

Дисциплина «Электрические станции и  
подстанции»

Болоев Евгений Викторович  
E-mail: [boloev@mail.ru](mailto:boloev@mail.ru)

10.09.2022

# Лекция 1: Общие сведения о производстве и распределении электроэнергии

1. Электрическая энергия. Электроустановки. Электроэнергетическая система (ЭЭС). Роль электрических станций и подстанций в ЭЭС. Классификация станций и подстанций.
2. Электрооборудование станций и подстанций. Подключение станций и подстанций к электрическим сетям. Стандартные номинальные напряжения для генераторов, электрических сетей и приемников.
3. Графики электрических нагрузок (суточные графики нагрузки потребителей, суточные графики нагрузки подстанций, суточные графики нагрузки станций, годовой график продолжительности нагрузок). Техничко-экономические показатели, определяемые из графиков нагрузок. Покрытие электрических нагрузок станциями в ЭЭС.

# 1. Электрическая энергия

**Электрическая энергия** (электроэнергия) – энергия электромагнитного поля во всех его проявлениях.

Электроэнергия обладает рядом свойств, которые обеспечивают возможность ее широкого применения:

- Простота производства. В мире функционирует огромное количество разнообразных генераторов электроэнергии.
- Легко преобразовывается в другие виды энергии. Электроэнергия легко преобразуется в механическую энергию (электродвигатели), тепловую (нагревательные приборы), энергию света (осветительные установки) и т.д.
- Передается с высокой скоростью с незначительными потерями на большие расстояния. Электроэнергия транспортируется по высоковольтным линиям электропередач без существенных потерь.
- Возможность совместного использования потребителями.

# 1. Электрическая энергия

Электроэнергия – это мощность в единицу времени.

Единица измерения киловатт в час (кВт·ч). Для характеристики больших объемов производства или потребления используются единицы измерения мегаватт в час (МВт·ч) и гигаватт в час (ГВт·ч).

Основные величины и параметры, с помощью которых можно охарактеризовать электрическую энергию, определить ее качество:

- электрическое напряжение  $U$ , которое измеряется в вольтах (В) и киловольтах (кВ);
- электрический ток  $I$ , который измеряется в А и килоамперах (кА);
- полная  $S$ , активная  $P$  и реактивная  $Q$  мощности, которые измеряются соответственно в киловольт-амперах кВА, киловаттах кВт и киловольт-ампер реактивный квар;
- частота сети  $f$ .

# 1. Электрическая энергия

Электроэнергия обладает рядом особенностей:

- электроэнергию в настоящее время невозможно накопить в промышленных масштабах, что определяет единовременность и связанность процессов производства, передачи, преобразования и потребления электроэнергии;
- электроэнергия визуально не воспринимается человеком, передача электроэнергии сопровождается потерями, источники и потребители влияют на качество электроэнергии, что требует контроля и управления электроэнергией.

Эти особенности привели к созданию электроустановок и их объединению в электроэнергетические системы.

# 1. Электроустановки. Электроэнергетическая система

Электроустановка – совокупность машин, аппаратов, линий и вспомогательного оборудования (вместе с сооружениями и помещениями, в которых они установлены), предназначенных для производства, преобразования, трансформации, передачи, распределения электроэнергии и преобразования ее в другие виды энергии.

Электроэнергетическая система – совокупность электроустановок электрических станции и электрических сетей и питающихся от них электроприемников, объединенные общностью процесса производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии.

Электрическая сеть – совокупность электроустановок для передачи и распределения электроэнергии, состоящая из подстанций, распределительных устройств, токопроводов, воздушных и кабельных линий электропередачи, работающих на определенной территории.

# РОЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

**Электрические станции** являются важнейшим элементом энергосистемы, основное назначение которых производство электроэнергии.

Электростанции классифицируются:

- 1) по району обслуживания;
- 2) по виду первичного энергоносителя.

