

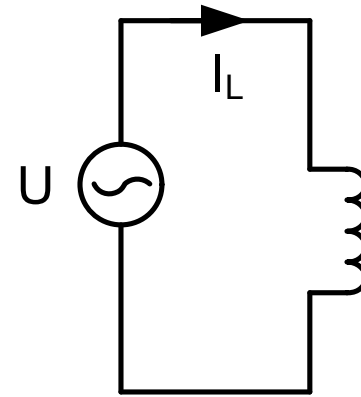
# Показатели энергетической эффективности: коэффициент мощности

Лектор\_к.т.н., доцент  
ТПУ Климова ГН

- Переменный ток рассматривается состоящим из активной и реактивной составляющих.
- Активная составляющая совпадает по фазе с напряжением и идет на создание полезной работы.
- Реактивная составляющая перпендикулярна вектору напряжения и создает переменное магнитное поле и электрическое поле для работы ЭП.

# Понятие реактивной мощности рассмотрим на примерах

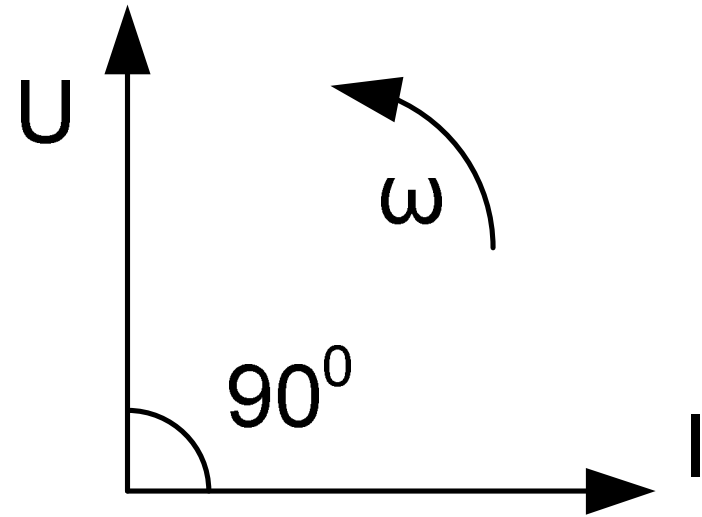
- **Пример 1.** Цепь, состоящая только из катушки индуктивности.
- Мгновенное значение тока в цепи:



$$i_L = I_{mL} \sin \omega t$$

Амплитудное значение тока

- Ток, проходящий по катушке индуктивности, активным сопротивлением которой можно пренебречь, отстает от приложенного к ее зажимам напряжения на угол  $90^\circ$ , т.е.

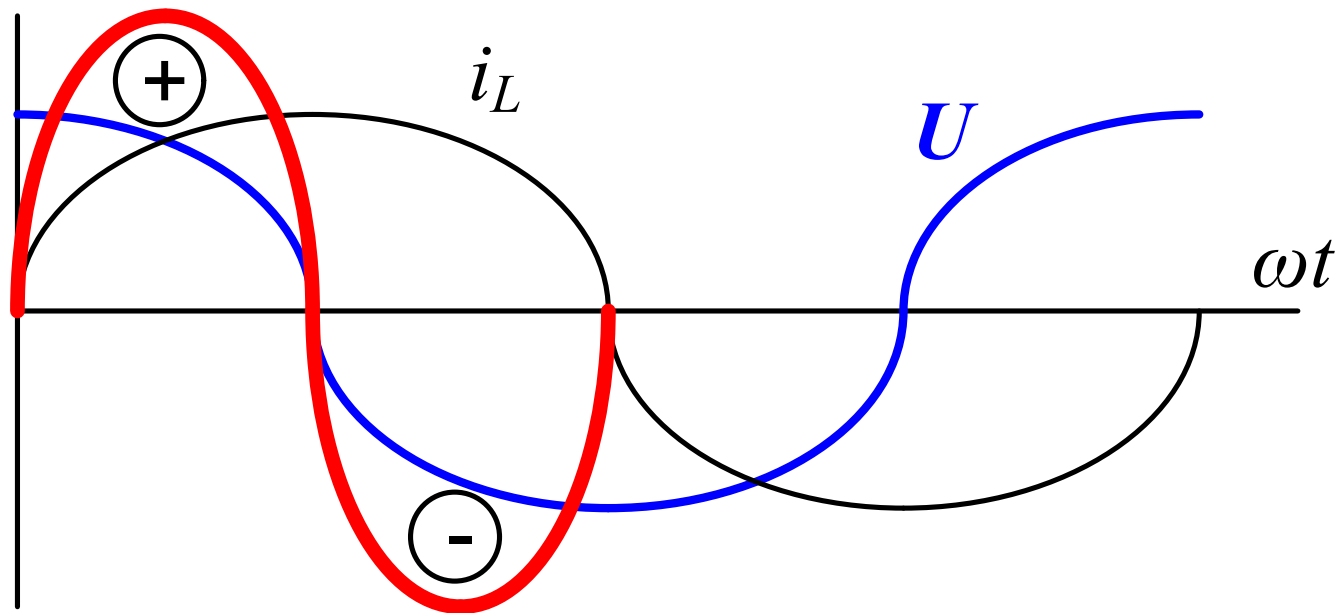


$$U = U_m \sin (\omega t + \pi/2)$$

- Мгновенная мощность цепи, содержащей только катушку индуктивности изменяется по синусоидальному закону, но с двойной частотой:

