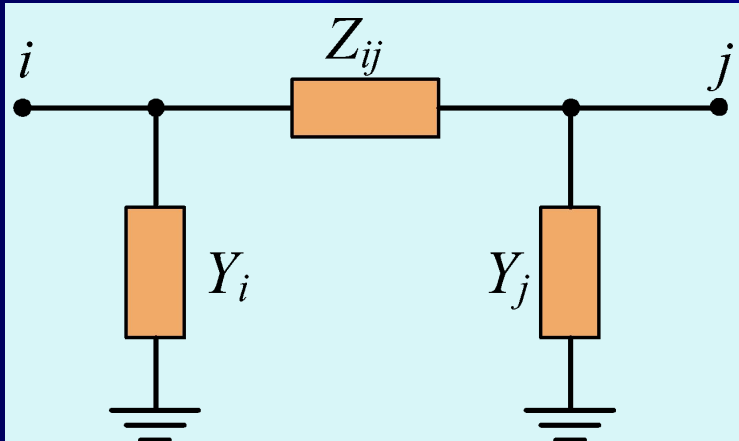


Расчет установившихся режимов

Математические модели Методы

Санкт-Петербург
НОУ ЦПКЭ, СПбГПУ
доц., к.т.н. Шаргин Ю.М.

Линии



Параметры П-схемы замещения

L до ~ 300 км:

$$Z_{ij} = \bar{Z}_0 l$$

$$Y_i = Y_j = \frac{l}{2} \bar{Y}_0$$

$L > 300$ км:

$$Z_{ij} = Z_\epsilon sh(\bar{\gamma}_0 l)$$

$$Y_i = Y_j = \frac{1}{Z_\epsilon} th\left(\bar{\gamma}_0 \frac{l}{2}\right)$$

$$\bar{Z}_0 = r_0 + jx_0$$

$$\bar{Y}_0 = g_0 + jb_0$$

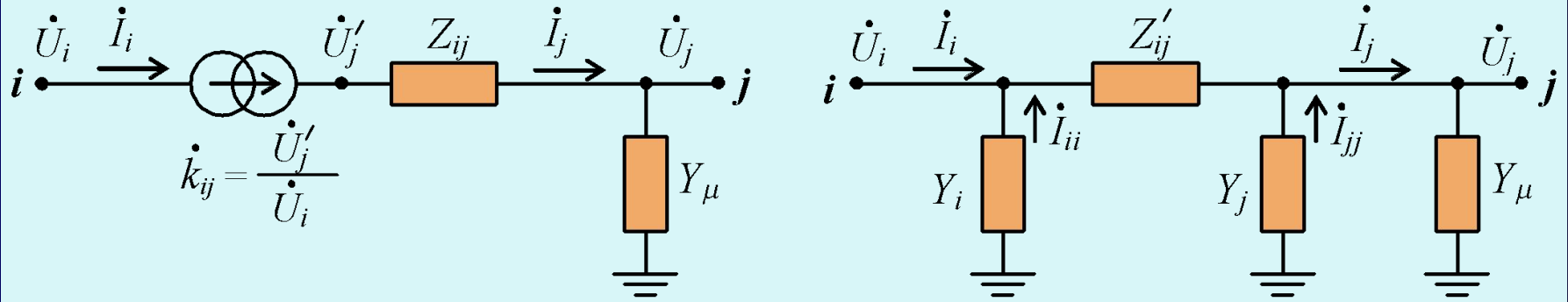
$$Z_\epsilon = \sqrt{\frac{\bar{Z}_0}{\bar{Y}_0}}$$

волновое сопротивление

$$\bar{\gamma}_0 = \sqrt{\bar{Z}_0 \bar{Y}_0}$$

коэффициент распространения электромагнитной волны

Трансформаторы



$$Y_{\mu} = g_{\mu} + jb_{\mu}$$

$$g_{\mu} = \frac{\Delta P_{x.x} [\text{кВт}]}{U_{BH.ном}^2 [\text{кВ}]} \cdot 10^{-3}$$

$$b_m = \frac{I_{x.x} \%}{100} \cdot \frac{S_{ном} [\text{МВ} \cdot \text{А}]}{U_{BH.ном}^2 [\text{кВ}]}$$

$$r_T = \frac{\Delta P_{к.з} [\text{кВт}]}{S_{ном}^2 [\text{МВ} \cdot \text{А}]} U_{BH.ном}^2 [\text{кВ}] \cdot 10^{-3} [\text{ОМ}]$$

$$x_T = \sqrt{z_T^2 - r_T^2} [\text{ОМ}]$$

$$z_T = \frac{u_k \% U_{отв}^2}{100 S_{ном}} [\text{ОМ}]$$

$$U_{отв} = U_{BH.ном} \left(1 \pm n_{отв} \frac{\Delta U_{отв} \%}{100} \right)$$

$$k_{ij} = \frac{U_{отв}}{U_{HH.ном}}$$

Параметры пассивной П-схемы замещения

Параметры П-схемы определяются через параметры Г-схемы.

$$P_i = \frac{U_i - \frac{U_j}{k_{ij}}}{Z_{ij}}, \quad P_j = \frac{U_i k_{ij} - U_j}{Z_{ij}}$$

Г-схема и П-схема эквивалентны, если

$$P_{i.\Gamma} = P_{i.\Pi}$$

$$P_{j.\Gamma} = P_{j.\Pi}$$

$$P_i = \frac{U_i - U_j}{Z'_{ij}} + U_i Y_i,$$

$$P_j = \frac{U_i - U_j}{Z'_{ij}} - U_j Y_j$$

Действительный k_{ij} ,
тогда:

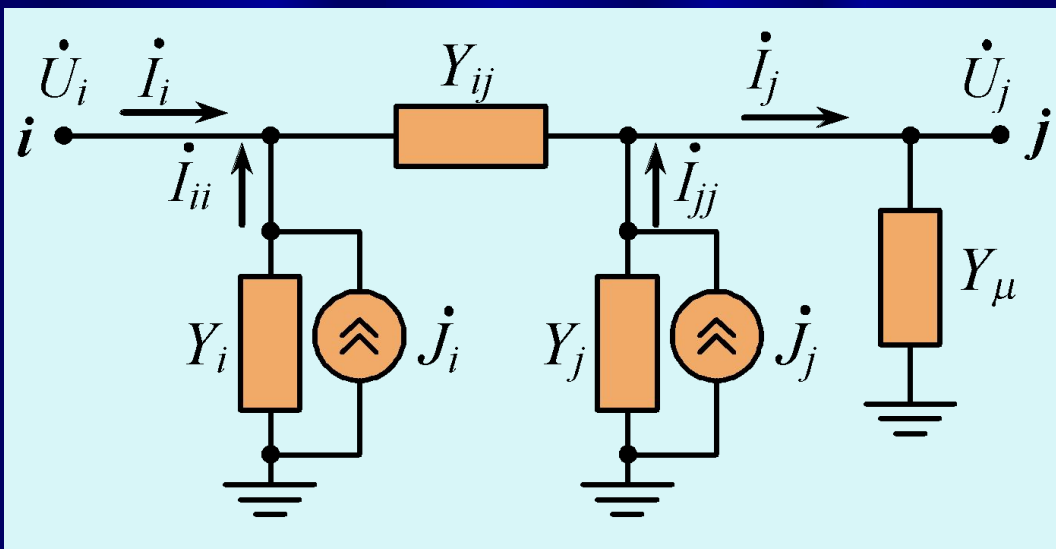
$$Z'_{ij} = \frac{Z_{ij}}{k_{ij}}$$

$$Y_i = \frac{k_{ij}}{Z_{ij}} (k_{ij} - 1) = \frac{1}{Z'_{ij}} (k_{ij} - 1)$$

$$Y_j = \frac{1}{Z_{ij}} - \frac{1}{Z'_{ij}} = \frac{1}{Z_{ij}} (1 - k_{ij})$$

П-схема позволяет заменить две или более параллельно включенные трансформаторные ветви с различными коэффициентами трансформации одной эквивалентной ветвью.

Активная П-схема замещения трансформаторной ветви



$$Y_{ij} = \frac{k_{ij}}{Z_{ij}}$$

$$Y_i = Y_{ij}(k_{ij} - 1)$$

$$Y_j = \frac{(1 - k_{ij})}{Z_{ij}}$$

Если коэффициент трансформации комплексный (при попережном регулировании напряжения автотрансформаторов), вращение векторов напряжений осуществляется за счет воздействия задающих токов:

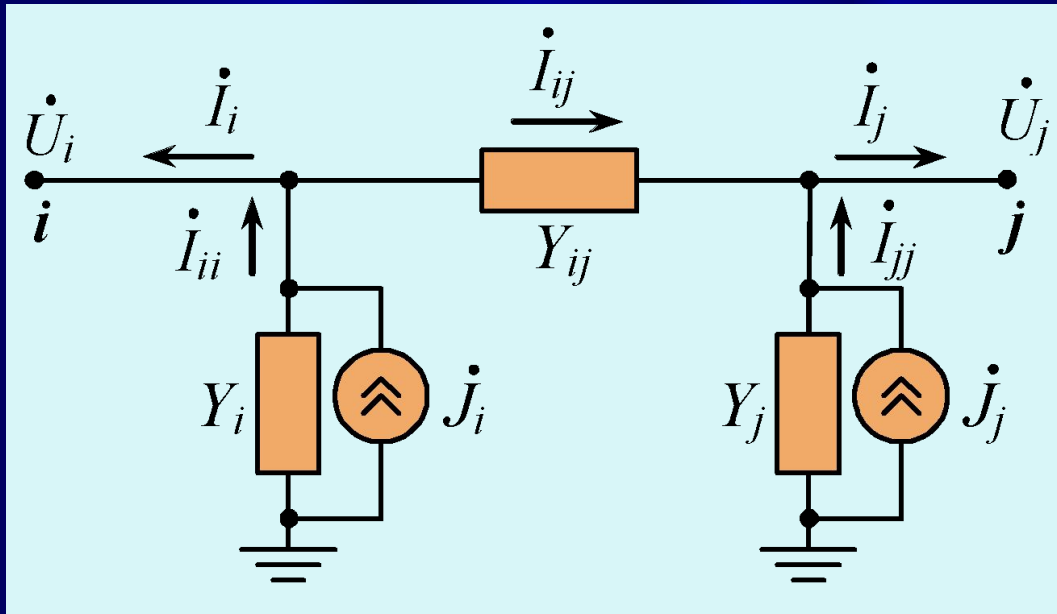
$$J_i^{\Delta} = U_j^{\Delta} Y_{ij} \left(\frac{k_{ij}}{k_{ij}^{\Delta}} - 1 \right)$$

Трехобмоточные трансформаторы и автотрансформаторы имеют трехлучевую схему замещения. Ветви среднего и низкого напряжений представляют Г-схемой с идеальными трансформаторами или активной П-схемой замещения.

То же, трансформаторы с расщепленной обмоткой НН.

$$J_j^{\Delta} = U_i^{\Delta} Y_{ij} \left(\frac{k_{ij}^{\Delta}}{k_{ij}} - 1 \right)$$

