

Лекционные материалы

Дисциплина «Электроэнергетические системы и сети»

Разработаны доцентом кафедры «Электроэнергетические системы»
ВятГУ Вычегжаниным А.В.

Потери мощности и электроэнергии в элементах электроэнергетических систем

- Основные определения и термины
- Структура потерь мощности и электроэнергии
- Потери мощности в линиях
- Потери мощности в трансформаторах
- Методы определения потерь электроэнергии

Потери энергии

- При передаче электроэнергии от источников к потребителям часть выработанной на электростанциях энергии расходуется в электрических сетях на **нагрев проводников и магнитопроводов, создание электрических и магнитных полей** и является необходимым технологическим расходом на ее передачу.
- В связи с тем, что полезно отпущенная потребителям энергия меньше, чем энергия, выработанная электрическими станциями, технологический расход энергии на ее передачу обычно называют **потерями энергии**.

$$\Delta W = W_{ГЕН} - W_{ПОТР} \cdot$$

Энергия и потери энергии

- Электрическая энергия, как и потери электрической энергии, являются интегральными величинами, значения которых зависят от периода времени. Если электроэнергия, получаемая потребителем при неизменной на заданном интервале времени мощности, определяется по формуле:

$$W = P \cdot \Delta t,$$

- то потери электроэнергии при указанных условиях можно определить так:

$$\Delta W = \Delta P \cdot \Delta t.$$

Очевидно, что потери электроэнергии связаны с потерями активной мощности

Потери мощности

- Под потерями мощности следует понимать потери энергии за интервал времени, кратный периоду.
- Различают потери активной мощности и потери реактивной мощности.
- В виду объективных причин, под потерями энергии в дальнейшем следует понимать потери активной энергии

Структура потерь мощности и электроэнергии

- Все потери мощности в элементах электроэнергетической системы принято подразделять на **три вида**:
- **Отчетная величина потерь** электроэнергии в энергосистеме – разность между количеством электроэнергии, отпущенной в сеть (электрическими станциями, энергосистемами и т.д.) и величиной реализованной электроэнергии (сумма оплаченных счетов от потребителей).
- **Расчетная (техническая) величина потерь** определяется по известным параметрам режимов работы сети и параметрам элементов сети (расход электроэнергии на нагрев и создание электромагнитных полей).
- **Коммерческие потери** – разность между отчетными и техническими потерями (несовершенство системы учета, неодновременность и неточность снятия показаний, погрешность приборов, хищения и т.д.).

Структура потерь мощности и электроэнергии

Кроме того, потери мощности в линиях и трансформаторах принято подразделять на две группы: **нагрузочные потери и потери холостого хода.**

Потери активной мощности ΔP			
Нагрузочные потери активной мощности		Потери активной мощности холостого хода	
Нагрев проводов ВЛ и жил кабелей	Нагрев обмоток трансформаторов и автотрансформаторов	Потери на корону и утечки через изоляцию ЛЭП	Потери в сердечниках трансформаторов и автотрансформаторов

Структура потерь мощности и электроэнергии

- **Нагрузочные потери** - это потери в продольных ветвях схем замещения, т.е. в сопротивлениях линий и трансформаторов. Они определяются величиной протекающего тока или мощности и могут быть рассчитаны по формулам:

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 \cdot r = 3 \cdot (I_a^2 + I_p^2) \cdot r = \frac{S^2}{U^2} \cdot r = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot r = \frac{P^2 \cdot r}{U^2 \cdot \cos^2 \varphi},$$

$$\Delta Q = 3 \cdot I^2 \cdot x = 3 \cdot (I_a^2 + I_p^2) \cdot x = \frac{S^2}{U^2} \cdot x = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot x = \frac{P^2 \cdot x}{U^2 \cdot \cos^2 \varphi},$$

- где I , I_a , I_p - модуль полного тока, активная и реактивная составляющие тока, протекающего по сопротивлениям;
- S , P , Q - модуль полной мощности, активная и реактивная мощности, передаваемые по линии или трансформатору.

Структура потерь мощности и электроэнергии

- **Потери холостого хода**, как в линиях, так и в трансформаторах не зависят от мощности нагрузки и определяются конструктивными особенностями этих элементов сети и напряжением. Под потерями холостого хода понимают **потери в поперечных элементах системы (проводимостях)**.
- Удельные значения потерь мощности холостого хода для линий электропередачи и для трансформаторов приводятся в справочниках (смотри схемы замещения).