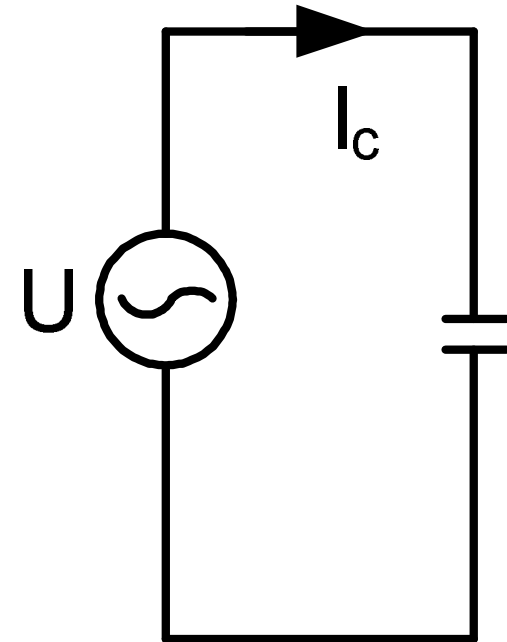
$$\begin{aligned} P_i &= U I_L = U_m \sin(\omega t + \pi/2) \cdot I_m \sin \omega t \\ &= U I_L \sin 2\omega t \end{aligned}$$

- Среднее значение активной мощности, потребляемой катушкой, равно 0.
- Физически это означает, что в течение первого полупериода (+) энергия поступает от генератора в катушку, накапливается в виде энергии магнитного поля, а в течение второго – возвращается обратно к генератору.

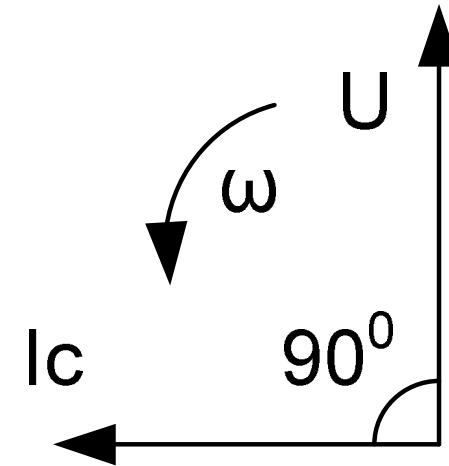


- **Пример 2.** Цепь, состоящая только из емкости
- Мгновенное значение тока в цепи

$$i_c = I_{m_c} \sin \omega t$$



- Ток, проходящий через емкость, активным сопротивлением которой можно пренебречь, опережает приложенное к ее зажимам напряжения на угол  $90^\circ$ , т.е.



$$U = U_m \sin (\omega t - \pi/2)$$



- Мгновенная мощность цепи, содержащей только емкость, составит действующее значение

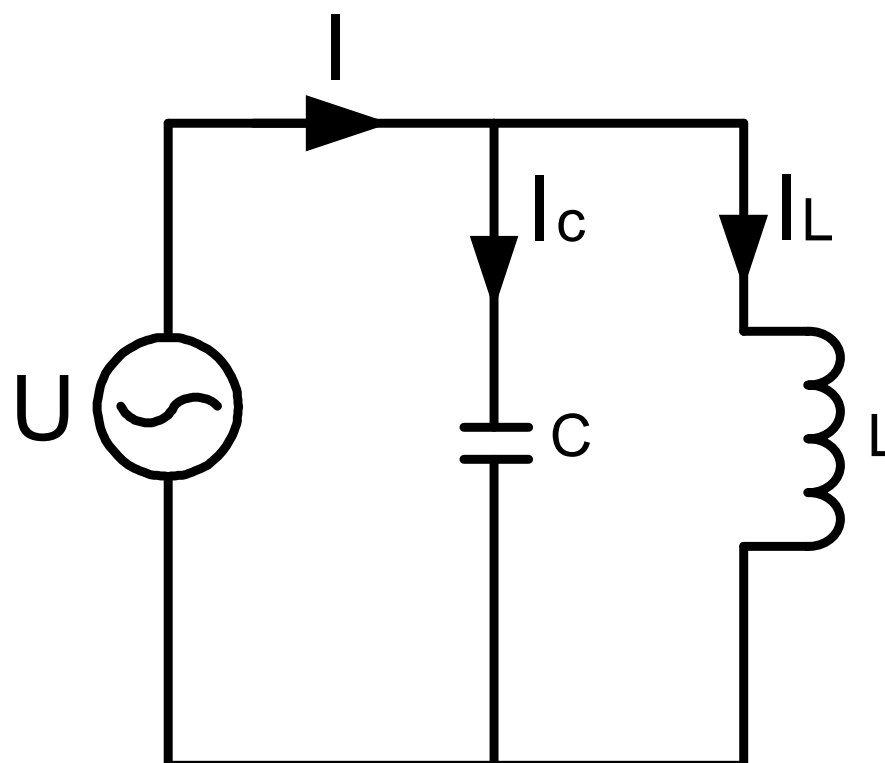
$$P_c = U i_c = U_m \sin(\omega t - \pi/2) * I_m \sin \omega t \\ = -U I_c \sin 2\omega t$$

Из полученного выражения следует, что:

- мгновенная мощность конденсатора изменяется по синусоидальному закону, но с двойной частотой;
- средняя мощность конденсатора равна 0.

