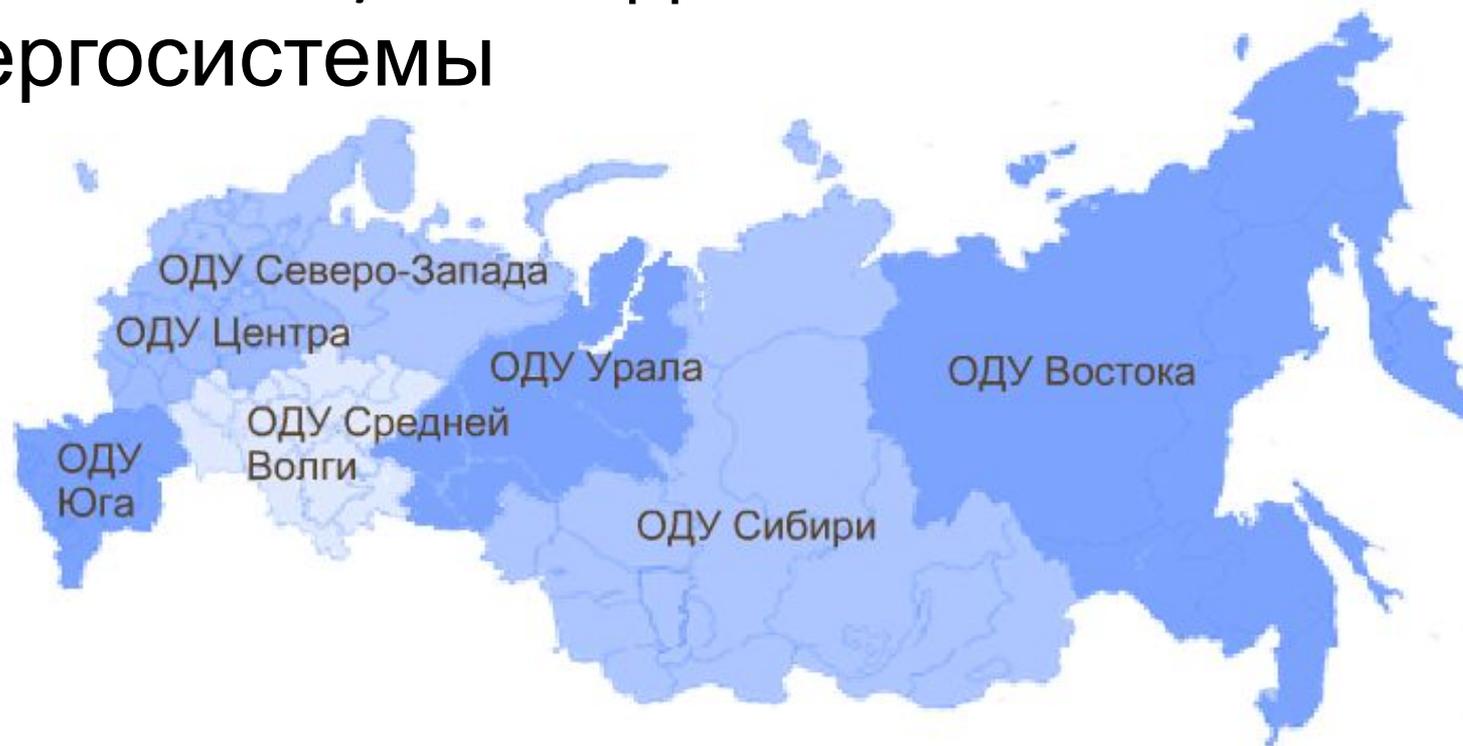


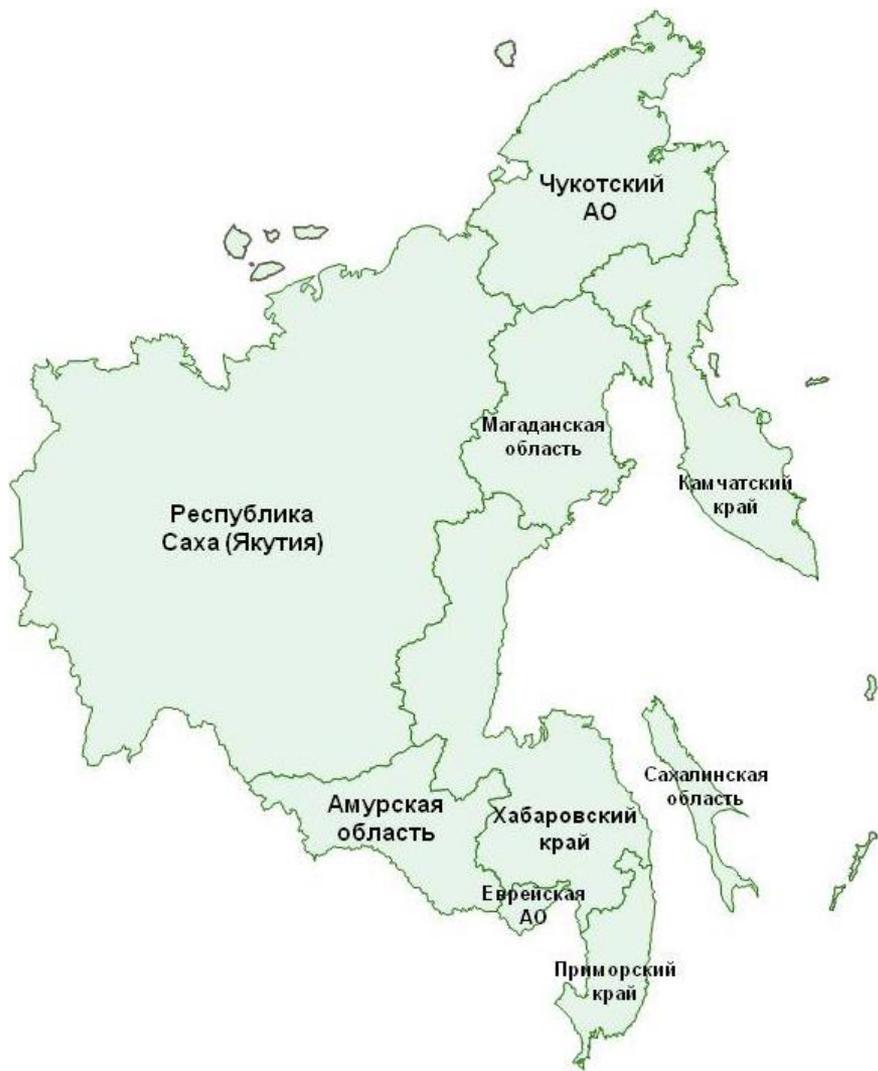
# Структура Единой Энергосистемы России

# Деление РФ по округам



# Объединенные диспетчерские управления/ Объединенные энергосистемы





Камчатский край	Изолированные ЭС	
Сахалинская область		
Магаданская область		
Чукотский АО		
Республика Саха (Якутия) (без южной части)	Амурская РЭС	
Республика Саха (Якутия) (южная часть)		
Амурская область	Амурское РДУ	
Приморский край		
Хабаровский край	Приморская РЭС	Приморское РДУ
Еврейская автономная область	Хабаровская РЭС	Хабаровское РДУ



Республика Алтай	Алтайская РЭС	Алтайское РДУ
Алтайский край		
Республика Бурятия	Бурятская РЭС	Бурятское РДУ
Красноярский край	Красноярская РЭС	Красноярское РДУ
Республика Тыва		
Республика Хакасия	Хакасская РЭС	Хакаское РДУ
Забайкальский край	Забайкальская РЭС	Забайкальское РДУ
Иркутская область	Иркутская РЭС	Иркутское РДУ
Кемеровская область	Кузбасская РЭС	Кузбасское РДУ
Новосибирская область	Новосибирская РЭС	Новосибирское РДУ
Омская область	Омская РЭС	Омское РДУ
Томская область		



Тюменская область	Тюменская РЭС	Тюменское РДУ
Ханты-Мансийский АО		
Ямало-Ненецкий АО		
Свердловская область	Свердловская РЭС	Свердловское РДУ
Курганская область	Курганская РЭС	
Челябинская область	Челябинская РЭС	Челябинское РДУ

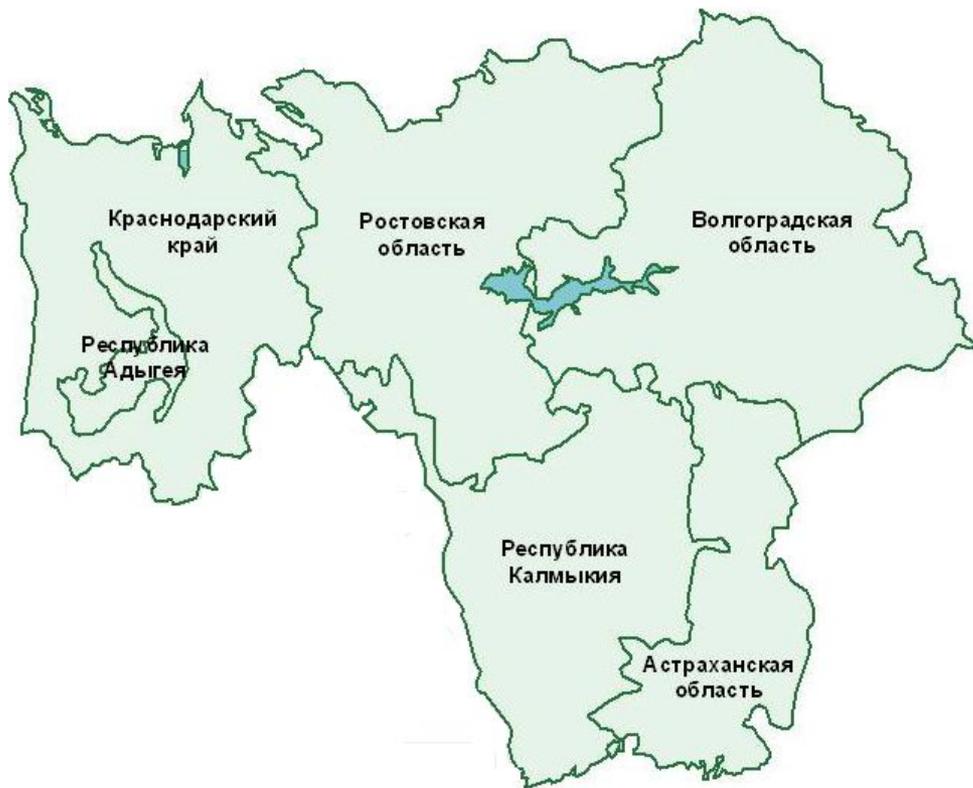


Респ. Башкортостан	Башкирская РЭС	Башкирское РДУ	ОЭС Урала /ОДУ Урала
Респ. Удмуртия	Удмуртская РЭС	Удмуртское РДУ	
Кировская обл.	Кировская РЭС	Кировское РДУ	
Оренбургская обл.	Оренбургская РЭС	Оренбургское РДУ	
Пермский край	Пермская РЭС	Пермское РДУ	
Респ. Мордовия	Мордовская РЭС	Пензенское РДУ	ОЭС Средней Волги /ОДУ Средней Волги
Пензенская обл.	Пензенская РЭС		
Самарская обл.	Самарская РЭС	Самарское РДУ	
Ульяновская обл.	Ульяновская РЭС		
Саратовская обл.	Саратовская РЭС	Саратовское РДУ	
Нижегородская обл.	Нижегородская РЭС	Нижегородское РДУ	
Чувашская Респ.	Чувашская РЭС		
Респ. Марий Эл	Марийская РЭС		
Респ. Татарстан	РЭС Татарстана	РДУ Татарстана	





Вологодская обл.	Вологодская РЭС	Вологодское РДУ	ОЭС Северо-Запада / ОДУ Северо-Запада
Санкт-Петербург	Ленинградская РЭС	Ленинградское РДУ	
Ленинградская обл.			
Мурманская обл.	Кольская РЭС (Мурманская)	Кольское РДУ	
Калининградская обл.	Калининградская РЭС	Балтийское РДУ	
Новгородская обл.	Новгородская РЭС	Новгородское РДУ	
Псковская обл.	Псковская РЭС		
Архангельская обл.	Архангельская РЭС	Архангельское РДУ	
Ненецкий АО			
Республика Карелия	Карельская РЭС	Карельское РДУ	
Республика Коми	РЭС Коми	РДУ Коми	



Республика Адыгея	Кубанская РЭС	Кубанское РДУ	ОЭС Юга / ОДУ Юга
Краснодарский край			
Астраханская область	Астраханская РЭС	Астраханское РДУ	
Ростовская область	Ростовская РЭС	Ростовское РДУ	
Республика Калмыкия	Калмыцкая РЭС		
Волгоградская область	Волгоградская РЭС	Волгоградское РДУ	

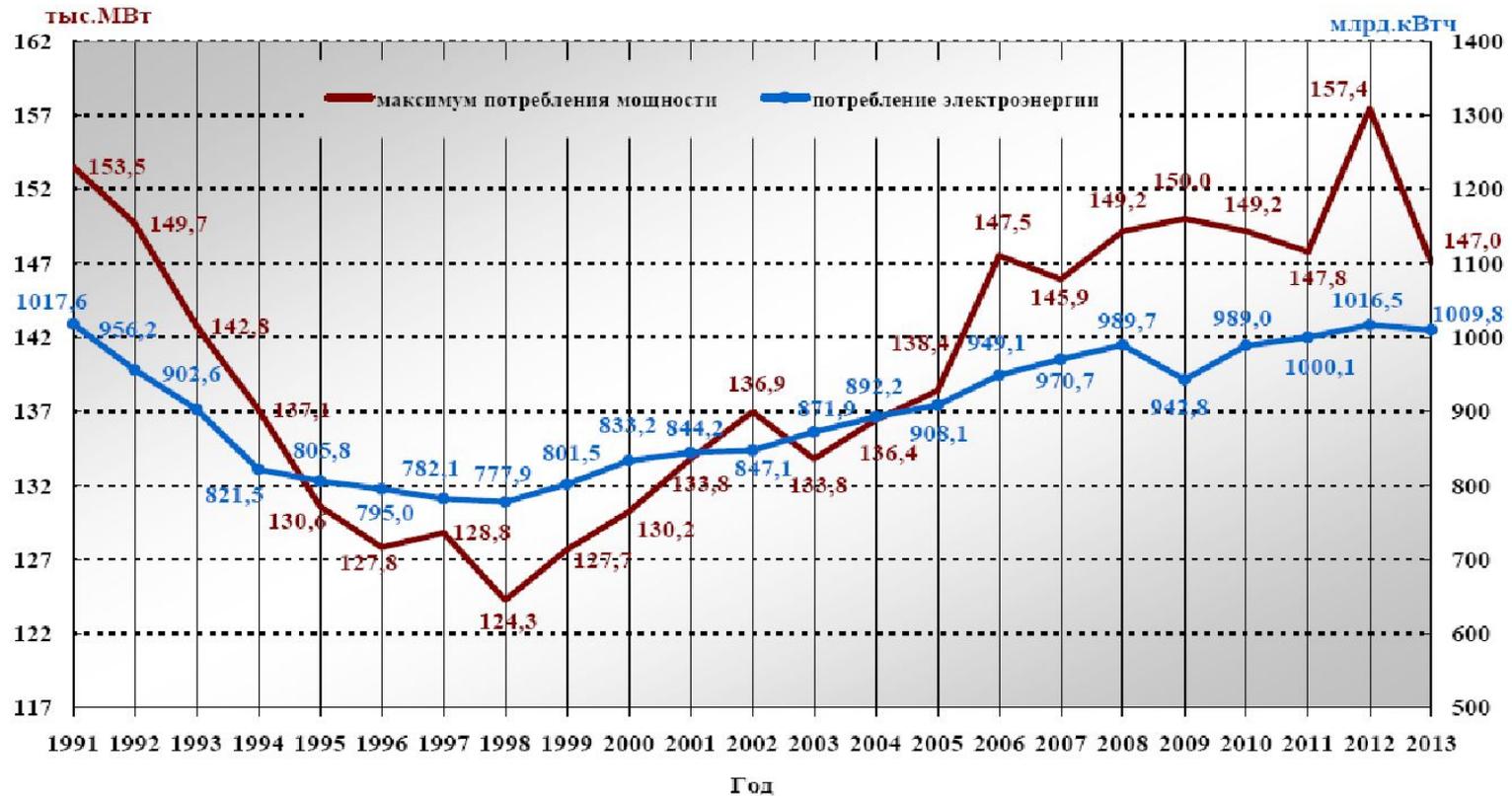


Республика Дагестан	Дагестанская РЭС	Дагестанское РДУ	ОЭС Юга /ОДУ Юга
Республика Ингушетия	Ингушская РЭС	Северокавказское РДУ	
Кабардино-Балкарская Республика	Кабардино-Балкарская РЭС		
Карачаево-Черкесская Республика	Карачаево-Черкесская РЭС		
Республика Северная Осетия-Алания	Северо-Осетинская РЭС		
Чеченская Республика	Чеченская РЭС		
Ставропольский край	Ставропольская РЭС		

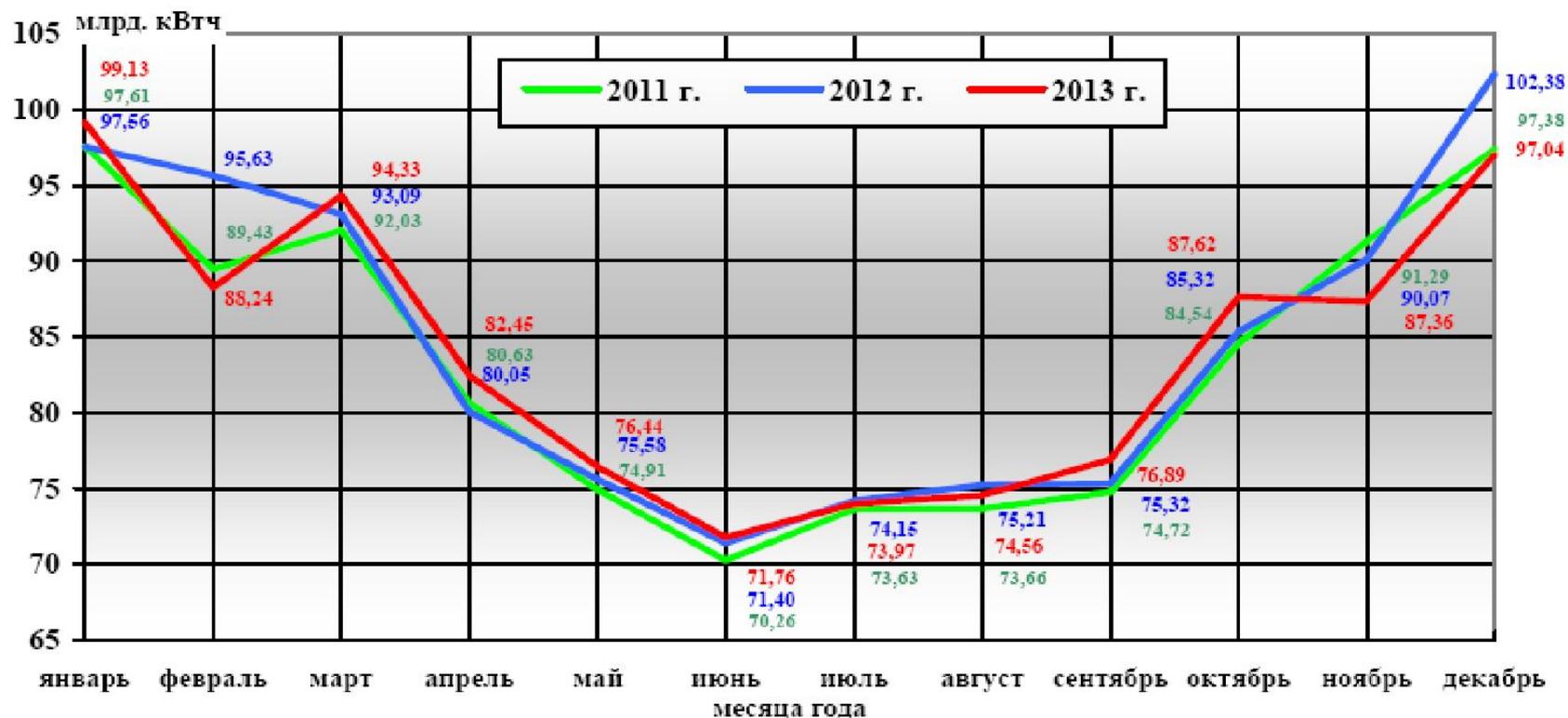
# Основные показатели работы ОЭС и ЕЭС России в 2013 году

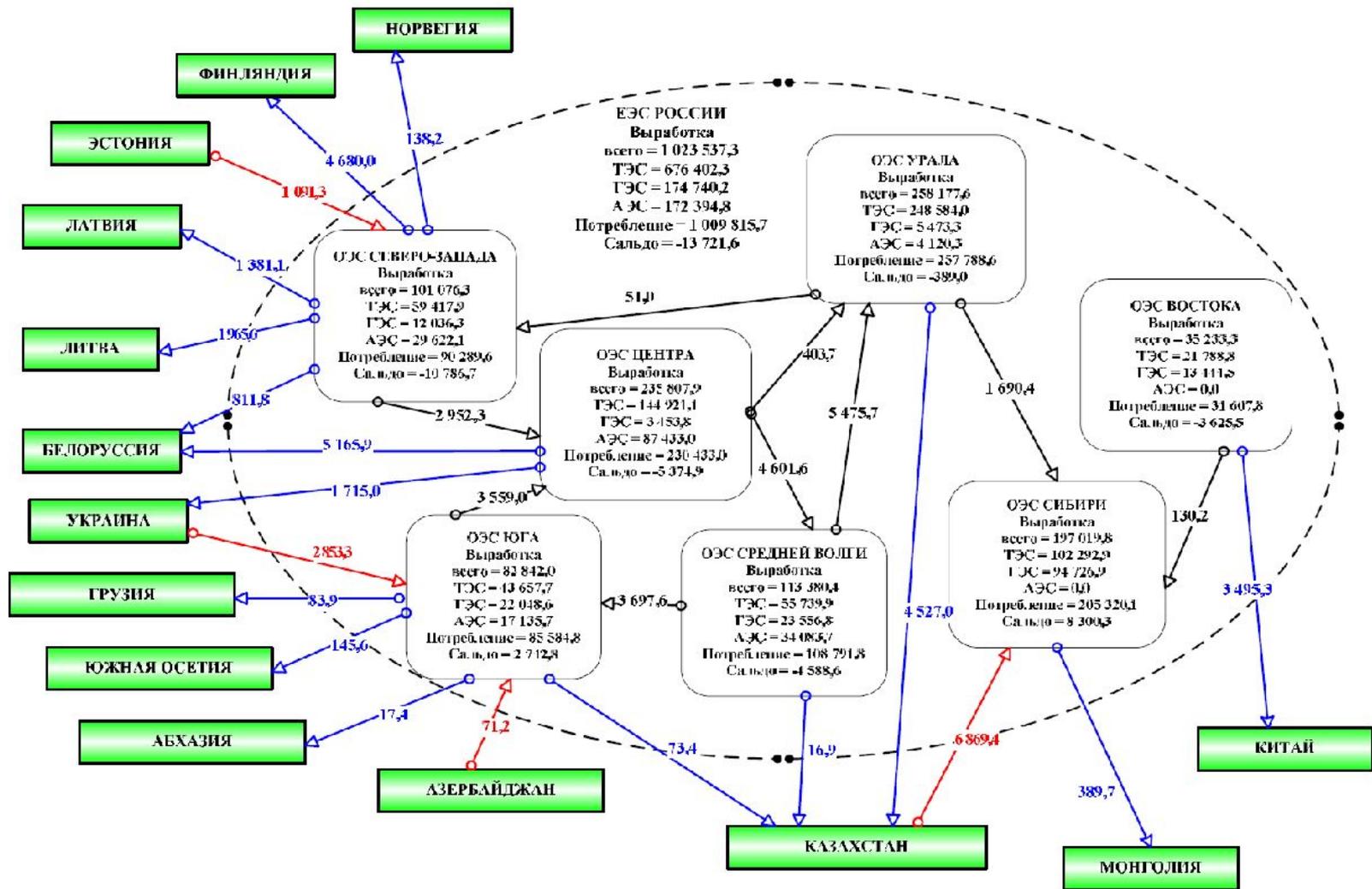
Показатель	Энергообъединения							
	ЕЭС России	в том числе:						
		Центра	Средней Волги	Урала	Северо- Запада	Юга	Сибири	Востока
Установленная мощность на 01.01.2014, МВт	226470,18	51681,75	26209,7	47587,47	23386,26	19302,35	49241,66	9060,99
± к 2012 г., %	1,5	0,8	1,0	2,9	-0,02	3,7	1,5	-0,002
Располагаемая мощность эл.станций на годовой максимум потребления 2013 г., МВт	20 8378	50 245	23 817	45 225	21 774	17 181	41 158	8 978
± к 2012 г., %	+0,1	-0,2	-0,1	-0,5	+0,4	-0,4	+1,2	-0,2
Нагрузка эл.станций на годовой максимум потребления 2013 г., МВт	149 253	35 959	17 239	36 661	15 256	12 090	26 964	5 085
± к 2012 г., %	-6,1	-8,5	-1,6	-5,4	-1,1	-10,1	-7,3	-6,9
Выработка ЭЭ, млрд. кВтч	1 023,5	235,8	113,4	258,1	101,1	82,8	197	35,2
± к 2012 г., %	-0,8	-3,0	3,0	-0,3	-3,7	4,1	-2,0	2,0
Потребление ЭЭ, млрд. кВтч	1 009,8	230,4	108,8	257,7	90,3	85,6	205,3	31,6
± к 2012 г., %	-0,6	0,5	0,3	0,3	-2,3	-1,1	-2,3	-0,2

# Динамика изменения потребления электроэнергии и мощности по ЕЭС России



# Динамика потребления электроэнергии а ЕЭС России по месяцам 2011-2013 годов



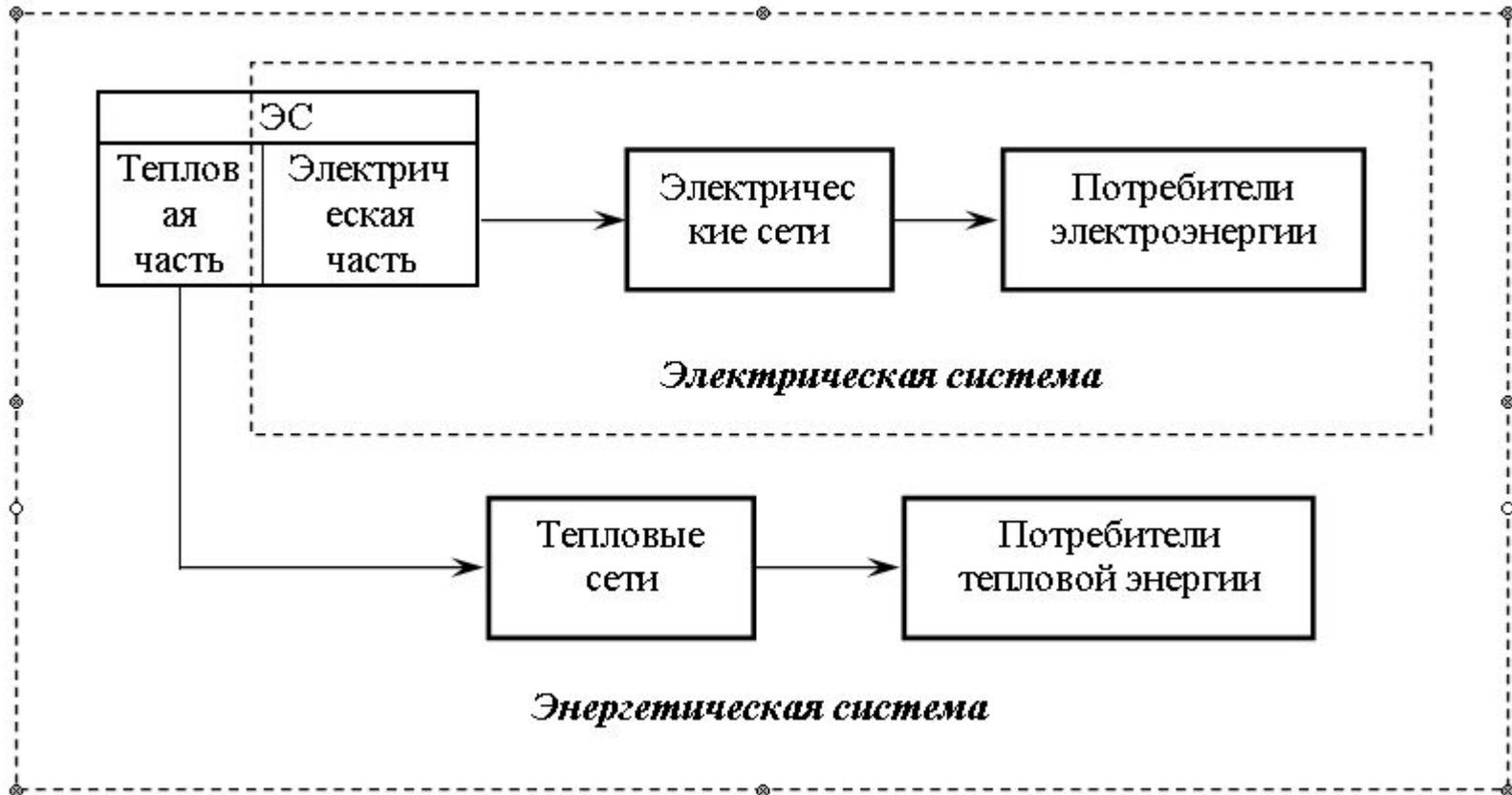


# Свойства электрической энергии

- легкость передачи на большие расстояния по сравнению с другими видами энергии;
- возможность преобразований в другие виды энергий с высоким к.п.д. независимо от ее количества. Поэтому нет необходимости в ее хранении;
- потребление электроэнергии может плавно меняться от нуля до максимума в зависимости от хода самого процесса производства или нагрузки рабочего механизма;
- поток электроэнергии можно представить непрерывным или периодическим в виде синусоиды.
- электроэнергия является наиболее чистым видом энергии и в наименьшей степени загрязняет окружающую среду;
- ориентация на использование трехфазного тока придала использованию электроэнергии однородность.