Структура потерь мощности и электроэнергии

- В большинстве случаев для расчетов потерь электроэнергии и мощности потери холостого хода **в линиях** допускается не учитывать из-за малого значения этих величин. Поэтому в расчетах потерь мощности и энергии в линиях учитываются только **нагрузочные потери**.
- Потери холостого хода **в трансформаторах и автотрансформаторах** могут достигать существенных значений. Поэтому при расчетах потерь в трансформаторах и автотрансформаторах **следует учитывать** как потери в сопротивлениях обмоток (**нагрузочные потери**), так и потери в проводимостях (**потери холостого хода**).

Потери мощности в трансформаторах

- Потери активной мощности в обмотках трансформаторов могут быть определены не только по сопротивлениям, но и по паспортным данным. Для двухобмоточного трансформатора они равны:

$$\Delta P_{ОБ} = \Delta P_K \cdot \left(\frac{S_{НАГР}}{S_{НОМ}} \right)^2,$$

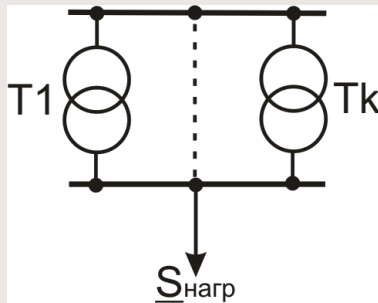
для трехобмоточного трансформатора:

$$\Delta P_{ОБ} = \frac{\Delta P_K}{2 \cdot S_{НОМ}^2} \sum_{i=1}^3 S_{НАГР i}^2,$$

где $S_{НАГР i}$ - мощность нагрузки i -ой обмотки трехобмоточного трансформатора.

Потери мощности в трансформаторах

- Если на подстанции с суммарной нагрузкой $S_{НАГР}$ работают параллельно k одинаковых трансформаторов, то их эквивалентные сопротивления в k раз меньше, а проводимости в k раз больше.

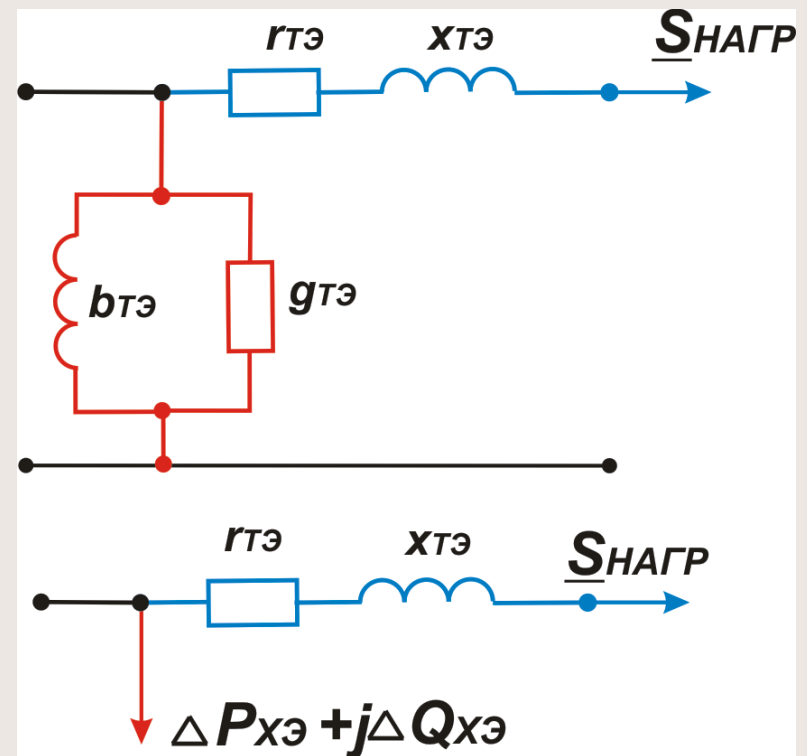


$$r_{TЭ} = \frac{r_T}{k}; \quad x_{TЭ} = \frac{x_T}{k};$$

$$g_{TЭ} = k \cdot g_T; \quad b_{TЭ} = k \cdot b_T;$$

$$\Delta S_{XЭ} = \Delta P_{XЭ} + j\Delta Q_{XЭ};$$

$$\Delta S_{XЭ} = k \cdot \Delta P_X + jk \cdot \Delta Q_X.$$



Потери мощности в трансформаторах

- Если учесть это, то получим следующие выражения для суммарных потерь мощности:

$$\Delta P = \Delta P_X + \Delta P_H = k \cdot \Delta P_X + \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta P_K}{S_{НОМ}^2} \cdot S_{НАГР}^2,$$

$$\Delta Q = \Delta Q_X + \Delta Q_H = k \cdot \frac{I_{X\%}}{100} \cdot S_{НОМ} + \frac{1}{k} \cdot \frac{u_{K\%}}{100 \cdot S_{НОМ}} \cdot S_{НАГР}^2.$$

