

# Лекционные материалы

## Дисциплина «Электроэнергетические системы и сети»

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

# Введение

---

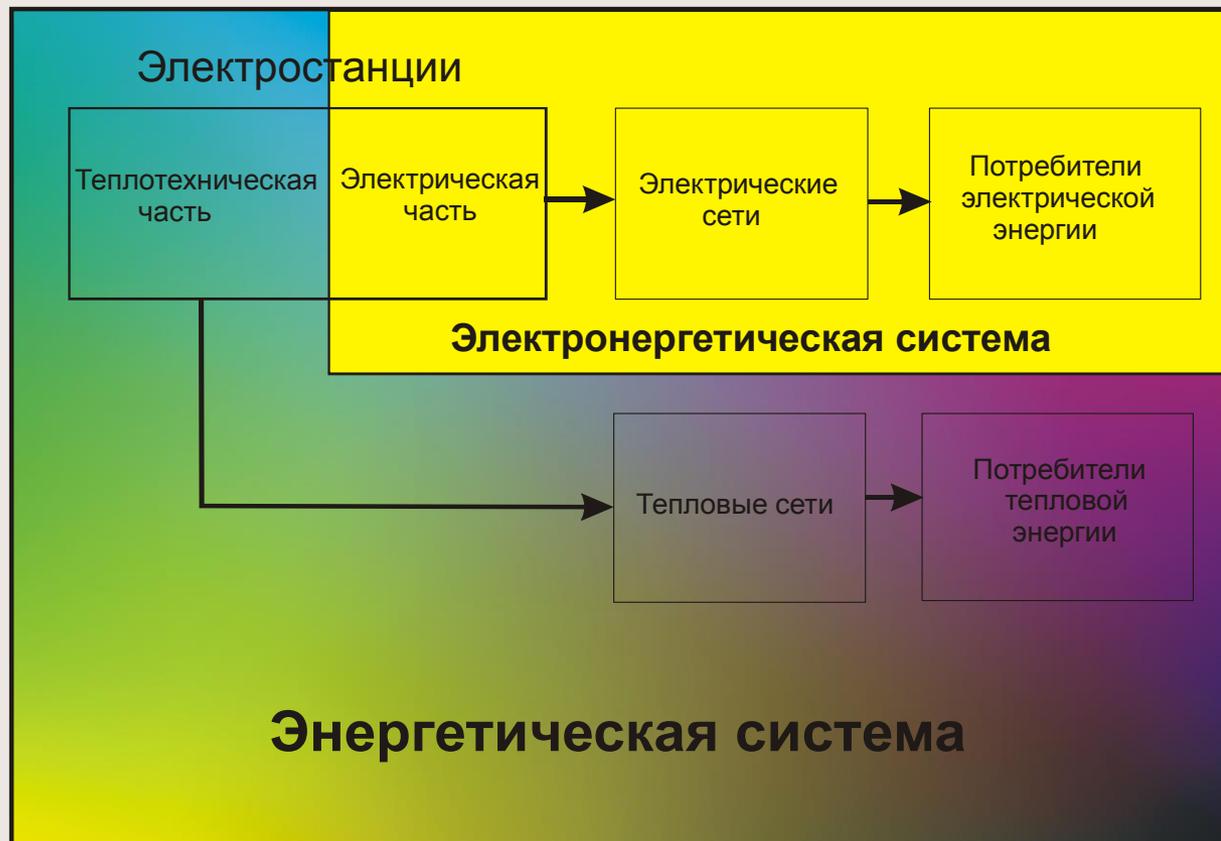
- Основные определения и термины
- Задачи и цели дисциплины

## Преимущества электроэнергии перед другими видами энергии:

- **производство** (в основном, преобразование механической энергии в электрическую) **разнообразие используемых ресурсов** [гидроэлектростанций (ГЭС), теплоэлектростанций (ТЭС), атомных электростанций (АЭС)], возможности концентрации мощностей и управления их размещением;
- **передача** возможность надежной и экономичной передачи электроэнергии на большие расстояния;
- **распределение** простота канализации электроэнергии потребителям независимо от их мощности;
- **потребление** простота и экономичность преобразования электроэнергии в другие виды энергии (механическую, тепловую, световую), а также существование ряда высокоэффективных электротехнических технологий — электролиз, гальванотехника.

# Понятие энергетической системы

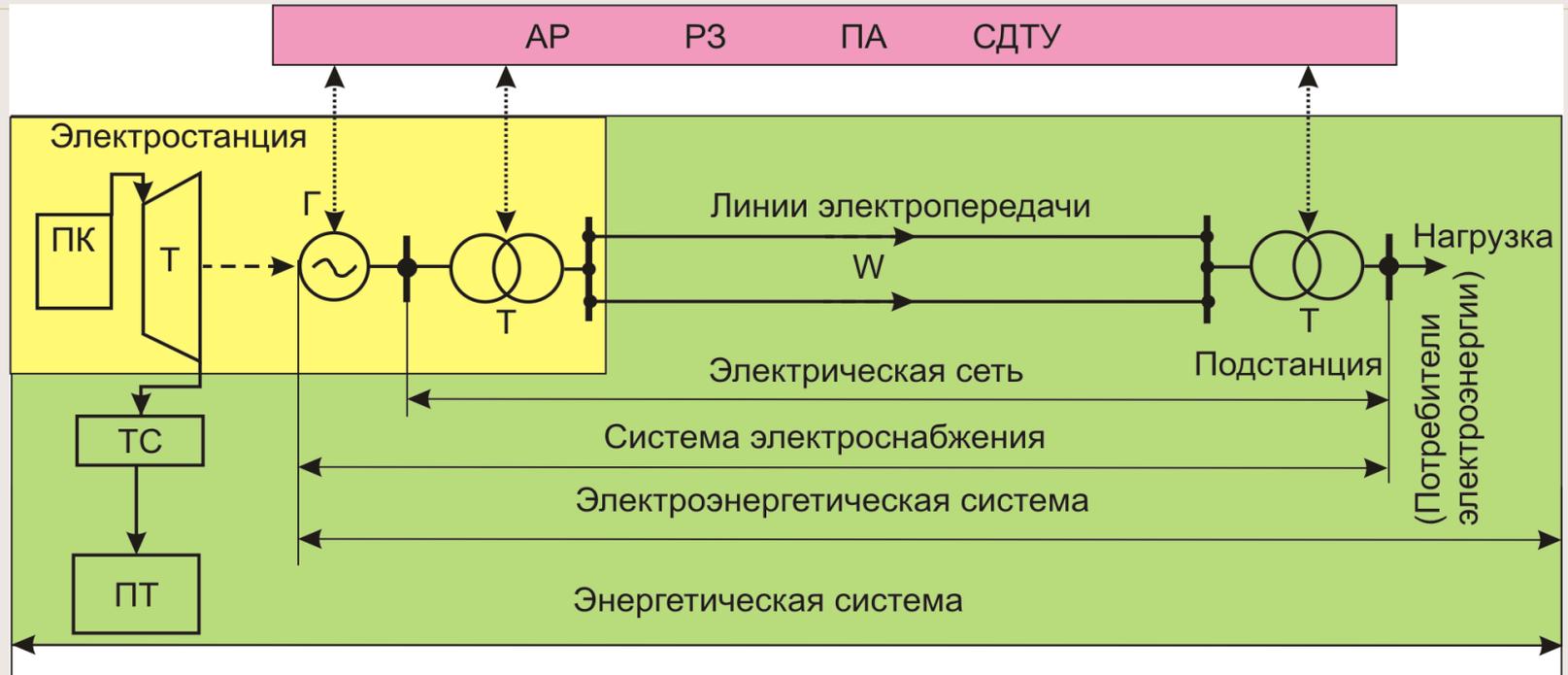
## Структура энергетической системы



## Энергетическая система (энергосистема)

- совокупность электрических станций, подстанций, линий электропередачи (ЛЭП), электрических и тепловых сетей, потребителей тепловой и электрической энергии, связанных общностью режима производства, передачи, распределения и потребления тепловой и электрической энергии, а также общим оперативным управлением.
- В ее состав входят: котлы, турбины, генераторы, линии электропередачи, трубопроводы для передачи пара и горячей воды, трансформаторы, оборудование подстанций, электроустановки потребителей (электродвигатели, осветительные и нагревательные приборы и др.).

