

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ

Ширинский Сергей Владимирович, каф. ЭМЭА, НИУ «МЭИ»

---

# ВВЕДЕНИЕ

# Энергетическая система

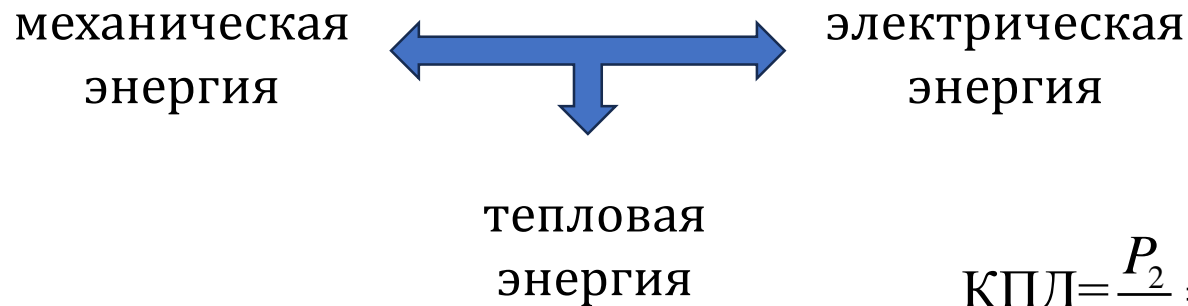


## Электростанция

- генератор (+ возбудитель)
- трансформатор
- электродвигатели механизмов собственных нужд

# Электромеханика

## Электрическая машина



$$\text{КПД} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_1}$$

- двигатель
- генератор
- синхронные машины
- трансформаторы
- асинхронные машины
- машины постоянного тока
- якорь
- индуктор
- статор
- ротор  
(вторичный элемент, транслятор)



# Электромеханическое преобразование энергии

**Закон электромагнитной индукции** (Фарадея + правило Ленца) – определяет электродвижущую силу, возникающую в проводнике при изменении сцепленного с ним магнитного потока

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}$$

$$E = B \cdot v \cdot l$$

**Закон Ампера** – определяет силу, с которой магнитное поле действует на элементарный проводник с током

$$d\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B} dV$$

$$F = B \cdot I \cdot l$$

(«правило левой руки»)

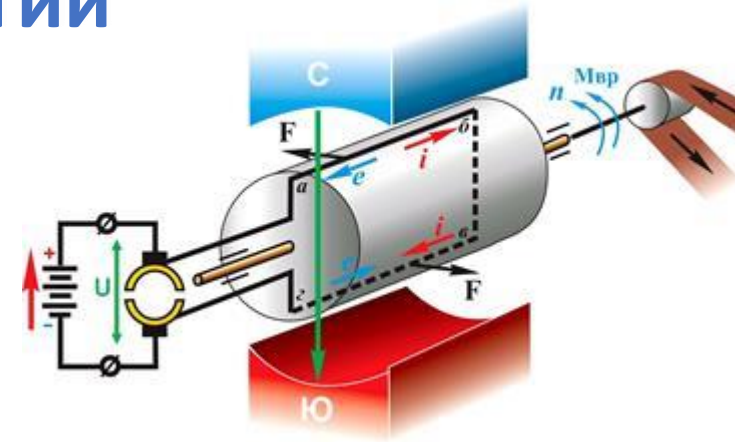
а также

Закон полного тока  $\oint_l H dl = Iw$

Законы Кирхгофа  $\sum i = 0$   $u = e - iR$

Свойства материалов  $B = \mu\mu_0 H$

**индуктивные** электрические машины (+ трансформатор)



электродвигатель

Для многовитковых катушек

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(\Phi w)}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt}$$

Для линейных сред

$$L = \frac{\Psi}{i} \quad \text{тогда} \quad e = -\frac{d\Psi}{dt} = -L \frac{di}{dt}$$

# Электромеханическое преобразование энергии

Элементарная ЭМ с 1 проводником,  
движущимся в магнитном поле под действием силы  $F$ :

- ЭДС  $e = Blv$  (направление)

При замыкании проводника на нагрузку – ток  $i$   
Ток в движущемся в магнитном поле проводнике:

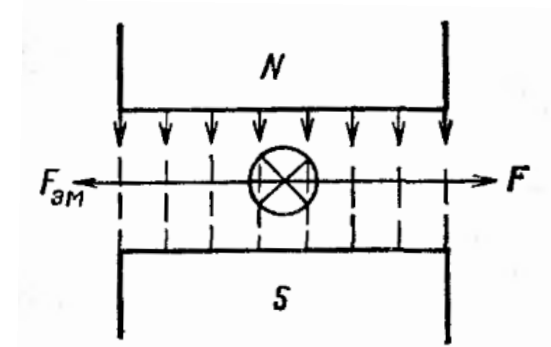
- сила Ампера  $F_{\text{эм}} = Bli$  (направление)

Установившийся процесс, равномерное движение при  $\bar{F} = -\bar{F}_{\text{эм}}$

Баланс мощностей  $Fv = F_{\text{эм}}v$


(механическая мощность)  $Fv = Bliv = ei$  (электромагнитная мощность)

Механическая мощность  $\rightarrow$  в электрическую (генератор)



# Электромеханическое преобразование энергии

Элементарная ЭМ с 1 проводником в магнитном поле, по которому течет ток  $i$

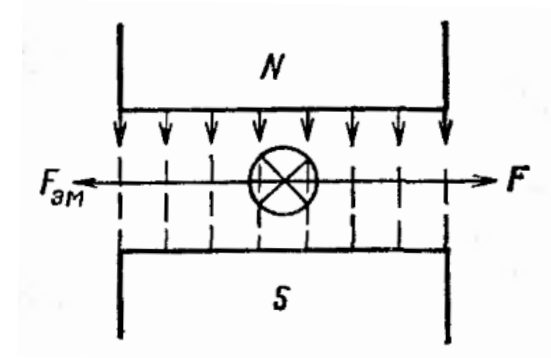
- сила Ампера 
- → движение проводника

При движении проводника в магнитном поле:

- ЭДС  $e = Blv$

Электромагнитная мощность  $ei = Blvi = F_{\text{эм}} v = F_c v$   
( $F_c$  – сила сопротивления нагрузки )  
равномерное движение при  $F_{\text{эм}} = F_c$

Электрическая мощность → в механическую (двигатель)



# ВВЕДЕНИЕ

Орг.вопросы

# «Электрические машины объектов энергетики»

- Лекции – 16
- Практические – 0
- Лабораторные – 0
- Курсовой проект
- Экзамен

Курсовой проект

- гидрогенератор
- турбогенератор

Контрольные мероприятия

- КМ-1 – контрольная работа (4н)
- КМ-2 – контрольная работа (8н)
- КМ-3 – контрольная работа (12н)
- КМ-4 – контрольная работа (16н)

# «Электрические машины объектов энергетики»

## Литература

1. Электрические машины в энергетике / Кузьмичев В.А., Ширинский С.В., Иванов А.С. – М.: Издательство МЭИ, 2024. – ISBN 978-5-7046-2995-5
2. Электрические машины: учебник для вузов по направлению "Электроэнергетика и электротехника" / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Академия, 2013. – 320 с. – ISBN 978-5-7695-8497-8
3. Электрические машины: Учебное пособие для электротехнических и энергетических специальностей вузов / Б. Ф. Токарев. – М.: Альянс, 2015. – 624 с. - ISBN 978-5-91872-064-6
4. Электрические машины. Иванов-Смоленский А.В. Том 1, Том 2 - М.: Издательство МЭИ, 2004
5. Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. Абрамов А.И., Иванов-Смоленский А.В. – М.: Издательство Высшая школа, 2011
6. Проектирование турбогенераторов. Извеков В.И., Серихин Н.А., Абрамов А.И. – М.: Издательство МЭИ, 2009

# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Конструкция и принцип действия



# Конструкция и принцип действия

Синхронные генераторы, двигатели, компенсаторы  
Обратимые синхронные машины на ГАЭС

- обмотка возбуждения (пост.ток)
- обмотка якоря (3-фазная распределенная)

ОВ вращается относительно ОЯ  
→ наводится ЭДС (3-фазная)

$$f = \frac{pn_p}{60}$$

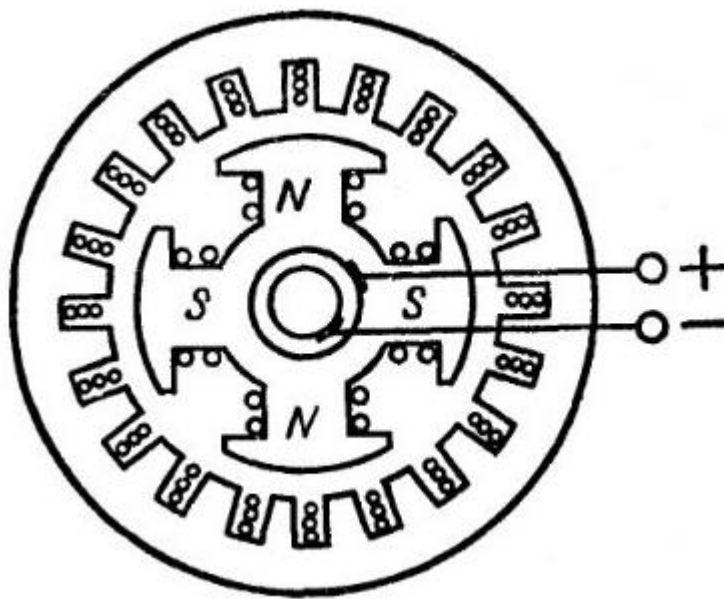
При включении нагрузки

→ 3-фазный ток в ОЯ

→ вращающееся поле якоря

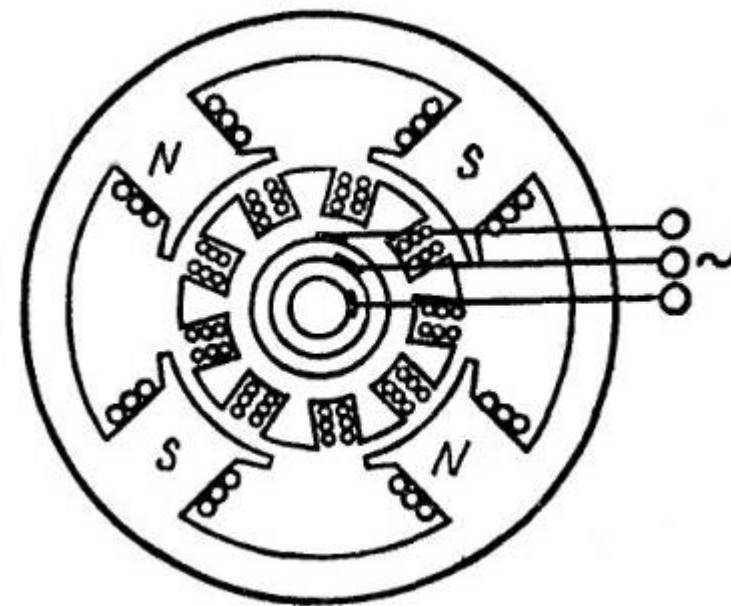
$$n_c = \frac{60f}{p}$$

$n_p = n_c \rightarrow$  «синхронная машина»



Традиционная конструкция

- ОВ на роторе
- ОЯ на статоре



Обращенная конструкция

- ОВ на статоре
- ОЯ на роторе

# Конструкция и принцип действия

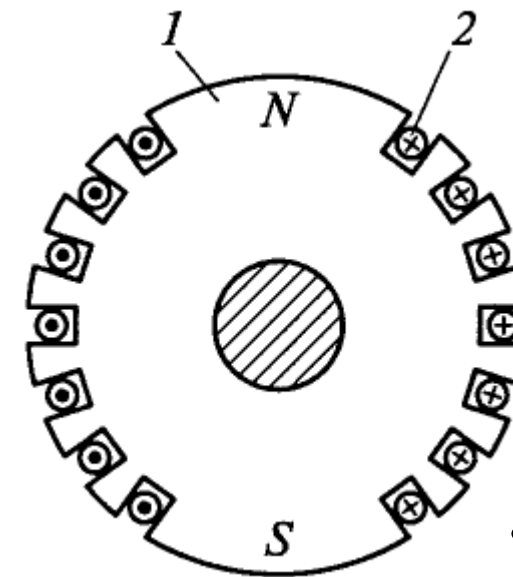
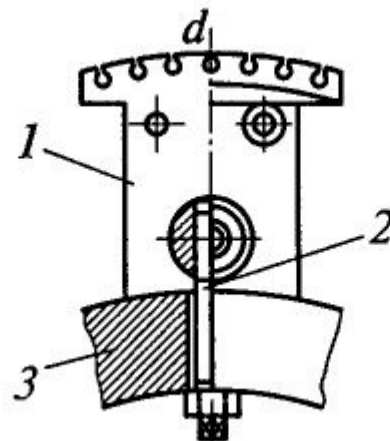
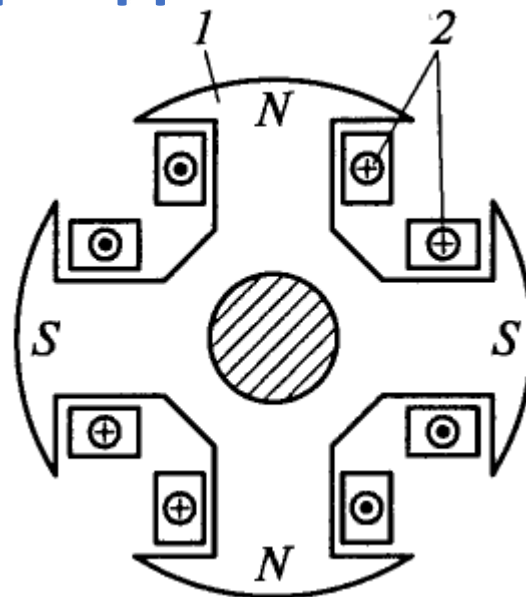
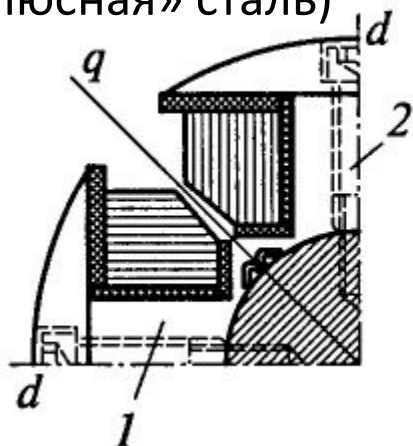
По конструкции ротора

- явнополюсные СМ
- неявнополюсные СМ

Явнополюсный ротор

- сердечник полюса, полюсный наконечник
- ОВ (круглый провод / шинная медь)
- Шихтованный сердечник (1-2 мм, «полюсная» сталь)

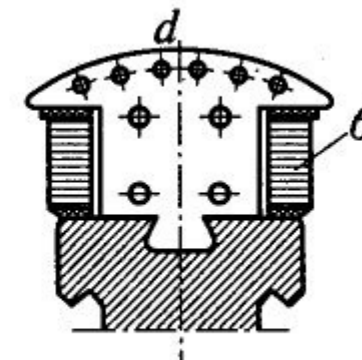
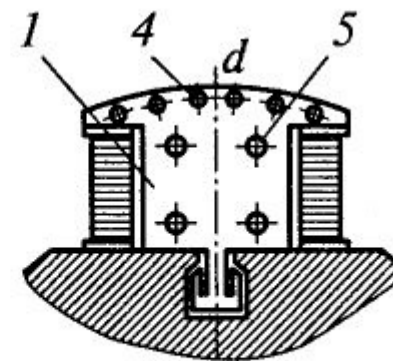
Способы крепления полюсов



Неявнополюсный ротор

- сердечник (поковка)
- пазы
- катушки ОВ

- Продольная ось  $d$
- Поперечная ось  $q$



# Конструкция и принцип действия

Демпферная обмотка – в полюсных наконечниках

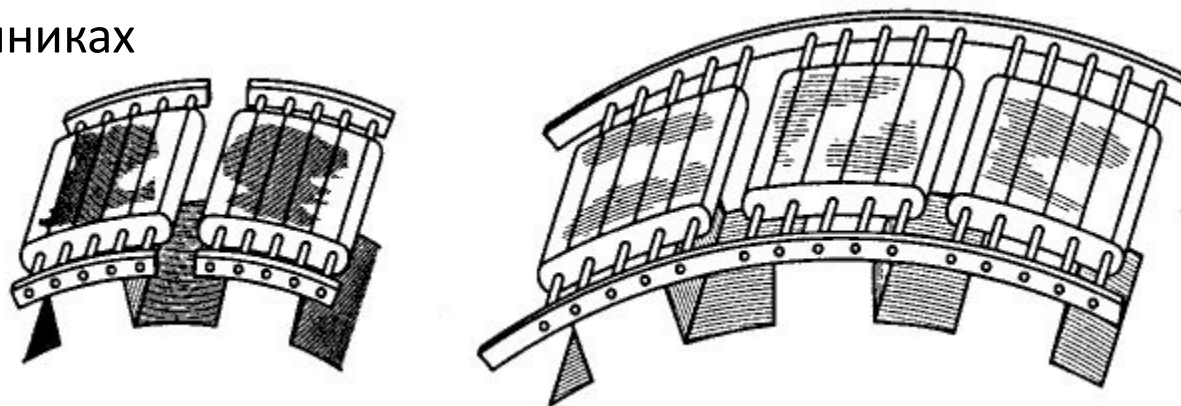
- стержни в пазах
- КЗ сегменты

Демпферная обмотка в генераторе

- ослабляет поле обратной последовательности при несимметричной нагрузке
- демпфирует колебания ротора (качания при парал. работе)

