

# **ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

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

**Лекция 6.1**

# СИЛОВАЯ ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ АППАРАТУРА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

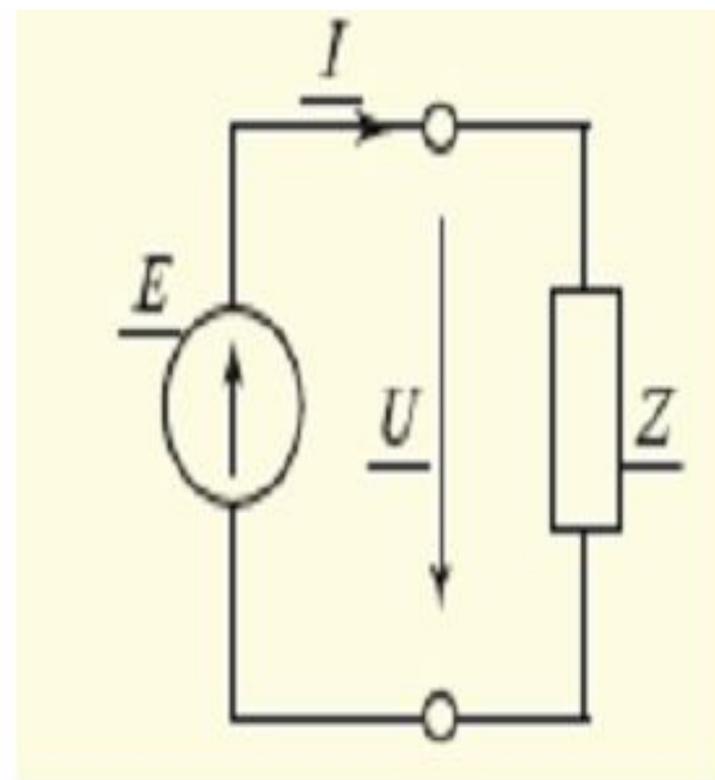
- В 90-х годах XIX в. с разработкой трехфазного *синхронного генератора, трансформаторов* и асинхронного *двигателя* начался переход на трехфазный переменный ток.
- Первый опыт (1891 г.): *электропередача* Лауфен—Франкфурт (протяженность 170 км, напряжение 15 кВ, передаваемая мощность 220 кВт).
- В конце XIX в. напряжение электропередач достигло 150 кВ. Электроэнергия быстрыми темпами стала завоевывать ведущие позиции в промышленности, транспорте, быту.
- В настоящее время практически повсеместно используются трехфазные системы переменного тока частотой 50 и 60 Гц.
- Во второй половине 30-х годов XX в. уже велась разработка вопросов, связанных с возможностью передачи электроэнергии от будущей Куйбышевской ГЭС в район Москвы на напряжении 380—400 кВ;
- В Ленинграде в Ленинградском энергофизическом институте была построена опытная трехфазная линия 500 кВ, на которой проводились исследования на дальнюю перспективу — использование более высоких напряжений для передачи электроэнергии.
- В 1967 г. была введена в эксплуатацию первая опытно-промышленная электропередача 750 кВ Конаковская ГРЭС — Москва протяженностью 90 км, а уже к 1985 г. протяженность линий электропередачи этого напряжения составила более 6 тыс. км

### 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	┌───┐ └───┘ └───┘

Активная мощность пассивного двухполюсника  $\underline{Z}$  с сопротивлением  $\underline{Z} = Ze^{j\varphi}$  равна  $P = UI\cos\varphi$ , где  $U$  и  $I$  — действующие значения его напряжения и тока, а  $\varphi$  — угол сдвига между ними. Наибольшая активная мощность двухполюсника  $\underline{Z}$ , возможная при данных значениях  $U$  и  $I$ , называется полной мощностью.



