

# **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

## **Лекция 6**

**Лектор: д.т.н., проф.  
Абросимов Леонид Иванович**

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

- *Электростанция* – электроустановка, служащая для производства (генерации) электрической энергии.
- *Подстанция* – электроустановка, предназначенная для приёма, преобразования (трансформации) и распределения электроэнергии, состоящая из трансформаторов (автотрансформаторов) и других преобразователей ЭЭ, распределительных и вспомогательных устройств. Подстанция может быть повышающей, если преобразование величины напряжения переменного тока осуществляется с низшего напряжения на высшее (подстанции электростанций), и понижающей (понижительной) – в случае трансформации высшего напряжения на низшее (подстанции предприятий, городов и др.).
- *Линия электропередачи (ЛЭП)* – электроустановка, предназначенная для передачи электрической энергии на расстояние с возможным промежуточным отбором. Линии выполняют воздушными, кабельными, а также в виде токопроводов на промышленных предприятиях и электростанциях
- *Потребитель ЭЭ, электроприёмник (ЭП)* – аппарат, агрегат, механизм (электродвигатель, преобразователь, светильник и др.), потребляющий или преобразующий ЭЭ в другие виды энергии.
- *Электропередача* – это линия с повышающей и понижающей подстанциями, служащая для транзитной передачи электроэнергии от станции к концентрированному потребителю.
- *Электрическая сеть* – объединение преобразующих подстанций, распределительных устройств, переключательных пунктов и соединяющих их линий электропередачи, предназначенных для передачи ЭЭ от электростанции к местам потребления и распределения её между потребителями.

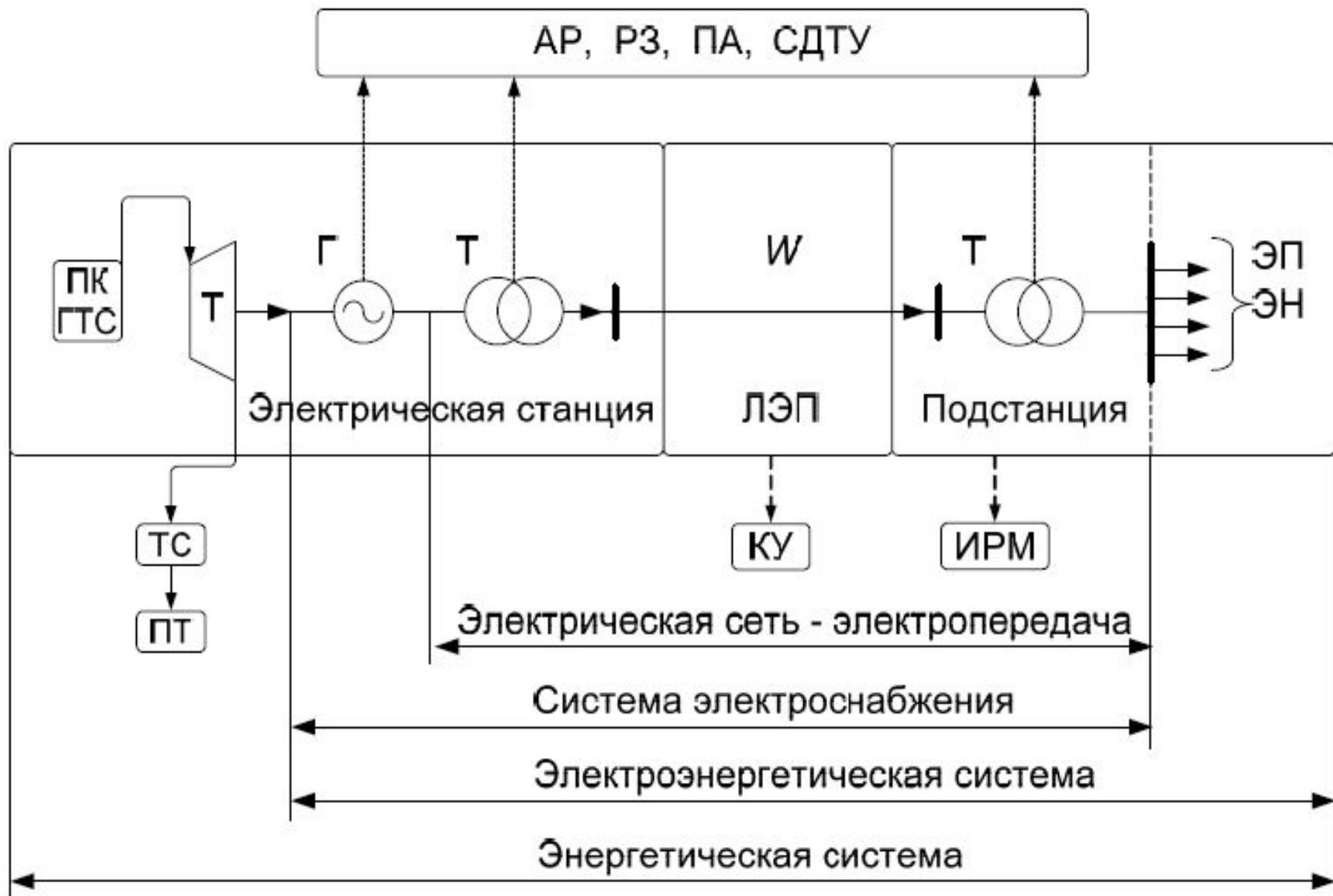


Рис. 1.1. Взаимосвязь объектов, обеспечивающих производство, передачу, распределение и потребление электрической и тепловой энергии