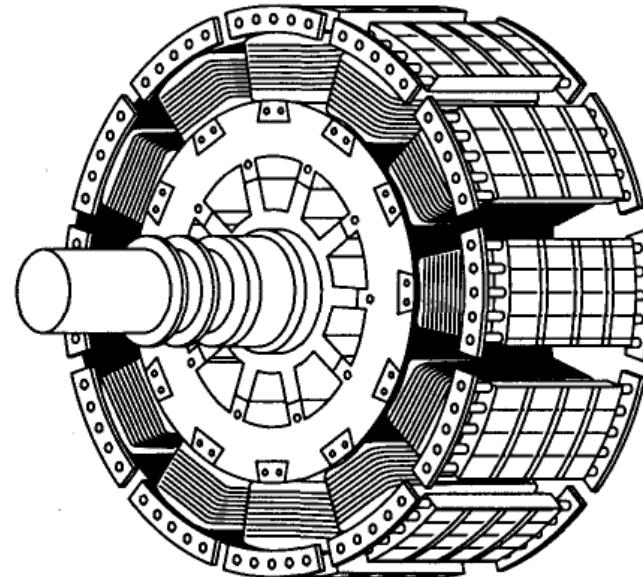
Демпферная обмотка в двигателе

- пусковая обмотка (асинхронный пуск)
- демпфирует колебания ротора (пульсации момента нагрузки)



Продольная ДО

Продольно-поперечная ДО



Ротор  
явнополюсной  
синхронной  
машины

# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Гидрогенераторы



# Гидрогенераторы

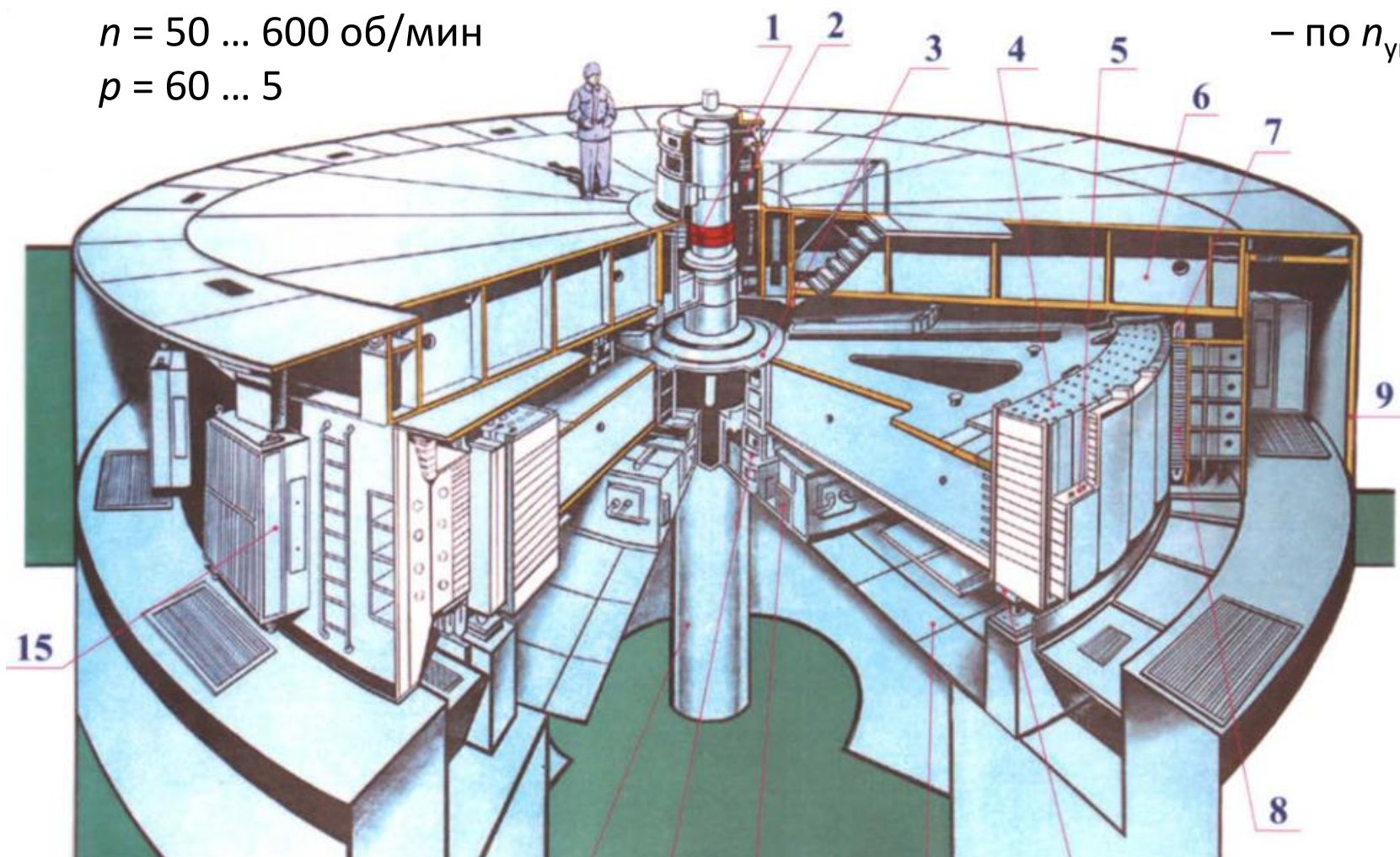
## Гидрогенераторы

$n = 50 \dots 600$  об/мин

$p = 60 \dots 5$

Механическая прочность

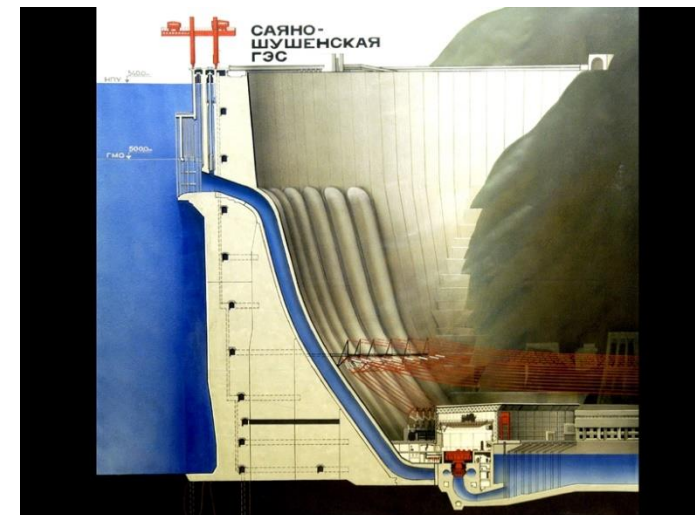
– по  $n_{yr} = 2 \dots 3 n_c$



Саяно-Шушенская ГЭС

10 генераторов

- $S = 715$  МВА
- $n = 143$  об/мин,  $2p = 42$
- $D_a = 15$  м,  $D_p = 12$  м
- $l_1 = 2,75$  м



# Гидрогенераторы

**Обозначения**    ТИП [внешний диаметр (см)] / [длина сердечника статора (см)] – [число полюсов]

**СВ, ВГС** – синхронные вертикальные с косвенным воздушным охлаждением

**СГ** – синхронные горизонтальные с косвенным воздушным охлаждением

**СВФ** – синхронные вертикальные с непосредственным охлаждением обмоток статора водой и форсированным охлаждением обмотки ротора воздухом

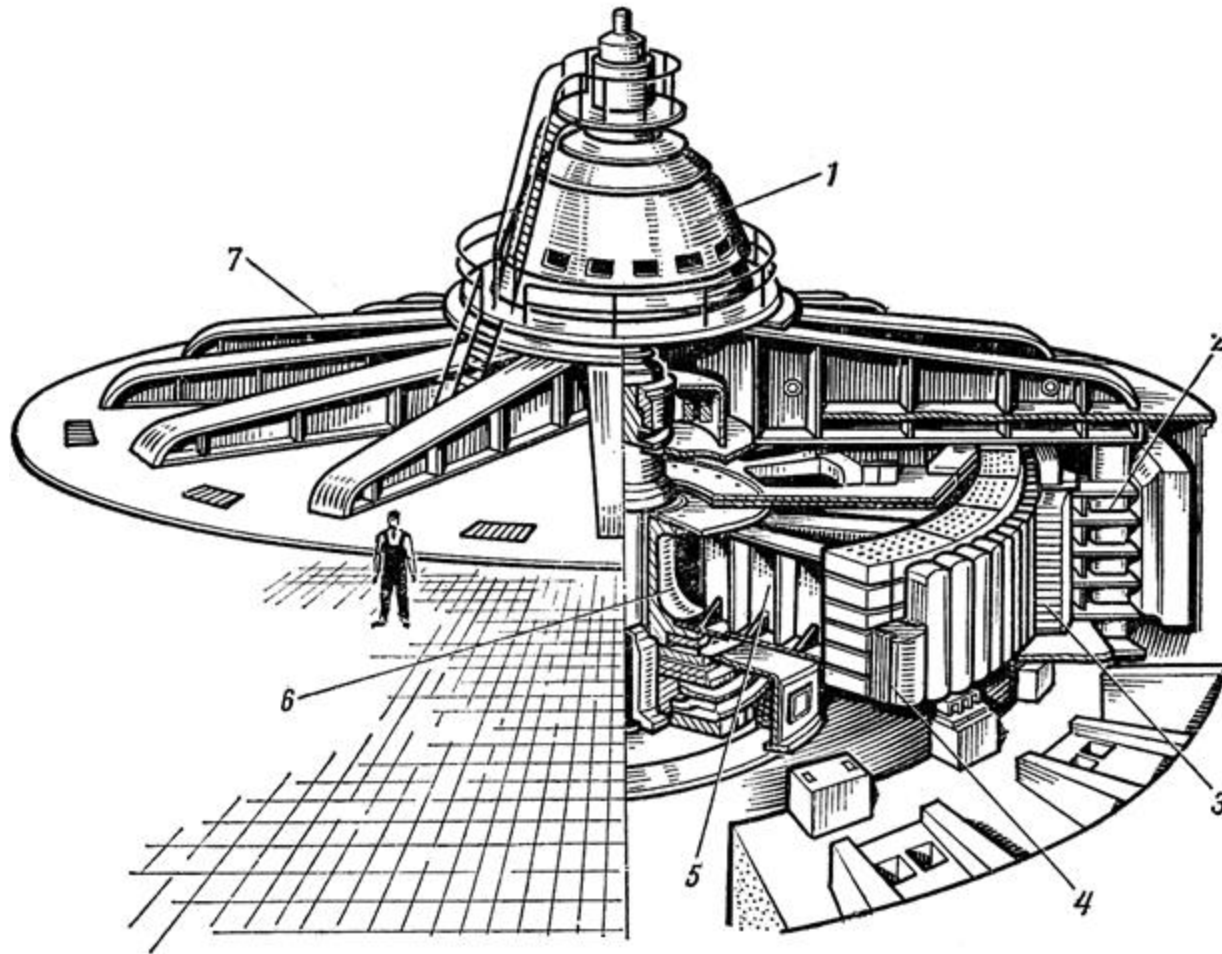
**СГКВ** – синхронные горизонтальные капсульные с непосредственным охлаждением обмоток статора и ротора водой

**СГК** - синхронные горизонтальные капсульные с воздушным охлаждением обмоток

**СВО** – синхронные вертикальные обратимые двигатель-генераторы с воздушным охлаждением

Например, ВГС 525/150-20

# Гидрогенератор вертикальный



Активные и конструктивные элементы

- 1 – возбудитель;
- 2 – корпус статора;
- 3 – сердечник статора;
- 4 – полюс ротора;
- 5 – спицы ротора;
- 6 – втулка ротора;
- 7 – грузонесущая крестовина