По району обслуживания различают

- а) *районные электростанции* (ЭС) служат для электроснабжения электроэнергией большого экономического района;
- б) *местные ЭС* строятся в местах, удалённых на большие расстояния от энергосистемы, для обеспечения электроэнергией одного или нескольких потребителей;
- в) *передвижные ЭС* используются чаще всего при ремонтно-восстановительных работах, новом строительстве или для временного электроснабжения потребителей до их подключения к постоянному источнику электроэнергии.

# РОЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

По виду перерабатываемой энергии ЭС различают:

- а) *атомные* (вырабатывают 13 % энергии) – это тепловые станции, использующие энергию ядерных реакций;
- б) *тепловые* (вырабатывают 72 % энергии) – химическая энергия сжигаемого топлива преобразуется в котле в энергию водяного пара, приводящего во вращение турбоагрегат (паровую турбину, соединённую с генератором).
- в) *гидравлические* (гидроэлектростанции) вырабатывают 15 % энергии – используют для производства электроэнергии поток падающей воды, приводящий во вращение гидротурбины, которые в свою очередь вращают электрогенераторы.
- г) *ветровые* преобразуют энергию ветра;
- д) *солнечные* – используется энергия солнца через фотоэлементы путём прямого получения электроэнергии или использования теплового излучения солнца, сфокусированного зеркалами на парогенераторе, пар из которого вращает турбину с генераторами;
- е) *водородные ЭС* – электростанции, которые используют энергию водорода.

# РОЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Тепловые ЭС классифицируются по роду *первичного двигателя* на:

- газотурбинные;
- паротурбинные;
- с МГД (магнитогидродинамическими) генераторами;
- дизельные.

Паротурбинные ЭС классифицируются по *типу турбин*:

- конденсационные;
- теплоэлектроцентрали;
- геотермальные.

Гидравлические ЭС классифицируются по конструкции гидроустройств:

- плотинные;
- приплотинные;
- деривационные;
- приливные;
- наплавные;
- гидроаккумулирующие.

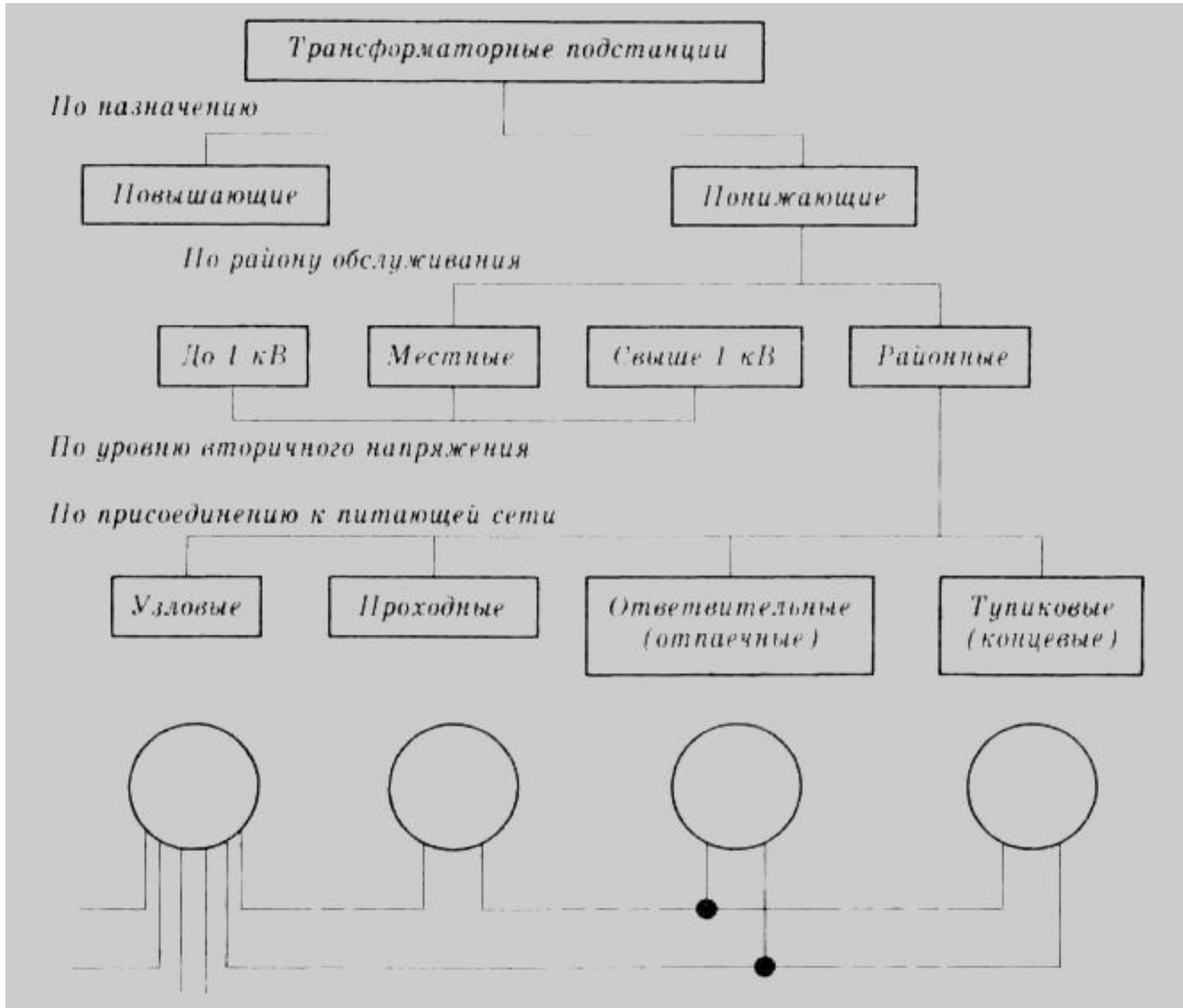
# РОЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