Расчет электрического режима ветвей, моделируемых П-схемой замещения



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

$$\dot{I}_{ii} = \dot{J}_i - Y_i \dot{U}_i$$

$$\dot{I}_{jj} = \dot{J}_j - Y_j \dot{U}_j$$

$$\dot{I}_i = \dot{I}_{ii} - \dot{I}_{ij}$$

$$\dot{I}_j = \dot{I}_{jj} + \dot{I}_{ij}$$

$$S_i = 3 \dot{U}_i \dot{I}_i$$

$$S_j = 3 \dot{U}_j \dot{I}_j$$

$$\Delta S_{ij} = S_i + S_j$$

Нагрузка

СХН: $P_{нг} = p(U, f)$ $Q_{нг} = q(U, f)$

- естественные
- с учетом регулирования напряжения
- для длительных режимов

$$f = f_{ном}$$

$$U = U_{кр}$$

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

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

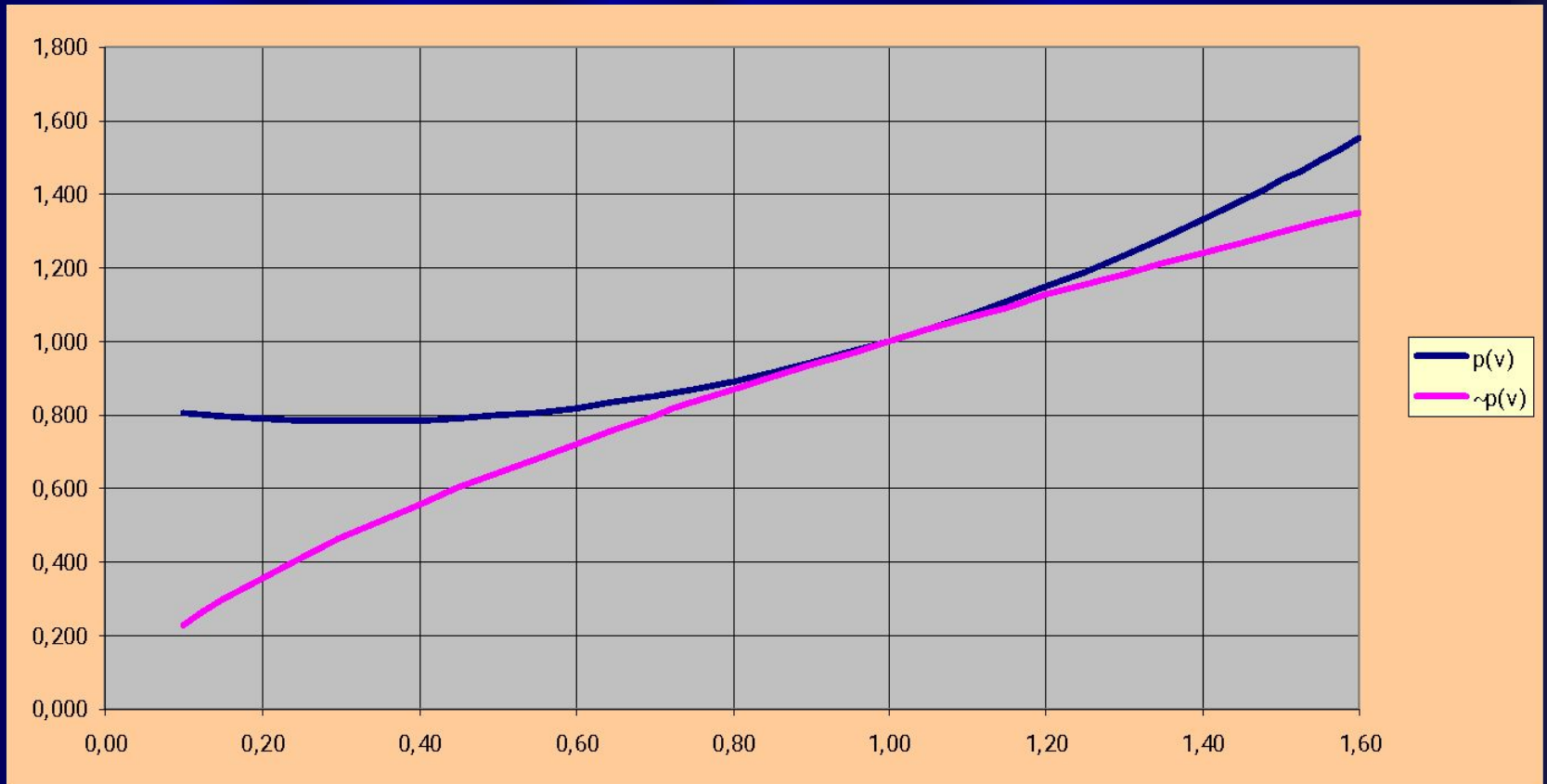
$$a_0 + a_1 + a_2 = 1,0$$

$$b_0 + b_1 + b_2 = 1,0$$

Типовые СХН

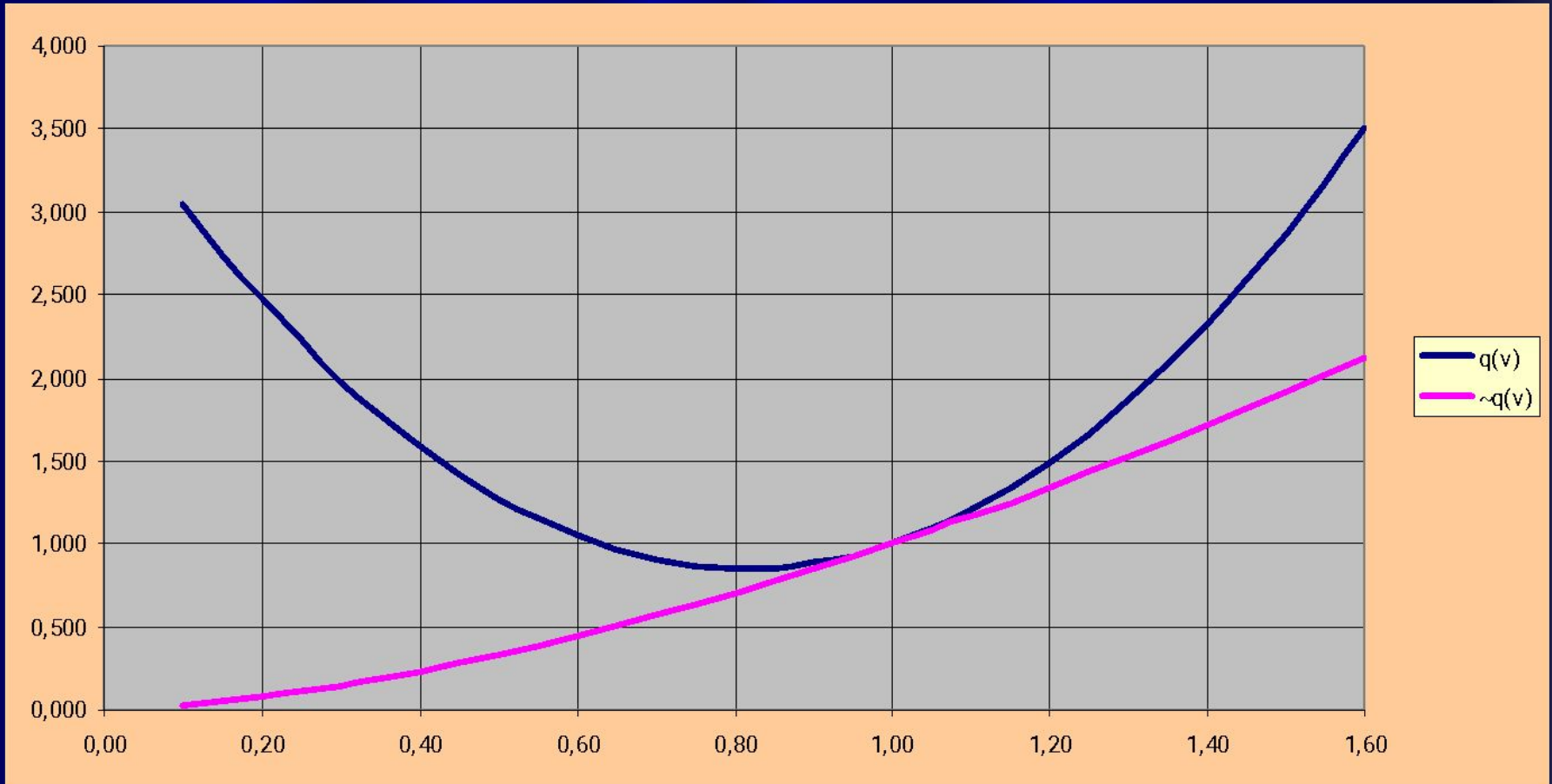
Вид характеристики	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2
Типовая на ступени 35 кВ и ниже	0,83	-0,3	0,47	4,9	-10,1	6,2
Типовая на ступени 110-220 кВ	0,83	-0,3	0,47	3,7	-7,0	4,3
Постоянная мощность	1	0	0	1	0	0
Постоянный задающий ток	0	1	0	0	1	0
Постоянная проводимость	0	0	1	0	0	1

$$P_{\text{HF}} = P_{\text{HF}}(U)$$



$$\sim p(U) = \exp\left((2a_2 + a_1) \cdot \ln\left(\frac{U}{U_{\text{HF.HOM}}} \right) \right)$$

$$Q_{\text{HT}} = Q_{\text{HT}}(U)$$



$$\sim q(U) = \exp\left((2b_2 + b_1) \cdot \ln\left(\frac{U}{U_{\text{HT.НОМ}}}\right)\right)$$

СХН с учетом регулирования напряжения

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

$\Delta U_-, \Delta U_+$

отклонения напряжения от номинального значения в сторону уменьшения и увеличения, компенсируемые АРНТ и/или действиями оперативного персонала

СХН с учетом регулирующего эффекта нагрузки

$$а) P_{нг} = P_{нг.ном} \left(a_0 + a_1 \frac{U}{U_{нг.ном}} + a_2 \left(\frac{U}{U_{нг.ном}} \right)^2 + a_3 \frac{\Delta f}{f_{ном}} \right)$$

$$б) P_{нг} = P_{нг.ном} \left(1 + K_{нг} \frac{\Delta f}{f_{ном}} \right) \quad K_{нг} = \frac{\partial P_{нг}}{\partial f} + \frac{\partial P_{нг}}{\partial U} \frac{\partial U}{\partial f}$$

где $K_{нг}$ - полный регулирующий эффект нагрузки

$$в) P_{нг} = P_{нг}(U) \left(1 + k_{нг} \frac{\Delta f}{f_{ном}} \right) \quad k_{нг} = \frac{\partial P_{нг}}{\partial f} = \frac{(P_{нг} - P_{нг.ном}) / P_{нг.ном}}{((f - f_{ном}) / f_{ном})}$$

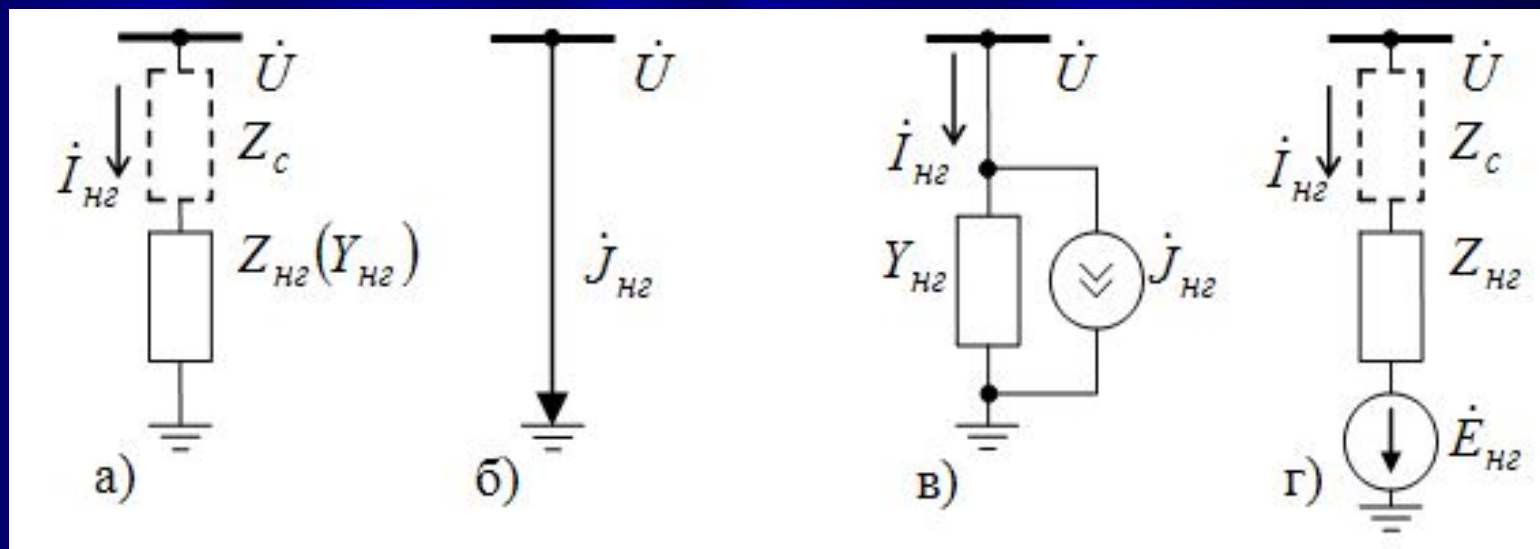
где $k_{нг}$ - регулирующий эффект нагрузки при $U = \text{const}$

Зависимость реактивной мощности нагрузки от частоты либо пренебрегают, считая мощность постоянной, либо пересчитывают по формуле

$$Q_{нг} \approx P_{нг} \operatorname{tg} \varphi_{нг} \quad \varphi_{нг} \approx \varphi_{нг.ном} \approx \text{const}$$

(старые руководящие указания по устойчивости энергосистем).

Математические модели нагрузки



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

Математические модели нагрузки

Шунт:

$$Z_{нз} = \frac{U}{I_{нз}} = \frac{3UU}{S_{нз}} = \frac{3U^2}{S_{нз}}$$

$$Y_{нз} = \frac{I_{нз}}{U} = \frac{S_{нз}}{3U^2}$$

$$S_{нз} = \frac{3U^2}{Z_{нз}} = 3U^2 Y_{нз}$$

Идеальный источник тока:

$$J_{нз} = \frac{S_{нз}}{3U}$$

Реальный источник тока:

$$J_{нз} = I_{нз} - Y_{нз} U$$

$$J_{нз} = \frac{S_{нз}}{3U} - Y_{нз} U$$

Реальный источник ЭДС:

$$-E_{нз} = U - Z I_{нз}$$

Преобразование реального источника ЭДС в реальный источник тока и наоборот:

$$J = \frac{E}{Z} = Y E$$

$$Y = \frac{1}{Z}$$

Генераторы

В зависимости от поведения генераторов в процессе балансирования режима они могут быть регулируемы и изменять свою активную и/или реактивную мощность, участвуя в сведении/замыкании баланса мощности в схеме, или нерегулируемыми с фиксированными значениями активной и реактивной мощности. Различают следующие типы генераторов:

PQ-генератор. Нерегулируемый генератор с заданными значениями генерации активной и реактивной мощности, не зависящими от напряжения в узле (от режима сети). Свободными параметрами режима генераторного узла, которые определяются расчетом, являются модуль и угол напряжения в узле, т.е. вектор напряжения.

PU-генератор. Регулируемый генератор с заданными уставками активной мощности и модуля напряжения в узле. Активная мощность генератора постоянна и не зависит от режима сети. Для поддержания заданного модуля напряжения изменяется реактивная мощность генератора в пределах регулировочного диапазона от Q_{min} до Q_{max} . Свободными параметрами режима являются реактивная мощность генератора и угол напряжения узла. При выходе на ограничения по реактивной мощности фиксируется ее граничное значение (изменяется тип генератора на PQ_{min} или PQ_{max}), свободными параметрами режима становятся модуль и угол напряжения. PU-генераторы участвуют в сведении баланса реактивной мощности в схеме.