**Энергетическая система** – это совокупность всех звеньев цепочки получения, преобразования, распределения и использования тепловой и электрической энергии.

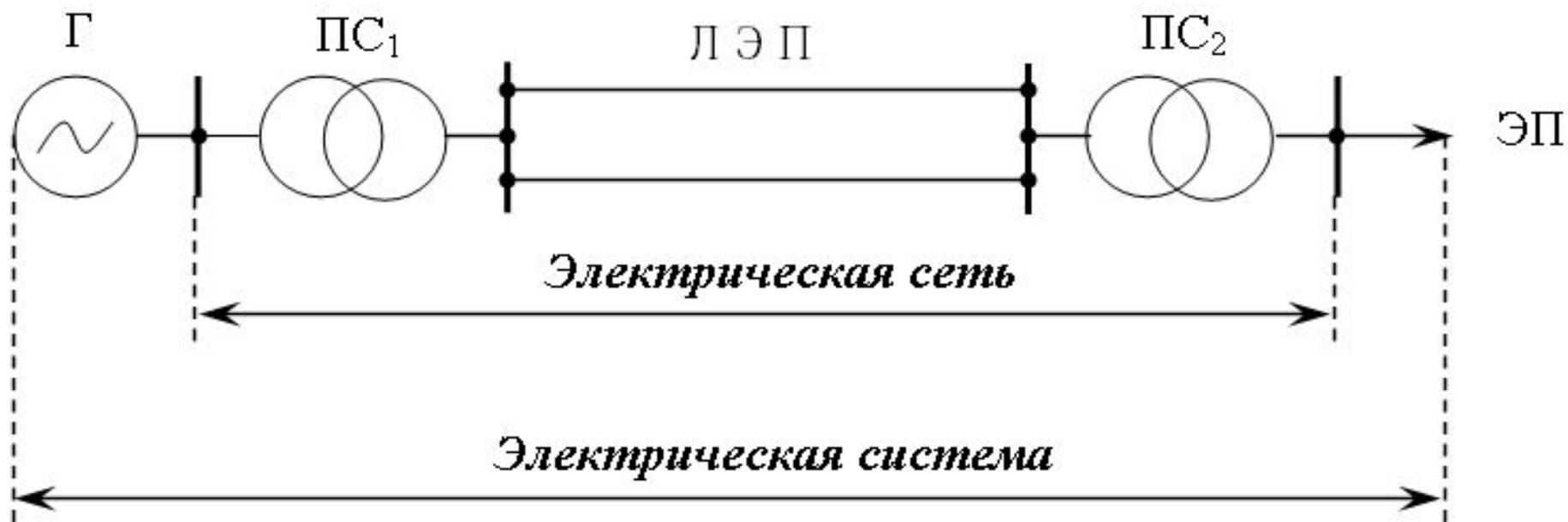
# Структура энергетической системы



# Особенности электрической системы

- постоянное совпадение по времени процесса выработки, передачи и потребления электроэнергии;
- непрерывность процесса выработки, передачи и потребления электроэнергии и необходимость в связи с этим непрерывного контроля за этим процессом. Процесс передачи электроэнергии по цепи “генератор – электроприемник” возможен лишь при надежной электрической и магнитной связи на всем протяжении этой цепи;
- быстрое протекание процессов, связанных с отказом различных элементов основной технологической цепочки;
- многообразие функциональных систем и устройств, которые осуществляют технологию производства электроэнергии; управление, регулирование и контроль. Необходимость их постоянного и четкого взаимодействия;
- удаленность энергетических объектов друг от друга;
- зависимость режимов работы электрических систем от различных случайных факторов (погодные условия, режим работы энергосистемы, потребителей);
- значительный объем работ по ремонтно-эксплуатационному обслуживанию большого количества разнотипного оборудования.

# Электрическая система



# Основные определения

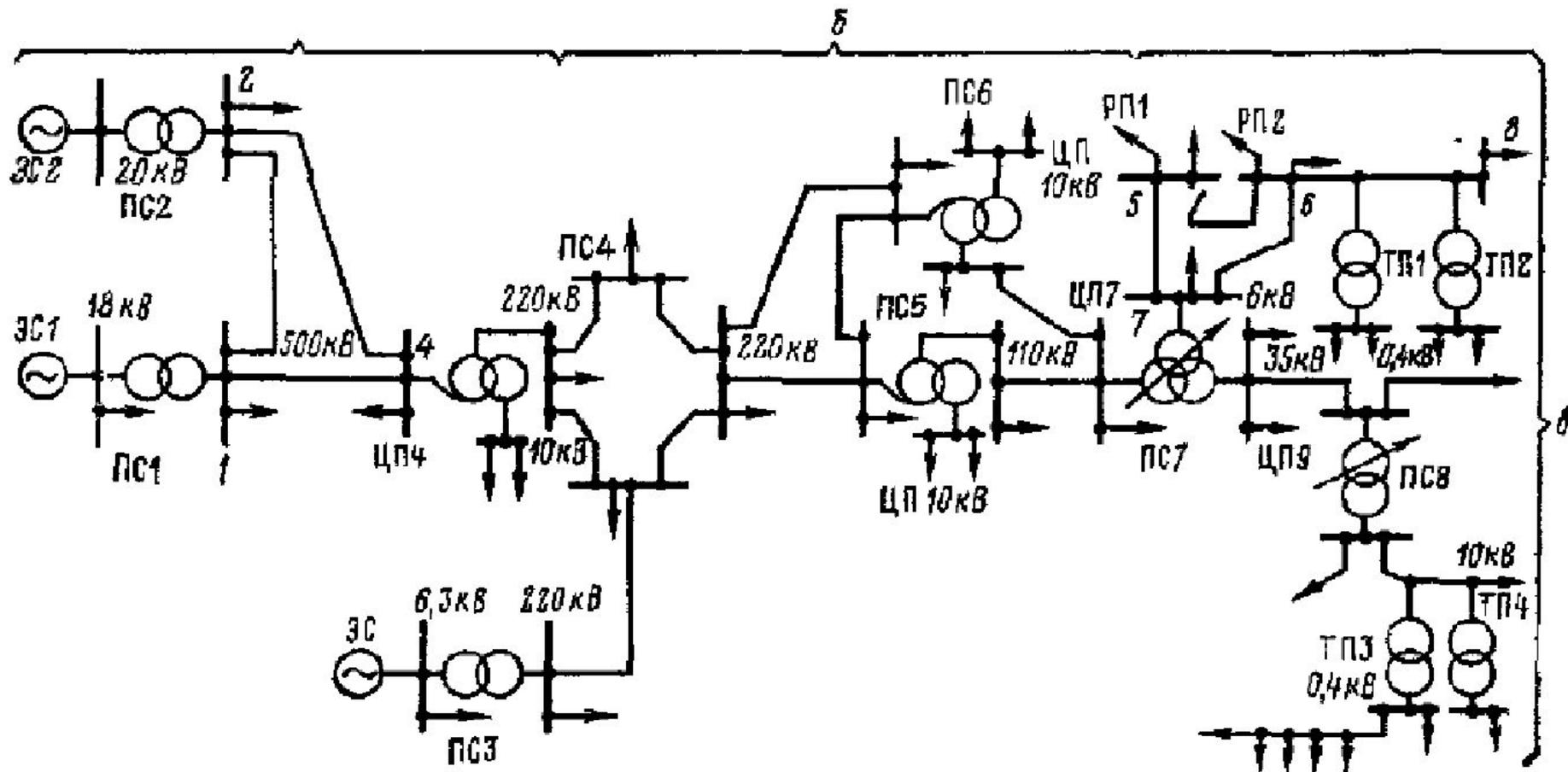
*Электрическая сеть* – это совокупность электроустановок для распределения электрической энергии. Она состоит из подстанций, распределительных устройств, воздушных и кабельных линий электропередач

*Линия электропередачи (ЛЭП)* – это электроустановка, предназначенная для передачи электроэнергии

Подстанции, на которых производится первичная трансформация электрической энергии называются *повышающими*. На другом конце электропередачи строится *понижительная* подстанция

Электроустановки, прием и распределение электроэнергии в которых выполняется на одном уровне напряжения, т.е. без трансформации, называются *распределительными пунктами*

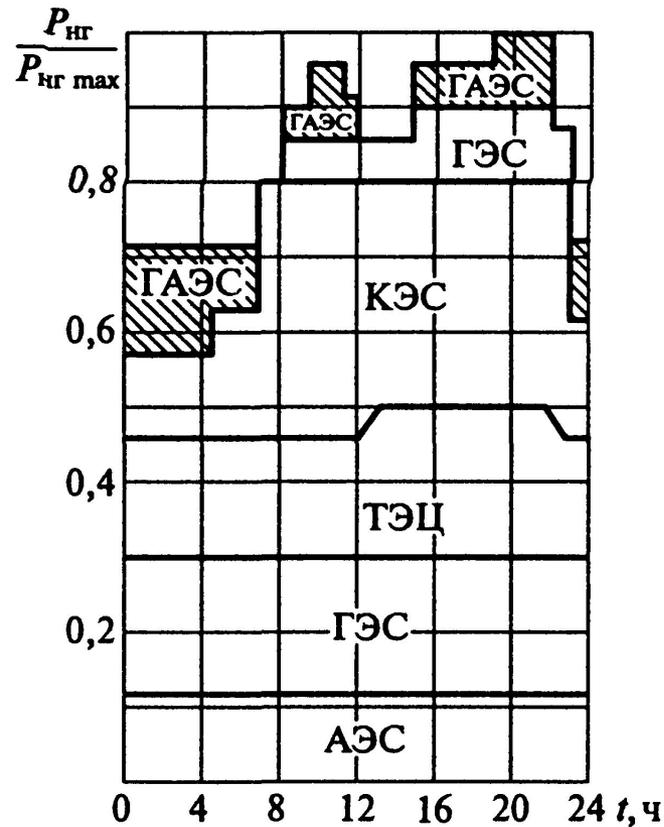
# Схема электрических сетей



Объединение отдельных районов в единую сеть для обеспечения взаимного обмена мощностями дает следующие преимущества:

- Снижение суммарного максимума
- Уменьшение суммарного резерва мощности (12 – 20% от суммарной мощности)
- Повышение надежности и качества энергоснабжения
- Повышение экономичности использования энергоресурсов
- Улучшение использования мощности ЭС (можно строить мощные агрегаты)
- Облегчается работа систем при сезонных изменениях нагрузки, при ремонтах и авариях

# Суточный график нагрузки энергосистемы



# Типы электрических станций

# Классификация электростанций

Традиционные  
виды электростанций

Тепловые  
электростанции  
(ТЭС)

Гидроэлектростанции  
(ГЭС)

Атомные  
электростанции  
(АЭС)

Виды  
электростанций

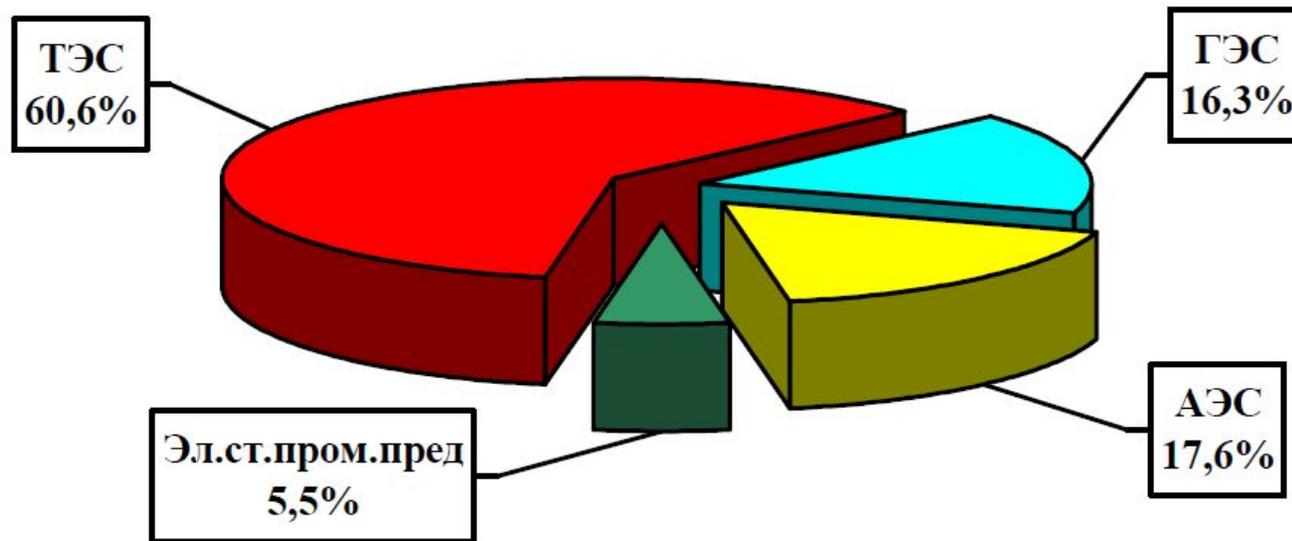
Альтернативные  
виды электростанций

Ветряные  
электростанции  
и  
(ВЭС)

Геотермальные  
электростанции

Солнечные  
электростанции

# Структура выработки электроэнергии по типам электрических станций



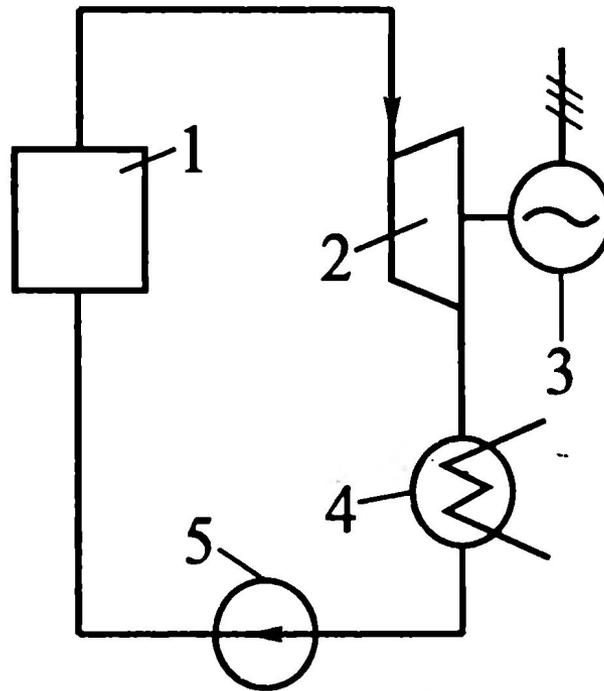
# Циклы тепловые электростанции (ТЭС)

**Тепловая электростанция** — электростанция, вырабатывающая электрическую энергию за счет преобразования химической энергии топлива в механическую энергию вращения вала электрогенератора.

# Виды тепловых электрических станций

- Конденсационные электрические станции (КЭС)
- Теплофикационные электрические станции (Теплоэлектроцентрали - ТЭЦ)
- Газотурбинные электрические станции (ГТЭС)
- Государственные районные электростанции (ГРЭС)

# Упрощенная схема паротурбинной электростанции



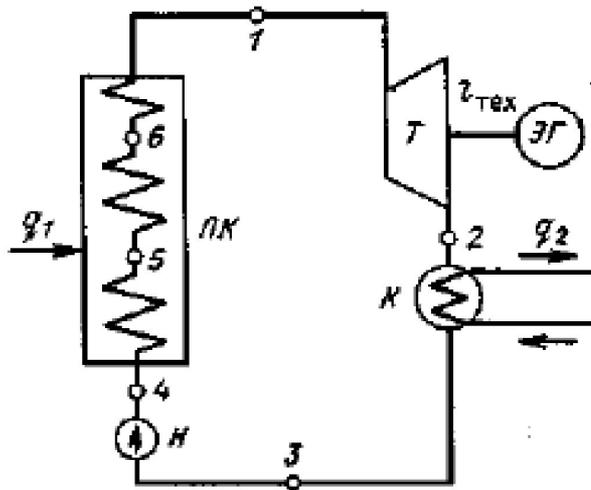
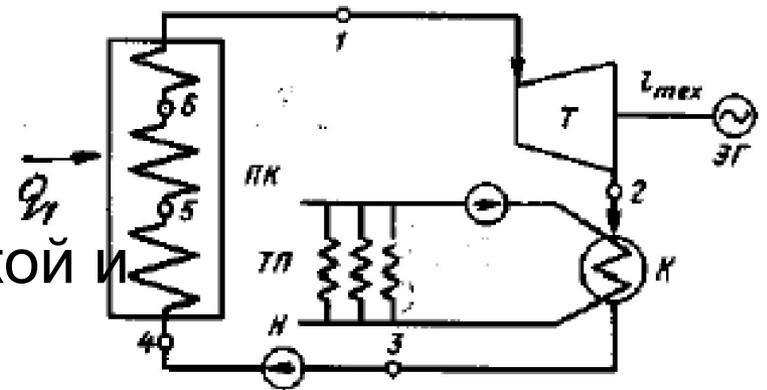
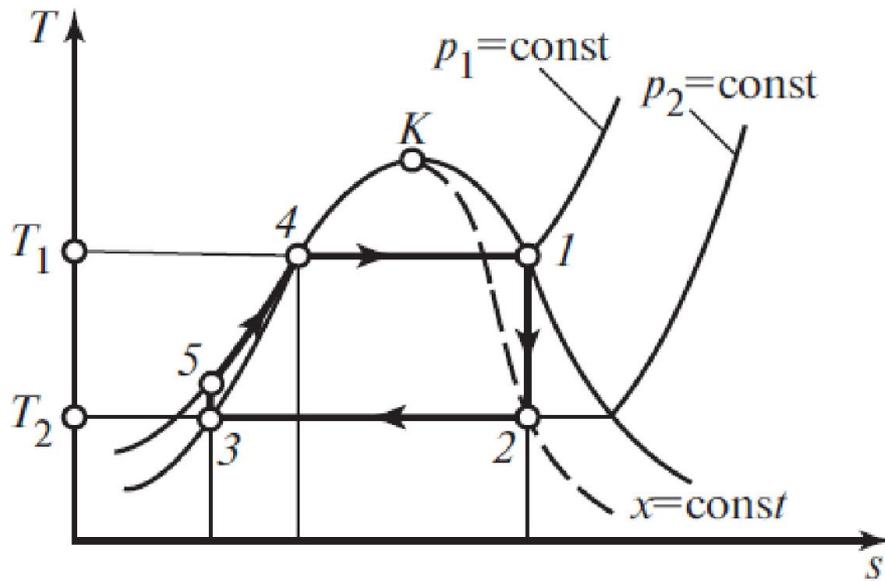


Схема паросиловой установки для выработки электроэнергии (КЭС)

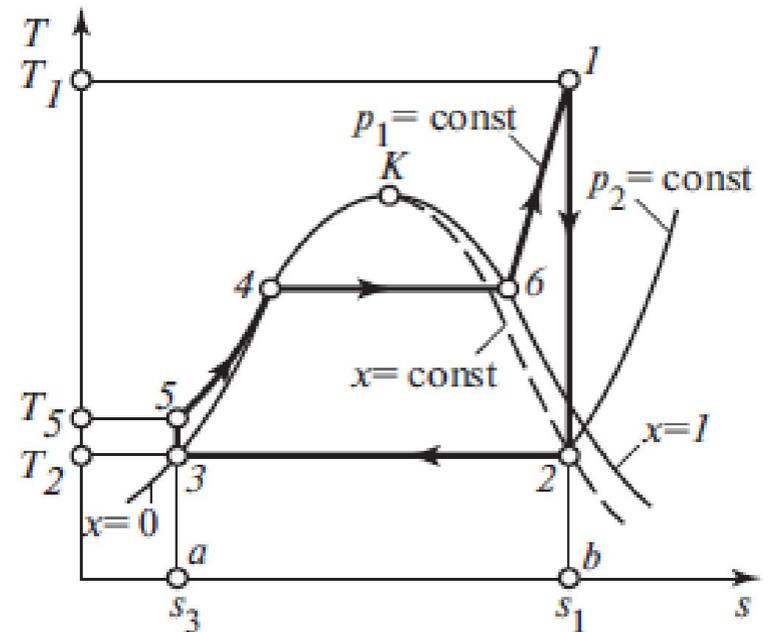
Схема паросиловой установки для совместной выработки электрической и тепловой энергии



# Цикл Ренкина

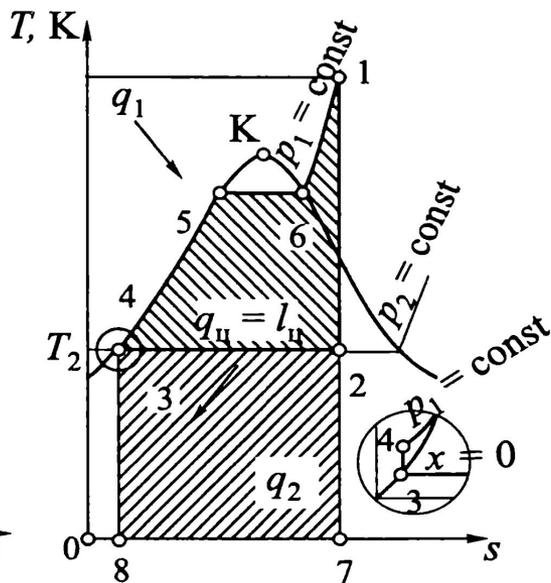
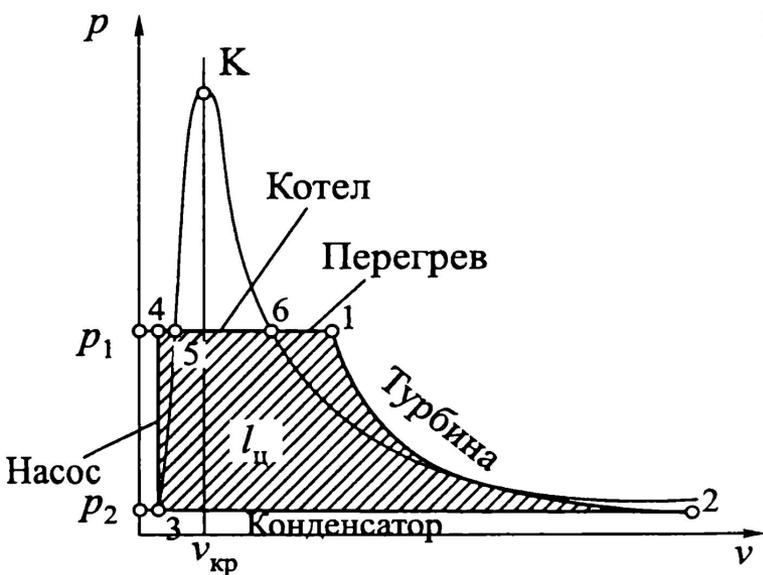


Без перегрева пара



С перегревом пара

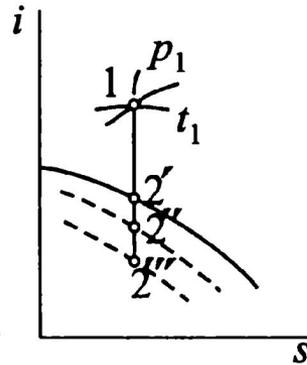
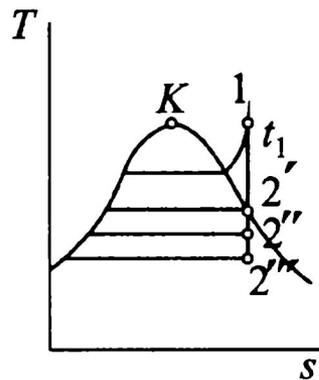
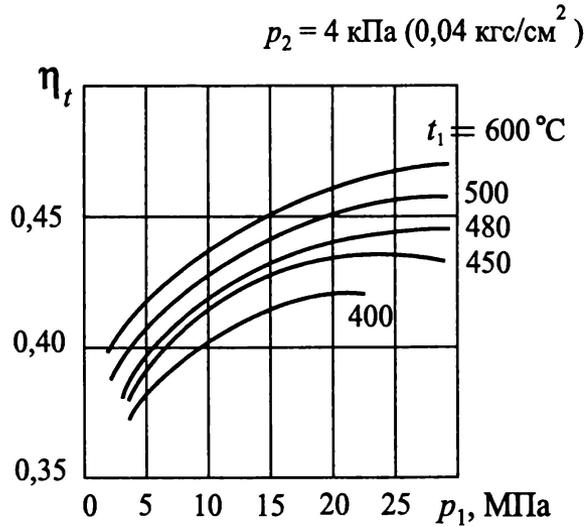
# Цикл Ренкина на перегретом паре в p-s и T-s диаграммах



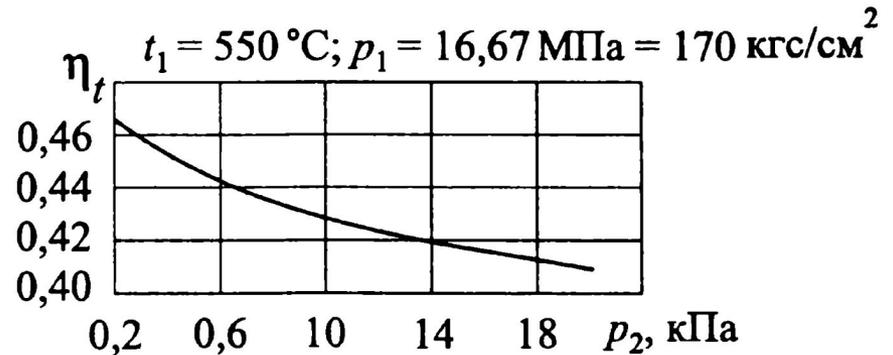
$$l_{\text{ц}}^{\text{пол}} = q_1 - q_2 = l_{\text{а}}^{\text{T}} - l_{\text{а}}^{\text{H}}$$

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{l_{\text{а}}^{\text{T}} - l_{\text{а}}^{\text{H}}}{q_1}$$

# Факторы влияющие на экономичность цикла Ренкина



*a*



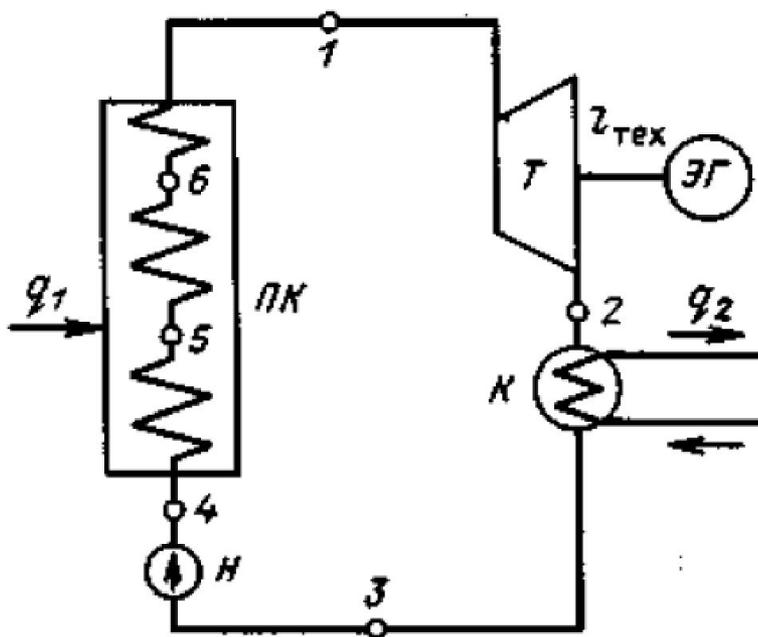
*б*



# Атомная электростанция (АЭС)

**Атомные электростанции (АЭС) -**  
предназначены для выработки  
электрической энергии путём  
использования энергии, выделяемой  
при контролируемой ядерной реакции

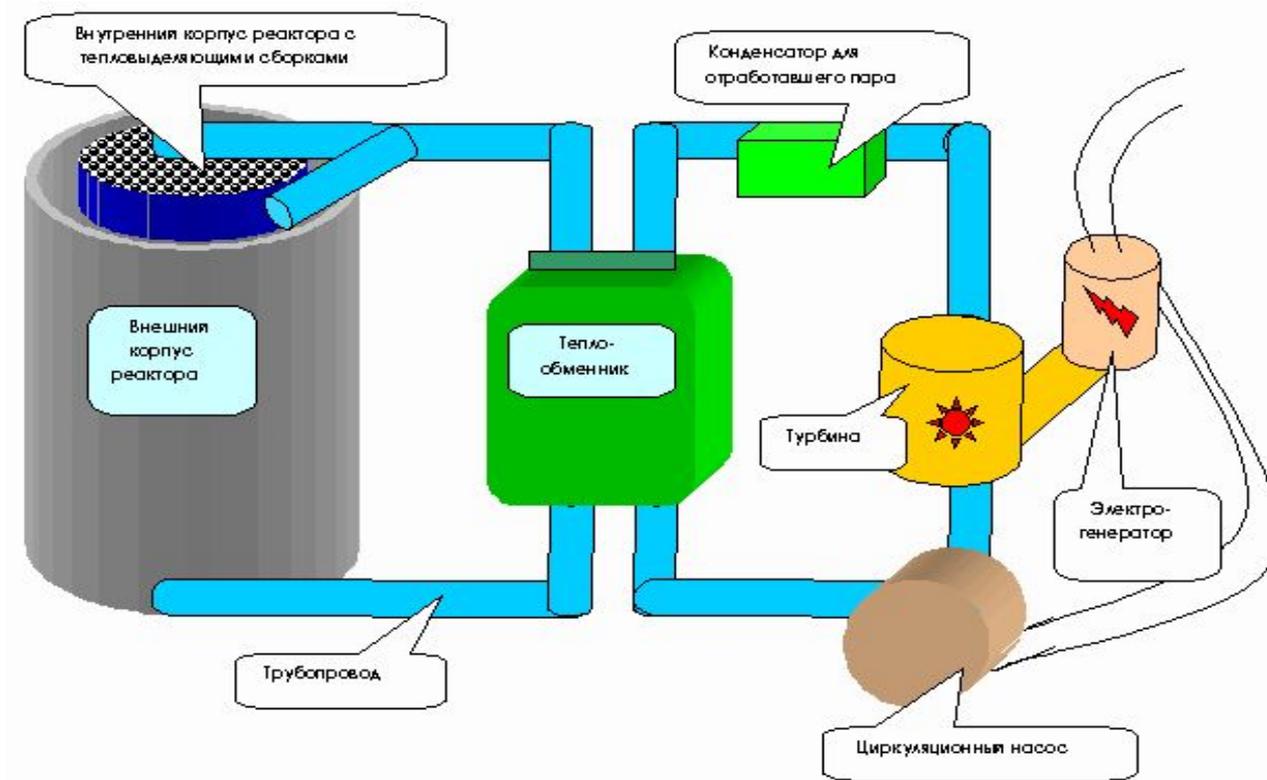
# Схема паросиловой установки для выработки электроэнергии на АЭС



