

## **ЛЕКЦИЯ №13**

### **Тема: «Регулирование напряжения в электрических сетях» (1 час)**

**План:**

- 1. Общая характеристика режима электрической сети по напряжению;**
- 2. Регулирование напряжения на электростанциях;**
- 3. Регулирование напряжения на подстанциях.**

## Общая характеристика режима электрической сети по напряжению

Электроэнергия, поставляемая потребителям, должна иметь определенные качественные показатели. ГОСТ 13109-97 устанавливает показатели и нормы качества электроэнергии в точках электрических сетей систем электроснабжения общего назначения, к которым присоединяются электрические сети, находящиеся в собственности различных потребителей, или приемники электроэнергии (в точках общего присоединения).

По ГОСТ 13109-97 предъявляются требования в основном к показателям качества электроэнергии связанных с режимом напряжения электрической сети (исключение - отклонению частоты  $\Delta f$ ), которое наряду с качеством электроэнергии определяет экономичность работы электрической сети и электроснабжения потребителей.

Непрерывное изменение электрических нагрузок приводит к непрерывному изменению падений напряжения в элементах электрической сети и, следовательно, к непрерывному изменению отклонений напряжения  $U$  от его номинального значения  $U_{ном}$  в различных узлах электрической сети. **Нормально допустимые и предельно допустимые значения установившегося отклонения напряжения**

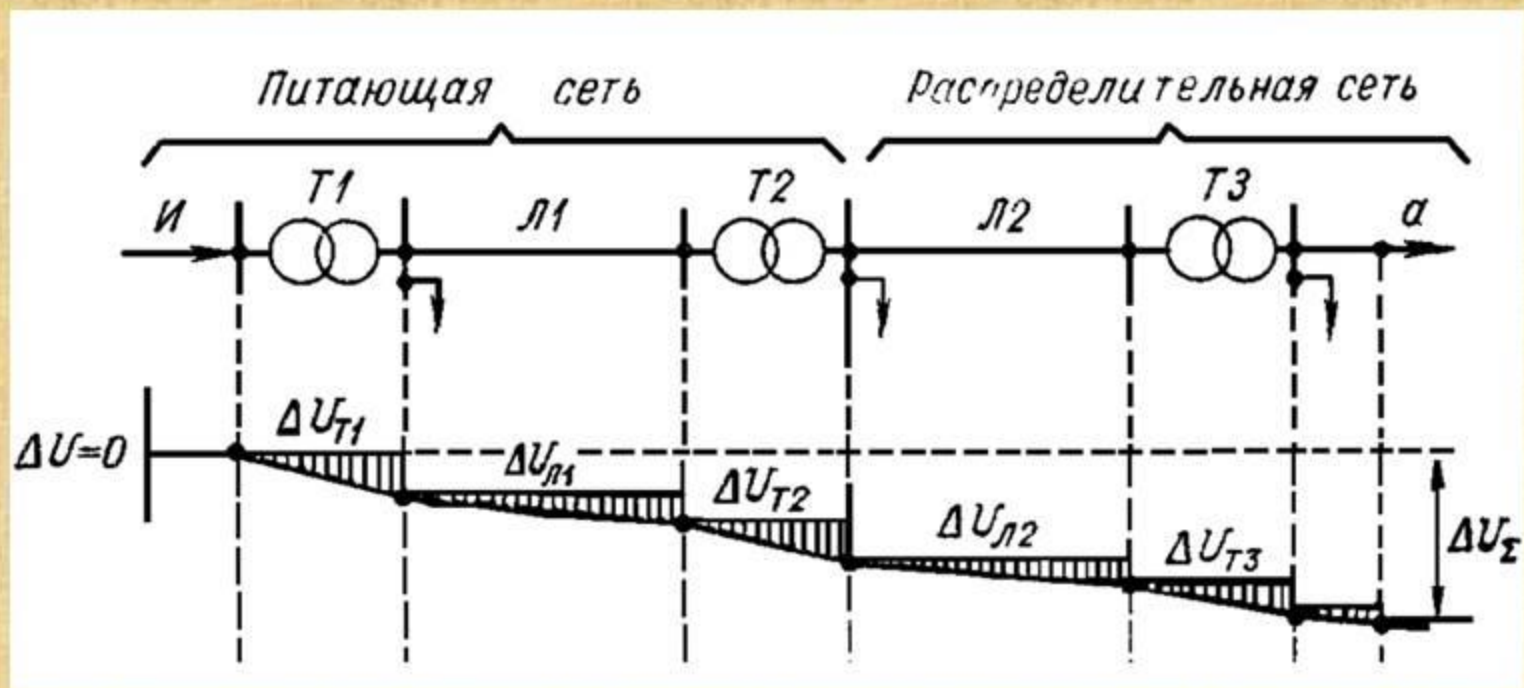
$$\delta U = \frac{U - U_{ном}}{U_{ном}} 100\%$$

на выводах приемников электрической энергии, регламентируемые ГОСТ 13109-97, равны соответственно  $+5\%$  и  $+10\%$ .