# Структура энергетической системы



## Энергетическая система (энергосистема)

- Энергетическая система обладает особенностями, которыми не обладают другие сложные системы в т. ч. коммуникационные и информационные системы, системы водоснабжения, транспортные системы и т.д.
- Эти особенности обусловлены сложными технологическими процессами выработки, передачи и распределения тепловой и электрической энергии.

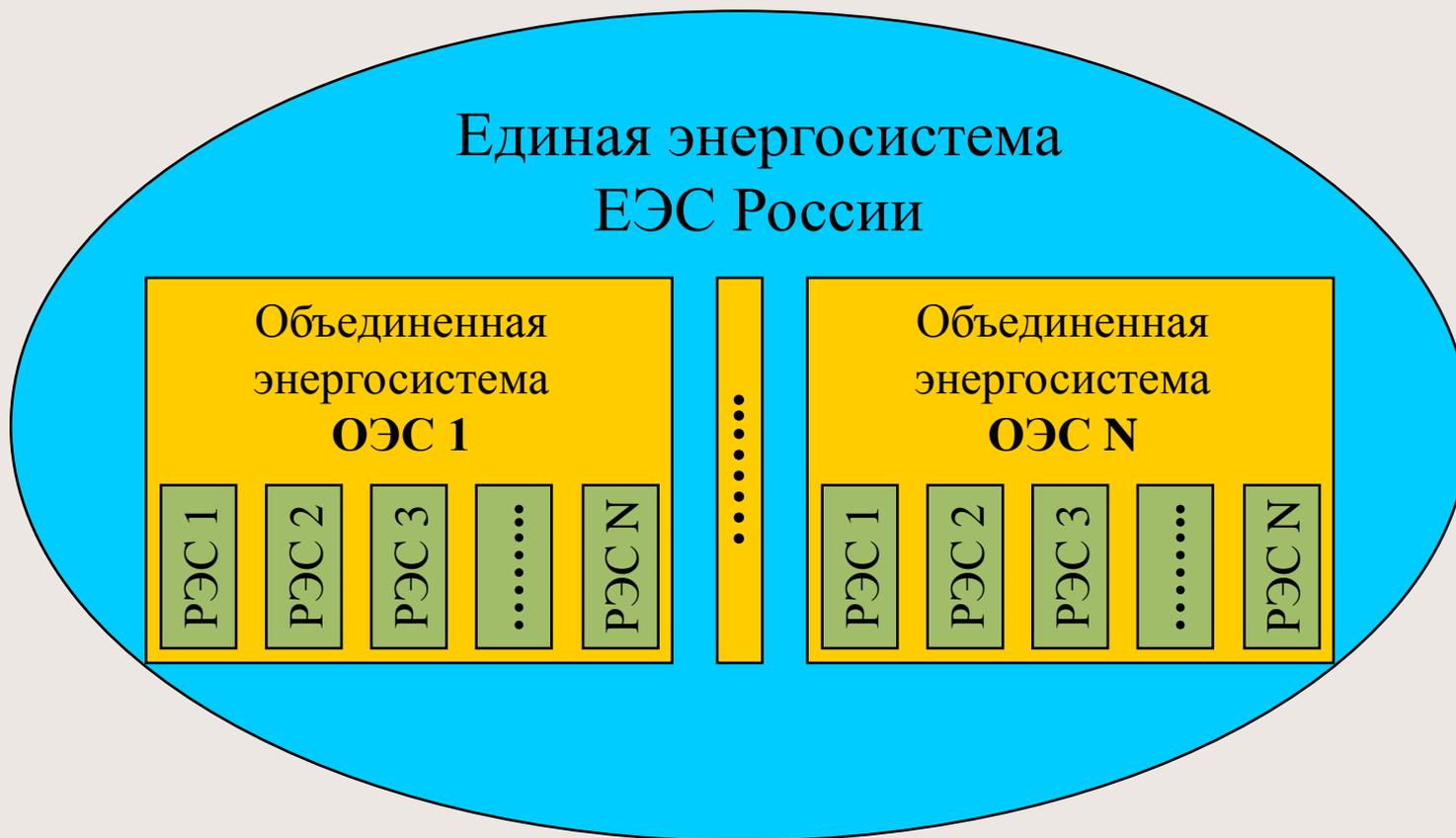
## Основные наиболее яркие особенности энергосистемы

- **одновременность** процессов производства, передачи, распределения и потребления электрической энергии (выработка электроэнергии жестко определяется ее потреблением и наоборот);
- **быстрота** протекания процессов, требующая специальных автоматических быстродействующих устройств, обеспечивающих качество электроэнергии;
- **приоритетность** развития энергетики по сравнению с остальными типами производств.

## Основные требования к энергетическим системам:

- В нормальных условиях энергосистема должна полностью обеспечивать потребителей электрической и тепловой энергией требуемого качества с необходимым уровнем надежности.
- Структура энергосистемы и ее режимы должны обеспечивать наибольшую экономичность выработки, передачи и распределения энергии, т.е. соответствовать наименьшей стоимости полезно отпущенной энергии.

# Структура энергетической системы



# Районные электроэнергетические системы (РЭС)

- обеспечивают централизованное электроснабжение потребителей на территории, охватываемой подчиненными ей сетями, а также централизованное теплоснабжение от подведомственных ей тепловых электростанций и котельных.
- Такие системы охватывают, как правило, территорию одной области, края, республики и т.д.
- В их состав могут входить электростанции различных типов (ГЭС, КЭС, ТЭЦ и т.д.).

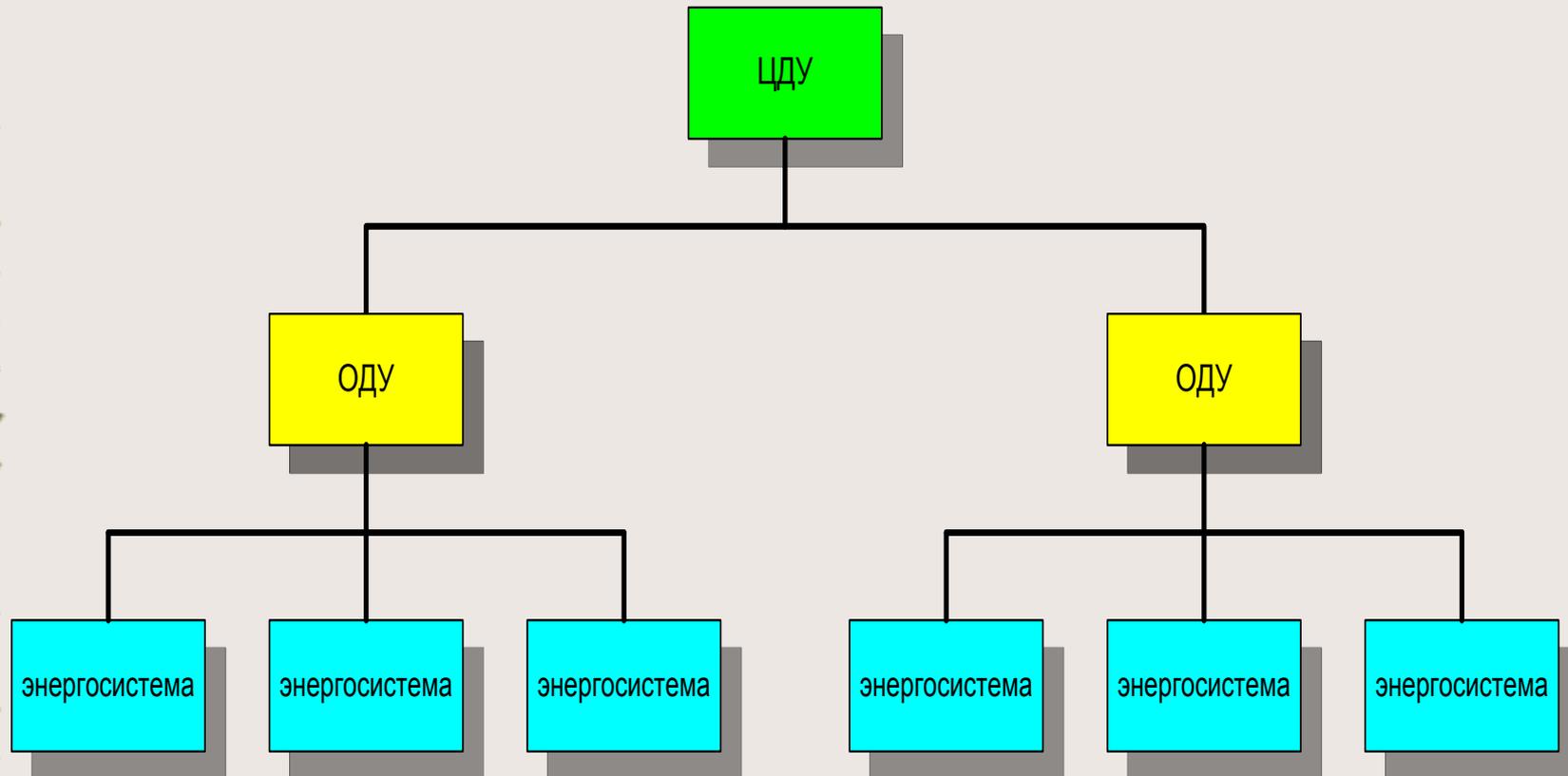
## Объединенная энергосистема (ОЭС)

- группа районных электроэнергетических систем, работающих параллельно, оперативно-диспетчерское управление, которых осуществляется из одного центра - объединенного диспетчерского управления (ОДУ).