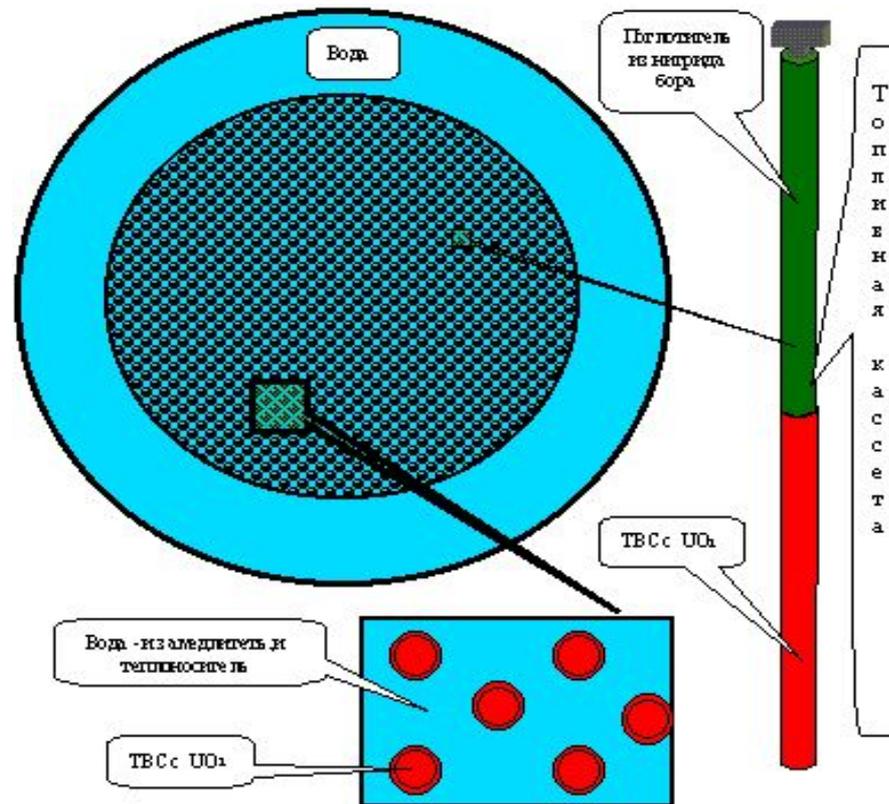
# Классификация атомных энергетических реакторов АЭС

- Реактор ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор
- Реактор РБМК – реактор большой мощности канальный
- Реактор БН – реактор на быстрых нейтронах

# Схема АЭС с реактором ВВЭР



# Строение активной зоны реактора типа ВВЭР



# Двухконтурные АЭС

## Преимущества:

- Рабочее тело нерадиоактивно;
- Удовлетворительные динамические свойства;

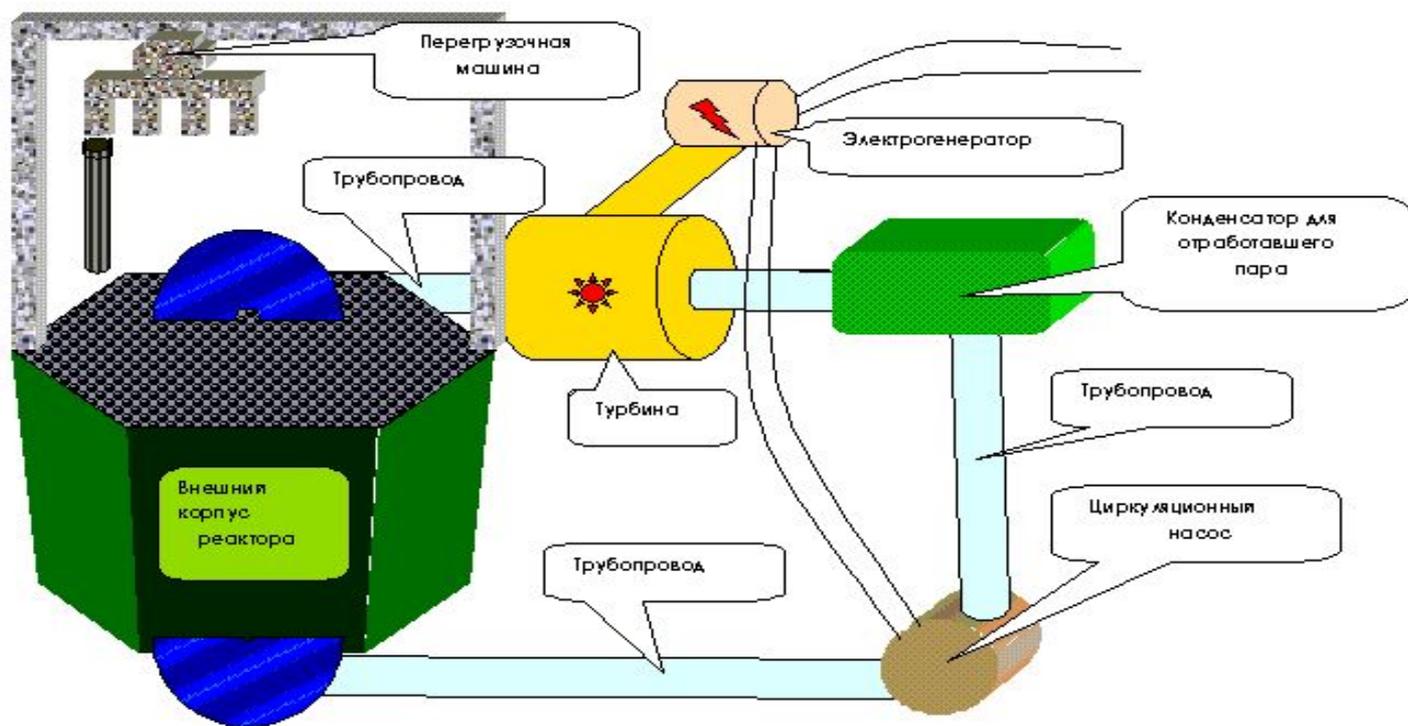
## Недостатки:

- Сложность схемы;
- Большие капитальные затраты;
- Низкая тепловая экономичность.

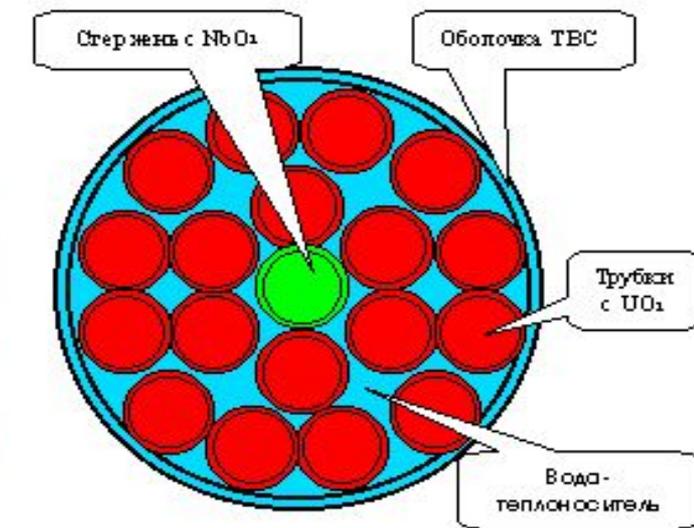
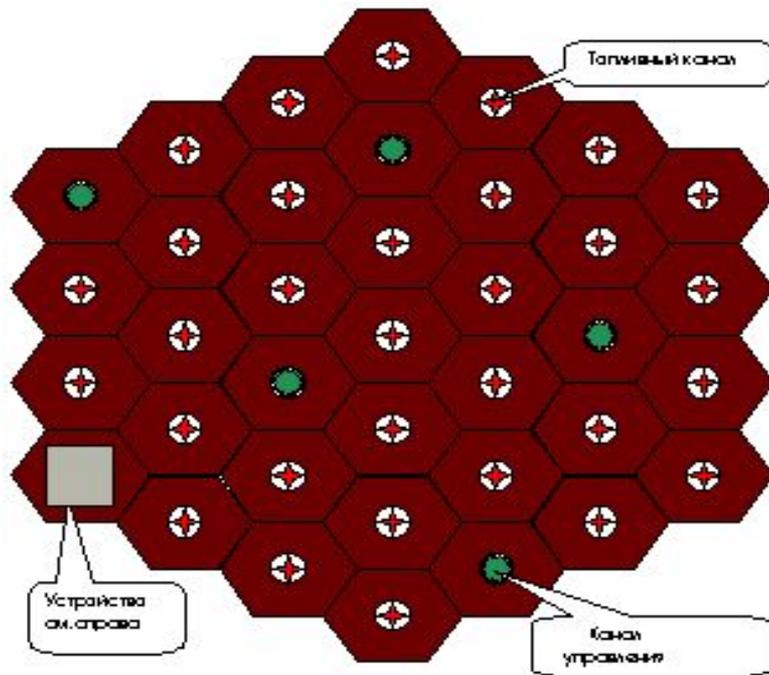
# Калининская АЭС



# Схема АЭС с реактором РБМК



# Активная зона реактора РБМК



Слева - фрагмент активной зоны. Вверху - одна топливная кассета. Вид сверху.

# Одноконтурные АЭС

## Преимущества:

- Простота схемы;

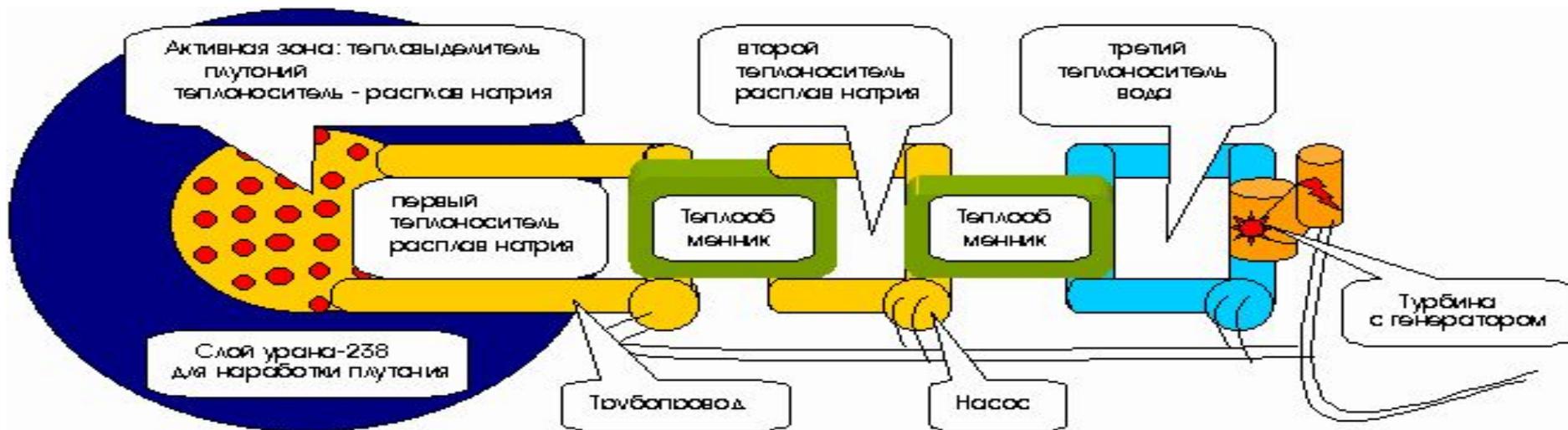
## Недостатки:

- радиоактивность рабочего тела;
- низкая тепловая экономичность;
- неудачные динамические свойства.

# Курская АЭС



# Схема АЭС с реактором БН



# Трехконтурные АЭС

## Преимущества:

- рабочее тело нерадиоактивно;
- Хорошие динамические свойства;
- Высокая тепловая экономичность.

## Недостатки:

- Сложность схемы;
- Большие капитальные затраты.

# Белоярская АЭС



# План размещения АЭС России



# Гидроэлектростанция (ГЭС)

**Гидроэлектрическая станция (ГЭС) —**  
электростанция, в качестве источника энергии  
использующая энергию водного потока.

# Схема работы ГЭС

Схема плотины гидроэлектростанции



# Классификация ГЭС

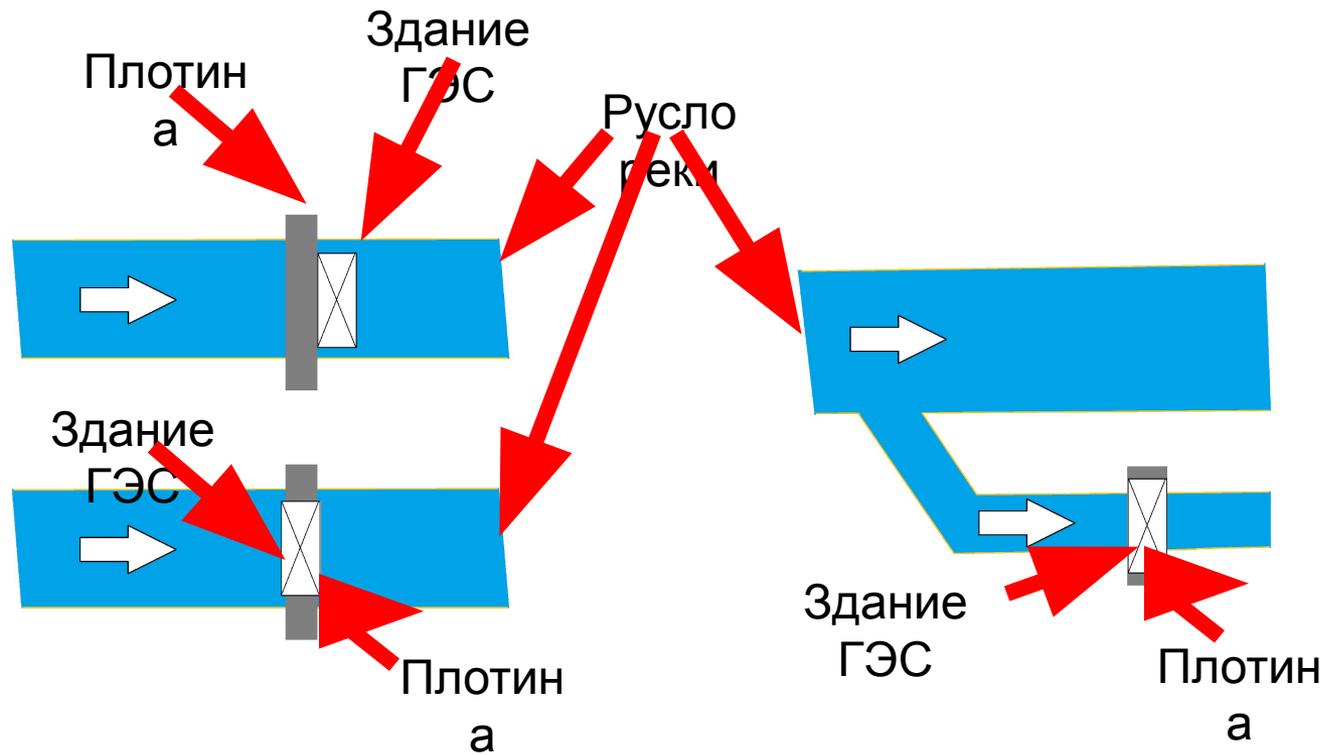
## 1. По уровню напора

- высоконапорные (более 60 м)
- средненапорные (25 - 60 м)
- низконапорные (3 – 25 м)

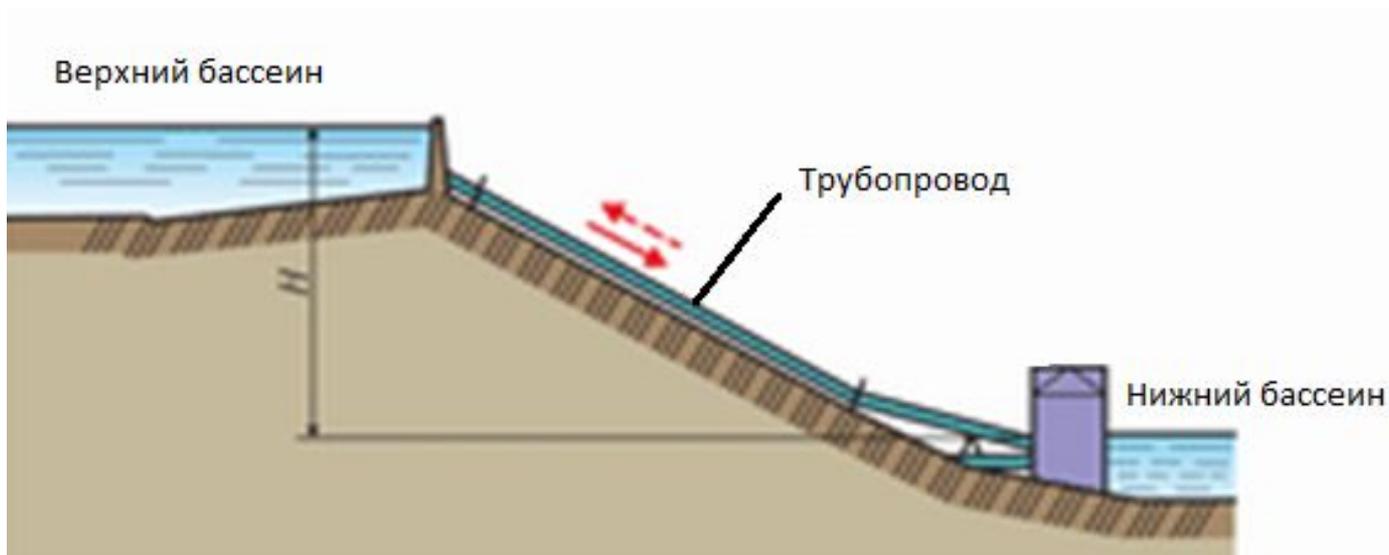
## 2. По принципу использования ресурсов

- плотинные
- приплотинные
- деривационные
- гидроаккумулирующие

# Схемы ГЭС



# Схема ГАЭС



# Преимущества ГЭС

- Высокая эффективность использования гидроэнергии благодаря большим значениям КПД турбин и генераторов.
- Себестоимость вырабатываемой на ГЭС энергии в 5-10 раз меньше, чем на тепловых станциях
- Высокая маневренность гидроагрегатов ГЭС
- Высокая степень автоматизации процесса выработки энергии
- Более высокая надежность в эксплуатации по сравнению с тепловыми станциями и более высокая надежность электроснабжения потребителей
- Гидроэлектростанции используют возобновляемый источник энергии

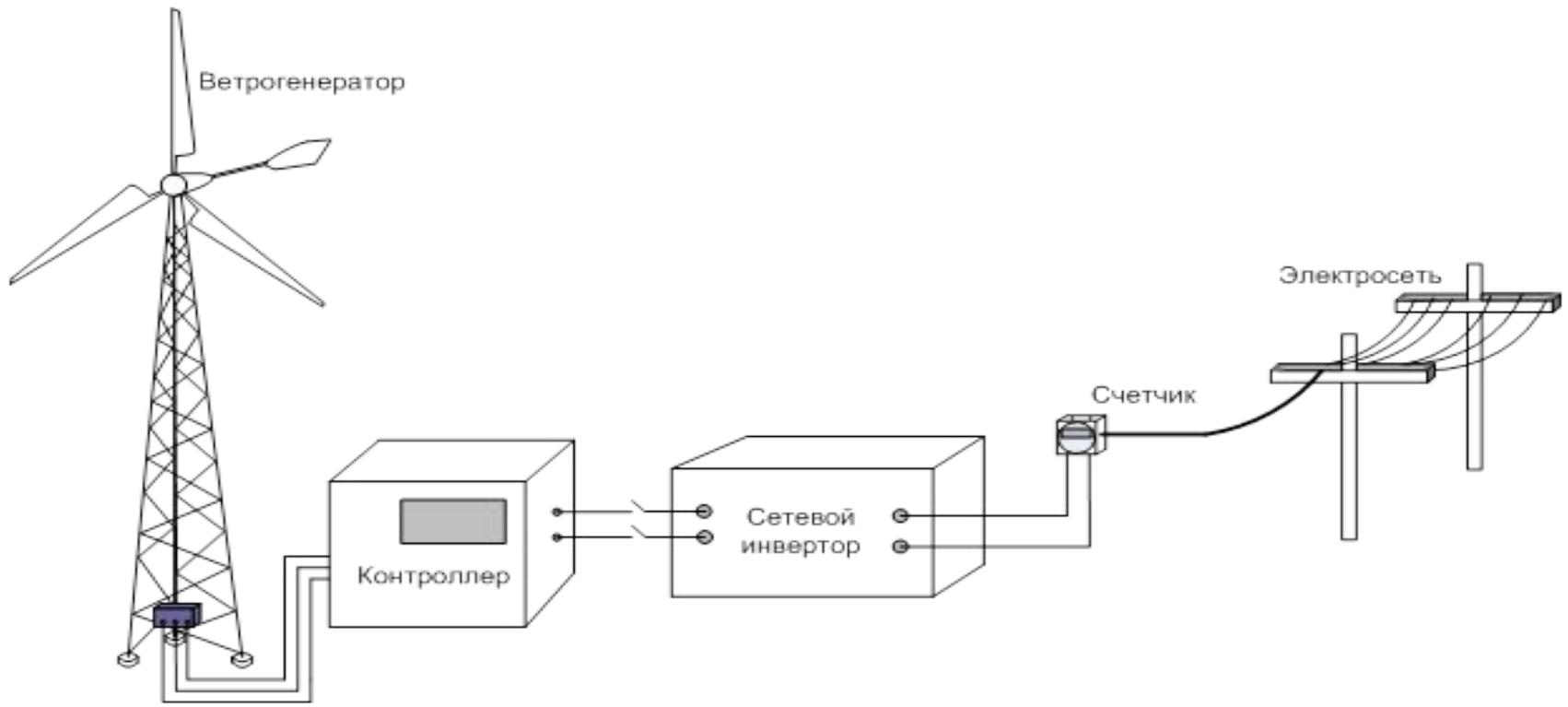
# Крупнейшие электростанции России

Наименование	Установленная мощность, МВт	Количество и мощность турбоагрегатов, реакторов		Топливо, вид агрегата
		шт	МВт	
Саяно-Шушенская ГЭС	6400	10	640	
Красноярская ГЭС	6000	12	500	
Сургутская ГРЭС-2	4800	6	800	газ
Братская ГЭС	4500	20	225	
Балаковская АЭС	4000	4	1000	ВВЭР -1000
Курская АЭС	4000	4	1000	РБМК -1000
Ленинградская АЭС	4000	4	1000	РБМК -1000
Усть - Илимская ГЭС	3840	18	240	
Рефтинская ГРЭС	3800	6	300	уголь
		4	500	

# Ветряная электростанция

**Ветроэлектростанции** — несколько ветрогенераторов, собранных в одном, или нескольких местах. Крупные ветряные электростанции могут состоять из 100 и более ветрогенераторов

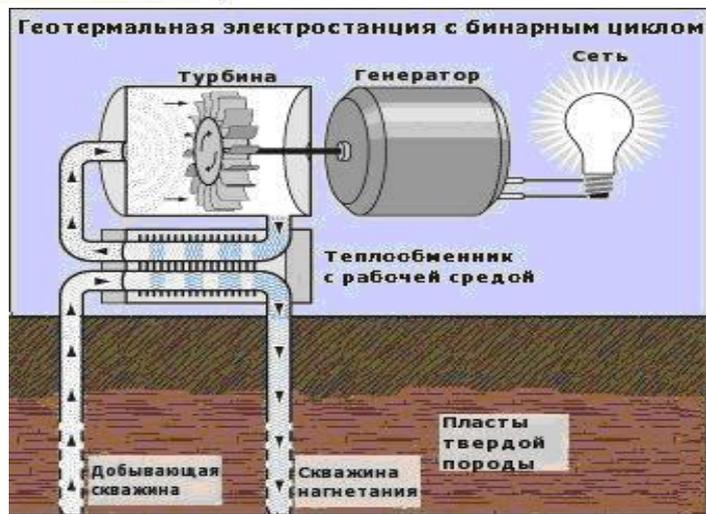
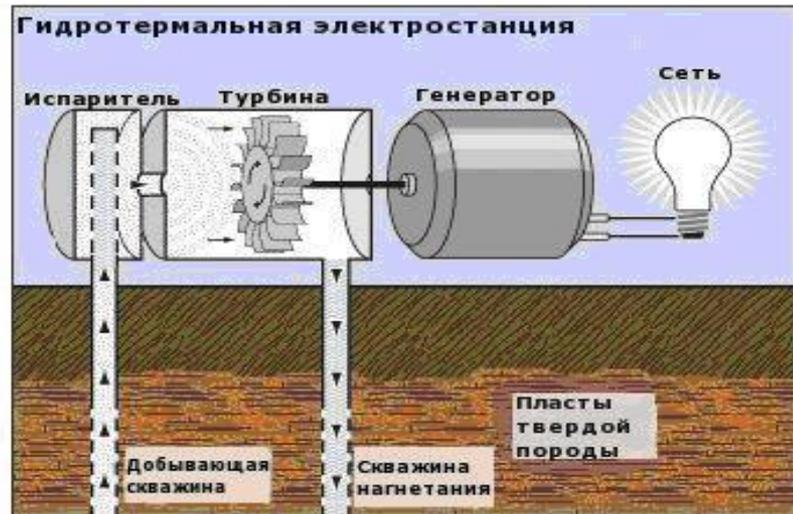
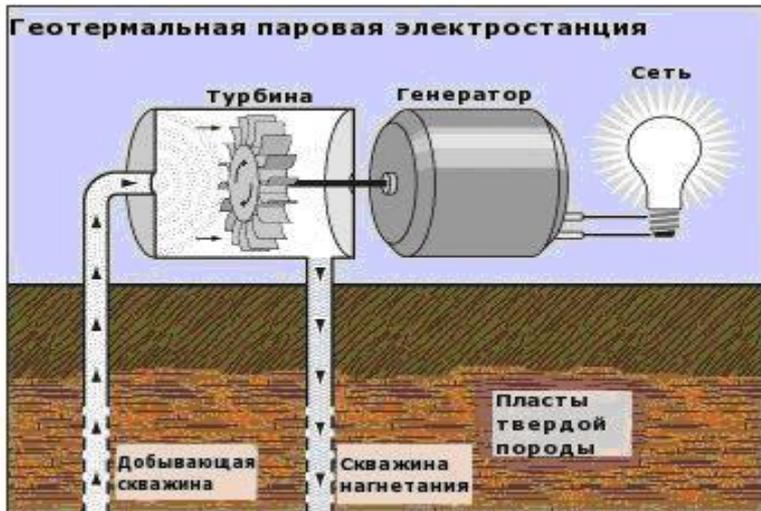
# Схема ветряной электростанции