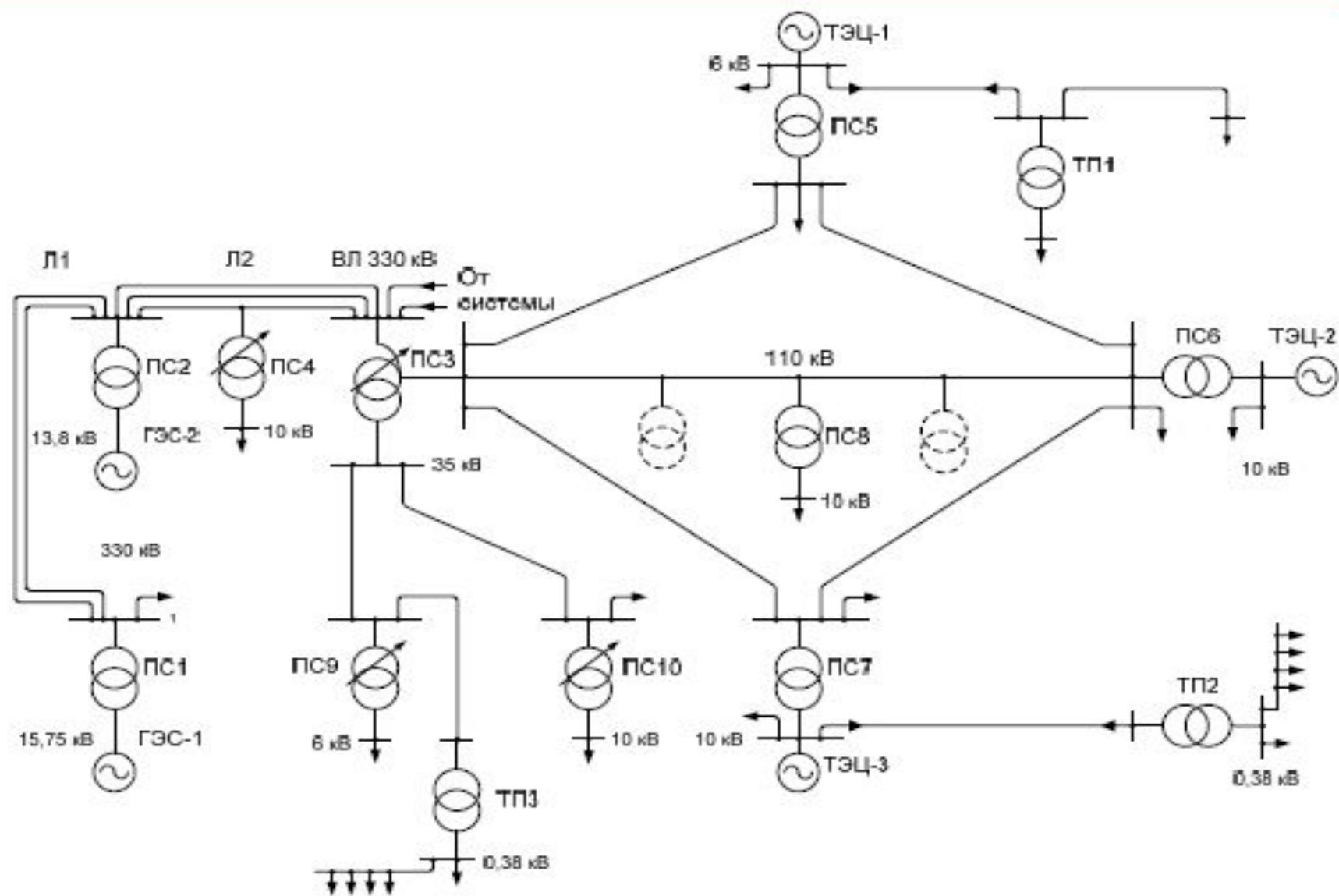
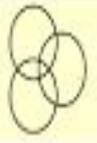
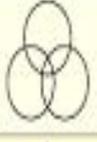
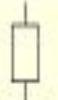
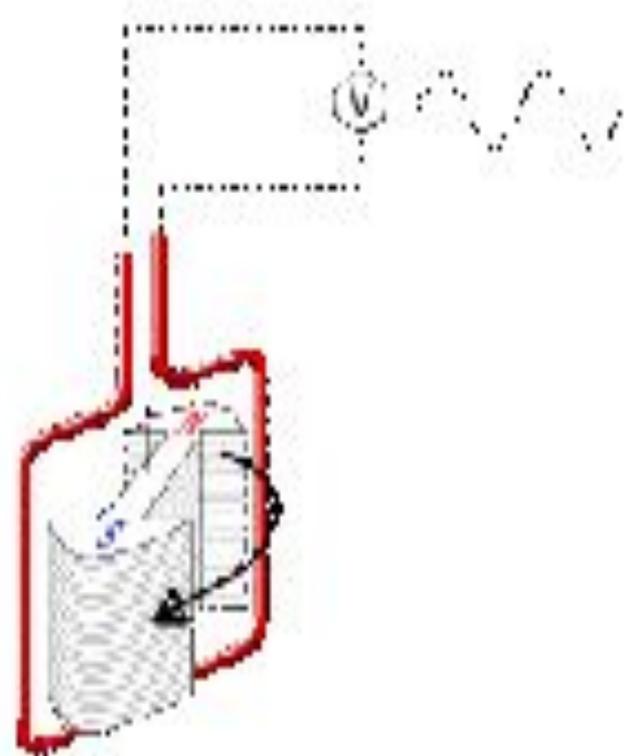


