансформатора рассчитывать в зависимости от величины напряжения на шинах подстанции. При этом нагрузки следует задавать статическими характеристиками.

## Статические характеристики нагрузок



## Схема замещения передачи с $U_{\text{ном}} \geq 220$ кВ



Расчет режимных параметров может быть проведен точно, если задано напряжение в конце передачи –  $\underline{U}_2$ .

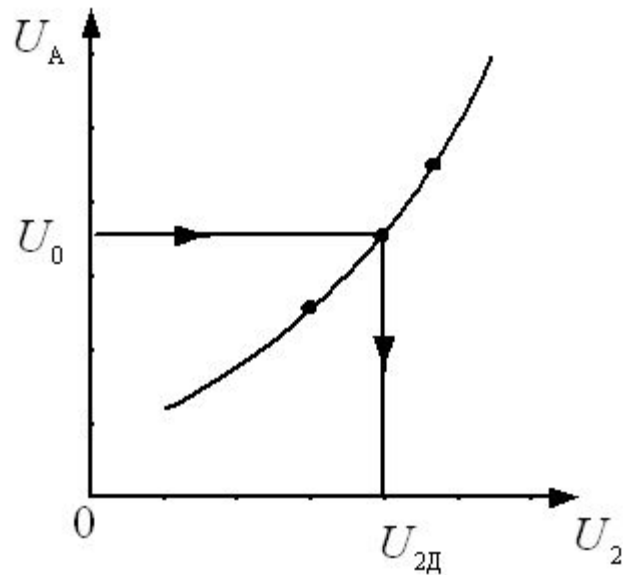
Проводится расчет **“по данным конца”**.

Мощность, поступающая из балансирующего узла

$$\underline{S}_{\text{БУ}} = P_{\text{Л}}^{\text{Н}} + jQ_{\text{Л}}^{\text{Н}} + U_{\text{А}}^2 \frac{g_{\text{ЭЛ}}}{2} - jU_{\text{Л}}^2 \frac{b_{\text{ЭЛ}}}{2}$$

При заданном напряжении в балансирующем узле А расчет следует проводить методом последовательных приближений. Можно провести расчет **«по данным начала»**. Однако на практике для расчета параметров режима в таких сетях более эффективен **метод систематизированного подбора**.

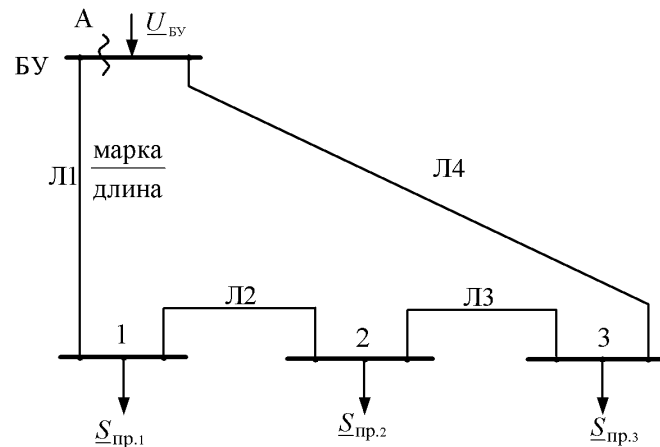
## Метод систематизированного подбора



Задается произвольно напряжение на шинах подстанции  $U_2$  и проводится расчет параметров режима «по данным конца», находится напряжение  $U_A$ . Такой расчет повторяется не менее трех раз, что позволяет построить зависимость  $U_A = f(U_2)$ . Используя ее и зная напряжение  $U_0$ , можно определить действительное значение  $U_{2Д}$ , которое при расчете «по данным конца» позволит рассчитать точные значения режимных параметров передачи.

## 6.7. Расчет режима кольцевой сети

Схема кольцевой сети



Замкнутые сети имеют ряд преимуществ по сравнению с разомкнутыми. Так как в кольцевой сети потребители могут получать электроэнергию с двух сторон, то:

- повышается надежность электроснабжения потребителей;
- снижаются потери мощности;
- улучшается режим работы сети по напряжению.

Однако в таких сетях увеличивается число линий, что требует дополнительных капиталовложений, усложняется эксплуатация.