## Единая энергосистема (ЕЭС)

- группа параллельно работающих ОЭС, режимами, которых управляет центральное диспетчерское управление (ЦДУ ЕЭС).
- Обмен мощностью между отдельными энергосистемами осуществляется по межсистемным связям, роль которых выполняют так называемые **дальние линии (ДЛЭП)**.

# Структура диспетчерского управления

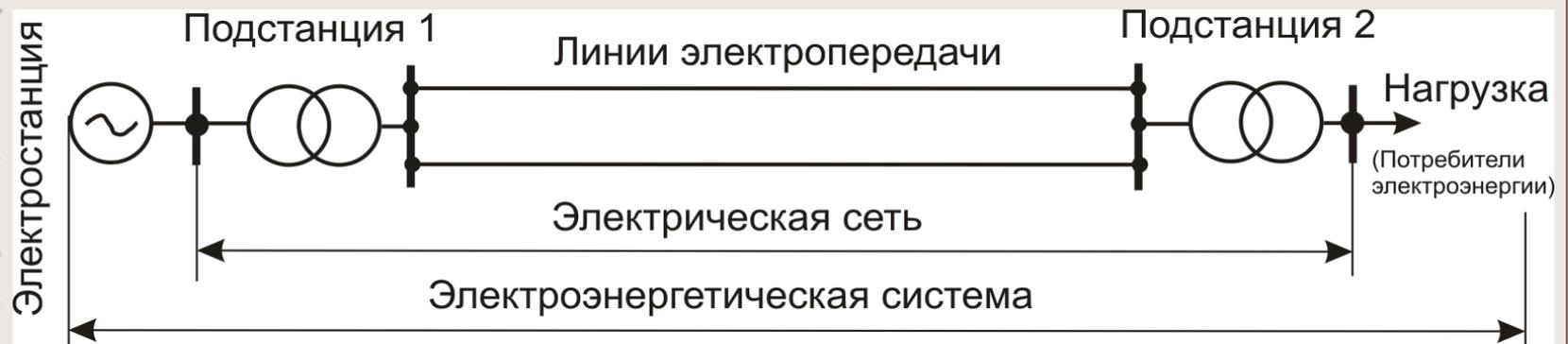


## Преимущества крупных энергосистем:

- **Объединение в Единую энергосистему (ЕЭС) позволяет уменьшить суммарную установленную мощность электростанций за счет долготного и широтного эффектов.**
- **Более полно используются энергетические ресурсы, т.к. пиковую часть графика нагрузки энергосистемы можно покрывать гидравлическими электростанциями, а базовую часть – тепловыми.**
- **Повышается экономичность выработки электроэнергии, т.к. в первую очередь можно увеличить мощность более экономичных станций.**
- **Позволяет увеличить единичную мощность агрегатов.**
- **Повышается надежность электроснабжения потребителей.**
- **Позволяет повысить маневренность и осуществлять взаимопомощь между ОЭС при авариях и ремонтах.**
- **Разгружаются магистральные линии электропередачи.**
- **Появляется возможность присоединения промежуточных потребителей.**
- **Позволяет сократить численность ремонтного персонала за счет централизации ремонтов.**

# Электроэнергетическая система (электрическая система)

- часть энергосистемы, связанная с производством, передачей, распределением и потреблением электрической энергии.
- Структура электроэнергетической системы



# Электрические станции

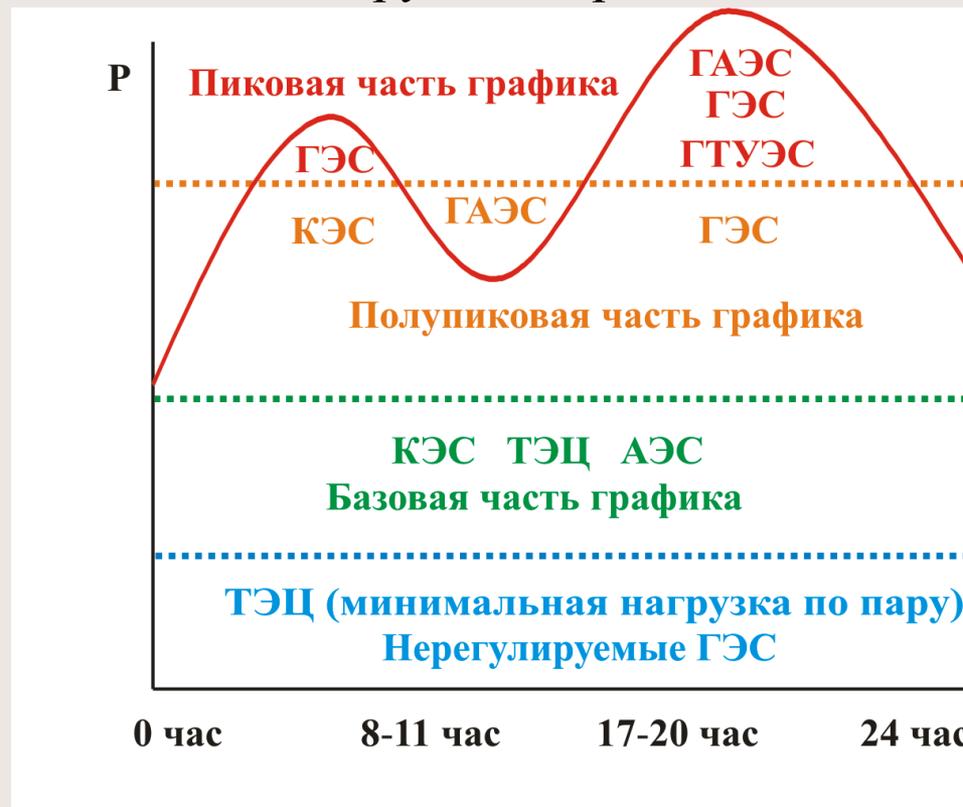
- являются **единственными источниками активной энергии (мощности)** в энергосистеме.
- Основную часть электрической энергии в Единой энергосистеме вырабатывают тепловые и гидравлические электростанции.
- Однако не все электростанции по своим технологическим особенностям или по условиям эксплуатации могут обладать необходимыми свойствами.
- Режим работы электростанции тесно связан с режимом работы технологического оборудования.