При задании нагрузки током $I_{НАГР}$ формулы можно представить в виде:

$$\Delta P = k \cdot \Delta P_X + \frac{1}{k} \cdot 3 \cdot I_{НАГР}^2 \cdot r_T,$$

$$\Delta Q = k \cdot \frac{I_{X\%}}{100} \cdot S_{НОМ} + \frac{1}{k} \cdot 3 \cdot I_{НАГР}^2 \cdot x_T.$$

Потери мощности в трансформаторах

- Потери мощности в k параллельно работающих **трехобмоточных** трансформаторах определяются по формулам:

$$\Delta P = k \cdot \Delta P_X + \frac{\Delta P_K}{k \cdot 2} \left(\frac{S_{BH}^2}{S_{НОМ}^2} + \frac{S_{СН}^2}{S_{НОМ}^2} + \frac{S_{НН}^2}{S_{НОМ}^2} \right),$$

$$\Delta Q = k \cdot \frac{I_{X\%}}{100} \cdot S_{НОМ} + \frac{1}{k \cdot 100 \cdot S_{НОМ}} \left(u_{KB\%} S_{BH}^2 + u_{KC\%} S_{СН}^2 + u_{KH\%} S_{НН}^2 \right),$$

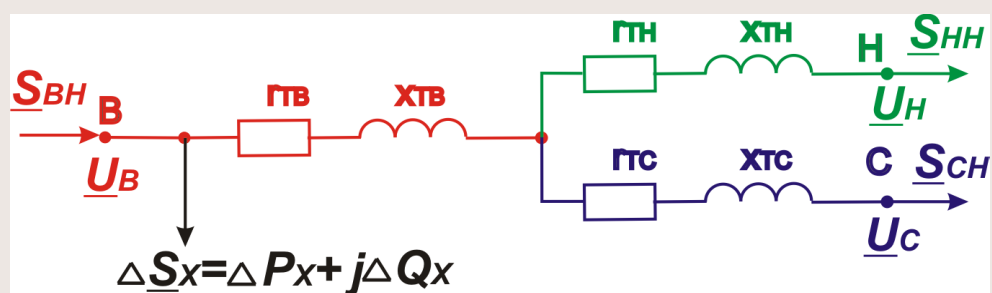
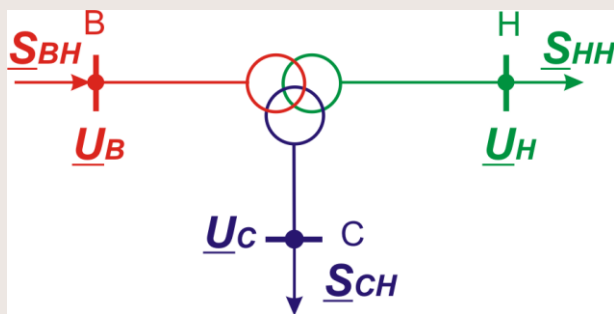
- где S_{BH} , $S_{СН}$, $S_{НН}$ – соответственно мощности, протекающие по обмоткам **высшего, среднего и низшего напряжения**.

Потери мощности в трансформаторах

- Потери мощности в k параллельно работающих трехобмоточных трансформаторах определяются по формулам:

$$\Delta P = k \cdot \Delta P_X + \frac{\Delta P_K}{k \cdot 2} \left(\frac{S_{BH}^2}{S_{НОМ}^2} + \frac{S_{CH}^2}{S_{НОМ}^2} + \frac{S_{HH}^2}{S_{НОМ}^2} \right),$$

$$\Delta Q = k \cdot \frac{I_{X\%}}{100} \cdot S_{НОМ} + \frac{1}{k \cdot 100 \cdot S_{НОМ}} \left(u_{KB\%} S_{BH}^2 + u_{KC\%} S_{CH}^2 + u_{KH\%} S_{HH}^2 \right),$$