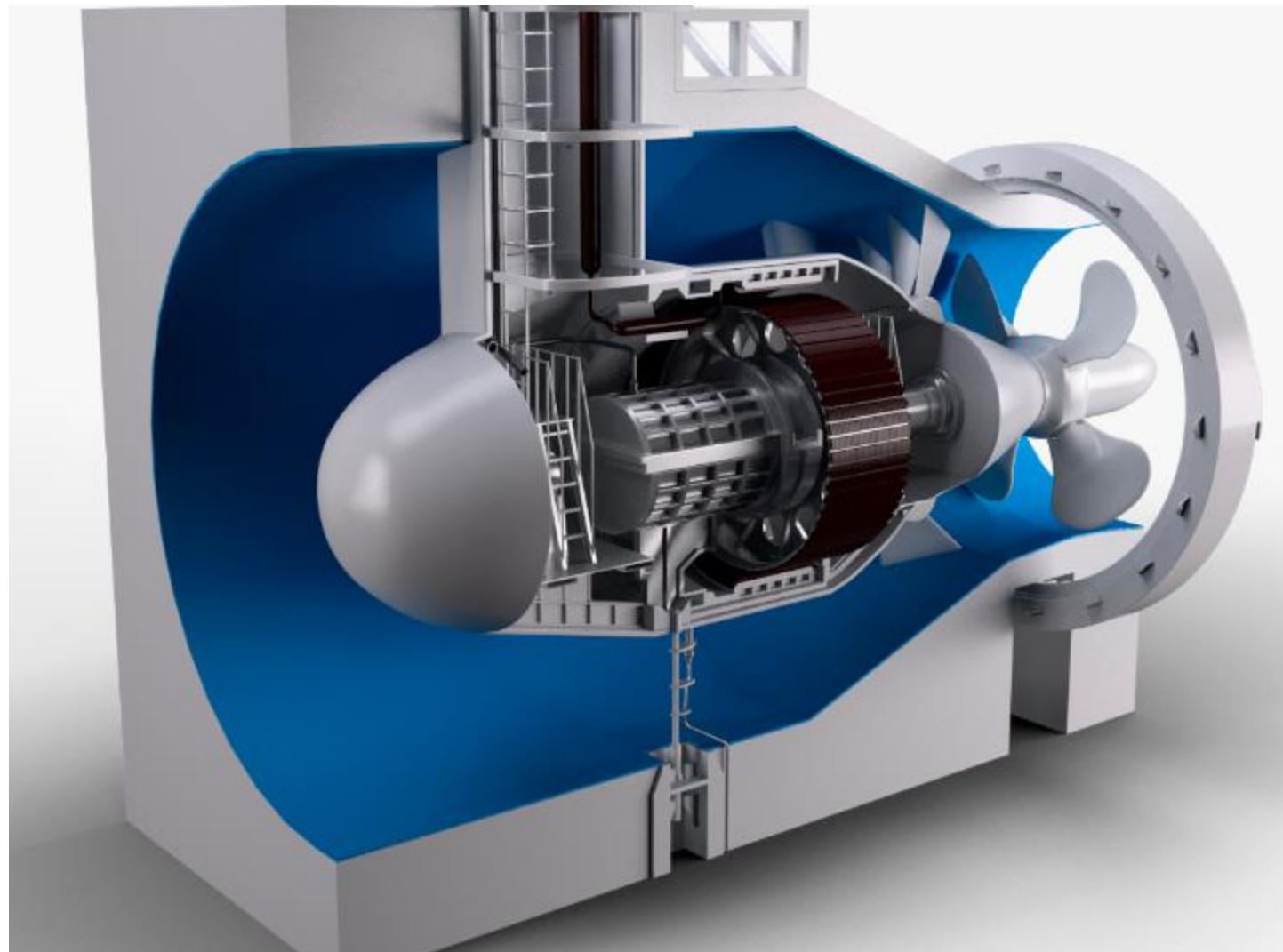


# Гидрогенератор капсульного типа

Горизонтальный вал

Небольшая мощность – размеры

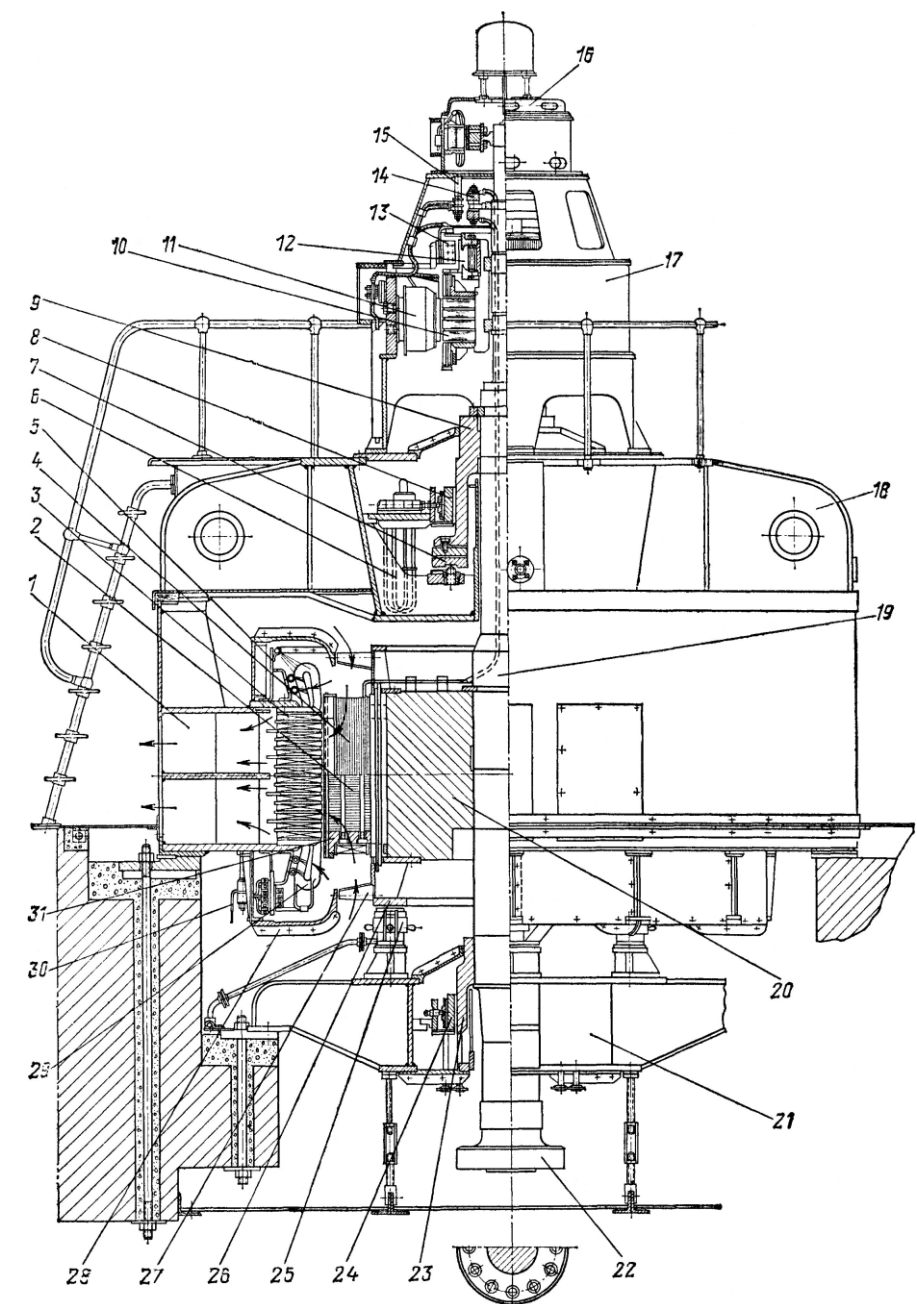
- 17,5 МВт, 87,7 об/мин  
(Киевская ГЭС)
- 20 МВт, 93,8 об/мин  
(Череповецкая ГЭС)
- 45 МВт, 75 об/мин  
(Саратовская ГЭС)





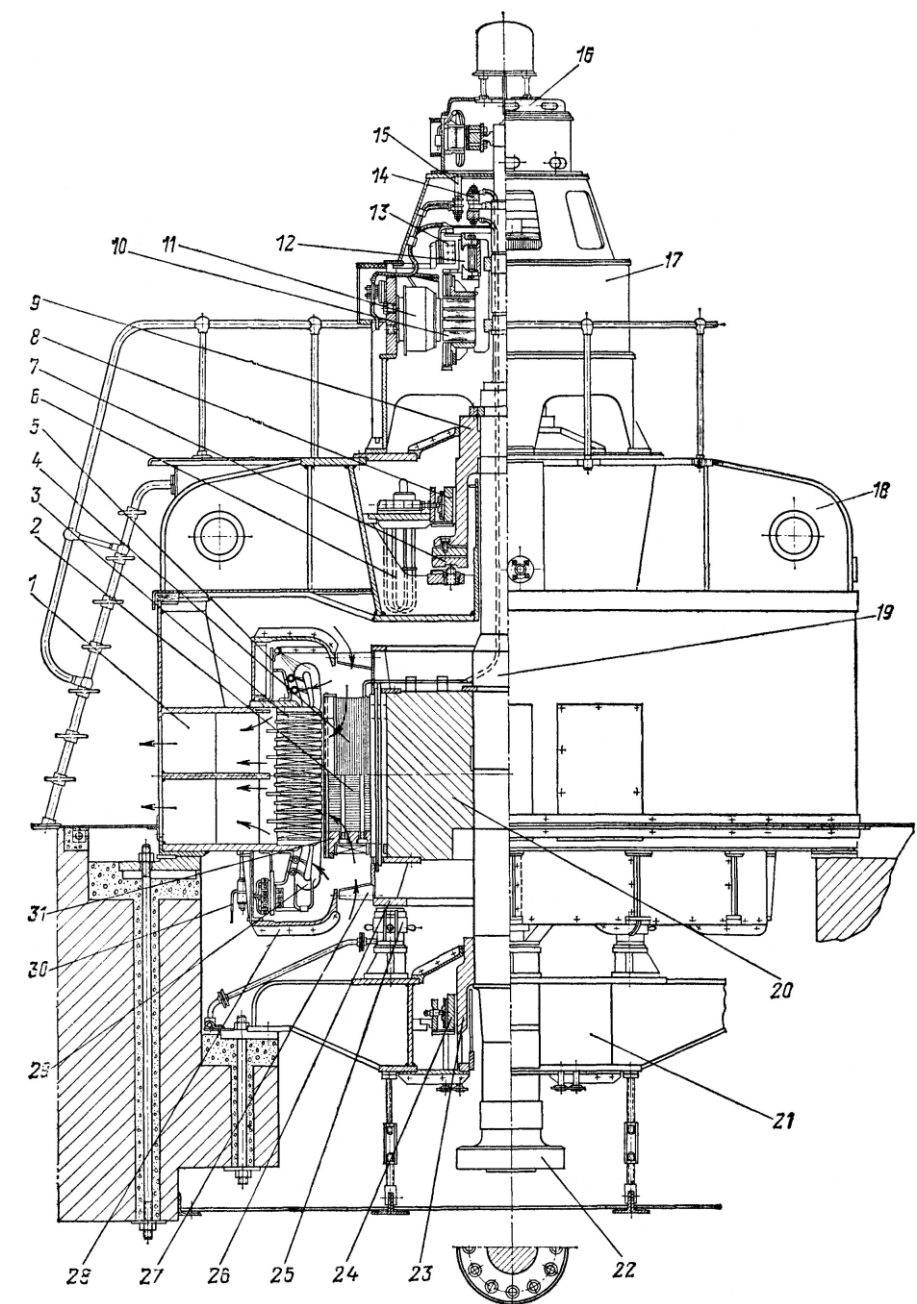
# Гидрогенератор с косвенным воздушным охлаждением

- 1 – корпус статора;
- 2 – полюс ротора;
- 3 – пакет магнитопровода статора;
- 4 – катушка обмотки возбуждения;
- 5 – кронштейн для крепления обмотки;
- 6 – маслоохладитель;
- 7 – сегмент подпятника;
- 8 – сегмент верхнего направляющего подшипника;
- 9 – втулка, подпятника и направляющего подшипника;
- 10 – якорь возбuditеля;
- 11 – полюс возбuditеля с обмоткой;
- 12 – коллектор возбuditеля;
- 13 – щеточное устройство возбuditеля;



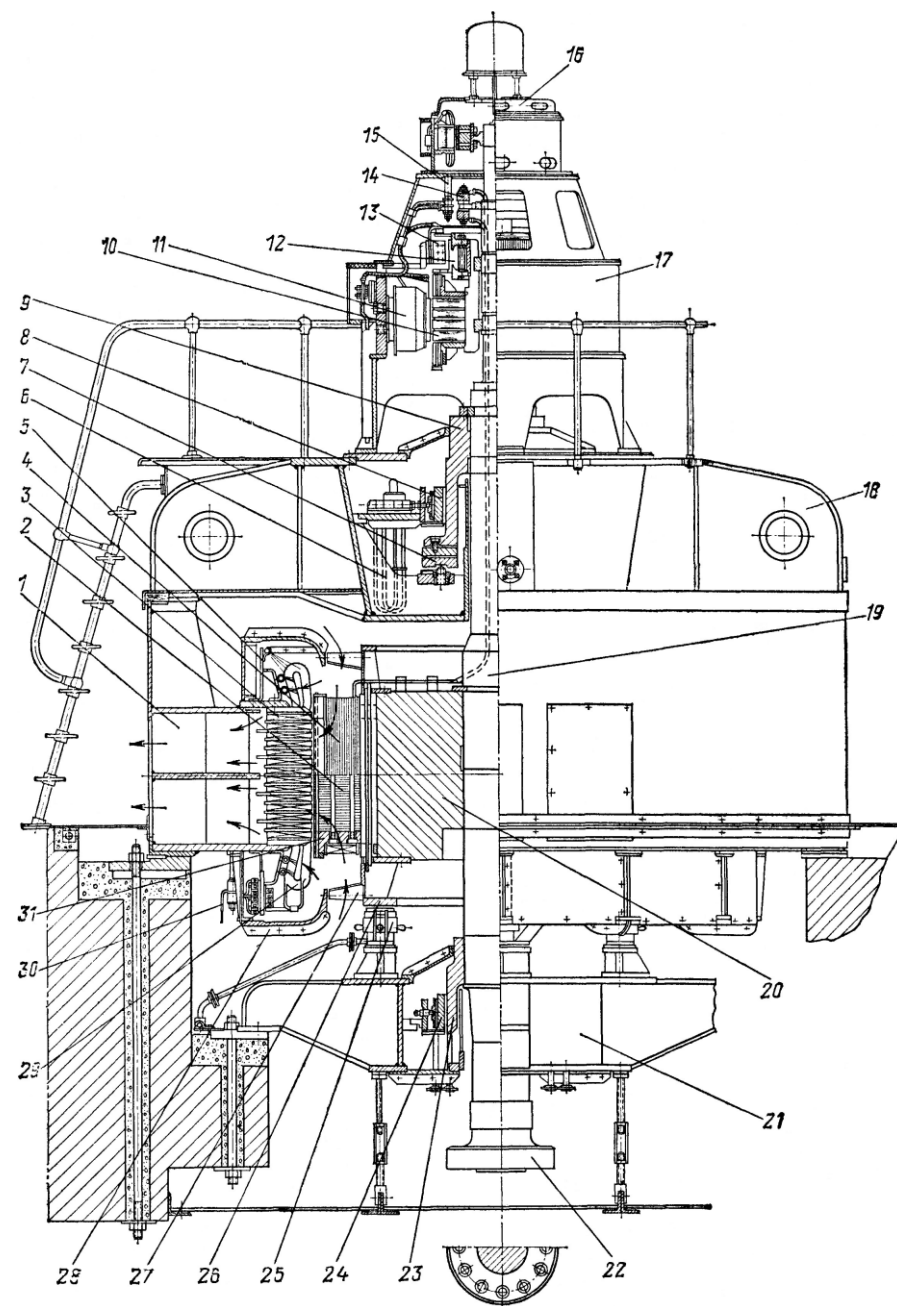
# Гидрогенератор с косвенным воздушным охлаждением

- 14 – контактные кольца машины;
- 15 – щеточное устройство контактных колец;
- 16 – регуляторный генератор;
- 17 – станина возбuditеля;
- 18 – верхняя крестовина;
- 19 – соединение между обмоткой возбуждения машины и контактными кольцами;
- 20 – обод ротора;
- 21 – нижняя крестовина;
- 22 – вал;
- 23 – втулка нижнего направляющего подшипника;
- 24 – сегмент нижнего направляющего подшипника;



# Гидрогенератор с косвенным воздушным охлаждением

- 25 – тормоз;
- 26 – тормозное кольцо ротора;
- 27 – осевой вентилятор;
- 28 – воздухоразделительный щит;
- 29 – катушка обмотки статора;
- 30 – выводы обмотки статора;
- 31 – нажимная щека полюса



# Исполнения вертикальных гидрогенераторов

## подвесное / зонтичное

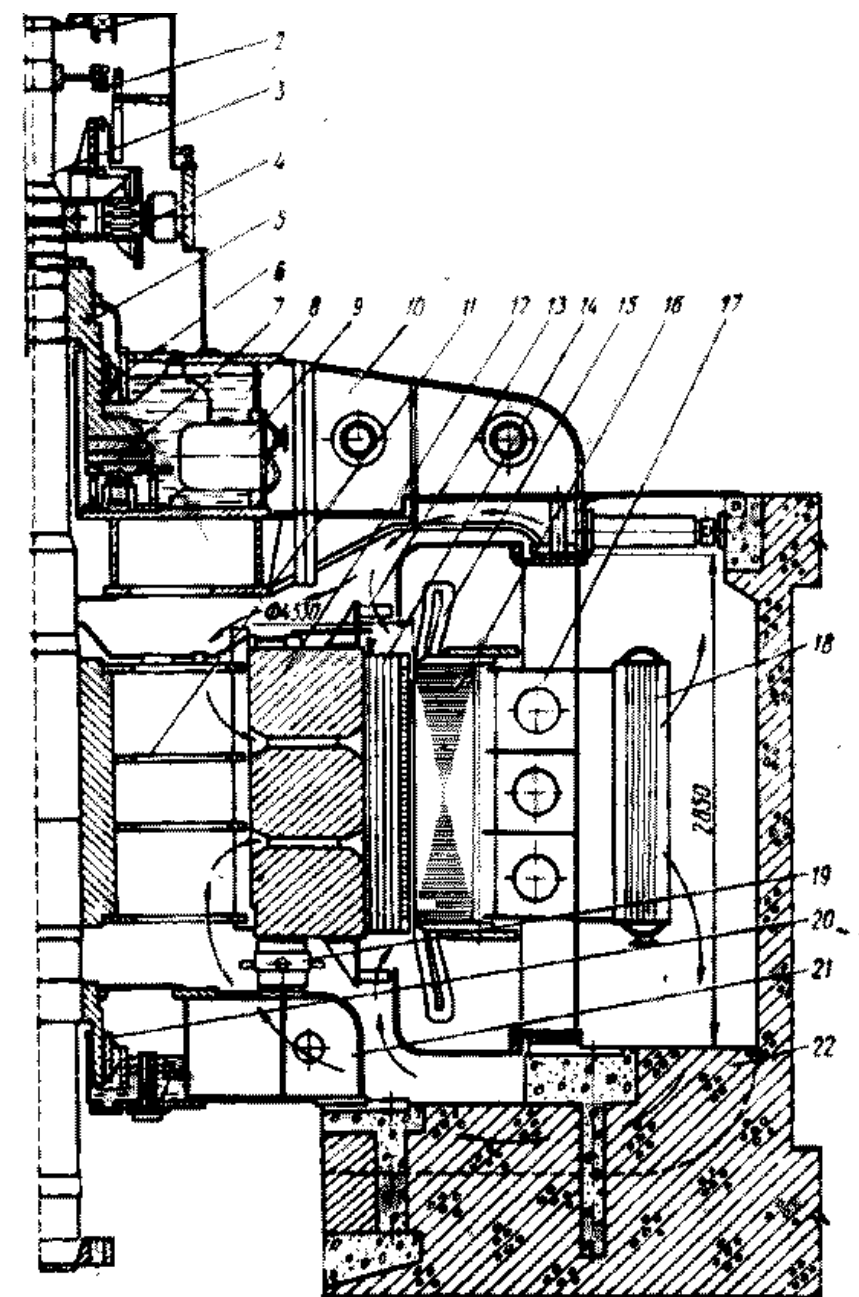
Подпятник над ротором в верхней крестовине  
Два направляющих подшипника