В нормальном режиме работы электрической сети значения  $\delta U$  на выводах приемников электрической энергии в течение суток не должны превышать предельно допустимые значения, при этом с вероятностью 95% значения  $\delta U$  не должны превышать нормально допустимые значения. В послеаварийном режиме работы электрической сети значения  $\delta U$  на выводах приемников электрической энергии не должны превышать предельно допустимые значения. При аварийных нарушениях в электрической сети допускается кратковременный выход значений  $\delta U$  за предельно допустимые значения с последующим их восстановлением до значений, установленных для послеаварийного режима.



**САМОСТОЯТЕЛЬНО!  
ПОВТОРИТЬ (ВЫУЧИТЬ) ОСНОВНЫЕ И  
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ  
КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ!!!!!!!!!!!!!!**



### Суммарная потеря напряжения при передаче электроэнергии

Рисунок наглядно подтверждает тот факт, что при передаче электрической энергии, неизбежно происходят потери напряжения. Поэтому даже при наличии напряжения, соответствующего нормативным показателям на месте производства электрической энергии, необходимым является его поддержание, потому что, как видно из рисунка, после генерации электрической энергии, происходят потери напряжения в питающих трансформаторах и линиях электропередач. Таким образом, из питающей сети в распределительную сеть уже поступает напряжение пониженного уровня.

Так, например, рассматривая электрическую систему, состоящую из сетей с номинальным напряжением 220, 110, 35, 10, 0,38 кВ, можно подсчитать суммарную потерю напряжения. В каждой из первых четырех сетей потеря напряжения составляет 10%, в каждом связующем эти сети трансформаторы – 5%, на последнем участке сети – 5%. Таким образом, получается, что суммарная потеря напряжения в сети по пути наибольшего протяжения составляет 60%.

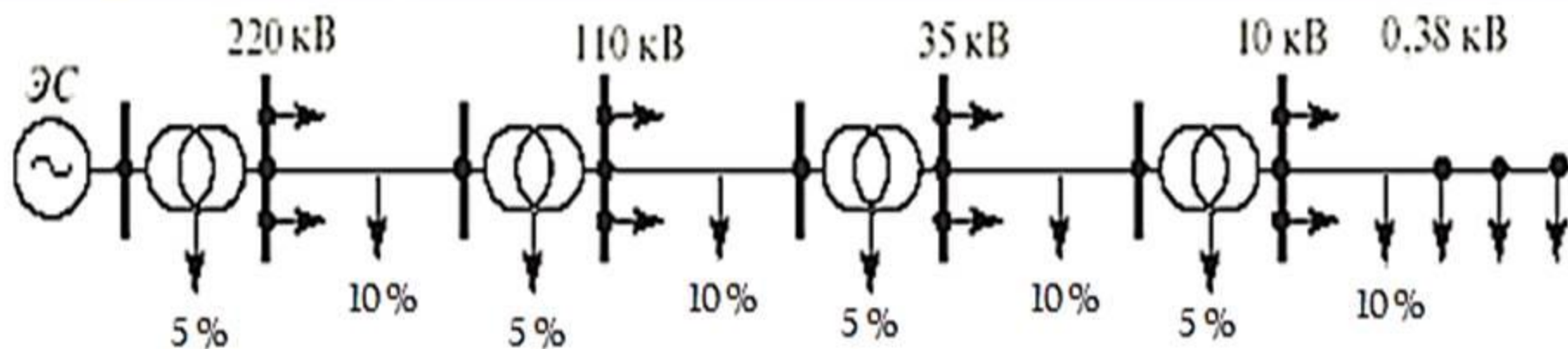


Схема передачи электроэнергии и потери напряжения

Учет надежности при рассмотрении режима напряжений заключается в том, чтобы в любых нормальных, аварийных и послеаварийных режимах напряжения в любых точках электрической сети не должны превышать или быть ниже определенного допустимого значения.