# **Геотермальные электростанции (ГеоТЭС)**

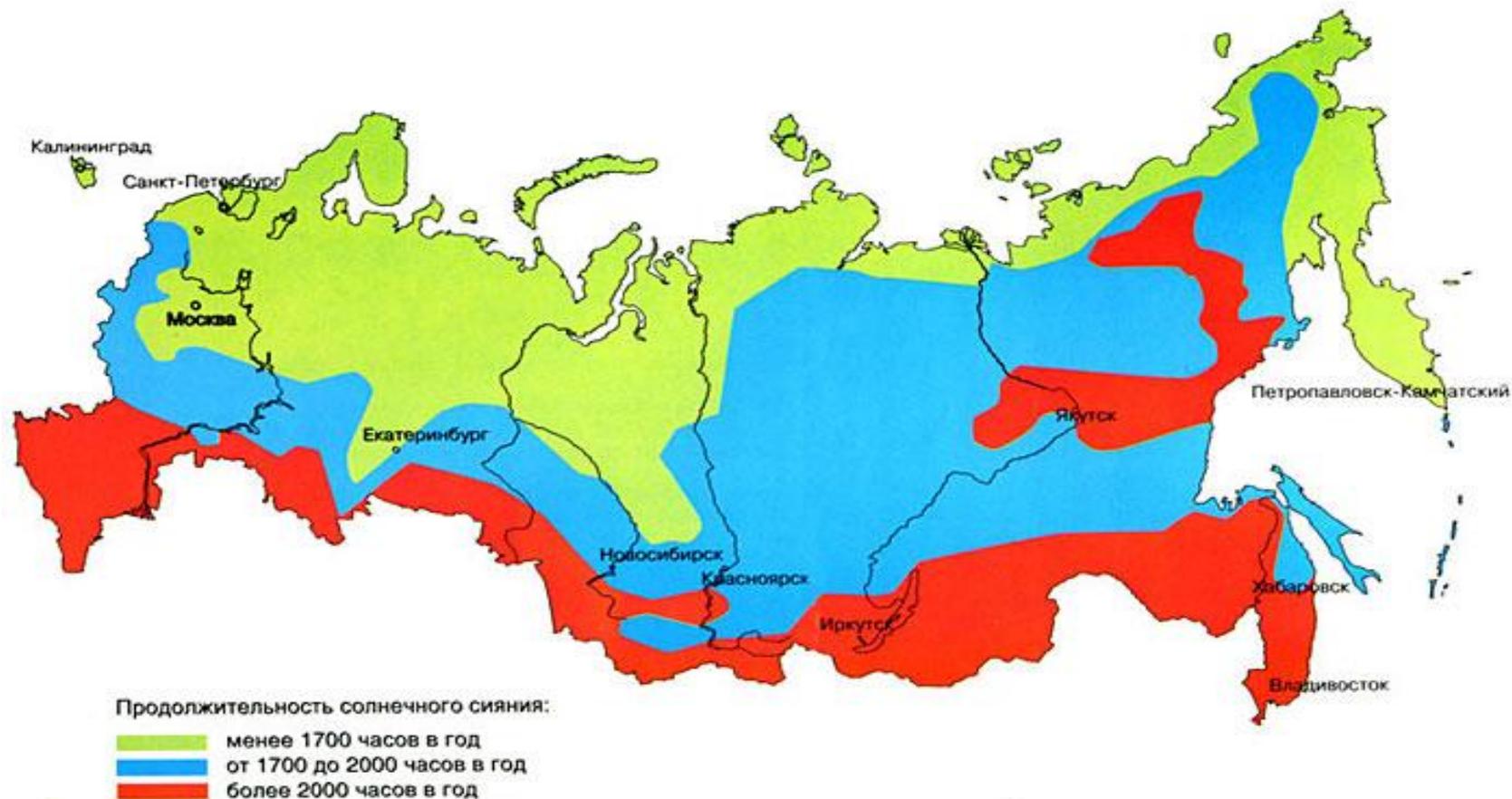
**Геотермальные электростанции –  
электростанции вырабатывающие  
электрическую энергию из тепловой  
энергии подземных источников**



# **Солнечные электростанции**

**Солнечные электростанции — инженерные сооружения, служащие для преобразования солнечной радиации в электрическую энергию**

# Карта солнечной инсоляции



# Схема солнечной электростанции



Номинальные напряжения (до 1000 В) переменного трехфазного тока, В

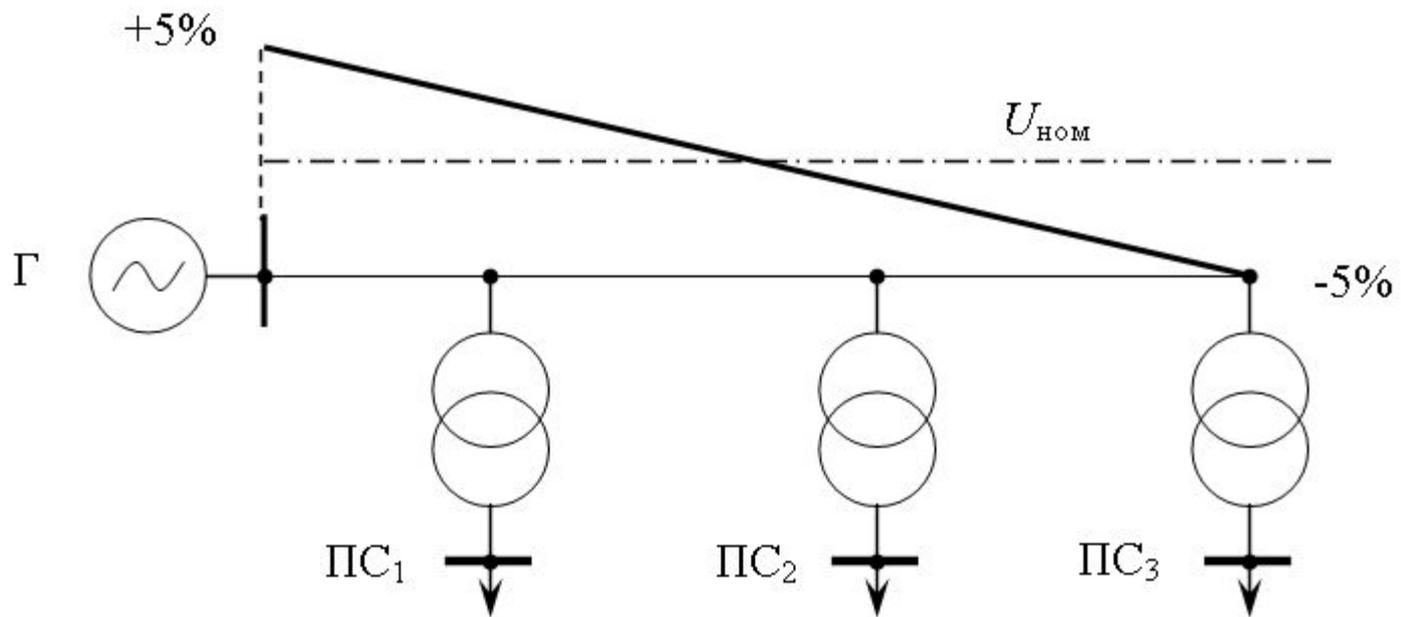
Источники и преобразователи	42	230	400	690
Сети и электроприемники	40	220	380	660

Номинальные напряжения (более 1000 В) переменного трехфазного тока, кВ

Сети и приемники	Генераторы и СК	Трансформаторы и автотрансформаторы			
		без РПН		с РПН	
		первичные обмотки	вторичные обмотки	первичные обмотки	вторичные обмотки
(3)	(3,15)	(3 и 3,15)	(3,15 и 3,3)	–	(3,15)
6	6,3	6; 6,3	6,3; 6,6	6; 6,3	6,3; 6,6
10	10,5	10; 10,5	10,5; 11	10; 10,5	10,5; 11
20	21	20	22	20; 21	22
35	–	35	38,5	35; 36,75	38,5
110	–	–	121	110; 115	115; 121
(150)	–	–	(165)	(158)	(158)
220	–	–	242	220; 230	230; 242
330	–	330	347	330	330
500	–	500	525	500	–
750	–	750	787	750	–
1150	–	–	–	1150	–

# Номинальное напряжение

$$U_{\text{НОМ}} = \frac{U_1 + U_2}{2}.$$



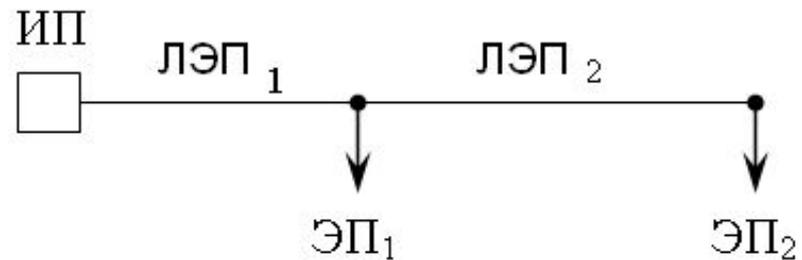
# Классификация электрических сетей

- по роду тока;
- по номинальному напряжению;
- по конструктивному исполнению;
- по расположению;
- по конфигурации;
- по степени резервирования;
- по выполняемым функциям;
- по характеру потребителей;
- по назначению в схеме электроснабжения;
- по режиму работы нейтрали.

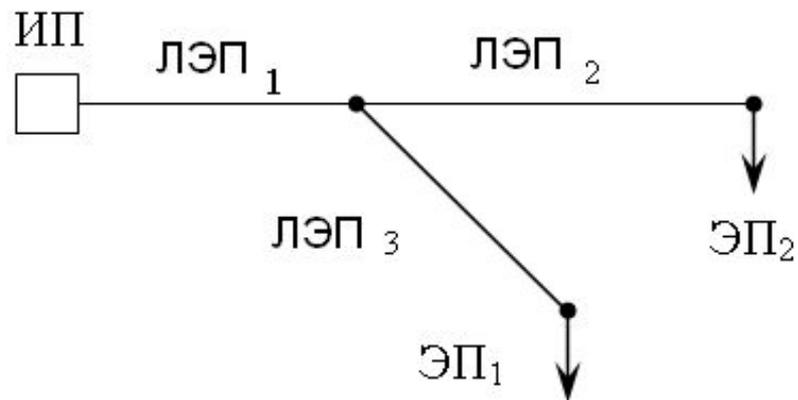
# Разомкнутые сети



а)

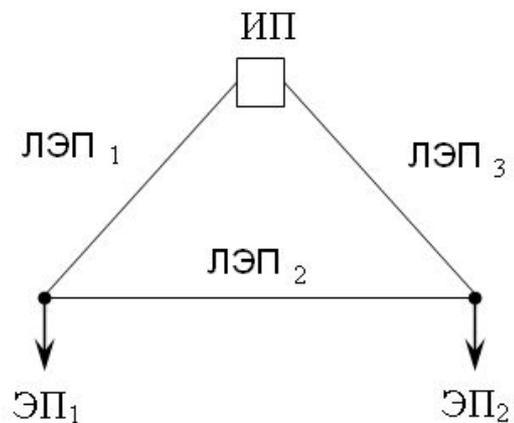


б)

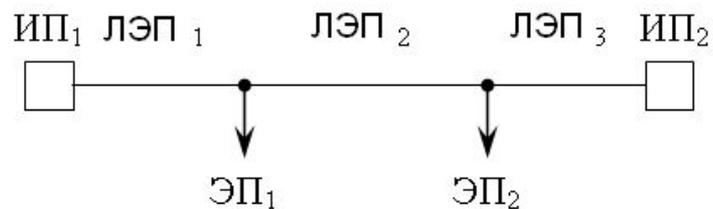


в)

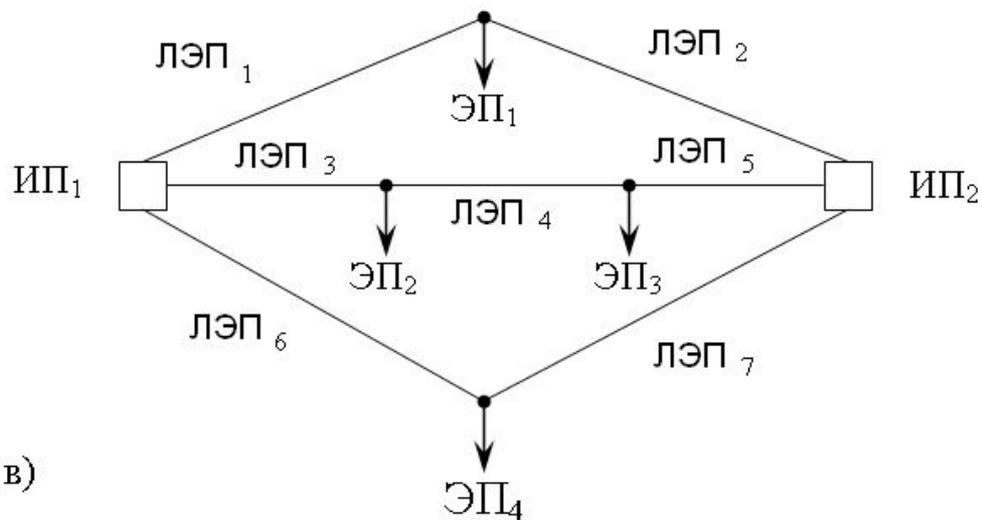
# Замкнутые сети



а)

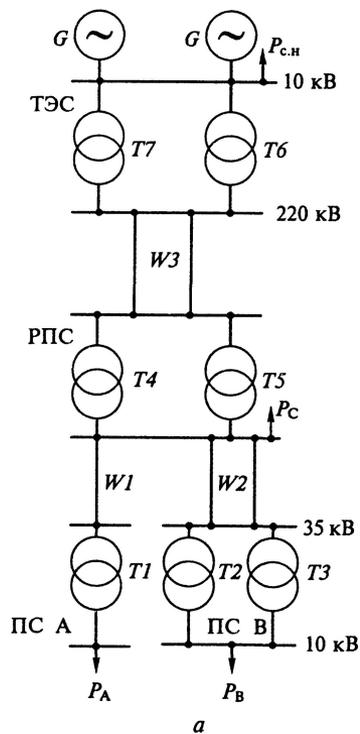


б)

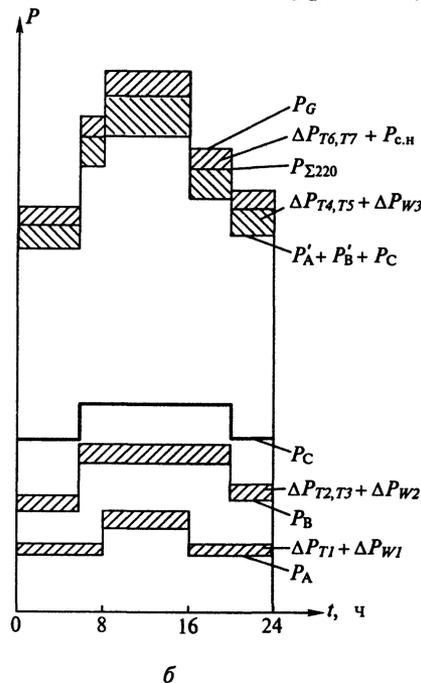


в)

# Построение графиков активной нагрузки



$$P'_A = P_A + \Delta P_{T1} + \Delta P_{W1}; \quad P'_B = P_B + \Delta P_{T1, T3} + \Delta P_{W2}$$



Потери

$$\Delta P_n = \sum \Delta P_i^{\text{пост}} + \sum \Delta P_{i \max}^{\text{пер}} \left( \frac{S_i}{S_{i \max}} \right)^2$$

$$\Delta Q_n = \sum \Delta Q_i^{\text{пост}} + \sum \Delta Q_{i \max}^{\text{пер}} \left( \frac{S_i}{S_{i \max}} \right)^2$$

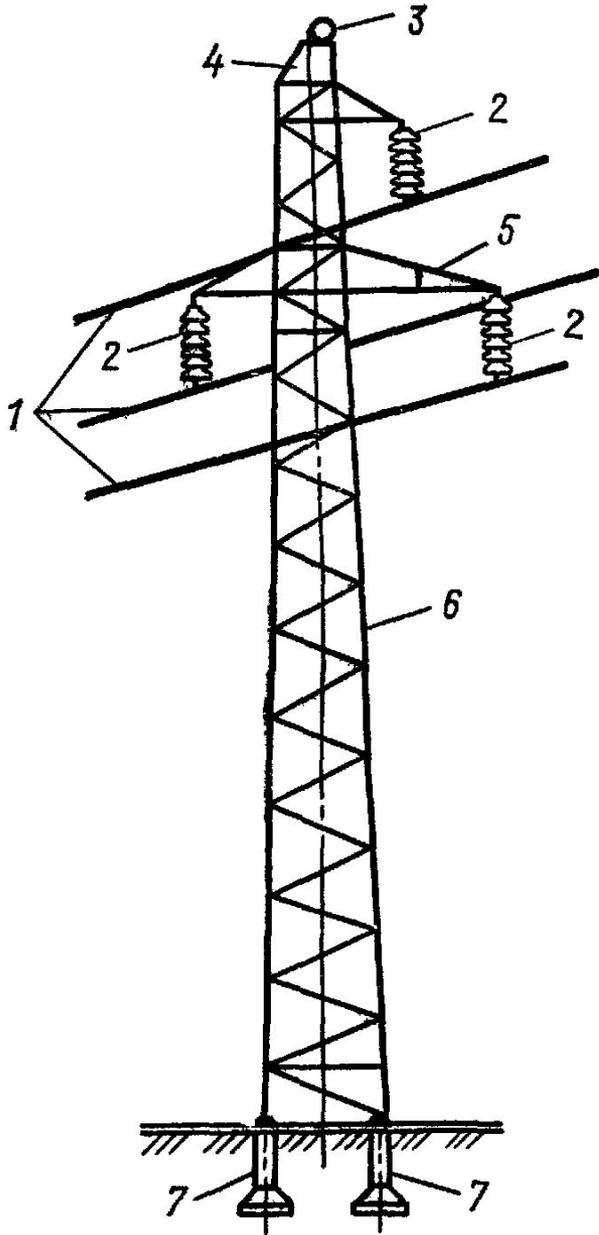
Мощность собственных

нужд

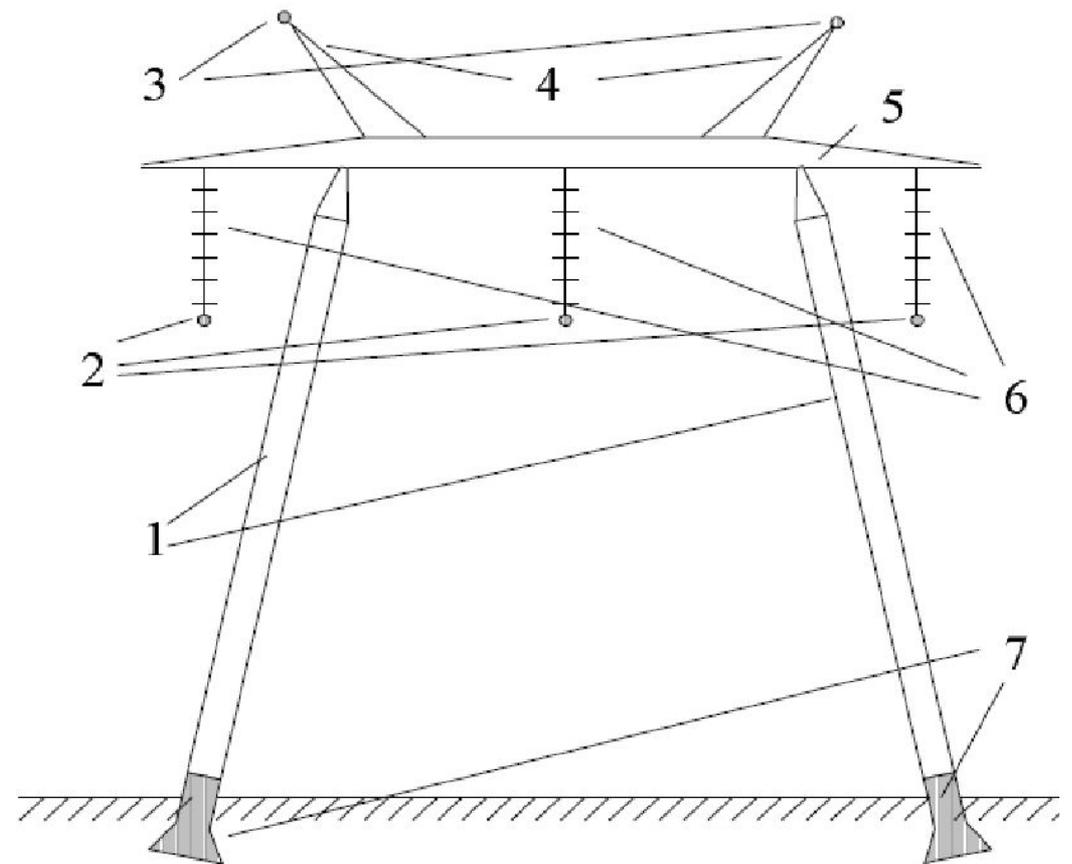
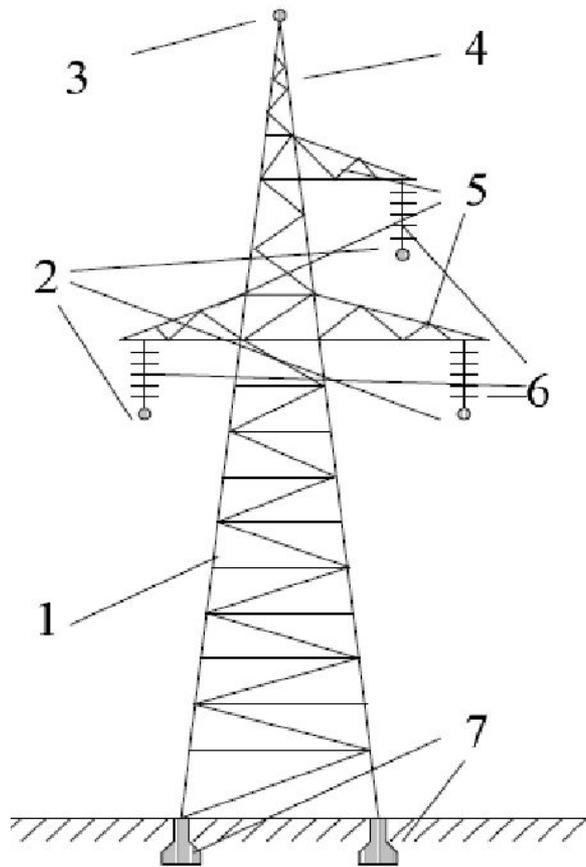
$$P_{\text{с.н}} = \left( 0,4 + 0,6 \frac{P_i}{P_{\text{уст}}} \right) P_{\text{с.н max}}$$

# Конструктивное выполнение и условия работы воздушных и кабельных линий

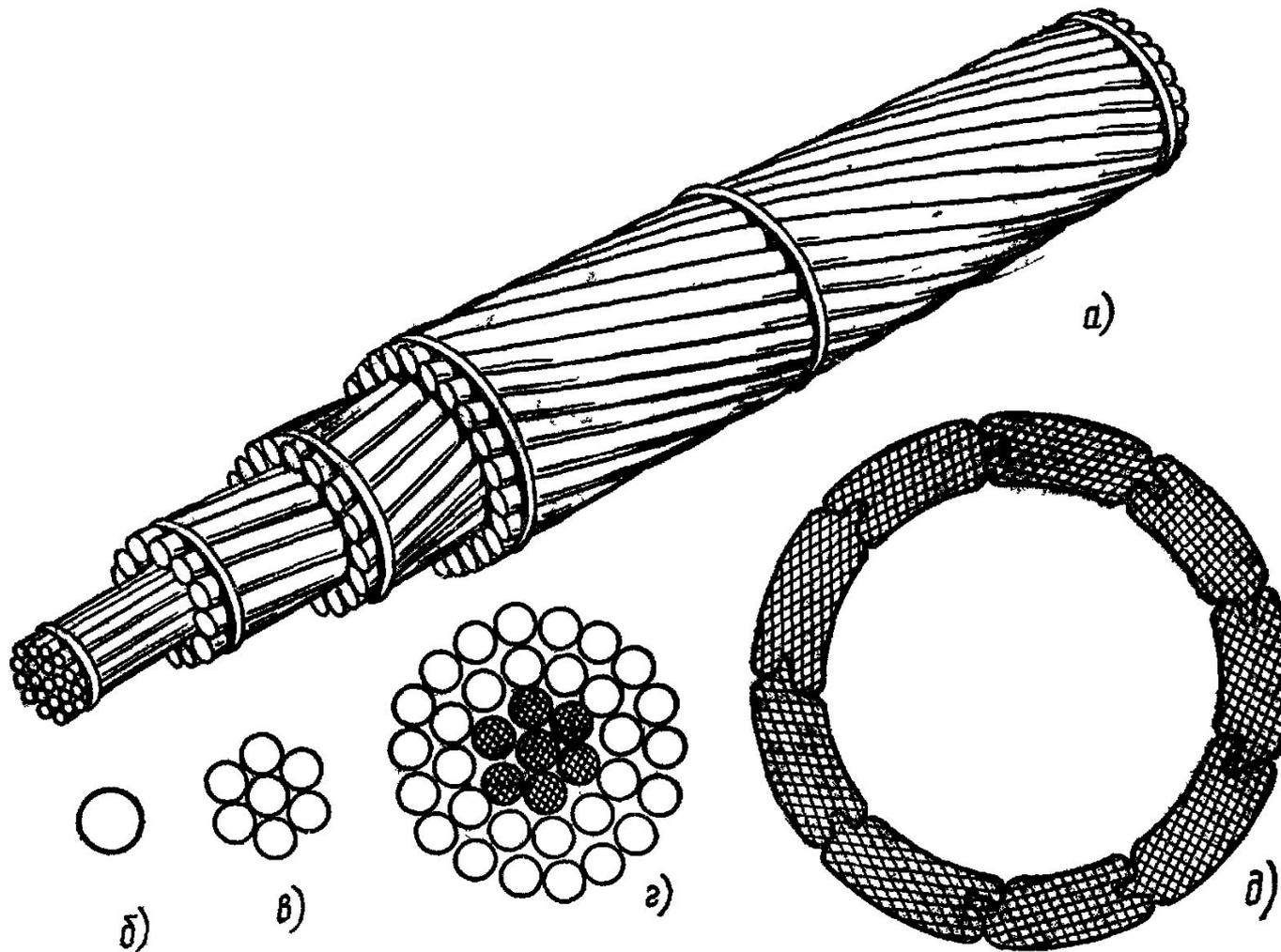
# Промежуточная металлическая опора одноцепной линии



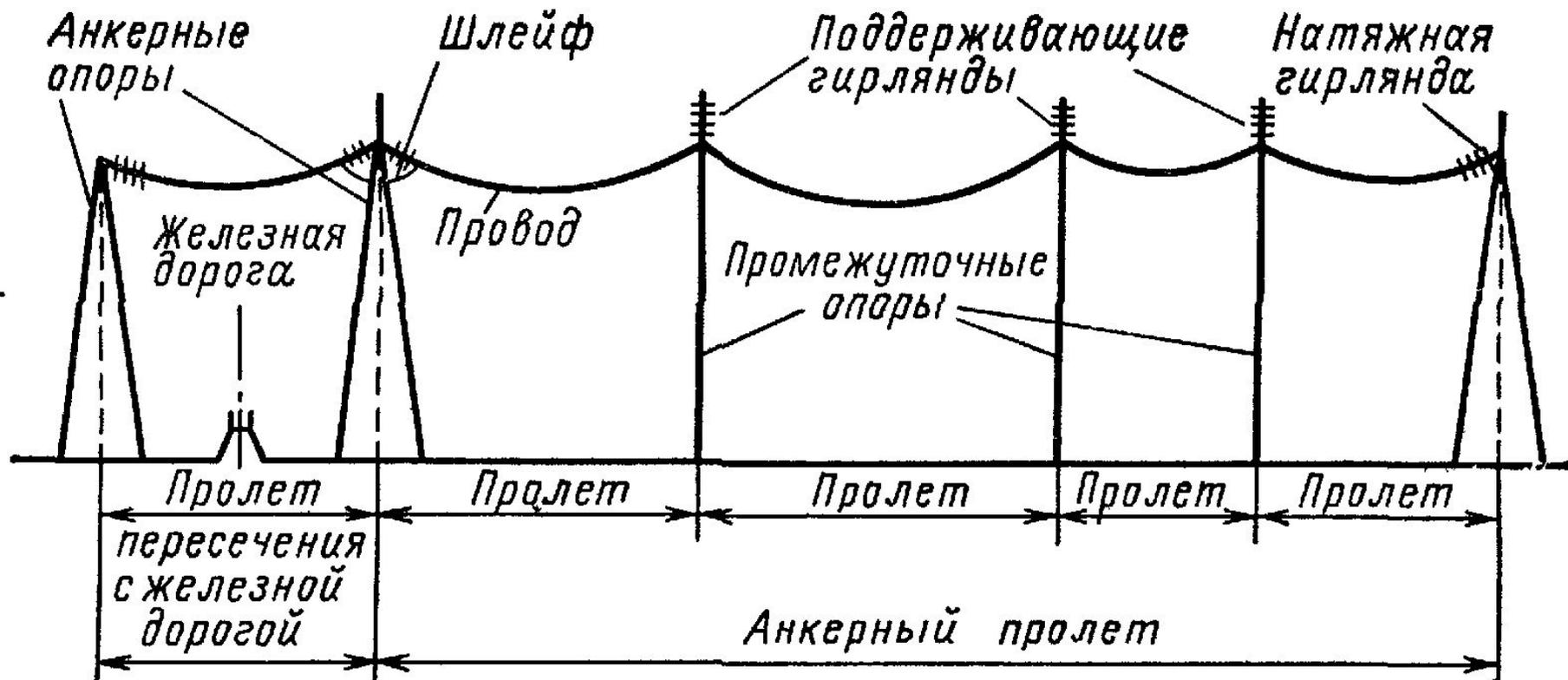
# Конструкция воздушных линий



# Конструкции проводов ВЛ



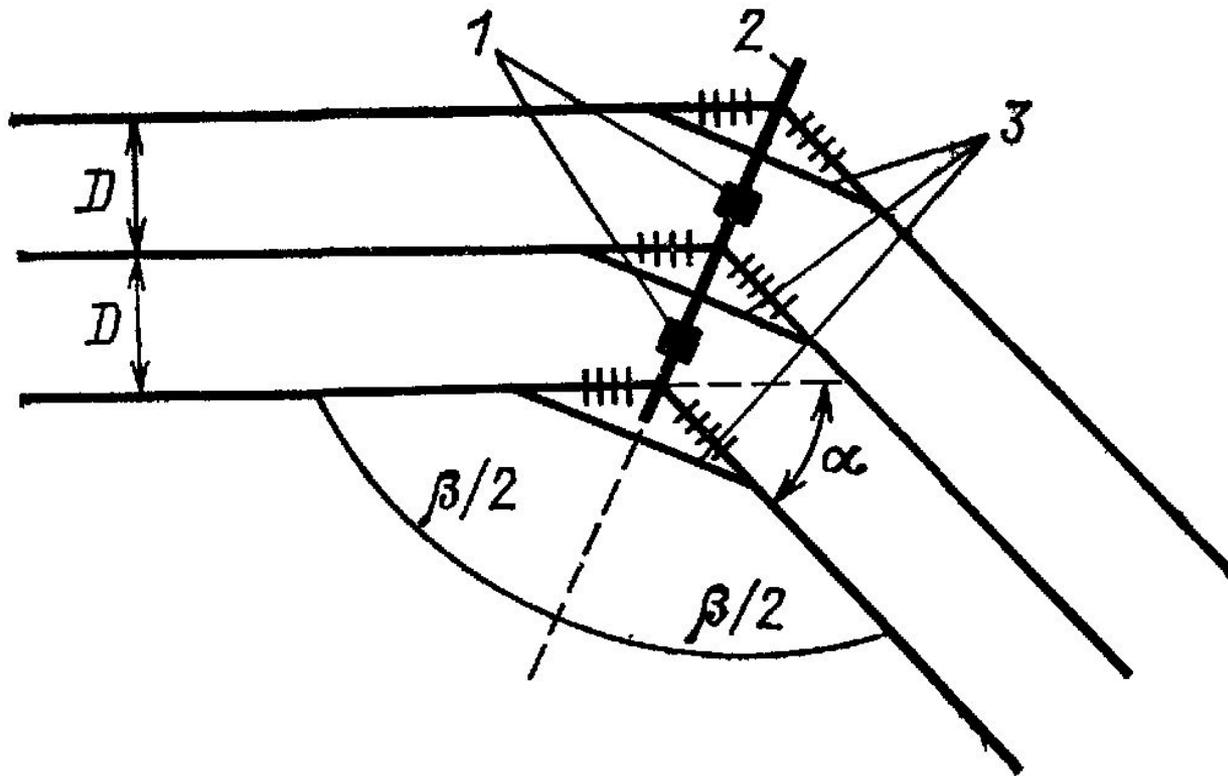
# Габаритные расстояния ВЛ



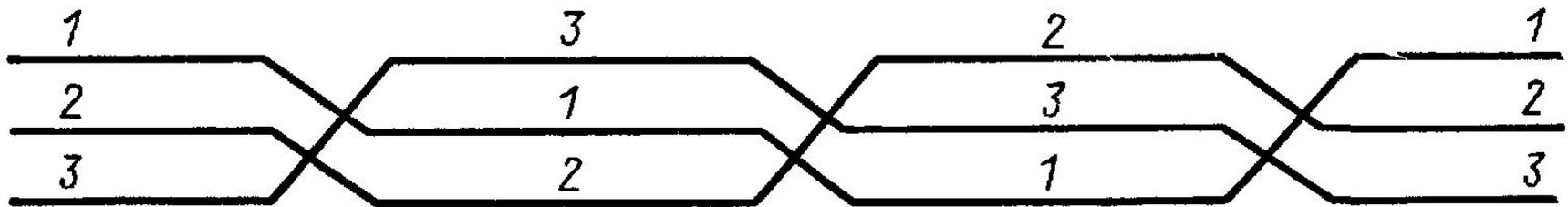
# Различают следующие типы опор:

1. Анкерные
2. Промежуточные
3. Угловые
4. Концевые
5. Ответвительные
6. Транспозиционные
7. Переходные

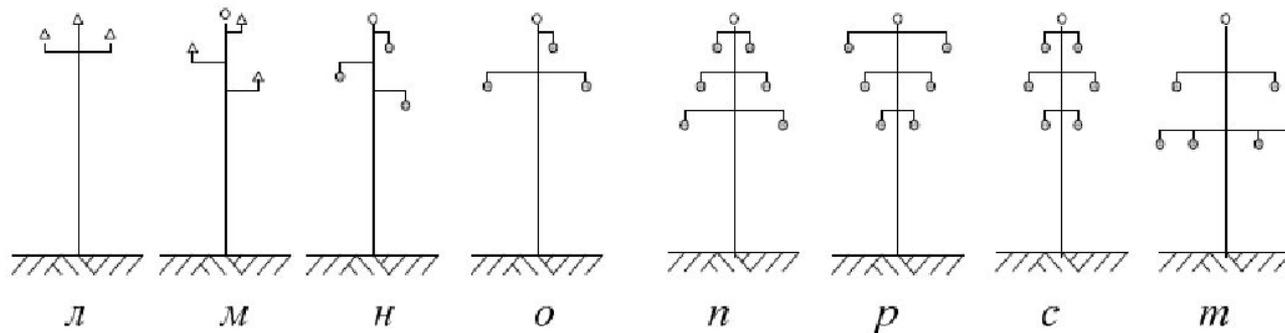
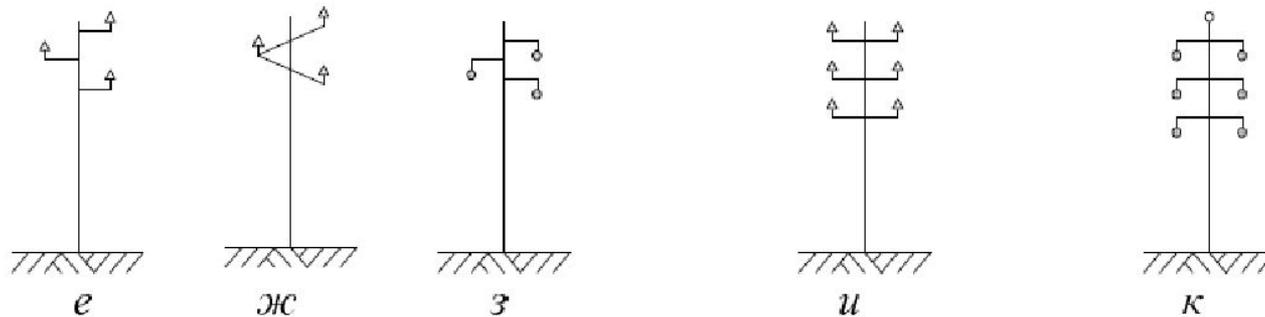
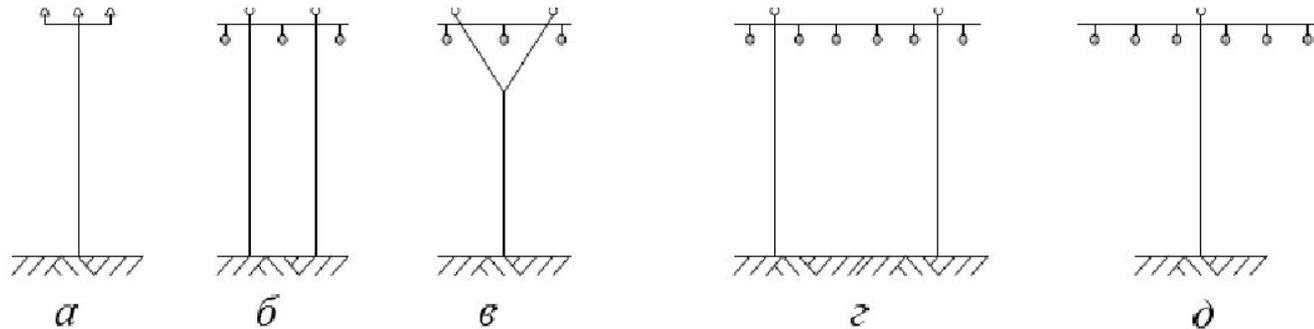
# Угол поворота ВЛ



# Цикл транспозиции проводов одноцепной линии



# Схемы расположения проводов и тросов на опорах

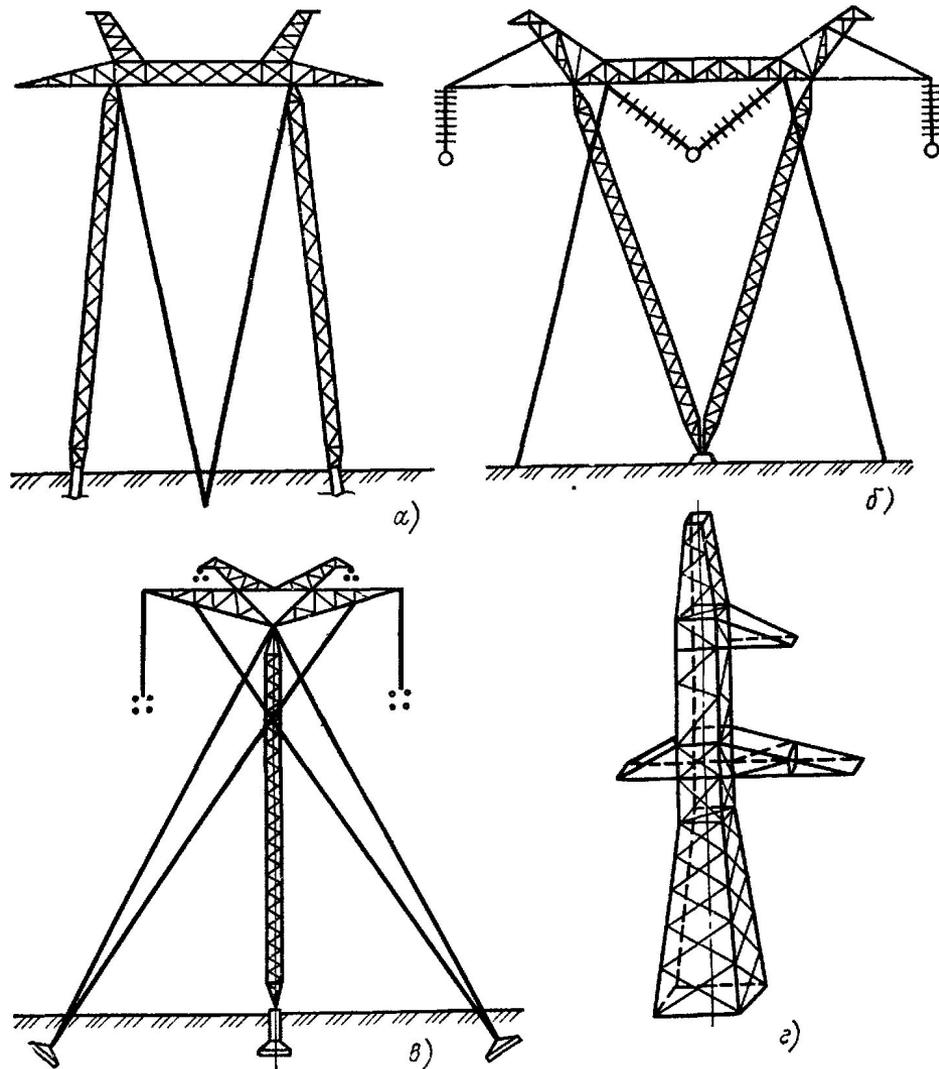


# Опоры ВЛ могут изготавливаться

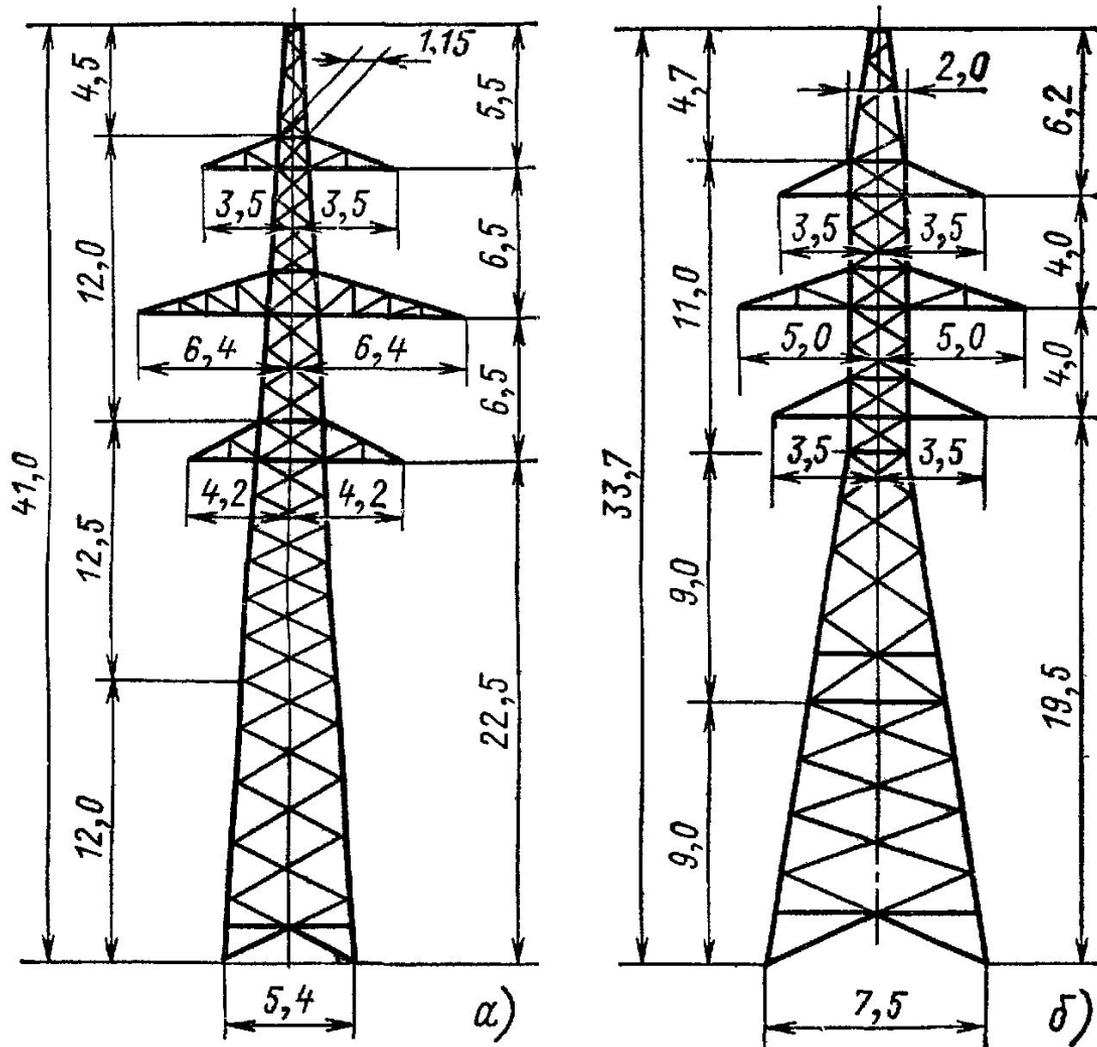
из:

1. Деревя
2. Металла
3. Железобетона

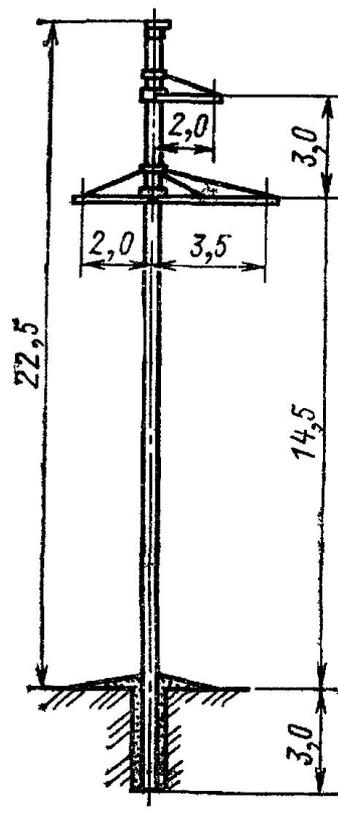
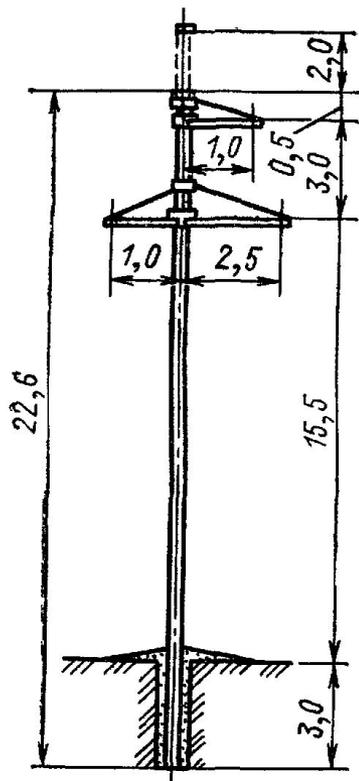
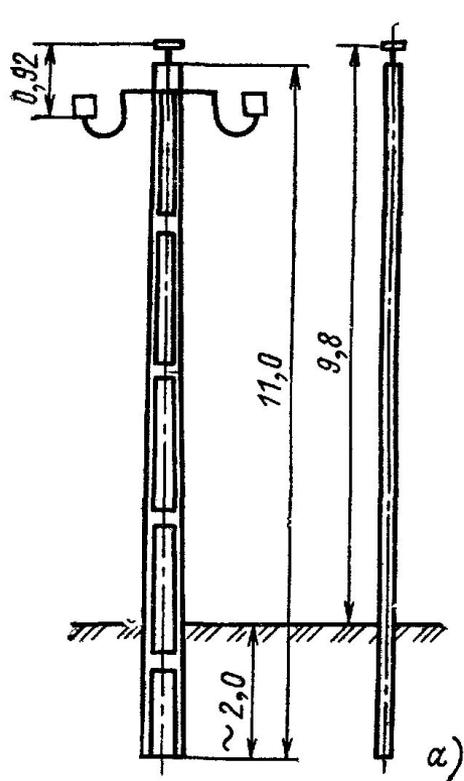
# Металлические опоры



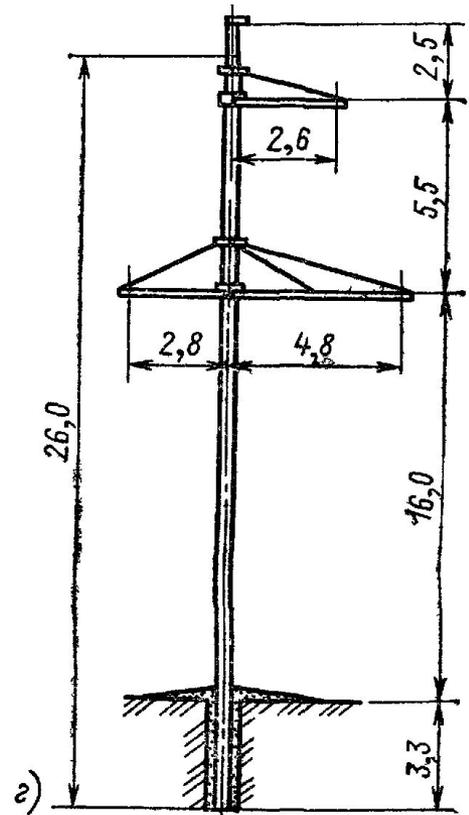
# Металлические свободностоящие двухцепные опоры



# Промежуточные железобетонные свободностоящие одноцепные опоры

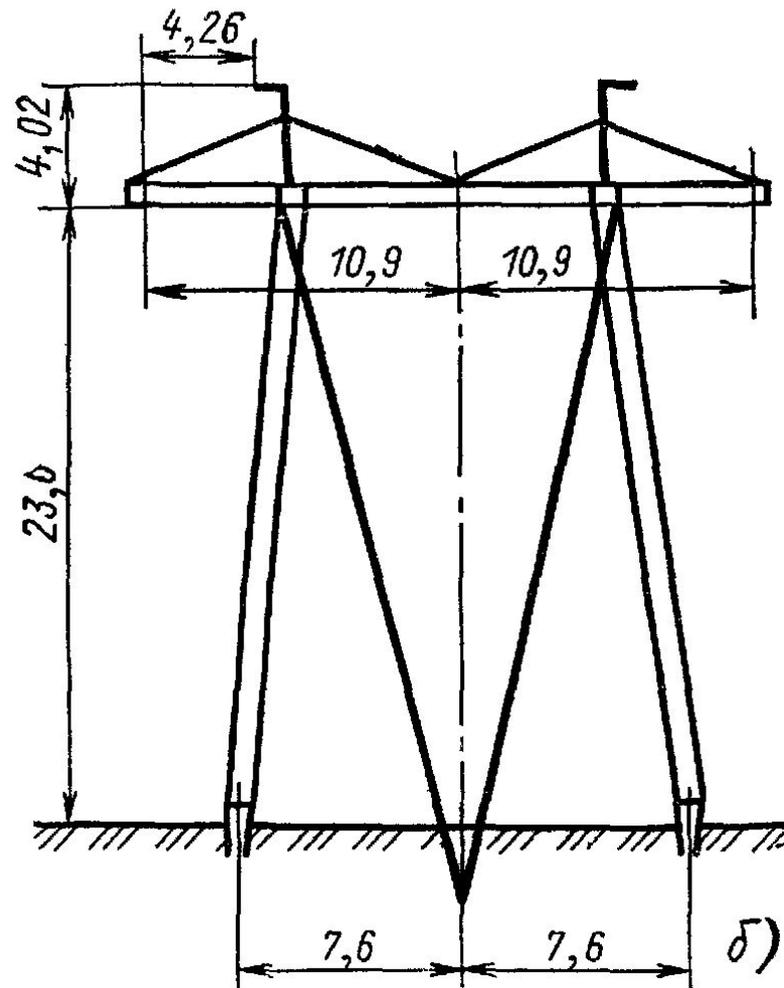
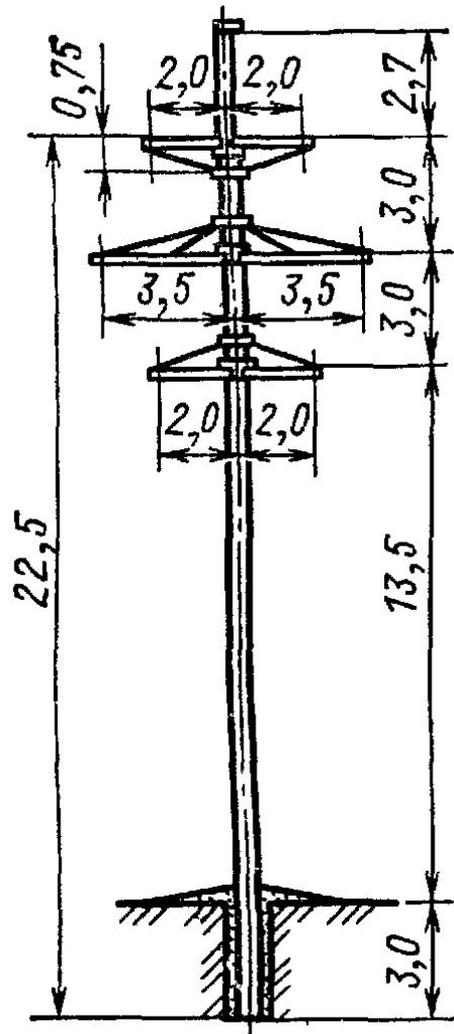


б)



а)

# Промежуточные железобетонные опоры



а)

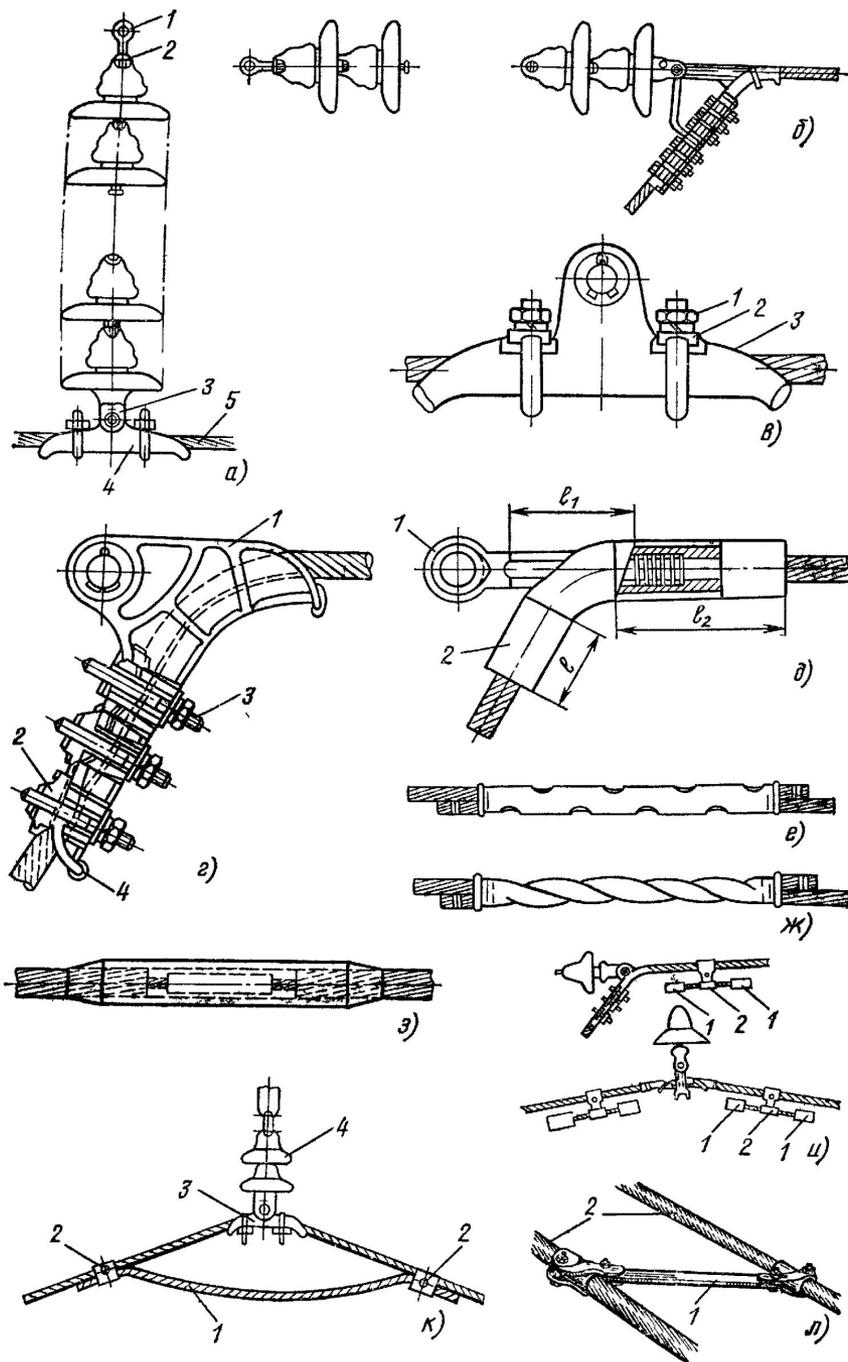
б)