Рис. 1.8. Принципиальная схема передачи и распределения электроэнергии в промышленном районе

## Графические обозначения элементов в электрических схемах

Вид элемента	Графическое обозначение
Ток постоянный	—
Ток переменный	~
Машина электрическая	
Машина постоянного тока	
Двигатель переменного тока	
Трансформатор силовой, трехфазный, двухобмоточный	
Трансформатор силовой, трехфазный, трехобмоточный	
Трансформатор силовой, трехфазный с расщепленной обмоткой низшего напряжения	
Автотрансформатор силовой	

Автотрансформатор силовой	
Реактор	
Реактор двойной	
Выключатель в силовых цепях	
Выключатель нагрузки	
Разъединитель	
Разъединитель заземляющий	
Отделитель	



Принцип действия генератора основан на законе электромагнитной индукции — индуцирование электродвижущей силы в прямоугольном контуре (проволочной рамке), находящейся в однородном вращающемся магнитном поле. Или наоборот, прямоугольный контур вращается в однородном неподвижном магнитном поле.

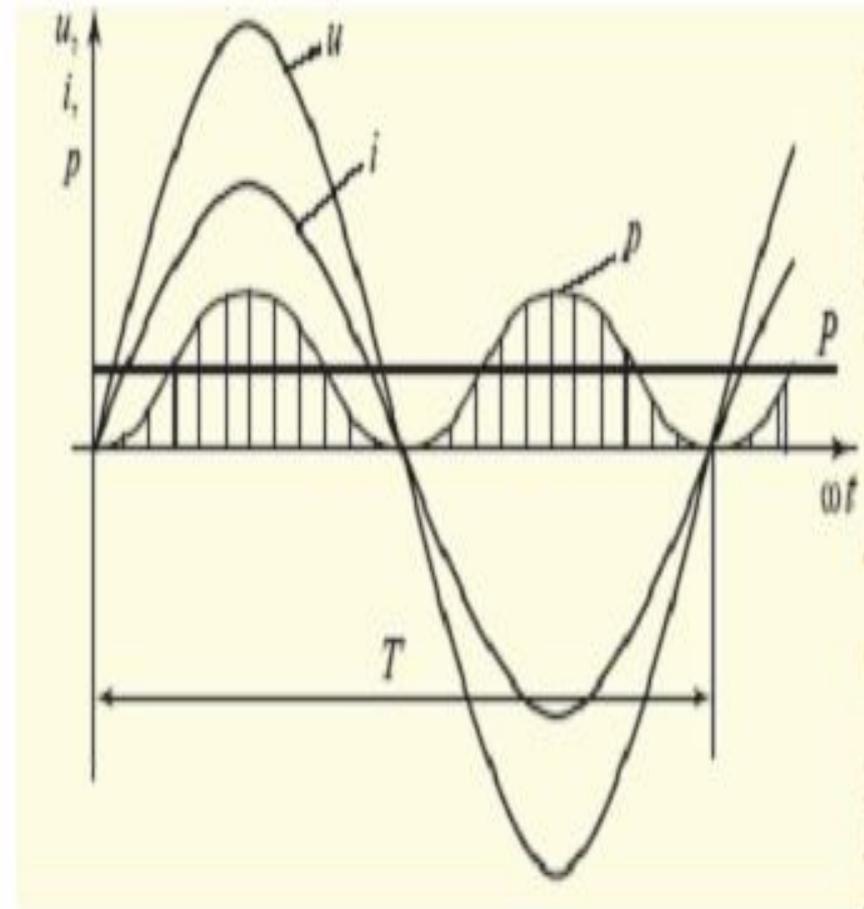
## Мощности в цепях синусоидального тока

Мгновенная мощность резистивного элемента с током  $i = I_m \sin \omega t$  и напряжением  $u = RI_m \sin \omega t$  изменяется по закону

$$p = \frac{RI_m^2}{2} (1 - \cos 2\omega t).$$

Среднее значение этой мощности

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \, dt = \frac{RI_m^2}{2} = RI^2 = UI$$



## ИСТОЧНИКИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

- Электрическая энергия, вырабатываемая генераторами электростанций, характеризуется их *активной и реактивной мощностью*.
- Активная мощность потребляется *электроприемниками*, преобразуясь в тепловую, механическую и другие виды энергии.
- Реактивная мощность характеризует электроэнергию, преобразуемую в энергию электрических и магнитных полей.
- В *электрической сети* и ее электроприемниках происходит процесс обмена энергией между электрическими и магнитными полями. Устройства, которые целенаправленно участвуют в этом процессе, называют *источниками реактивной мощности* (ИРМ).
- Такими устройствами могут быть не только генераторы электрических станций, но и *синхронные компенсаторы*, реакторы, *конденсаторы*, реактивной мощностью которых управляют по определенному закону регулирования с помощью специальных средств.

# ИСТОЧНИКИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

- Электрическая энергия, вырабатываемая генераторами электростанций, характеризуется их *активной* и *реактивной мощностью*.
- Активная мощность потребляется *электроприемниками*, преобразуясь в тепловую, механическую и другие виды энергии.
- Реактивная мощность характеризует электроэнергию, преобразуемую в энергию электрических и магнитных полей.
- В *электрической сети* и ее электроприемниках происходит процесс обмена энергией между электрическими и магнитными полями. Устройства, которые целенаправленно участвуют в этом процессе, называют *источниками реактивной мощности* (ИРМ).
- Такими устройствами могут быть не только генераторы электрических станций, но и *синхронные компенсаторы*, реакторы, *конденсаторы*, реактивной мощностью которых управляют по определенному закону регулирования с помощью специальных средств.