Наибольшие рабочие напряжения электрических сетей  $U_{\text{раб max}}$ , определяемые надежностью работы изоляции, нормируются ГОСТ 721-77 в следующих пределах от номинального напряжения электрической сети  $U_{\text{ном}}$ :

|  |   |
|--|---|
| $U_{\text{ном}}=6, 10 \text{ кВ}$      | $U_{\text{раб max}}=1,2 U_{\text{ном}};$  |
| $U_{\text{ном}}=35, 110 \text{ кВ}$    | $U_{\text{раб max}}=1,15 U_{\text{ном}};$ |
| $U_{\text{ном}}=220, 330 \text{ кВ}$   | $U_{\text{раб max}}=1,1 U_{\text{ном}};$  |
| $U_{\text{ном}}=500 \text{ кВ и выше}$ | $U_{\text{раб max}}=1,05 U_{\text{ном}}.$ |

Наименьшие рабочие напряжения электрических сетей 110 кВ и выше, определяемые, главным образом, устойчивостью параллельной работы генераторов и узлов нагрузки, ограничиваются на уровне  $(0,8...0,9)U_{\text{ном}}$ .

Экономичность режима напряжений электрической сети обусловлена величиной потерь активной мощности и энергии в ее элементах (линиях и трансформаторах). Эти потери в продольных активных сопротивлениях линий и трансформаторов обратно пропорциональны квадрату напряжения. Поэтому повышение уровня напряжения является одним из основных средств уменьшения потерь мощности и энергии в электрических сетях напряжением до 220 кВ включительно.

Для обеспечения требуемых технико-экономических показателей режимов работы электрических сетей необходимо регулировать напряжение. Для различных электрических сетей цели регулирования напряжения различаются между собой.

Основной целью регулирования напряжения в местных распределительных сетях, находящихся в непосредственной электрической близости от потребителей, является поддержание отклонений напряжения в пределах, установленных ГОСТ 13109-97.

Основной целью регулирования напряжения в районных распределительных сетях является обеспечение экономичного режима их работы за счет уменьшения потерь мощности и энергии.

Основной целью регулирования напряжения в системообразующих сетях является ограничение внутренних перенапряжений для обеспечения надежной работы изоляции оборудования таких сетей, предельное рабочее напряжение которых составляет  $1,05U_{ном}$ .

Регулирование напряжения осуществляется на шинах генераторов электростанций, шинах высшего и среднего напряжения крупных узловых подстанций в системообразующих сетях, шинах центров питания распределительных районных и местных электрических сетей.

Регулирование напряжения осуществляется с помощью специальных технических средств, называемых регулируемыми устройствами. Все эти регулирующие устройства условно можно разделить на два типа: узловые и линейные. Узловые устройства изменяют режимные параметры сети – напряжение и реактивную мощность в точке подключения к сети. Это генераторы электростанций, синхронные компенсаторы, батареи конденсаторов, нерегулируемые и регулируемые реакторы и статические регулируемые источники реактивной мощности.

Линейные устройства изменяют схемные параметры сети – реактивное сопротивление, коэффициенты трансформации. Это конденсаторные установки продольной компенсации, трансформаторы, автотрансформаторы с устройствами регулирования напряжения под нагрузкой РПН, специальные регулировочные трансформаторы.



# Регулирование напряжения на электростанциях

Основное назначение генераторов электростанций – это выдача в электрическую сеть заданного значения активной мощности. Кроме того, генераторы являются основными источниками реактивной мощности в ЭЭС. Изменение выдаваемой генератором реактивной мощности и изменение напряжения на его выходе осуществляется за счет регулирования тока возбуждения генератора. Напряжение на выходе генератора  $U_g$  изменяется в пределах  $(0,95...1,05)U_{ном}$ .

Увеличение регулировочного диапазона по напряжению, например до  $1,1U_{ном}$ , потребует увеличения тока возбуждения генератора и, следовательно, увеличения выдаваемой генератором реактивной мощности. При номинальной нагрузке генератора полной мощностью и увеличении выдаваемой генератором реактивной мощности его активную мощность необходимо снижать во избежание перегрузки генератора.

Последнее условие противоречит основному назначению генераторов – выдавать заданную активную мощность. Повышающие трансформаторы на электростанциях или вообще не имеют регулировочного диапазона по напряжению, или этот диапазон ограничен пределами  $\pm 2 \times 2,5\% U_{ном}$ .