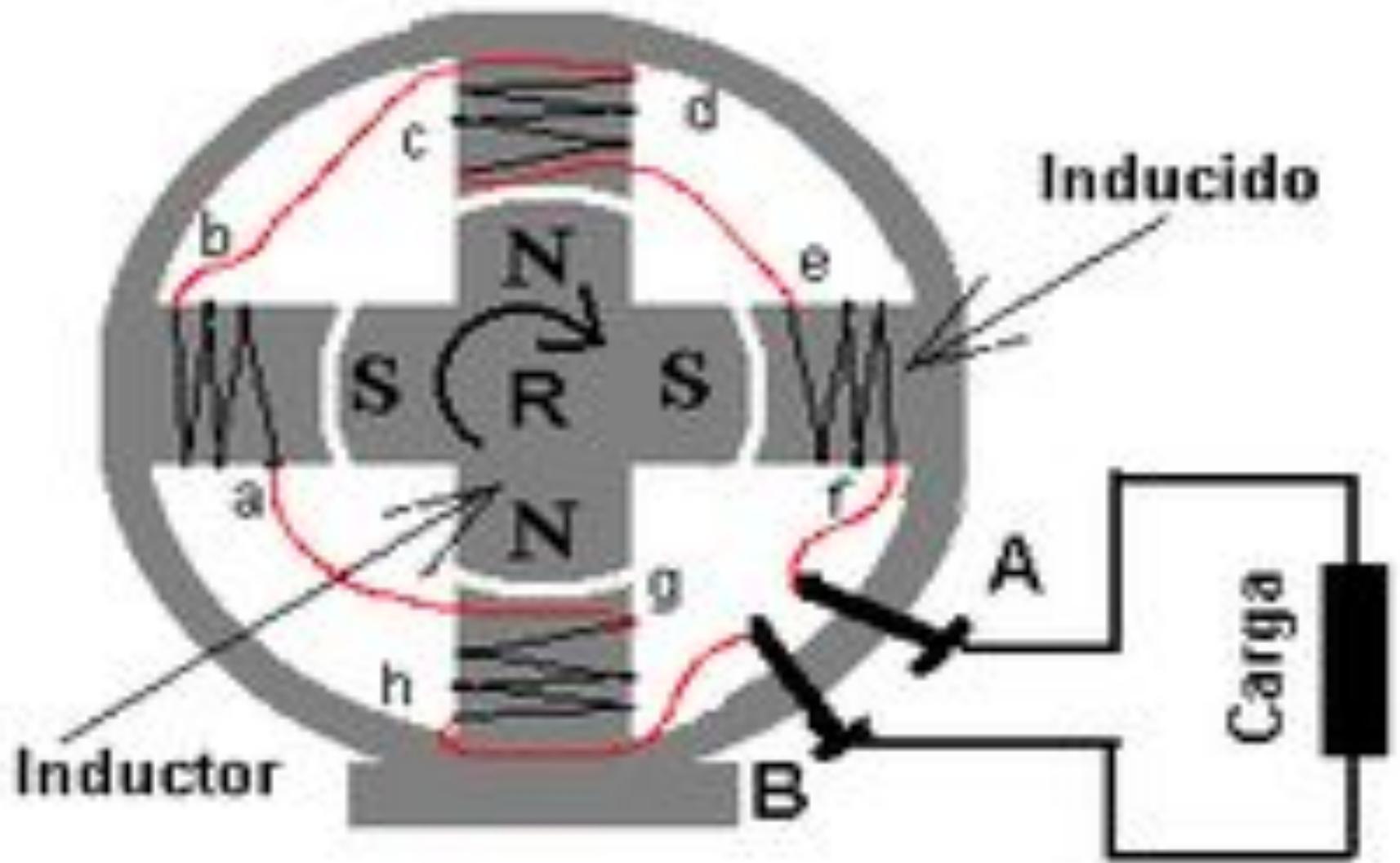
Она равна  $S = UI$ , а отношение активной мощности  $P$  к полной мощности  $S$ , характеризующее его энергетическую эффективность, называется коэффициентом мощности  $P/S = \cos\varphi$ . Наряду с активной мощностью для двухполюсника вводят понятие реактивной мощности  $Q = UI\sin\varphi$ . При этом очевидно, что  $S^2 = P^2 + Q^2$ .