**Электрические подстанции** являются важнейшим элементом энергосистемы, основное назначение которых прием, преобразование и распределение электроэнергии.

Повышающие подстанции сооружаются рядом с электростанциями, они служат для связи электростанций с электроэнергетической системой и передачи электроэнергии высоким напряжением потребителям.

Понижающие подстанции сооружаются в районах потребления электроэнергии (районные) или непосредственно у потребителей (местные). Они предназначены для понижения высокого напряжения питающей сети в более низкое напряжение, которое служит для питания потребителей и электроприёмников. Понижающие подстанции бывают с одним низшим напряжением, в этих случаях устанавливаются двухобмоточные трансформаторы, или со средним напряжением и низшим напряжением – применяются трёхобмоточные трансформаторы.

# РОЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ



# ПРЕИМУЩЕСТВА ОБЪЕДИНЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Объединение изолированных станций и создание ЭЭС даёт ряд технических и экономических преимуществ:

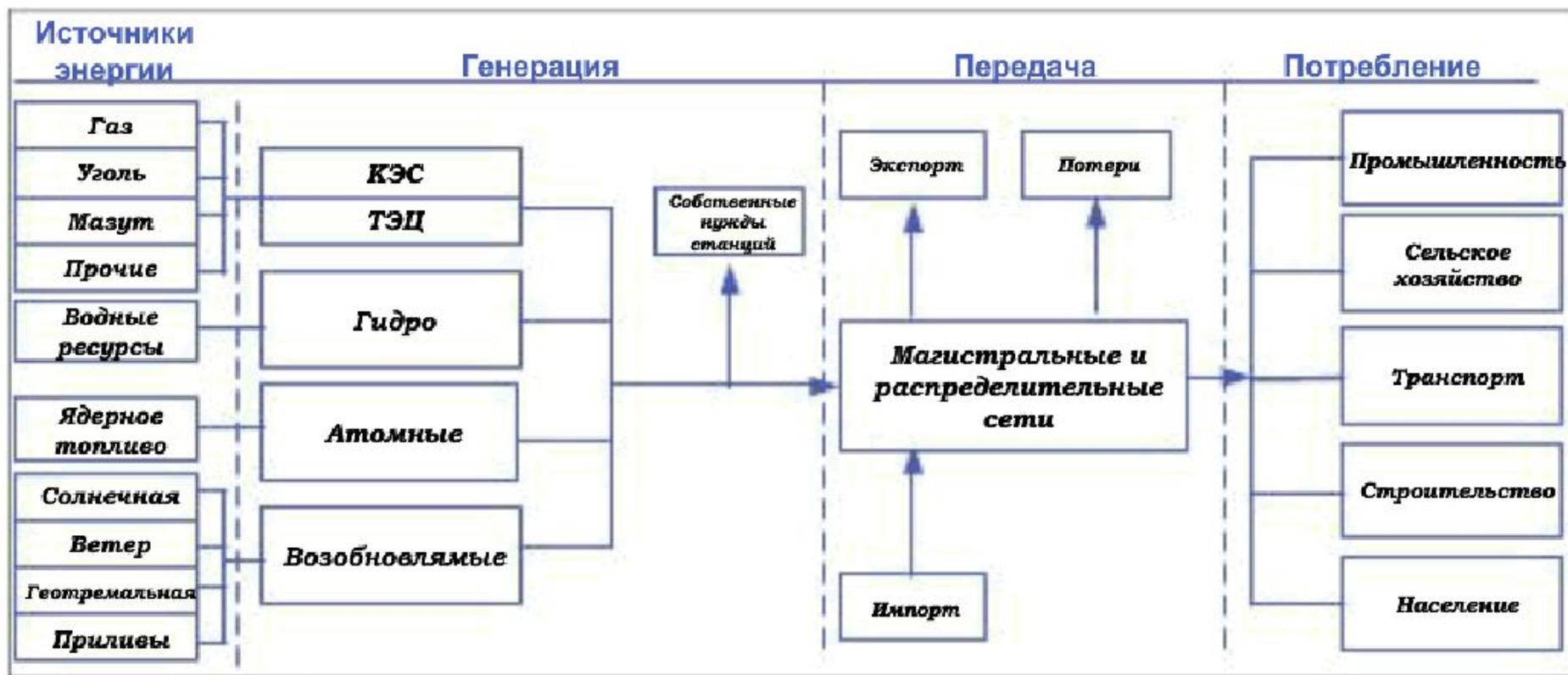