Реальные потери напряжения в электрических сетях значительно больше диапазона регулирования напряжения генераторами и повышающими трансформаторами электростанций. Потери напряжения в линиях электропередачи зависят от их протяженности, нагрузки и напряжения и могут достигать 10% в сети одного напряжения. Такой же порядок имеют потери напряжения при каждой трансформации.

От электростанций до потребителей электроэнергия проходит 3...5 ступеней трансформации напряжения. Нетрудно оценить суммарную потерю напряжения, которая может заметно превысить 50%.

Из приведенных данных видно, что регулирования напряжения за счет генераторов и трансформаторов электростанций явно недостаточно для покрытия потерь напряжения в электрической сети. Поэтому генераторы и трансформаторы электростанций в общем случае являются лишь вспомогательным средством регулирования напряжения в

# Регулирование напряжения на подстанциях

Для достижения обеспечения требований к режиму напряжений применительны следующие способы:

- централизованное изменение режима напряжений или регулирование напряжения на шинах или выводах центра питания;
- изменение или регулирование значений потерь напряжения в отдельных элементах сети;
- изменение и регулирование коэффициента трансформации линейного регулятора или трансформатора, включенного на участке сети от центра питания до электроприёмника.

Термин «изменение» подразумевает проведение на длительный период времени единовременного мероприятия.

Таковым может быть:

- изменение рабочего положения регулировочного ответвления (ПБВ) трансформатора;
  - включение установки продольно-емкостной компенсации;
- замена сечения проводов.

- При этих мероприятиях режим напряжения улучшается, но закон изменения напряжения остается обусловленным изменением нагрузки.

Под понятием «регулирования» подразумевается текущее изменение какого-либо параметра – напряжения, коэффициента трансформации, потери напряжения – применяемое в целях изменения режима напряжения.

Регулирование обычно производится автоматически, и возможности регулирования весьма ограничены.

Применяются следующие методы регулирования:

- централизованное регулирование напряжения;
- групповое централизованное регулирование напряжения;
- локальное (местное) регулирование напряжения.

**Централизованное регулирование напряжения** отличается от локального непосредственно местом, где производится регулирование напряжение: при централизованном – в центре питания, при локальном – непосредственно у потребителя.

**Централизованное регулирование напряжения** применяется в случае наличия потребителей, имеющих однотипные графики нагрузок. В этом случае регулирование напряжение для всех потребителей, питающихся от данного центра питания, производится одновременно.

**Групповое централизованное регулирование напряжения** отличается от централизованного тем, что имеются присоединенные потребители с разнотипными графиками потребления в различные временные интервалы. В этом случае все потребители сортируются и объединяются по критерию схожести графиков, так формируются группы потребителей, которые позже подключаются к разным секциям шин ЦП, которые оснащены отдельными регулирующими устройства.

**Локальное (местное) регулирование напряжения** также подразделяется на групповое и индивидуальное по тому же принципу, что и централизованное. Регулирование напряжения производится местными средствами регулирования – например, управляемыми батареями конденсаторов, синхронными двигателями

## Способы регулирования напряжения:

а) изменение режима напряжений или регулирование напряжения на шинах ЦП;

б) изменение значения потери напряжения в отдельных элементах сети (линиях, трансформаторах) или на нескольких участках сети одновременно;

в) изменение коэффициента трансформации нерегулируемых (с ПБВ) и регулируемых (с РПН) трансформаторов и автотрансформаторов, включенных на участке сети ЦП—ЭП (что приводит к изменению величины соответствующих надбавок напряжения).

## Встречное регулирование

При сложившейся ситуации оперативное управление режимом сетевого района по напряжению сосредоточивается в ЦП. Закон регулирования напряжения в ЦП определяется ПУЭ: устройства регулирования напряжения должны обеспечивать поддержание напряжения на шинах 3...20 кВ электростанций и подстанций, к которым присоединены распределительные сети, в пределах не ниже  $1,05U_{ном}$  в период наибольших нагрузок и не выше  $U_{ном}$  в период наименьших нагрузок этих сетей.

Регулирование напряжения в ЦП местной распределительной сети называется централизованным регулированием напряжения.

Регулирование, при котором напряжение на шинах ЦП в период наибольших нагрузок повышается, а в период наименьших нагрузок уменьшается, называется встречным регулированием напряжения.