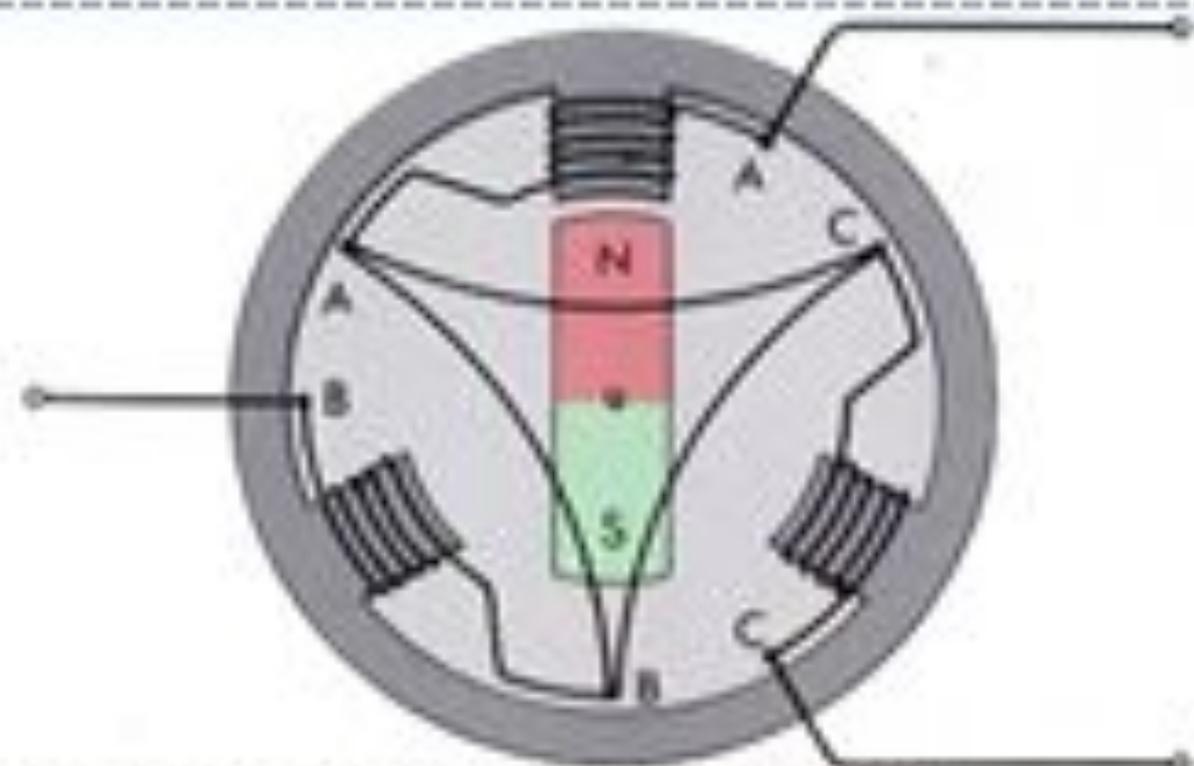
- **По конструкции можно выделить:**
- генераторы с неподвижными магнитными полюсами и вращающимся якорем;
- генераторы с вращающимися магнитными полюсами и неподвижным статором, которые получили большее распространение, так как благодаря неподвижности статорной обмотки отпадает необходимость снимать с ротора большой ток высокого напряжения с использованием скользящих контактов (щёток) и контактных колец.
- Подвижная часть генератора называется ротор, а неподвижная — статор.
- Статор собирается из отдельных железных листов, изолированных друг от друга. На внутренней поверхности статора имеются пазы, куда вкладываются провода статорной обмотки генератора.
- Ротор изготавливается, обычно, из сплошного железа, полюсные наконечники магнитных полюсов ротора собираются из листового железа. При вращении между статором и полюсными наконечниками ротора присутствует минимальный зазор, для создания максимально возможной магнитной индукции. Геометрическая форма полюсных наконечников подбирается такой, чтобы вырабатываемый генератором ток был наиболее близок к синусоидальному.

# По способу возбуждения генераторы переменного тока делятся на:

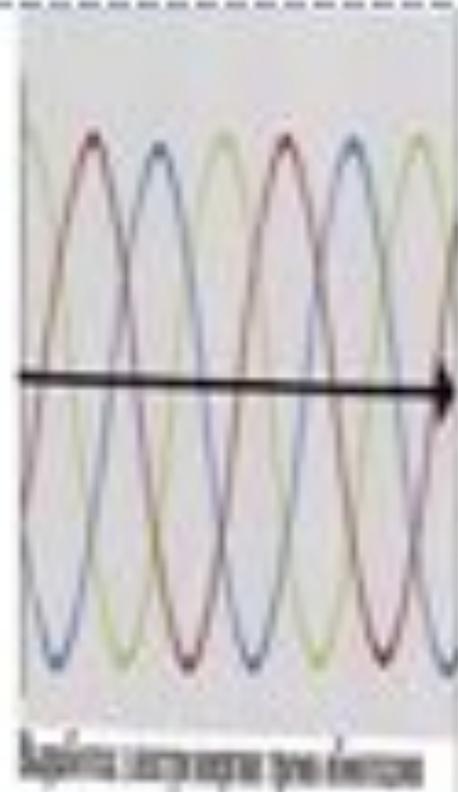
- генераторы, обмотки возбуждения которых питаются постоянным током от постороннего источника электрической энергии, например от аккумуляторной батареи (генераторы с независимым возбуждением).
- генераторы, обмотки возбуждения которых питаются от постороннего генератора постоянного тока малой мощности (возбудителя), сидящего на одном валу с обслуживаемым им генератором.
- генераторы, обмотки возбуждения которых питаются выпрямленным током самих же генераторов (генераторы с самовозбуждением).
- генераторы с возбуждением от постоянных магнитов