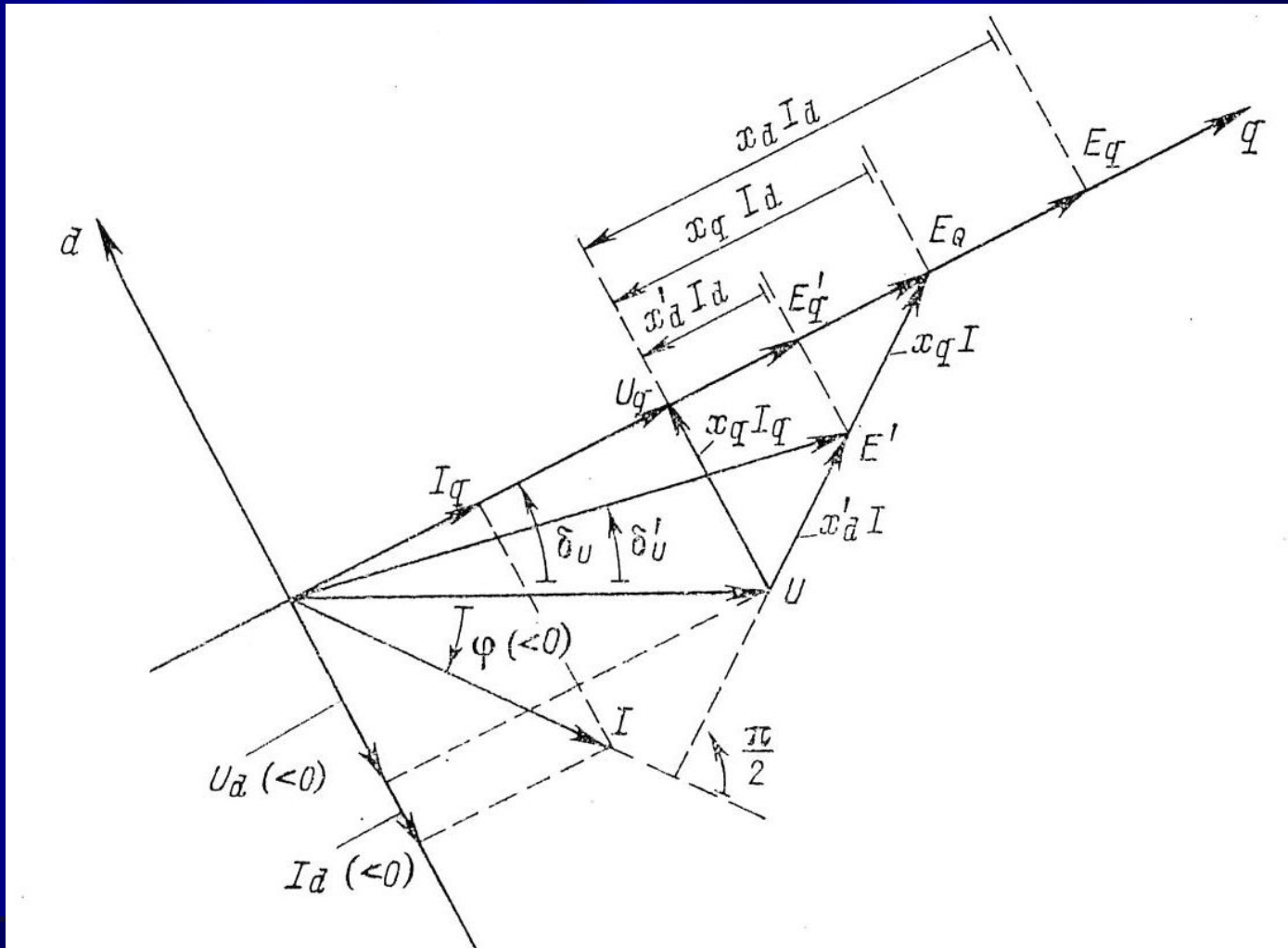
Типы генераторных узлов

PEq-генератор. Регулируемый генератор с заданными уставками активной мощности и модуля напряжения в узле. Для этого типа генератора дополнительно **должны быть заданы синхронные индуктивные сопротивления по осям d и q .** При изменении режима сети изменяются возбуждение генератора (модуль синхронной ЭДС E_q) в пределах регулировочного диапазона от E_{qmin} до E_{qmax} и угол между векторами ЭДС и напряжения узла таким образом, чтобы получить заданные значения активной мощности и модуля напряжения. Свободными параметрами режима генераторного узла, которые определяются расчетом, являются реактивная мощность генератора и угол напряжения узла.

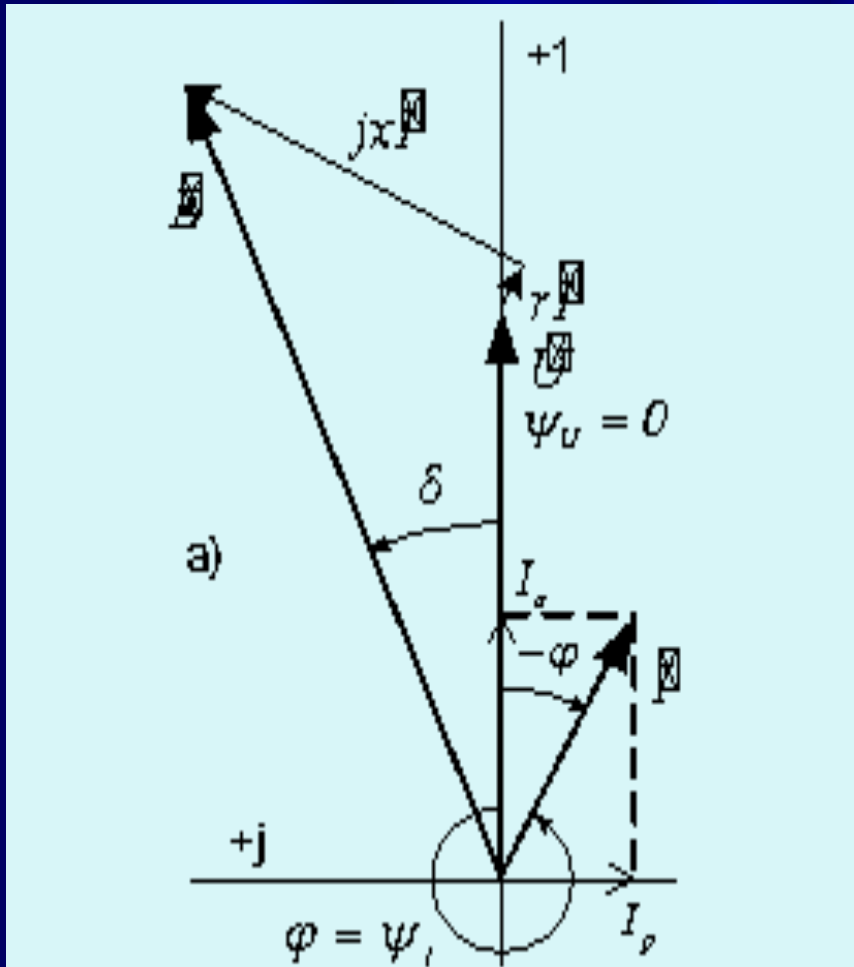
При выходе на ограничения E_{qmin} или E_{qmax} модуль E_q фиксируется, при этом свободным параметром режима становится модуль напряжения в узле, ***а реактивная мощность генератора и угол напряжения по-прежнему остаются свободными параметрами режима.*** Если ток якоря генератора превышает номинальный ток, то, если не достигнуты ограничения по возбуждению, изменяется E_q таким образом, чтобы уменьшить ток якоря до номинального, в противном случае уменьшается активная мощность генератора. *PEq-генераторы* участвуют в регулировании баланса реактивной мощности в схеме.

В отличие от *PU-генератора*, при регулировании *PEq-генератора* учитывается взаимосвязь процессов регулирования активной и реактивной мощности, изменение модуля вектора синхронной ЭДС влияет на угол и наоборот.

Типы генераторных узлов



Типы генераторных узлов

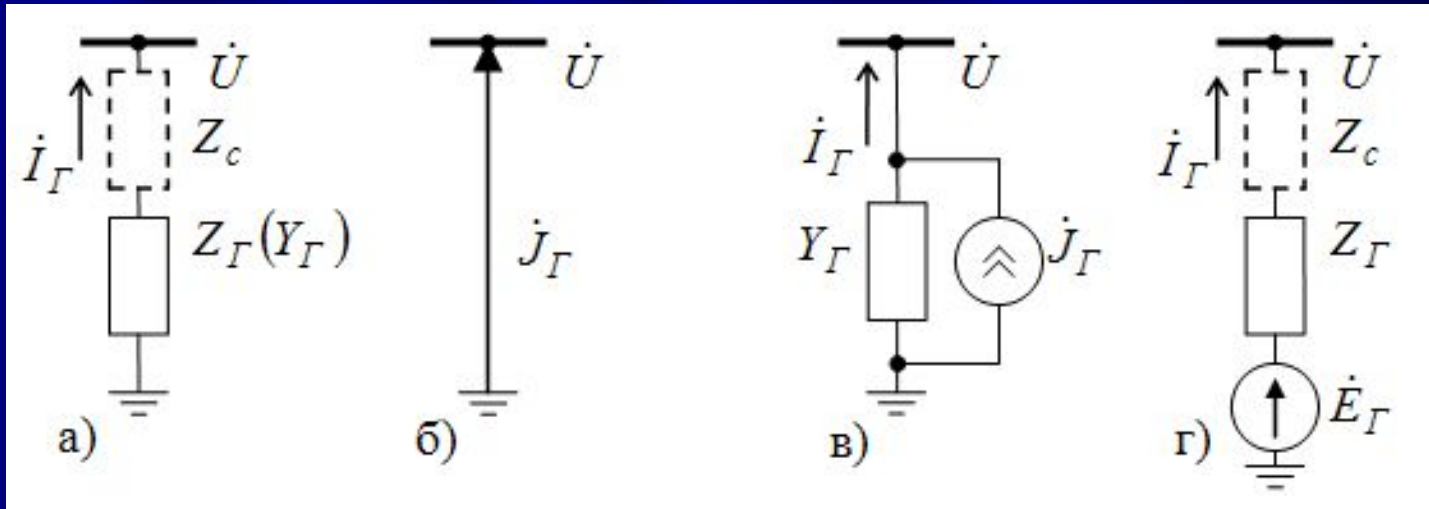


Векторная диаграмма PEq-генератора

$$E_q = \frac{x_d}{x_q} E - \frac{x_d - x_q}{x_q} U \cos(\delta_E - \delta_U)$$

$$E_{q \min} \leq E_q \leq E_{q \max}$$

Математические модели генераторов



а) шунт:

$$Z_{н2} = \frac{U}{I_{н2}} = \frac{3UU}{S_{н2}} = \frac{3U^2}{S_{н2}}$$

$$Y_{н2} = \frac{I_{н2}}{U} = \frac{S_{н2}}{3U^2}$$

б) идеальный источник тока:

$$J_{Г} = \frac{S_{н2}}{3U}$$

в) реальный источник тока:

$$J_{Г} = I_{Г} + Y_{Г}U$$

$$J_{Г} = \frac{S_{н2}}{3U} + Y_{Г}U$$

г) реальный источник ЭДС:

$$E_{Г} = U + ZI_{Г}$$

Практические методы расчета режимов энергосистем

При расчете электрических режимов используются первый и второй законы Кирхгофа

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0$$

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0$$

n - число ветвей, присоединенных к узлу

$$\sum_{k=1}^m u_k = \sum_{k=1}^m e_k$$

$$\sum_{k=1}^m U_k = \sum_{k=1}^m E_k$$

m - число ветвей, входящих в контур

Пусть электрическая схема имеет r узлов и s ветвей.

Если заданы ЭДС всех источников и параметры всех ветвей, то неизвестными являются s токов ветвей. После нахождения токов, можно вычислить напряжения в узлах

По первому закону Кирхгофа можно составить r уравнений, но только $r-1$ из них независимы друг от друга.

По второму закону Кирхгофа можно составить $s-r+1$ независимых уравнений.

Законы Кирхгофа позволяют составить систему из $(r-1)+(s-r+1)=s$ независимых уравнений, решив которую можно найти токи в s ветвях.

Для уменьшения числа уравнений можно упростить схему, используя эквивалентные преобразования, или использовать специальные методы **контурных токов**, **узловых напряжений**.

Метод узловых напряжений

По этому методу составляется система уравнений для определения напряжений узлов относительно одного из узлов схемы, выбранного в качестве опорного узла. Напряжение опорного узла выбирается произвольно и может быть равно нулю. Тогда узловые напряжения являются фазными напряжениями.

Определив искомые узловые напряжения, которые являются фазными напряжениями, можно найти напряжения на ветвях, токи ветвей, генерацию, потребление, перетоки мощности, потери в сети и другие величины, необходимые для анализа режима.

Минимальная исходная информация для проведения расчетов:

схема замещения электрической сети и параметры ее элементов,

- ✓ текущие значения коэффициентов трансформации,
- ✓ отключенные с одной или двух сторон ветви схемы,
- ✓ полная мощность нагрузки в нагрузочных узлах,
- ✓ полная мощность нерегулируемых генераторов,
- ✓ уставки активной мощности и напряжения регулируемых генераторов,
- ✓ располагаемый диапазон изменения реактивной мощности PQ -генераторов, зависящий от числа включенных в узле генераторов и их загрузки по активной мощности, или пределы изменения модуля синхронной ЭДС PEq -генераторов.