- облегчен доступ к подпятнику
- пары масла не попадают в генератор
- большая механическая устойчивость ротора

ГГ со средними и высокими  $n$   
при большой  $l_\delta$  и небольшом  $D$

- высота ГГ и вес больше,  
чем в зонтичном исполнении

ВГС 525/150-20 в подвесном исполнении





# Исполнения вертикальных гидрогенераторов

подвесное / зонтичное

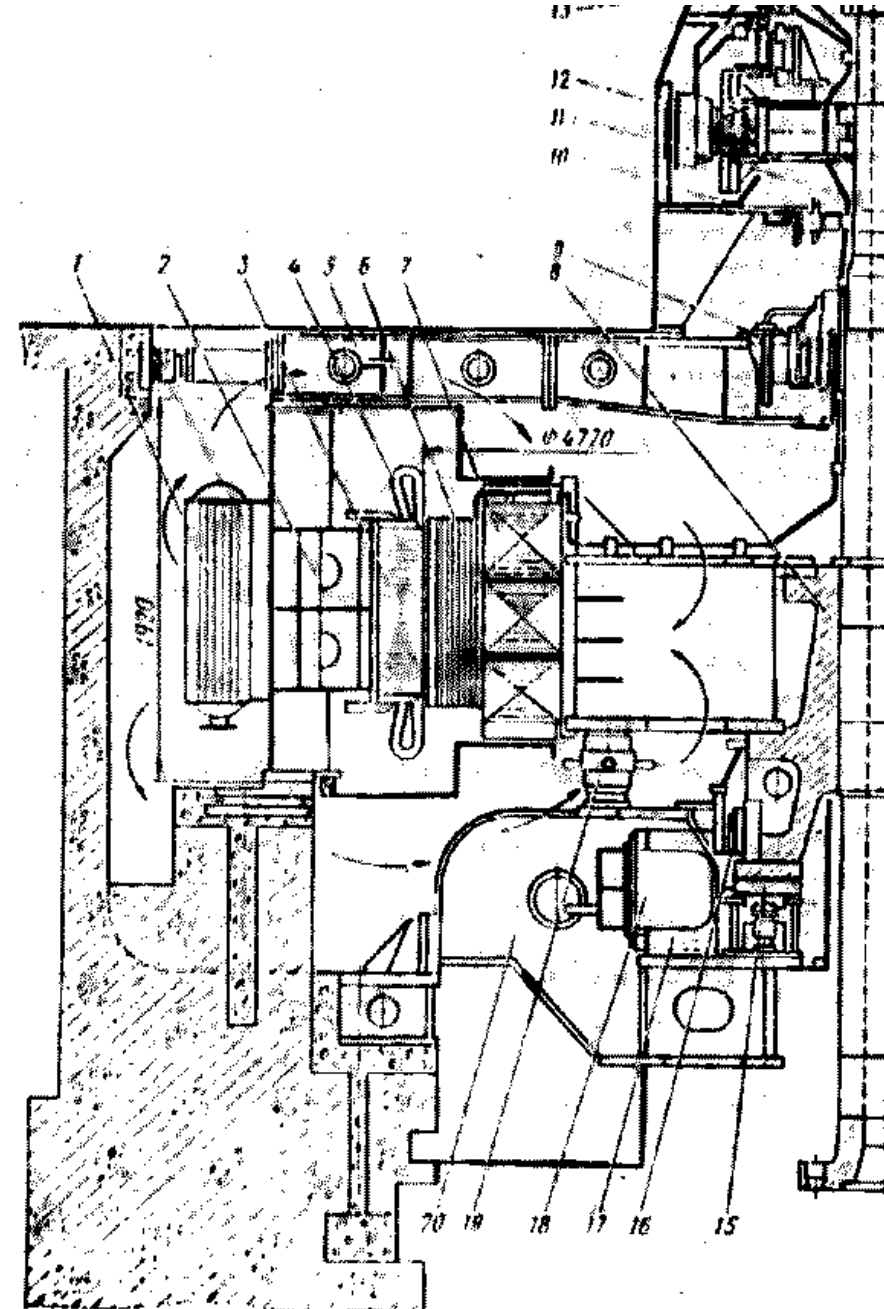
Подпятник под ротором в нижней крестовине

Можно обойтись без верхнего направляющего подшипника (используя подшипник турбины)

Возможна конструкция без нижней крестовины с опорой на крышку турбины

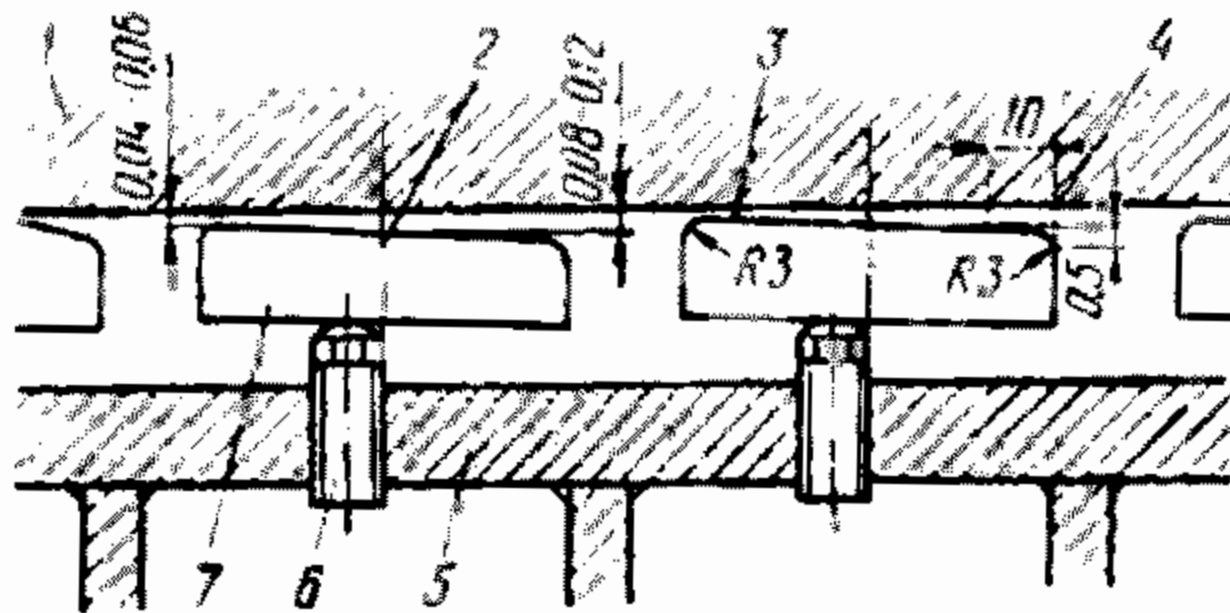
- меньше высота → меньше размеры и стоимость машинного зала
- больше диаметр подпятника – выше окружная скорость – больше потери

ВГС 525/84-32 в зонтичном исполнении



# Подпятник вертикального гидрогенератора

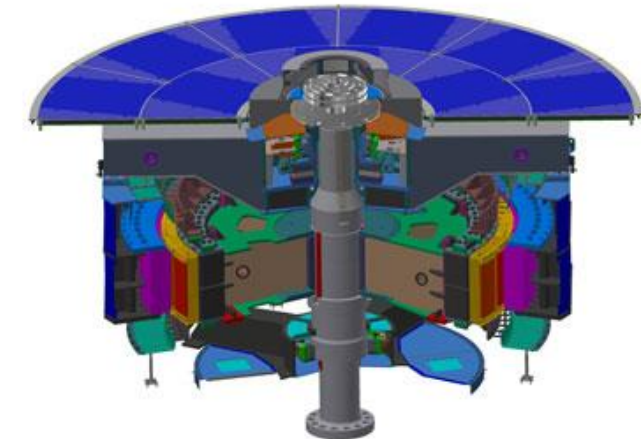
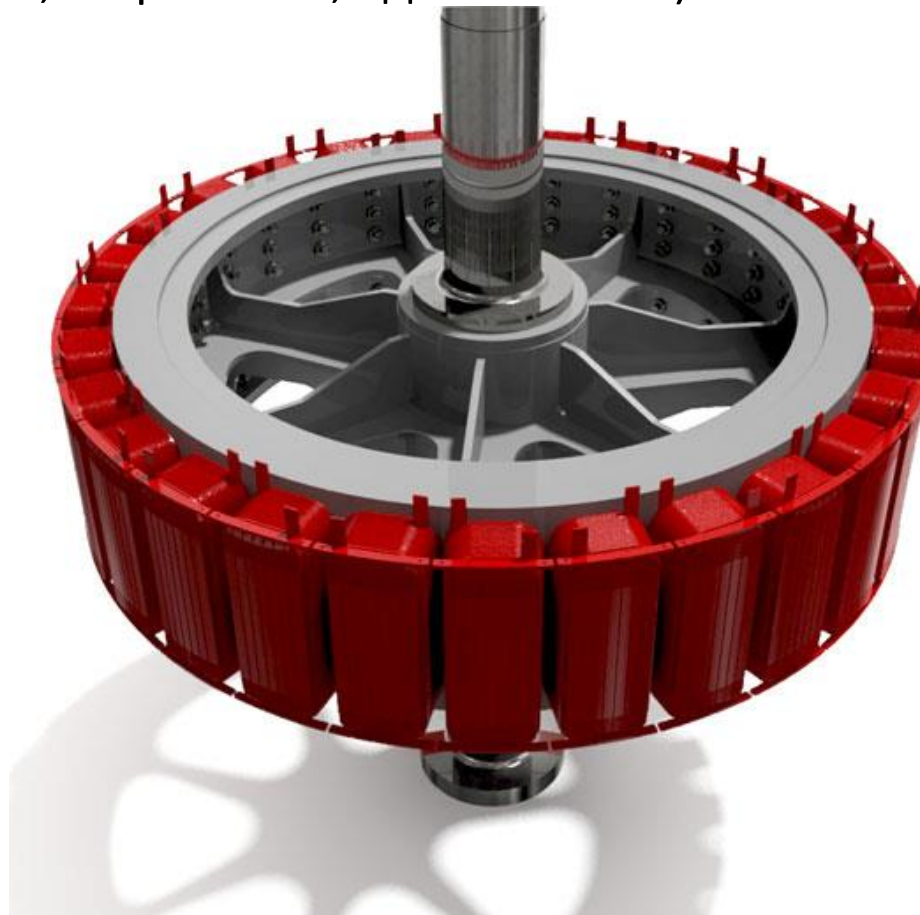
Схема работы подпятника



- 1 – вращающийся диск; 2 – середина сегмента;
- 3 – сбегающая кромка; 4 – набегающая кромка;
- 5 – опорное кольцо; 6 – опорный винт;
- 7 – сегмент подпятника

# Конструкция гидрогенератора

- Корпус статора
- Сердечник статора
- Обмотка статора (двухслойная, стержневая, одновитковая)
- Ротор (остов/обод/спицы)
- Сердечник полюса
- Обмотка возбуждения
- Вал
- Подпятник
- Направляющий подшипник
- Крестовины



# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

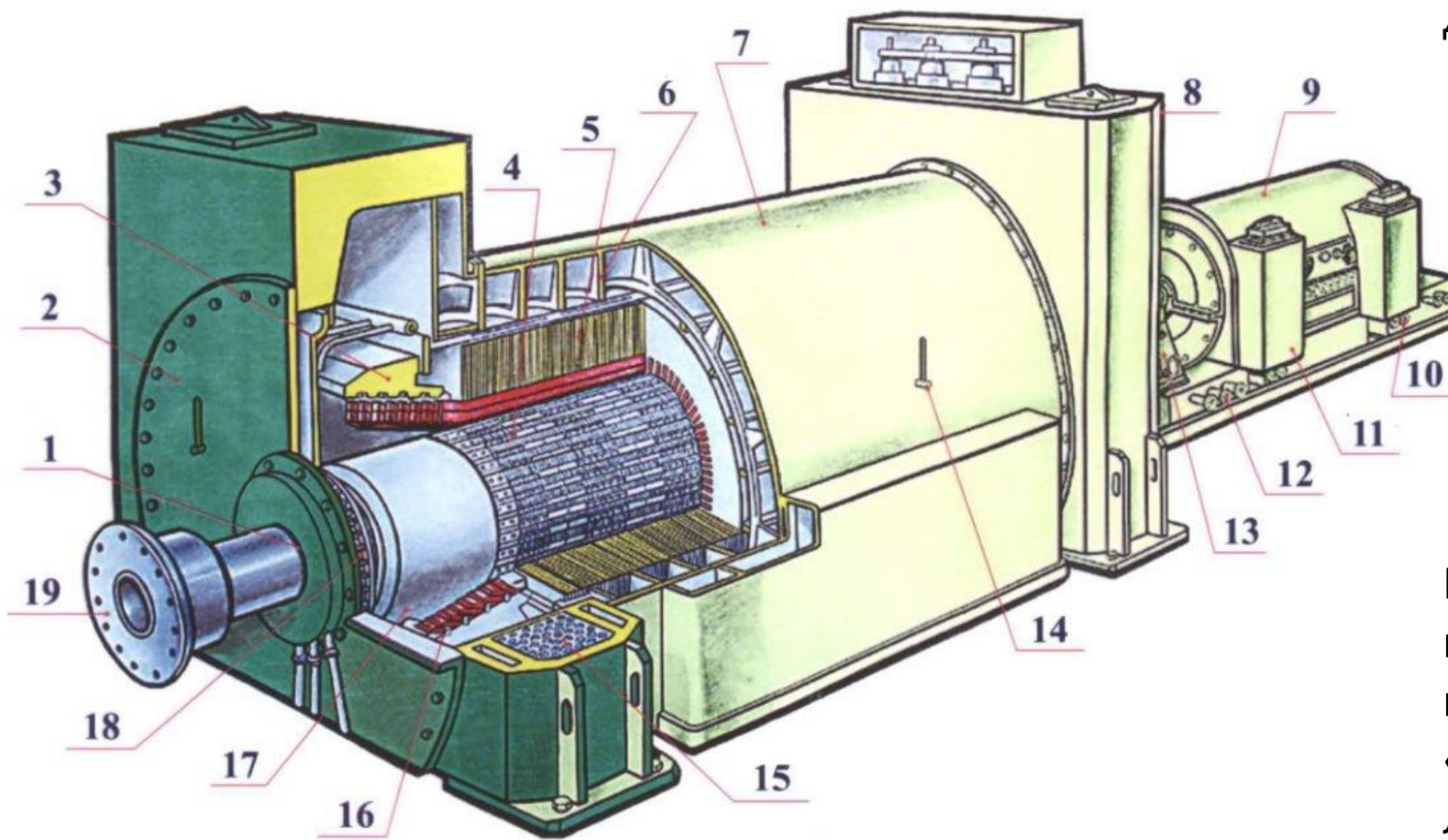
Турбогенераторы



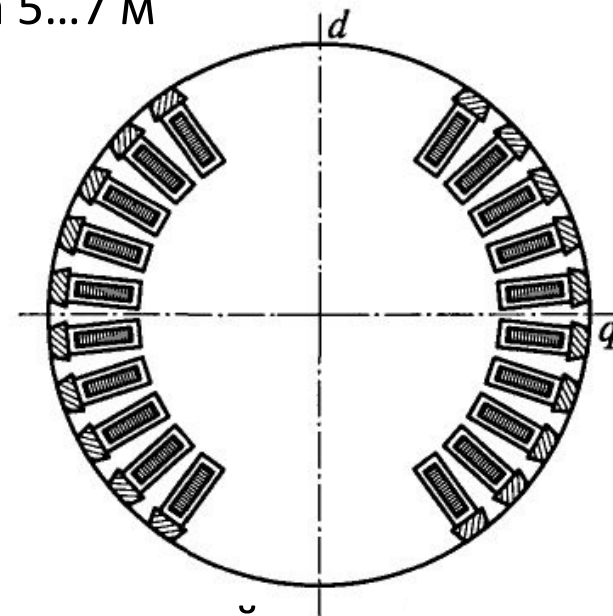
# Турбогенераторы

Турбогенераторы

$n = 1500$  или  $3000$  об/мин



диаметр ротора 1200...1250 мм  
длина 5...7 м



Ротор массивный  
пазы – распределенная ОВ  
пазовые клинья (немагн. металл)  
«большой зубец» – полюс  
лобовые части ОВ – бандаж