Рассмотрим подробнее принцип встречного регулирования напряжения в ЦП сетевого района. На рисунке показана упрощенная схема сетевого района. От шин ЦП через распределительный трансформатор с сопротивлением  $Z_{РТ}$  получают питание ближние потребители электроэнергии БП. От шин ЦП отходит линия сопротивлением  $Z_{Л}$ , в конце которой через распределительный трансформатор с сопротивлением  $Z_{РТ}$  подключены дальние потребители электроэнергии ДП.

Напряжение у ближнего потребителя БП составляет

$$U_б = U_{цп} - \Delta U_{рт},$$

где  $U_{цп}$  – напряжение в ЦП;

$\Delta U_{рт}$  – потеря напряжения в распределительном трансформаторе.

Напряжение у дальнего потребителя ДП составляет

где  $\Delta U_{л}$  – потеря напряжения в сопротивлении линии  $Z_{л}$ .

$$U_{д} = U_{цп} - \Delta U_{л} - \Delta U_{рт},$$

Согласно ГОСТ 13109-97 нормально

допустимые значения отклонений напряжения у потребителей находятся в диапазоне  $+5\% U_{ном}$ .

При поддержании в ЦП напряжения, равного номинальному напряжению сети  $U_{цп} = U_{ном}$ , изменения напряжения от ЦП до ближнего и дальнего потребителей, вычисленные по формулам характеризуются эякурами 1 для режима макс. нагрузки и эякурами 2 для режима мин. нагрузки. Из этих эякур видно, что напряжение у ближнего потребителя в режимах мин. и макс. нагрузки находится в доп. пределах. В режиме мин. нагрузки напряжение у дальнего потребителя находится в доп. пределах. В режиме макс. нагрузки напряжение у дальнего потребителя ниже доп. значения.

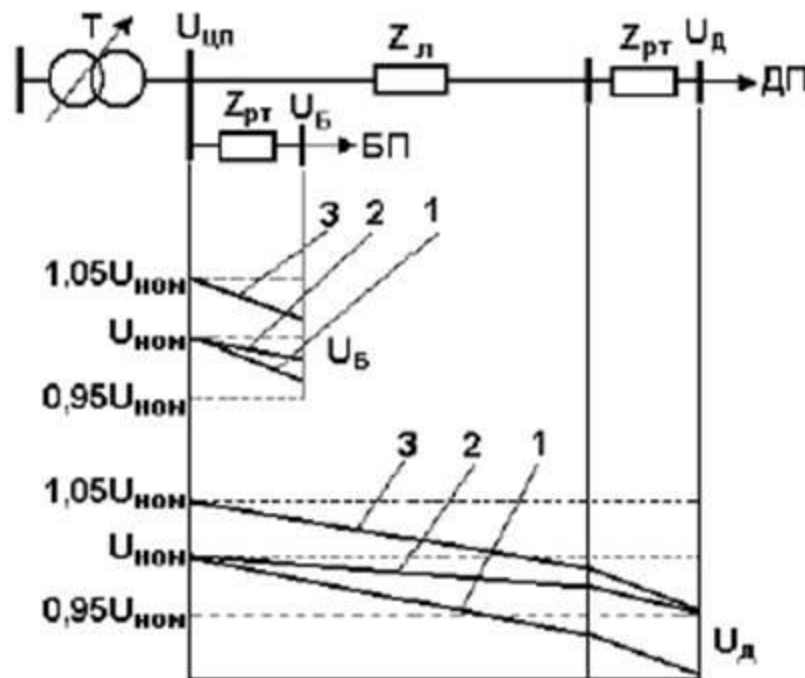


Схема сети и эякура напряжений, поясняющие принцип встречного регулирования напряжения

Для поддержания допустимого уровня напряжения у дальних потребителей в режиме максимальной нагрузки необходимо повысить напряжение в ЦП. При увеличении напряжения в ЦП до значения  $U_{цп}=1,05U_{ном}$  изменения напряжений в сети до ближнего и дальнего потребителей характеризуются эпюрами 3. В этом случае напряжения у дальнего и ближнего потребителей находятся в допустимых пределах. Таким образом, напряжение на шинах ЦП в режиме максимальной нагрузки необходимо поддерживать не ниже  $1,05U_{ном}$ , а в режиме минимальной нагрузки – на уровне  $U_{ном}$ .