## **Основные типы электростанций:**

- **Тепловые конденсационные электрические станции (КЭС или ГРЭС).**
- **Теплофикационные электростанции - теплоэлектроцентрали (ТЭЦ).**
- **Гидроэлектростанции (ГЭС).**
- **Гидроаккумулирующие станции (ГАЭС).**
- **Атомные электростанции (АЭС).**
- **Газотурбинные электростанции (ГТУЭС).**
- **Другие типы электростанций (использование энергии солнца, ветра, геотермальных источников, морских приливов, а также дизельные электростанции и т.д.)**

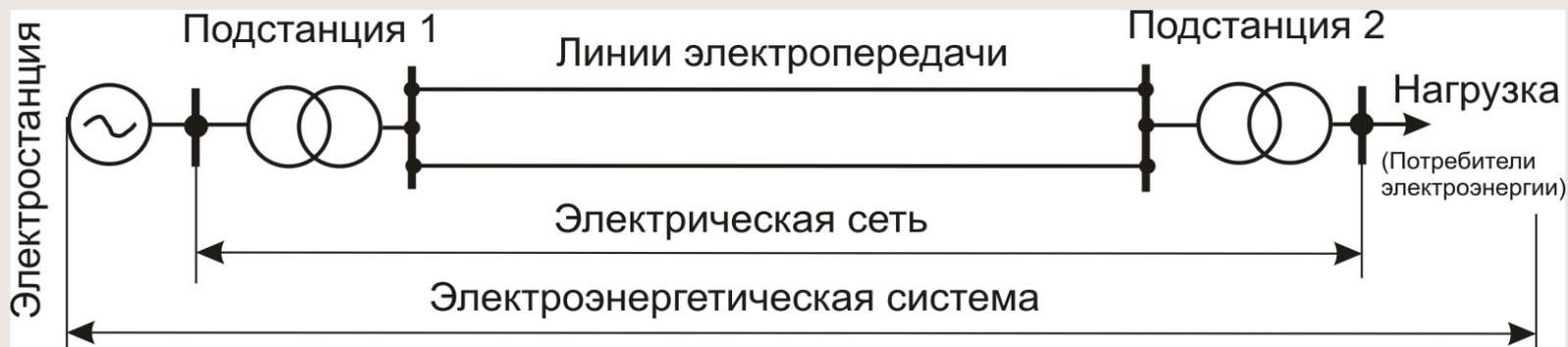
# Необходимость в регулировании графиков нагрузки

- Участие электростанций различного типа в покрытии графика нагрузки энергосистемы



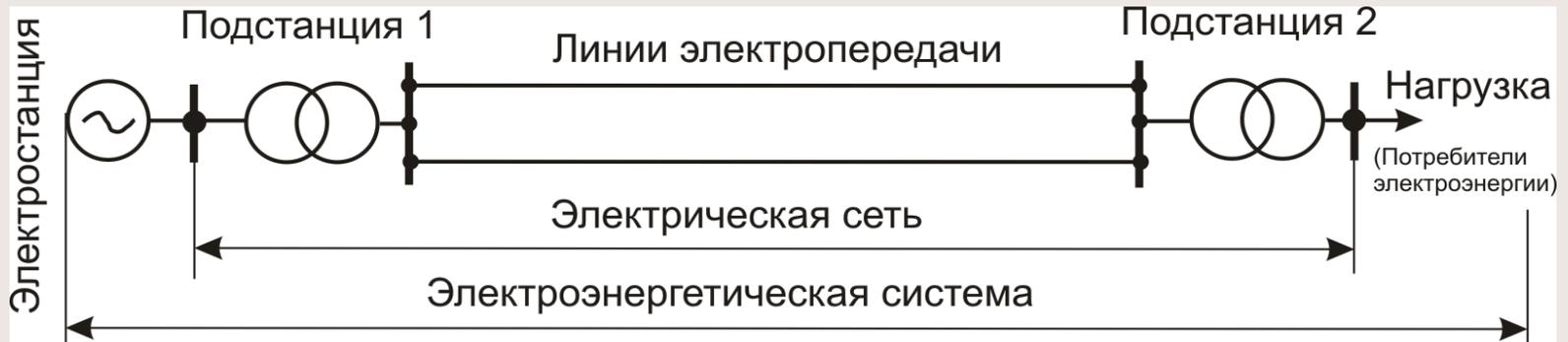
# Электрическая сеть

- это совокупность подстанций, распределительных устройств и соединяющих их линий электропередачи, предназначенная для передачи и распределения электрической энергии.
- По электрической сети осуществляется распределение электроэнергии от электростанций к потребителям.



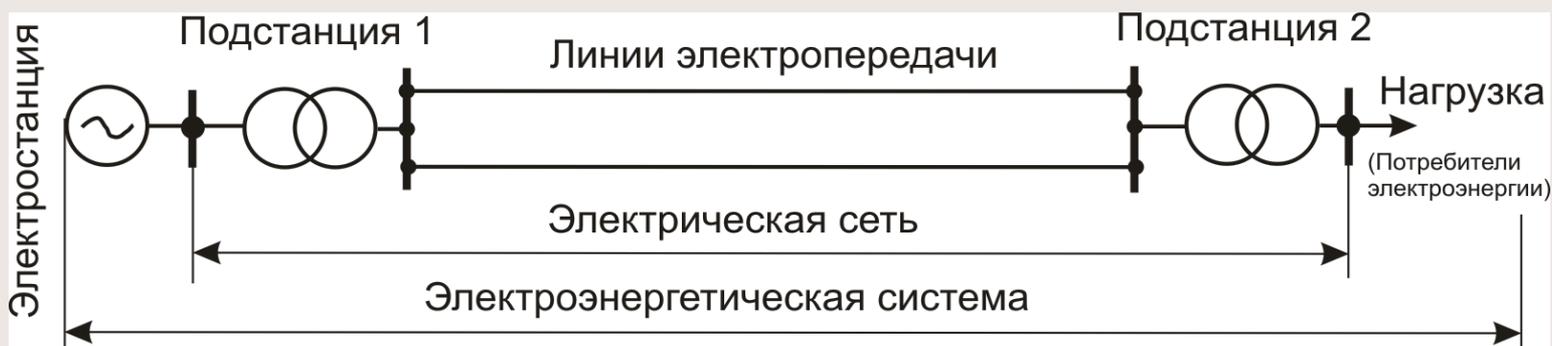
# Линия электропередачи

- это электроустановка, состоящая из проводов, кабелей, изолирующих элементов и несущих конструкций, предназначенная для передачи электрической энергии между двумя пунктами энергосистемы с возможным промежуточным отбором.



# Электрическая подстанция

- это электроустановка, предназначенная для приема, преобразования и распределения электрической энергии, состоящая из трансформаторов или других преобразователей электрической энергии, устройств управления, распределительных и вспомогательных устройств.



# Классификация сетей по роду тока:

- сети постоянного тока;
- сети переменного тока.

## Классификация сетей по номинальному напряжению:

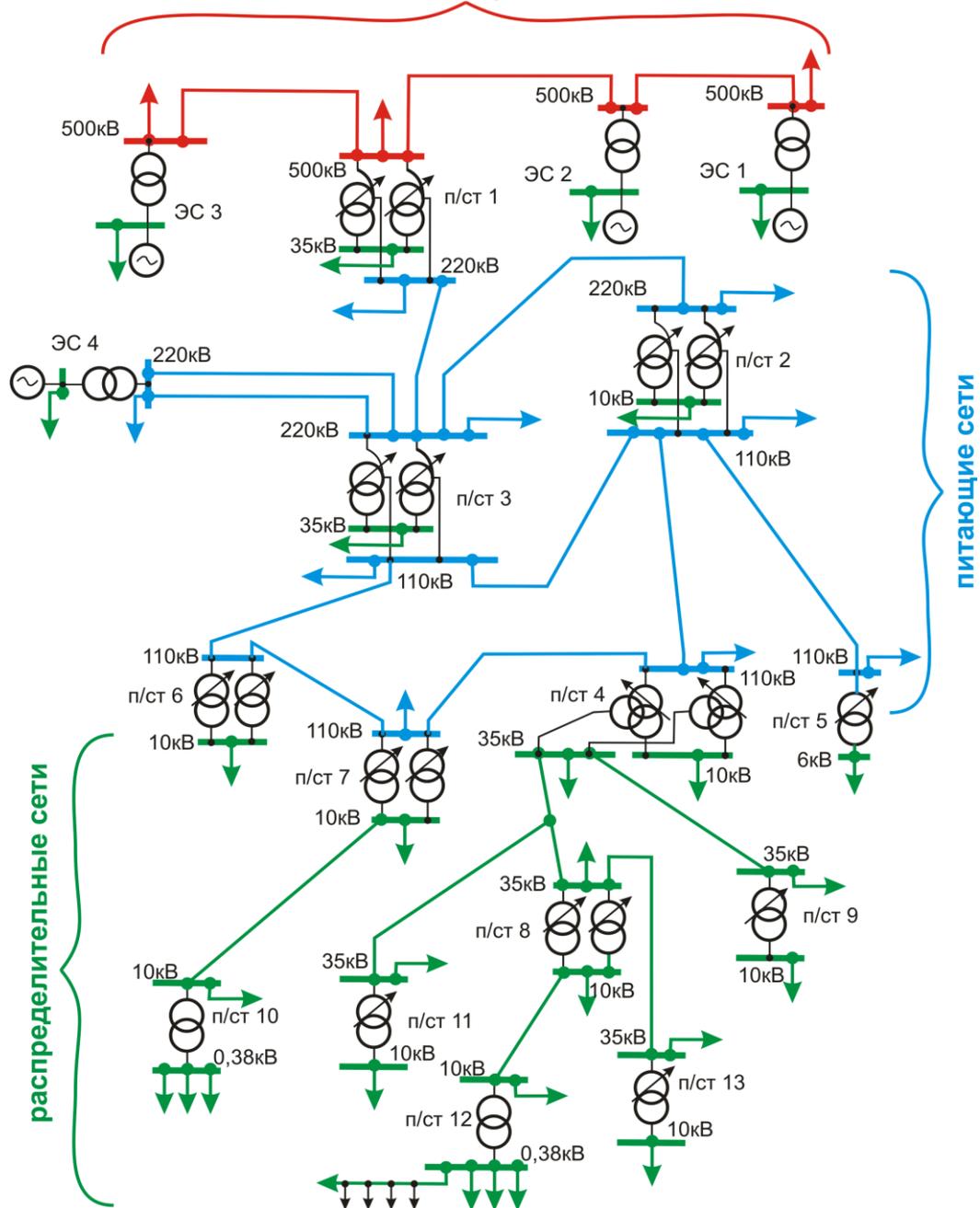
- сети низкого напряжения
- сети среднего напряжения
- сети высокого напряжения
- сети сверхвысокого напряжения