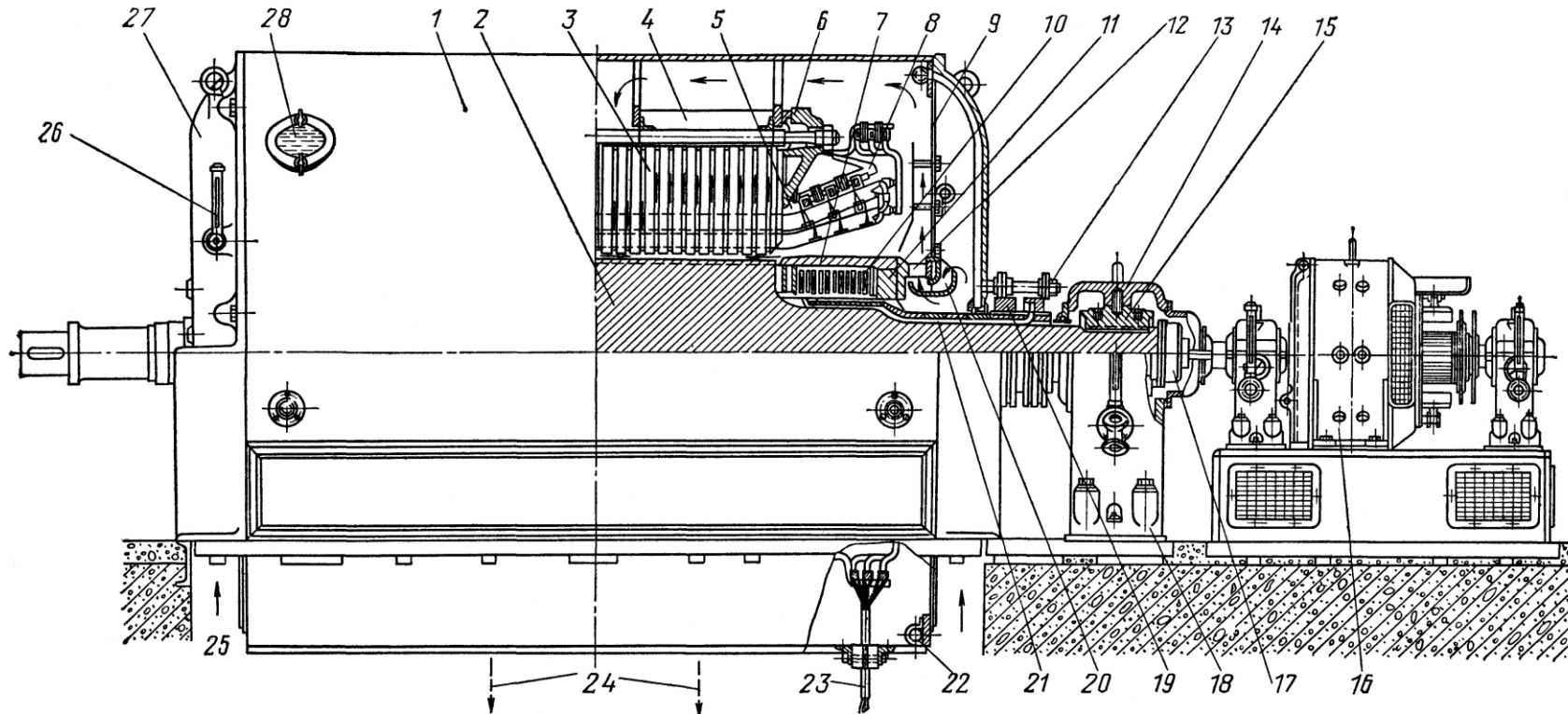
# Турбогенераторы

Тип генератора	Охлаждение		
	Обмотки статора	Сердечника статора	Обмотки ротора
Т, Т2	косвенное воздушное	непосредственное воздушное	косвенное воздушное
ТФ (форсированное охлаждение)	косвенное воздушное	непосредственное воздушное	непосредственное воздушное
ТЗФ (форсированное с разделением воздушных потоков статор/ротор)	косвенное воздушное	непосредственное воздушное	непосредственное воздушное
ТВ2 (водородное охлаждение)	косвенное водородом	непосредственное водородом	косвенное водородом
ТВФ (форсированное охлаждение ротора)	косвенное водородом	непосредственное водородом	непосредственное водородом
ТВВ (водородно-водяное охлаждение)	непосредственное водой	непосредственное водородом	непосредственное водородом
ТГВ (водородно-водяное охлаждение обмоток)	непосредственное водородом	непосредственное водородом	непосредственное водородом

# Турбогенераторы

Тип генератора	Охлаждение		
	Обмотки статора	Сердечника статора	Обмотки ротора
ТЗВ (полное водяное охлаждение)	непосредственное водой	непосредственное водой	непосредственное водой
ТВМ (масляное охлаждение статора, водяное – обмотки ротора)	непосредственное маслом	непосредственное маслом	непосредственное водой
ТА (турбогенератор асинхронизированный)	косвенное воздушное	непосредственное воздушное	косвенное воздушное
ТЗФА (ТЗФ асинхронизированный)	косвенное воздушное	непосредственное воздушное	непосредственное воздушное
ТЗВА (ТЗВ асинхронизированный)	непосредственное водой	непосредственное водой	непосредственное водой
АСТГ (асинхронизированный синхронный турбогенератор)	непосредственное водородом	непосредственное водородом	непосредственное водородом

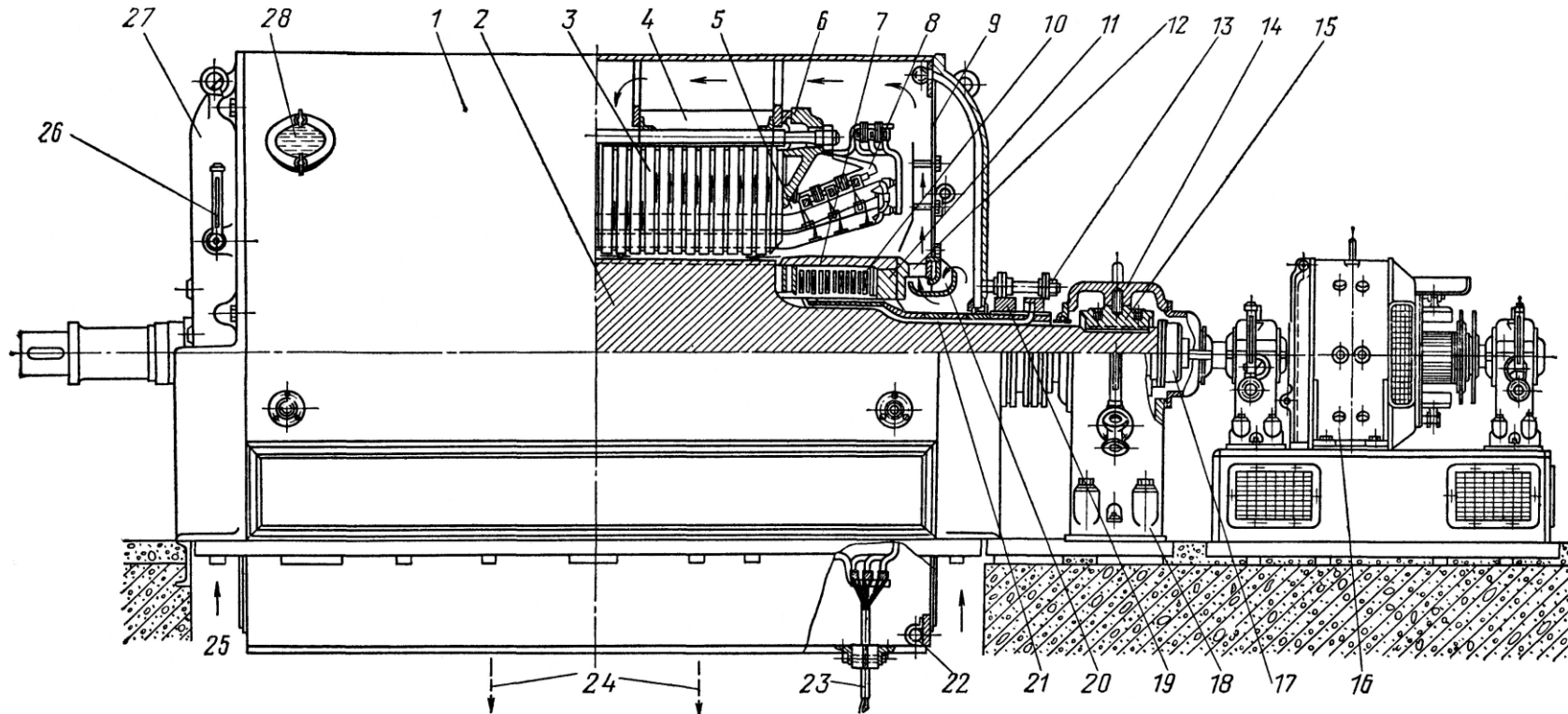
# Конструкция турбогенератора



1 – корпус статора; 2 – магнитопровод ротора; 3 – пакет магнитопровода статора; 4 – стяжная шпилька; 5 – стержень обмотки статора; 6 – нажимное кольцо; 7 – бандажное кольцо ротора; 8 – кронштейн для крепления обмотки; 9 – воздухоразделительная перегородка с диффузором; 10 – катушка обмотки возбуждения; 11 – центрирующее кольцо; 12 – центробежный вентилятор; 13 – траверса со щеточным устройством;

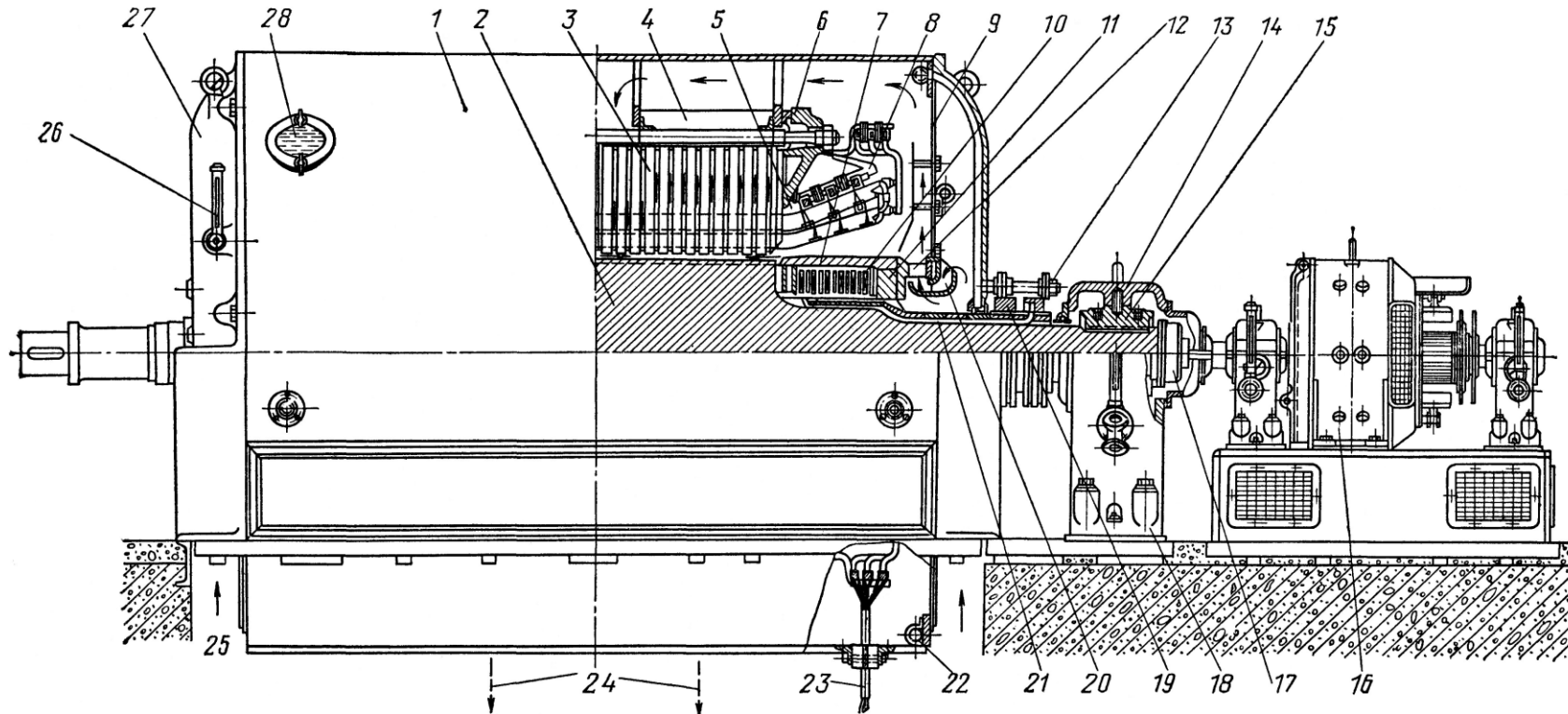


# Конструкция турбогенератора



14 – крышка подшипника; 15 – вкладыш подшипника; 16 – электромашинный возбудитель; 17 – гибкая соединительная муфта; 18 – стояк подшипника; 19 – контактное кольцо; 20 – направляющий аппарат вентилятора; 21 – соединение между контактными кольцами и обмоткой возбуждения; 22 - труба системы пожаротушения; 23 – труба воды системы воздушного охлаждения;

# Конструкция турбогенератора



24 – направление движения нагретого воздуха к охладителям; 25 – направление движения охлажденного воздуха; 26 – термометр охлажденного воздуха. 27 – торцевой щит; 28 – смотровой люк