В ряде случаев централизованное встречное регулирование не может обеспечить требуемый уровень напряжения. Это обусловлено различными параметрами линий, отходящих от ЦП, и неоднородностью графиков нагрузки различных потребителей. В таких случаях необходимо использовать местное регулирование напряжения у потребителей, для которых не обеспечивается требуемый уровень напряжения. В качестве средств местного регулирования напряжения могут использоваться регулировочные трансформаторы, компенсирующие устройства, установки продольной компенсации. Выбор того или иного средства регулирования напряжения должен быть обоснован технико-экономическими расчетами.



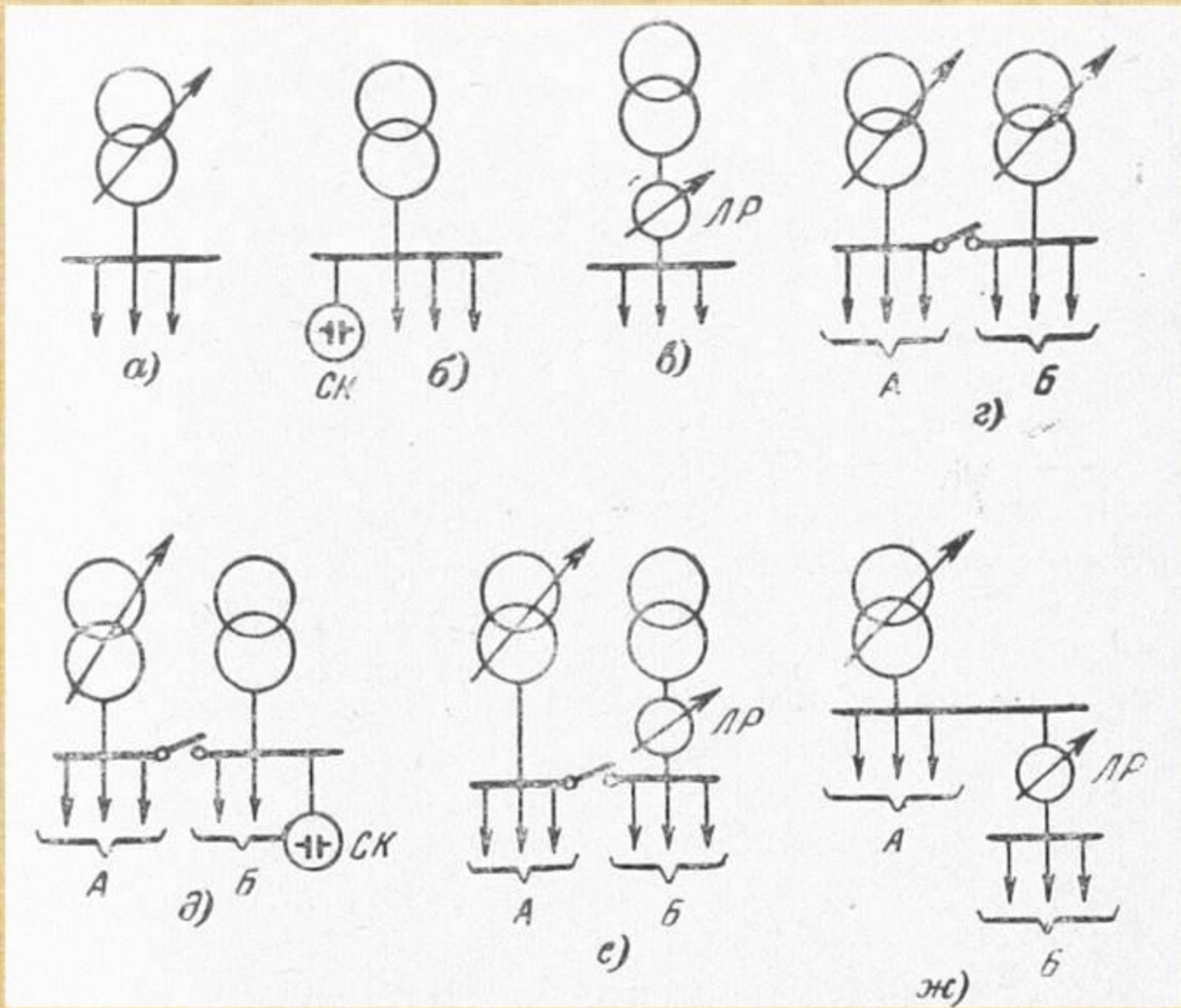
Регулировочный трансформатор



Синхронный компенсатор



Вольтодобавочные трансформаторы

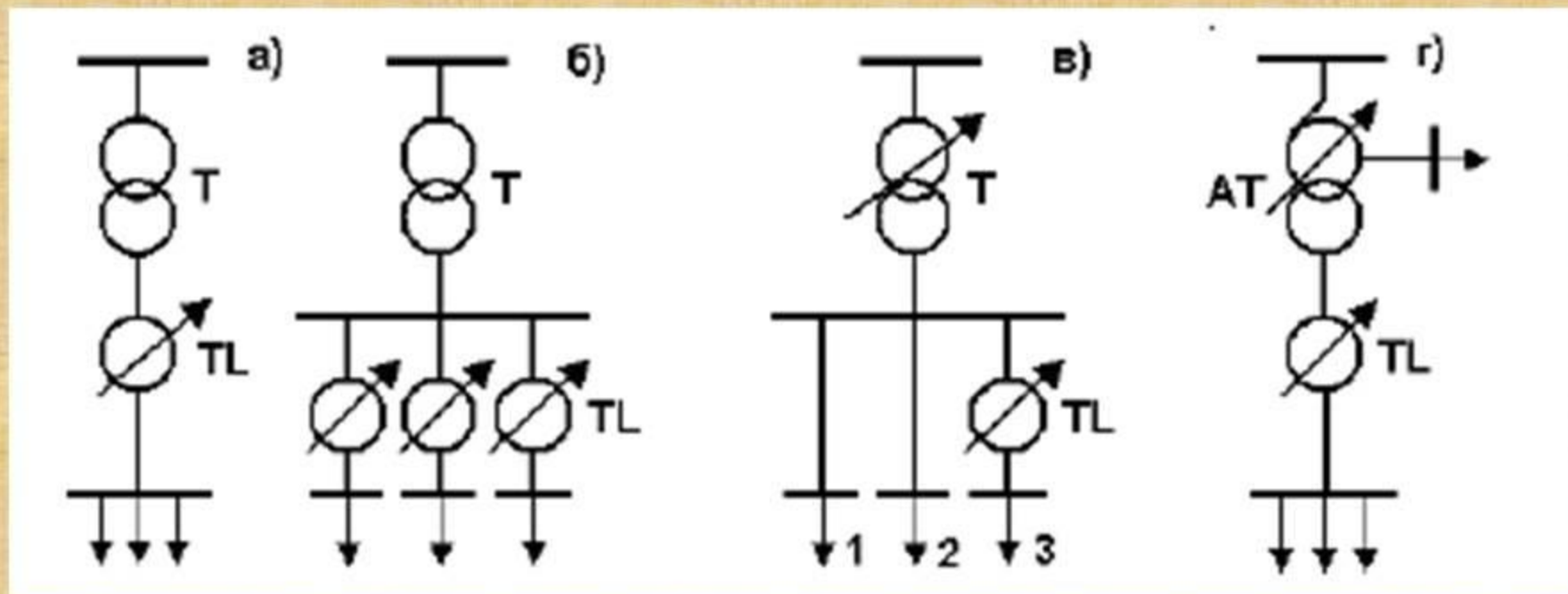


Принципиальные схемы централизованного регулирования напряжения в ЦП



Регулировочные трансформаторы ТЛ вводят добавочное напряжение в основную обмотку трансформатора (автотрансформатора) и применяются в следующих случаях:

- для регулирования напряжения на подстанциях с трансформаторами без РПН при групповом (рис., а) или индивидуальном (рис.,б) регулировании;
- для регулирования напряжения на подстанциях с трансформаторами с РПН, от которых питаются потребители с разным характером нагрузки (рис., в); характер нагрузки потребителя 3 значительно отличается от характера нагрузки потребителей 1 и 2;
- для регулирования низшего напряжения на подстанциях с автотрансформаторами, снабженными устройствами РПН в обмотке среднего напряжения (рис.,г).



Принципиальные схемы включения линейных регулировочных трансформаторов



**САМОСТОЯТЕЛЬНО!  
ИЗУЧИТЬ РЕГУЛИРОВАНИЕ  
НАПРЯЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ  
УСТРОЙСТВ РПН И ПБВ НА  
ТРАНСФОРМАТОРАХ!!!!!!!!!!!!!!**



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**