# Изоляторы ВЛ по конструкции делятся на:

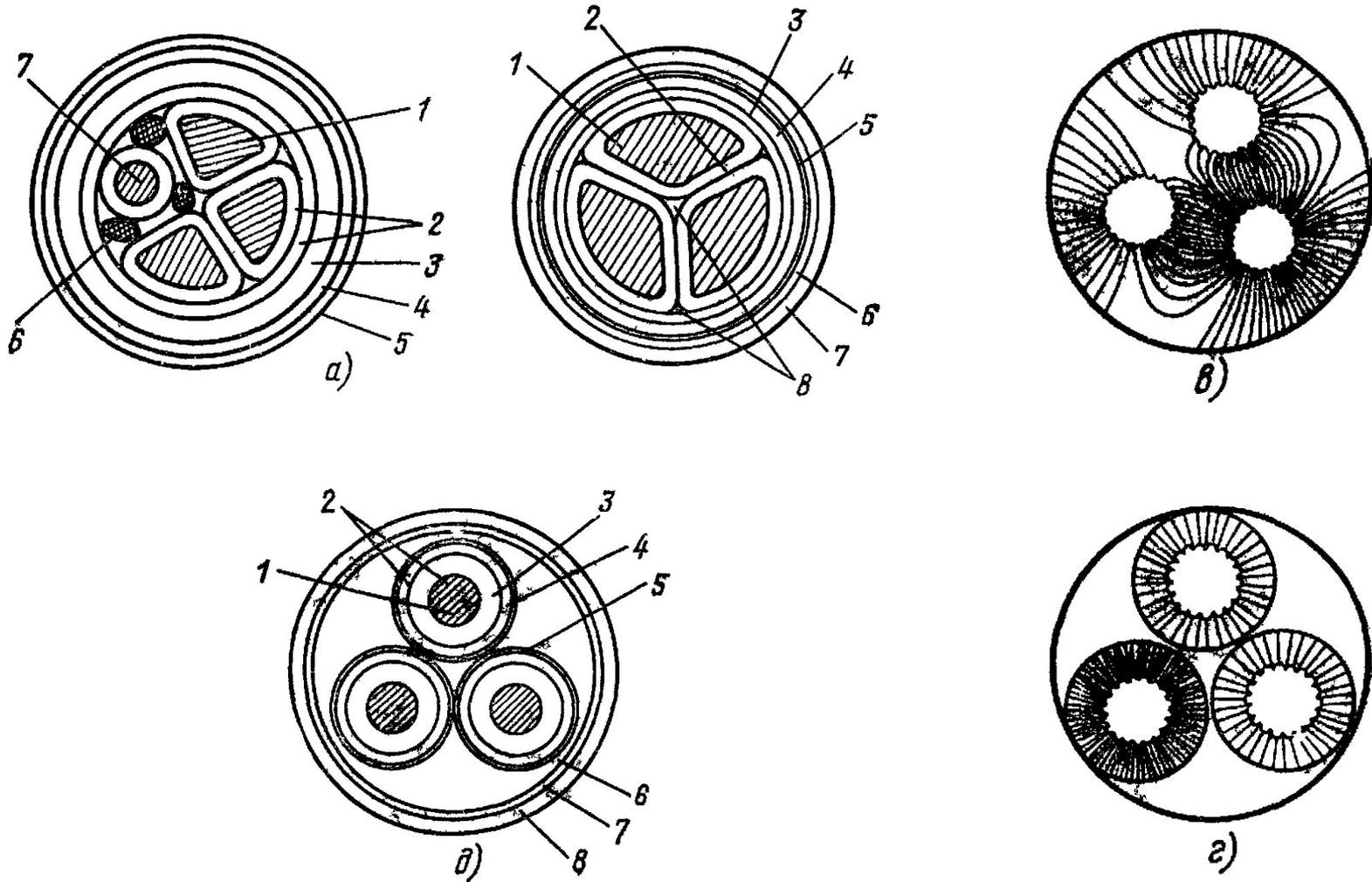
- Штыревые
- Подвесные
- Стержневые



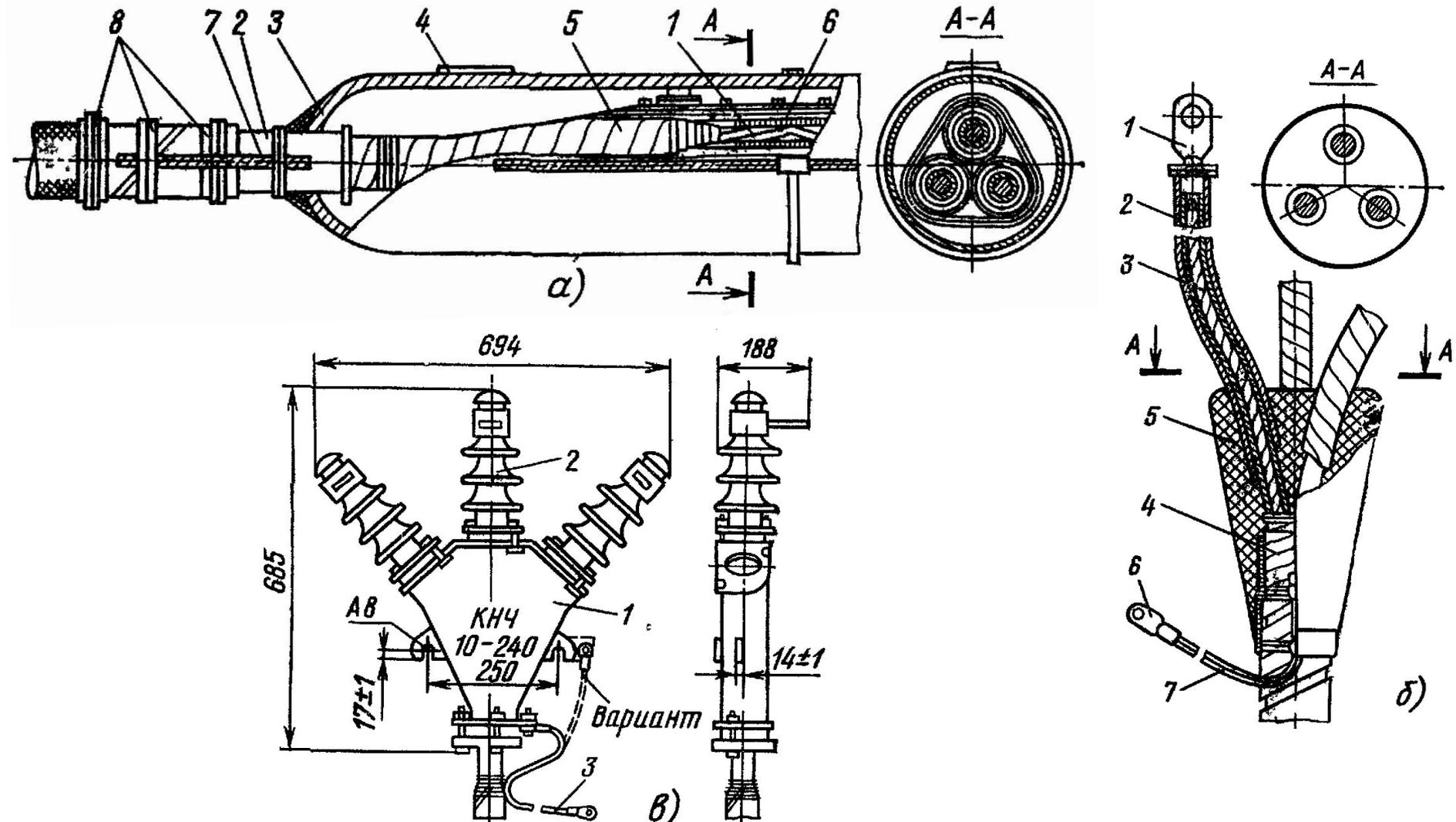
# Изоляторы и линейная арматура



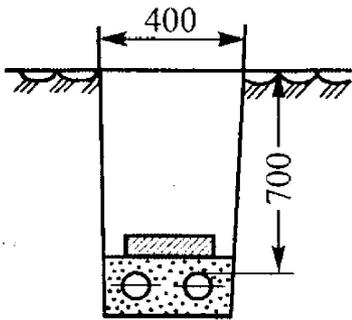
# Силовые кабели



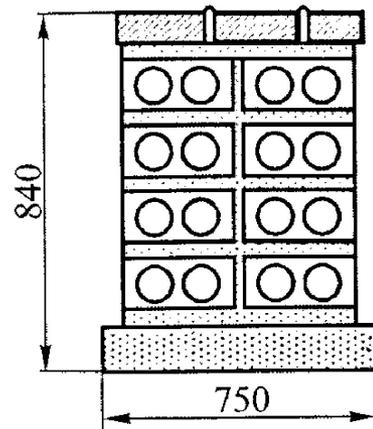
# Кабельная арматура



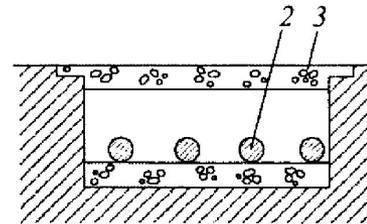
# Способы прокладки кабелей



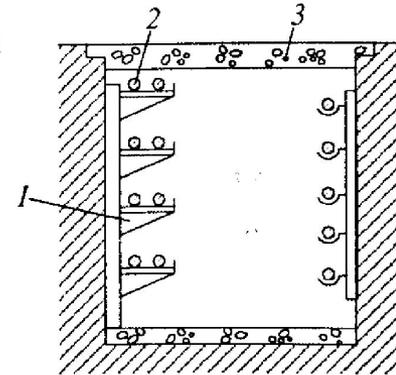
Прокладка в земле



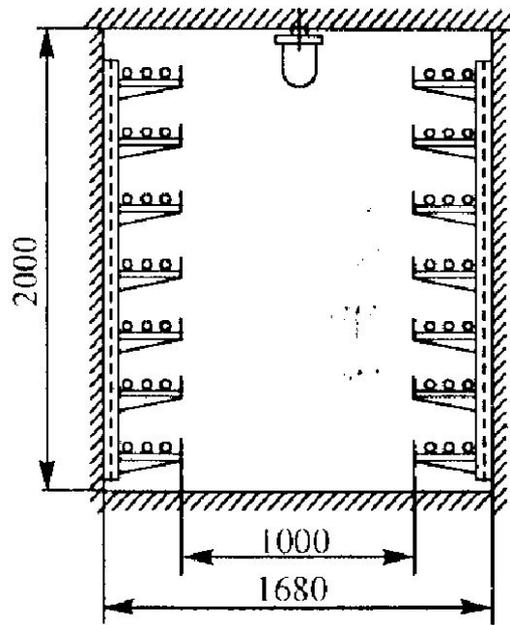
Прокладка в блоках



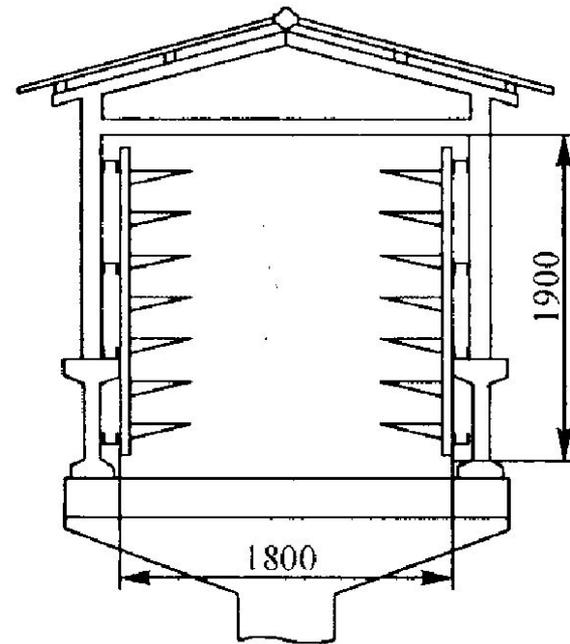
Прокладка в каналах



# Способы прокладки кабелей



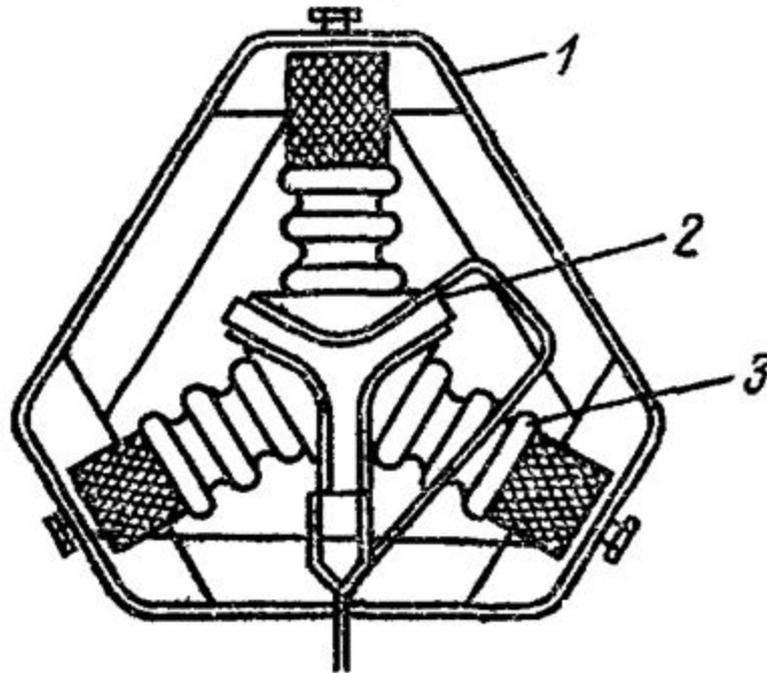
Прокладка в тоннеле



Прокладка в кабельной галерее

# Конструктивно токопроводы различают:

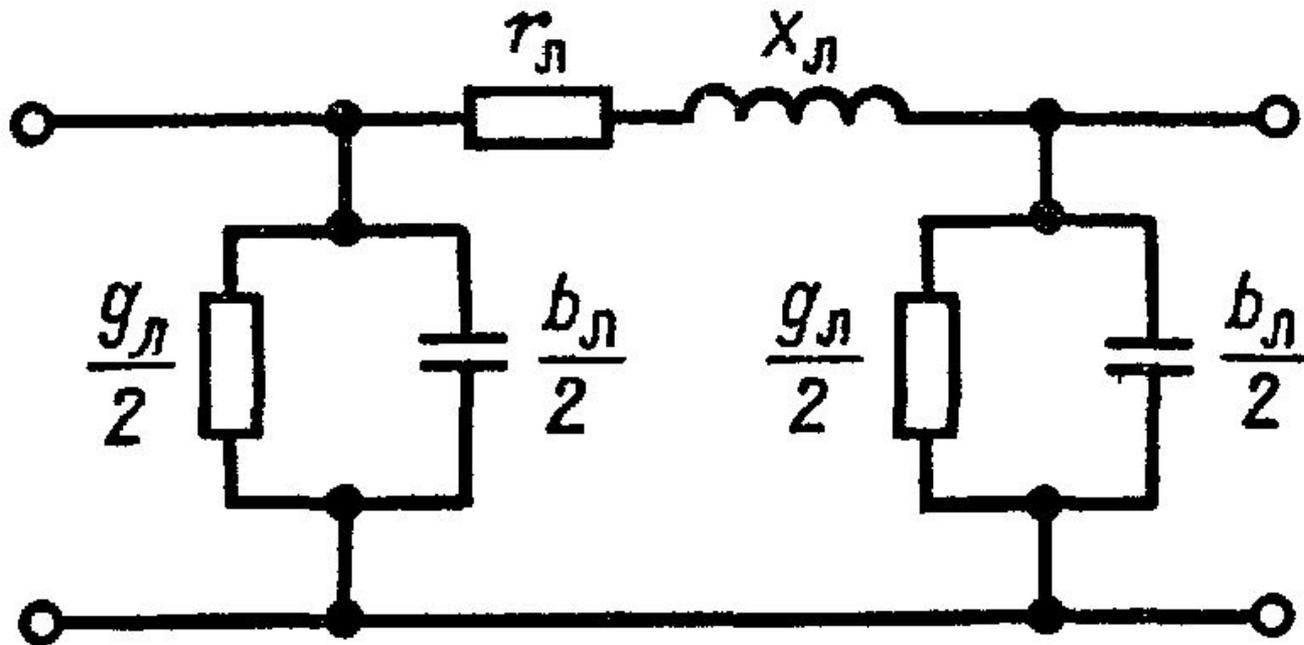
- Гибкий токопровод
- Жесткий симметричный токопровод
- Жесткий не симметричный токопровод





# Характеристики и параметры элементов электрической сети

# Схемы замещения ЛЭП



П – образная схема замещения  
воздушной линии электропередачи

# Параметры схемы замещения ЛЭП

$r_{\text{л}} = r_0 l$       Активное сопротивление

$x = x_0 l$       Реактивное сопротивление

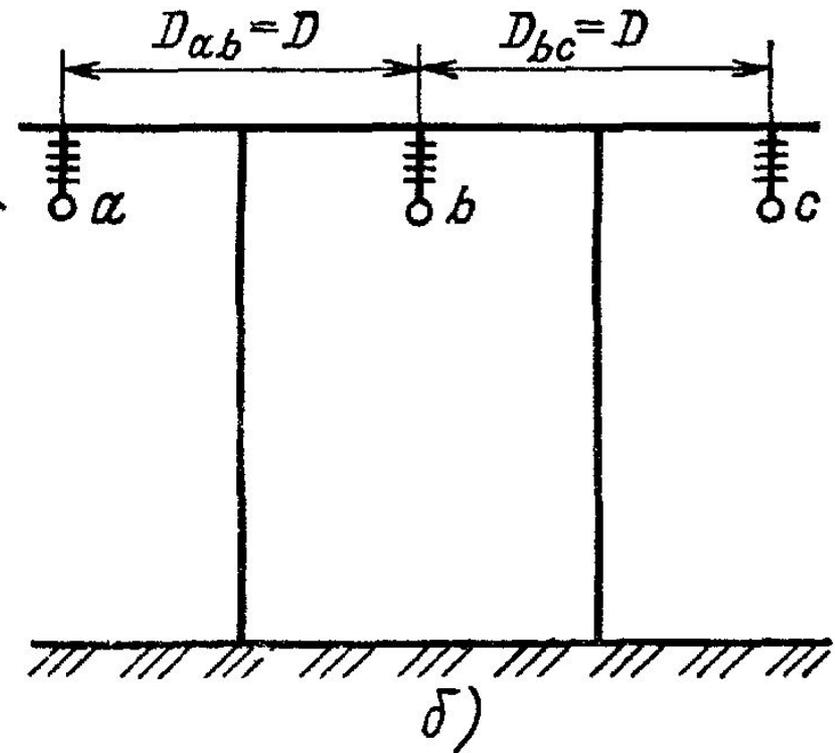
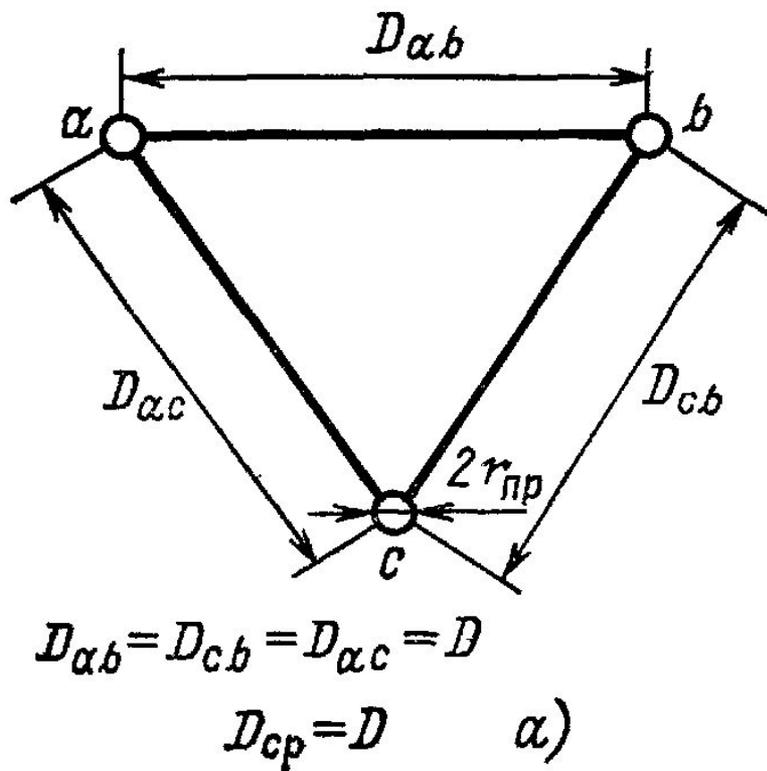
Удельное реактивное сопротивление фаз ВЛ

$$x_0 = 0,144 \lg (D_{\text{ср}}/r_{\text{пр}}) + 0,0157$$

Среднегеометрическое расстояние между фазами

$$D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ca}}$$

# Расположение проводов линии электропередачи



Эквивалентный радиус провода

$$r_{\text{эк}} = \sqrt[n_{\phi}]{r_{\text{пр}} a_{\text{ср}}^{n_{\phi}-1}}$$

Удельное активное сопротивление фазы ВЛ  
с расщепленным проводом

$$r_0 = r_{0\text{пр}}/n_{\phi}$$

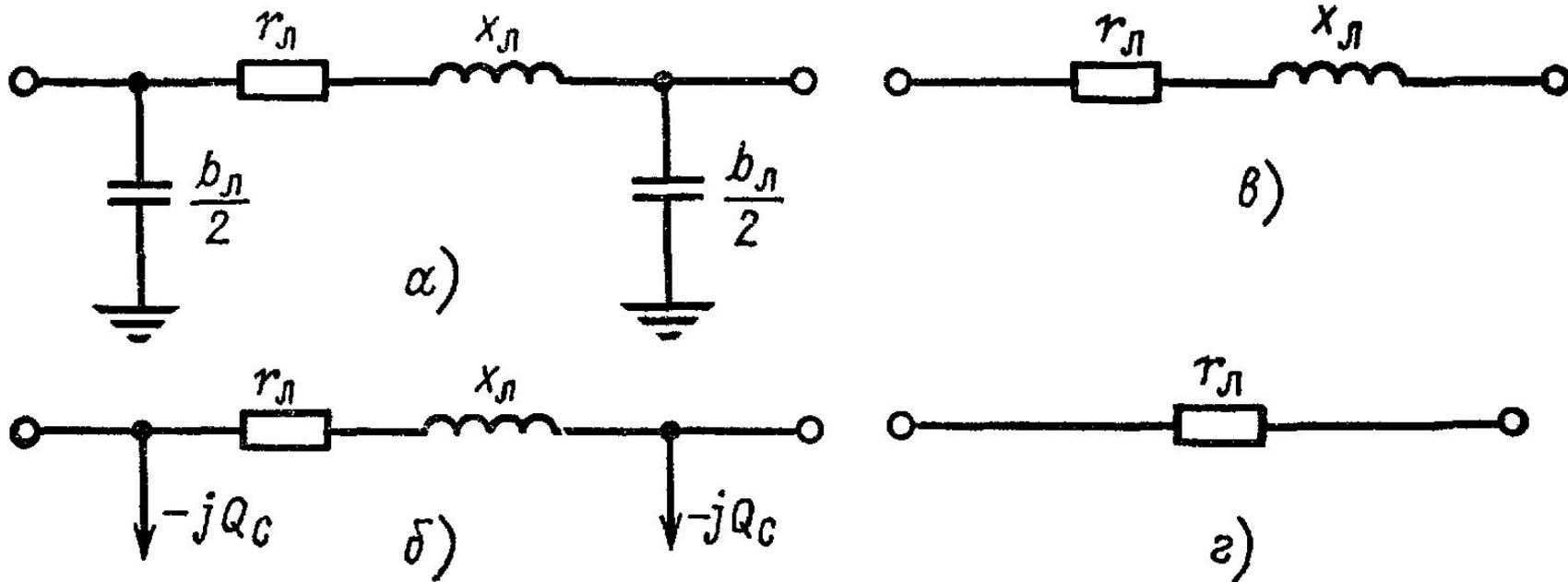
Емкостная проводимость линии

$$b_{\text{л}} = b_0 l,$$

Удельная емкостная проводимость

$$b_0 = \frac{7,58}{\lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{пр}}}} 10^{-6}$$

# Схемы замещения линий электропередачи



Половина емкостной мощности линии

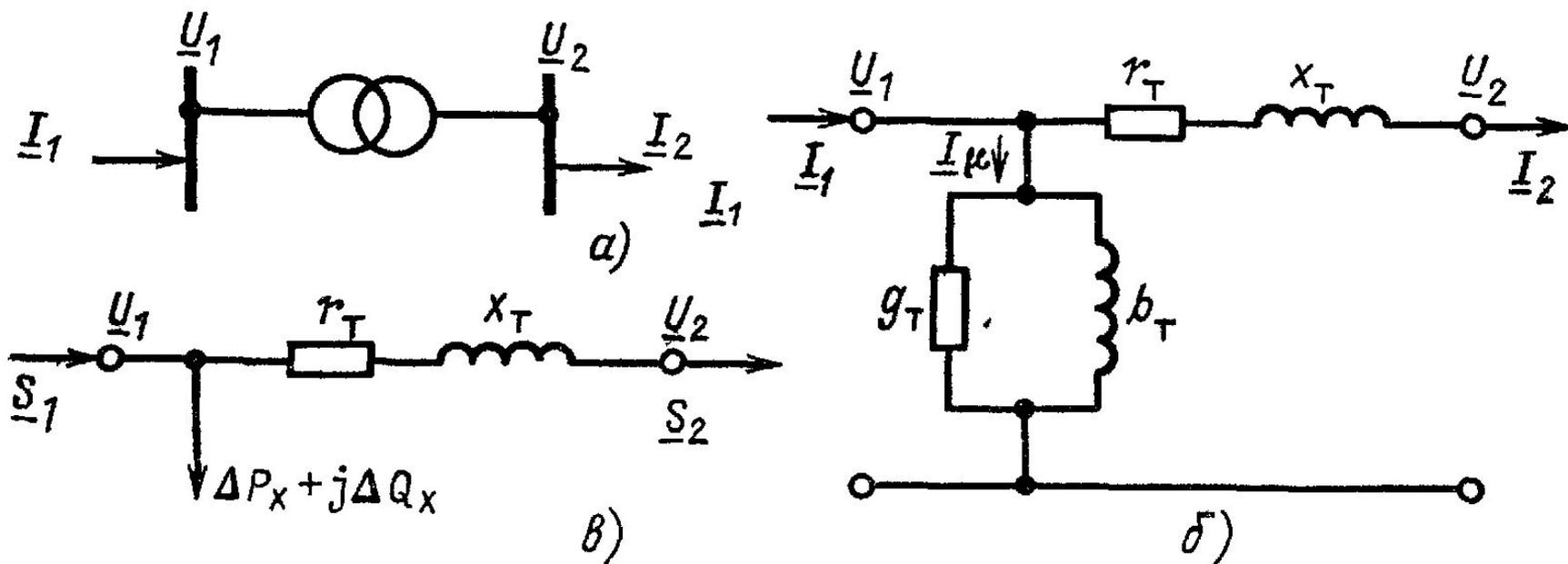
$$Q_c = 3I_c U_\phi = 3U_\phi^2 \frac{1}{2} b_0 l = \frac{1}{2} U^2 b_l$$

Емкостной ток на землю

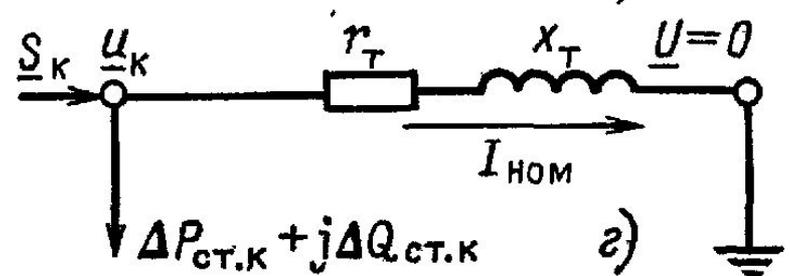
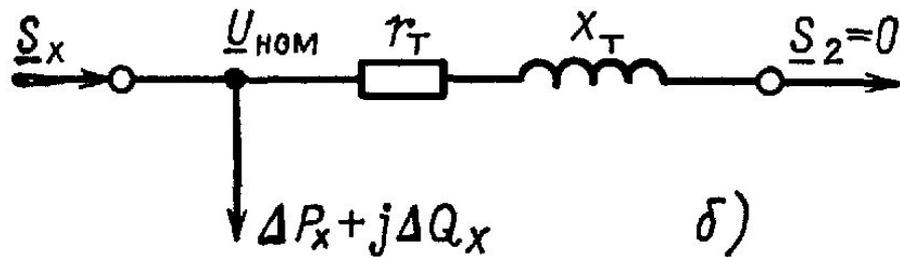
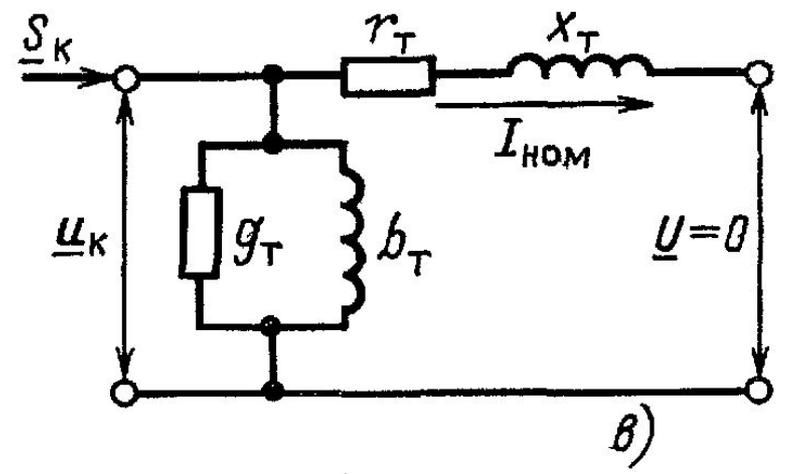
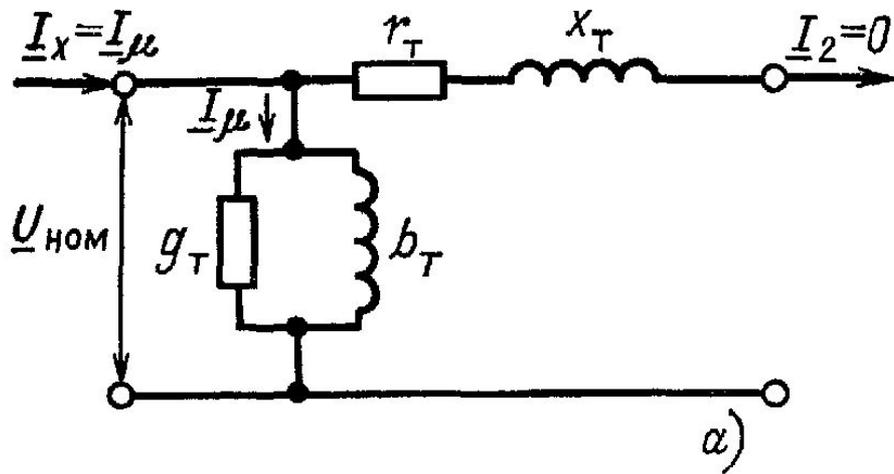
$$I_c = U_\phi b_l / 2.$$

# Схемы замещения трансформаторов и авто трансформаторов

# Схемы замещения двухобмоточного трансформатора



# Схема опытов ХХ и КЗ



Мощность холостого хода

$$\underline{S}_x = \Delta P_x + j\Delta Q_x.$$

Проводимости (См) определяются как:

$$g_T = \Delta P_x / U_{\text{НОМ}}^2$$

$$b_T = \Delta Q_x / U_{\text{НОМ}}^2$$

Ток намагничивания равен току холостого хода

$$I_\mu = I_x \approx I_x''$$

Потери реактивной мощности в режиме ХХ:

$$\begin{aligned} \Delta Q_x &= 3I_x'' U_{\text{НОМ.}\phi} \approx 3I_x U_{\text{НОМ.}\phi} = 3 \frac{I_x \% I_{\text{НОМ}}}{100} U_{\text{НОМ.}\phi} = \\ &= \frac{I_x \% S_{\text{НОМ}}}{100} \end{aligned}$$

С учетом потерь реактивной мощности в режиме ХХ,  
Проводимость определится как:

$$b_T = \frac{I_X \% S_{\text{НОМ}}}{100 U_{\text{НОМ}}^2}$$

Потери КЗ:

$$\Delta P_K = 3 I_{\text{НОМ}}^2 r_T = \frac{S_{\text{НОМ}}^2}{U_{\text{НОМ}}^2} r_T$$

Активное сопротивление трансформатора:

$$r_T = \frac{\Delta P_K U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2}$$