В замкнутой электрической сети выделяют **точку потококораздела**. Это подстанция, которая получает электроэнергию по крайней мере с двух сторон. Если нагрузки имеют разные  $\text{tg}\varphi$ , то точки раздела активной и реактивной мощности могут не совпадать.

Расчет режима линии с двухсторонним питанием проводится **методом последовательных приближений**:

**I приближение** – для всех узлов схемы принимаем  $U_j = U_{\text{ном}}$  и не учитываем потери мощности на участках сети. Находим потоки мощности и определяем точку потококораздела;

**II приближение** – делим сеть на две разомкнутые по точке потококораздела, сохраняя напряжение в узлах  $U_j = U_{\text{ном}}$ , для каждой разомкнутой сети рассчитываем потоки мощности на участках с учетом потерь;

**III приближение** – определяем напряжения для всех узлов схемы. В точке потококораздела напряжение находится с двух сторон. За действительное напряжение принимается среднее арифметическое значение. Полученные напряжения в узлах сравниваются с номинальными:

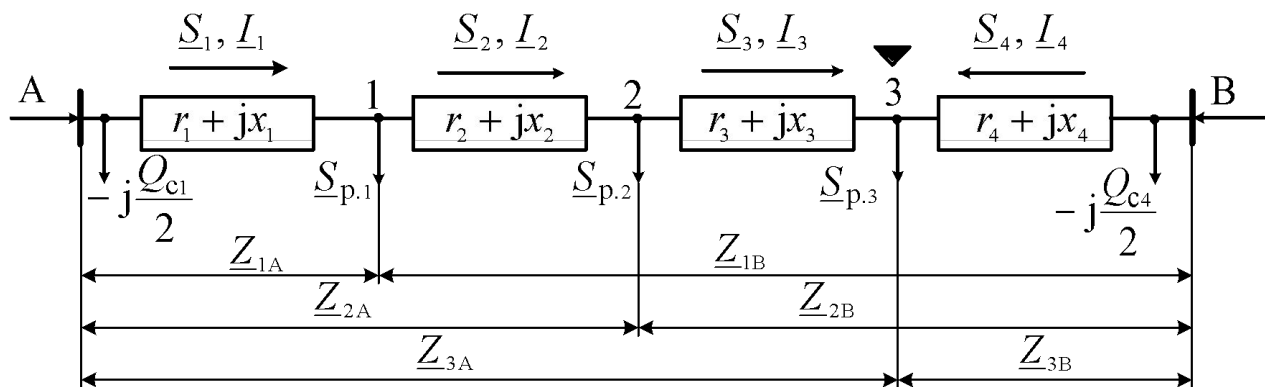
$$|U_j - U_{\text{ном}}| \leq \varepsilon$$

Если разница меньше, либо равна  $\varepsilon$  – расчет заканчивается. Если больше  $\varepsilon$ , продолжаем рассчитывать сеть во втором и третьем приближении, принимая за исходные напряжения, полученные в предыдущем расчете. Здесь  $\varepsilon$  – заранее заданная точность расчета.

Любую кольцевую сеть можно разрезать по питательному пункту и развернуть. При этом ее допустимо классифицировать как линию с двухсторонним питанием, у которой напряжения по концам равны по величине и фазе.

$$\underline{U}_A = \underline{U}_B = \underline{U}_{\text{БУ}}$$

### Схема замещения кольцевой сети



Направление токов и потоков мощности на участках схемы принято условно.

В первом приближении определим потоки мощности на участках без учета потерь мощности и точку потоко раздела:

$$\underline{S}_A = \frac{\sum_{i=1}^n \underline{S}_{p.i} \underline{Z}_{iB}^*}{\underline{Z}_{AB}^*}; \quad \underline{S}_B = \frac{\sum \underline{S}_{p.i} \underline{Z}_{iA}^*}{\underline{Z}_{AB}^*}$$

где  $n$  – количество узлов в схеме;

$\underline{Z}_{iA}^*, \underline{Z}_{iB}^*$  – комплексно-сопряженные величины сопротивлений линий от узла  $i$ , в который включена некоторая расчетная нагрузка, до источников питания А и В соответственно.