- 1) повышает надёжность и экономичность электроснабжения;
- 2) позволяет производить такое распределение нагрузки между станциями, при котором достигается наиболее экономичная выработка электроэнергии в целом по системе при наилучшем использовании энергетических ресурсов района (топлива, водной энергии);
- 3) улучшает качество электроэнергии, т.е. обеспечивает постоянство частоты и напряжения, так как колебания нагрузки воспринимаются большим количеством агрегатов;
- 4) при параллельной работе нескольких станций нет необходимости устанавливать резервные агрегаты на каждой станции, а достаточно иметь общую для всей энергосистемы резервную мощность, величина которой составляет обычно порядка 10-12 % мощности агрегатов системы, но не менее мощности самого крупного агрегата, установленного на станциях системы (на случай аварийного отключения или планового ремонта).

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

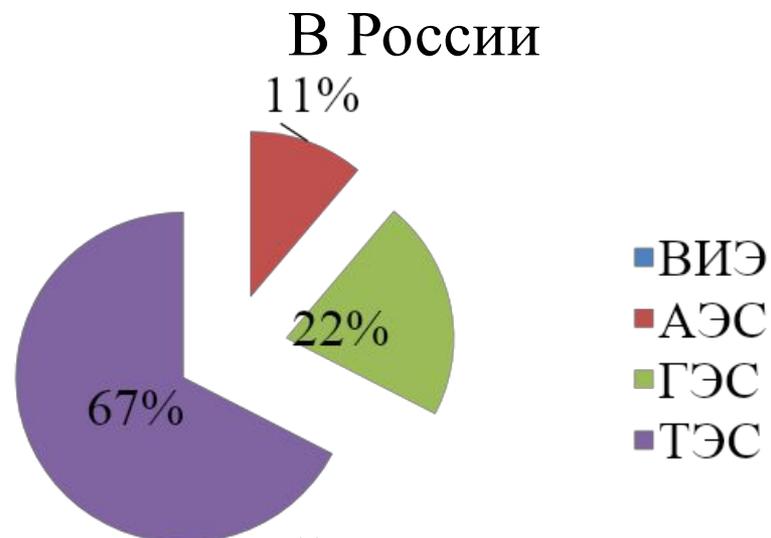
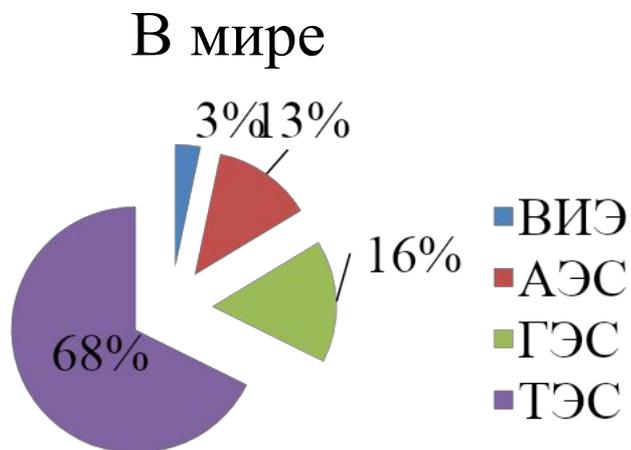
Генерирующие  
компании