# Устройство генератора переменного тока

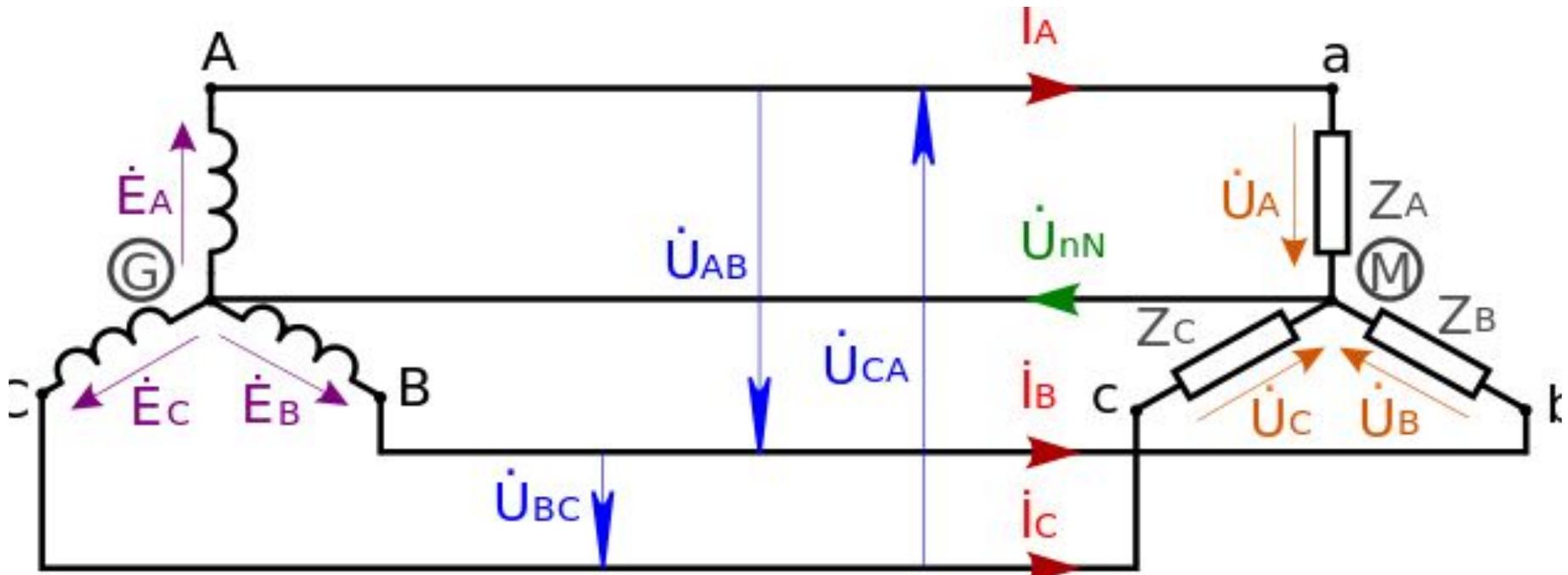


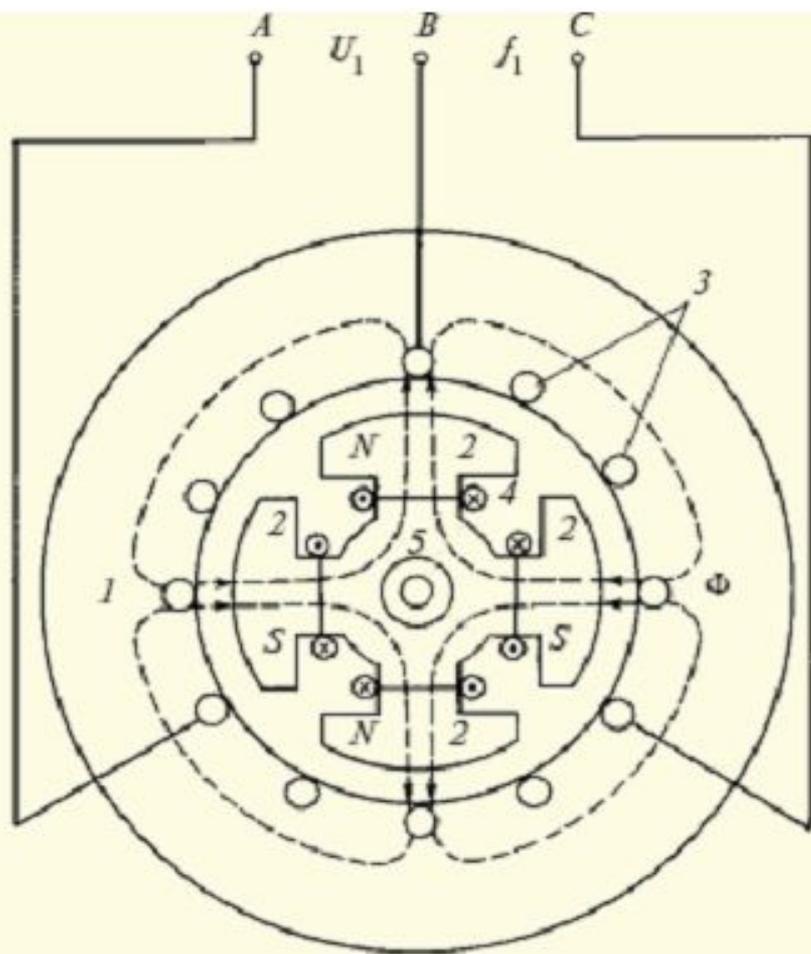


Трёхфазный генератор переменного тока



К трёхфазному генератору (соединение «звездой») подключена активная нагрузка (соединение «звездой») с нейтральным проводом.