# ФИЗИКА ПРОЦЕССА

- Переменный ток идет по проводу в обе стороны, в идеале нагрузка должна полностью усвоить и переработать полученную энергию.
- Для переменного тока при рассогласованиях между генератором и потребителем происходит одновременное протекание токов от генератора к нагрузке и от нагрузки к генератору (нагрузка возвращает запасенную ранее энергию любым реактивным элементом, имеющим собственную индуктивность или ёмкость).
- Индуктивный реактивный элемент стремится сохранить неизменным протекающий через него ток, а ёмкостной — напряжение. Через идеальные резистивные и индуктивные элементы протекает максимальный ток при нулевом напряжении на элементе и, наоборот, максимальное напряжение оказывается приложенным к элементам, имеющим ёмкостной характер, при токе, протекающем через них, близком к нулю.
- Поскольку одной из особенностей индуктивности является свойство сохранять неизменным ток, протекающий через нее, то при протекании тока нагрузки появляется фазовый сдвиг между током и напряжением (ток «отстает» от напряжения на фазовый угол).
- Разные знаки у тока и напряжения на период фазового сдвига, как следствие, приводят к снижению энергии электромагнитных полей индуктивностей, которая восполняется из сети.

Мощность электрооборудования *электроэнергетической системы* (генераторы, *линии электропередач, трансформаторы*, электроприемники и т. п.) определяется его *полной мощностью*. Полная мощность  $S$  при синусоидальной форме напряжения и тока связана с активной  $P$  и реактивной  $Q$  мощностями квадратичной зависимостью  $S^2 = P^2 + Q^2$ . При этом полная мощность  $S = UI$ , активная  $P = UI \cos\varphi$  и реактивная  $Q = UI \sin\varphi$ , где  $U$  и  $I$  — действующие значения синусоидального напряжения и тока;  $\varphi$  — угол между векторами напряжения и тока.

В конденсаторах, *кабелях* и других видах электрооборудования, которое характеризуется емкостным сопротивлением  $X_C$ , реактивной мощностью  $Q = U^2/X_C$ , определяемой приложенным напряжением  $U$ , создаются *электрические поля*.

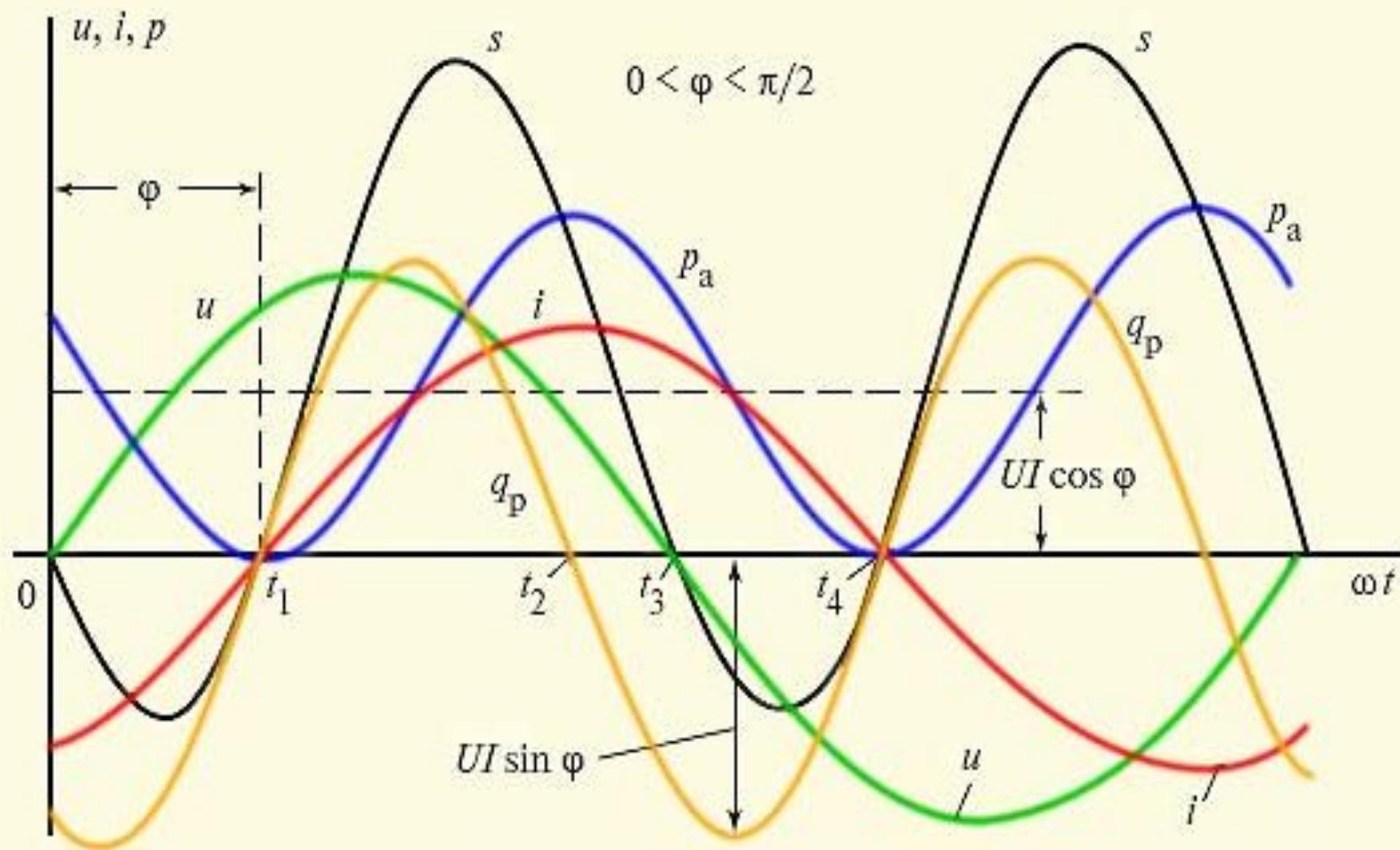
В индуктивных элементах системы, например в реакторах, трансформаторах, *электродвигателях*, создаются *магнитные поля*. В этом случае реактивная мощность  $Q = I^2 X_L$  определяется током  $I$  и индуктивным сопротивлением элемента  $X_L$ .

