

Глава 6

Рабочие режимы электроэнергетических систем. Методы и средства регулирования рабочих режимов.

- §1 Баланс активной мощности и его связь с частотой.
- §2 Баланс реактивной мощности и его связь с напряжением.
- §3 Регулирующий эффект нагрузки.
- §4 Выработка реактивной мощности на электростанциях.
- §5 Компенсация реактивной мощности.
- §6 Компенсирующие устройства.

§1 Баланс активной мощности и его связь с частотой

$$\sum P_{\Gamma} = \sum P_{\Pi} = \sum P_{\text{H}} + \sum \Delta P$$

При неизменном составе нагрузок энергосистемы потребляемая ими мощность связана с частотой переменного тока. При нарушении исходного баланса частота принимает новое значение.

Основные причины нарушения баланса:

- аварийное отключение СГ;
- неплановый рост потребляемой мощности;
- аварийное отключение линий и трансформаторов связи между отдельными электроэнергетическими системами.

$$\sum P_{\Gamma 1} + \sum P_{\Gamma 2} = \sum P_{\Pi 1} + \sum P_{\Pi 2}; \quad \sum P_{\Gamma 1} > \sum P_{\Pi 1}; \quad \sum P_{\Gamma 2} < \sum P_{\Pi 2}$$

В нормальном режиме энергосистемы необходимость регулирования отклонения частоты обусловлена изменением состава и мощности потребителей. Эти изменения мощности в течение суток составляют 20—50 %.

Необходимость регулирования частоты определяется необходимостью обеспечения требуемого качества электрической энергии.

При отклонениях частоты от допустимых значений может существенно изменяться производительность вращающихся установок и механизмов потребителей, а также происходить нарушение технологических процессов.

При снижении частоты увеличивается реактивная мощность потребителей и снижается напряжение на выводах потребителей.

Любое электронное оборудование, использующее в качестве индикатора времени частоту тока в системе электроснабжения, также подвергается воздействию.

Изменение частоты существенно влияет на работу приборов и аппаратов применяемых в телевидении, вычислительной технике.

Однако уникальность электроэнергетики как отрасли определяется тем, что в высоком качестве электроэнергии по частоте чаще всего в большей степени заинтересован сам производитель, нежели ее потребитель. Объясняется это тем, что от стабильности частоты в ЭЭС существенно зависят экономичность и надежность процесса выработки, передачи и распределения электроэнергии.

Показателем КЭ, относящимся к частоте, является **отклонение** значений основной **частоты** напряжения электропитания от номинального значения:

где $\Delta f = \bar{f}_{\text{напр}} - f_{\text{н}}$ - значение основной частоты напряжения электропитания, Гц, измеренное в интервале 10 секунд;

Отклонение частоты в синхронизируемых системах электроснабжения не должно превышать **0,2 Гц** в течении 95% времени интервала в одну неделю и **0,4 Гц** в течение 100% времени в интервале в одну неделю.

Отклонение частоты – это общесистемный показатель качества электроэнергии.

Для регулирования частоты, турбины электростанций снабжают регуляторами скорости, которые при изменении частоты вращения турбоагрегата, изменяя положение регулирующих органов турбины (регулирующих клапанов у тепловой турбины или направляющего аппарата у гидротурбины), меняют объем энергоносителя (пара или воды), который поступает на турбину.

Процесс изменения мощностей генераторов при отклонении частоты, стремящийся сохранить прежнее значение частоты, называют **первичным регулированием**.

Первичное регулирование частоты обычно не обеспечивает поддержание номинальной частоты в системе. Поэтому дополнительно применяют **вторичное регулирование**.

В процессе вторичного регулирования осуществляется изменение мощности, развиваемой турбинами.

В результате действия вторичного регулирования и восстановления нормальной частоты ликвидируются изменения режима, вызванные первичным регулированием частоты. Электростанции и потребители возвращаются в исходный режим работы. Компенсацию всего первоначально возникшего небаланса мощности принимают на себя электростанции вторичного регулирования частоты до тех пор, пока не будет нормализован режим.

В первичном регулировании частоты участвуют все станции энергосистемы. Для вторичного регулирования выделяют только одну или несколько станций – **балансирующих**.

Электростанции вторичного регулирования частоты должны быть достаточно мощными и поддерживать необходимый диапазон регулирования.

Регулировочный диапазон мощности определяется техническими характеристиками оборудования электрических станций, условиями его работы, объемом водохранилища и режимом его использования (для ГЭС) и многими другими факторами.

Наибольшим регулировочным диапазоном обладают

газотурбинные (ГТЭС) — 100 %,

гидроаккумулирующие (ГАЭС) — 70 %

и гидравлические (ГЭС) электростанции — 60—70 %.

ТЭС большой мощности ограничен техническими характеристиками и условиями работы котельного оборудования и обычно не превышает 20 % .

Блоки АЭС до последнего времени проектировались для работы в базовом режиме, т.е. с постоянной мощностью.

В России именно гидроэлектростанции участвуют во вторичном регулировании частоты.

Для восстановления резерва мощности, частично или полностью потраченного в ходе первичного и вторичного регулирования, а также для оперативной коррекции режима работы ЭЭС в иных целях, служат специально выделенные для этого электростанции **третичного регулирования частоты.**

Для восстановления баланса на ЭС необходим резерв мощности и энергии.