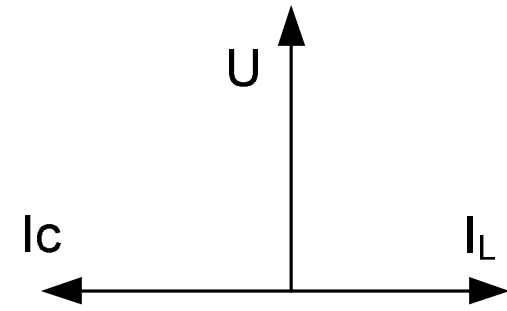
- Физически это означает, что происходит периодический колебательный обмен мгновенной мощностью  $\pm p$  между генератором и электрическим полем конденсатора без преобразования в другой вид энергии.
- Из вышесказанного следует, что традиционный термин «потребители реактивной мощности» - является условным, не отражающим сущности реактивной мощности.

## Пример 3. Цепь с индуктивностью и емкостью

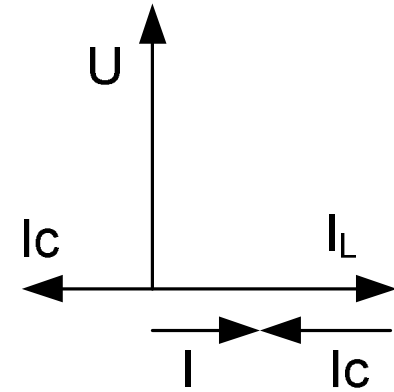


- Ток  $I$  в неразветвленной части схемы равен геометрической сумме токов  $I_L$  и  $I_C$  в параллельных ветвях схемы:
- $I = I_L + I_C = U * (1/X_L - 1/X_C) = U * (X_C - X_L) / (X_C * X_L)$ .
- Когда  $X_C = X_L$ , ток будет равен 0 – резонанс токов.

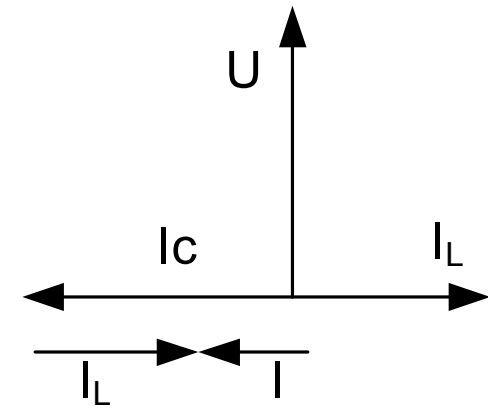
- Векторная диаграмма этого режима (резонанс):



- Если  $X_L < X_C$  ток будет иметь индуктивный характер, а диаграмма примет вид:



- Если  $X_L > X_C$  ток будет иметь емкостной характер, а диаграмма примет вид:



- В последних случаях ток  $I$  в неразветвленной части схемы меньше тока в одной из параллельных ветвей, например для случая  $X_L < X_C$  имеем

$$I_L = I + I_C, \text{ т.е.}$$

Включая в схеме емкость // с индуктивностью, мы как бы компенсируем потребность индуктивности в реактивном токе, необходимом для создания магнитного поля, и тем самым снижаем величину реактивного тока, потребляемого индуктивностью от источника.

- Обмен энергией в этом случае будет происходить между индуктивностью и емкостью цепи, между индуктивностью и источником будет происходить обмен только нескомпенсированной энергией.



- Реактивная мощность в неразветвленной части схемы

$$Q = Q_L - Q_K$$

представляет собой нескомпенсированную часть реактивной мощности  $Q_L$ . Мощность  $Q_K$  можно назвать мощностью компенсирующей установки.

## Пути снижения реактивных нагрузок

- 1. Установка специальных компенсирующих устройств (искусственная компенсация).
- 2. Снижение реактивной мощности самих приемников электроэнергии (естественная компенсация).

# Естественная компенсация

- не требует больших материальных затрат и должна проводиться на предприятии в первую очередь.

## Мероприятия по естественной компенсации

1. Упорядочение технологического процесса, ведущее к улучшению энергетического режима оборудования и выравниванию графика нагрузки:

- равномерное размещение нагрузок по фазам,
- смещение времени обеденных перерывов отдельных цехов и участков,
- перевод энергоемкого оборудования в часы минимума нагрузки ЭС.

2. Создание рациональной схемы электроснабжения за счет уменьшения количества ступеней трансформации;
3. Замена ЭО старых конструкций на новое с меньшими потерями на перемагничивание;

4. Замена малозагруженных трансформаторов и ЭД меньшими по мощности или их полная загрузка;
5. Применение СД вместо АД, когда это допустимо по условиям технологического процесса;

6. Ограничение продолжительности ХХ двигателей и сварочных трансформаторов;
7. Сокращение длительности и рассредоточение по времени пуска крупных ЭП;

8. Улучшение качества ремонта ЭД;
9. Отключение при малой нагрузке части силовых трансформаторов.



## Искусственная компенсация реактивной мощности

- Загрузка системы электроснабжения определяется величиной полной мощности

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$P$ , кВт – активная составляющая считается полезно потребленной и обратно к источнику не возвращается;

- $Q$ , кВАр – необходима для создания электромагнитных и электрических полей в отдельных элементах ЭС. Практически она не потребляется, а передается от источника к электроприемнику и обратно.