Емкостной ток в идеальном конденсаторе *опережает* приложенное к нему напряжение на 90 эл. град. Тогда мощность этого конденсатора  $Q_C = UI \sin(-\varphi) = -UI$  имеет отрицательный знак. В этом случае говорят, что конденсатор генерирует реактивную мощность.

Индуктивный ток в идеальном реакторе *отстает* от приложенного к нему напряжения на 90 эл. град. Мощность реактора  $Q_L = UI \sin\varphi$  имеет положительный знак. В этом случае говорят, что реактор потребляет реактивную мощность.

Очевидно, что в понятиях «генерирование» и «потребление» реактивной мощности заложена определенная условность, но тем самым подчеркивается, что взаимодействие емкостных и индуктивных элементов в электрической сети имеет компенсирующий эффект  $Q_\Sigma = Q_L - Q_C$ . Это свойство элементов широко используется на практике для *компенсации реактивной мощности*, тем самым снижая падение напряжения в сети, потери электроэнергии.

- Фактически же по цепи протекает переменный ток, мгновенное значение которого определяется выражением  $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$ .
- Под действием этого тока на элементах цепи устанавливается напряжение  $u_a = U_m \cos \varphi \sin(\omega t - \varphi)$  - активная составляющая;  $u_p = U_m \sin \varphi \sin(\omega t - \varphi \pm \pi/2)$  реактивная составляющая. Здесь  $U_m$  и  $I_m$  — амплитуды синусоидальных напряжения и тока. Мощность, потребляемая активными элементами электрической цепи, определяется как функция времени выражением  $p_a = i u_a = UI \cos \varphi [1 - \cos 2(\omega t - \varphi)]$ , реактивная мощность, потребляемая (генерируемая) реактивными элементами,
  - $-q_p = i u_p = \pm UI \sin \varphi \sin 2(\omega t - \varphi)$ . Линейные диаграммы, отображающие мгновенные значения напряжения и тока в активно-индуктивной цепи, а также соответствующие им мощности приведены на рисунках
- Амплитуды активной и реактивной мощностей, изменяющихся по синусоидальному закону с двойной частотой ( $2\omega$ ), составляют  $P = UI \cos \varphi$  и  $Q = UI \sin \varphi$ , т.е. те самые значения мощностей, которыми пользуются при расчетах режимов и выборе оборудования. При этом мгновенные значения «потребляемой» в индуктивных элементах и «генерируемой» в емкостных элементах реактивной мощности в каждый момент времени имеют противоположный знак, в чем, как было отмечено выше, и проявляется их взаимокомпенсирующее действие.

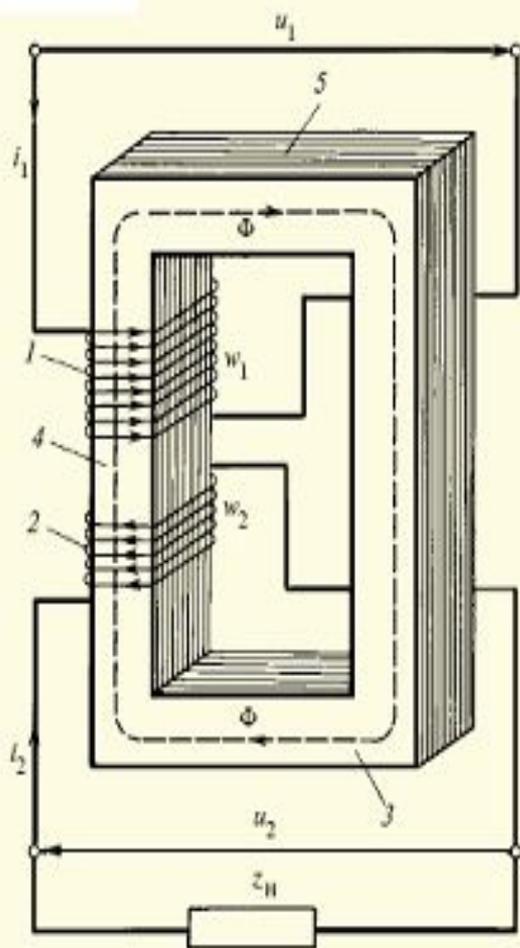


Изменения мгновенных значений полной  $s$ , активной  $p_a$  и реактивной  $q_p$  мощностей в цепи с активно-индуктивной нагрузкой ( $0 < \varphi < \pi/2$ )

# ТРАНСФОРМАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

- Для связи с энергосистемой и потребителями, а также для питания собственных потребителей станции (собственных нужд) на электрических станциях и подстанциях устанавливают повышающие и понижающие трансформаторы.
- В связи с тем что в сетях энергосистем существует несколько ступеней трансформации, количество трансформаторов и их мощность в несколько раз превышают число и установленную мощность генераторов. (на каждый установленный киловатт генераторной мощности приходится 7—8 кВА трансформаторной мощности, а на вновь вводимый — до 12—15 кВА). На крупных электростанциях для связи двух высших напряжений, как правило, применяются автотрансформаторы, обладающие существенными технико-экономическими преимуществами в сравнении с обычными трансформаторами. Стоимость автотрансформатора, потери энергии при эксплуатации значительно ниже, чем у обычных трансформаторов той же мощности.
- На подстанциях 35—750 кВ энергосистем России работает около 2500 силовых трансформаторов и автотрансформаторов общей мощностью более 570 тыс. МВ · А, что почти втрое больше установленной мощности электростанций.