# Классификация сетей по функциональному назначению:

---

- системообразующие
- питающие
- распределительные

# системообразующие сети



## Классификация сетей по характеру потребителя:

---

- внутризаводские сети
- сети внешнего электроснабжения
- осветительные сети
- сети с/х назначения и т.д.

## Классификация сетей по конфигурации:

---

- замкнутые сети
- разомкнутые резервируемые сети
- разомкнутые нерезервируемые сети

## Классификация сетей по методам расчета:

---

- дальние ЛЭП
- районные ЛЭП
- местные ЛЭП

## Классификация сетей по режиму нейтрали:

- сети с глухозаземленной нейтралью
- сети с эффективно заземленной нейтралью
- сети с изолированной нейтралью
- сети с компенсированной нейтралью

# Классификация сетей по конструктивному исполнению:

- ВОЗДУШНЫЕ
- КАБЕЛЬНЫЕ
- ГАЗОВЫЕ
- КОМПАКТНЫЕ
- СУПЕРПРОВОДЯЩИЕ И  
ГИПЕРПРОВОДЯЩИЕ  
(КРИОГЕННЫЕ).

## Понятие режима

- **Режим системы** – совокупность процессов, происходящих в энергосистеме в данный момент времени или на каком-то интервале. Таким образом, режим системы определяет ее состояние. Соответствующий термин применим и к сети.
- **Параметрами режима** являются: перетоки мощности по участкам, напряжения в узловых точках, частота, угол сдвига между векторами ЭДС и напряжениями и т.д. Они тесно связаны с параметрами системы (сети).
- **Параметрами системы (сети)** являются полные, активные и реактивные сопротивления, взаимные проводимости, коэффициенты трансформации, постоянные времени агрегатов и т.д.

## **Различают три основных вида режимов:**

- **нормальный установившийся режим**
- **послеаварийный установившийся режим**
- **переходный режим**
- **В данной дисциплине рассматриваются два первых режима.**

## **Общая цель дисциплины:**

- **дать представление о физике процессов, происходящих в электроэнергетических системах и электрических сетях**
- **дать основные представления о методах расчета и требованиях к улучшению режимов работы электроэнергетических систем и электрических сетей**
- **дать основные сведения об условиях оптимального управления электроэнергетическими системами и сетями**

## Основные положения. Шкала номинальных напряжений

- Основные положения, принимаемые для расчетов установившихся режимов
- Система обозначений
- Сложившиеся номинальные напряжения элементов электроэнергетической системы

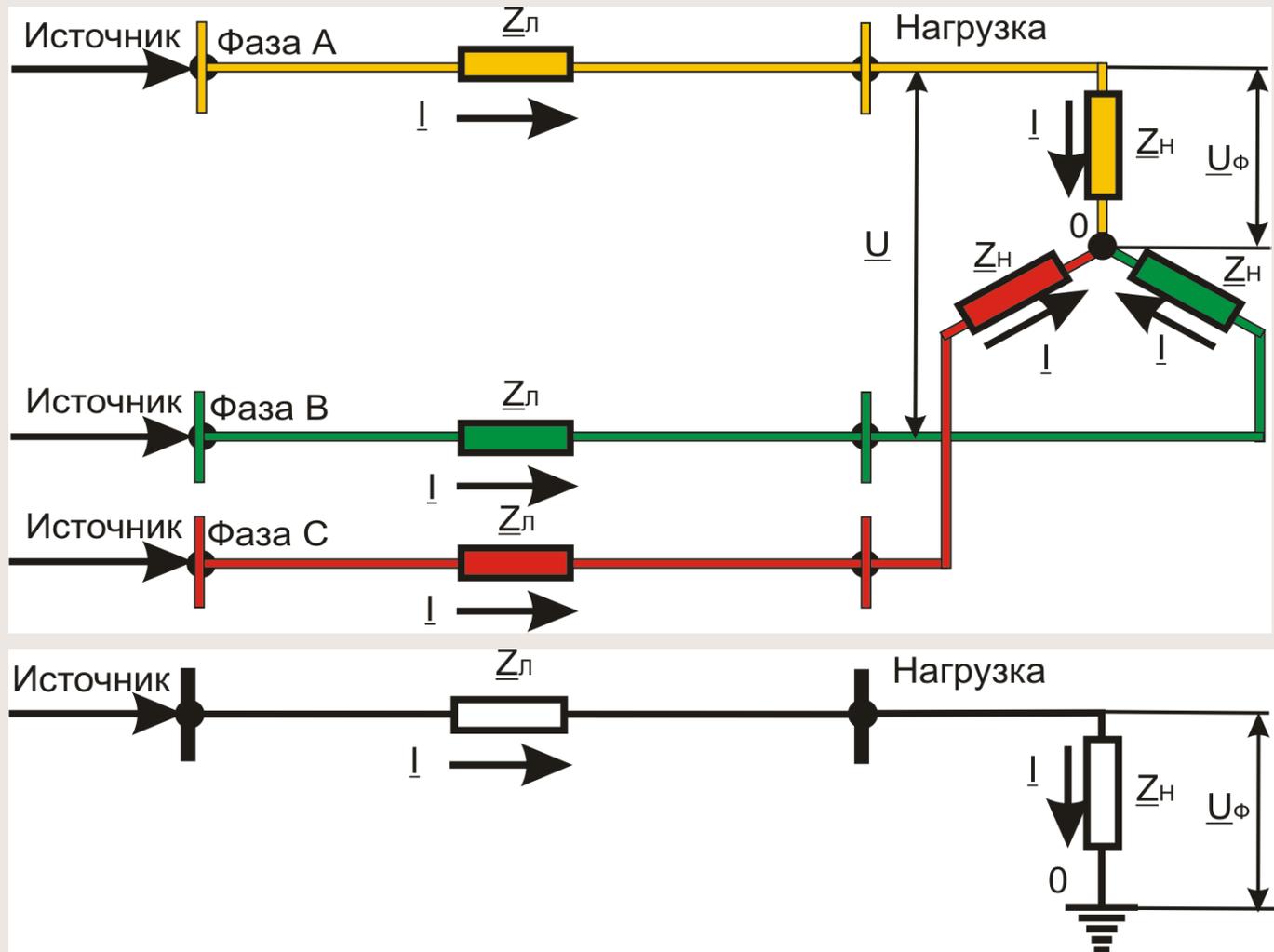
## Основные положения, принимаемые для расчетов установившихся режимов

В дальнейшем рассмотрению подлежат сети **общего назначения**, которые являются **трехфазными сетями переменного тока**.