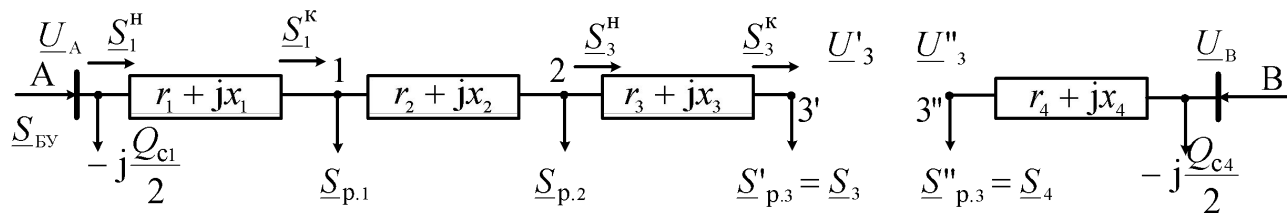
После вычисления потоков мощности на головных участках следует проверить баланс мощности в сети при  $\Delta S = 0$

$$\underline{S}_A + \underline{S}_B = \underline{S}_{p.1} + \underline{S}_{p.2} + \underline{S}_{p.3}$$

Левую часть уравнения необходимо скорректировать, если равенство не выполняется. Затем находятся потоки мощности на 2-м и 3-м участках по балансу мощности применительно к каждому узлу подключения нагрузки. Определяется **точка потоко раздела**.



## Схема кольцевой сети, разделенная по точке потокораздела



Дальнейший расчет проводится так же, как для разомкнутых сетей, «по данным начала».

**Во втором приближении** находится распределение потоков мощности с учетом потерь в направлении от точки потокораздела к шинам источников А и В.

**В третьем приближении** определяются напряжения в узлах присоединения нагрузок в направлении от источника А к точке потокораздела.

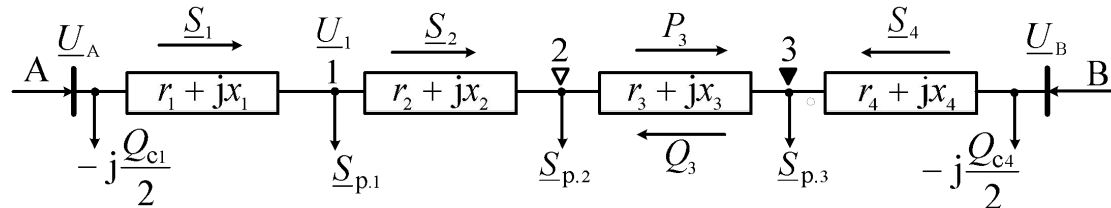
Рассчитывая аналогично две схемы, получим два значения напряжения в точке потокораздела  $U'_3$  и  $U''_3$ . Если разница между данными напряжениями будет меньше заданной точности  $\varepsilon$ , то окончательное напряжение в точке потокораздела определится:

$$U_3 = \frac{U'_3 + U''_3}{2}$$

Может оказаться, что 1-й этап расчета кольцевой сети выявит две точки потокораздела одну активной, а другую реактивной мощности.

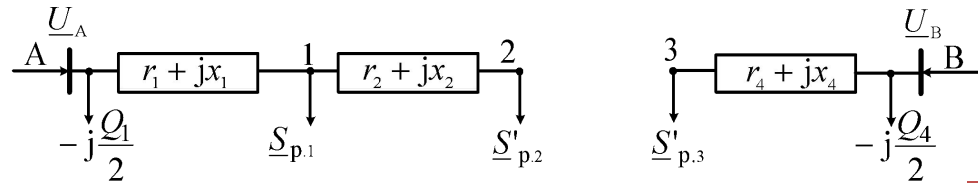
### Схема замещения кольцевой сети.

Точки потокораздела активной и реактивной мощности не совпадают



При делении сети на две разомкнутые участки, имеющие встречное направление потоков мощности, исключаются.