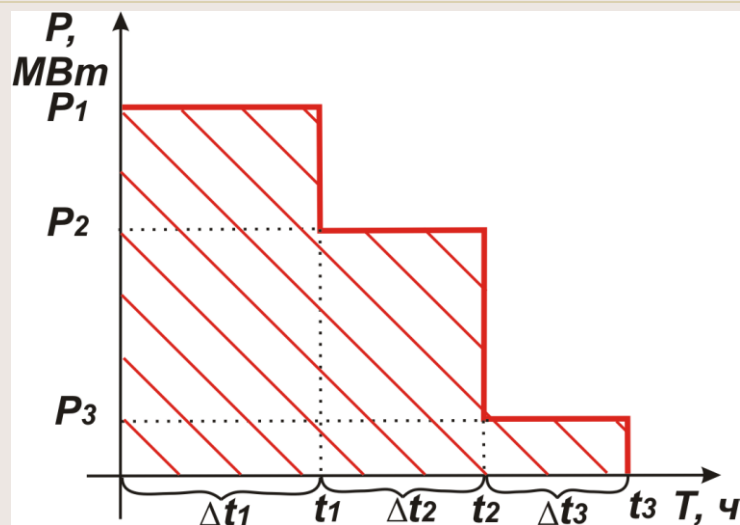


Методы определения потерь электроэнергии

- Определение потерь электроэнергии **по графику нагрузки** (метод графического интегрирования)
- Определение потерь электроэнергии методом **среднеквадратичного тока** (среднеквадратичной мощности)
- Определение потерь электроэнергии **по времени наибольших потерь**

Определение потерь электроэнергии по графику нагрузки (метод графического интегрирования)

- Метод заключается в вычислении потерь электроэнергии на каждой ступени графика нагрузки и дальнейшем суммировании этих величин.



Потери энергии в элементе электрической сети определяются по формуле:

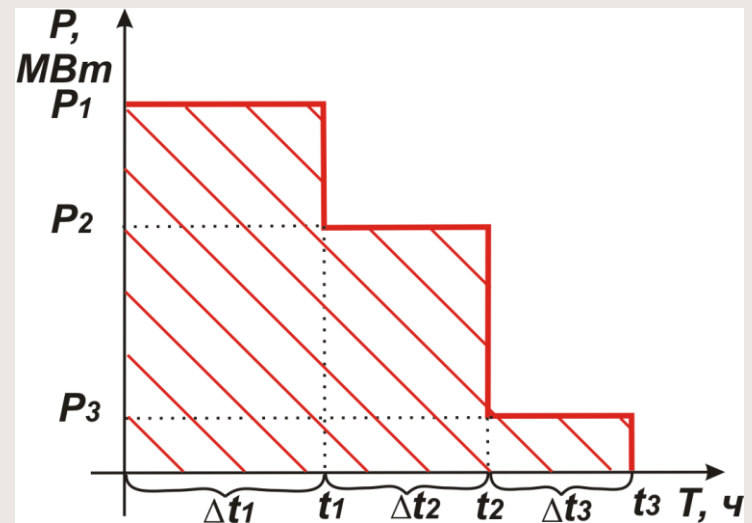
$$\Delta W = \sum_{i=1}^N \Delta P_i \cdot \Delta t_i,$$

где ΔP_i - потери мощности на i ступени графика нагрузки;
 Δt_i - интервал времени (длительность i ступени графика нагрузки);

N – количество ступеней графика нагрузки.

Определение потерь электроэнергии по графику нагрузки (метод графического интегрирования)

- Метод имеет высокую степень точности, но необходимость графика нагрузок делает его трудоемким и не позволяет использовать метод графического интегрирования в процессе проектирования.



Потери энергии в элементе электрической сети определяются по формуле:

$$\Delta W = \sum_{i=1}^N \Delta P_i \cdot \Delta t_i,$$

где ΔP_i - потери мощности на i ступени графика нагрузки;
 Δt_i - интервал времени (длительность i ступени графика нагрузки);

N – количество ступеней графика нагрузки.

Определение потерь электроэнергии методом среднеквадратичного тока (среднеквадратичной мощности)

- Достоинство этого метода в том, что среднеквадратичный ток (или мощность) вычисляется только один раз для серии расчетов.
- Среднеквадратичный ток $I_{CP.KB.}$ – это такой условный неизменный по величине ток, при протекании которого по сети в течение расчетного периода выделяются те же потери энергии, что и при протекании действительного тока, изменяющегося по графику нагрузки.

$$\Delta W = 3 \cdot r \cdot \int_0^T I_i^2 dt = 3 \cdot I_{CP.KB.}^2 \cdot r \cdot T.$$

Определение потерь электроэнергии методом среднеквадратичного тока (среднеквадратичной мощности)

- Среднеквадратичный ток можно определить:

$$I_{CP.KB.} = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot \Delta t_1 + I_2^2 \cdot \Delta t_2 + I_3^2 \cdot \Delta t_3 + \dots + I_n^2 \cdot \Delta t_n}{T}},$$

где T – интервал времени, за который необходимо определить потери;
 n – количество ступеней графика нагрузки.