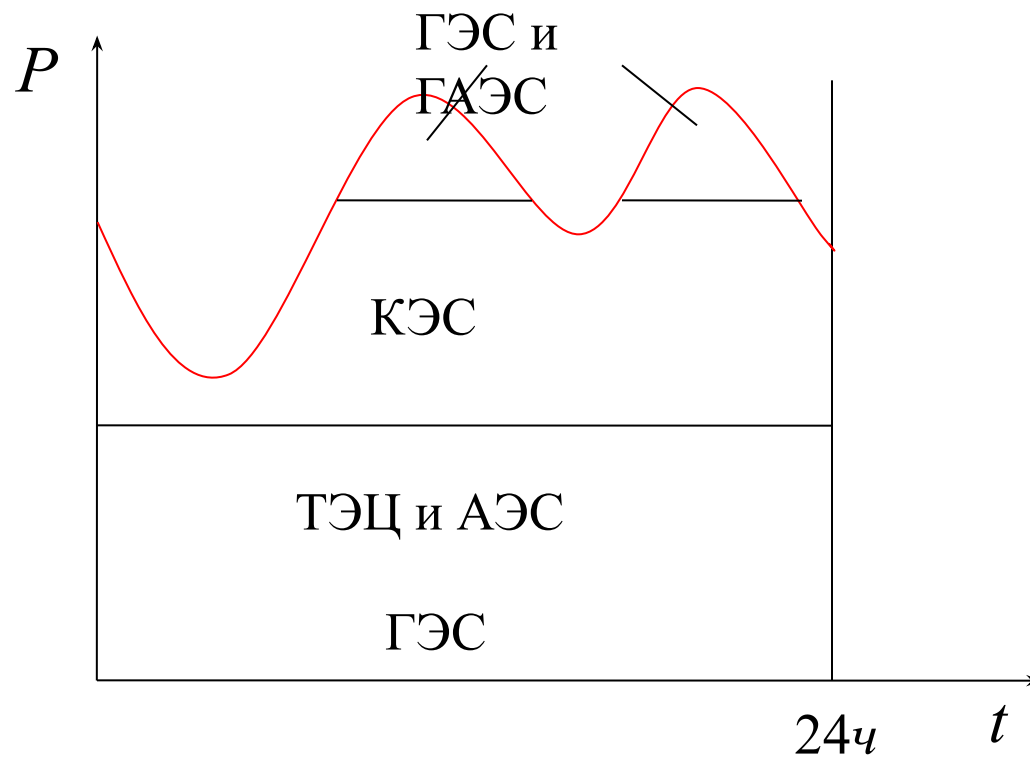
Резерв мощности:

- нагрузочный;
- ремонтный;
- аварийный;
- эксплуатационный.

Резерв мощности может быть холодным и горячим.

Если резерв станций исчерпан, а частота в системе не достигла номинального значения, то восстановление частоты осуществляется путем автоматической частотной разгрузки.(АЧР), при которой отключается часть потребителей. Это преднамеренное отключение части потребителей позволяет сохранить в работе генерирующие мощности, и обеспечить электроснабжение большинства нагрузок

Распределение нагрузки между различными электростанциями производят, учитывая особенности их технологического режима.



§2 Баланс реактивной мощности

$$\sum Q_{\Gamma} = \sum Q_{\Pi} = \sum Q_{\text{H}} + \sum \Delta Q$$

Нарушение баланса реактивной мощности приводит к изменению уровня напряжения в сети.

$$\sum \Delta Q = \sum \Delta Q_{\text{Л}} - \sum Q_{\text{C}} + \sum \Delta Q_{\text{T}}$$

$$\sum \Delta Q_{\text{Л}} = \frac{S_{\text{Л}}^2}{U_{\text{H}}^2} x_{\text{Л}} \quad \sum Q_{\text{C}} = 2Q_{\text{C}} = U_{\text{H}}^2 b_{\text{Л}} \quad \Delta Q_{\text{T}} = kS_{\text{H}} \frac{u_{\text{K}}\%}{100}$$

$$\sum \Delta Q_{\text{Л}} \approx 0,1S_{\text{Л}} \quad \sum Q_{\text{C}} \approx 0,1S_{\text{Л}} \quad \Delta Q_{\text{T}} \approx 0,1kS_{\text{H}}$$

$$\sum \Delta Q_{\text{Л}} - \sum Q_{\text{C}} = 0 \quad \sum Q_{\text{C}} \approx \sum \Delta Q_{\text{Л}}$$

Баланс реактивной мощности следует предусматривать для каждого характерного режима сети в отдельности. Это режимы:

- наибольшей реактивной нагрузки;
- наибольшей активной нагрузки;
- наименьшей активной нагрузки;
- послеаварийные и ремонтные.

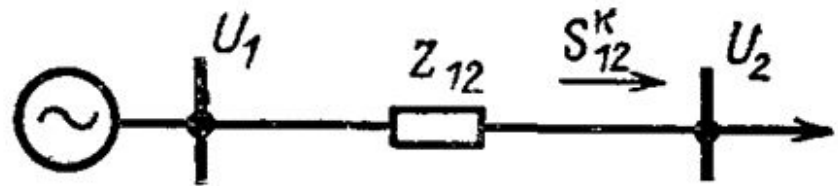
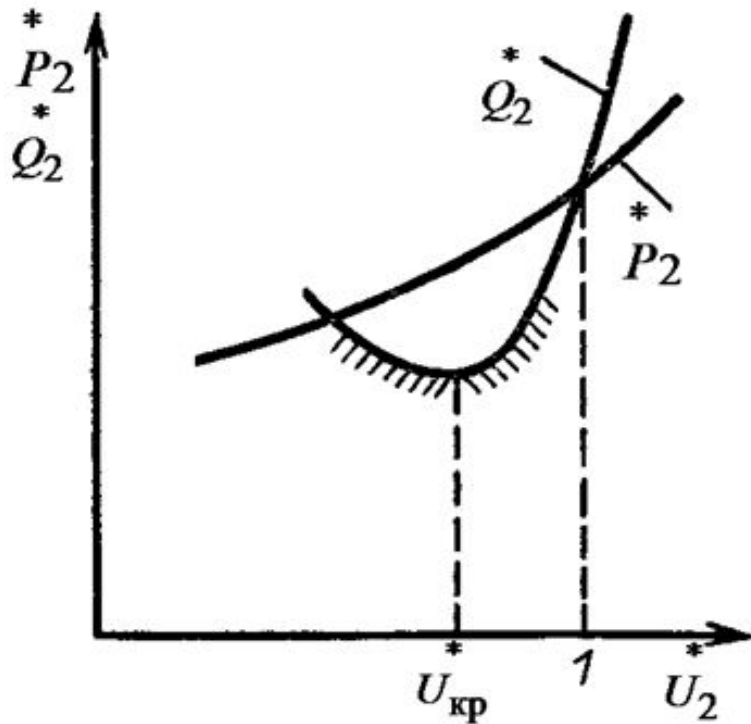
Основными потребителями реактивной мощности в электрических системах являются:

- трансформаторы;
- воздушные электрические линии;
- асинхронные двигатели;
- вентильные преобразователи;
- индукционные электропечи;
- сварочные агрегаты и другие нагрузки.