### Схема замещения кольцевой сети с двумя точками потокораздела



$$\underline{S}'_{p.2} = \underline{S}_2 + \Delta P_3$$

$$\Delta P_3 = \frac{P_3^2 + Q_3^2}{U_{\text{НОМ}}^2} r_3$$

$$\underline{S}'_{p.3} = \underline{S}_4 + j\Delta Q_3$$

$$\Delta Q_3 = \frac{P_3^2 + Q_3^2}{U_{\text{НОМ}}^2} x_3$$

При наличии двух точек потокораздела допустимо проводить расчет, разделив сеть по точке раздела активной мощности. При этом

$$\underline{S}'_{p.3} = P_3 - jQ_3$$

## 6.8. Расчет режима местной кольцевой сети

$$U_{\text{НОМ}} \leq 35 \text{ кВ}$$

### Допущения:

- не учитываются проводимости линий;
- напряжения в узлах приравниваются к номинальным, при этом потери мощности на участках сети равны нулю.

Расчет режима заключается в определении максимальной потери напряжения. Очевидно, что это **разница между напряжением источника и напряжением в точке потокораздела.**

## 6.9. Расчет режима однородной электрической сети

**Однородной** считается сеть, если отношение активного сопротивления к индуктивному для всех участков сети – **постоянная величина**:

$$\frac{r_i}{x_i} = a$$

$$\frac{x_i}{r_i} = \frac{1}{a}$$

Тогда при расчете потоков мощности в первом приближении

$$\underline{S}_A = \frac{\sum_{i=1}^n P_{p.i} R_{iB}}{R_{AB}} + j \frac{\sum_{i=1}^n Q_{p.i} R_{iB}}{R_{AB}}$$

$$\underline{S}_B = \frac{\sum_{i=1}^n P_{p.i} R_{iA}}{R_{AB}} + j \frac{\sum_{i=1}^n Q_{p.i} R_{iA}}{R_{AB}}$$

В однородных сетях имеет место независимое распределение активных и реактивных мощностей.

$$P_A = \frac{\sum_{i=1}^n P_{p.i} R_{iB}}{R_{AB}}$$

$$Q_A = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{p.i} R_{iB}}{R_{AB}}$$

Однородная электрическая сеть может рассчитываться как две независимые сети: одна включает только активные нагрузки, а вторая – реактивные. Такой прием называется **«расщеплением сети»**.

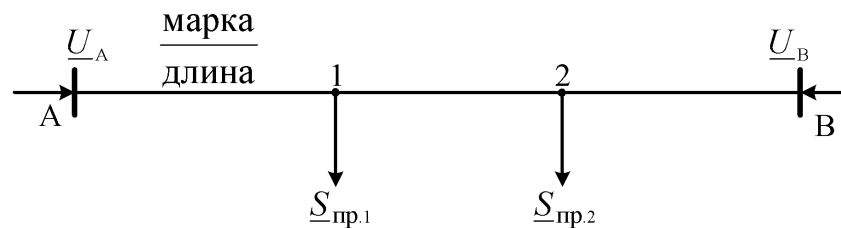
**Для однородной кольцевой сети с одинаковыми сечениями линий распределение потоков мощности рассчитывается по длинам.**

$$P_A = \frac{\sum_{i=1}^n P_{p.i} R_{iB}}{R_{AB}} = \frac{r_o \sum_{i=1}^n P_{p.i} L_{iB}}{r_o L_{AB}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{p.i} L_{iB}}{L_{AB}}$$

$$Q_A = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{p.i} X_{iB}}{X_{AB}} = \frac{x_o \sum_{i=1}^n Q_{p.i} L_{iB}}{x_o L_{AB}} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{p.i} L_{iB}}{L_{AB}}$$

## 6.10. Расчет режима линии с двусторонним питанием, когда напряжения источников не равны

Схема с двухсторонним питанием



Расчет параметров режима проводится методом последовательных приближений.

Рассматриваются две расчетные схемы. Первая схема соответствует расчетной схеме линии, при этом  $\underline{U}_A = \underline{U}_B$ .

Во второй отсутствуют расчетные нагрузки и напряжения источников не равны.