Переходя от тока к мощности, можно записать:

$$\Delta W = \frac{r}{U_{НОМ}^2} \int_0^T S_i^2 dt = \frac{r}{U_{НОМ}^2} \cdot S_{CP.KB.}^2 \cdot T,$$

где $S_{CP.KB.}$ - среднеквадратичная мощность, которая определяется по формуле:

$$S_{CP.KB.} = \sqrt{\frac{S_1^2 \cdot \Delta t_1 + S_2^2 \cdot \Delta t_2 + S_3^2 \cdot \Delta t_3 + \dots + S_n^2 \cdot \Delta t_n}{T}}.$$

Определение потерь электроэнергии по времени наибольших потерь

- Одним из наиболее простых методов, используемых для приближенной оценки потерь электрической энергии, в частности, на стадии проектирования электрических сетей, является расчет по времени максимальных (наибольших) потерь.
- В результате анализа формул для определения потерь мощности можно заключить, что нагрузочные потери пропорциональны квадрату полной мощности, передаваемой через элемент системы.

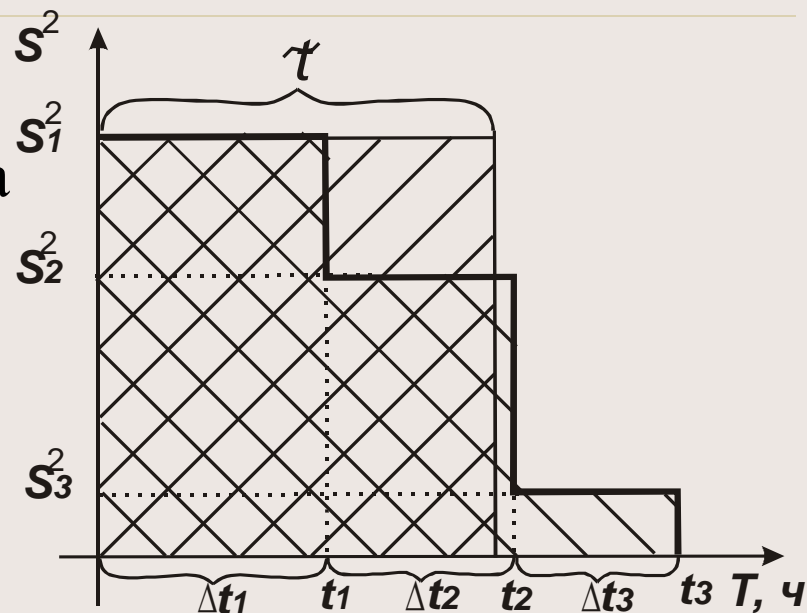
$$\Delta P = 3 \cdot I^2 \cdot r = 3 \cdot (I_a^2 + I_p^2) \cdot r = \frac{S^2}{U^2} \cdot r = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot r = \frac{P^2 \cdot r}{U^2 \cdot \cos^2 \varphi},$$

- Поэтому, считая, что , $\frac{r}{U_{НОМ}^2} = const$

можно записать: $\Delta W_i \sim S^2 i \cdot \Delta t_i$

Определение потерь электроэнергии по времени наибольших потерь

- Следовательно, для трехступенчатого графика нагрузки, приведенного ранее, можно построить зависимость $S^2=f(t)$.



- **Время наибольших потерь (τ)** представляет собой абсциссу прямоугольника, площадь которого равна площади, ограниченной графиком зависимости $S^2=f(t)$ и координатными осями.
- **Эта площадь пропорциональна потерям электроэнергии**

Определение потерь электроэнергии по времени наибольших потерь

- Поэтому можно записать:

$$\Delta W = \sum_{i=1}^N \Delta P_i \cdot \Delta t_i = \frac{r}{U_{НОМ}^2} \cdot \sum_{i=1}^N S_i^2 \cdot \Delta t_i = \frac{r}{U_{НОМ}^2} \cdot S_{НБ}^2 \cdot \tau = \Delta P_{НБ} \cdot \tau.$$