Поперечное сечение явнополюсной синхронной машины:

1 — статор; 2 — полюсы ротора; 3 — обмотка якоря (статора); 4 — обмотка возбуждения; 5 — контактные кольца

Электрические машины — *синхронные* генераторы могут работать одновременно, в ритме единого времени, со строго определенными частотами вращения своих подвижных частей, называемых *роторами*. Ротор может быть выполнен с сосредоточенной обмоткой. В этом случае ротор и сам генератор называются явнополюсными. Если обмотка ротора является распределенной, ротор и генератор называются неявнополюсными. На рисунке схематично показано поперечное сечение *синхронной явнополюсной* машины с четырьмя полюсами на роторе 2 чередующейся полярности *N-S-N-S*. Сосредоточенная обмотка возбуждения 4, размещенная на роторе, обтекается постоянным током, возбуждающим *магнитное поле* ротора.

<b>Число полюсов</b>	<b>Число оборотов ротора для частоты 50 герц, в 1 минуту</b>
2	3 000
4	1 500
6	1 000
8	750
10	600
12	500
14	428,6
16	375
18	333,3
20	300
40	150

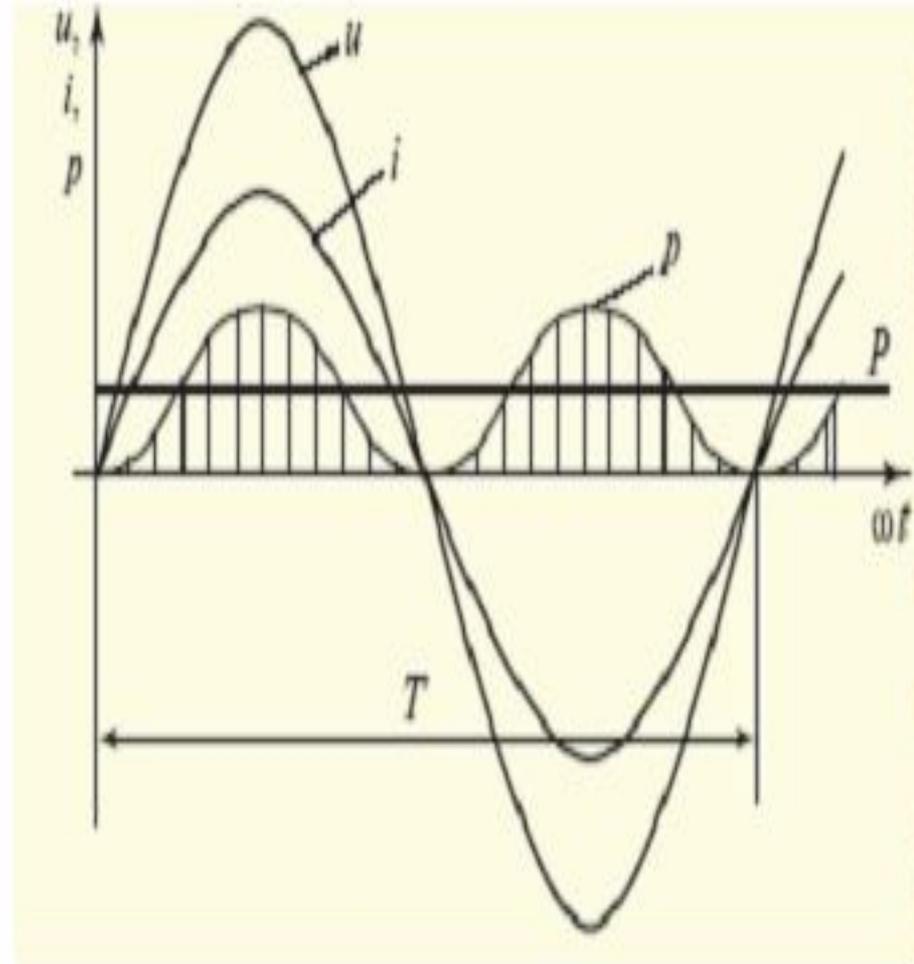
## Мощности в цепях синусоидального тока