## Невыгодность передачи Q на расстояния

- возникают дополнительные потери ( $\Delta P$ ) во всех элементах системы электроснабжения, обусловленные загрузкой их реактивной мощностью.

$$\Delta P = 3I^2 R = \frac{S^2}{U^2} R = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R = \Delta P_a + \Delta P_p$$

Потери от передачи активной мощности

Потери от передачи реактивной мощности

# Коэффициент мощности $\cos\varphi$

- имеет большое значение при передачи ЭЭ от ИП к потребителю

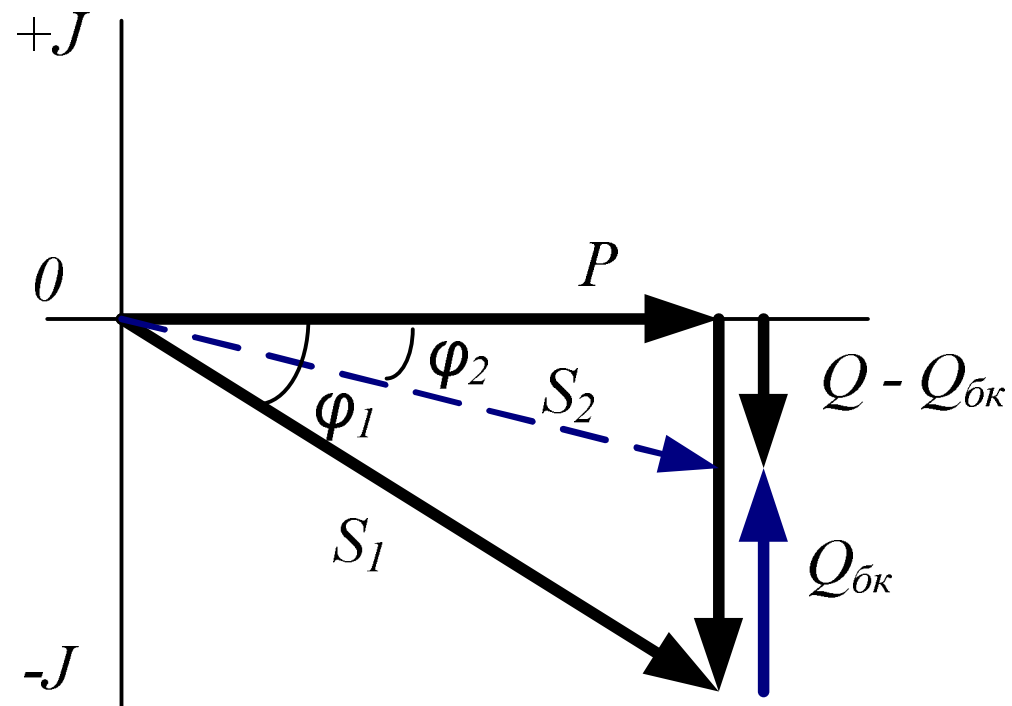
$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \Rightarrow P^2 + Q^2 = \frac{P^2}{\cos^2\varphi}$$

$$\Delta P = \frac{P^2 \cdot R}{U^2 \cos^2\varphi}$$

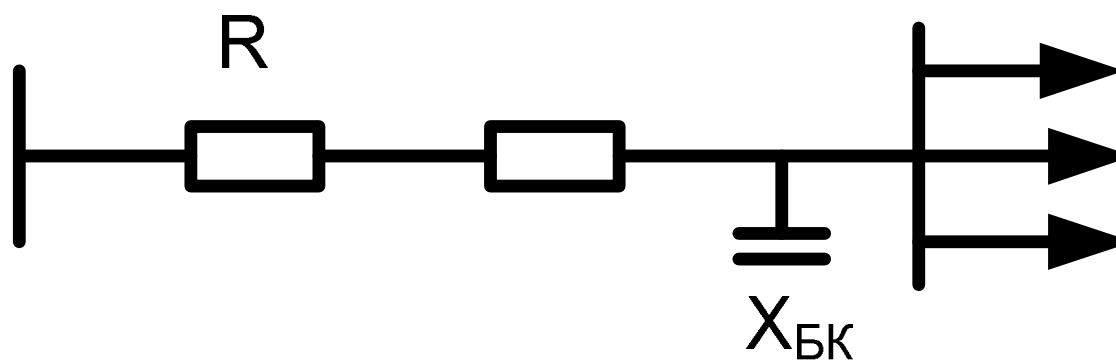
# Повышение коэффициента мощности

## I. Поперечная компенсация

- Повышение  $\cos\varphi$  зависит от снижения потребления  $Q$



## Схема замещения при поперечной компенсации $Q$



## Особенности поперечной компенсации

- Назначение – повышение коэффициента мощности.
- Существенное значение имеет повышение уровня напряжения, сопровождающее установку КУ.

Размещение конденсаторов принято выполнять по принципу наибольшего снижения потерь мощности в системе ЭСПП.

## Собственные ИРМ в системах ЭСПП

1. Генераторы собственных ЭС и СД;
2. Воздушные и кабельные линии ЭС;
3. Дополнительно устанавливаемые КУ:  
синхронные компенсаторы, батареи конденсаторов ВН, НН, вентильные установки со специальным регулированием



## Определение мощности конденсаторов, кВАр

1. Мощность трехфазного конденсатора, соединенного треугольником:  $U$  – линейное напряжение,  $C$  – сумма емкостей всех трех фаз

$$Q = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot 10^{-3}$$

2. Мощность 3-х фазного конденсатора, соединенного в звезду (емкости всех фаз равны)

$$Q = \frac{1}{3} \cdot \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot 10^{-3}$$

## Из векторной диаграммы

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{Q}{P},$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{Q - Q_{\text{бк}}}{P},$$

$$\frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1} = 1 - \frac{Q_{\text{бк}}}{Q},$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 < \operatorname{tg} \varphi_1, \quad \cos \varphi_2 > \cos \varphi_1$$