Из опыта КЗ, определяется напряжение КЗ:

$$u_K = \frac{u_K \% U_{\text{НОМ}}}{100} \approx \sqrt{3} I_{\text{НОМ}} x_T$$

После преобразований этого выражения, умножая его на  $U_{\text{НОМ}}$ ,  
Получаем индуктивное сопротивление трансформатора:

$$x_T = \frac{u_K \% U_{\text{НОМ}}^2}{100 S_{\text{НОМ}}}$$

Потери мощности в  $r_T$ , зависят от тока нагрузки и полной мощности нагрузки, они определяются:

$$\Delta P_T = 3 I_2^2 r_T = \frac{S_2^2}{U_2^2} r_T$$

Если учесть, что:

$$U_2^2 \approx U_{\text{НОМ}}^2$$

То получим:

$$\Delta P_{\text{T}} = \frac{\Delta P_{\text{K}} S_2^2}{S_{\text{НОМ}}^2}$$

Потери в  $x_{\text{T}}$  определяются аналогично и равны:

$$\Delta Q_{\text{T}} = 3I_2^2 x_{\text{T}} = \frac{S_2^2}{U_2^2} x_{\text{T}} = \frac{u_{\text{K}} \% S_2^2}{100 S_{\text{НОМ}}}$$

Для силового трансформатора, через который проходят ток нагрузки  $I_2$  и мощность  $S_2$  потери определяются как:

$$\Delta P = \Delta P_x + \Delta P_T = \Delta P_x + \frac{\Delta P_K S_2^2}{S_{\text{НОМ}}^2},$$

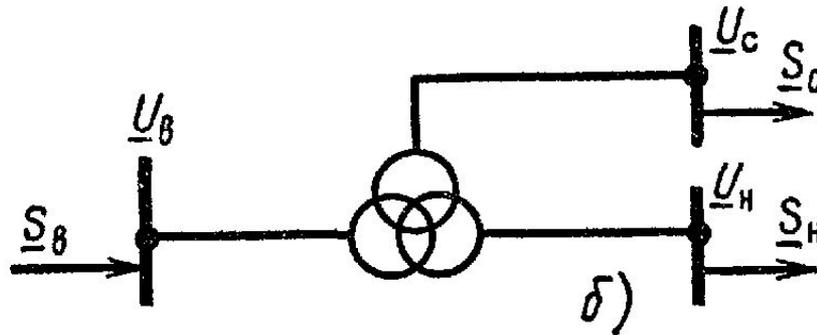
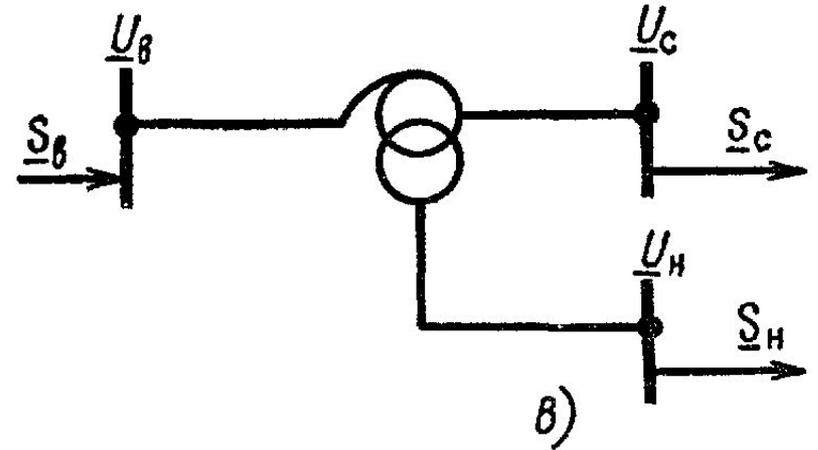
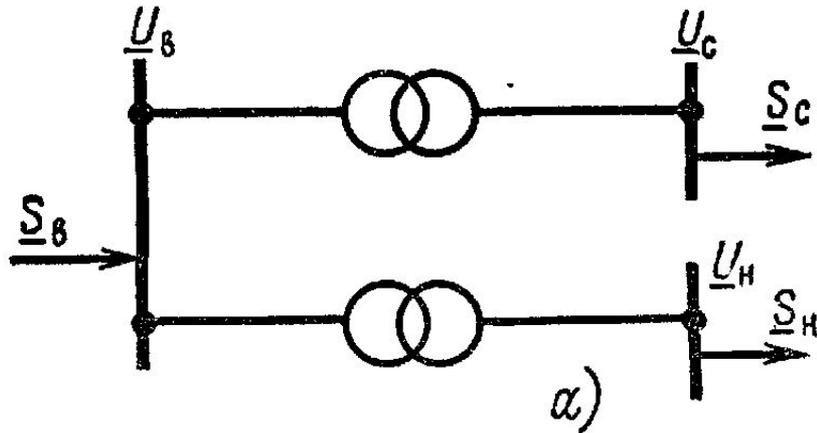
$$\Delta Q = \Delta Q_x + \Delta Q_T = \frac{I_x \% S_{\text{НОМ}}}{100} + \frac{u_K \% S_2^2}{100 S_{\text{НОМ}}}$$

Если на ПС установлено  $k$  параллельных трансформаторов, то потери в них равны:

$$\Delta P = k \Delta P_x + \frac{1}{k} \frac{\Delta P_K S_2^2}{S_{\text{НОМ}}^2},$$

$$\Delta Q = \frac{k I_x \% S_{\text{НОМ}}}{100} + \frac{1}{k} \frac{u_K \% S_2^2}{100 S_{\text{НОМ}}}$$

# Схемы подстанции с тремя номинальными напряжениями



Номинальная мощность автотрансформатора:

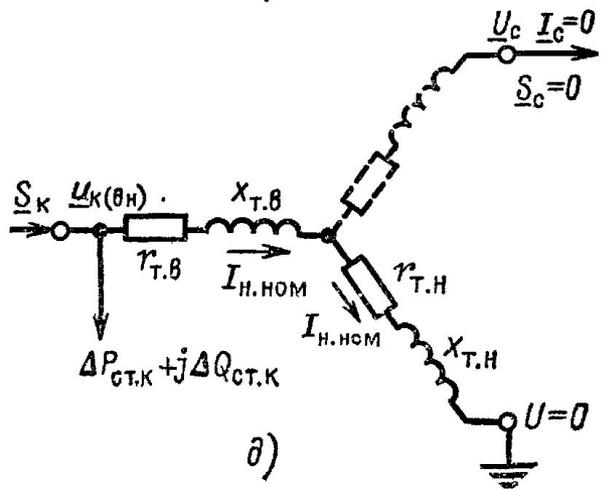
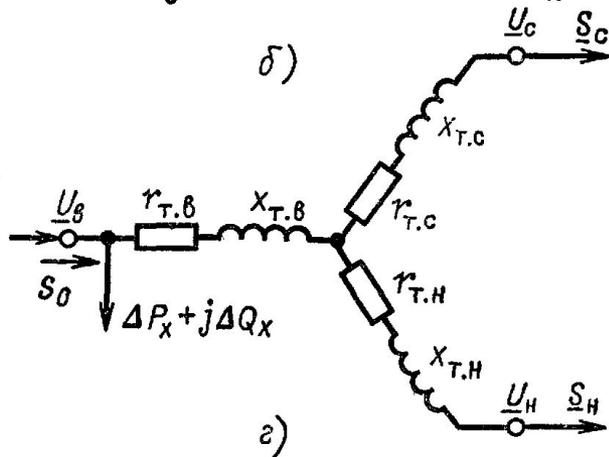
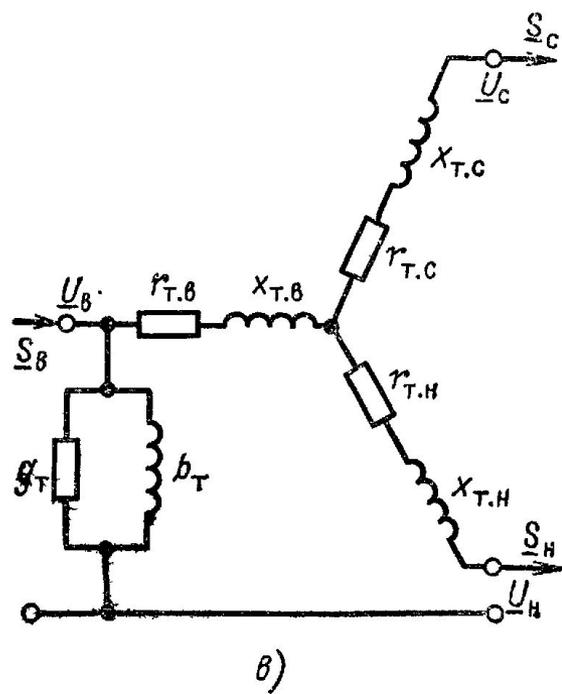
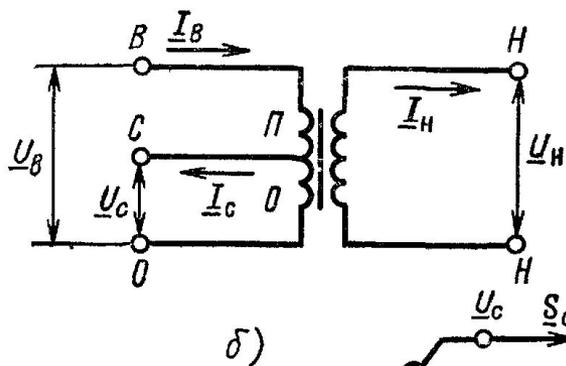
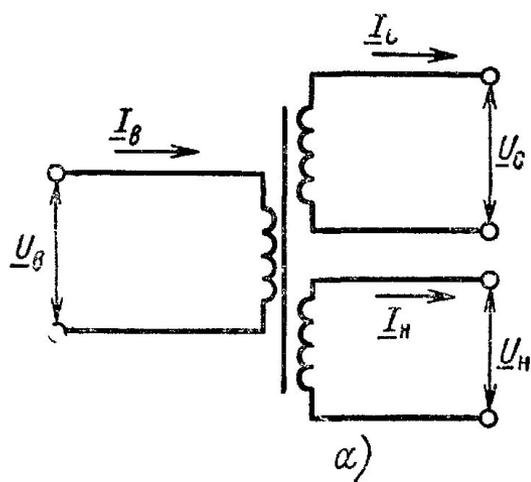
$$S_{\text{НОМ}} = \sqrt{3} U_{\text{В.НОМ}} I_{\text{В.НОМ}}$$

Типовая мощность автотрансформатора:

$$\begin{aligned} S_{\text{ТИП}} &= \sqrt{3} (U_{\text{В.НОМ}} - U_{\text{С.НОМ}}) I_{\text{В.НОМ}} = \\ &= \sqrt{3} U_{\text{В.НОМ}} I_{\text{В.НОМ}} \left( 1 - \frac{U_{\text{С.НОМ}}}{U_{\text{В.НОМ}}} \right) = \alpha S_{\text{НОМ}} \end{aligned}$$

Коэффициент выгоды:

$$\alpha = 1 - \frac{U_{\text{С.НОМ}}}{U_{\text{В.НОМ}}}$$



Трехобмоточный  
трансформатор  
и  
автотрансформатор

Мощность обмотки низшего напряжения определяется:

$$S_{\text{Н.НОМ}} = \alpha_{\text{Н.Н}} S_{\text{НОМ}}$$

Из опыта КЗ можно определить сумму сопротивлений обмоток:

$$r_{\text{Т.В}} + r_{\text{Т.Н}} = \Delta P_{\text{К(В.Н)}} U_{\text{НОМ}}^2 / S_{\text{НОМ}}^2$$

$$r_{\text{Т.В}} + r_{\text{Т.С}} = \Delta P_{\text{К(В.С)}} U_{\text{НОМ}}^2 / S_{\text{НОМ}}^2$$

$$r_{\text{Т.С}} + r_{\text{Т.Н}} = \Delta P_{\text{К(С.Н)}} U_{\text{НОМ}}^2 / S_{\text{НОМ}}^2$$

Решив представленные выше уравнения с тремя неизвестными, получим выражения аналогичные двухобмоточному трансформатору :

$$r_{ТВ} = \frac{\Delta P_{КВ} U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}^2}$$

$$r_{ТС} = \frac{\Delta P_{КС} U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}^2}$$

$$r_{ТН} = \frac{\Delta P_{КН} U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}^2}$$

Величины потерь соответствуют лучам схемы замещения и определяются из каталожных данных:

$$\Delta P_{к.в} = 0,5 (\Delta P_{к(в.н)} + \Delta P_{к(в.с)} - \Delta P_{к(с.н)});$$

$$\Delta P_{к.с} = 0,5 (\Delta P_{к(в.с)} + \Delta P_{к(с.н)} - \Delta P_{к(в.н)}),$$

$$\Delta P_{к.н} = 0,5 (\Delta P_{к(в.н)} + \Delta P_{к(с.н)} - \Delta P_{к(в.с)})$$

Аналогично, из каталожных данных определяются напряжения КЗ:

$$u_{к.в} \% = 0,5 [u_{к(в.н)} \% + u_{к(в.с)} \% - u_{к(с.н)} \%],$$

$$u_{к.с} \% = 0,5 [u_{к(в.с)} \% + u_{к(с.н)} \% - u_{к(в.н)} \%]$$

$$u_{к.н} \% = 0,5 [u_{к(в.н)} \% + u_{к(с.н)} \% - u_{к(в.с)} \%].$$

Для приведения к разным мощностям паспортные значения потерь короткого замыкания для пар обмоток АТ необходимо привести к одной мощности – номинальной. Это приведение пропорционально отношению квадратов мощностей обмоток:

$$\Delta P_{\text{к(в н)}} = \frac{\Delta P_{\text{к(в н)}}^{\text{н}}}{\alpha_{\text{н н}}^2}$$

$$\Delta P_{\text{к(с н)}} = \frac{\Delta P_{\text{к(с н)}}^{\text{н}}}{\alpha_{\text{н н}}^2}$$

# Статические характеристики нагрузок потребителей

По напряжению

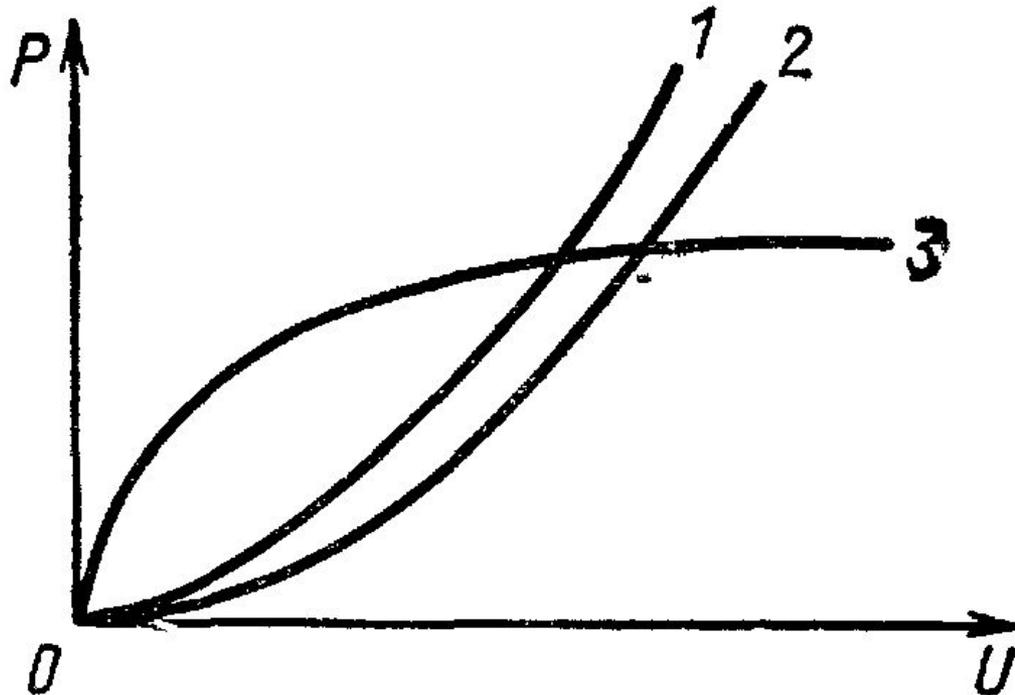
$$P_H(U), Q_H(U)$$

По частоте

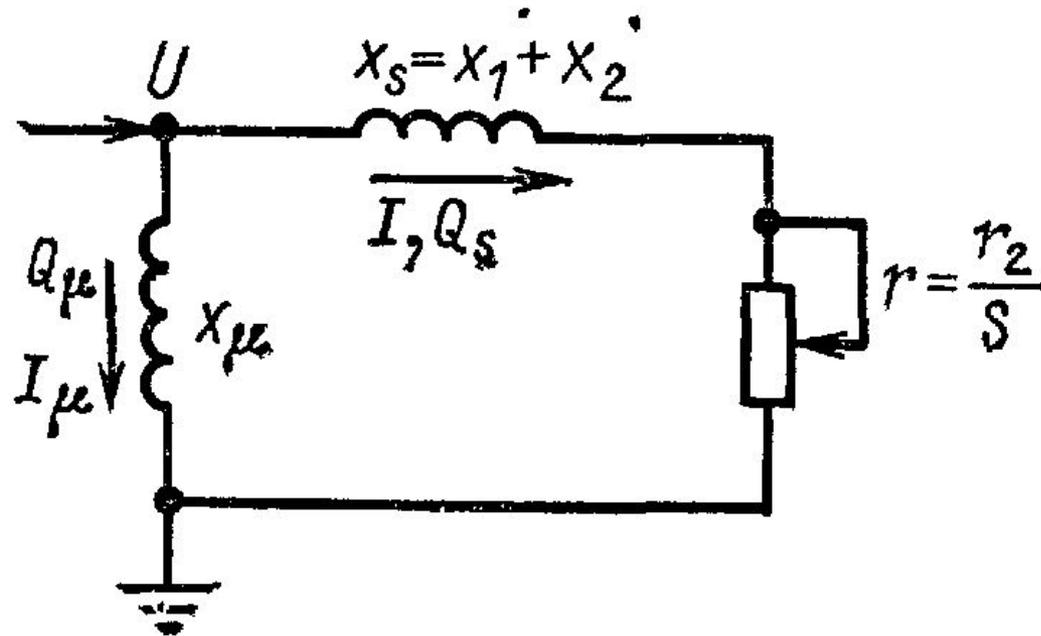
$$P_H(f), Q_H(f)$$

# Осветительная нагрузка

$$P = U^2 / r_{\text{H}} \equiv U^2$$

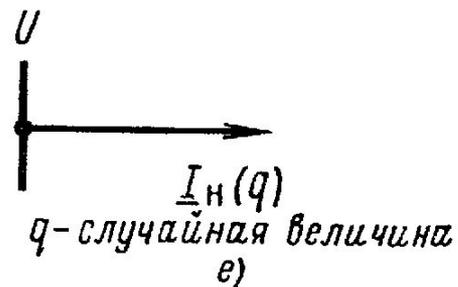
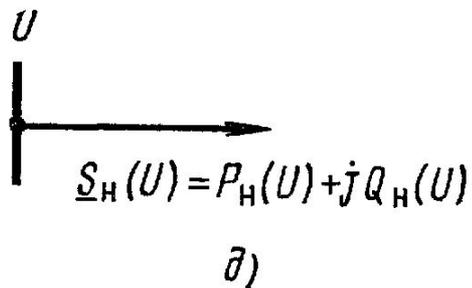
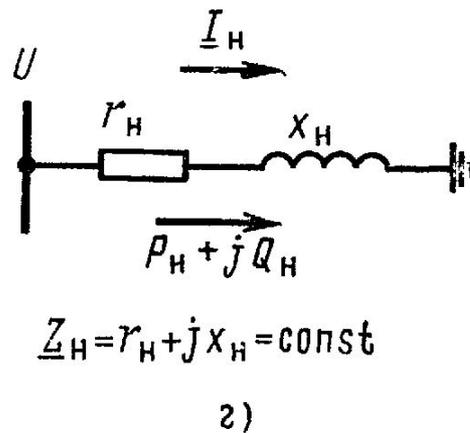
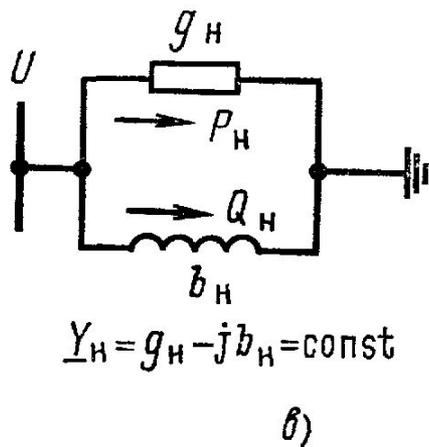
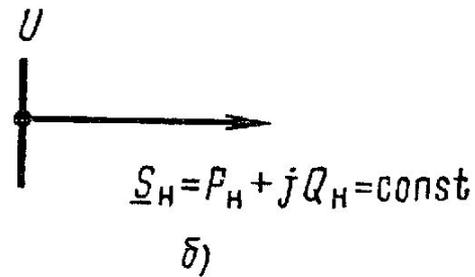
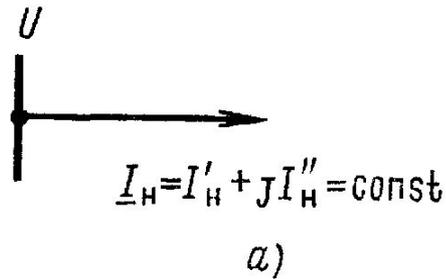


# Асинхронная нагрузка



$$P = 3I^2 \frac{r_2}{s} = \frac{U^2}{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + X_s^2} \frac{r_2}{s} = \frac{U^2 r_2 s}{r_2^2 + (X_s s)^2}$$

# Задание нагрузок при расчете режимов



Нагрузка задается постоянным по модулю и фазе током

$$\underline{I}_H = I'_H + jI''_H = \text{const.}$$

Нагрузка задается постоянной по величине мощностью

$$\underline{S}_H = P_H + jQ_H = \text{const}$$

$$\underline{I}_H = \frac{\underline{S}_H^*}{\sqrt{3} \underline{U}^*} = \frac{P_H - jQ_H}{\sqrt{3} \underline{U}^*} = \text{var}$$

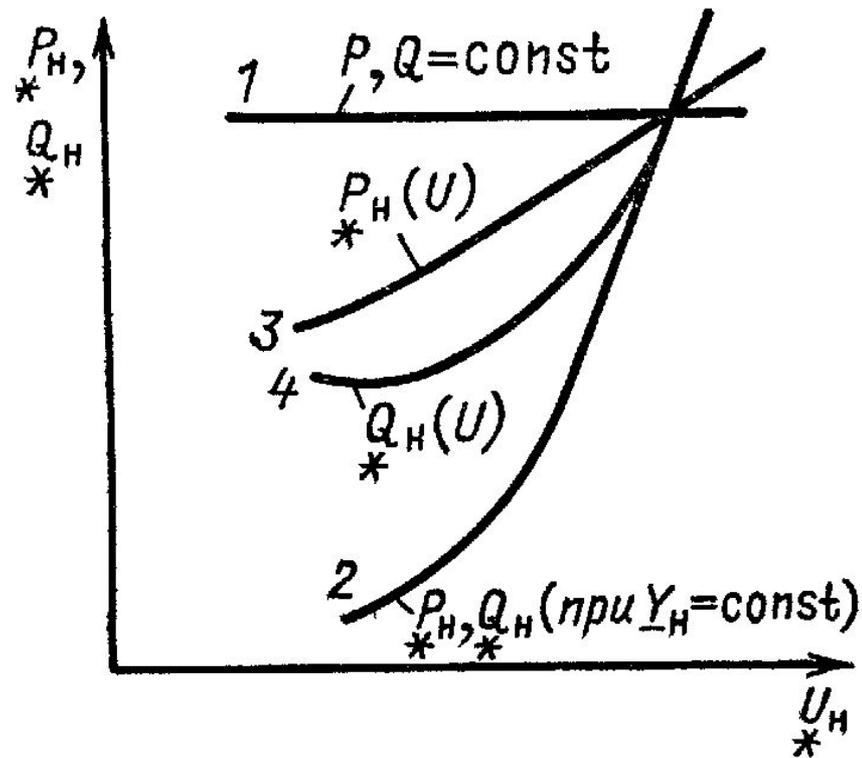
$$\underline{I}_H = \frac{\underline{S}_H^*}{\sqrt{3} \underline{U}_{\text{ном}}^*} = \frac{P_H - jQ_H}{\sqrt{3} U_{\text{ном}}} = \text{const.}$$

Нагрузка представляется постоянной проводимостью

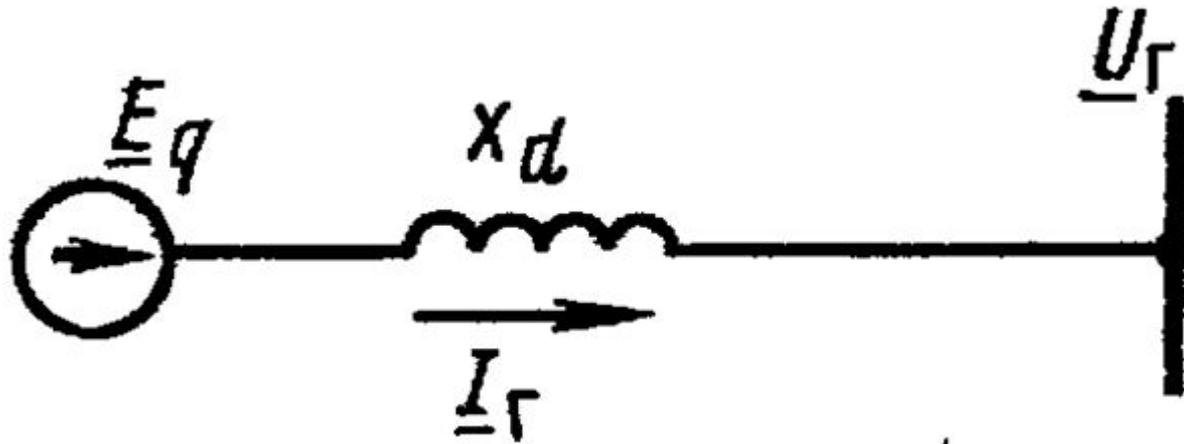
$$\underline{Y}_H = g_H - jb_H = \text{const} \text{ или } \underline{Z}_H = r_H + jx_H = \text{const.}$$

$$P_H = U^2 g_H \text{ и } Q_H = U^2 b_H.$$

# Статические характеристики нагрузок по напряжению

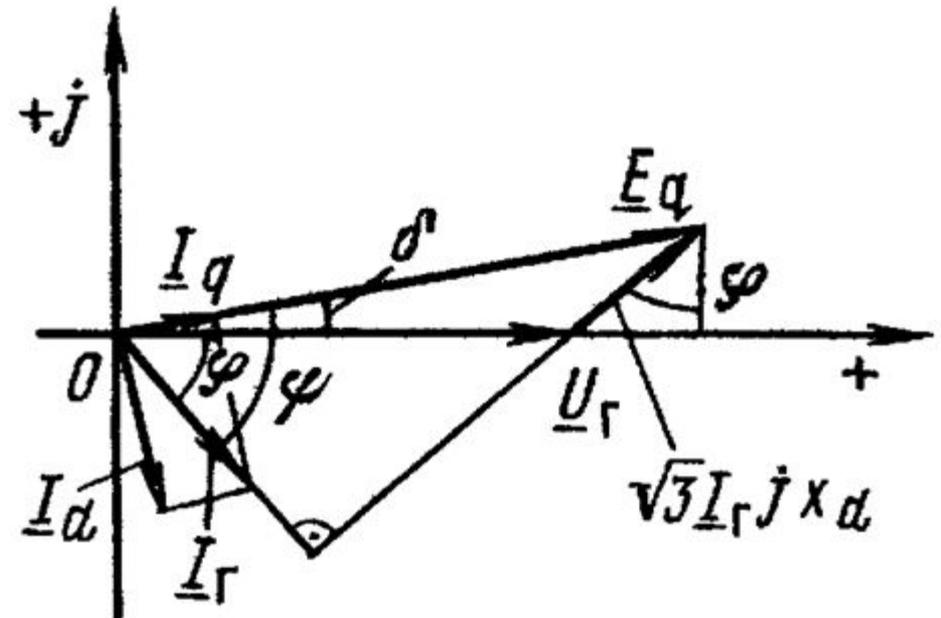


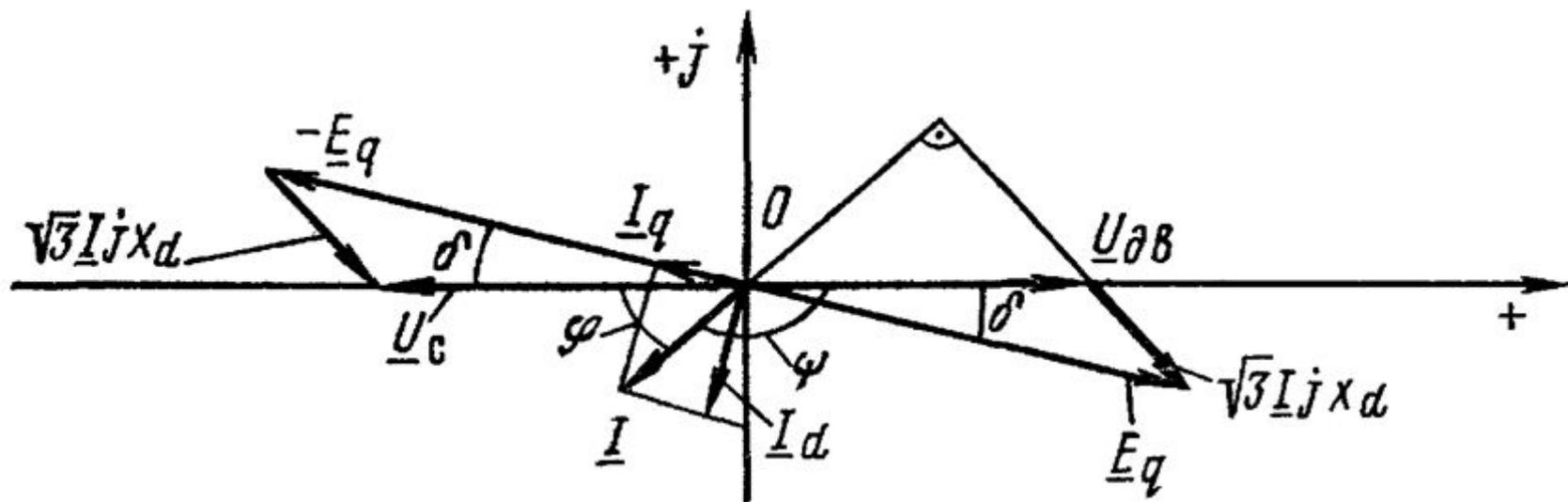
# Нагрузка представляется случайным током



$$\underline{E}_q = \underline{U}_r + \sqrt{3} \underline{I}_r j x_d.$$

$$\underline{I}_q = \underline{I}_r \cos \psi; \quad \underline{I}_d = \underline{I}_r \sin \psi.$$





$$\underline{I}_r = \frac{\underline{E}_q - \underline{U}_r}{\sqrt{3} j x_d}$$

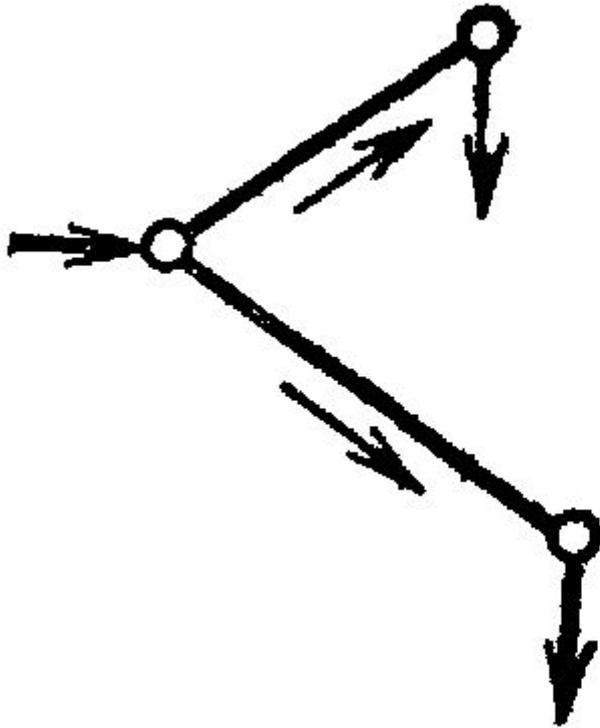
$$\underline{S} = P + jQ = \sqrt{3} \underline{U}_r \underline{I}_r^* = \underline{U}_r \frac{\underline{E}_q^* - \underline{U}_r}{-j x_d}$$

$$P = \frac{U_r E_q}{x_d} \sin \delta;$$

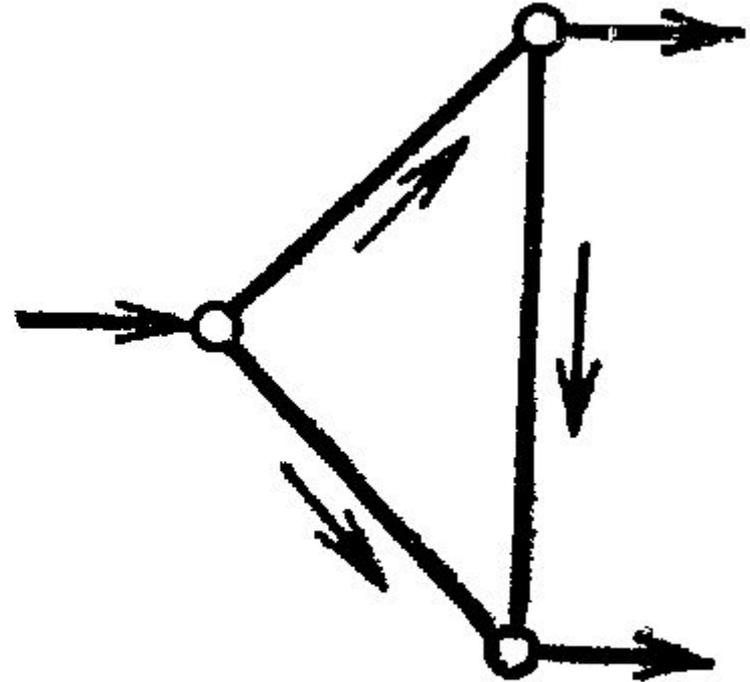
$$Q = \frac{U_r E_q}{x_d} \cos \delta - \frac{U_r^2}{x_d}$$