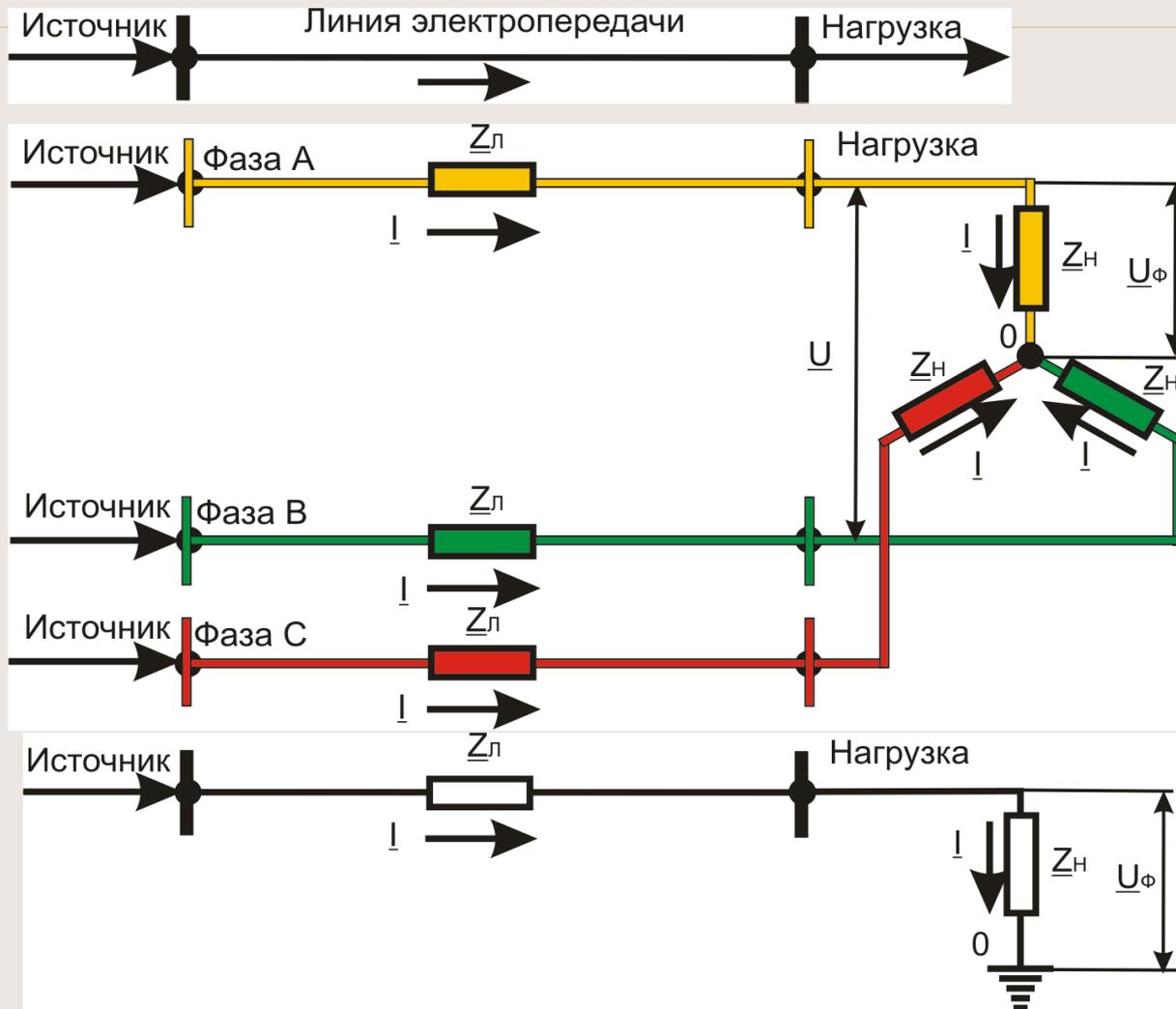
Как указывалось ранее, рассматриваются **установившиеся симметричные** режимы работы сетей, т.е. токи и напряжения представляют собой симметричную систему, их **значения изменяются по синусоидальному закону**.

Иными словами, **явления**, происходящие **во всех фазах** абсолютно **одинаковы**. Поэтому достаточно проанализировать параметры для одной фаз, а параметры двух других фаз при необходимости можно определить путем сдвига векторов на  $120^\circ$ .

# Расчетная схема и схема замещения трехфазной электрической сети, работающей в установившемся симметричном синусоидальном режиме



По линии с комплексным сопротивлением  $\underline{Z}_L$  к узлу нагрузки с комплексным сопротивлением  $\underline{Z}_H$  течет ток  $\underline{I}$ , равный фазному току приемника. Комплексное фазное напряжение узла нагрузки  $\underline{U}_\phi$ , а линейное (междуфазное) напряжение  $\underline{U}$ .



# Напряжение

Причем  $U = \sqrt{3} \cdot U_{\phi}$ .

Необходимо помнить, что **номинальные напряжения** электрических сетей – **это междуфазные напряжения**.

$$\underline{U} = U' \pm jU'' ,$$

где  $U'$  – активная составляющая вектора напряжения;  $U''$  – реактивная составляющая вектора напряжения.

# Ток

Вектор тока, протекающего по фазному проводу линии

$$\underline{I} = I' \mp jI'',$$

где  $I'$  – активная составляющая вектора тока;  
 $I''$  – реактивная составляющая вектора тока.

В этих выражениях перед реактивными составляющими ставятся знаки "**минус**" в случае **индуктивного** характера реактивностей, а в случае **емкостного** характера ставится знаки "**плюс**".

# Сопротивление и проводимость

Сопротивление элемента сети обозначают:

$$\underline{Z} = r \pm jx,$$

где  $r$  – активная составляющая (активное сопротивление);  
 $x$  – реактивная составляющая (реактивное сопротивление).

Проводимость элемента сети обозначают:

$$\underline{Y} = g \pm jb,$$

где  $g$  – активная составляющая (активная проводимость);  
 $b$  – реактивная составляющая (реактивная проводимость).

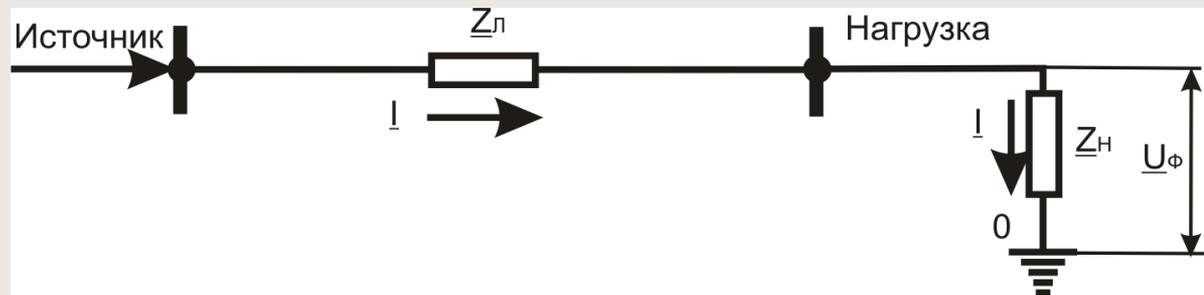
В этих выражениях перед реактивными составляющими ставятся знаки "**минус**" в случае **емкостного** характера реактивностей, а в случае **индуктивного** характера ставится знаки "**плюс**".

# Мощность

Полная мощность одной фазы

$$\underline{S}_\Phi = \underline{U}_\Phi \cdot \underline{I}^*$$

где  $\underline{I}^*$  – сопряженный комплекс тока.



# Мощность

Полная мощность трех фаз

$$\underline{S} = P + jQ = 3 \cdot \underline{U}_\phi \cdot \underline{I}^* = \sqrt{3} \cdot U \cdot \underline{I}^*;$$

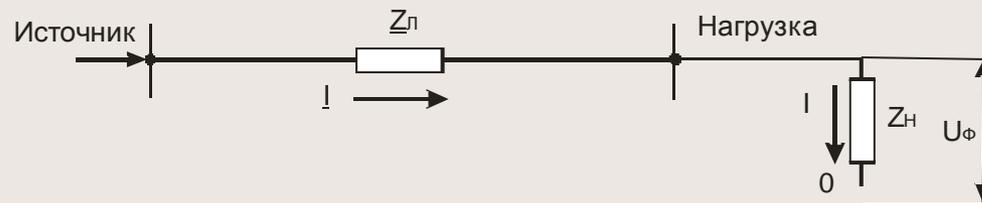
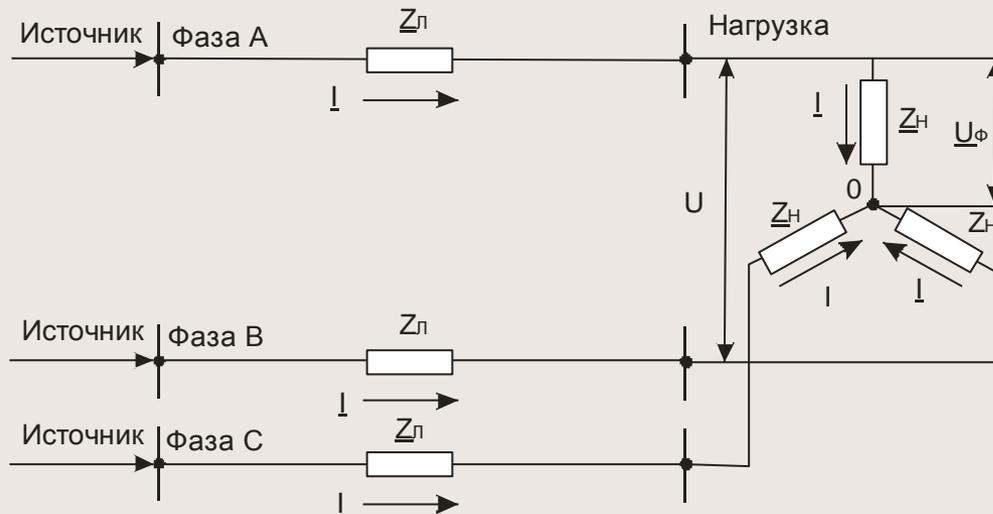
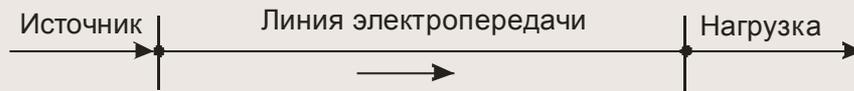
$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi; Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi,$$