Транспортные  
компании

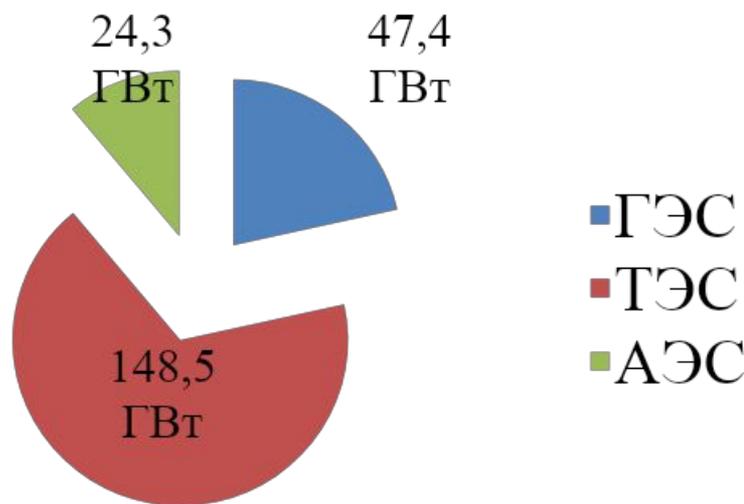
Сбытовые  
компании



# СТРУКТУРА ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПО ВИДАМ ГЕНЕРАЦИИ



## УСТАНОВЛЕННАЯ МОЩНОСТЬ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В РОССИИ



Мощность крупнейшей ТЭС России – Сургутской ГРЭС-2, составляет 4800 МВт.

Крупнейшие ГЭС России: Саяно-Шушенская – 6400 МВт, Красноярская – 6000 МВт, Братская – 4500 МВт.

Крупнейшие АЭС России: Ленинградская, Курская и Балаковская – по 4000 МВт каждая.

## 2. Электрооборудование станций и подстанций. Подключение станций и подстанций к электрическим сетям.

Электроэнергетика в России, странах ближнего зарубежья и в Европейских странах базируется на трёхфазном переменном токе с частотой 50 Гц (в США и в некоторых других странах принято 60 Гц). Применение трёхфазного тока объясняется большей экономичностью сетей и установок трёхфазного тока по сравнению с установками однофазного переменного тока, а также возможностью применения наиболее надёжных, простых и экономичных асинхронных двигателей по сравнению с электродвигателями других типов.

Наряду с трёхфазным переменным током в некоторых отраслях промышленности применяют и постоянный ток (электролиз в химической промышленности и цветной металлургии, электрифицированный транспорт и др.).

## 2. Электрооборудование станций и подстанций. Подключение станций и подстанций к электрическим сетям

Основным оборудованием электрических станций являются **генераторы и трансформаторы.**

Другие аппараты и устройства являются **вспомогательным оборудованием:**

**Коммутационные аппараты** – предназначены для включения и отключения электрической цепи. (К ним можно отнести – разъединители, выключатели высокого и низкого напряжения, рубильники, переключатели и т.д.).