# Турбогенератор с воздушным охлаждением

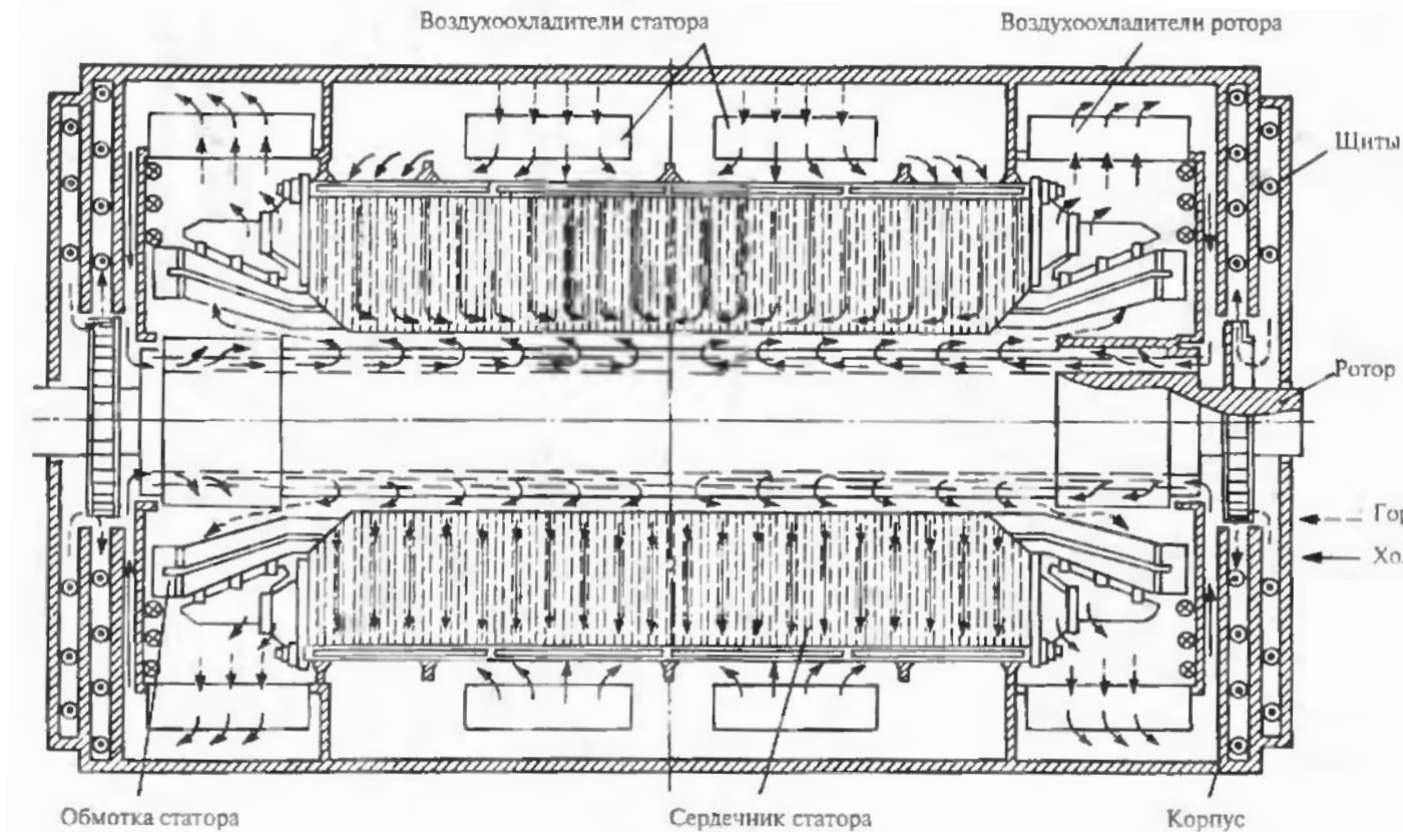


Схема охлаждения турбогенератора серии ТЗФ

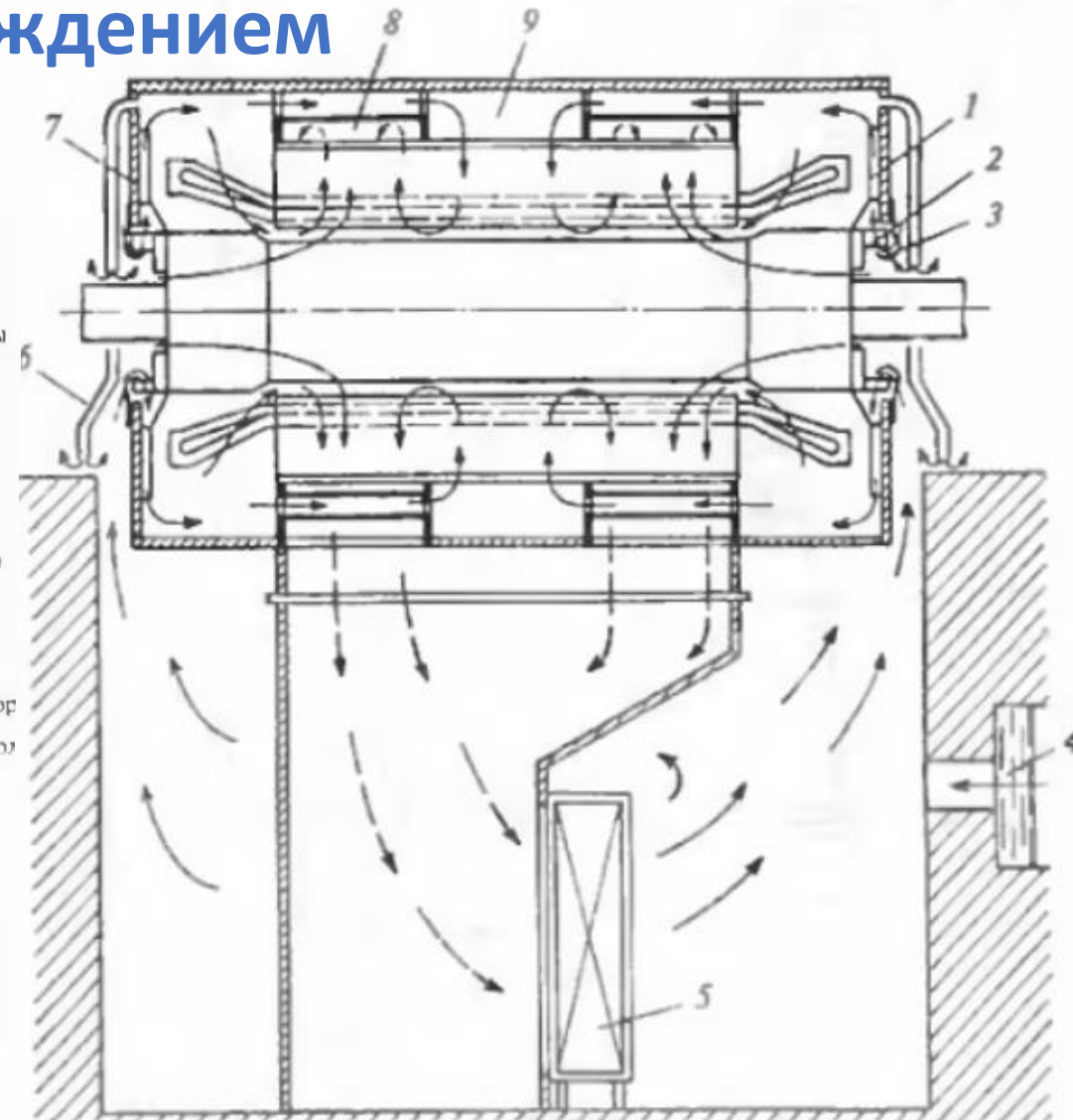


Схема охлаждения турбогенератора Т2-12-2



# Турбогенератор с косвенным водородным охлаждением

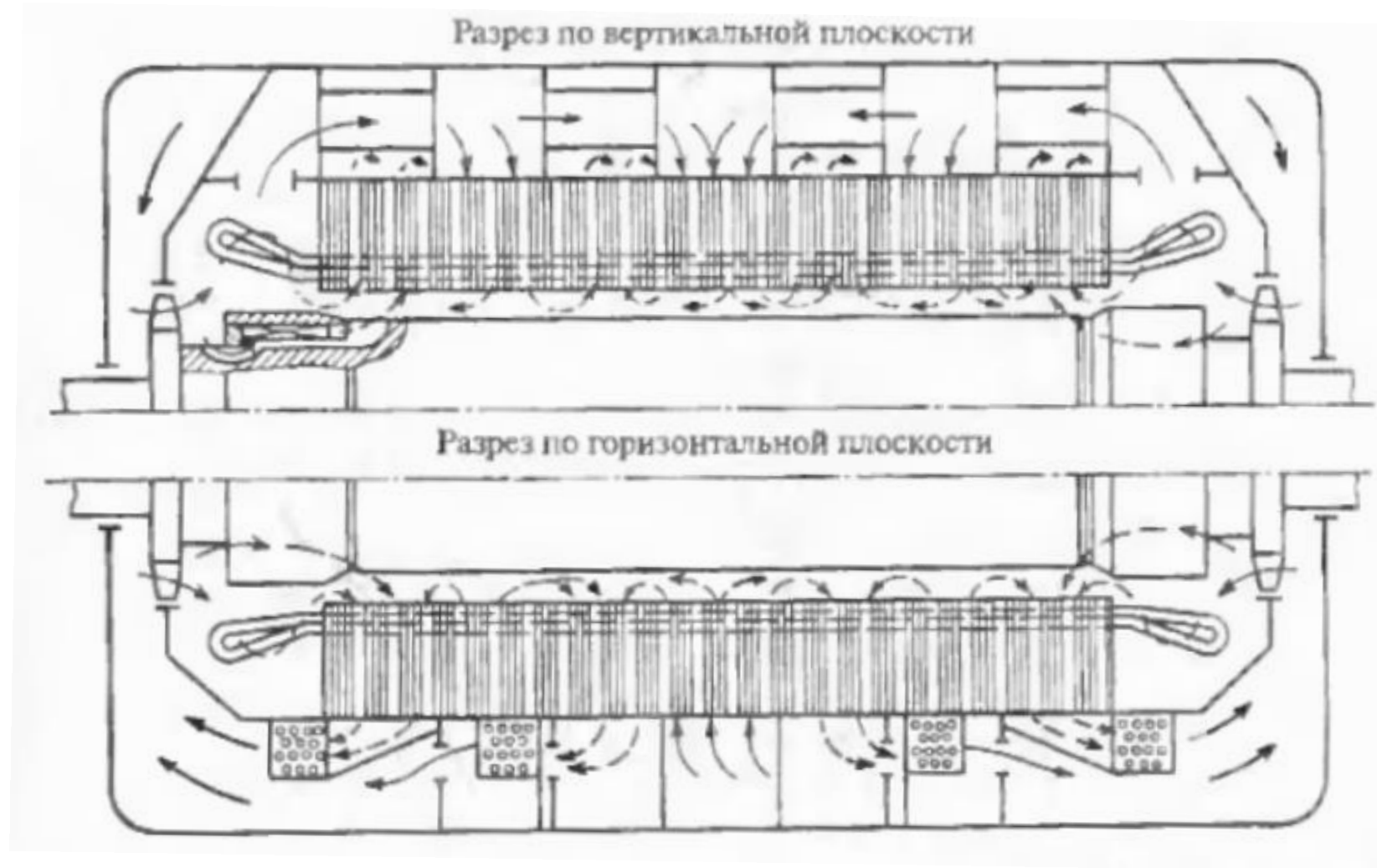


Схема циркуляции водорода в турбогенераторе серии ТВ2



# Турбогенератор с форсированным водородным охлаждением

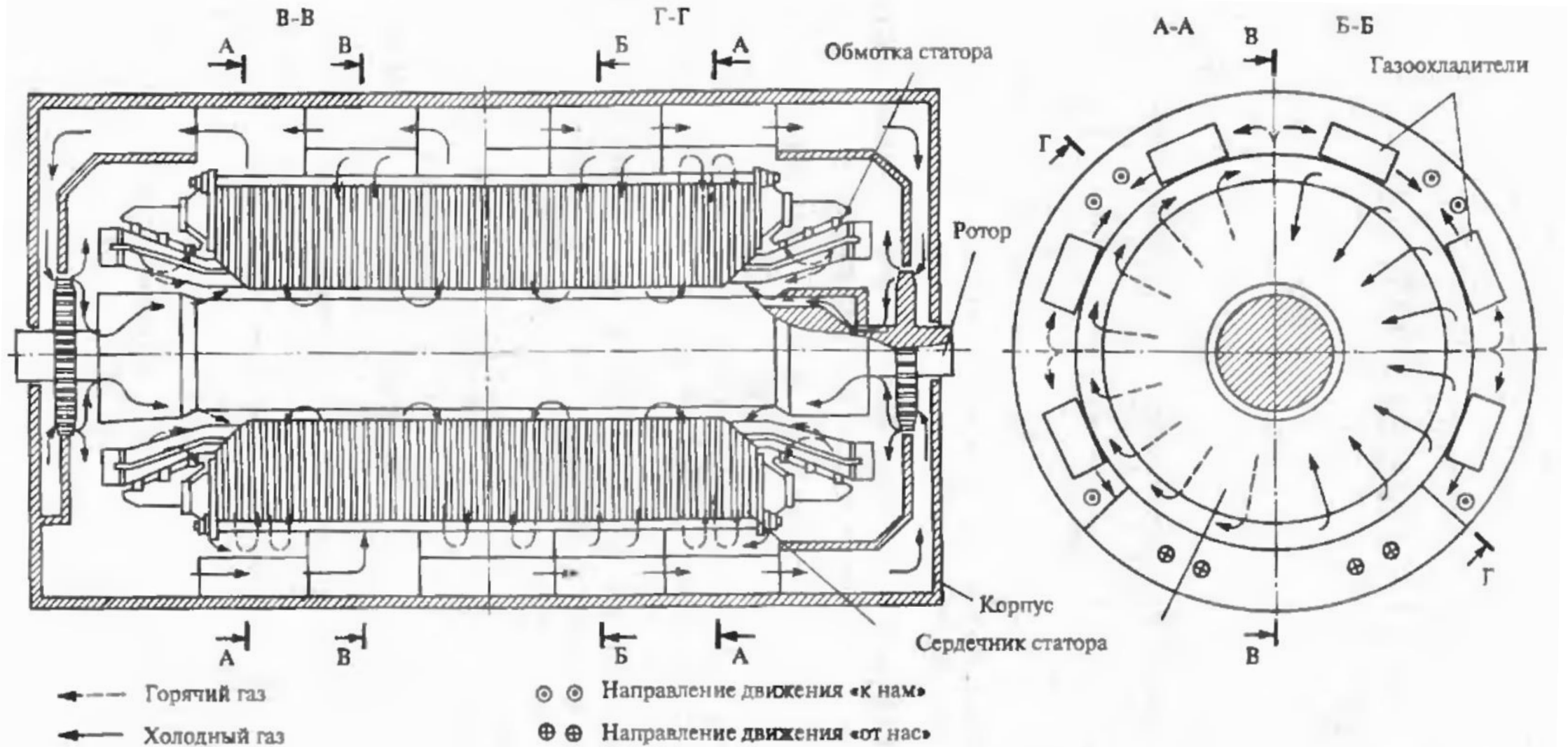


Схема охлаждения турбогенератора серии ТВФ

# Турбогенератор с форсированным водородным охлаждением

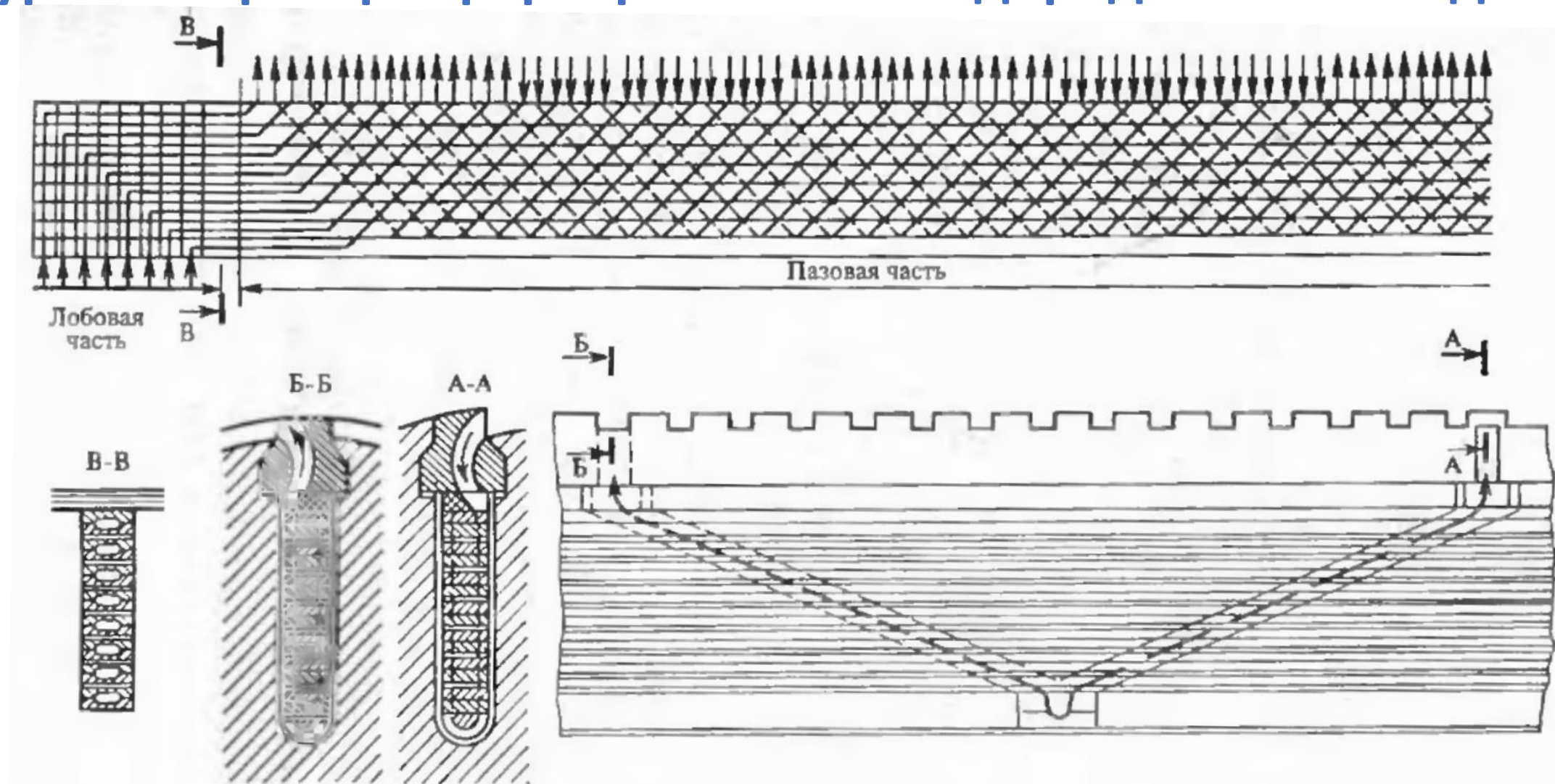