# ПРИНЦИП РАБОТЫ И УСТРОЙСТВО ТРАНСФОРМАТОРА



В основе работы трансформатора лежит явление *электромагнитной индукции*, в соответствии с которым значение *электродвижущей силы* (ЭДС), наведенной в контуре, пропорционально скорости изменения потока  $\Phi$ , пронизывающего этот контур. Если в контуре имеется несколько последовательно соединенных витков  $w$ , то наведенная в катушке ЭДС будет в  $w$  раз больше. Трансформатор состоит из замкнутого магнитопровода  $3$  и двух обмоток с числом витков  $w_1$  и  $w_2$ .

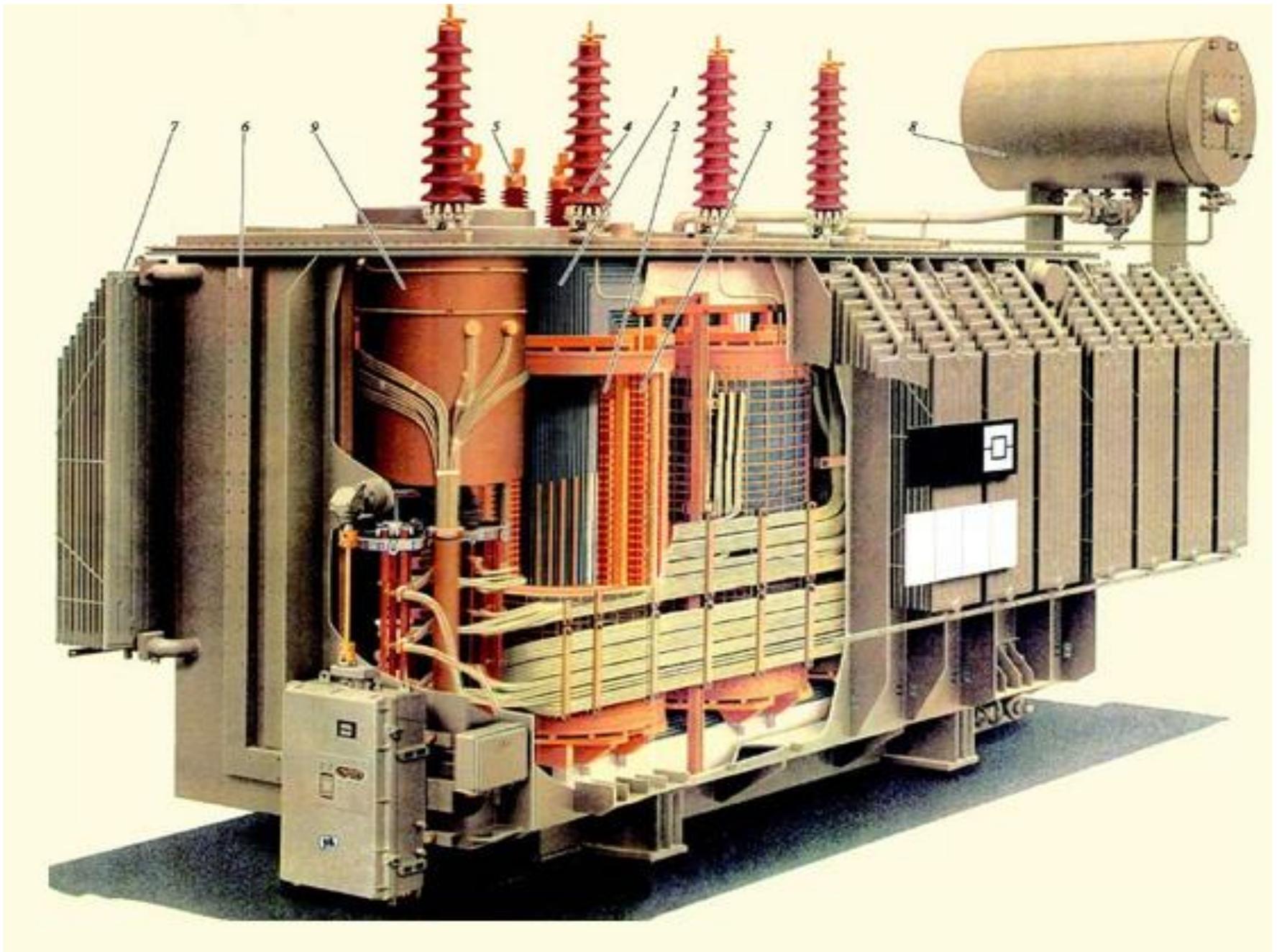
Обмотки трансформатора служат для создания *магнитного поля*, посредством которого осуществляется передача электрической энергии и обеспечивается наведение в обмотках ЭДС, требуемой по условиям эксплуатации. Обмотки выполняют из медных или алюминиевых изолированных проводов круглого или прямоугольного сечения.