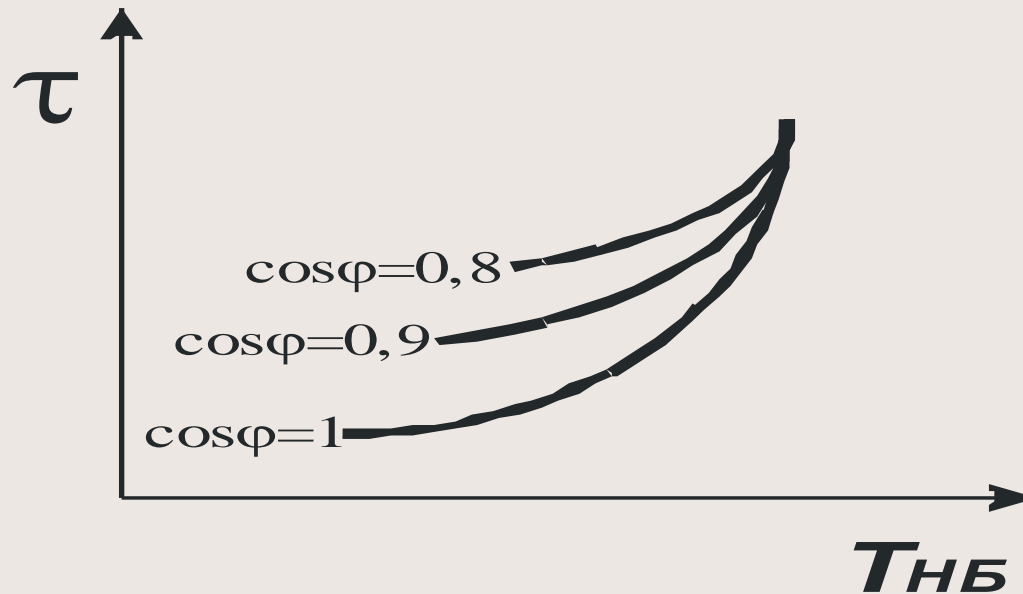
- **Временем наибольших потерь τ** называется время, за которое при передаче наибольшей нагрузки в сети возникнут те же потери электроэнергии, что и при работе сети по действительному графику нагрузки.
- Это условное время, которое при определении потерь электрической энергии за год может быть определено по формуле:

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_{НБ}}{10000} \right)^2 \cdot 8760.$$

Определение потерь электроэнергии по времени наибольших потерь

- **Время наибольших потерь τ** может быть определено и по «кривым Глазунова»

$$(\tau = \Psi(T_{НБ}, \cos \varphi))$$



Определение потерь электроэнергии по времени наибольших потерь

Порядок расчета потерь по методу τ

- Определяют время использования наибольшей нагрузки $T_{НБ}$.
- Одним из перечисленных способов находят величину времени наибольших потерь τ .
- Для режима наибольших нагрузок определяют величину потерь активной мощности $\Delta P_{НБ}$.
- По формуле $\Delta W = \Delta P_{НБ} \cdot \tau$ определяют потери электроэнергии.

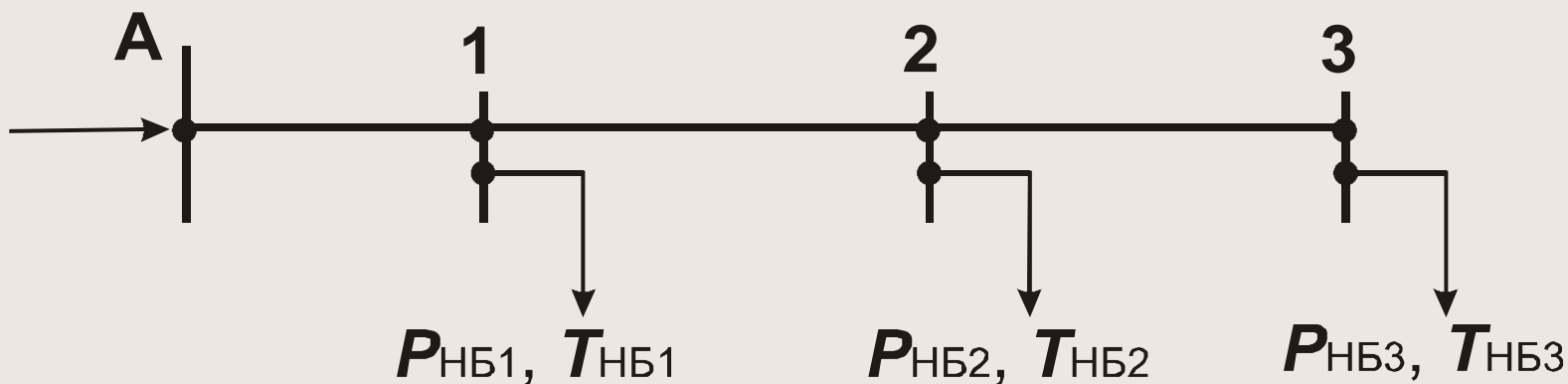
Определение потерь электроэнергии по времени наибольших потерь

Недостатки метода:

- **Большая погрешность расчетов**, обусловленная предположением о том, что графики активной и реактивной мощности подобны, т.е. $\cos\varphi = \text{const}$.
- Данный метод невозможно использовать для определения потерь в элементах, имеющих переменное активное сопротивление (линии со стальными проводами).