## Потери мощности:

до компенсации

$$\Delta P_1 = 3I^2 R \cdot 10^{-3} = \frac{S^2 R \cdot 10^{-3}}{U^2} = \frac{(P^2 + Q^2)R}{U^2} \cdot 10^{-3}$$

после компенсации

$$\Delta P_2 = \frac{[P^2 + (Q - Q_{\text{БК}})^2] \cdot R}{U^2} \cdot 10^{-3}$$

Уменьшение потерь мощности после компенсации

$$\Delta P_1 - \Delta P_2 = \frac{(2Q - Q_{\text{бк}}) \cdot Q_{\text{бк}}}{U^2} \cdot R \cdot 10^{-3}$$

Полная нагрузка до компенсации

$$S_1 = \frac{P}{\cos \varphi_1}$$

Полная нагрузка после компенсации

$$S_2 = \frac{P}{\cos \varphi_2}$$

- Полная нагрузка после компенсации уменьшается обратно пропорционально значению коэффициента мощности после компенсации

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2}$$

- Таким образом, поперечная компенсация позволяет уменьшать потери мощности при сохранении величины передаваемой мощности или в пределах тех же потерь увеличивать пропускную способность сети.

# Потери напряжения

- До компенсации

$$\Delta U_1 = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U} \cdot 10^{-3}$$

- После компенсации

$$\Delta U_2 = \frac{P \cdot R + (Q - Q_{\text{бк}}) \cdot X}{U} \cdot 10^{-3}$$

Уменьшение потерь напряжения - увеличение напряжения на приемном конце составит

$$\Delta U_1 - \Delta U_2 = \frac{Q_{\text{бк}} \cdot X}{U} \cdot 10^{-3}$$



## Выясним влияние нагрузки на колебания напряжения

1. Потеря напряжения при полной нагрузке до компенсации

$$\Delta U_1 = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U} \cdot 10^{-3}$$

2. Потеря напряжения при уменьшенной нагрузке до компенсации

$$\Delta U'_1 = \frac{k \cdot (P \cdot R + Q \cdot X)}{U} \cdot 10^{-3}$$

$k$  – коэффициент, учитывающий пропорциональное уменьшение нагрузки

- 3. При неполной нагрузке до компенсации уменьшение потерь напряжения составит

$$\Delta U_1 - \Delta U'_1 = \frac{(1-k) \cdot (P \cdot R + Q \cdot X)}{U} \cdot 10^{-3} = (1-k) \cdot \Delta U_1$$

4. Потеря напряжения  
при полной нагрузке  
после компенсации

$$\Delta U_2 = \frac{P \cdot R + (Q - Q_{\text{бк}}) \cdot X}{U} \cdot 10^{-3}$$

5. Потеря напряжения  
при неполной  
нагрузке после  
компенсации

$$\Delta U'_2 = \frac{k \cdot P \cdot R + (k \cdot Q - Q_{\text{бк}}) \cdot X}{U} \cdot 10^{-3}$$

= const

Уменьшение потерь напряжения при компенсации и неполной нагрузке

$$\Delta U_2 - \Delta U'_2 = \frac{(1-k) \cdot (P \cdot R + Q \cdot X)}{U} \cdot 10^{-3} = (1-k) \cdot \Delta U_1$$

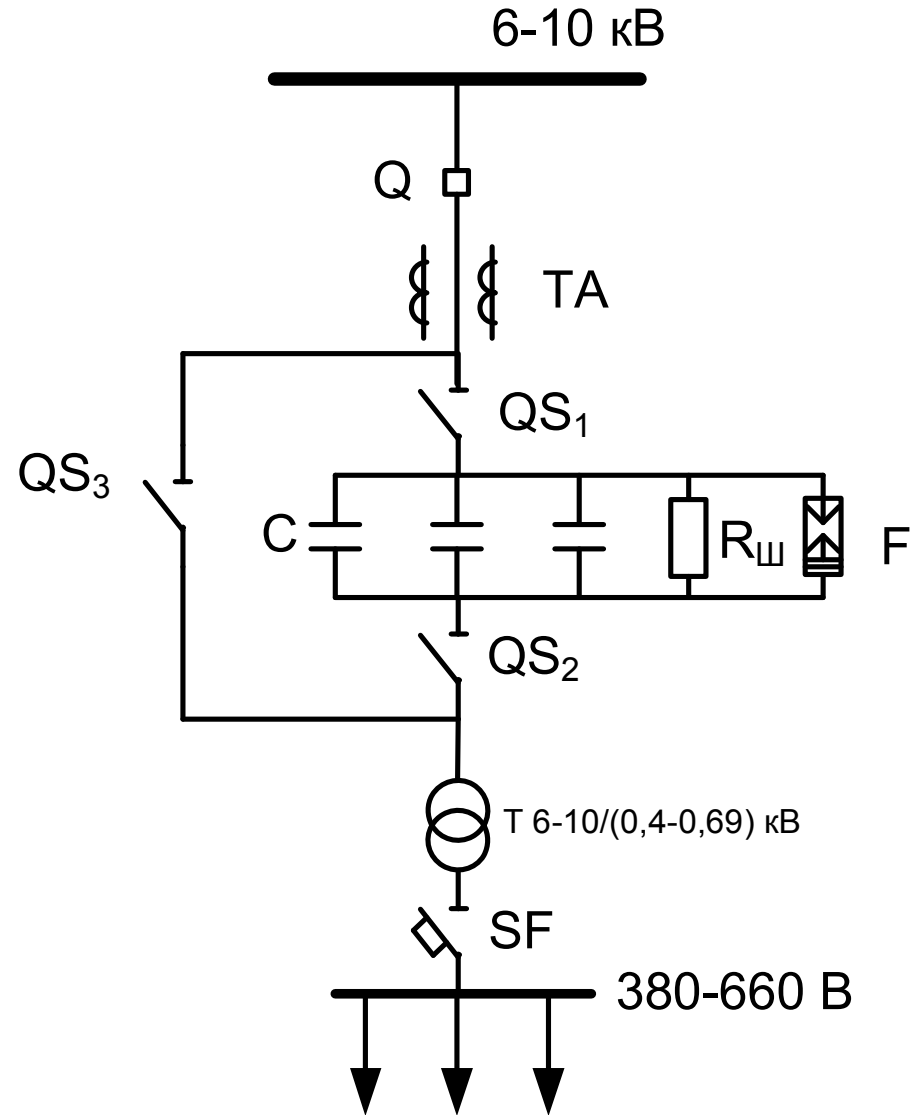
- **Выводы:**
  1. При уменьшении нагрузки колебание напряжения после компенсации будет таким же, как и до нее, но уровень напряжения будет выше. Т.к. уменьшение потери напряжения зависит только от  $Q_{БК}$ ,  $X$ ,  $U$ , которые являются постоянными величинами.
  2. Уровень напряжения в сети повышается на постоянную величину, в зависимости от мощности установленных конденсаторов  $Q_{БК}$  и реактивного сопротивления элементов установки  $X$ .