Обмотку  $w_1$  трансформатора, к которой подводится электрическая энергия (напряжение  $u_1$ ), называют *первичной*, а обмотку  $w_2$ , от которой энергия отводится (напряжение  $u_2$ ), — *вторичной*.

*Магнитопровод* трансформатора служит для усиления магнитной связи между обмотками и является конструктивным основанием (остовом) для установки и крепления обмоток, отводов и других деталей трансформатора

Электромагнитная система однофазного двухобмоточного трансформатора:  
1 — первичная обмотка; 2 — вторичная обмотка; 3, 4, 5 — магнитопровод: 4 — стержень магнитопровода; 3, 5 — ярма магнитопровода

- Для *силовых трансформаторов* установлены стандартные обозначения (маркировка) начал и концов (выводов) обмоток.
- В однофазном трансформаторе начало и конец обмотки *высшего напряжения* (ВН) обозначается соответственно прописными буквами  $A$  и  $X$ , а обмотки *низшего напряжения* (НН) — строчными латинскими буквами  $a$  и  $x$ . При наличии третьей обмотки с промежуточным (*средним*) напряжением (СН) начало и конец обмотки обозначают соответственно  $A_m$  и  $X_m$ .
- В трехфазном трансформаторе начала и концы обмоток ВН обозначаются соответственно  $A, B, C$  и  $X, Y, Z$  и т.д.
- В трехфазных трансформаторах обмотки могут быть соединены по схемам «звезда», «треугольник» или «зигзаг», которые соответственно обозначают русскими буквами У и Д и латинской  $Z$ . При выводе от нейтрали (общей точки обмоток фаз) у схемы «звезда» или «зигзаг» отвода (ответвления) его обозначают  $0$ , добавляя к буквенным обозначениям схем соединения обмоток индекс «н» ( $U_n$ ).
- Схемы соединения трехфазного трансформатора обозначаются в виде дроби, в числителе которой ставят обозначение схемы соединения обмотки ВН, а в знаменателе — НН, например для трансформатора с обмоткой ВН, соединенной по схеме треугольник, а НН — в звезду с выведенной нейтралью обозначение имеет вид  $D/U$ .



## ПОТЕРИ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Важной величиной, характеризующей экономичность работы трансформатора, является *коэффициент полезного действия* (КПД), равный отношению активной мощности, отдаваемой трансформатором во вторичную сеть  $P_2$ , к активной мощности  $P_1$ , потребляемой из сети:

$$\eta = P_2 / P_1.$$

Первичная активная мощность определяется суммой, которая включает активную мощность  $P_2$ , магнитные потери  $P_m$  (потери в стали), электрические потери в первичной и вторичной обмотках  $P_{э1}$ ,  $P_{э2}$ :

$$P_1 = P_2 + P_m + P_{э1} + P_{э2}.$$

В современных силовых трансформаторах КПД достигает 0,98—0,995, причем максимальные значения КПД получаются при  $(0,45—0,65)P_{2ном}$ . Такая нагрузка обычно соответствует средней нагрузке при эксплуатации трансформатора. Отметим, что в диапазоне нагрузок  $(0,4—1,5)P_{2ном}$  КПД трансформатора изменяется относительно мало