Схема замещения электрической сети

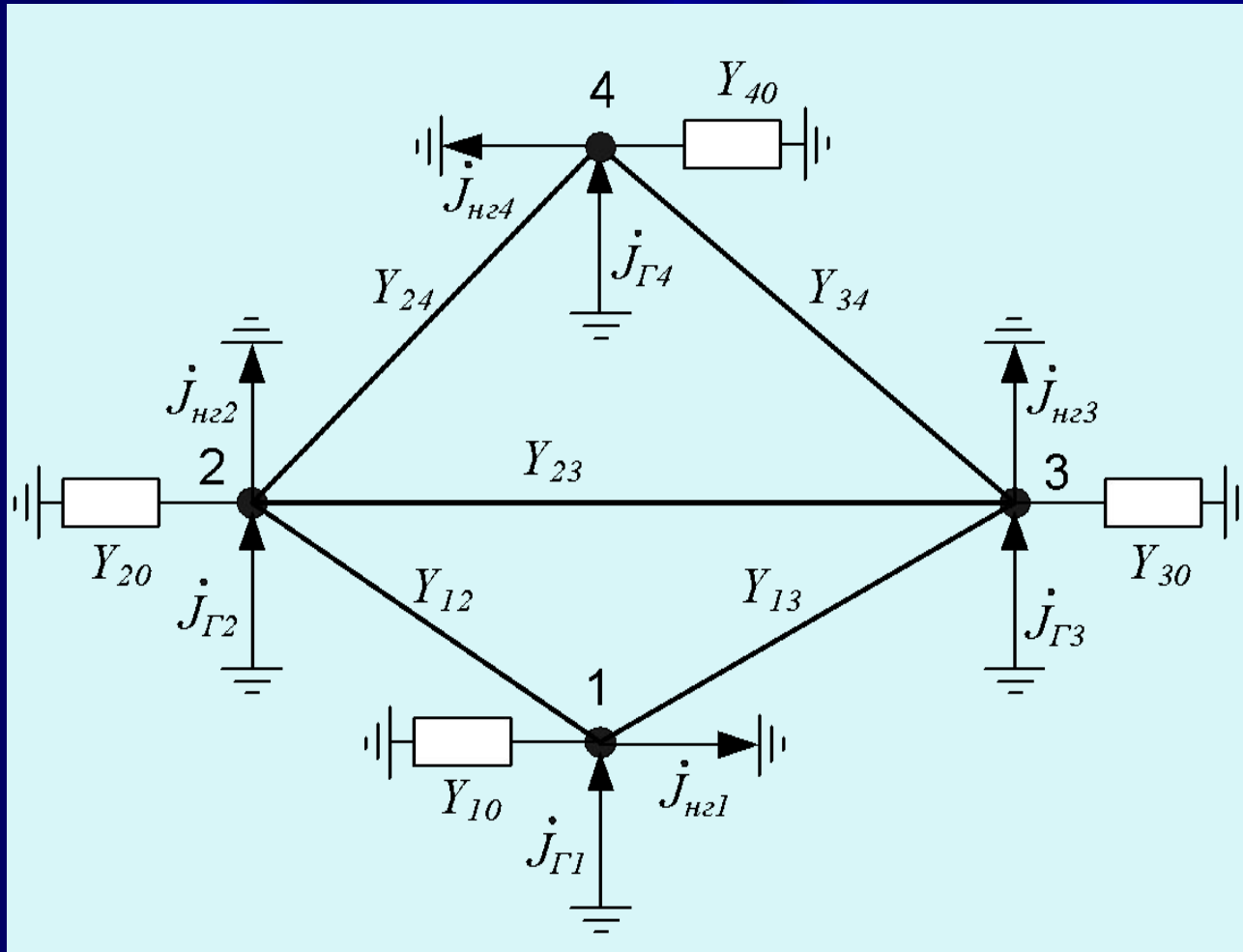


Схема имеет ПЯТЬ узлов.

Узел нулевого потенциала (“земля”) имеет номер 0.

Трансформаторы представлены П-схемой, тогда

$$Y_{12} = Y_{21}, \quad Y_{13} = Y_{31}, \quad Y_{23} = Y_{32}, \quad Y_{24} = Y_{42}, \quad Y_{34} = Y_{43}$$

Формирование системы узловых уравнений

$$Y_{12}(U_2 - U_1) + Y_{13}(U_3 - U_1) - Y_{10}U_1 + J_{\Gamma 1} - J_{нз1} = 0,$$

$$Y_{21}(U_1 - U_2) + Y_{23}(U_3 - U_2) + Y_{24}(U_4 - U_2) - Y_{20}U_2 + J_{\Gamma 2} - J_{нз2} = 0,$$

$$Y_{31}(U_1 - U_3) + Y_{32}(U_2 - U_3) + Y_{34}(U_4 - U_3) - Y_{30}U_3 + J_{\Gamma 3} - J_{нз3} = 0,$$

$$Y_{42}(U_2 - U_4) + Y_{43}(U_3 - U_4) - Y_{40}U_4 + J_{\Gamma 4} - J_{нз4} = 0.$$

$$\begin{cases} Y_{11}U_1 - Y_{12}U_2 - Y_{13}U_3 & = J_1, \\ -Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2 - Y_{23}U_3 - Y_{24}U_4 & = J_2, \\ -Y_{31}U_1 - Y_{32}U_2 + Y_{33}U_3 - Y_{34}U_4 & = J_3, \\ -Y_{42}U_2 - Y_{43}U_3 + Y_{44}U_4 & = J_4 \end{cases}$$

где $Y_{11} = Y_{12} + Y_{13} + Y_{10},$

$$Y_{22} = Y_{21} + Y_{23} + Y_{24} + Y_{20},$$

$$Y_{33} = Y_{31} + Y_{32} + Y_{34} + Y_{30},$$

$$Y_{44} = Y_{42} + Y_{43} + Y_{40}$$

$$J_i = J_{\Gamma i} - J_{нз i}$$

Постановка задачи расчета установившегося режима

Система узловых уравнений является нелинейной системой уравнений, поскольку результирующие задающие токи зависят от напряжений, которые нужно найти (слайды 14 и 18). Если в узлах схемы включены нелинейные шунты, их параметры тоже зависят от режима сети.

Нелинейная система может быть решена только методом последовательных приближений.

На первый взгляд кажется, что для получения решения достаточно в качестве начальных значений напряжений узлов задать номинальные напряжения и ориентировать вектора напряжений по оси вещественных комплексной плоскости, задать активную и реактивную мощности нагрузки, активную и реактивную мощности генераторов задать равной мощности нагрузки с учетом примерной оценки потерь мощности в сети, и применить какой-либо метод решения системы нелинейных уравнений. Итерации прекращаются по достижении заданной точности сведения балансов токов.

При такой постановке задачи итерационный процесс или расходится, или дает решение, как правило, не соответствующее условиям задачи, т.к. система нелинейных уравнений может иметь несколько решений.

Для получения решения, имеющего смысл, необходимо учесть физические свойства объекта, для которого составлена система уравнений.

Постановка задачи расчета установившегося режима

1. Чтобы получить напряжения узлов, соответствующие условиям задачи, необходимо в ходе итеративного решения системы уравнений регулировать напряжение в узлах схемы.

Уже давно установлено, что представление генерации в схеме только PQ-генераторами препятствует получению заведомо существующего решения и является причиной неоднозначного решения нелинейной системы узловых уравнений или нарушения условий существования решения. Изменение модуля вектора задающего тока PQ-генератора в пределах диапазона допустимых значений при изменении напряжения узла не контролируется и не ограничивается, а по углу этот вектор жестко привязан к вектору напряжения. Поведение PQ-генератора в итеративном процессе не соответствует поведению реального генератора при изменении режима сети.

Для регулирования напряжения в одном или нескольких узлах схемы PQ-генераторы необходимо заменить регулируемыми PU- или PEq-генераторами, которые, поддерживая заданное значение модуля напряжения, позволяют векторам задающего тока и напряжения узла поворачиваться на различные углы в пределах, определяемых заданным регулировочным диапазоном реактивной мощности генератора (возбуждения генератора). Регулируемые генераторы обеспечивают уровень напряжений, соответствующий условиям задачи, и участвуют в сведении баланса реактивных составляющих токов (мощностей) в рассматриваемой схеме.

Генераторные узлы с регулируемыми генераторами называют **опорными узлами**.

2.

$$J_i$$

$$U_i$$

$$i=1,2,3,4$$

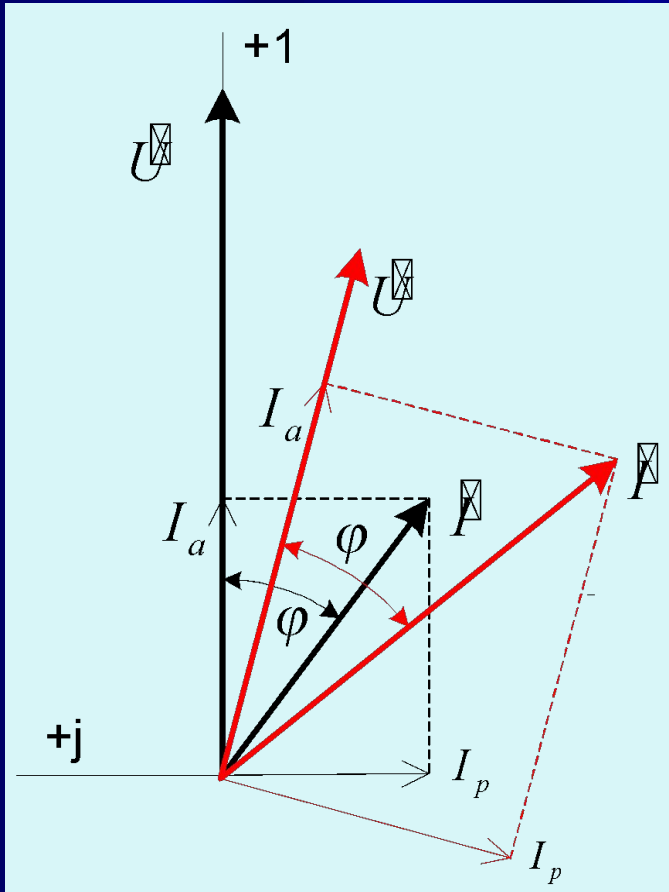
$$J_i e^{j\delta}$$

$$U_i e^{j\delta}$$

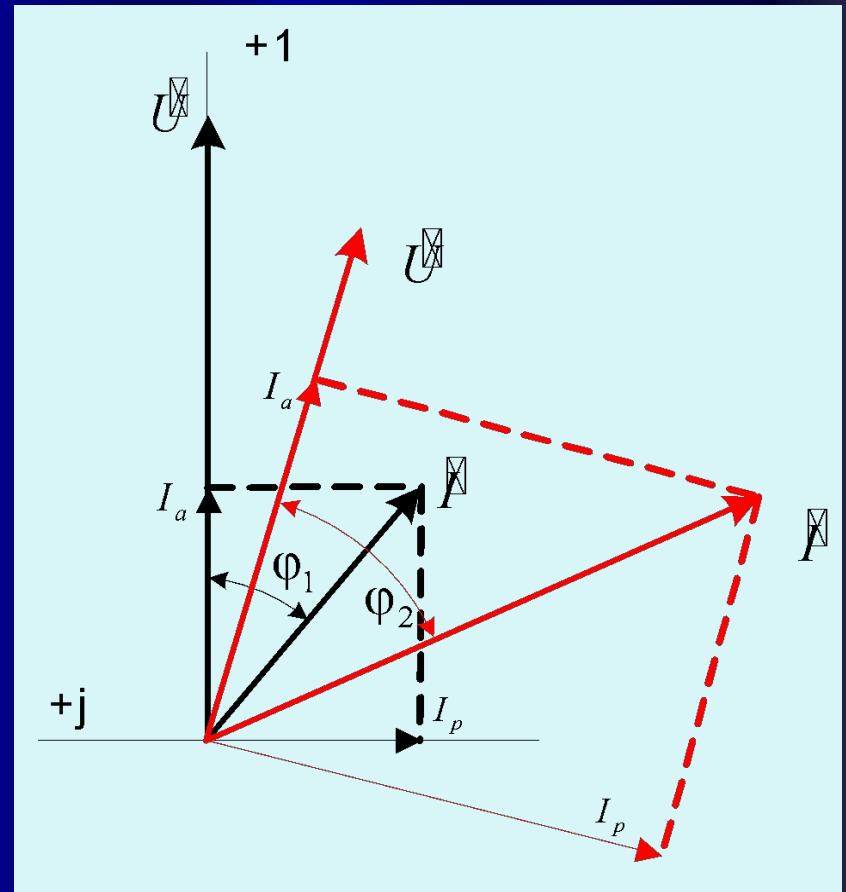
Чтобы исключить неконтролируемое вращение векторов в ходе итераций, препятствующее сведению баланса токов, и обеспечить однозначное расположение векторов задающих токов и напряжений на комплексной плоскости достаточно в одном из опорных узлов задать фазу напряжения.

Постановка задачи расчета установившегося режима

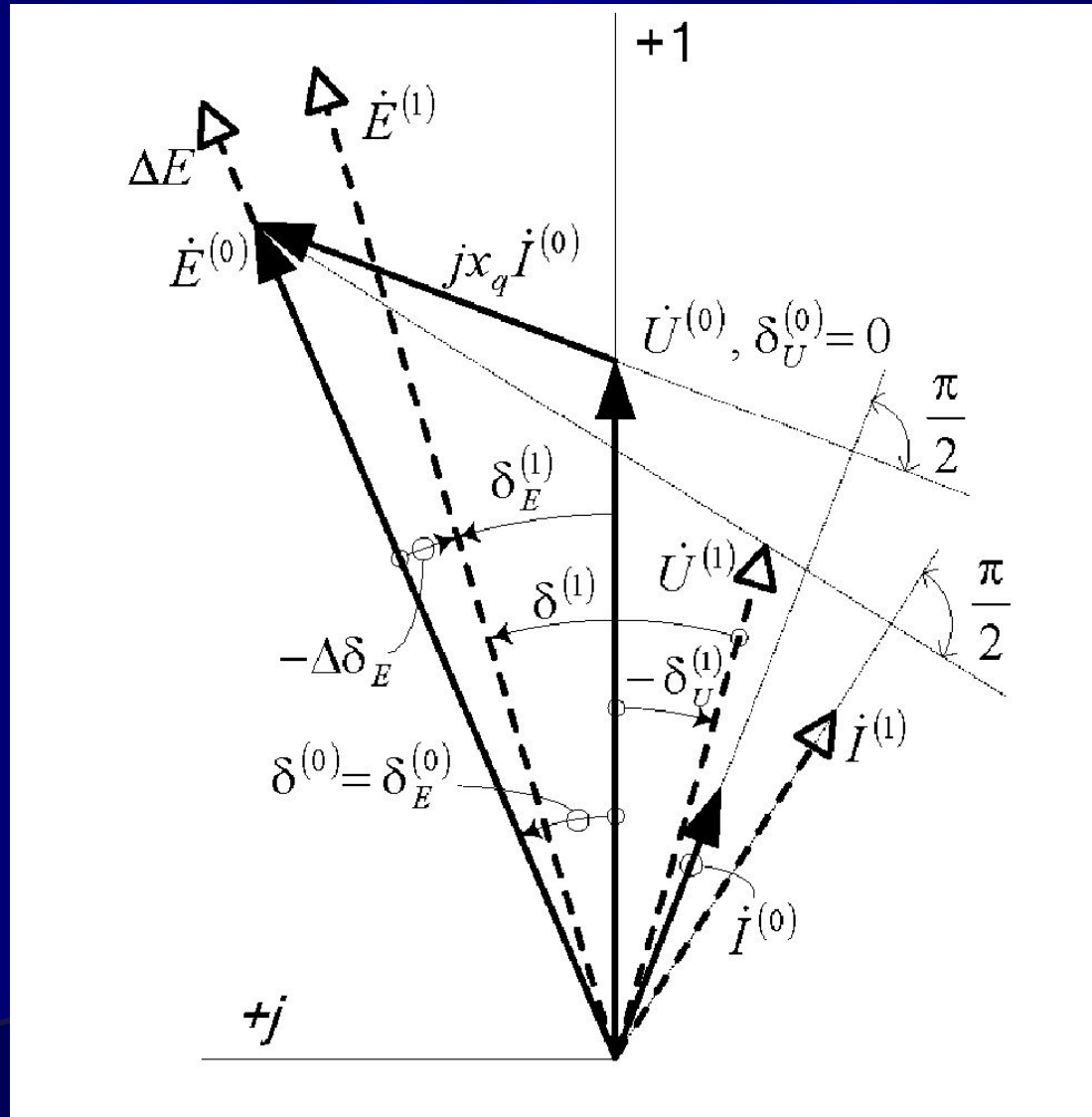
PQ-генератор



PU-генератор



Постановка задачи расчета установившегося режима Req - генератор



Базисный, балансирующий и опорный узлы

Опорный узел – узел с генератором, регулирующим напряжение в узле (тип PQ). Уравнение баланса Q *исключается*. Опорные узлы необходимо выбирать таким образом, чтобы фазовые углы между напряжениями любого узла с PQ -генератором или нагрузочного узла и ближайшего по “дереву” схемы опорного узла не превышал $\sim 30-35^\circ$. Это предупреждает затруднения, связанные с неоднозначностью и нарушением условий существования решения.