На промышленных предприятиях основными потребителями реактивной мощности являются:

- асинхронные двигатели – 65-70%;
- трансформаторы – 20-25%;
- другие приемники, воздушные линии электропередачи – 10%.

§3 Регулирующий эффект нагрузки



$$U_2 \approx U_1 - \Delta U_{12} = U_1 - \frac{P_{12}^K r_{12} + Q_{12}^K x_{12}}{U_2}$$

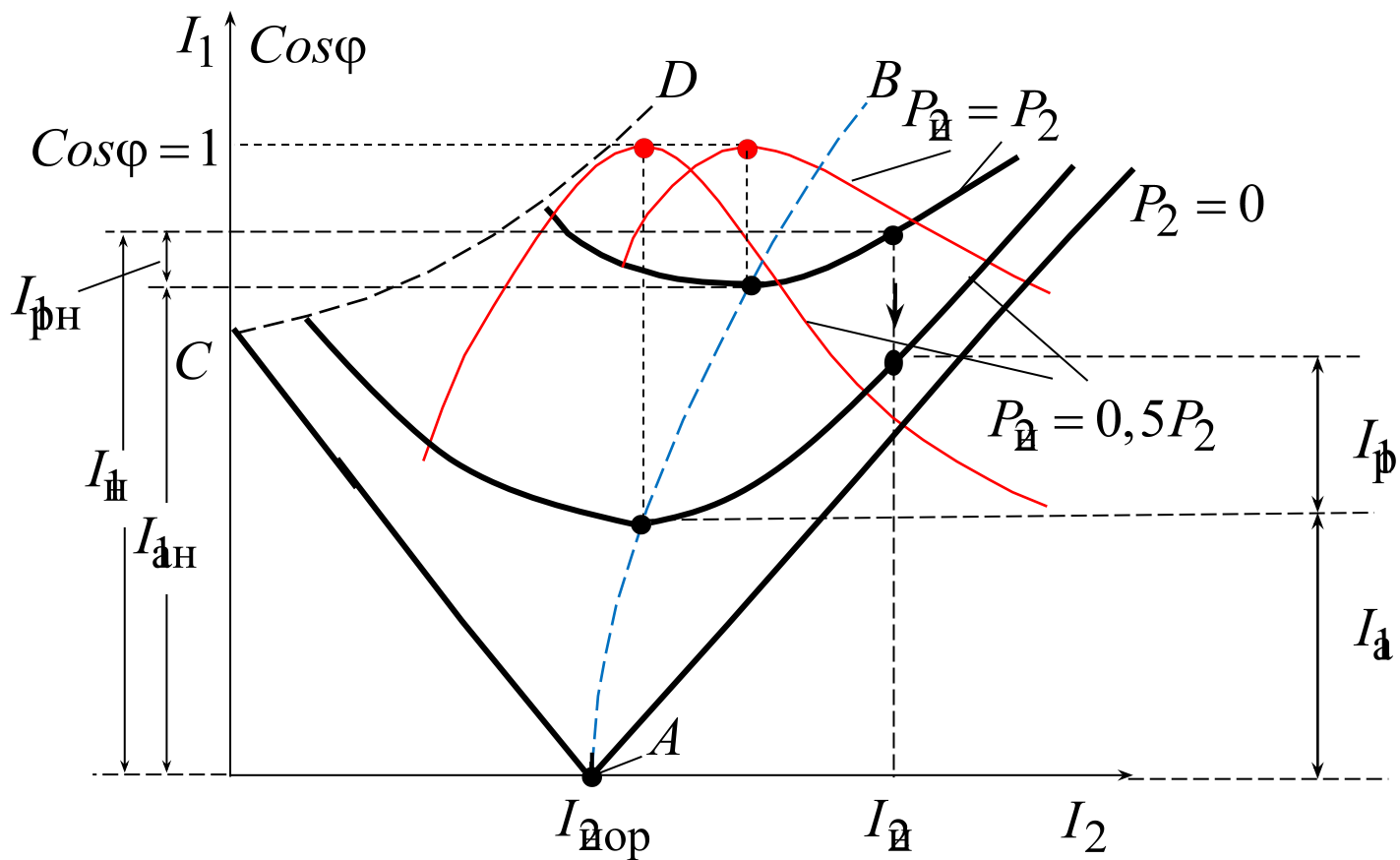
$$U_2 \downarrow \rightarrow \downarrow P_2, Q_2, \rightarrow \downarrow P_{12}^K, Q_{12}^K, \rightarrow \downarrow \Delta U_{12} \rightarrow \uparrow U_2 \quad (U_1 = Const)$$

$$U_{кр} > U = (0,7 \div 0,8)U$$

$$U_{кр} < U \quad U_2 \downarrow \rightarrow \uparrow P_2, Q_2, \rightarrow \uparrow P_{12}^K, Q_{12}^K, \rightarrow \uparrow \Delta U_{12} \rightarrow \downarrow U_2 \dots$$

§4 Выработка реактивной мощности на электростанциях

$$I_1, \cos\varphi = f(I_2) \quad U = \text{Const.}, f_1 = \text{Const.}, P_2 = \text{Const.}$$