Схема замещения линии с двухсторонним питанием при  $\underline{U}_A = \underline{U}_B$

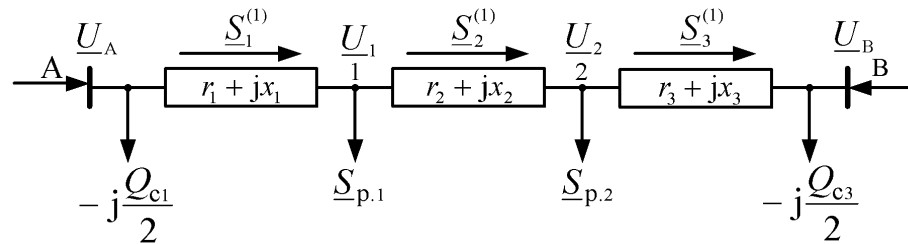
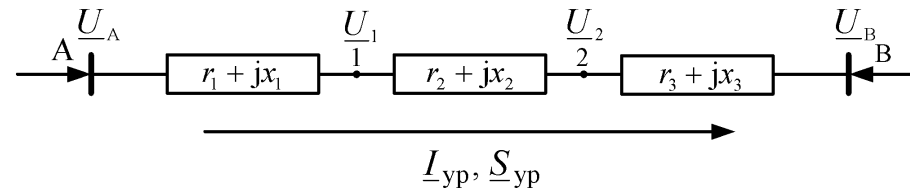


Схема замещения линии с двухсторонним питанием при  $\underline{U}_A \neq \underline{U}_B$



Для каждой схемы находятся потоки мощности, а затем, используя принцип наложения (суммирования), определяют потокораспределение в исходной схеме сети.

$$\begin{aligned}\underline{S}_1 &= \underline{S}_1^{(1)} + \underline{S}_{yp} \\ \underline{S}_2 &= \underline{S}_2^{(1)} + \underline{S}_{yp} \\ \underline{S}_3 &= \underline{S}_3^{(1)} - \underline{S}_{yp}\end{aligned}$$

$$\underline{S}_{yp} = \sqrt{3}U_{ном} I_{yp} = \frac{U_{ном} (\underline{U}_A - \underline{U}_B)}{\underline{Z}_{AB}}$$

Полученное потокораспределение позволяет установить точки (или точку) потокораздела и разделить линию с двусторонним питанием на две разомкнутые для дальнейшего расчета.

## 6.11. Расчет режима сети нескольких номинальных напряжений

**1 вариант.** Необходимо выбрать базисное напряжение, практически это одно из номинальных напряжений рассчитываемой сети; затем для элементов сети, имеющих напряжение  $U_{\text{НОМ}}$ , отличное от базисного, следует найти приведенные значения сопротивлений и проводимостей.

$$r'_{\text{л}} = r_{\text{л}} \left( \frac{U_{\text{б}}}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2 \quad \text{и} \quad x'_{\text{л}} = x_{\text{л}} \left( \frac{U_{\text{б}}}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2$$

$$b'_{\text{л}} = b_{\text{л}} \left( \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{б}}} \right)^2 \quad \text{и} \quad g'_{\text{л}} = g_{\text{л}} \left( \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{б}}} \right)^2$$

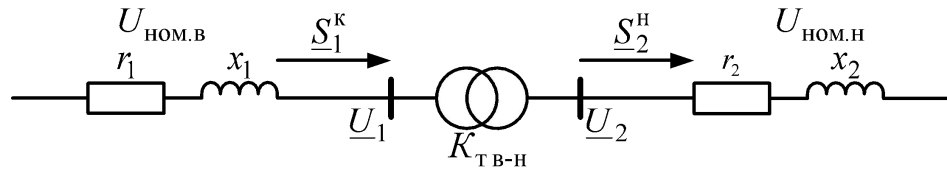
$\frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{б}}}$  – коэффициент трансформации трансформатора, определяемый при холостом ходе.

Рассчитываем режим как для сети одного напряжения. Заканчивая расчёт, для узлов, имеющих номинальное напряжение, отличное от базисного, необходимо определить действительные напряжения, а для ветвей – действительные токи

$$\underline{U} = \underline{U}' \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{б}}}; \quad \underline{I} = \underline{I}' \frac{U_{\text{б}}}{U_{\text{НОМ}}}$$



2-й вариант. Для расчета режимных параметров в расчетную схему замещения следует включать **идеальные трансформаторы**.



При включении идеального трансформатора в схему поток мощности не меняется  $\underline{S}_1^H = \underline{S}_2^K$ .

Но для дальнейшего расчета сети необходимо изменить напряжение:

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 \frac{U_{\text{НОМ Н}}}{U_{\text{НОМ В}}}$$