**Аппараты защиты** – для защиты электрических цепей от ненормальных режимов работы (к.з., перегрузка). Сюда относятся предохранители высокого и низкого напряжения, различного рода реле.

**Пускорегулирующие аппараты** – для управления электроприводами и другими промышленными потребителями электроэнергии (двигатели – пуск, остановка, регулирование скорости вращения). Это контакторы, пускатели, реостаты и т.д.

**Ограничивающие аппараты** – для ограничения токов к.з. (реакторы) и перенапряжений (разрядники).

**Контролирующие аппараты** – для контроля заданных электрических и неэлектрических параметров. Сюда относятся различного рода реле и датчики.

**Регулирующие аппараты** – для автоматической и непрерывной стабилизации и регулирования заданных параметров. Это различные стабилизаторы и регуляторы.

**Измерительные аппараты** – для изоляции цепей первичной коммутации от цепей измерительных приборов и релейной защиты. (Измерительные трансформаторы тока и напряжения).

а так же устройства заземления, молниезащиты и т.п.

## 2. Стандартные номинальные напряжения для генераторов, электрических сетей и приемников.

Подключение электростанций и подстанций осуществляется посредством линий электропередачи электрических сетей.

Электрические сети по уровню напряжений принято делить на сети:

- низкого напряжения (НН) – до 1 кВ;
- среднего напряжения (СН) – 3-35 кВ;
- высокого напряжения (ВН) – 110-220 кВ;
- сверхвысокого напряжения (СВН) – 330-750 кВ;
- ультравысокого напряжения (УВН) – 1150 кВ и выше.

*Номинальным напряжением* сетей, генераторов, трансформаторов, приёмников электроэнергии и т.д. называется то напряжение, при котором они предназначены для нормальной работы.

## 2. Стандартные номинальные напряжения для генераторов, электрических сетей и приемников трёхфазного переменного тока

Номинальные напряжения				Наибольшее рабочее напряжение
Сети и приёмники энергии	Генераторы	Трансформаторы		
		Обмотка ВН	Обмотка НН	
1	2	3	4	5
<b>В ВОЛЬТАХ</b>				
220	230	220	230	-
380	400	380	400	-
660	690	660	690	-
<b>В КИЛОВОЛЬТАХ</b>				
(3)	3,15	3 и 3,15	3,15 и 3,3	3,5
(6)	6,3	6 и 6,3	6,3 и 6,6	6,9
10	10,5	10 и 10,5	10,5 и 11	11,5
20	21	20 и 21	21 и 22	23
35	-	35	38,5	40,5
110	-	110	121	126
(150)	-	150	165	172
220	-	220	242	252
330	-	330	347	363
500	-	500	525	525
750	-	750	787	787
1150	-	1 150	1200	1200

## 2. Стандартные номинальные напряжения для генераторов, электрических сетей и приемников трёхфазного переменного тока

Номинальные напряжения для генераторов мощностью от 100 МВт и выше

Мощность генератора, МВт	Номинальное напряжение, кВ
100	10,5-13,8
150	18
200	15,75
300	20
500	20; 36,75
800-1200	24

## 2. Подключение станций и подстанций к электрическим сетям.

При выборе номинального напряжения сети учитываются следующие общие рекомендации:

- напряжения 10 (6) кВ используются для промышленных, городских и сельскохозяйственных распределительных сетей; наибольшее распространение для таких сетей получило напряжение 10 кВ;
- применение напряжения 6 кВ для новых объектов не рекомендуется, но может использоваться при реконструкции существующей электрической сети при наличии в ней высоковольтных двигателей на такое напряжение;
- в настоящее время в связи с ростом нагрузок коммунально-бытового сектора имеется тенденция к повышению напряжения распределительных сетей в крупных городах до 20 кВ;
- напряжение 35 кВ широко используется для создания центров питания сельскохозяйственных распределительных сетей 10 кВ; в связи с ростом мощностей сельских потребителей для этих целей начинает применяться напряжение 110 кВ;
- напряжения 110-220 кВ применяются для создания региональных распределительных сетей общего пользования и для внешнего электроснабжения крупных потребителей;
- напряжения 330 кВ и выше используются для формирования системообразующих связей ЕЭС и для выдачи мощности крупными электростанциями.