Базисный узел – узел с заданным комплексом напряжения (*исключаются* уравнения балансов P и Q). Заданы модуль напряжения и его угол, отсчитываемый от оси вещественных комплексной плоскости против часовой стрелки, или реальная и мнимая части комплекса. Обычно комплекс напряжения в базисном узле ориентируют по оси вещественных комплексной плоскости, тогда угол или мнимая часть комплекса напряжения базисного узла равны нулю.

Балансирующий узел – узел, замыкающий баланс активной мощности в схеме (*исключается* уравнение баланса P). Уравнение балансирующего узла исключается из системы узловых уравнений. Результирующий задающий ток в этом узле определяется после расчета напряжений в узлах непосредственно по его уравнению.

(Если базисный узел одновременно является балансирующим, его целесообразно называть **базисно-балансирующим, ББУ**).

NB: В базисно-балансирующем узле в отличие от балансирующего узла вектор напряжения при итеративном решении системы уравнений не может вращаться. Это нужно учитывать при выборе опорных узлов, если на линиях к ББУ получаются углы более 30° .

Система уравнений

При нумерации узлов, как правило, базисный узел получает последний номер, а балансирующий — предпоследний, это позволяет избежать перенумерации узлов при формировании системы уравнений.

Исходная система уравнений:

$$\begin{cases} Y_{11}U_1 - Y_{12}U_2 - Y_{13}U_3 & = J_1, \\ -Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2 - Y_{23}U_3 - Y_{24}U_4 & = J_2, \\ -Y_{31}U_1 - Y_{32}U_2 + Y_{33}U_3 - Y_{34}U_4 & = J_3, \\ -Y_{42}U_2 - Y_{43}U_3 + Y_{44}U_4 & = J_4 \end{cases}$$

Классическая постановка задачи расчета установившегося режима методом узловых напряжений не позволяет иметь несколько балансирующих узлов, т.к. число искомых напряжений должно быть равно числу уравнений, но можно назначить несколько базисно-балансирующих узлов. Однако в этом случае необходимо корректно задать модули и углы напряжений в этих узлах (последовательные приближения).

Узел 4 – базисный,
узел 3 – балансирующий:

$$\begin{cases} Y_{11}U_1 - Y_{12}U_2 - Y_{13}U_3 = J_1, \\ -Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2 - Y_{23}U_3 = J_2 + Y_{24}U_4, \\ -Y_{42}U_2 - Y_{43}U_3 = J_4 - Y_{44}U_4. \end{cases}$$

Узел 4 – базисно-балансирующий:

$$\begin{cases} Y_{11}U_1 - Y_{12}U_2 - Y_{13}U_3 = J_1, \\ -Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2 - Y_{23}U_3 = J_2 + Y_{24}U_4, \\ -Y_{31}U_1 - Y_{32}U_2 + Y_{33}U_3 = J_3 + Y_{34}U_4. \end{cases}$$

Методы решения системы нелинейных узловых уравнений

Основными характеристиками итерационного метода являются:

- ✓ условия и надежность сходимости к решению, “чувствительность” к точности начального приближения,
- ✓ скорость сходимости, характеризуемая необходимым числом итераций для получения решения с заданной точностью,
- ✓ характер сходимости — апериодический или колебательный,
- ✓ сложность алгоритма и потребность в ресурсах компьютера при его реализации.

При так называемом “плоском” старте в качестве начального приближения принимают номинальные напряжения в узлах, а вектора напряжений ориентируют на комплексной плоскости так же, как вектор напряжения в базисном узле. Зная напряжения в узлах, можно определить задающие токи узлов, что дает возможность решить систему уравнений и найти новые значения напряжений. В процессе итераций происходит поворот векторов задающих токов и напряжений на комплексной плоскости (уточняется ориентация) и корректируются их модули, контролируются ограничения режима регулируемых генераторов. Итерации прекращаются по достижении заданной точности расчета.

Метод Зейделя

(поузловое определение напряжений)

$$\begin{cases} U_1 = \frac{1}{Y_{11}} \left(Y_{12} U_2 + Y_{13} U_3 + \frac{S_{\Gamma 1} \bar{S}_{\text{нг}1}}{U_1} \right), \\ U_2 = \frac{1}{Y_{22}} \left(Y_{21} U_1 + Y_{23} U_3 + Y_{24} U_4 + \frac{S_{\Gamma 2} \bar{S}_{\text{нг}2}}{U_2} \right), \\ U_3 = \frac{1}{Y_{33}} \left(Y_{31} U_1 + Y_{32} U_2 + Y_{34} U_4 + \frac{S_{\Gamma 3} \bar{S}_{\text{нг}3}}{U_3} \right). \end{cases}$$

$$U_i^{(k+1)} = \frac{\sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} U_j^{(k+1)} + \sum_{j=i+1}^n Y_{ij} U_j^{(k)} + \frac{S_{\Gamma i} \bar{S}_{\text{нг}i}}{U_i}}{Y_{ii}}$$

k – номер итерации

Метод Ньютона

(одновременное определение напряжений узлов)

$$\begin{cases} w_{I1}(U_1, U_2, U_3) = Y_{11}U_1 - Y_{12}U_2 - Y_{13}U_3 - \frac{S_{\Gamma 1} - S_{H21}}{3U_1} = 0, \\ w_{I2}(U_1, U_2, U_3) = -Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2 - Y_{23}U_3 - Y_{24}U_4 - \frac{S_{\Gamma 2} - S_{H22}}{3U_2} = 0, \\ w_{I3}(U_1, U_2, U_3) = -Y_{31}U_1 - Y_{32}U_2 + Y_{33}U_3 - Y_{34}U_4 - \frac{S_{\Gamma 3} - S_{H23}}{3U_3} = 0. \end{cases}$$

$$\begin{cases} w_{S1}(U_1, U_2, U_3) = Y_{11}U_1^2 - Y_{12}U_2U_1 - Y_{13}U_3U_1 - \frac{S_{\Gamma 1} - S_{H21}}{3} = 0, \\ w_{S2}(U_1, U_2, U_3) = -Y_{21}U_1U_2 + Y_{22}U_2^2 - Y_{23}U_3U_2 - Y_{24}U_4U_2 - \frac{S_{\Gamma 2} - S_{H22}}{3} = 0, \\ w_{S3}(U_1, U_2, U_3) = -Y_{31}U_1U_3 - Y_{32}U_2U_3 + Y_{33}U_3^2 - Y_{34}U_4U_3 - \frac{S_{\Gamma 3} - S_{H23}}{3} = 0. \end{cases}$$

Функции балансов содержат сопряженный комплекс напряжения, поэтому не являются аналитическими, не имеют комплексной производной.

$$U = U' + jU''$$

$$U = Ue^{j\delta_U} = U(\cos \delta_U + j \sin \delta_U)$$

Запись уравнений в форме баланса токов с переменными U' и U''

$$w_{I'i} = g_{ii}U'_i - b_{ii}U''_i - \sum_{\substack{j=1, \\ j \neq i}}^4 (g_{ij}U'_j - b_{ij}U''_j) - \frac{P_{\Gamma i}U'_i - Q_{\Gamma i}U''_i}{3U_i^2} + \\ + \frac{P_{нzi}(U_i)U'_i - Q_{нzi}(U_i)U''_i}{3U_i^2},$$

функция баланса
активных
составляющих
токов

$$w_{I''i} = b_{ii}U'_i + g_{ii}U''_i - \sum_{\substack{j=1, \\ j \neq i}}^4 (b_{ij}U'_j + g_{ij}U''_j) - \frac{Q_{\Gamma i}U'_i + P_{\Gamma i}U''_i}{3U_i^2} + \\ + \frac{Q_{нzi}(U_i)U'_i + P_{нzi}(U_i)U''_i}{3U_i^2}, \quad \text{где } U_i^2 = U_i'^2 + U_i''^2.$$

функция баланса
реактивных
составляющих
токов

Запись уравнений в форме баланса мощности с переменными U, δ

В программах расчета установившихся режимов чаще используют систему уравнений в форме баланса мощности с переменными U, δ , при этом функции балансов полной мощности разделяются на балансы активной и реактивной мощностей:

$$U_i \left[\cos \delta_i \sum_j U_j (g_{ij} \cos \delta_j - b_{ij} \sin \delta_j) + \sin \delta_i \sum_j U_j (g_{ij} \sin \delta_j + b_{ij} \cos \delta_j) - U_i \sum_j g_{ij} \right] - P_i = 0;$$

$$U_i \left[\cos \delta_i \sum_j U_j (g_{ij} \sin \delta_j + b_{ij} \cos \delta_j) - \sin \delta_i \sum_j U_j (g_{ij} \cos \delta_j - b_{ij} \sin \delta_j) - U_i \sum_j b_{ij} \right] - Q_i = 0.$$

$\delta_{i,j}$ -

угол, отсчитываемый от вектора напряжения i -го или j -го узла к вектору напряжения базисного узла против часовой стрелки

Эта форма записи позволяет уменьшить порядок системы узловых уравнений, для узлов с P -генераторами исключаются уравнения баланса реактивной мощности. При выходе на ограничения по Q и смене типа генераторных узлов требуется перестроение системы уравнений.

Запись уравнений в форме баланса мощности с переменными U, δ

Дальнейшего снижения трудоемкости расчета можно достигнуть с помощью следующей замены переменных:

$$\eta = \operatorname{tg} (\delta_{i; j} / 2) \quad \text{и далее}$$

$$\sin \delta_{i; j} = \frac{1 - \eta^2}{1 + \eta^2};$$

$$\cos \delta_{i; j} = \frac{2 \eta}{1 + \eta^2}.$$

Тем самым устраняется необходимость многократного обращения к подпрограммам вычисления тригонометрических функций, и далее задача решается в переменных U, η . Окончательно фазы напряжений в узлах определяются после сходимости к решению.

$$\left[\frac{\partial \mathbf{W}}{\partial \mathbf{U}} \right]_{\mathbf{U}^{(k)}} \Delta \mathbf{U} = -\mathbf{W}(\mathbf{U}^{(k)})$$

вектор небалансов
на k-й итерации

$$\left[\frac{\partial \mathbf{W}}{\partial \mathbf{U}} \right]_{\mathbf{U}^{(k)}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{W}_{I'}}{\partial \mathbf{U}'} & \frac{\partial \mathbf{W}_{I'}}{\partial \mathbf{U}''} \\ \frac{\partial \mathbf{W}_{I''}}{\partial \mathbf{U}'} & \frac{\partial \mathbf{W}_{I''}}{\partial \mathbf{U}''} \end{bmatrix}_{\mathbf{U}^{(k)}}$$

матрица Якоби
на k-й итерации

$$\mathbf{W}(\mathbf{U}^{(k)}) = \begin{bmatrix} \mathbf{W}(\mathbf{U}'^{(k)}) \\ \mathbf{W}(\mathbf{U}''^{(k)}) \end{bmatrix}$$

$$\Delta \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{U}' \\ \Delta \mathbf{U}'' \end{bmatrix}$$