Определение потерь электроэнергии по времени наибольших потерь

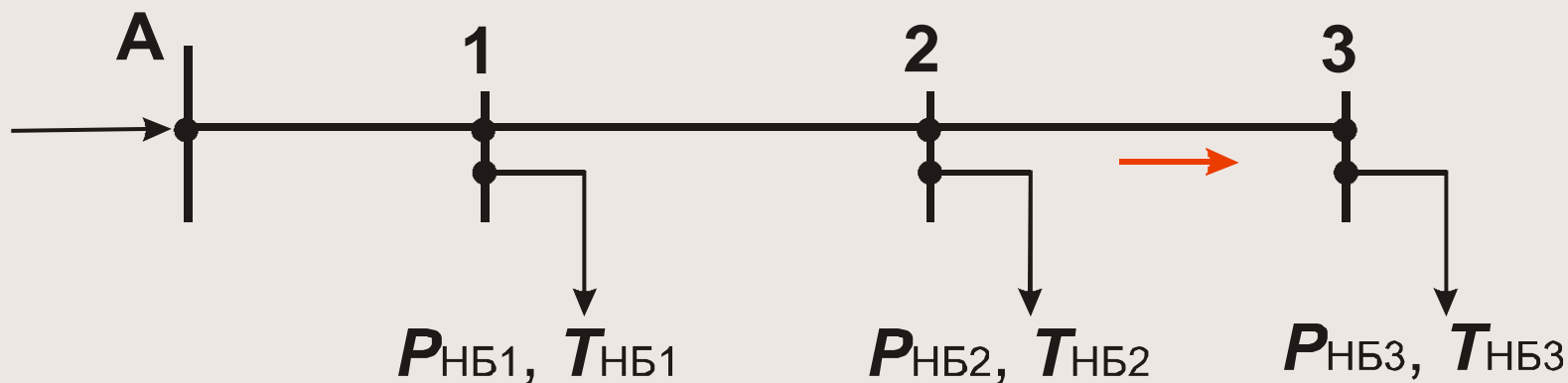
Некоторые особенности использования метода при передаче мощности по участку сети к нескольким потребителям, характеризующимся отличающимися величинами $T_{НБ}$ и $P_{НБ}$.



В рассматриваемом случае необходимо определять **средневзвешенное значение времени использования наибольшей нагрузки** для каждого участка сети.

Определение потерь электроэнергии по времени наибольших потерь

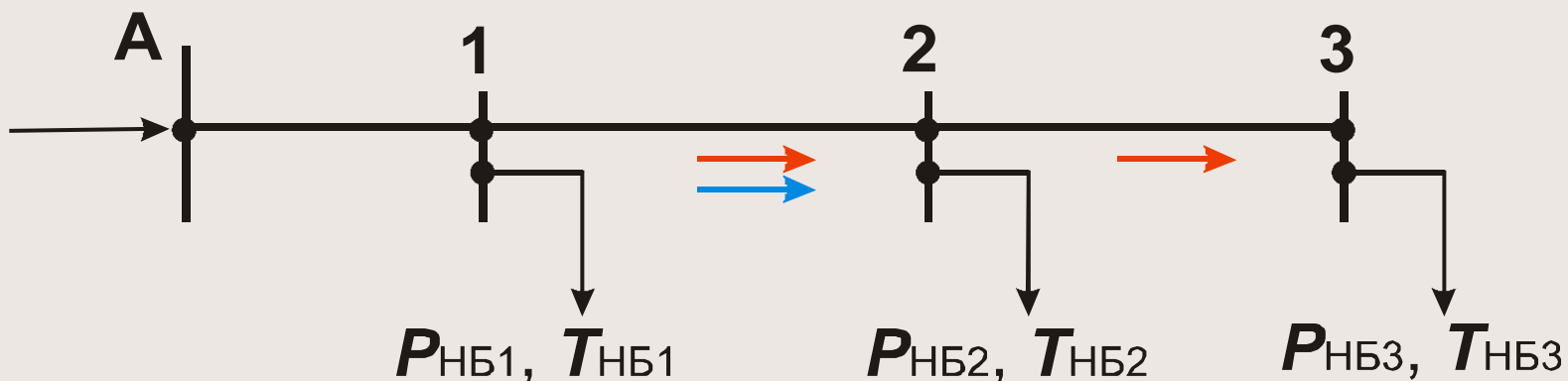
Так как по участку 2-3 протекает только мощность нагрузки 3, то значение $T_{НБ\ 2-3}$ будет равно значению $T_{НБ\ 3}$.



$$T_{НБ\ 2-3} = T_{НБ\ 3}$$

Определение потерь электроэнергии по времени наибольших потерь

По участку 1-2 протекают мощности узла 3 и узла 2.