# Расчет режимов ЛЭП

# Схема соединения электрической сети



Разомкнутая сеть



Замкнутая сеть

# Расчет режима линии электропередач

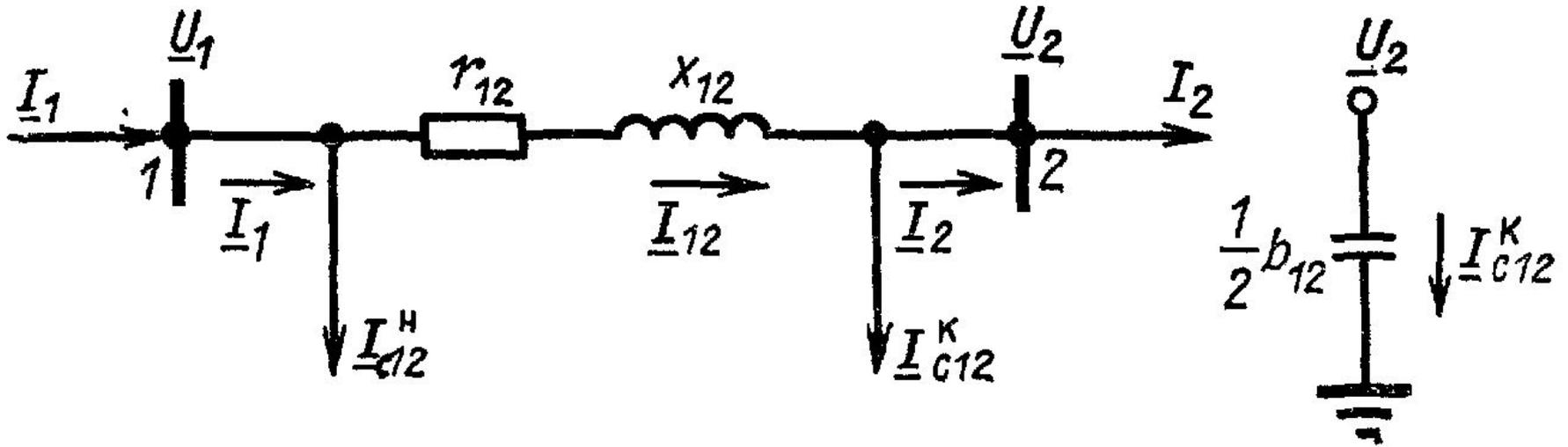
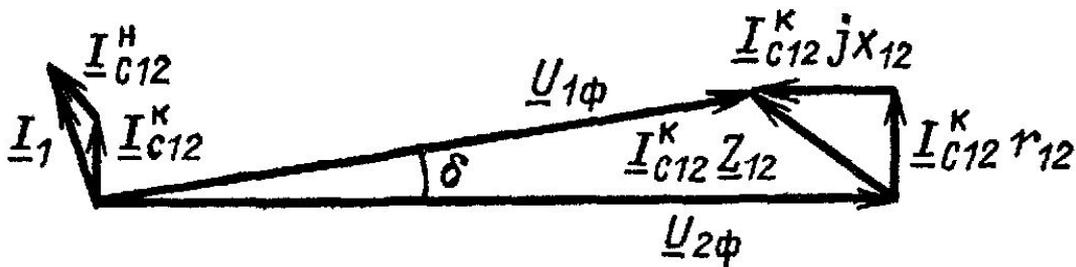
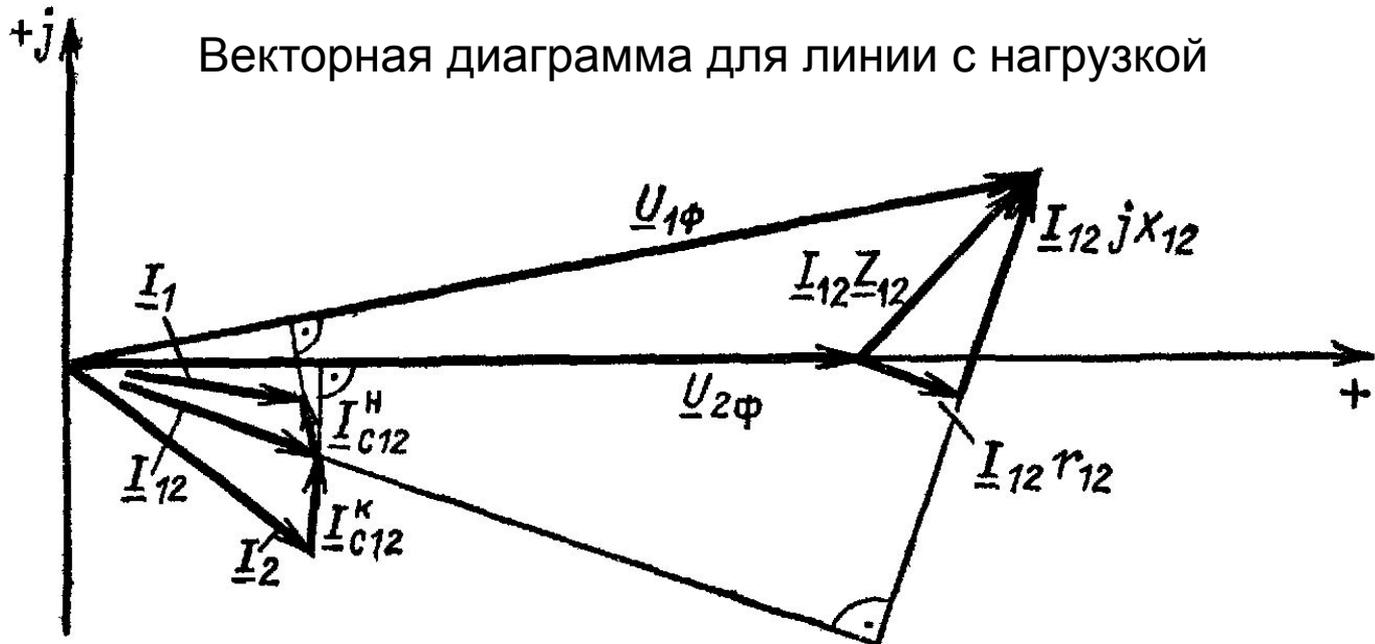


Схема замещения

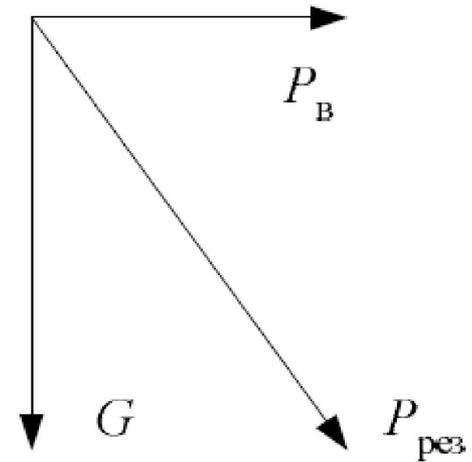
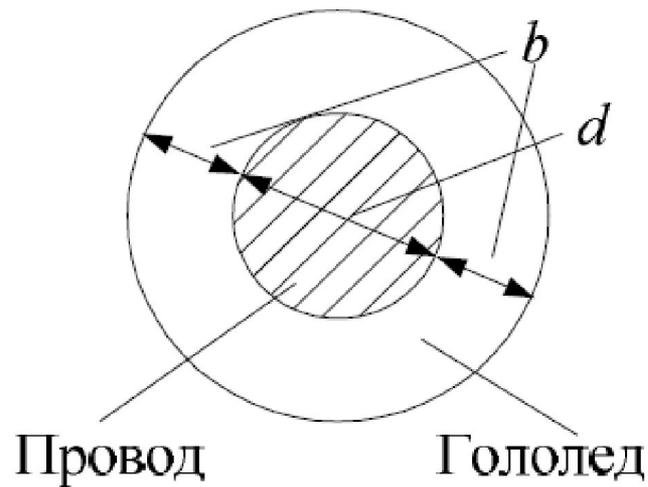
Определение  
емкостного тока

# Расчет режима линии электропередач



Векторная диаграмма для линии на холостом ходу

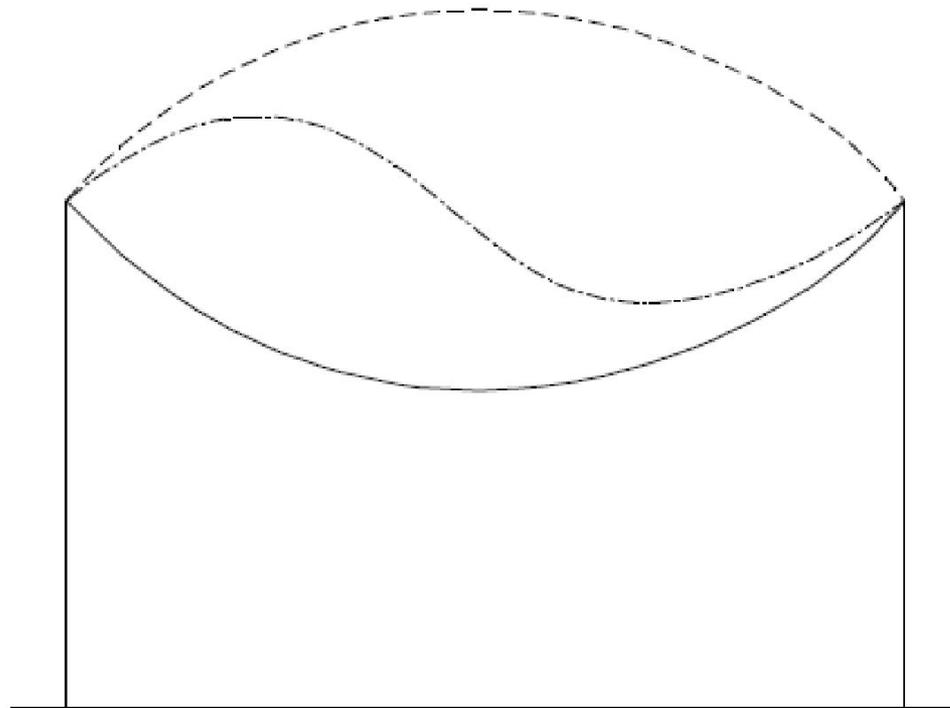
# Действие гололеда на провода ВЛ



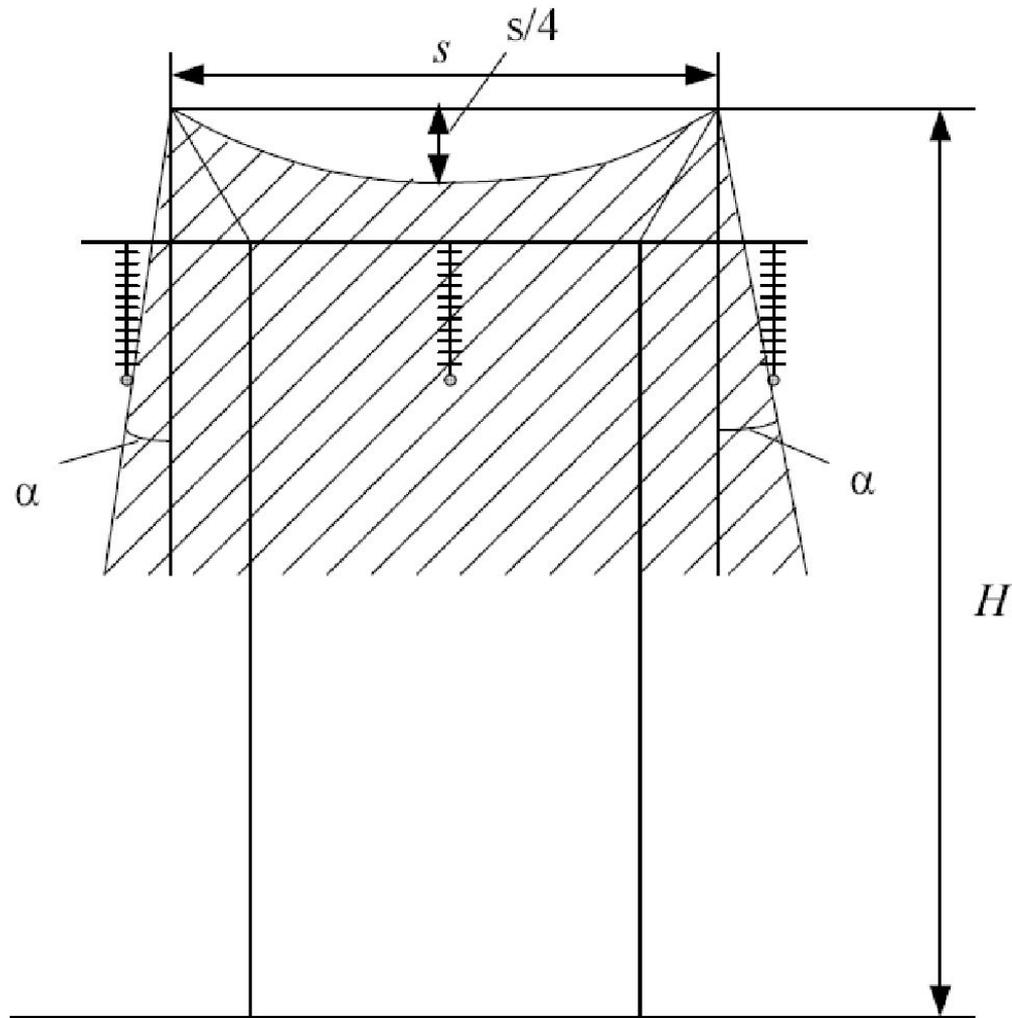
Результирующая нагрузка на провод

Поперечное сечение провода с гололедом

# Волны пляски на проводе в пролете



# Защитная зона грозозащитных тросов



# Параметры воздушных и кабельных линий

Активное сопротивление провода или жилы кабеля пересчитанное с учетом температуры:

$$r_{\theta} = r_{20^{\circ}\text{C}} [1 + 0,004(\theta - 20)]$$

Результирующее индуктивное сопротивление:

$$X = X_L - X_M$$

Погонное индуктивное сопротивление:

$$x_0 = \omega \left( 4,6 \lg \frac{2D_{\text{ср}}}{d} + 0,5\mu \right) 10^{-4}$$

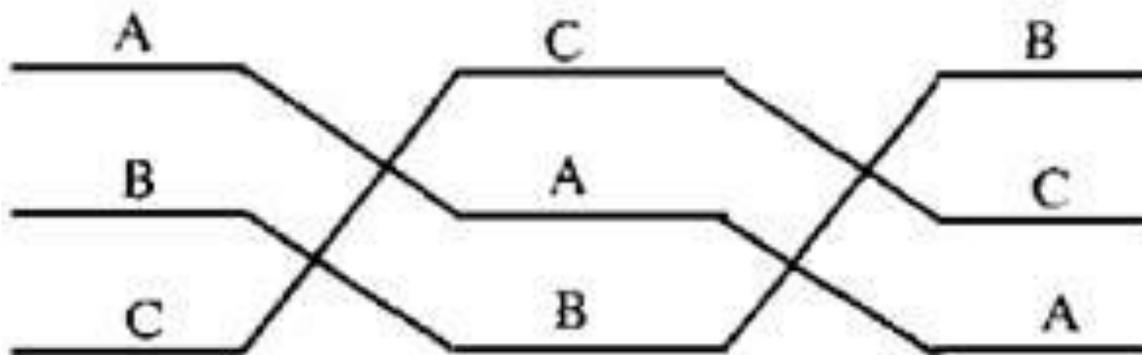
Средне геометрическое расстояние между фазами:

$$D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{D_{AB} D_{BC} D_{AC}}$$

Для проводов из цветных металлов и одного провода линии:

$$x_0 = 0,144 \lg \frac{2D_{\text{ср}}}{d} + 0,0156$$

Для выравнивания (симметрирования) сопротивлений фаз проводов ВЛ применяется транспозиция проводов



# Индуктивность кабельных линий

- 0,06 Ом/км у трехжильных кабелей до 1 кВ
- 0,08 Ом/км у трехжильных кабелей 6-10 кВ
- 0,15 Ом/км у одножильных кабелей 35-220 кВ

# Емкостная проводимость линии

Погонная емкостная проводимость:

$$b_0 = \frac{7,58}{\lg \frac{2D_{\text{cp}}}{d}} 10^{-6}$$

Среднее значение  $b_0$  для ЛЭП 110-220 кВ составляет 2,7 мкСм/км.

# Проводимость обусловленная короной на ВЛ

$$g_0 = \frac{\Delta P_{\text{кор.ср}}}{U_{\text{НОМ}}^2}$$

Потери на корону для ВЛ разных напряжений

при напряжении, кВ	220	330	500	750	1150
потери, кВт/км	2,7	4,3	8,0	18,3	41,1

Для расщепленной фазы  
погонные сопротивления и емкостная  
проводимость вычисляются по формулам

$$r_0 = \frac{r_{0\text{пр}}}{n},$$

$$x_0 = 0,144 \lg \frac{2D_{\text{ср}}}{d_{\text{ЭКВ}}} + \frac{0,0156}{n},$$

$$b_0 = \frac{7,58}{\lg \frac{2D_{\text{ср}}}{d_{\text{ЭКВ}}}},$$

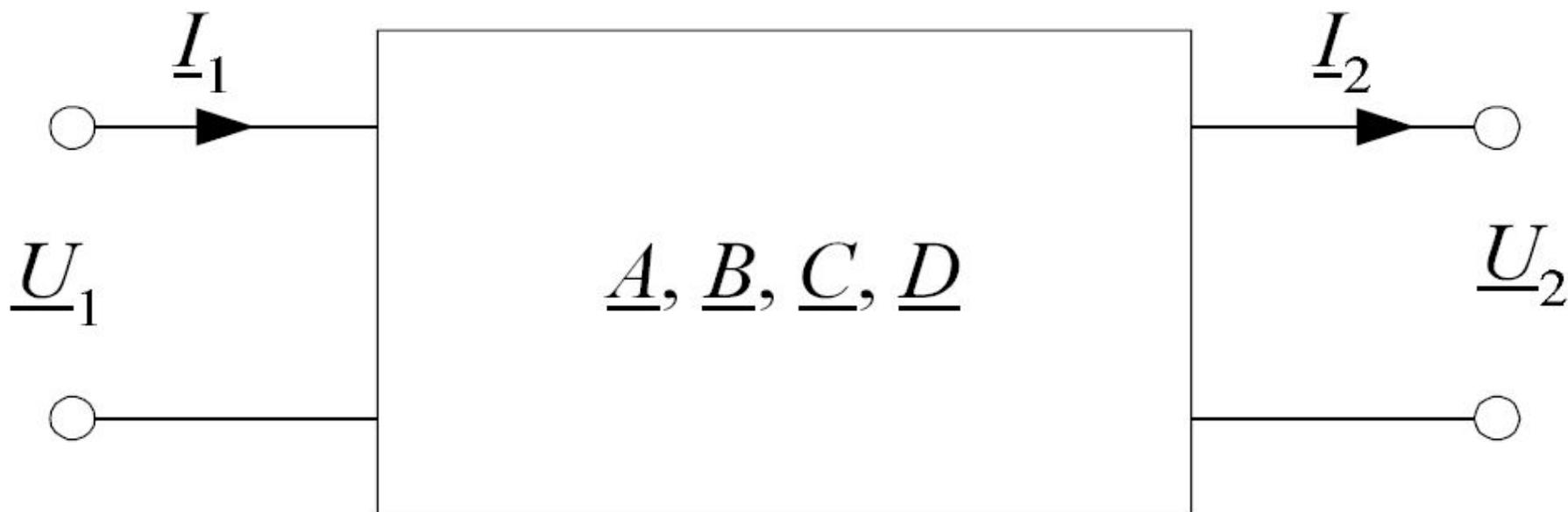
Эквивалентный диаметр расщепленного провода -  $d_{\text{ЭКВ}} = \sqrt[n]{2^{n-1} d \prod_{i=2}^n a_{1i}},$

# Средние значения параметров расщепленной фазы ВЛ

Напряжение, кВ	$x_0$ , Ом/км	$b_0$ , мкСм/км
330, 500	0,32	3,7
750	0,29	4,2
1150	0,23	4,6

# Схемы замещения ЛЭП

Каждая фаза ЛЭП может быть  
представлена в виде  
четырёхполюсника



# Уравнения четырехполюсника связывают напряжения и токи на входе и выходе

$$\underline{U}_1 = \underline{A}\underline{U}_2 + \sqrt{3}\underline{B}\underline{I}_2,$$
$$\underline{I}_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}\underline{C}\underline{U}_2 + \underline{D}\underline{I}_2.$$

Так как ЛЭП это объект с распределенными параметрами, который описывается Уравнениями длинной линии, учитывающими волновой характер распространения тока и напряжения вдоль линии:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \operatorname{ch} \underline{\gamma}_0 l + \sqrt{3} \underline{I}_2 \underline{Z}_C \operatorname{sh} \underline{\gamma}_0 l,$$
$$\underline{I}_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} \underline{U}_2 \frac{1}{\underline{Z}_C} \operatorname{sh} \underline{\gamma}_0 l + \underline{I}_2 \operatorname{ch} \underline{\gamma}_0 l,$$

Волновое сопротивление линии:

$$\underline{Z}_C = \sqrt{\frac{r_0 + jx_0}{g_0 + jb_0}}$$

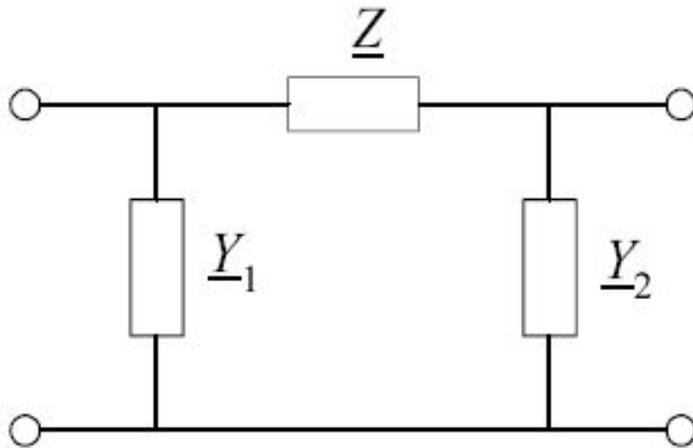
Коэффициент распространения волны:

$$\underline{\gamma}_0 = \alpha_0 + j\beta_0 = \sqrt{(r_0 + jx_0)(g_0 + jb_0)}$$

Коэффициенты четырехполюсника ЛЭП:

$$\underline{A} = \underline{D} = \operatorname{ch}\gamma_0 l, \quad \underline{B} = \underline{Z}_C \operatorname{sh}\gamma_0 l, \quad \underline{C} = \frac{1}{\underline{Z}_C} \operatorname{sh}\gamma_0 l$$

# П-образная схема замещения



Параметры четырехполюсника для П-образной схемы замещения:

$$\underline{A} = (1 + \underline{Z}\underline{Y}_2),$$

$$\underline{B} = \underline{Z},$$

$$\underline{C} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_1\underline{Z}\underline{Y}_2 + \underline{Y}_2,$$

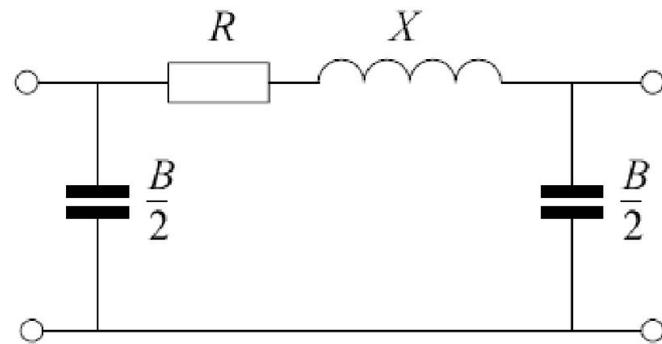
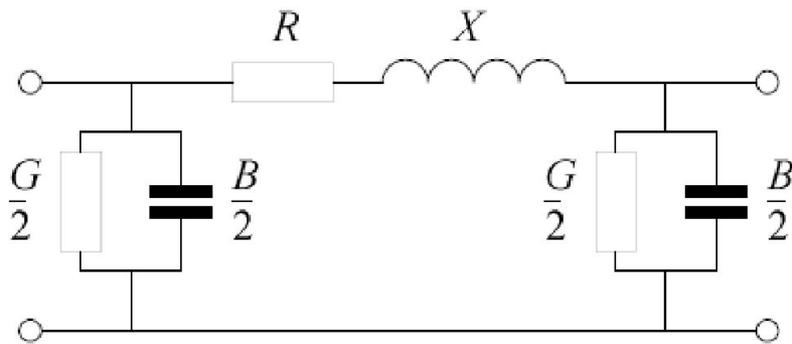
$$\underline{D} = (1 + \underline{Z}\underline{Y}_1).$$

Выражения для определения параметров П-образной схемы замещения:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_C \operatorname{sh} \underline{\gamma}_0 l,$$

$$\underline{Y}_1 = \underline{Y}_2 = \frac{1}{\underline{Z}_C} \operatorname{th} \frac{\underline{\gamma}_0 l}{2}.$$

# Упрощение расчетов параметров ЛЭП



$$\underline{Z} = (r_0 + jx_0)l = R + jX,$$
$$\underline{Y}_1 = \underline{Y}_2 = \frac{(g_0 + jb_0)l}{2} = \frac{G}{2} + j\frac{B}{2}.$$

# Упрощенные схемы ЛЭП