вектор поправок напряжений

$$\mathbf{W}(\mathbf{U}'^{(k)}) = \begin{bmatrix} w_{I'1}^{(k)} \\ w_{I'2}^{(k)} \\ w_{I'3}^{(k)} \end{bmatrix}$$

$$\Delta \mathbf{U}' = \left(\mathbf{U}'^{(k+1)} - \mathbf{U}'^{(k)} \right) = \begin{bmatrix} U_1'^{(k+1)} - U_1'^{(k)} \\ U_2'^{(k+1)} - U_2'^{(k)} \\ U_3'^{(k+1)} - U_3'^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta U_1' \\ \Delta U_2' \\ \Delta U_3' \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{W}(\mathbf{U}''^{(k)}) = \begin{bmatrix} w_{I''1}^{(k)} \\ w_{I''2}^{(k)} \\ w_{I''3}^{(k)} \end{bmatrix}$$

$$\Delta \mathbf{U}'' = \left(\mathbf{U}''^{(k+1)} - \mathbf{U}''^{(k)} \right) = \begin{bmatrix} U_1''^{(k+1)} - U_1''^{(k)} \\ U_2''^{(k+1)} - U_2''^{(k)} \\ U_3''^{(k+1)} - U_3''^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta U_1'' \\ \Delta U_2'' \\ \Delta U_3'' \end{bmatrix}$$

k – номер итерации

Матрицы-клетки матрицы Якоби

$$\frac{\partial \mathbf{W}_{I'}}{\partial \mathbf{U}'} = \begin{bmatrix} \frac{\partial w_{I'1}}{\partial U'_1} & \frac{\partial w_{I'1}}{\partial U'_2} & \frac{\partial w_{I'1}}{\partial U'_3} \\ \frac{\partial w_{I'2}}{\partial U'_1} & \frac{\partial w_{I'2}}{\partial U'_2} & \frac{\partial w_{I'2}}{\partial U'_3} \\ \frac{\partial w_{I'3}}{\partial U'_1} & \frac{\partial w_{I'3}}{\partial U'_2} & \frac{\partial w_{I'3}}{\partial U'_3} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial \mathbf{W}_{I'}}{\partial \mathbf{U}''} = \begin{bmatrix} \frac{\partial w_{I'1}}{\partial U''_1} & \frac{\partial w_{I'1}}{\partial U''_2} & \frac{\partial w_{I'1}}{\partial U''_3} \\ \frac{\partial w_{I'2}}{\partial U''_1} & \frac{\partial w_{I'2}}{\partial U''_2} & \frac{\partial w_{I'2}}{\partial U''_3} \\ \frac{\partial w_{I'3}}{\partial U''_1} & \frac{\partial w_{I'3}}{\partial U''_2} & \frac{\partial w_{I'3}}{\partial U''_3} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial \mathbf{W}_{I''}}{\partial \mathbf{U}'} = \begin{bmatrix} \frac{\partial w_{I''1}}{\partial U'_1} & \frac{\partial w_{I''1}}{\partial U'_2} & \frac{\partial w_{I''1}}{\partial U'_3} \\ \frac{\partial w_{I''2}}{\partial U'_1} & \frac{\partial w_{I''2}}{\partial U'_2} & \frac{\partial w_{I''2}}{\partial U'_3} \\ \frac{\partial w_{I''3}}{\partial U'_1} & \frac{\partial w_{I''3}}{\partial U'_2} & \frac{\partial w_{I''3}}{\partial U'_3} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial \mathbf{W}_{I''}}{\partial \mathbf{U}''} = \begin{bmatrix} \frac{\partial w_{I''1}}{\partial U''_1} & \frac{\partial w_{I''1}}{\partial U''_2} & \frac{\partial w_{I''1}}{\partial U''_3} \\ \frac{\partial w_{I''2}}{\partial U''_1} & \frac{\partial w_{I''2}}{\partial U''_2} & \frac{\partial w_{I''2}}{\partial U''_3} \\ \frac{\partial w_{I''3}}{\partial U''_1} & \frac{\partial w_{I''3}}{\partial U''_2} & \frac{\partial w_{I''3}}{\partial U''_3} \end{bmatrix}$$

Элементы матриц-клеток

Диагональные:

$$\frac{\partial w_{\Gamma i}}{\partial U'_i} = g_{ii} - \frac{P_{\Gamma i}(U_i^2 - 2U_i'^2) - 2Q_{\Gamma i}U_i'U''}{3U_i^4} + \frac{\partial}{\partial U'_i} \left[\frac{P_{\text{нги}}(U_i)U'_i - Q_{\text{нги}}(U_i)U''}{3U_i^2} \right]$$

$$\frac{\partial w_{\Gamma i}}{\partial U''_i} = -b_{ii} + \frac{Q_{\Gamma i}(U_i^2 - 2U_i''^2) + 2P_{\Gamma i}U_i'U''}{3U_i^4} + \frac{\partial}{\partial U''_i} \left[\frac{P_{\text{нги}}(U_i)U'_i - Q_{\text{нги}}(U_i)U''}{3U_i^2} \right]$$

$$\frac{\partial w_{\Gamma i}}{\partial U'_i} = b_{ii} - \frac{Q_{\Gamma i}(U_i^2 - 2U_i'^2) - 2P_{\Gamma i}U_i'U''}{3U_i^4} + \frac{\partial}{\partial U'_i} \left[\frac{Q_{\text{нги}}(U_i)U'_i + P_{\text{нги}}(U_i)U''}{3U_i^2} \right]$$

$$\frac{\partial w_{\Gamma i}}{\partial U''_i} = g_{ii} - \frac{P_{\Gamma i}(U_i^2 - 2U_i''^2) - 2Q_{\Gamma i}U_i'U''}{3U_i^4} + \frac{\partial}{\partial U''_i} \left[\frac{Q_{\text{нги}}(U_i)U'_i + P_{\text{нги}}(U_i)U''}{3U_i^2} \right]$$

Недиагональные:

$$\frac{\partial w_{\Gamma i}}{\partial U'_j} = -g_{ij}$$

$$\frac{\partial w_{\Gamma i}}{\partial U''_j} = b_{ij}$$

$$\frac{\partial w_{\Gamma i}}{\partial U'_j} = -b_{ij}$$

$$\frac{\partial w_{\Gamma i}}{\partial U''_j} = -g_{ij}$$

Каждая итерация состоит из нескольких шагов:

1. Вычисляется вектор небалансов. Если достигнута заданная точность сведения баланса, итерации прекращаются.
2. Вычисляются элементы матрицы Якоби с контролем ограничений режима регулируемых генераторов.
3. Решается система уравнений методом Гаусса и определяется вектор поправок.
4. Определяются напряжения узлов.

Расчет установившегося режима без балансирующего узла

$$\begin{cases} Y_{11}U_1 - Y_{12}U_2 - Y_{13}U_3 & = J_1, \\ -Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2 - Y_{23}U_3 - Y_{24}U_4 & = J_2, \\ -Y_{31}U_1 - Y_{32}U_2 + Y_{33}U_3 - Y_{34}U_4 & = J_3, \\ -Y_{42}U_2 - Y_{43}U_3 + Y_{44}U_4 & = J_4 \end{cases}$$

Используется полная исходная система узловых уравнений. Эта система уравнений преобразуется к системе из 8 уравнений балансов активных и реактивных составляющих токов или мощностей.

В базисном узле фиксируется только положение вектора напряжения (угол или мнимая составляющая).

Обычно совмещают вектор напряжения в базисном узле (узел 4) с осью вещественных, тогда угол или мнимая составляющая комплекса напряжения в этом узле равна нулю. Число переменных получается на единицу меньше числа уравнений. Вместо нее вводится новая переменная — относительное отклонение частоты от номинальной

$$\Delta f_* = \frac{f - f_{ном}}{f_{ном}}$$

Система уравнений для определения поправок реальной и мнимой составляющих напряжений и отклонения частоты принимает вид:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial w_{I'1}}{\partial U'_1} & \boxtimes & \frac{\partial w_{I'1}}{\partial U''_3} & \frac{\partial w_{I'1}}{\partial \Delta f_*} \\ \boxtimes & \boxtimes & \boxtimes & \boxtimes \\ \frac{\partial w_{I''3}}{\partial U''_1} & \boxtimes & \frac{\partial w_{I''3}}{\partial U''_3} & \frac{\partial w_{I''3}}{\partial \Delta f_*} \\ \frac{\partial w_{I''4}}{\partial U''_1} & \boxtimes & \frac{\partial w_{I''4}}{\partial U''_3} & \frac{\partial w_{I''4}}{\partial \Delta f_*} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta U'_1 \\ \Delta U''_3 \\ \Delta f_* \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} w_{I'1} \\ w_{I''3} \\ w_{I''4} \end{bmatrix}$$

Если активные мощности генераторов постоянны, режим балансируется за счет регулирующего эффекта нагрузки, поэтому СХН должны учитывать зависимость нагрузки от частоты, кроме того, целесообразно учесть зависимость реактивных параметров элементов схемы замещения от частоты:

$$b(f) = \frac{b}{1 + \Delta f_*}$$

Для регулирования частоты можно выделить один или несколько генераторов и распределять возникающий при отклонениях частоты небаланс активной мощности между этими генераторами:

$$P_G(f) = P_G - K_c P_{G.\text{ном}} \Delta f_*, \quad P_{G.\text{min}} \leq P_G(f) \leq P_{G.\text{max}}$$

$$K_c = \frac{(P_G - P_{G.\text{ном}}) / P_{G.\text{ном}}}{(f - f_{\text{ном}}) / f_{\text{ном}}}$$

- коэффициент крутизны статической характеристики генератора по частоте

Метод эквивалентных преобразований

Если заданы параметры элементов схемы замещения, причем генерация и нагрузка представлены реальными источниками ЭДС (тока), напряжения узлов и токи продольных и поперечных ветвей схемы можно найти, используя эквивалентные преобразования схемы замещения.

Преобразование является эквивалентным, если электрические режимы узлов и ветвей в непреобразованной части схемы до и после какого-либо эквивалентного преобразования одинаковы.

Задачу сведения балансов токов (балансов активной и реактивной мощностей в узлах схемы) при итеративном расчете установившегося режима с использованием метода эквивалентных преобразований можно решить, если найти способ регулирования источников ЭДС на поддержание заданных уставок активной мощности и напряжения в процессе итераций.

Метод эквивалентных преобразований

Характеристики:

- Безматричный метод, не требует формирования, хранения и обработки слабозаполненных матрицы узловых проводимостей и матрицы Якоби при решении системы узловых уравнений.
- Применим для расчета как установившихся режимов, так и мгновенных (на шаге численного интегрирования) электрических режимов при расчете электромеханических переходных процессов.
- Позволяет построить компактный алгоритм и вычислительное ядро программы в комплексном виде.
- Обеспечивает простую и эффективную обработку разделения схемы на произвольное число частей, вплоть до отключения отдельных узлов, с последующим поочередным или одновременным слиянием частей.
- Позволяет реализовать корректное эквивалентирование схемы исключением части узлов, поскольку в основе самого метода расчета установившегося режима лежит исключение узлов.
- Обладает надежной сходимостью при балансировании установившихся режимов и дает однозначное решение за счет применения адекватной PEq -модели генератора. Эта модель органично связана с динамической моделью генератора, обеспечивая корректный расчет начальных условий на основе векторной диаграммы генератора.

Метод эквивалентных преобразований

- Не критичен к начальному приближению, от начального приближения слабо зависит число итераций, необходимых для поворота векторов ЭДС на требуемые углы при балансировании установившегося режима.
- Предоставляет полный и точный контроль ограничений режима генераторов при балансировании установившегося режима.
- Дает возможность реализовать различные законы управления регулирующими компенсирующими устройствами в ходе итеративного балансирования режима с полным и точным контролем ограничений их режима.
- Недостатком метода эквивалентных преобразований является большое число итераций, необходимое для балансирования установившегося режима, по сравнению с решением системы узловых уравнений методом Ньютона. На расчет задачи может потребоваться несколько сотен итераций.

Метод эквивалентных преобразований

Расчет электрического режима методом эквивалентных преобразований состоит из следующих этапов:

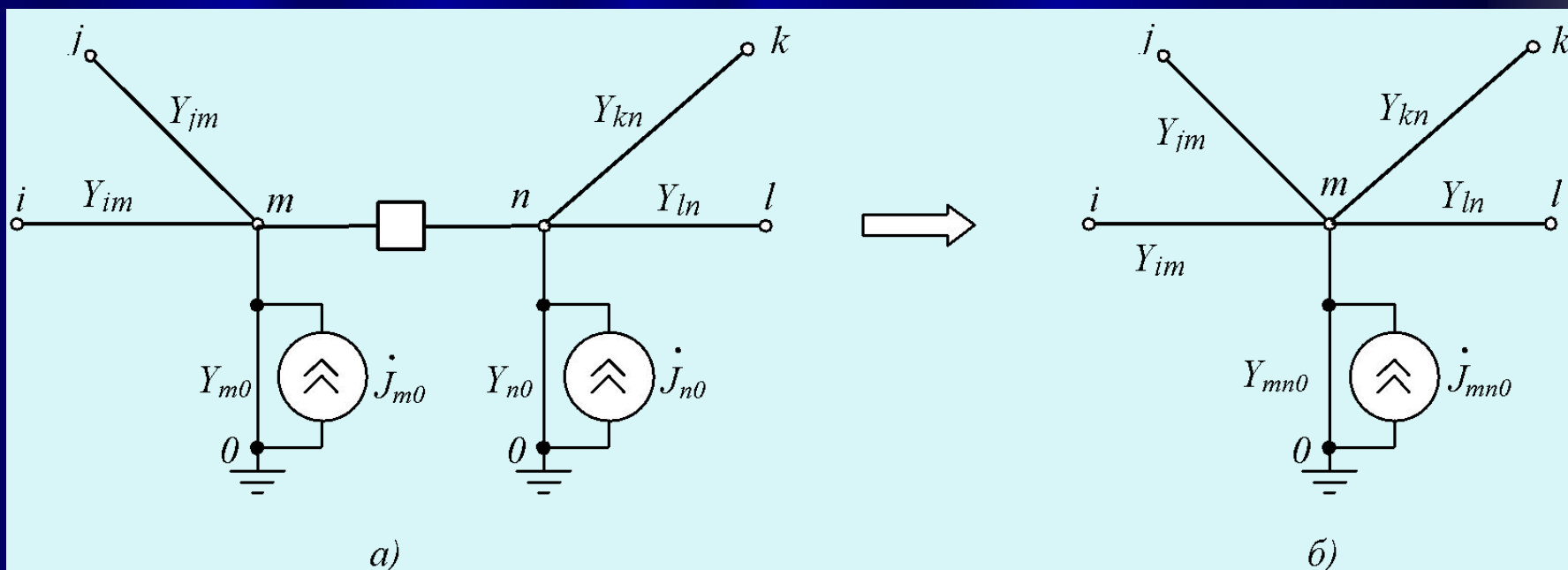
- Замещение рассматриваемой электрической схемы эквивалентным источником тока в узле свертки (свертка схемы к одному из узлов).
- Определение напряжения в узле свертки (при расчете мгновенного электрического режима в процессе интегрирования) из условия, что ток эквивалентного источника тока в узле свертки равен нулю. Или определение тока эквивалентного источника, включенного в базисный узел, выбранный за узел свертки, при расчете установившегося режима.
- Определение напряжений в узлах при разворачивании схемы в порядке, обратном исключению узлов.
- Расчет электрического режима продольных и поперечных элементов схемы.