### 3. Графики электрических нагрузок

Электрическая нагрузка отдельных потребителей, а следовательно, и суммарная их нагрузка, определяющая режим работы электростанций в энергосистеме, непрерывно меняется. Принято отражать этот факт графиком нагрузки, т.е. диаграммой изменения мощности или тока электроустановки во времени.

По виду фиксируемого параметра различают графики активной  $P$ , реактивной  $Q$ , полной  $S$  мощностей и тока  $I$  электроустановки.

Как правило, графики отражают изменение нагрузки за определенный период времени. По этому признаку их подразделяют на суточные (24 ч), месячные, сезонные, годовые и т.п.

По месту изучения или элементу энергосистемы, к которому они относятся, графики можно разделить на следующие группы:

графики нагрузки потребителей, определяемые на шинах подстанций;

сетевые графики нагрузки - на шинах районных и узловых подстанций;

графики нагрузки энергосистемы, характеризующие результирующую нагрузку энергосистемы;

графики нагрузки электростанций.

Графики нагрузки используют для анализа работы электроустановок, для проектирования системы электроснабжения, для составления прогнозов электропотребления, для планирования ремонтов оборудования, для ведения нормального режима работы, для распределения электрических нагрузок между электростанциями и т.д.

### 3. Графики электрических нагрузок

Различают фактические и перспективные графики нагрузки.

Фактические графики нагрузки получают с помощью регистрирующих приборов, которые фиксируют изменение соответствующего параметра во времени.

Перспективные суточные графики нагрузок получают в результате обработки нескольких фактических графиков нагрузки. Для удобства расчетов перспективные графики электрических нагрузок выполняют ступенчатыми с интервалом осреднения 30 минут. Выбор интервала осреднения обусловлен постоянной нагрева проводников и соответственно электрооборудования, которая составляет 10 минут. Переходный процесс практически считается законченным за время трех постоянных нагревов.

При проектировании станций и подстанций важное значение среди перспективных графиков нагрузки имеют типовые графики нагрузки по отраслям промышленности. Это ступенчатые графики построенные в относительных единицах, в которых максимальная нагрузка принята за 100 %. Получая расчетные максимальные нагрузки и используя типовые графики нагрузки потребителей можно получить перспективные графики нагрузок подстанций, суммарную нагрузку энергосистемы в целом и определить максимальную нагрузку каждой электростанции.

### 3. Графики электрических нагрузок Технико-экономические показатели, определяемые из графиков нагрузок

**Средняя нагрузка** – постоянная, неизменная во времени нагрузка в течение рассматриваемого промежутка времени, которая вызывает такой же расход электроэнергии, что и реальная, изменяющаяся нагрузка за этот же промежуток времени

$$P_c = \frac{\int_0^T P(t) \Delta t}{T}$$

В практических целях в качестве средней нагрузки используется среднечасовая, средняя нагрузка за смену, за сутки, среднегодовая нагрузка.

**Среднеквадратичная нагрузка** – нагрузка, которая не изменяется в течение промежутка времени  $T$  и вызывает потери мощности и энергии в элементах системы электроснабжения потребителей такие же, как реальная нагрузка, изменяющаяся за это же время:

$$P_{ск} = \sqrt{\frac{1}{T} * \int_0^T P^2(t) dt}; I_{ск} = \sqrt{\frac{1}{T} * \int_0^T I^2(t) dt}; P_{ск} = \sqrt{\frac{\sum P_i^2 * \Delta t}{T}}$$

Среднеквадратичная нагрузка используется для определения потерь мощности и энергии в элементах системы электроснабжения.

**Максимальная нагрузка** – это наибольшая из средних нагрузок за рассматриваемый промежуток времени. При этом различают максимальную длительную и максимальную кратковременную нагрузки. Максимальная длительная нагрузка характеризуется периодом усреднения от нескольких минут до нескольких часов. Из максимальной длительной нагрузки важнейшее значение имеет расчетная нагрузка.