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

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



## Мощности турбогенераторов по группам

Группа	Диапазон мощностей турбогенераторов, МВт	Суммарная мощность турбогенераторов, ГВт
1	25—63	33,5
2	100—200	54,5
3	300—500	46,1
4	800	12,8
5	более 1000	1,2
		Итого 148,1 ГВт

Большинство отечественных турбогенераторов имеет большую надежность, чем аналогичные в США, но несколько меньшую, чем турбогенераторы новейших серий фирм ABB и Siemens/KWU. В последние 30—40 лет в мире имел место рост единичной мощности турбогенераторов, который приводил к снижению удельных затрат материалов генераторов на единицу мощности, удельных капиталовложений при сооружении станции и стоимости электроэнергии. Например, удельные капиталовложения на 1 кВт установленной мощности для турбогенератора 200 МВт почти в 2,5 раза меньше, чем для турбогенератора мощностью 32 МВт. *Коэффициент полезного действия* (КПД) турбогенераторов мощностью 1200 МВт примерно равен 99 %, однако, отводимые в виде теплоты потери в нем достигают 12 000 кВт, что требует обеспечения интенсивного охлаждения.

### Мощность гидрогенераторов

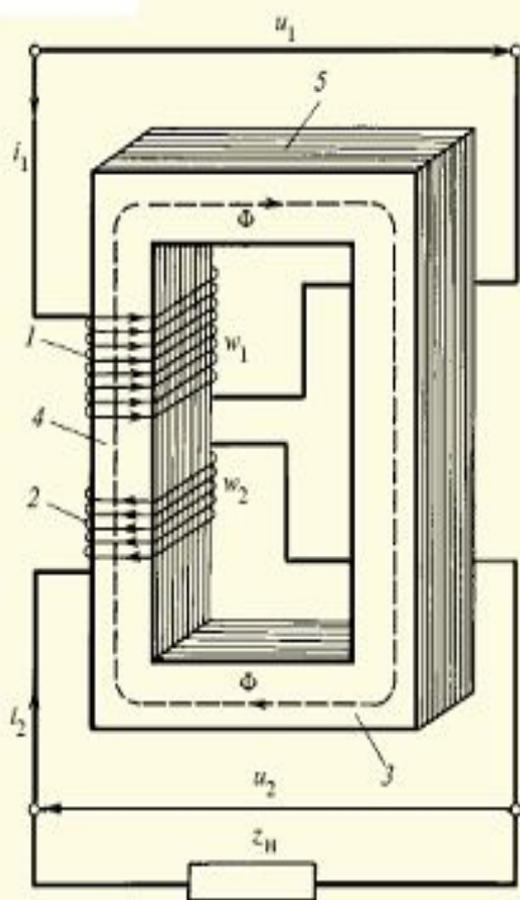
Группа	Диапазон мощностей генераторов, МВт	Суммарная мощность генераторов, ГВт
1	до 49	6,60
2	50—99	6,64
3	100—199	6,94
4	200—300	11,42
5	500 и более	12,40
		Итого 44,00

Основная доля вырабатываемой гидроэлектростанциями электроэнергии (54,2 %) в России приходится на *гидрогенераторы* большой мощности (200—640 МВт). Из 120 ГЭС в мире мощностью 1000 МВт и более российских — 10, т.е. одна двенадцатая часть. Однако использование гидропотенциала по нашей стране неравномерное: в европейской части страны оно составляет 46,4 %, в Сибири 19,7 %, в восточных регионах только 3,3 % и в среднем по стране около 20 %. Экономически целесообразный к использованию гидропотенциал страны составляет 850 млрд кВт · ч в год, что примерно в 5 раз больше возможностей сегодняшних ГЭС. Во Франции и Германии степень использования экономически целесообразного гидропотенциала более 90 %, в Японии — 84 %, в США — 73 %, Испании — 63 % и т.д. Рекордными по полной или кажущейся (измеряемой в мегавольт-амперах — МВ · А) мощности гидрогенераторами могут быть названы машины ГЭС Итайпу (Бразилия) — 823,6 МВ · А, Саяно-Шушенской ГЭС (Россия) — 820 МВ · А, 142,8 об/мин, Гранд-Кули (США) — 600 МВ · А, 73,2 об/мин.