Эквивалентные преобразования

Для свертки схемы необходимы следующие эквивалентные преобразования:

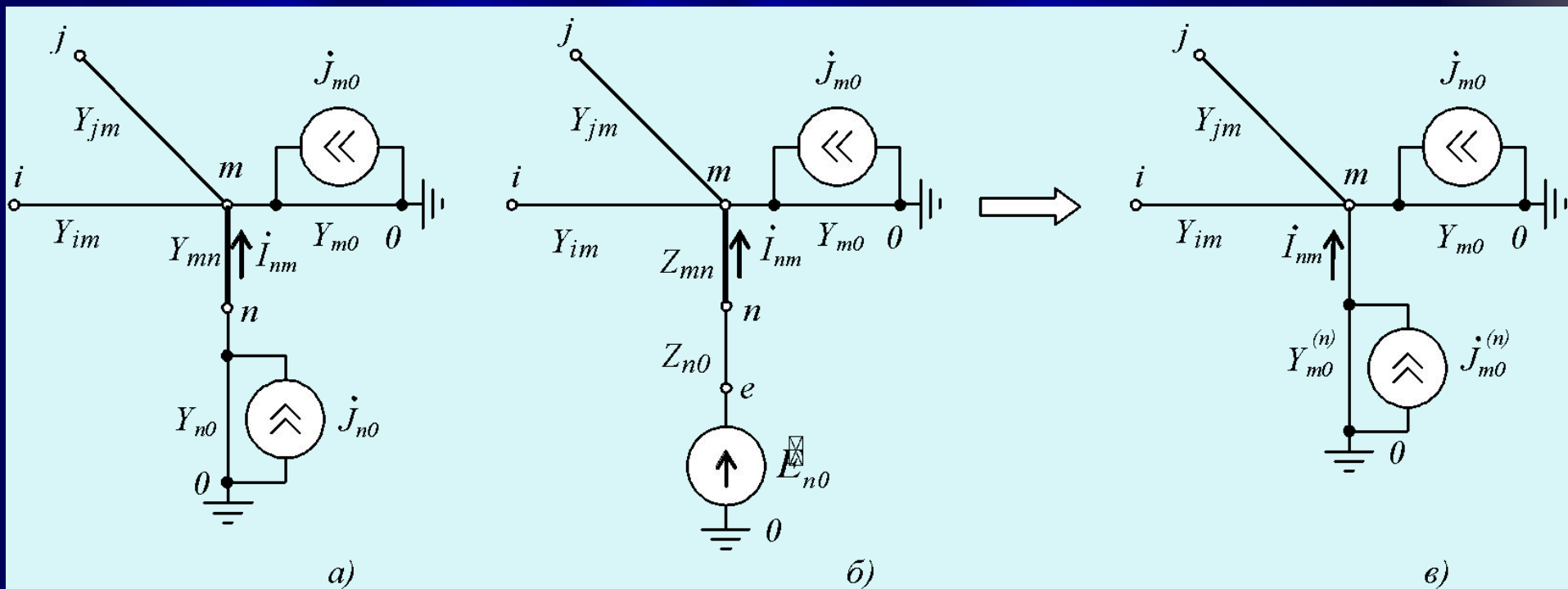
- ✓ замена параллельных ветвей одной эквивалентной ветвью
- ✓ исключение узла слиянием узлов ветви с нулевым сопротивлением (включенного выключателя)
- ✓ исключение узла при помощи преобразования активной многолучевой звезды в эквивалентный многоугольник

Слияние узлов включенного выключателя



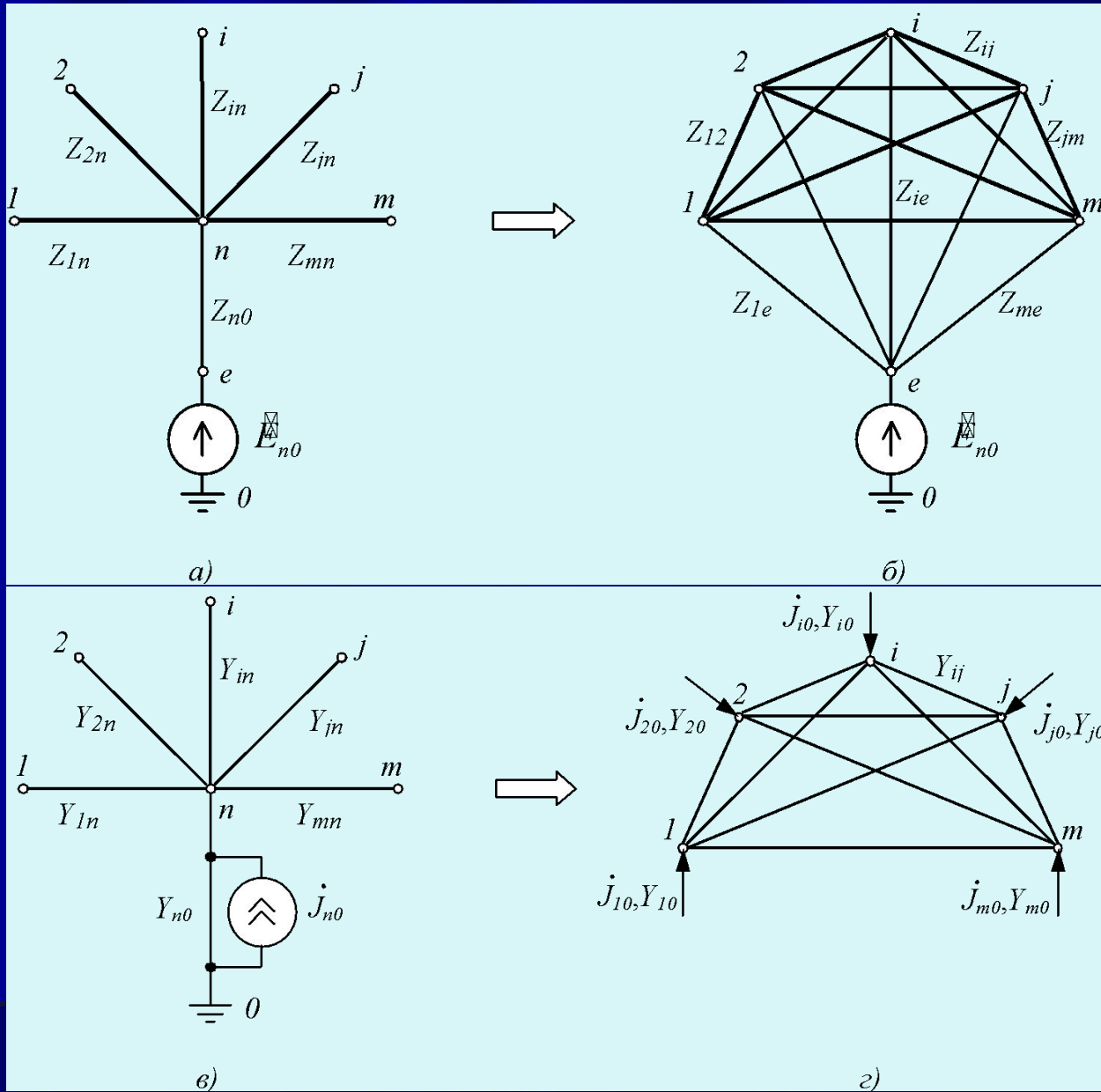
Хорошо работает и обычное замещение ветви выключателя очень небольшим и очень большим сопротивлением во включенном и отключенном состояниях

Исключение одиночного узла



Примечание. Это частный случай исключения узла при помощи более общего преобразования активной многолучевой звезды в эквивалентный многоугольник

Исключение узла преобразованием активной многолучевой звезды в эквивалентный многоугольник



Исключение узла преобразованием активной многолучевой звезды в эквивалентный многоугольник

$$Y_{ij}^{(n)} = Y_{ij} + \frac{Y_{in}Y_{jn}}{Y_{nn}}$$

$$Y_{i0}^{(n)} = Y_{n0} \frac{Y_{in}}{Y_{nn}}$$

$$J_{i0}^{(n)} = J_{n0} \frac{Y_{in}}{Y_{nn}}$$

$$Y_{nn} = Y_{1n} + Y_{2n} + \dots + Y_{in} + Y_{jn} + \dots + Y_{mn} + Y_{n0}$$

Следует подчеркнуть, что преобразование активной многолучевой звезды в эквивалентный многоугольник не существует, если генерация и/или нагрузка в исключаемом узле представлена идеальными источниками тока, поскольку для получения формул использовалось преобразование источника тока в источник ЭДС и обратно.

Для идеальных источников тока и ЭДС взаимное преобразование не определено, их воздействие на режим схемы различно — в узле с идеальным источником ЭДС напряжение постоянно, а в узле с идеальным источником тока — нет. Если формально выполнить исключение узла с идеальным источником тока, искажается режим внешней сети, примыкающей к узлам, смежным исключаемому узлу. Это проявляется в том, что потери мощности в ветвях исходной и эквивалентной схем не совпадают.

Регулирование P_{eq} -генераторов

$$\vec{S} = P + jQ = 3\vec{U}\vec{I} = 3\vec{U}(\vec{E} - \vec{U})Y = 3U\vec{E}Y - 3U^2Y$$

$$P = 3EUy \cos(\delta_E - \delta_U + \delta_Y) - 3U^2g$$

$$Q = 3EUy \sin(\delta_E - \delta_U + \delta_Y) - 3U^2b$$

$$\vec{E} = Ee^{j\delta_E}$$

$$\vec{U} = Ue^{j\delta_U}$$

$$\vec{U} = Ue^{-j\delta_U}$$

$$Y = \frac{1}{Z_q} = g + jb = ye^{j\delta_Y}$$

$$y = \sqrt{g^2 + b^2}$$

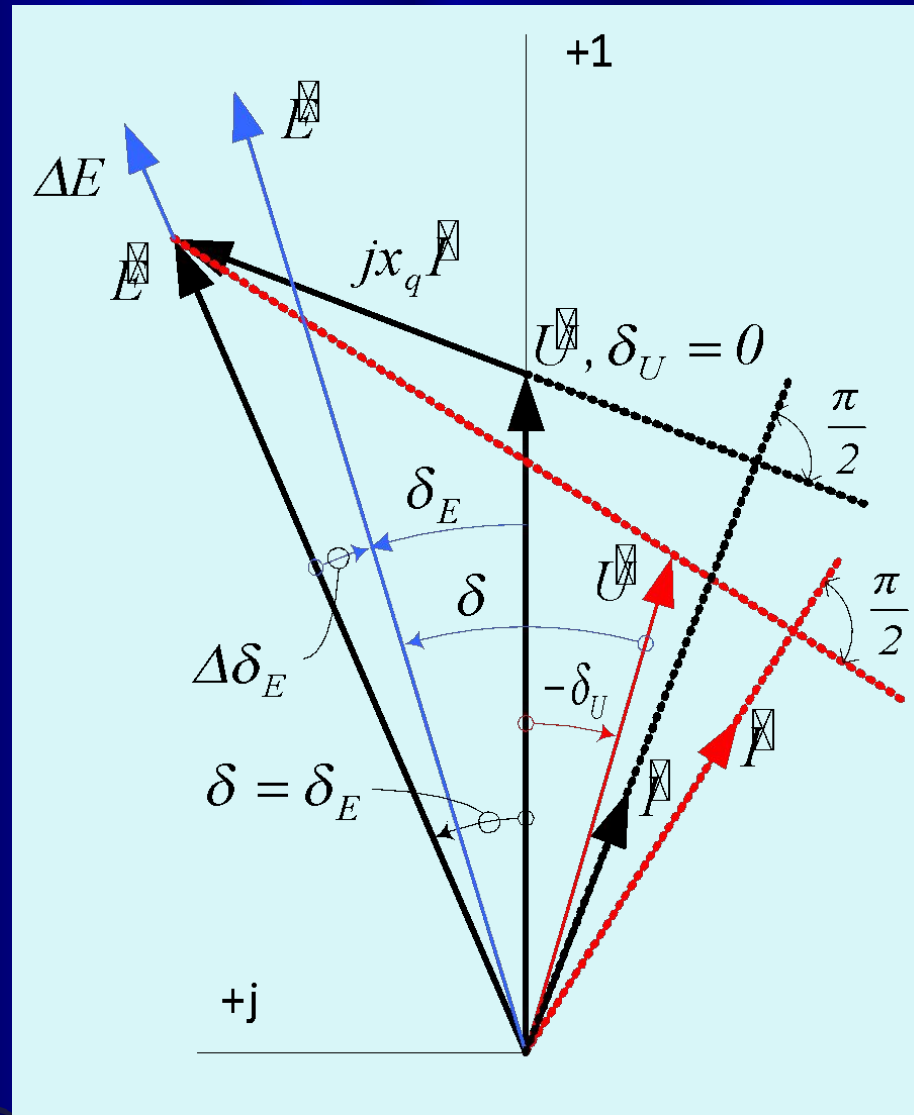
$$U = \frac{-3Ey \cos(\delta_E - \delta_U) - \sqrt{9E^2 y^2 \cos^2(\delta_E - \delta_U) - 12bQ}}{6b}$$

Разложив выражения для активной мощности и напряжения в ряд Тейлора, можно получить линеаризованную систему уравнений для определения поправок модуля и угла вектора ЭДС при регулировании генератора на поддержание заданных уставок активной мощности и напряжения

Регулирование P_{eq} -генераторов

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial P}{\partial E} \right) \Delta E + \left(\frac{\partial P}{\partial \delta_E} \right) \Delta \delta_E = P_0 - P, \\ \left(\frac{\partial U}{\partial E} \right) \Delta E + \left(\frac{\partial U}{\partial \delta_E} \right) \Delta \delta_E = U_0 - U, \end{cases}$$

Регулирование генераторов



Регулирование генераторов

Выполняется итерация. После итерации модуль вектора напряжения в узле уменьшился, а по углу повернулся на угол по часовой стрелке (красный цвет). Определяются:

$$1) P + jQ = 3U\bar{I} = 3U(\bar{E} - \bar{U})Y$$

$$2) \text{отклонения} \quad P_0 - P \quad U_0 - U$$

$$3) \text{поправки} \quad \Delta E \quad \Delta \delta_E$$

$$4) \bar{E} = \text{Complex}((E + \Delta E) \cdot \cos(\delta_E + \Delta \delta_E), (E + \Delta E) \cdot \sin(\delta_E + \Delta \delta_E))$$

$$E_q = \frac{x_d}{x_q} E - \frac{x_d - x_q}{x_q} U \cos(\delta_E - \delta_U)$$

$$E_{q \min} \leq E_q \leq E_{q \max}$$

Процесс балансирования приобретает физический смысл – регулирование генераторов при безынерционном изменении возбуждения и положения ротора генератора

При выходе на ограничения ЭДС E_q фиксируется, но реактивная мощность остается свободным параметром режима. При перегрузке генератора по току статора уменьшается E_q , если она не вышла на нижнее ограничение, в противном случае уменьшается активная мощность. Таким образом, выполняется полный и точный контроль по ограничениям режима генератора, т.е. балансирование режима схемы осуществляется с контролем возможности существования режима самих генераторов.