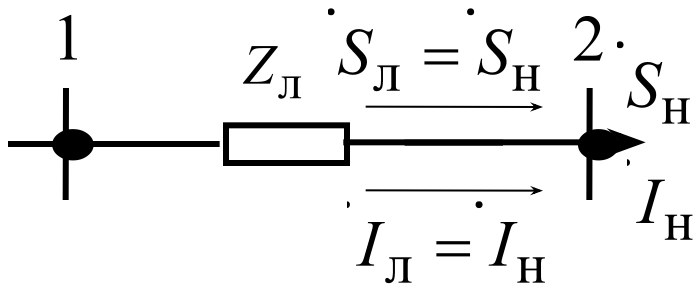


§5 Компенсация реактивной мощности

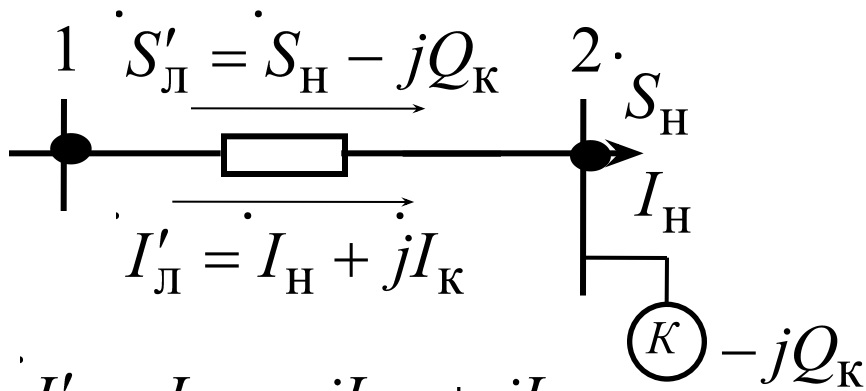
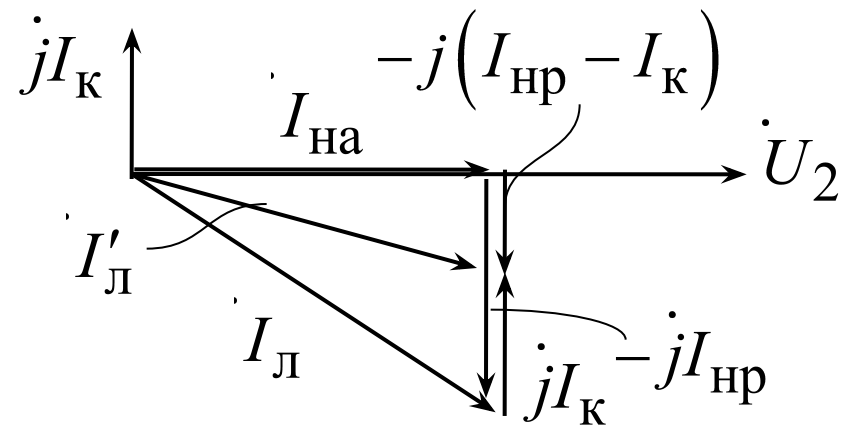
При номинальной нагрузке генераторы вырабатывают лишь около 60 % требуемой реактивной мощности, 20% генерируется в ЛЭП с напряжением выше 110 кВ, 20% вырабатывают компенсирующие устройства, расположенные на подстанциях или непосредственно у потребителя.

Компенсирующие устройства применяются для:

- выполнения условий баланса реактивной мощности;
- снижения потерь электрической энергии в сетях;
- регулирования напряжения.

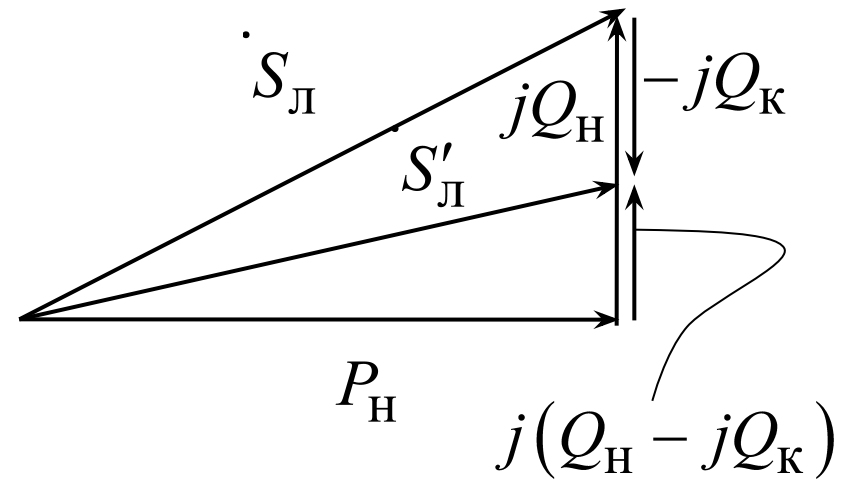


$$I_H = I_{Ha} - jI_{Hp} \quad S_H = P_H + jQ_H$$



$$I'_L = I_{Ha} - jI_{Hp} + jI_K$$

$$S'_L = P_H + jQ_H - jQ_K$$



$$\Delta P_L = \frac{P_H^2 + (Q_H - Q_K)^2}{U_H^2} r_L$$

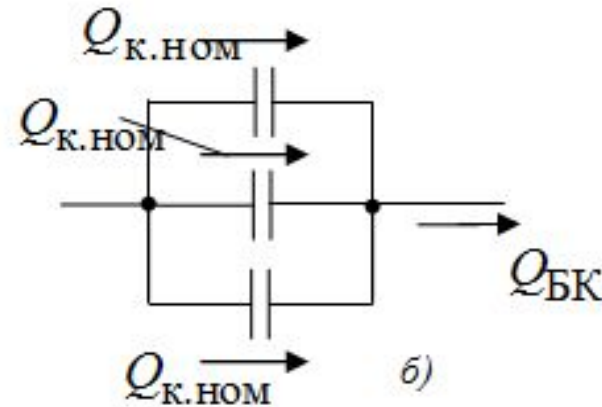
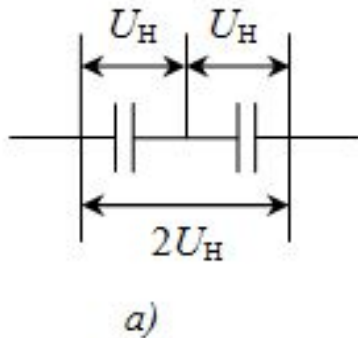
$$\Delta U_L = \frac{P_H r_L + (Q_H - Q_K) x_L}{U_H}$$

§6 Компенсирующие устройства

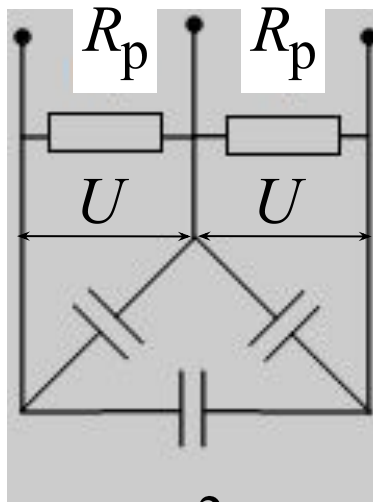
В качестве компенсирующих устройств используются:

- батареи конденсаторов (БК);
- синхронные компенсаторы (СК);
- реакторы;
- статические источники реактивной мощности (ИРМ);
- синхронные двигатели (СД).