# 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



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

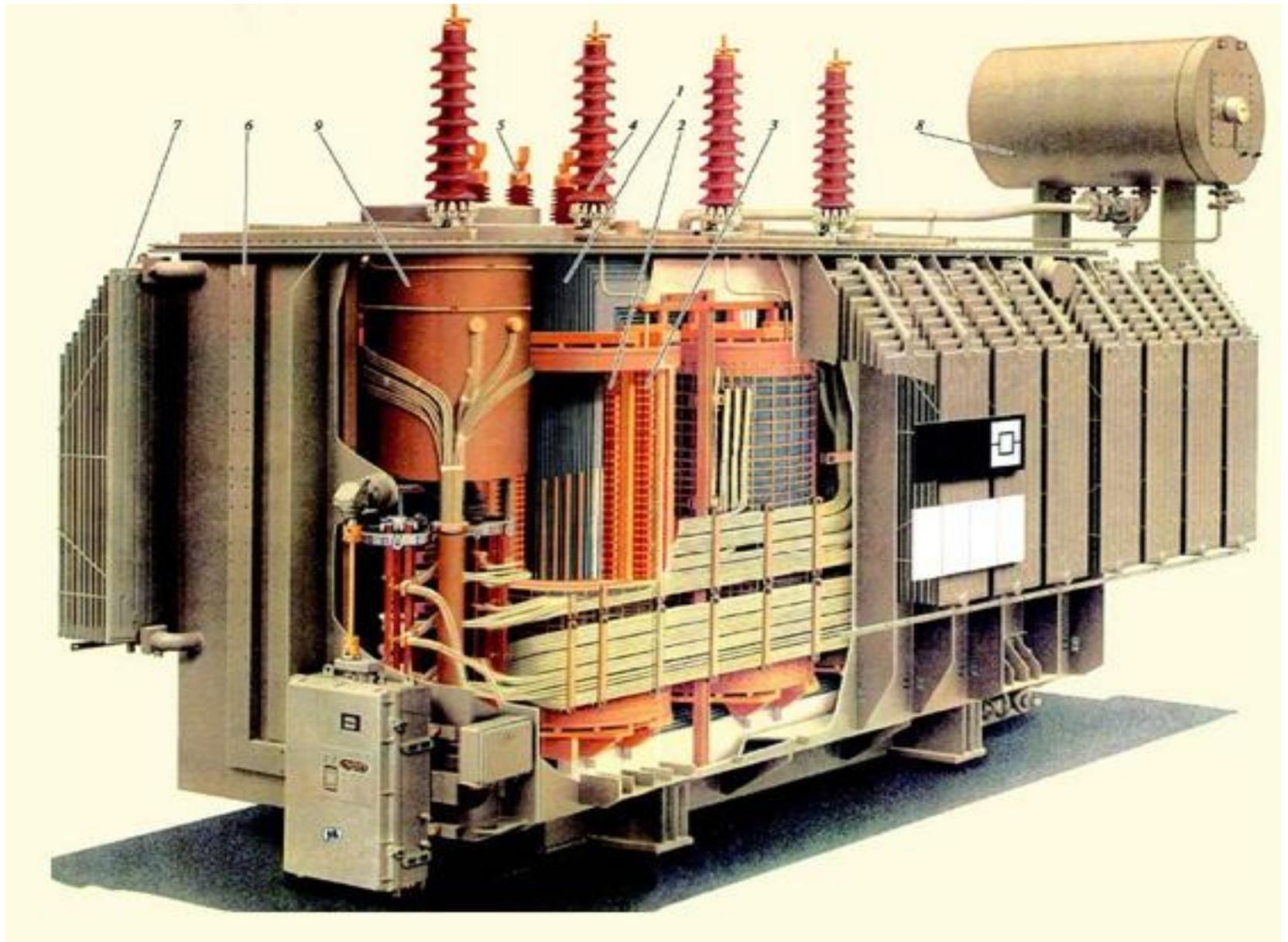
В основе работы трансформатора лежит явление *электромагнитной индукции*, в соответствии с которым значение *электродвижущей силы* (ЭДС), наведенной в контуре, пропорционально скорости изменения потока  $\Phi$ , пронизывающего этот контур. Если в контуре имеется несколько последовательно соединенных 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

- 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  $D/U_n$ .



# 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  $(0,45—0,65)P_{2\text{ном}}$ . Такая нагрузка обычно соответствует средней нагрузке при эксплуатации трансформатора. Отметим, что в диапазоне нагрузок  $(0,4—1,5)P_{2\text{ном}}$  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.

- *Комплектные распределительные устройства (КРУ)* состояются из полностью или частично закрытых шкафов или блоков со встроенными в них АВН, устройствами защиты, автоматики, контрольно-измерительной аппаратуры и поставляемых в собранном на заводе или полностью подготовленном для сборки виде.
- Различают распределительные устройства внутренней и наружной установки. Комплектные распределительные устройства становятся наиболее распространенным типом РУ. В последнее время начали широко применяться герметизированные РУ (ГРУ), в которых все токоведущие элементы и весь комплекс аппаратуры (выключатели, разъединители) расположены внутри герметичной оболочки, заполненной сжатым газом (*элегазом*).