## II. Продольная компенсация

- При продольной компенсации конденсаторы включаются в сеть последовательно. Через них проходит полный ток линии.

# Схема УПК линии

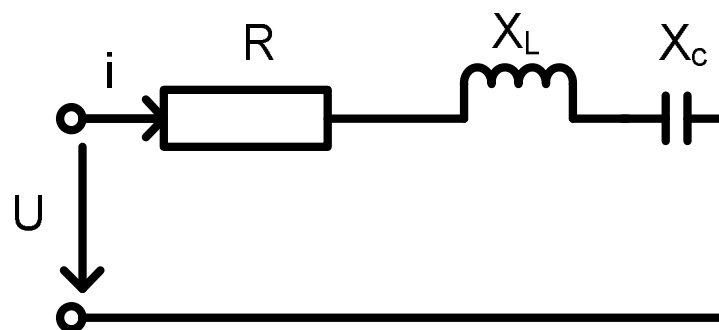
Лектор\_к.т.н., доцент  
ТПУ Климова ГИ



# Схема замещения УПК

- Действующие значения тока и напряжения

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$



$$X = X_C + X_L, \quad X_L = \omega L, \quad X_C = 1/\omega C$$

$$U_R = IR, \quad U_L = IX_L, \quad U_C = IX_C \quad \varphi = \arctg \frac{X}{R}$$



## Векторные диаграммы продольной емкостной компенсации

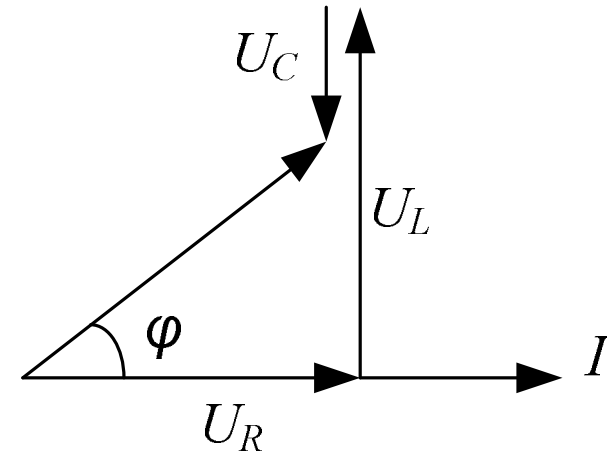
- В зависимости от соотношения между индуктивным и емкостным сопротивлениями векторная диаграмма  $R$ ,  $L$ ,  $C$  цепи имеет три вида:

# 1. При индуктивном характере цепи

- $X_L > X_C$ ,
- Угол

$$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}$$

- Ток отстает от напряжения

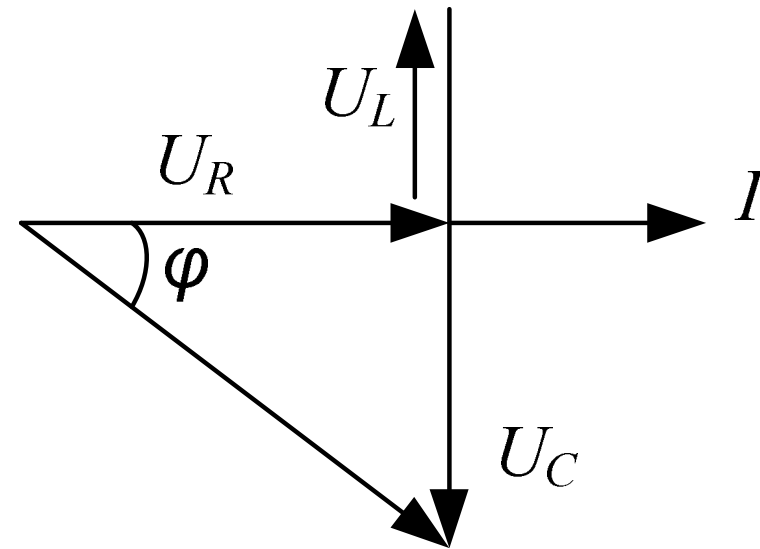


## 2. При емкостном характере цепи

- $X_L < X_C$ ,
- Угол ,

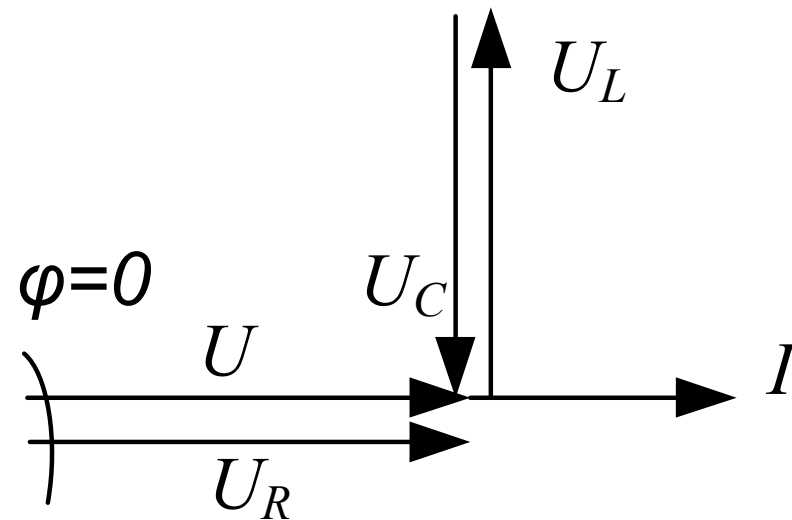
$$\varphi < 0$$

- Ток опережает напряжение.



### 3. Равенство $X_L = X_C$

- Угол  $\varphi = 0$ ,
- Ток совпадает по фазе с напряжением,
- Падения напряжения на индуктивности и емкости равны и компенсируют друг друга, т.к. противоположны по направлениям



- Для резонанса напряжений характерно максимальное значение тока при  $U = \text{const}$ .

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{R}$$

- В системах ЭСПП, где активное сопротивление невелико по сравнению с индуктивным сопротивлением трансформаторов.

При резонансе напряжений в режиме короткого замыкания может быть очень большой ток КЗ и недопустимы повышения напряжений на индуктивности и емкости:

$$R \rightarrow 0, \quad I \rightarrow \infty, \quad \text{а} \quad U_L = U_C \rightarrow \infty$$

## Выбор емкостного сопротивления в УПК

- Емкость в УПК выбирают из расчета, чтобы напряжение  $U_c = I \cdot X_c = (5 - 20)\% U_{\text{ном}} \text{ сети}$ .
- При этом емкость компенсирует лишь часть потерь реактивной мощности, равную

$$Q_C = \omega \cdot C \cdot U_c^2$$

- Т.е. УПК практически не является источником мощности.

- Шунтирующее сопротивление  $R_{ш}$ , превышающее сопротивление конденсаторов примерно в 10 раз, устраняет резонансные явления в УПК.

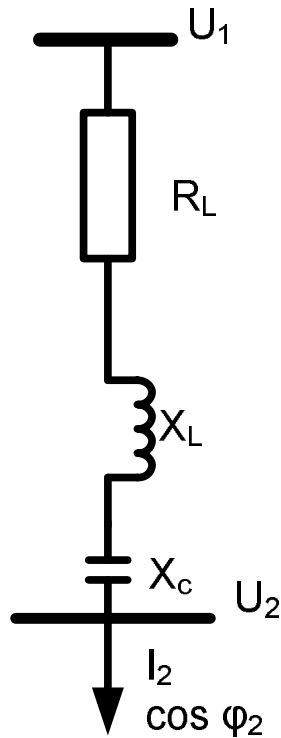


# Назначение УПК

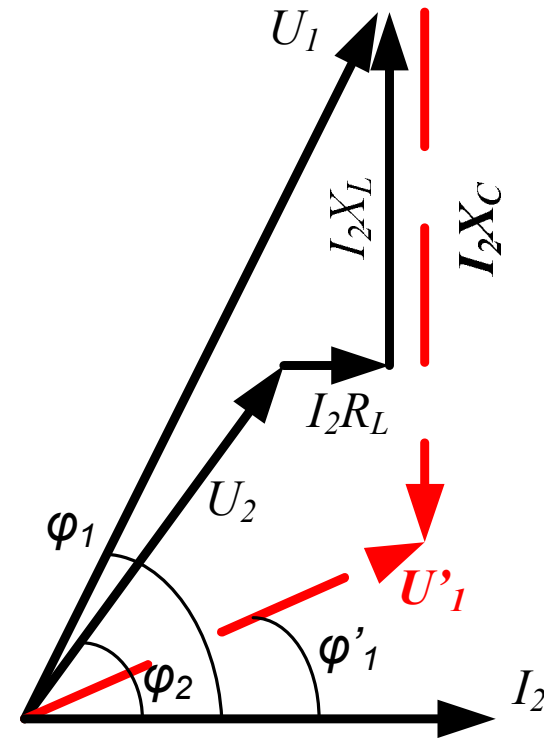
1. Частичная компенсация индуктивного сопротивления участков электрической сети для уменьшения потерь напряжения в них.