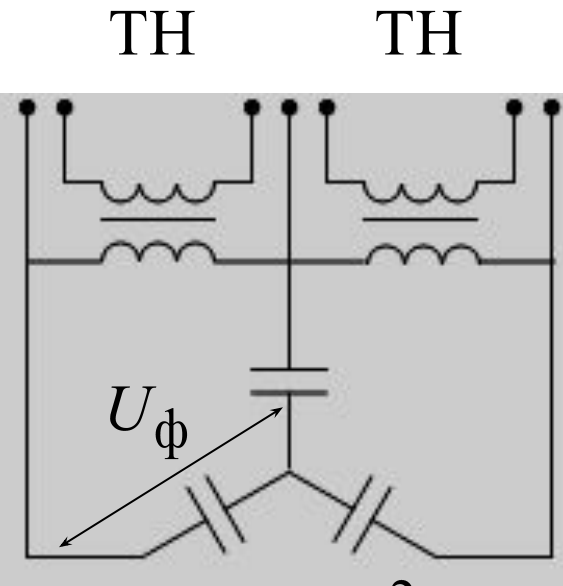
Батареи конденсаторов (БК)



$$U_H = \sqrt{2} \cdot \frac{Q_{К.НОМ}}{10,5} = 10,5 \cdot \frac{100}{125} \text{ кВар} \div$$



$$Q_c = 3U^2 \omega C = 9U_{\phi}^2 \omega$$



$$Q_c = 3U_{\phi}^2 \omega$$

Батареи конденсаторов:

- регулируемые (управляемые); нерегулируемые.

**В сетях систем электроснабжения промышленных предприятий
возможны следующие виды компенсации с помощью БК:**

- 1) Индивидуальная;
- 2) Групповая;
- 3) Централизованная.

Технико-экономические преимущества батарей конденсаторов по сравнению с другими компенсирующими устройствами:

- возможность применения как на низком, так и на высоком напряжении;
- малые потери активной мощности (0,0025 — 0,005 кВт/квар);
- удельная стоимость (за 1 квар) БК совместно с пускорегулирующей аппаратурой в настоящее время наименьшая по сравнению со стоимостью других компенсирующих устройств;
- простота эксплуатации (ввиду отсутствия вращающихся и трущихся частей);
- простота производства монтажа (малая масса, отсутствие фундамента);
- возможность использования для установки конденсаторов любого сухого помещения.

Недостатки конденсационных батарей

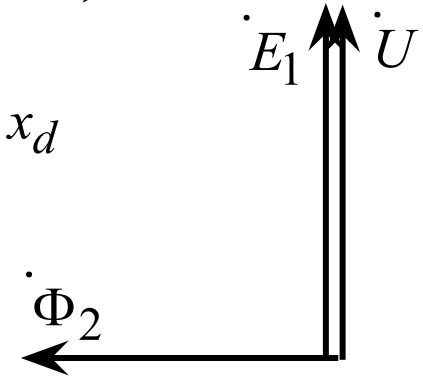
- зависимость генерируемой ими реактивной мощности от величины напряжения в квадрате;
- невозможность потребления реактивной мощности;
- ступенчатое регулирование выработки реактивной мощности и невозможность ее плавного изменения;
- чувствительность к искажениям формы кривой питающего напряжения;
- малый срок службы (8 — 10 лет);
- недостаточная электрическая прочность (особенно при коротких замыканиях и напряжениях выше номинального).

Синхронные компенсаторы (СК)

Допущения: 1. $U_c = Const., f_c = Const.$ 2. $x_{ad} = x_{aq} = x_d$

$$3. r_1 = 0 \quad 4. \dot{E}_1 = \dot{U}_c = \dot{U}$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1 - \dot{U}}{jx_d} = 0$$



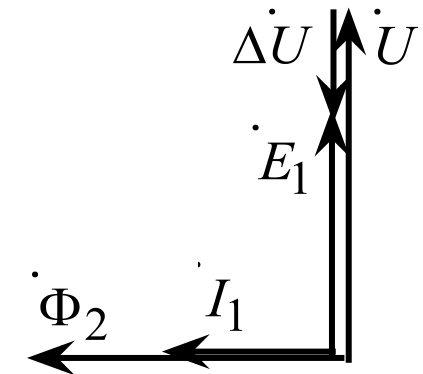
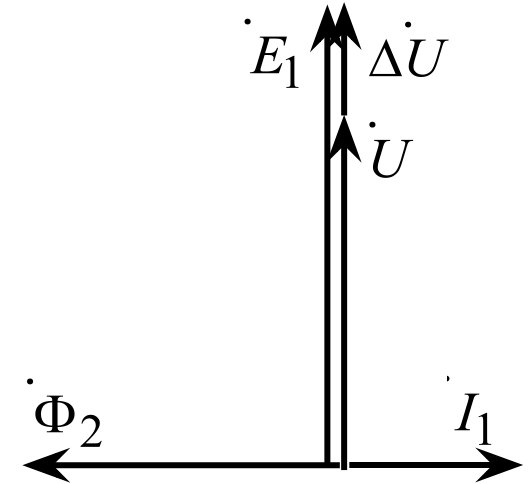
Режим синхронного компенсатора.