В воздушных выключателях (ВВ) энергия сжатого воздуха используется и как движущая сила, перемещающая контакты, и как дугогасящая среда. Принцип действия дугогасительного устройства (ВВ) заключается в том, что дуга, образующаяся между контактами, подвергается интенсивному охлаждению потоком сжатого воздуха, вытекающего в атмосферу. При прохождении тока через ноль температура дуги падает и сопротивление промежутка увеличивается. Одновременно происходит механическое разрушение дугового столба и вынос заряженных частиц из промежутка.

ВВ конструктивно подразделяются на:

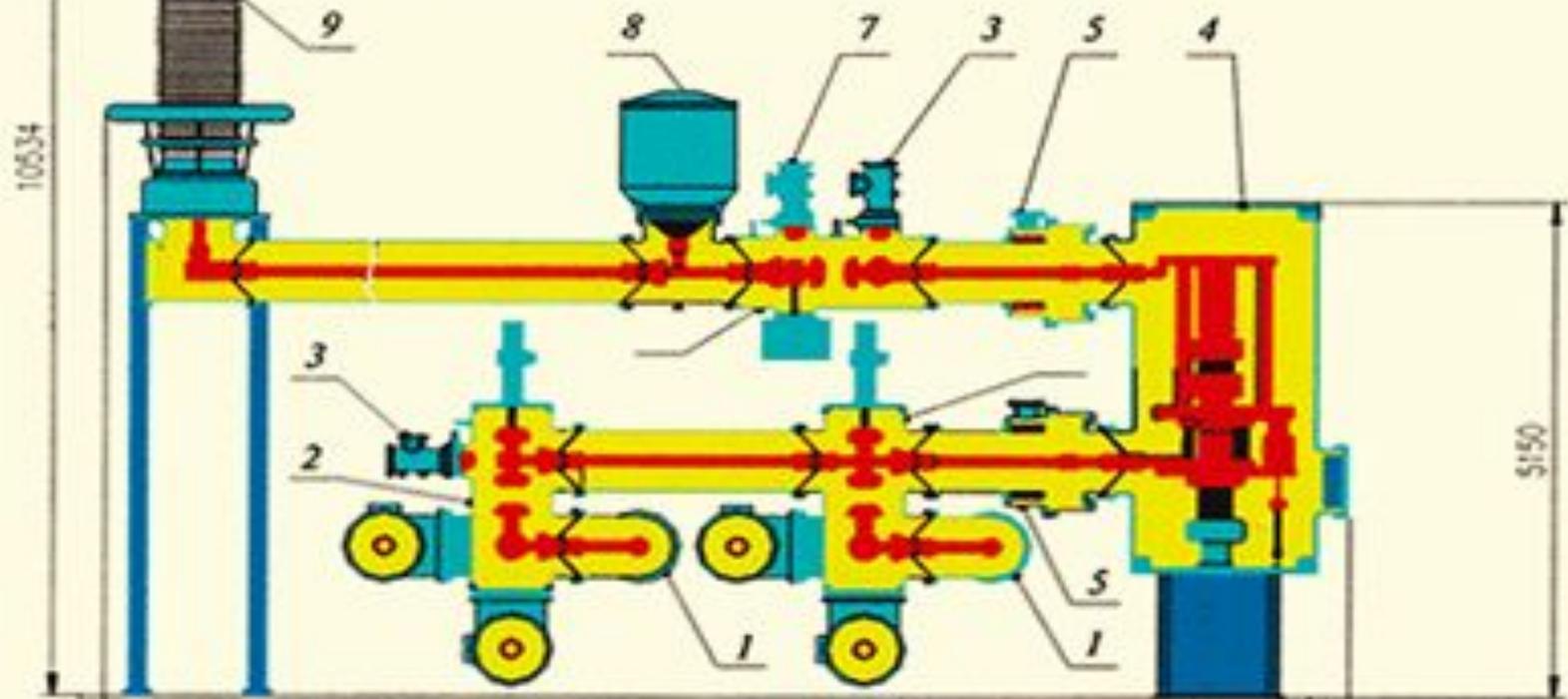
- Выключатель с открытым отделителем
- Выключатель с газонаполненным отделителем
- Выключатель с камерами в баке со сжатым воздухом

# Три полюса выключателя



КРУЭ на напряжение 500 кВ вид спереди (а),  
вид слева (б):

1 — сборная шина; 2 — шинный разъединитель; 3 —  
заземлитель; 4 — полюс выключателя; 5 — трансфор-  
матор тока; 6 — линейный разъединитель; 7 — быстро-  
действующий заземлитель; 8 — трансформатор напря-  
жения; 9 — ввод «воздух-элегаз»





. Высоковольтные выключатели на напряжение 330 кВ

# Подстанция 110 кв