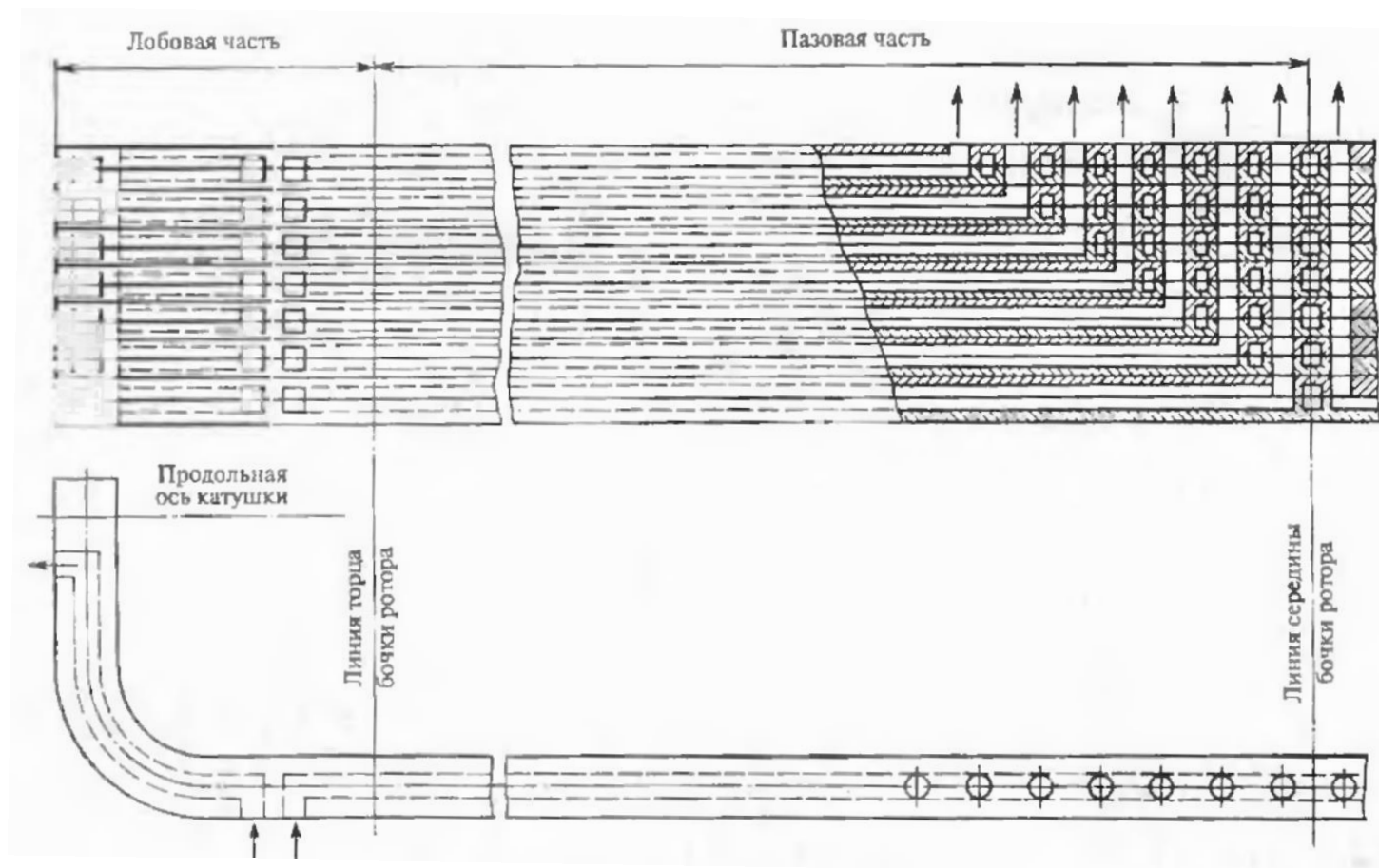
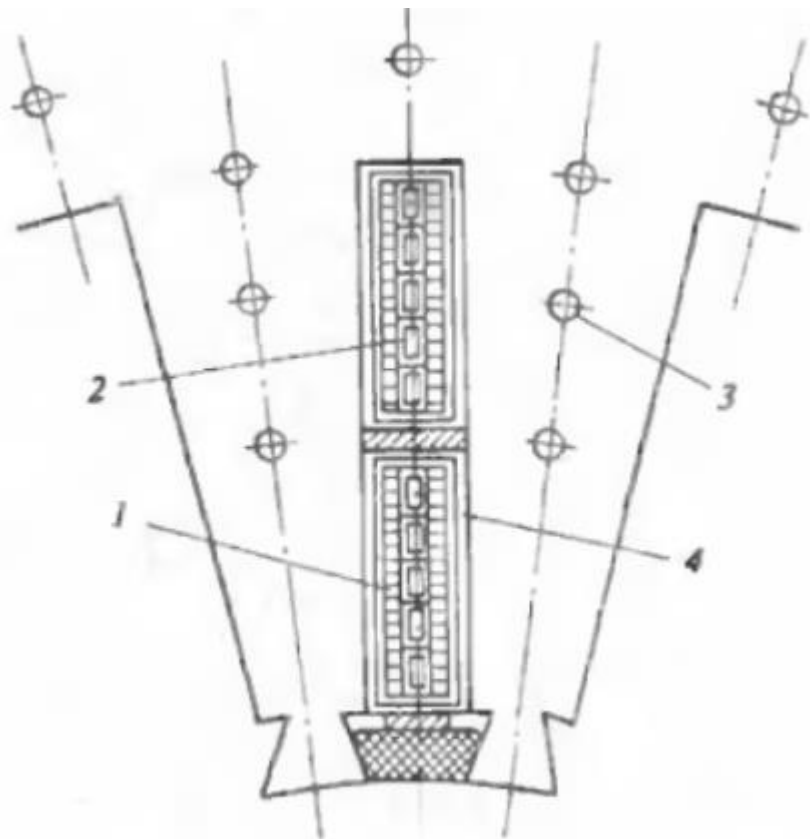


Схема непосредственного охлаждения обмотки ротора турбогенератора серии ТВФ

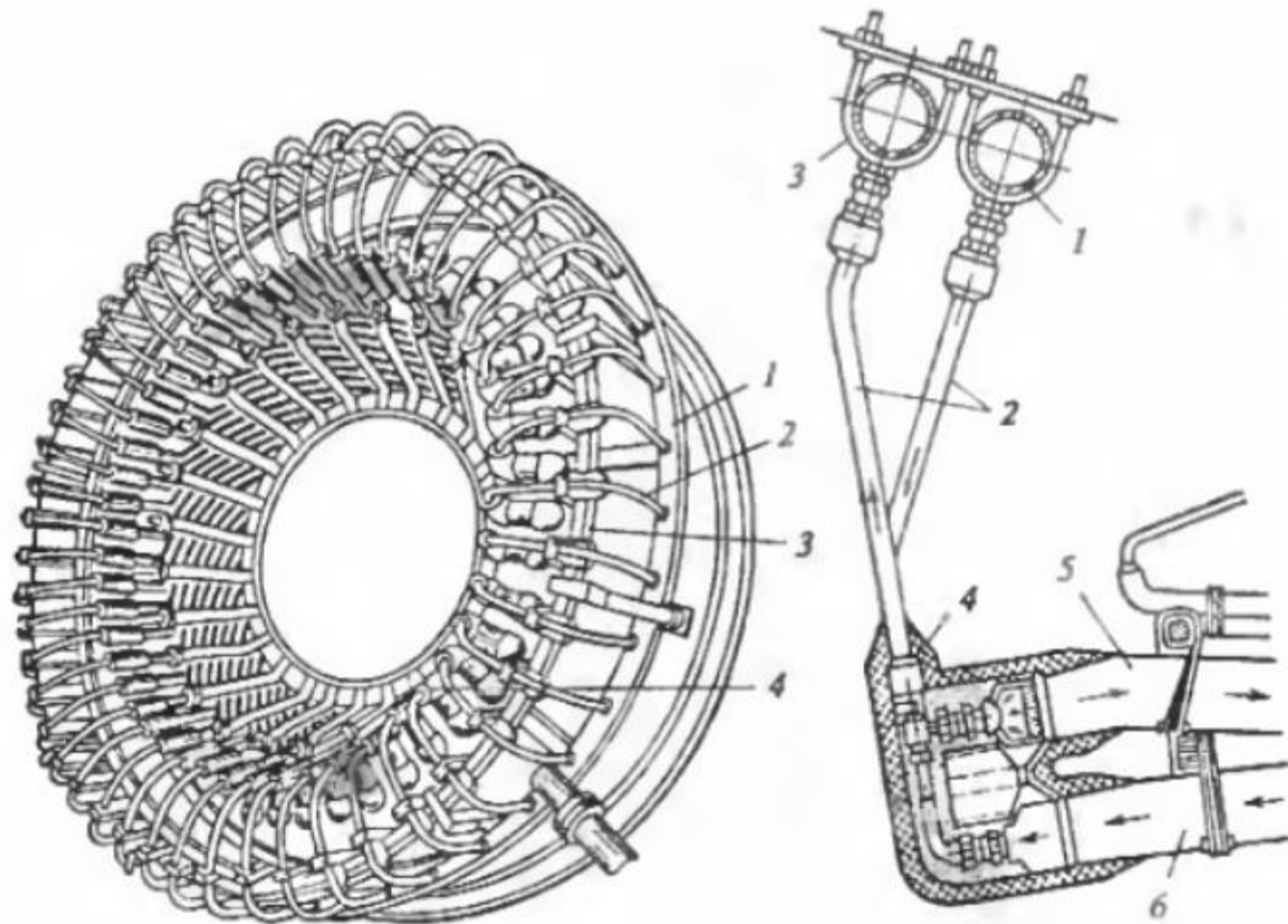
# Турбогенератор с непосредственным водородным охлаждением



Каналы для непосредственного охлаждения статора и ротора



# Турбогенератор с водяным охлаждением



Водяной коллектор для обмотки статора

# Турбогенератор с полным водяным охлаждением

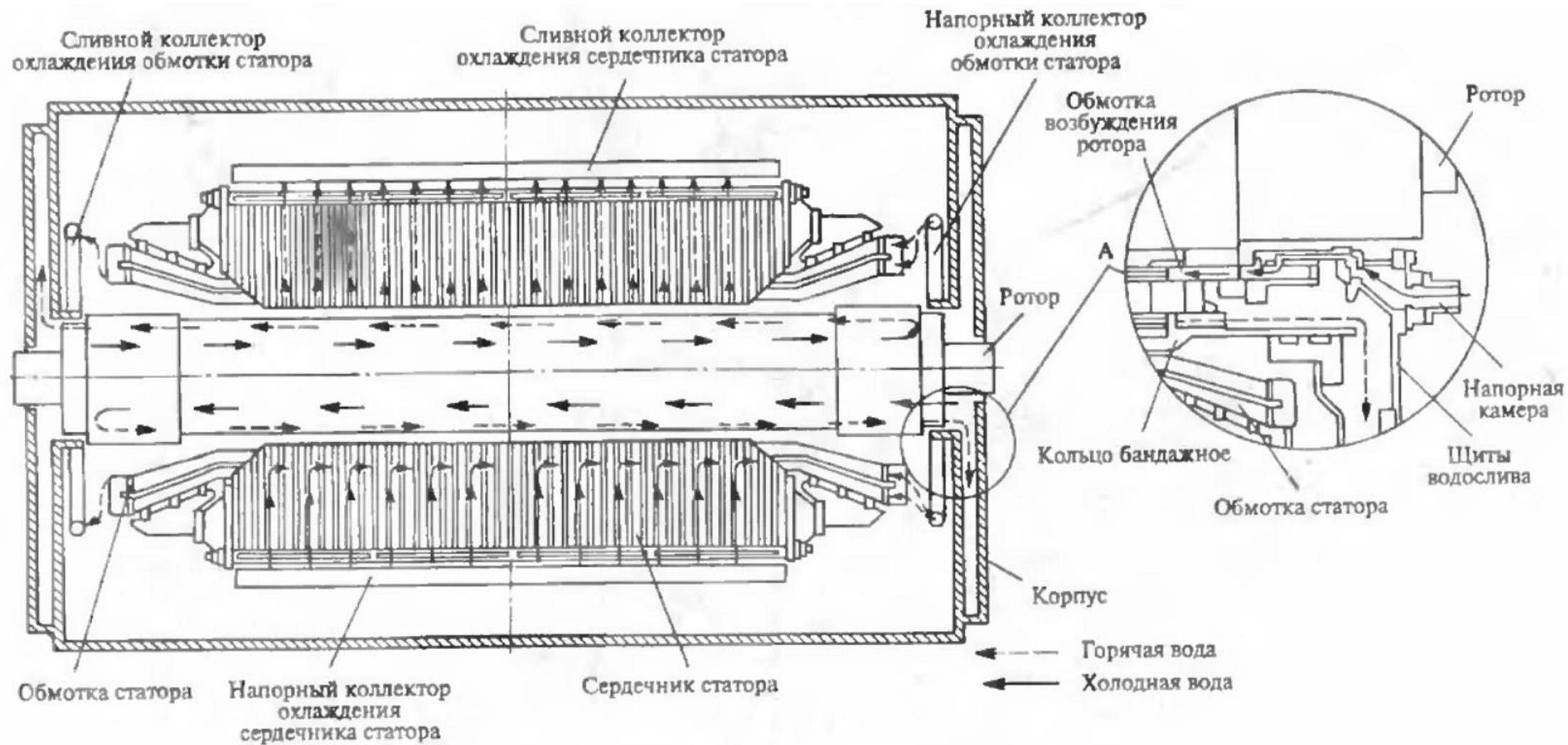
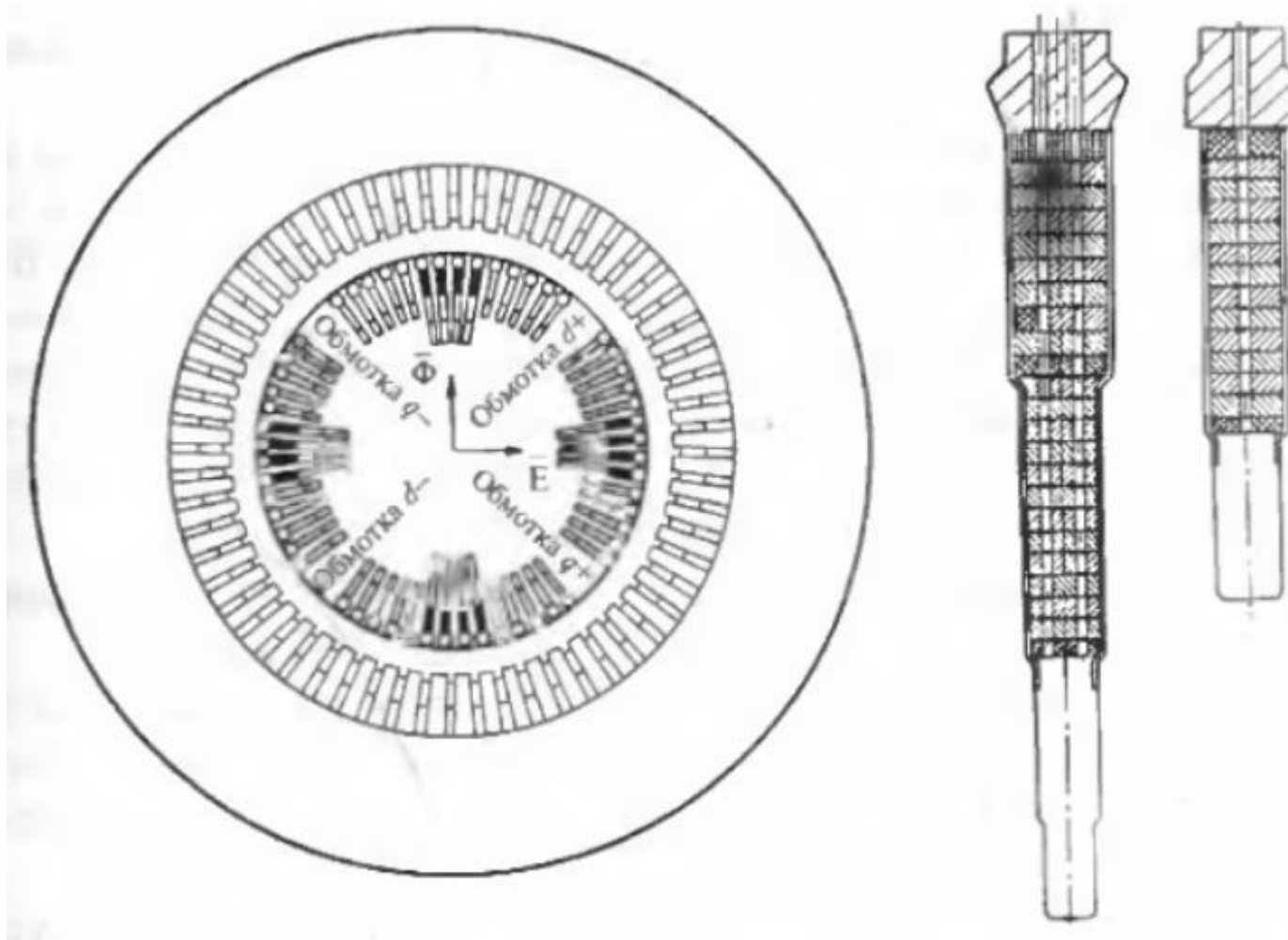