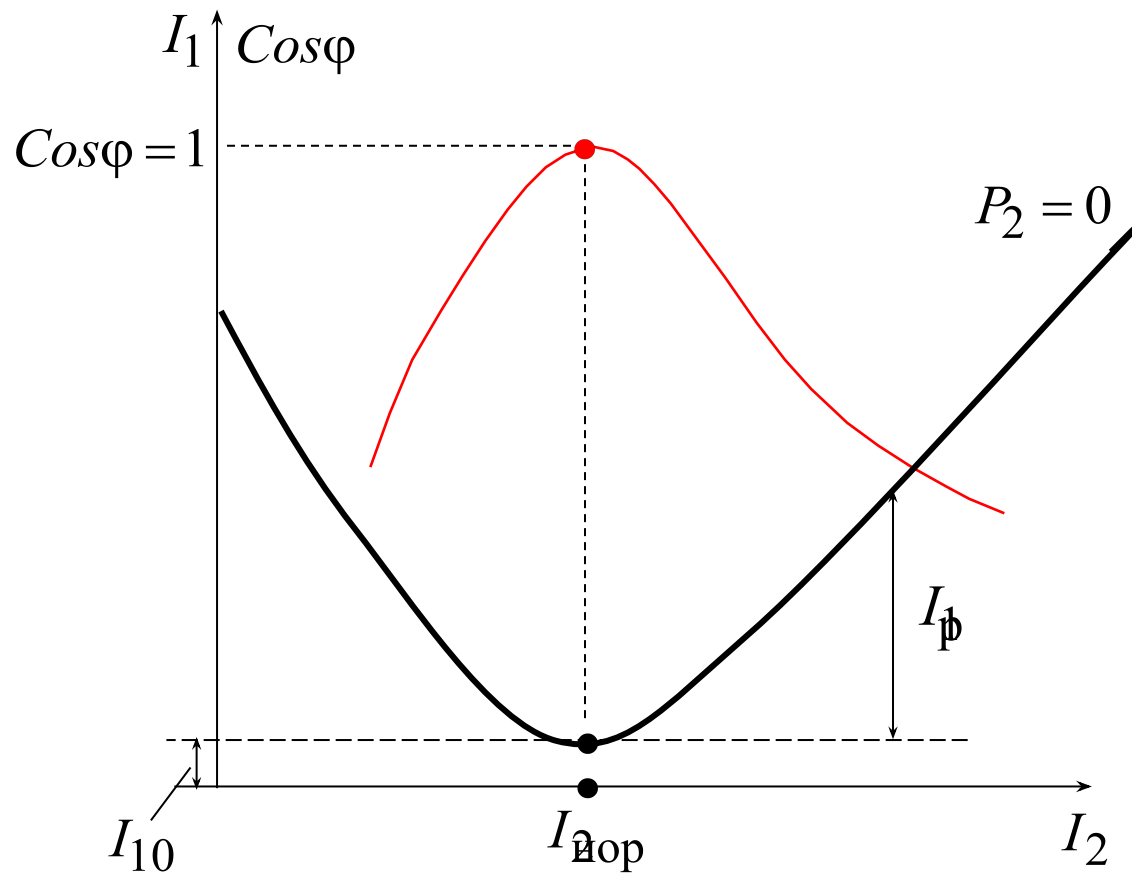
$$\uparrow I_2 \rightarrow E_1 > U_c = U \quad \Delta \dot{U} = \dot{E}_1 - \dot{U} = jx_d \dot{I}_1$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1 - \dot{U}}{jx_d} > 0$$

$$\downarrow I_2 \rightarrow E_1 < U_c = U \quad \Delta \dot{U} = \dot{E}_1 - \dot{U} = jx_d \dot{I}_1$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1 - \dot{U}}{jx_d} < 0$$





Положительными свойствами СК как источников реактивной мощности являются:

1. Возможность увеличения генерируемой реактивной мощности при понижении напряжения в сети путем регулирования тока возбуждения;
2. Возможность плавного и автоматического регулирования генерируемой реактивной мощности;
3. Возможность как потребления, так и выработки реактивной мощности.

Недостатки СК:

1. Дорогостоящее электромеханическое устройства;
2. Требуется постоянное обслуживание.

Шунтирующие реакторы

Реактор - это статическое электромагнитное устройство, предназначенное для использования его индуктивности в электрической цепи.

Используются **нерегулируемые** и **регулируемые** шунтирующие реакторы. $Q_{\text{Р}} = U^2 b_{\text{Р}}$ (управляемые)

УШР представляют собой трехфазное электромагнитное устройство трансформаторного типа, размещенное в маслonaполненном баке и предназначенное для наружной установки.

По конструкции, технологии изготовления обмоток, магнитной системы, системы охлаждения, монтажу и обслуживанию электромагнитная часть реактора аналогична силовому трансформатору.

Регулирование мощности реактора осуществляется путем изменения постоянного тока в обмотках управления, получаемого от регулируемого преобразователя (выпрямителя).

На практике используются три вида управляемых шунтирующих реакторов:

- реакторы, управляемые подмагничиванием постоянным током при помощи специальной обмотки управления;
- реакторы, управляемые подмагничиванием постоянным током через расщеплённую нейтраль сетевой обмотки;
- реакторы трансформаторного типа, в трансформаторе задействованы две обмотки, они выполнены таким образом, что их напряжение короткого замыкания составляет 100%, а во вторичную обмотку включена тиристорная группа. Функционально, такая конструкция представляет собой тиристорно-реакторную группу СТК, которая подключена к сети высокого напряжения без использования дополнительных согласующих трансформаторов.

Использование управляемых шунтирующих реакторов позволяет решить следующие проблемы электросети:

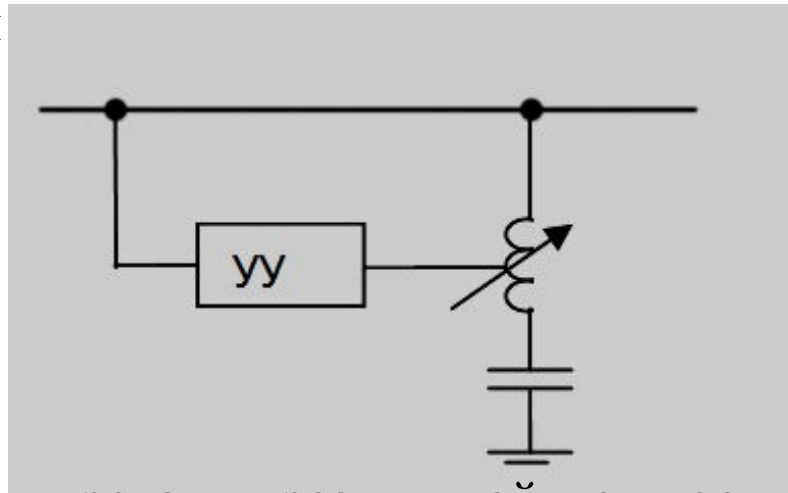
- устранить суточные и сезонные колебания напряжения в электрической сети;
- повысить качество электрической энергии;
- оптимизировать и автоматизировать режимы работы электрической сети;
- снизить потери электроэнергии при ее транспортировке и распределении;
- повысить устойчивость энергосистемы;
- улучшить условия эксплуатации и повысить надежность работы электротехнического оборудования;
- увеличить пропускную способность линий электропередачи.