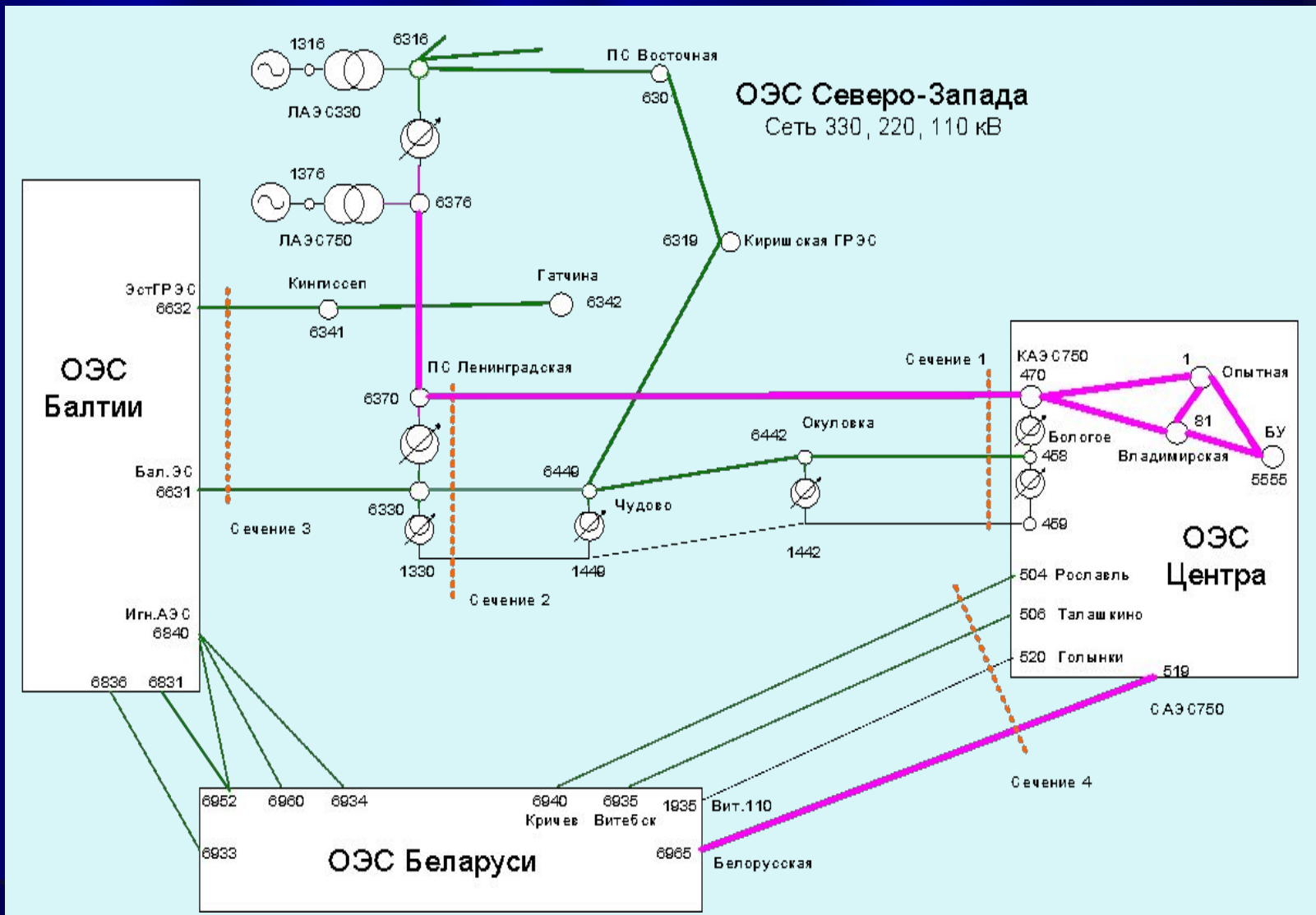
NB: с расчетчика снимается обязанность контроля реактивной мощности генераторов.

Определение предельных перетоков по линиям и сечениям методом непрерывного утяжеления режимов

Теория статической апериодической устойчивости – самостоятельно по книге
Г.В.Меркурьев, Ю.М.Шаргин Устойчивость энергосистем, изд. 2

§ 3.1

Определение предельных перетоков по линиям и сечениям методом непрерывного утяжеления режимов



Определение предельных перетоков по линиям и сечениям методом непрерывного утяжеления режимов

Нужно найти предельный переток по линии 6370-470 ПС Ленинградская – Калининская АЭС 750 кВ и в сечении 1, 2, в которые входят также линии 330 и 110 кВ.

Генерация электростанций ОЭС Северо-Запада, задействованных в изменении режима схемы, в исходном режиме составляет:

ЛАЭС — 2000 МВт: первая очередь (узел 1316) не работает; вторая очередь (узел 1376) работают четыре агрегата по 500 МВт, суммарная мощность 2000 МВт.

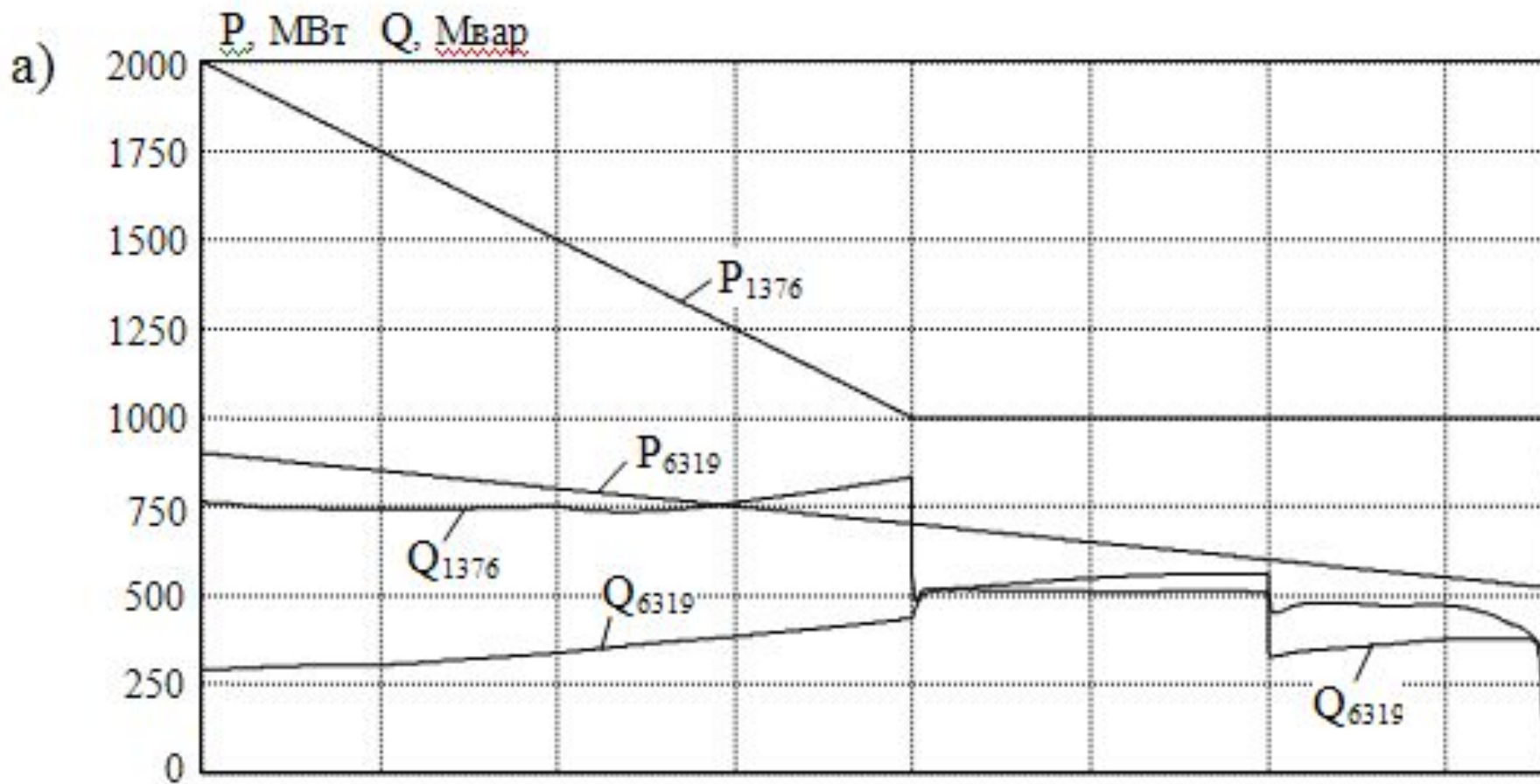
Киришская ГРЭС — 900 МВт, работают три агрегата по 300 МВт.

ОЭС Балтии принимает из ОЭС Северо-Запада 534 МВт по сечению 3. ОЭС Белоруссии принимает 1332 МВт по сечению 4 из ОЭС Центра. В подпорном узле 470 на Калининской АЭС работает один энергоблок на номинальной мощности 1000 МВт.

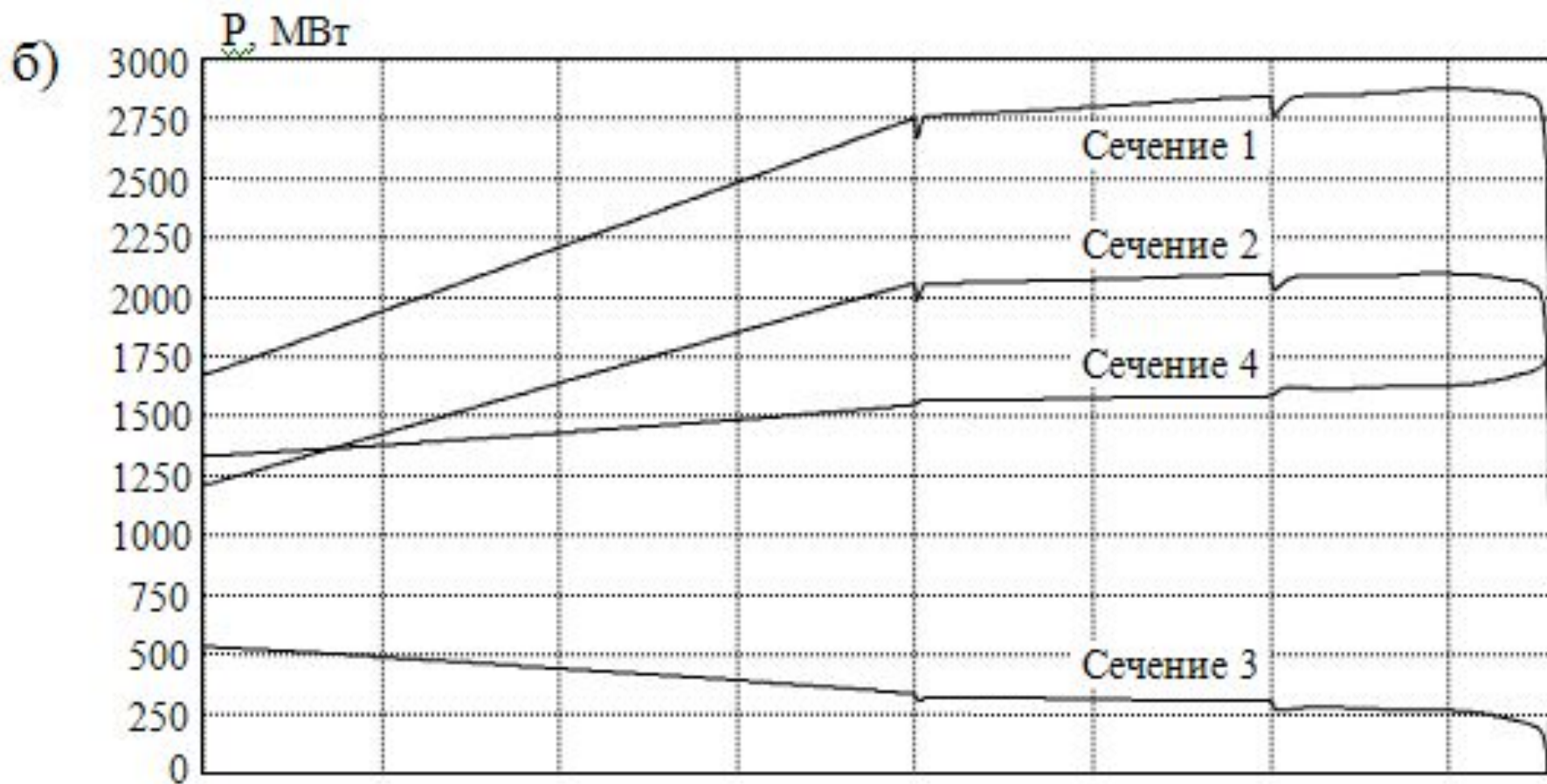
Загрузка сечений осуществляется за счет разгрузки второй очереди ЛАЭС до 1000 МВт по линейному закону за 1000 шагов со скоростью 1 МВт/шаг, Киришская ГРЭС разгружается от 900 до 500 МВт за 2000 шагов со скоростью 0,2 МВт/шаг.

До середины процесса утяжеления режима скорость перераспределения генерации активной мощности между Северо-Западом и Центром составляет 1,2 МВт/шаг. После завершения разгрузки ЛАЭС при приближении к предельному режиму и при нарушении апериодической устойчивости скорость перераспределения баланса мощности составляет 0,2 МВт/шаг, что обеспечивает плавное "сползание" режима с четким обозначением предельных перетоков по сечениям 1 и 2.

Изменение мощности генераторов ЛАЭС и Киришской ГРЭС



Изменение перетоков по сечениям



Изменение напряжений