Схема охлаждения турбогенератора серии ТЗВ

# Асинхронизированные турбогенераторы

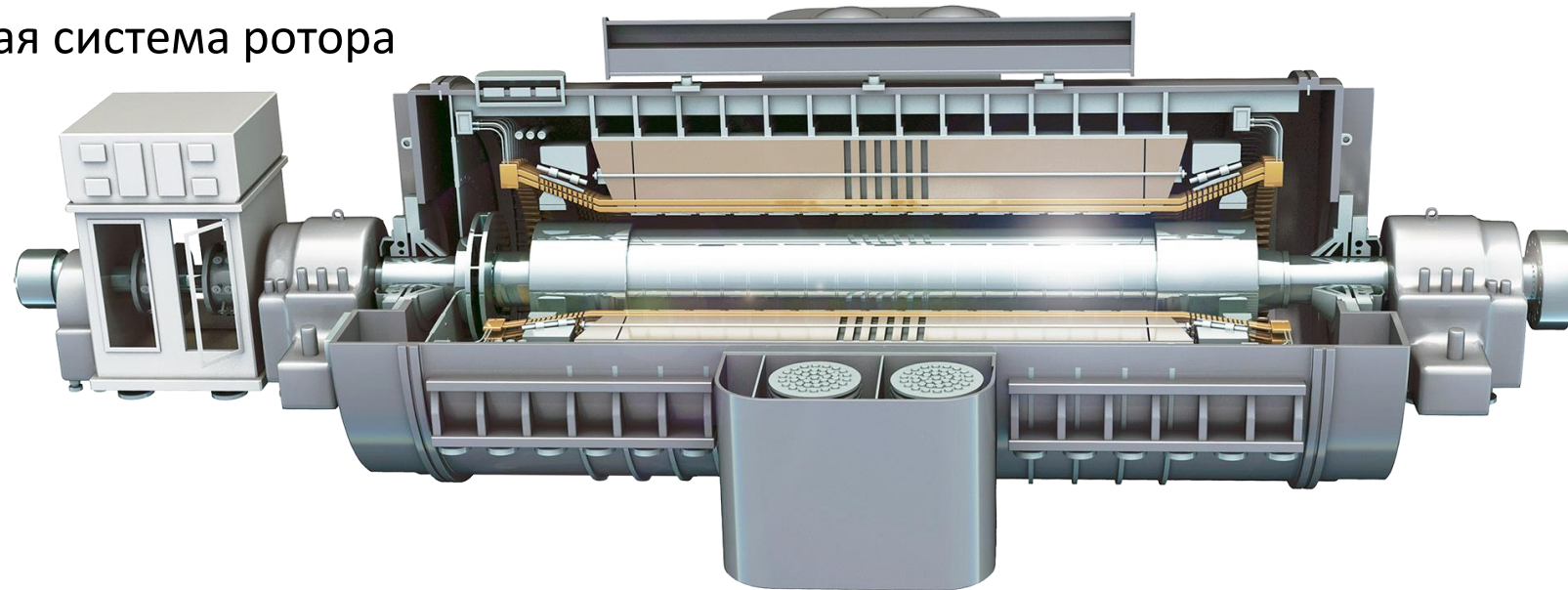


Поперечное сечение, схема размещения обмоток и пазы ротора ТЗФА-110-2УЗ



# Конструкция турбогенератора

- Корпус статора
- Сердечник статора
- Обмотка статора
- Торцевые щиты
- Магнитопровод и вал ротора
- Обмотка ротора
- Пазовые клинья и демпферная система ротора
- Бандаж ротора
- Вентиляторы
- Токоподвод
- Соединительные муфты, подшипники, уплотнения



# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Системы возбуждения

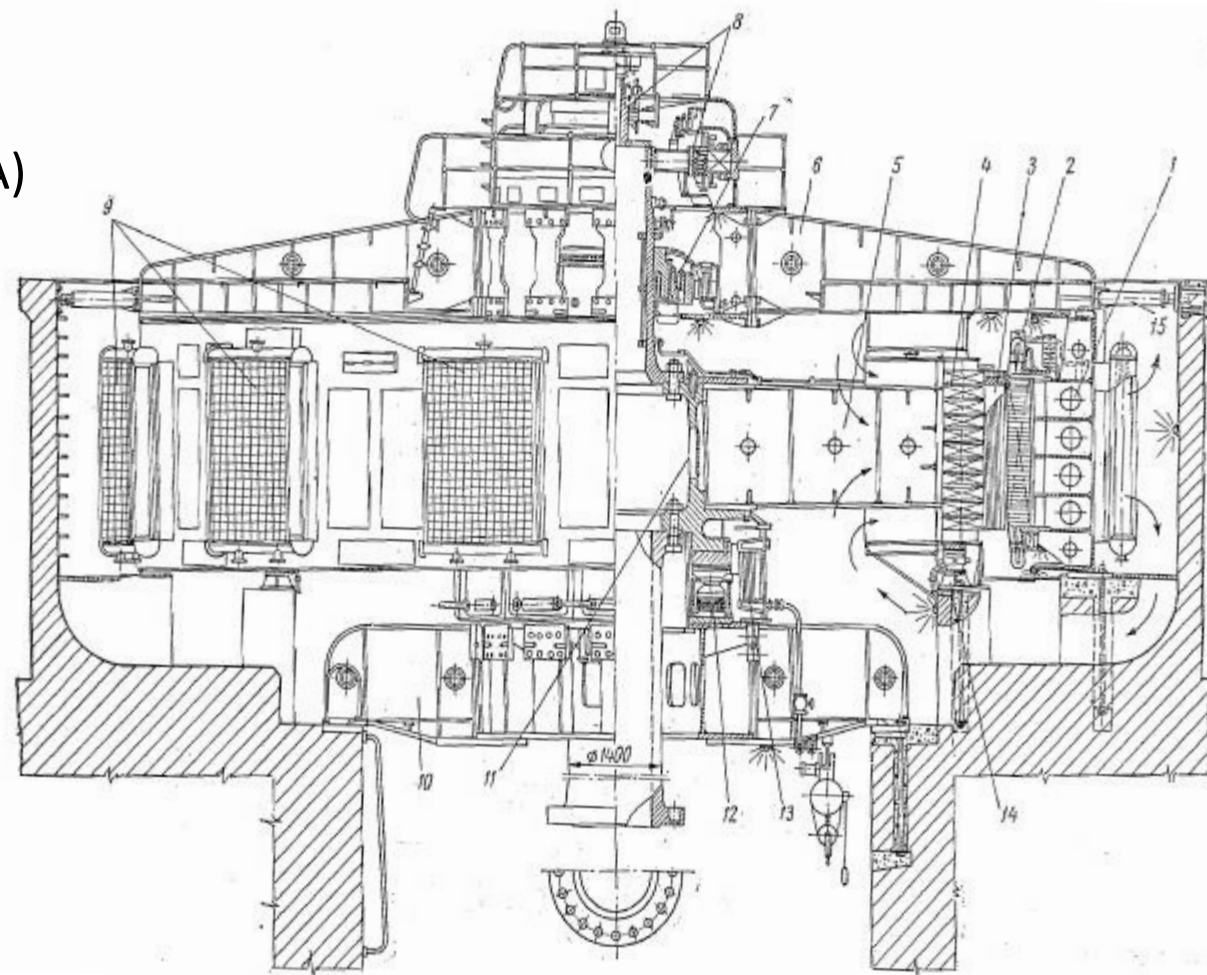
# Системы возбуждения крупных генераторов

## Система возбуждения

- мощность возбуждения 0,3...3%
- постоянный ток для ОВ (до 800 В, до 6...9 кА)
- регулирование тока ОВ
- форсировка возбуждения ( $1,8...2 U_{fH}$ )
- гашение магнитного поля

## **Электромашинальная система возбуждения (8)**

- возбудитель – генератор постоянного тока независимого возбуждения
- подвозбудитель – генератор с самовозбуждением для питания ОВ возбудителя



# Системы возбуждения крупных генераторов

## Полупроводниковые статические системы возбуждения

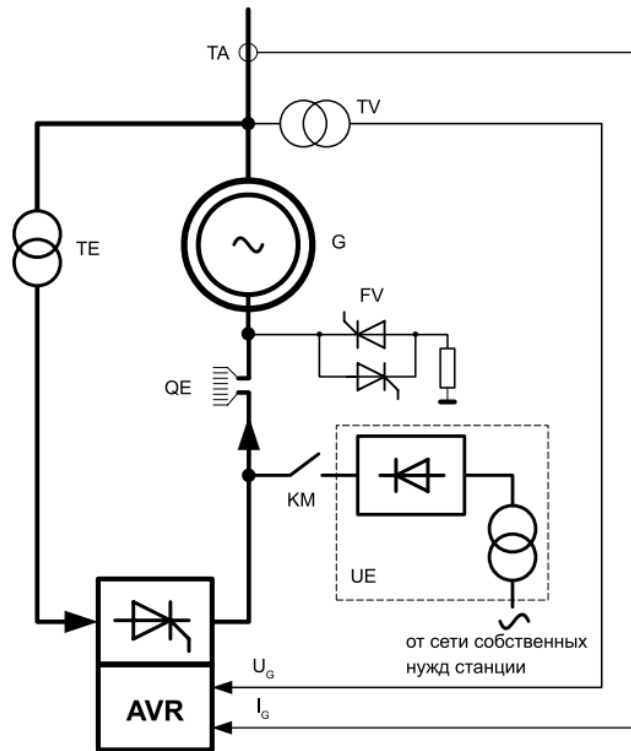
- системы тиристорные самовозбуждения (СТС)
- системы тиристорные независимые (СТН)
- системы бесщеточные диодные (СБД)
- другие (АО «Силовые машины»)

### Функции

- начальное возбуждение
- холостой ход
- включение в сеть методом точной синхронизации или самосинхронизации
- работа в энергосистеме с допустимыми нагрузками и перегрузками
- форсировка возбуждения с заданной кратностью по  $U$  и по  $I$
- разгрузка по реактивной мощности до  $\cos\varphi = 1$
- развозбуждение при нарушениях в энергосистеме
- гашение поля генератора при аварии и при остановке
- электрическое торможение агрегата

# Системы возбуждения крупных генераторов

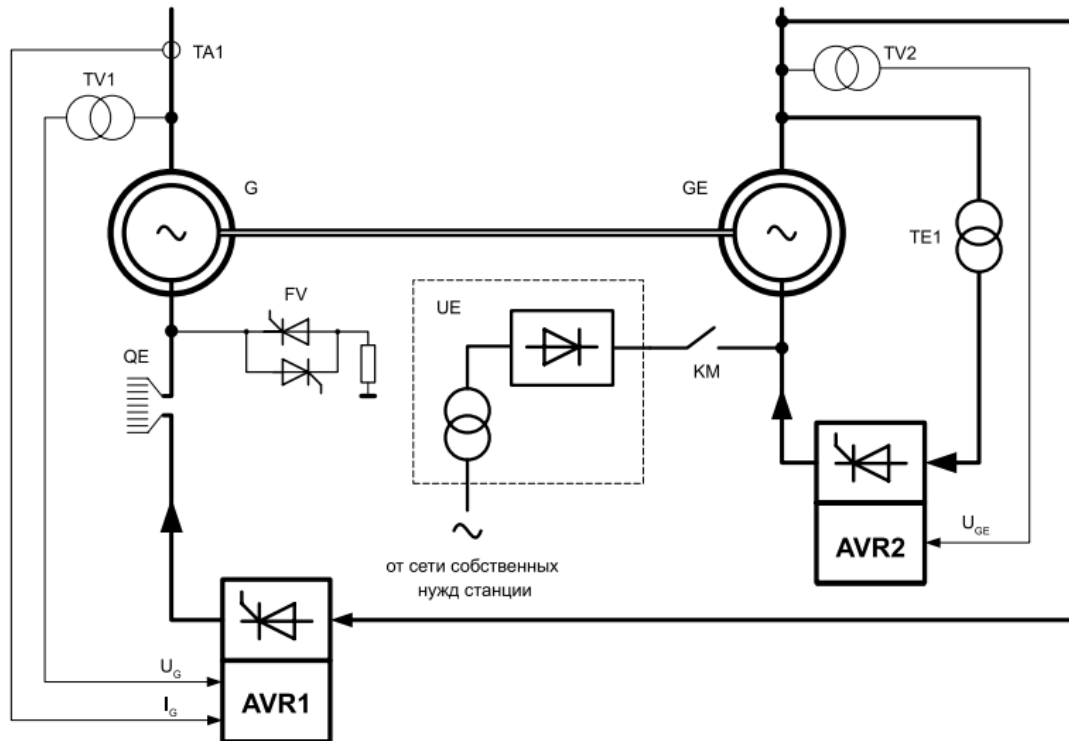
## Системы тиристорные самовозбуждения



- Питание ОВ выпрямленным регулируемым током: напряжение с зажимов генератора через трансформатор и выпрямитель – на ОВ генератора
- AVR – автоматический регулятор возбуждения
- Начальное возбуждение UE – от сети собственных нужд или от батареи (кратковременный импульс  $U$  на ОВ)
- Защита ротора от перенапряжений – тиристорные разрядники FV
- Интенсивное гашение поля – перевод преобразователя в инверторный режим изменением полярности  $U$
- Экстренное снятие возбуждения – автомат гашения поля QE

# Системы возбуждения крупных генераторов

## Системы тиристорные независимые

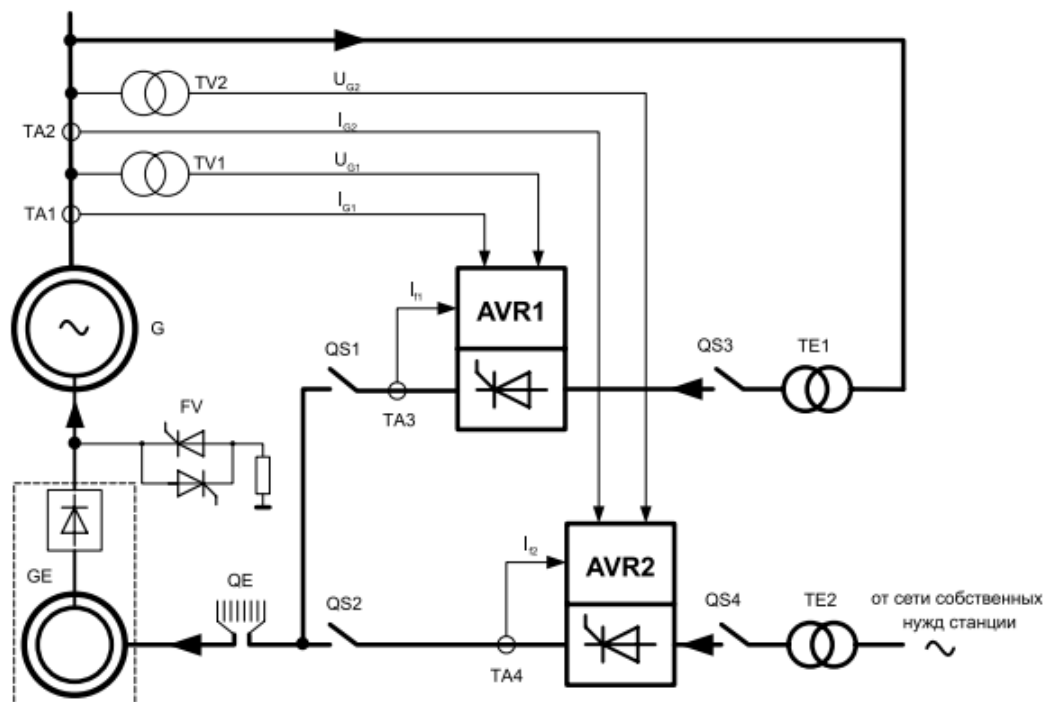


- Питание ОВ выпрямленным током от вспомогательного синхронного генератора GE (возбудителя с системой самовозбуждения)
  - AVR1, AVR2 – автоматические регуляторы возбуждения генератора и возбудителя
  - Начальное возбуждение UE
  - Тиристорные разрядники FV
  - Автомат гашения поля QE
- 
- Параметры возбуждения не зависят от процессов в энергосистеме



# Системы возбуждения крупных генераторов

## Системы бесщеточные диодные



- Питание ОВ сверхмощных генераторов (до 9 кА) от вращающегося якоря возбuditеля GE обращенной конструкции через вращающиеся выпрямители (нет скользящих контактов)
- ОВ возбuditеля – на статоре
- Регулирование возбуждения генератора G – путем регулирования тока ОВ возбuditеля GE
- Питание ОВ возбuditеля – через выпрямитель с AVR1 от сети (самовозбуждение), либо через выпрямитель с AVR2 от шин собственных нужд
- Вариант – возбуждение от подвозбудителя (синхронный генератор с ПМ на роторе)