Недостаток - реакторы только потребляют реактивную мощность и ее величина пропорционально квадрату напряжения.

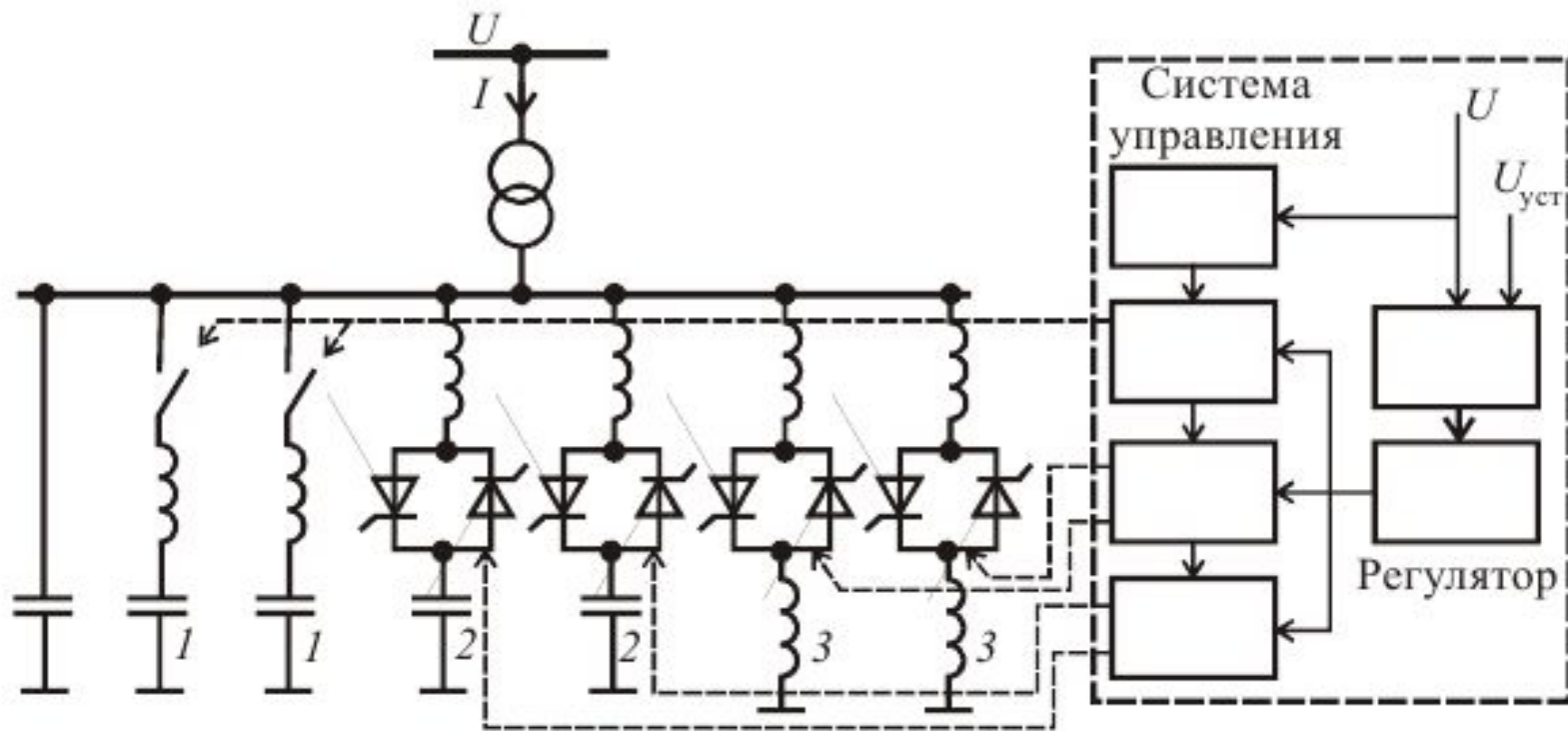
Нерегулируемые шунтирующие реакторы выпускаются мощностью до 330 МВАр, управляемые до 250 МВАр, с большим диапазоном регулирования.

Статические источники реактивной мощности (ИРМ)

Предназначены для плавной (регулируемой) генерации или потребления реактивной мощности, что достигается в ИРМ использованием нерегулируемой батареи конденсаторов и включенного последовательно или параллельно с ней



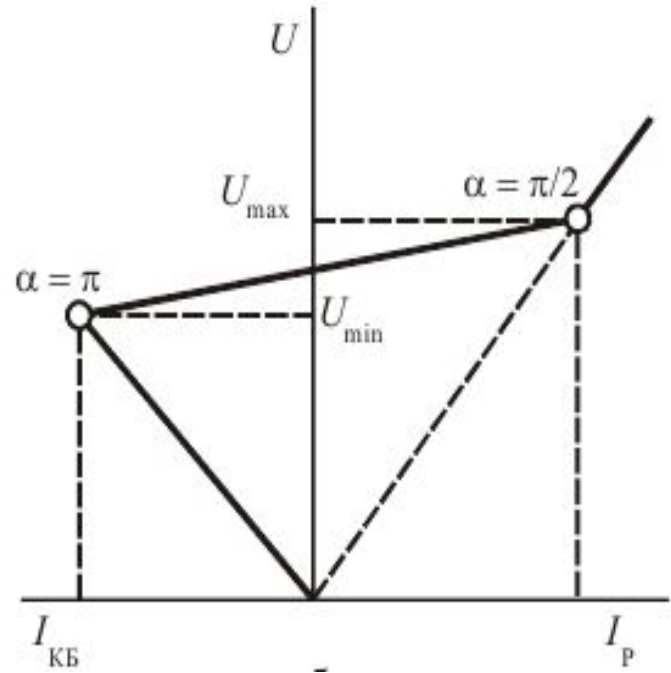
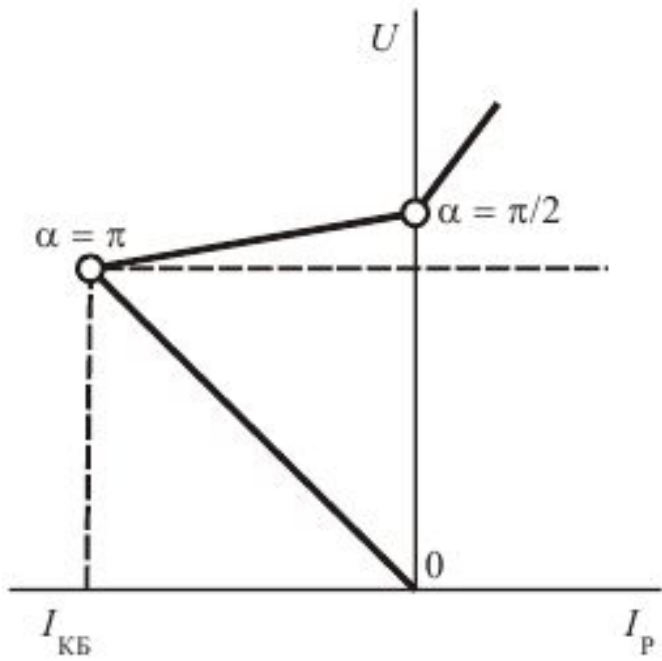
Плавность регулирования реактивной мощности ИРМ достигается с помощью регулируемого тиристорного блока, входящего в устройство управления. Схемы ИРМ весьма разнообразны и позволяют вырабатывать или потреблять реактивную мощность в зависимости от режима работы и вида схемы.