2. На линиях высокого напряжения (500 кВ и выше) она применяется с целью увеличения пропускной способности линии и повышения устойчивости энергосистемы в результате снижения реактивного сопротивления

# Влияние УПК на соотношение напряжения в начале $U_1$ и в конце $U_2$ участка сети



а) Схема включения емкости в нагрузочную цепь



б) Векторная диаграмма

- Исходя из векторной диаграммы подбором  $X_C$  можно снизить разность напряжений  $U_1$  и  $U_2$ .
- Наиболее существенное влияние УПК оказывает на  $U_2$  при низком значении  $\cos\varphi$ .

# Мощность конденсатора

-при любом включении  
определяется

$$Q_{k1} = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot 10^{-3}$$

-с другой стороны

$$Q_{k1} = \frac{I_k}{U} \Rightarrow U = \frac{Q_{k1}}{I_k}$$

-подстановка

$$Q_{k1} = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot 10^{-3} = \omega \cdot C \frac{Q_{k1}^2}{I_k^2} \cdot 10^{-3} = \frac{I_k^2}{\omega \cdot C \cdot 10^{-3}}$$

- Так как при продольной компенсации ток конденсатора равен проходящему через него полному току нагрузки линии, то

$$Q_{k1} = \frac{I_2^2}{\omega \cdot C \cdot 10^{-3}}$$

- **Вывод:** мощность конденсатора при продольной компенсации является величиной переменной и зависит от меняющегося во времени тока нагрузки линии.

# Влияние УПК на напряжение

- 1. Потеря напряжения до компенсации

$$\Delta U_1 = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U} \cdot 10^{-3}$$

- 2. После компенсации

$$\Delta U_2 = \frac{P \cdot R + Q \cdot (X - X_{\text{БК}})}{U} \cdot 10^{-3}$$

- 3. Уменьшение потерь напряжения

$$\Delta U_1 - \Delta U_2 = \frac{\text{VAR } Q \cdot \text{CONST } X_{\text{БК}}}{U} \cdot 10^{-3}$$



- Следует, что уровень напряжения повышается не на постоянную величину, как при поперечной компенсации, а на величину, изменяющуюся пропорционально изменению реактивной нагрузки линии (при неизменном значении  $X_{бк}$  для установленных конденсаторов).

- Подбором мощности конденсаторов можно добиться равенства напряжений на приемном и питающем конце линий.
- Примем  $\Delta U_2 = 0$ , тогда

$$P \cdot R + Q \cdot (X - X_{\text{бк}}) = 0 \Rightarrow X_{\text{бк}} = \frac{P \cdot R}{Q} + X, \text{ т.е. } X_{\text{бк}} > X$$

# Влияние УПК на колебание напряжения

- 1. Потеря напряжения до компенсации при полной нагрузке

$$\Delta U_1 = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U} \cdot 10^{-3}$$

- 2. При неполной нагрузке

$$\Delta U'_1 = \frac{k \cdot (P \cdot R + Q \cdot X)}{U} \cdot 10^{-3}$$

- 3. Уменьшение потерь напряжения

$$\Delta U_1 - \Delta U'_1 = (1 - k) \cdot \Delta U_1$$

- 4. Потеря напряжения с учетом продольной компенсации при полной нагрузке

$$\Delta U_2 = \frac{P \cdot R + Q \cdot (X - X_{\text{бк}})}{U} \cdot 10^{-3}$$

- 5. При неполной нагрузке

$$\Delta U_2 - \Delta U'_2 = (1 - k) \cdot \Delta U_2$$

- 6. Уменьшение потерь напряжения

$$\Delta U'_2 = \frac{k \cdot [P \cdot R + Q(X - X_{\text{бк}})]}{U} \cdot 10^{-3}$$

- Так как  $\Delta U_2 < \Delta U_1$ , а  $(1-k) = \text{const}$  для определенной степени загрузки линии, то

$$\Delta U_2 - \Delta U'_2 < \Delta U_1 - \Delta U'_1.$$

- **Вывод:** при изменении нагрузки линии колебания напряжения в ней при наличии продольной компенсации будут меньше, чем при отсутствии такой компенсации.

- Если подбором сопротивления добиться равенства напряжения на приемном и питающем концах линий ( $\Delta U_2 = 0$ ), то при любом изменении нагрузки никакого изменения напряжения на приемном конце линии не будет – напряжение сохранится стабильным.

## Назначение элементов схемы УПК

- Компенсация индуктивного сопротивления цепи емкостью приводит к повышению величины токов КЗ во всех элементах трансформаторной подстанции.



- Особенно это опасно для самих конденсаторов УПК, т.к. напряжение на них при сквозных токах КЗ ( $\Delta U_k = I_k X_c$ ) возрастает пропорционально кратности тока КЗ ( $I_k / I_{\text{НОМ}}$ ).

- Для защиты конденсаторов путем их шунтирования при сквозных токах КЗ применяется искровой спекающийся разрядник, который после срабатывания выводится временно из работы с помощью разъединителей QS1, QS2, QS3 для восстановления разрядных свойств.

## Недостатки продольной компенсации

1. В схему системы вводится новый элемент, состоящий из большого количества БК, который должен быть не менее надежен в эксплуатации, чем остальные элементы.

2. Условия работы конденсаторов для продольной компенсации тяжелее, чем при поперечной, т.к. при возникновении КЗ за конденсаторами напряжение на их зажимах повышается – это требует специальной защиты конденсаторов (шунтирование БК, применение разрядников).

3. Шунтирование выводит УПК из схемы в тот момент, когда в ней больше всего нуждается электрическая система по условиям устойчивости.

# Достоинства продольной компенсации

1. Способность стабилизации напряжения при резкопеременных нагрузках.