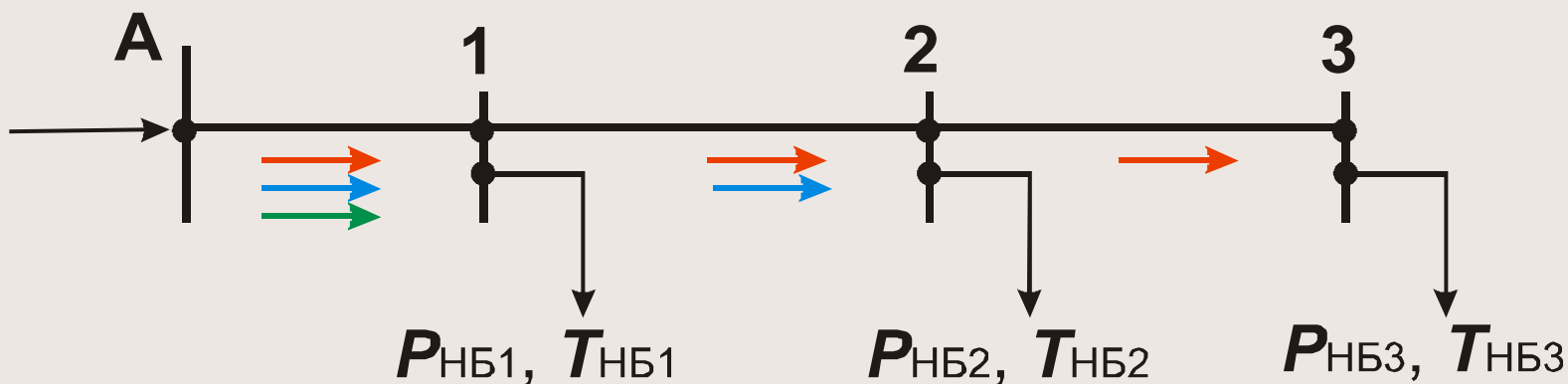


Поэтому для участка 1-2 аналогичная величина определяется по формуле:

$$T_{НБ1-2} = \frac{P_{НБ2} \cdot T_{НБ2} + P_{НБ3} \cdot T_{НБ3}}{P_{НБ2} + P_{НБ3}},$$

Определение потерь электроэнергии по времени наибольших потерь

Так как по участку А-1 протекают мощности всех нагрузок,



то для участка А-1 применима формула:

$$T_{НБ А-1} = \frac{P_{НБ1} \cdot T_{НБ1} + P_{НБ2} \cdot T_{НБ2} + P_{НБ3} \cdot T_{НБ3}}{P_{НБ1} + P_{НБ2} + P_{НБ3}},$$

Определение потерь электроэнергии по времени наибольших потерь

В общем случае формула для определения средневзвешенной величины времени использования наибольшей нагрузки имеет вид:

$$T_{НБ.СР.} = \frac{W}{k_{рма} \cdot P_{НБ}} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{НБi} \cdot T_{НБi}}{k_{рма} \cdot \sum_{i=1}^N P_{НБi}},$$

где $k_{рма}$ - коэффициент разновременности максимумов нагрузки активной мощности, который при совпадении максимумов нагрузок различных пунктов равен 1.

Определение потерь электроэнергии по времени наибольших потерь

В общем случае формула для определения средневзвешенной величины времени использования наибольшей нагрузки имеет вид:

$$T_{НБ.СР.} = \frac{W}{k_{рма} \cdot P_{НБ}} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{НБi} \cdot T_{НБi}}{k_{рма} \cdot \sum_{i=1}^N P_{НБi}},$$

Указанную особенность необходимо учитывать и при расчете потерь электроэнергии в понижающих **трехобмоточных трансформаторах и автотрансформаторах**, у которых по обмотке высшего напряжения протекают мощности, равные сумме мощностей обмоток среднего и низшего напряжения.

Определение потерь электроэнергии по времени наибольших потерь

При большом числе нагрузок, имеющих различные значения коэффициента мощности ($\cos \varphi$), для определения величины τ пользуются средневзвешенным значением данного параметра, определяемого по формуле:

$$\cos \varphi_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{НБi} \cdot \cos \varphi_i}{\sum_{i=1}^N P_{НБi}}.$$

Источники дополнительных сведений

- **Идельчик В.И. Электрические системы и сети. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 588 с.**
- **Электрические системы. Т. 2. Электрические сети/ Под ред. В.А. Веникова. - М.: Высшая школа, 1971. - 440 с.**
- **Передача и распределение электрической энергии. Учебное пособие. / Герасименко А.А., Федин В.Т. - Изд. 2-е. – Ростов н/Д : Феникс, 2008. - 715, [2] с. – (Высшее образование).**
- **Боровиков В.А. и др. Электрические сети энергетических систем. Изд. 3-е, переработанное. Л., «Энергия», 1977.**
- **Черепанова Г.А., Вычегжанин А.В. Установившиеся режимы электрических сетей в примерах и задачах. - Киров: изд. ВятГУ, 2009 - 114 с.**



Спасибо за внимание!