Возможны, например, следующие соотношения этих мощностей для СТК, состоящего из нерегулируемой секции БК и регулируемого тиристорными реактора:

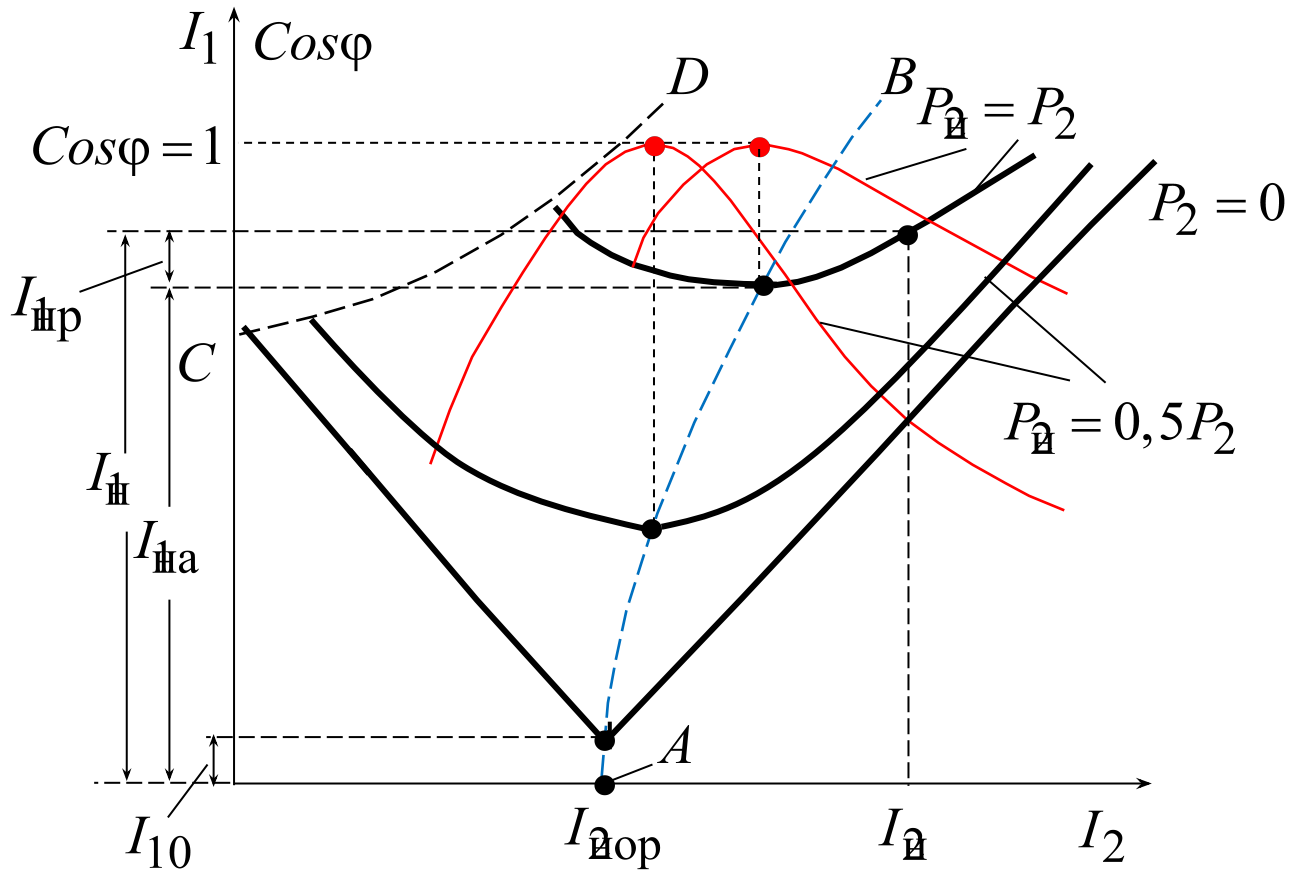
- установленные мощности реактора и КБ равны;
- установленная мощность реактора больше мощности БК, например,

$$Q_p = 2Q_{БК}$$



Синхронные двигатели

$$I_1, \cos\varphi = f(I_2) \quad U = \text{Const.}, f_1 = \text{Const.}, P_2 = \text{Const.}$$



Отличительные свойства синхронного двигателя, как компенсирующего устройства:

- I. Одновременно может выполнять две функции – являться приводом механического устройства и выполнять функцию компенсирующего устройства;
- II. Может вырабатывать или потреблять из сети реактивную мощность в зависимости от величины тока возбуждения при сохранении необходимого режима как приводного двигателя;
- III. Плавно и в широких пределах регулировать величину и характер генерируемой реактивной мощности;
- IV. Предотвращать лавинообразное снижение напряжения в системах электроснабжения в аварийных режимах и при коротких замыканиях при наличии системы автоматического регулирования тока возбуждения.