где  $P$  – активная составляющая вектора мощности  
(активная мощность);

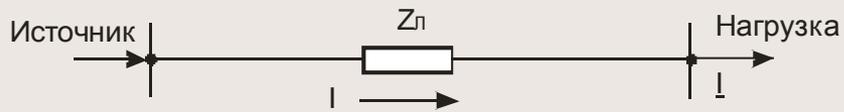
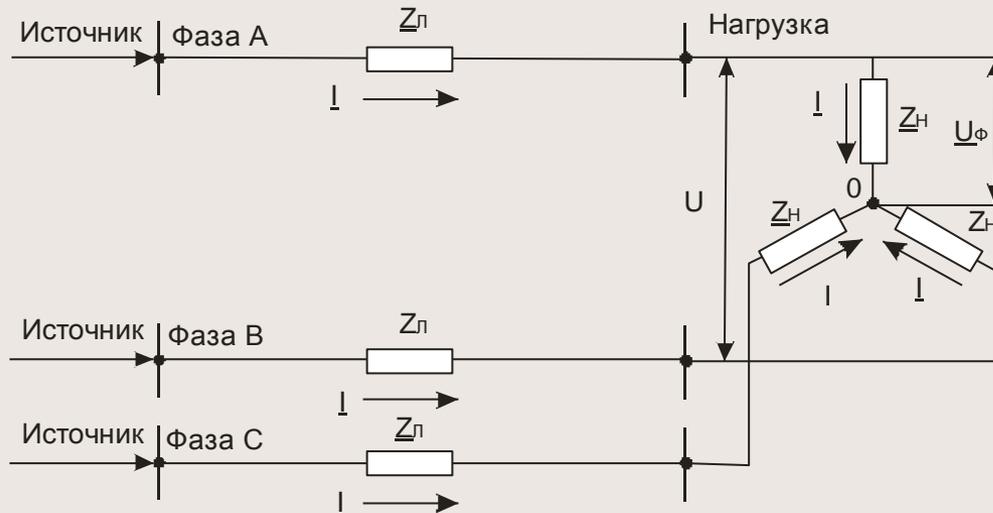
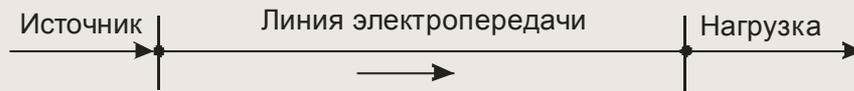
$Q$  – реактивная составляющая (реактивная  
мощность);

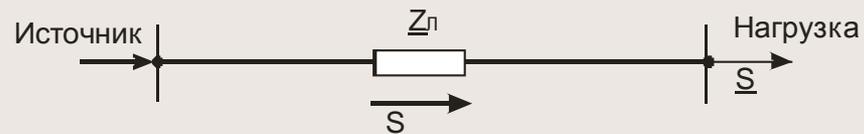
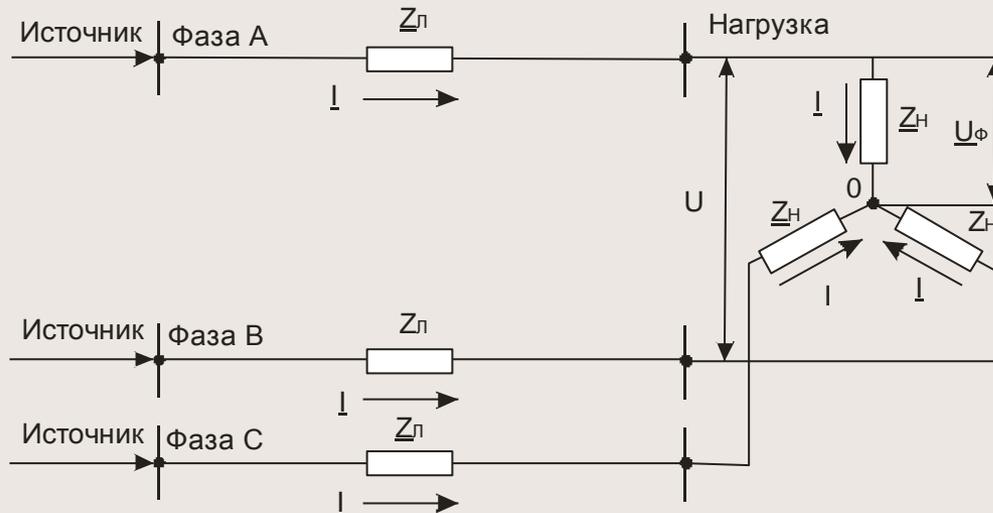
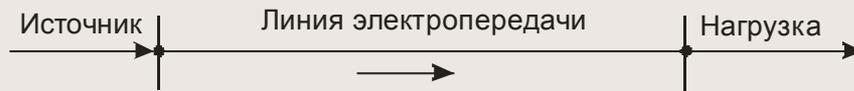
$\varphi$  - угол между комплексами тока и напряжения.  
Знак перед реактивными составляющими зависит от  
характера реактивности.

Знак "**минус**" ставится в случае **емкостного** характера  
реактивностей, а в случае **индуктивного** характера  
ставится знак "**плюс**".