# КОММУТАЦИОННЫЕ И ЗАЩИТНЫЕ АППАРАТЫ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

## Назначение и классификация аппаратов

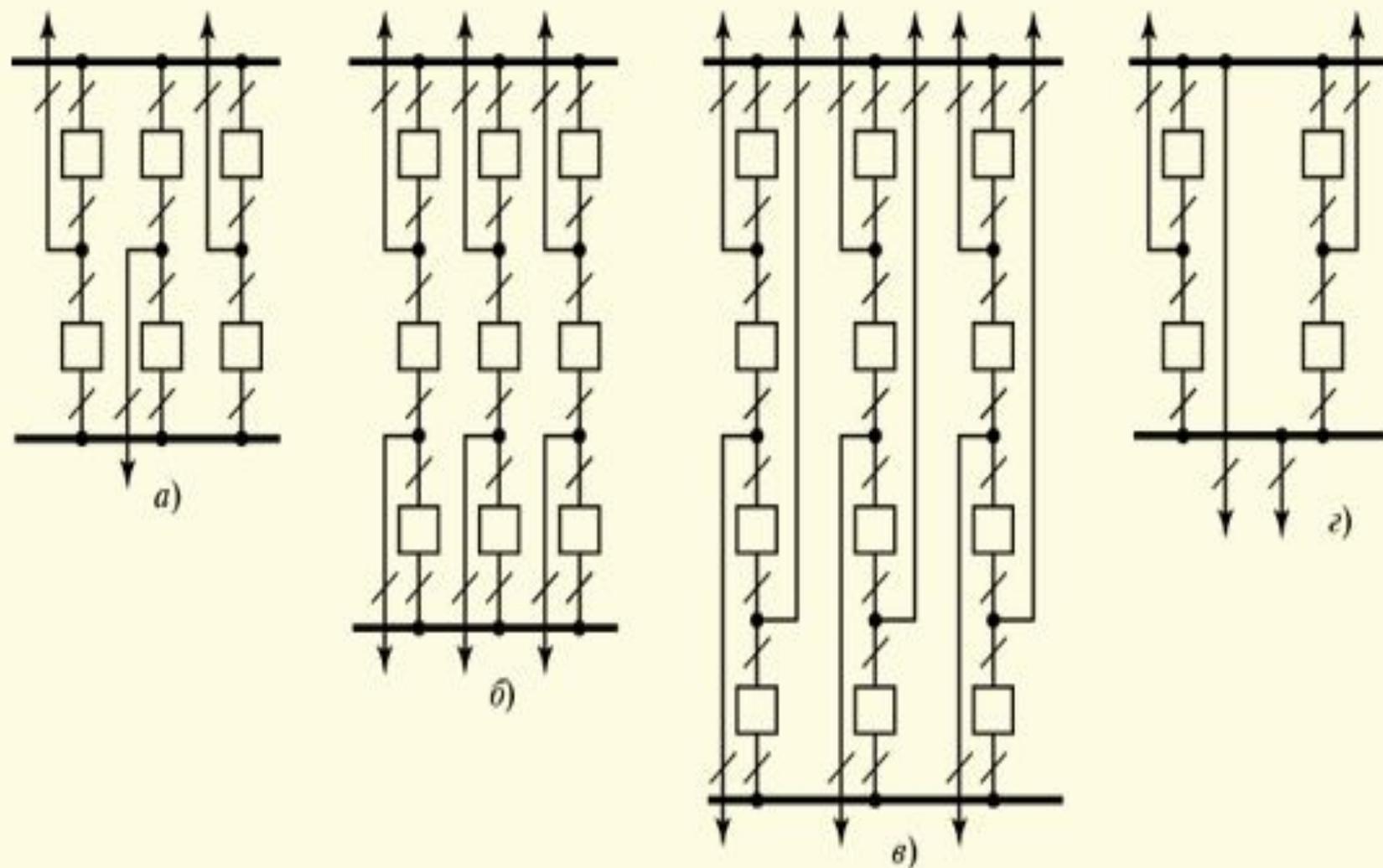
- По функциональному признаку электрические *аппараты высокого напряжения (АВН)* подразделяются на следующие виды:
- коммутационные аппараты (выключатели, разъединители, короткозамыкатели, отделители);
- защитные и ограничивающие аппараты (предохранители, токоограничивающие реакторы, разрядники, нелинейные ограничители перенапряжений);
- комплектные распределительные устройства (КРУ).
- Коммутационные аппараты используются для формирования необходимых схем передачи энергии от ее источника (электростанции) к *потребителю*.

- *Выключатели* предназначены для оперативной и аварийной коммутации в *энергосистемах*, т.е. выполнения операций включения и отключения отдельных *цепей* при ручном или автоматическом управлении.
- Во включенном состоянии выключатели должны беспрепятственно пропускать токи нагрузки. Характер режима работы этих аппаратов несколько необычен: нормальным для них считается как включенное состояние, когда они обтекаются током нагрузки, так и отключенное, при котором они обеспечивают необходимую электрическую изоляцию между разомкнутыми участками цепи.
- Коммутация цепи, осуществляемая при переключении выключателя из одного положения в другое, производится нерегулярно, время от времени, а выполнение им специфических требований по отключению возникающего в цепи короткого замыкания чрезвычайно редко.
- Выключатели должны надежно выполнять свои функции в течение срока службы (25 лет), находясь в любом из указанных состояний, и одновременно быть всегда готовыми к мгновенному эффективному выполнению любых коммутационных операций, часто после длительного пребывания в неподвижном состоянии.
- Отсюда следует, что они должны иметь очень высокий коэффициент готовности: при малой продолжительности процессов коммутации (несколько минут в год) должна быть обеспечена постоянная готовность к осуществлению коммутаций.

- **Разъединители** применяются для коммутации обесточенных при помощи выключателей участков токоведущих систем, для переключения РУ с одной ветви на другую, а также для отделения на время ревизии или ремонта силового электротехнического оборудования и создания безопасных условий от смежных частей *линии*, находящихся под напряжением. Разъединители способны размыкать электрическую цепь только при отсутствии в ней тока или при весьма малом токе. В отличие от выключателей разъединители в отключенном состоянии образуют видимый разрыв цепи. После отключения разъединителей с обеих сторон объекта, например выключателя или *трансформатора*, они должны заземляться с обеих сторон либо при помощи переносных заземлителей, либо специальных заземляющих ножей, встраиваемых в конструкцию разъединителя.
- **Отделитель** служит для отключения обесточенной цепи высокого напряжения за малое время (не более 0,1 с). Он подобен разъединителю, но снабжен быстродействующим приводом.
- **Короткозамыкатель** служит для создания искусственного короткого замыкания (КЗ) в цепи высокого напряжения. Конструкция его подобна конструкции заземляющего устройства разъединителя, но снабженного быстродействующим приводом.

## **В соответствии с принятым условным делением различают *четыре основные группы схем РУ:***

- **схемы с коммутацией присоединения одним выключателем**— одна-две (в западных странах одна-две-три, реже — четыре и даже пять) системы сборных шин с обходной системой шин либо без нее;
- **схемы с коммутацией присоединения двумя выключателями**— две системы сборных шин с двумя выключателями на присоединение (схема 2/1), две системы сборных шин с тремя выключателями на два присоединения (схема 3/2 или полуторная), две системы сборных шин с четырьмя выключателями на три присоединения (схема 4/3),
- **схемы с коммутацией присоединения тремя и более выключателями**— связанные многоугольники, генератор—трансформатор—линия с уравнительно-обходным многоугольником, трансформаторы—шины;



Примеры схем РУ второй группы:

*а* — схема 2/1; *б* — схема 3/2; *в* — схема 4/3; *г* — многоугольник (четырёх-угольник)