Под *расчетной* понимается такая условная нагрузка, которая эквивалентна реальной нагрузке по наиболее тяжелому тепловому эффекту.

### 3. Техничко-экономические показатели, определяемые из графиков нагрузок

Некоторые показатели графиков нагрузки:

**1. Коэффициент максимума графика:**

$$K_{\text{мг}} = \frac{P_p}{P_c}$$

В практике электроснабжения при определении расчетных нагрузок вместо коэффициента максимума используют коэффициент расчетной нагрузки:

$$K_p = \frac{P_p}{P_c}$$

**2. Коэффициент заполнения графика:**

$$K_{\text{зг}} = \frac{P_c}{P_m}$$

**3. Коэффициент формы графика:**

$$P_{\text{фг}} = \frac{P_{\text{ск}}}{P_c}$$

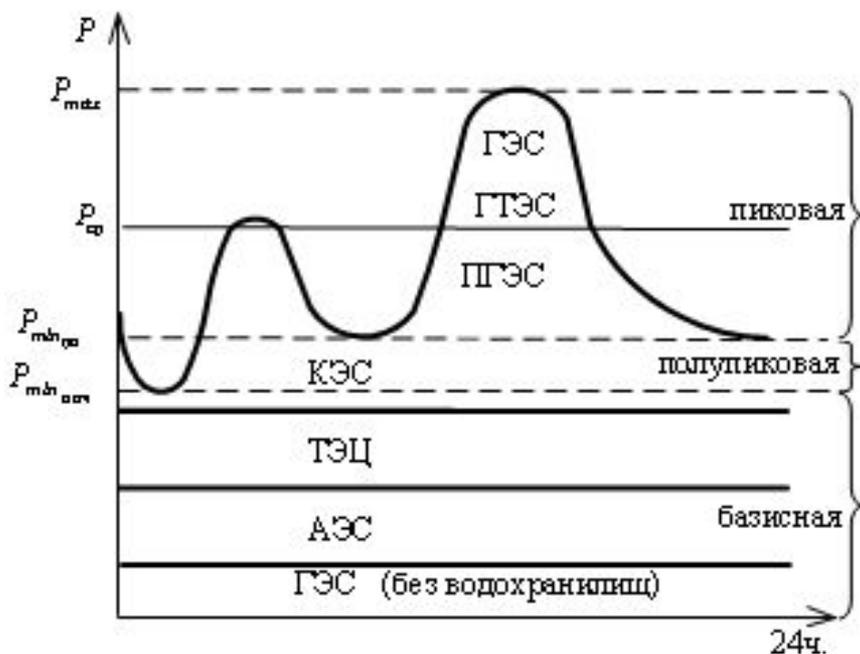
**4. Продолжительность использования максимальной нагрузки**

$$T_{\text{max}} = \frac{W}{P_{\text{max}}} = \frac{\sum P_i T_i}{P_{\text{max}}}$$

**5. Время максимальных активных потерь**

$$\tau_{\text{max}} = \frac{\sum P_i^2 T_i}{P_{\text{max}}^2}$$

### 3. Покрытие электрических нагрузок станциями в ЭЭС



Сведения об участии электростанций разных типов в формировании общего суточного графика выработки электроэнергии покажем графически.

В постоянной **базисной** части графика работают электростанции, на которых невозможно, неэкономично или небезопасно регулирование мощности. К таким станциям относятся ГЭС без водохранилищ, атомные электростанции и ТЭС.

Конденсационные электростанции экономичнее использовать в базисной части графика, но при необходимости на них осуществляется регулирование мощности для покрытия переменных нагрузок в **полупиковой** зоне.

В **пиковой** части суточного графика энергосистемы используются ГЭС и ГАЭС, ГТЭС и ПГЭС. На перечисленных станциях легко и с малыми затратами регулируется мощность в зависимости от требований энергосистемы. Необходимо иметь в виду, что ГАЭС, ГТЭС и ПГЭС вырабатывают незначительное количество электроэнергии в масштабах энергосистемы.