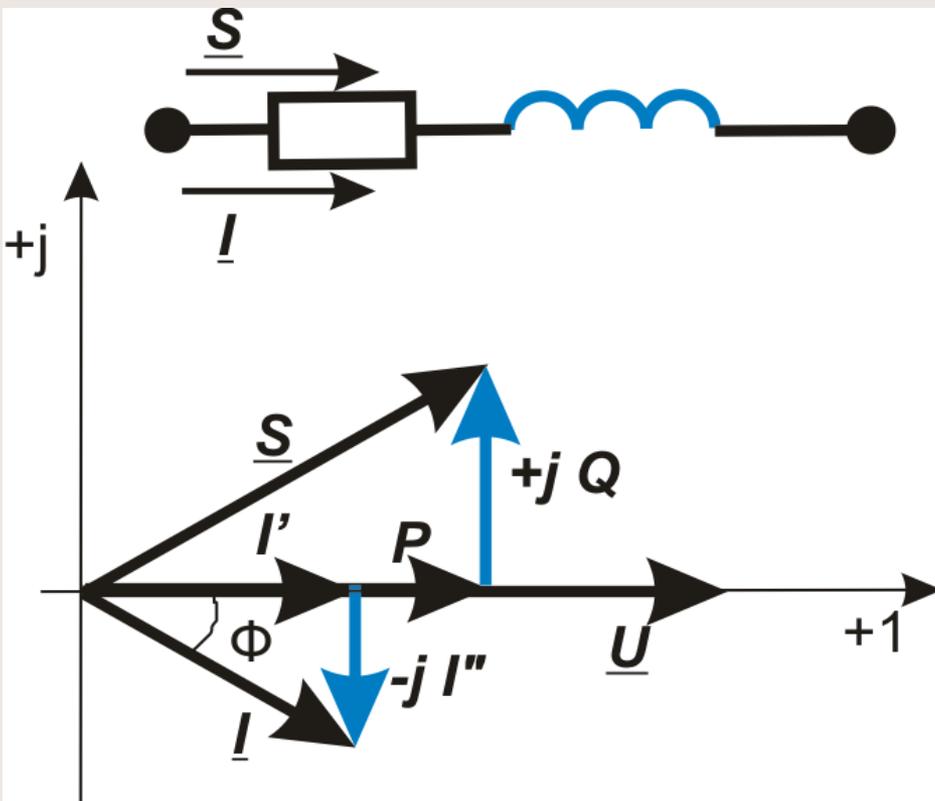








# Векторная диаграмма при **активно – индуктивной** нагрузке

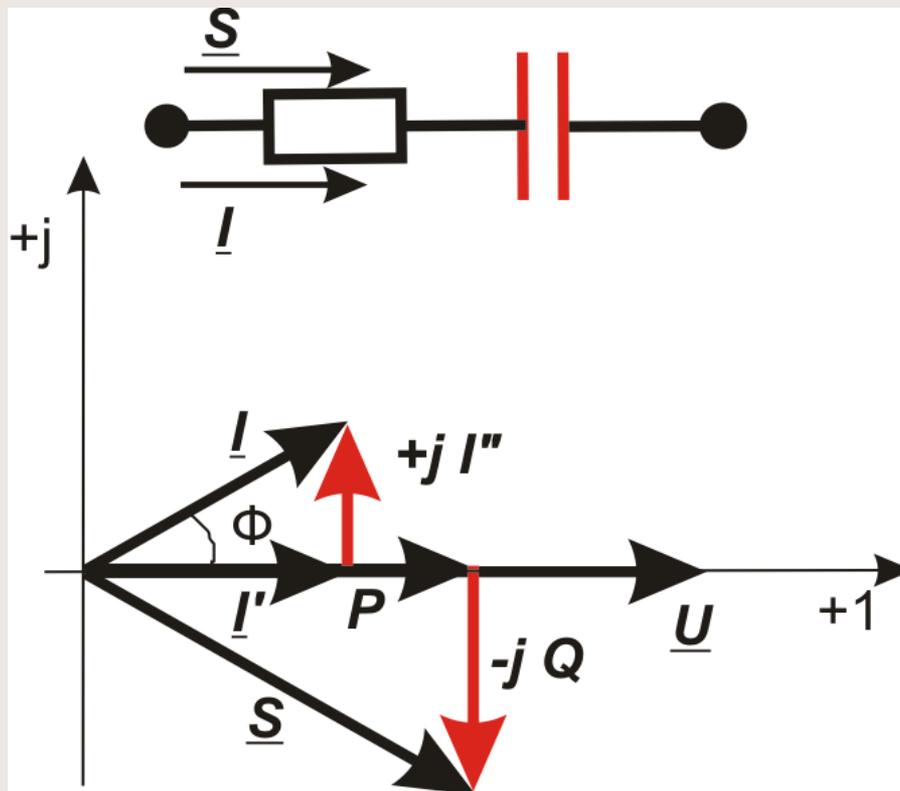


$$\underline{Z} = r + jx$$

$$\underline{I} = I' - jI''$$

$$\underline{S} = P + jQ$$

# Векторная диаграмма при **активно – емкостной** нагрузке



$$\underline{Z} = r - jx$$

$$\underline{I} = \underline{I}' + j\underline{I}''$$

$$\underline{S} = P - jQ$$

## Определение номинального напряжения

- Номинальным напряжением  $U_{НОМ}$  источников и приемников электроэнергии (генераторов, трансформаторов) называется то напряжение, на которое они рассчитаны в условиях нормальной работы.
- Номинальные напряжения электрических сетей, а также присоединяемых к ним источников и приемников электроэнергии устанавливаются ГОСТ 721-77.

## **Стандартные напряжения сетей и приемников электроэнергии переменного тока выше 1кВ:**

**3; 6; 10; 20; 35; 110; 150; 220; 330; 500; 750; 1150 кВ.**

**В настоящий момент сложились две системы номинальных напряжений сетей**

**3; 6; 10; 20; 35; 110; 150; 330; 750 кВ.**

**3; 6; 10; 20; 35; 110; 220; 500; 1150 кВ.**

## Номинальное напряжение генераторов

- По условиям компенсации потери напряжения в питаемой ими сети номинальное напряжение генераторов принимается на **5%** больше **номинального напряжения этой сети.**
- Кроме того, для генераторов большой мощности приняты также номинальные напряжения: **13,8; 15,75; 18; 20; 24; 27 кВ.**

## Номинальное напряжение трансформаторов и автотрансформаторов

- Номинальные напряжения трансформаторов и автотрансформаторов устанавливаются для всех обмоток **в режиме холостого хода**.
- ГОСТ предусматривает **две шкалы** напряжений:
  - ✓ одна для трансформаторов со встроенным устройством регулирования напряжения под нагрузкой (РПН),
  - ✓ другая для трансформаторов без РПН, т.е. снабженных устройством ПБВ (переключение без возбуждения).

# Номинальное напряжение трансформаторов и автотрансформаторов

- **Первичная обмотка** трансформатора является приемником электроэнергии и поэтому ее номинальное напряжение равно или несколько выше (примерно на **5%**) номинального напряжения генератора или питающей трансформатор сети.
- **Вторичные обмотки** являются питающими для сетей, которые к ним присоединены. С учетом частичной компенсации потери напряжения в питаемой сети а также и в самом трансформаторе или автотрансформаторе, напряжения вторичных обмоток трансформаторов и автотрансформаторов должны быть при нагрузке несколько выше номинальных напряжений присоединенных к ним сетей. Поэтому номинальное напряжение вторичных обмоток принимается на **5 – 10%** выше номинального напряжения питаемых через них сетей.

# Номинальные напряжения электрических сетей и их элементов, кВ.

ЛЭП и электро- приемников	Генераторов	Трансформаторов без РПН		Трансформаторов с РПН	
		У первичных обмоток	У вторичных обмоток	У первичных обмоток	У вторичных обмоток
0,22	0,23	0,22	0,23	-	-
0,38	0,40	0,38	0,40	-	0,40
0,66	0,69	0,66	0,69	-	-
3	3,15	3 и 3,15	3 и 3,3	-	-
6	6,3	6 и 6,3	6,3 и 6,6	6 и 6,3	6,3 и 6,6
10	10,5	10 и 10,5	10,5 и 11	10 и 10,5	10,5 и 11
20	21	20	22	20 и 21	22
35	-	35	38,5	35 и 36,75	38,5
110	-	-	121	110 и 115	115 и 121
150	-	-	165	158	158
220	-	-	242	220 и 230	230 и 242
330	-	330	347	330	330
500	-	500	525	500	-
750	-	750	787	750	-
1150	-	-	-	1150	-

**По экономическим соображениям и исходя из условий безопасности работы, сети различных номинальных напряжений имеют свои области применения, указанные в таблице**

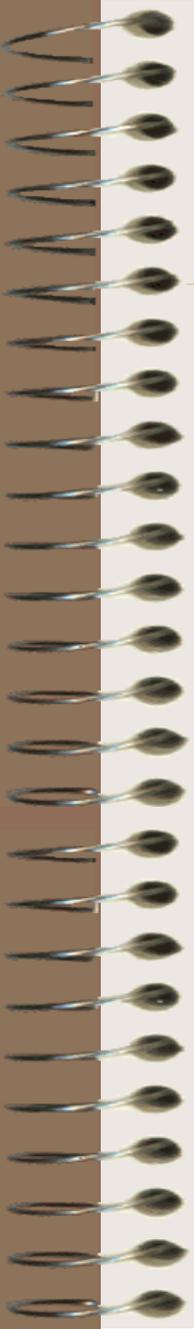
$U_{НОМ}$ кВ	Область применения
0,38/0,22	Низковольтные сети городских и сельских районов, внутрицеховые сети промышленных предприятий
0,66	Заводские сети и сети для питания силовой нагрузки при разработке полезных ископаемых
3; 6; 10; 20; 35	Питающие и распределительные сети городских и сельских районов, внутривзаводские сети при наличии высоковольтных двигателей
110; 150	Питающие и распределительные сети крупных населенных пунктов или энергорайонов. Применяются для глубоких вводов на энергоемких предприятиях
220	Применяются взамен расширения сетей 110 кВ при значительном росте нагрузок
330; 500; 750	Системообразующие линии электропередачи для объединения энергосистем

## **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.**
- **Герасименко А. А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии. – 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.**

## **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!**