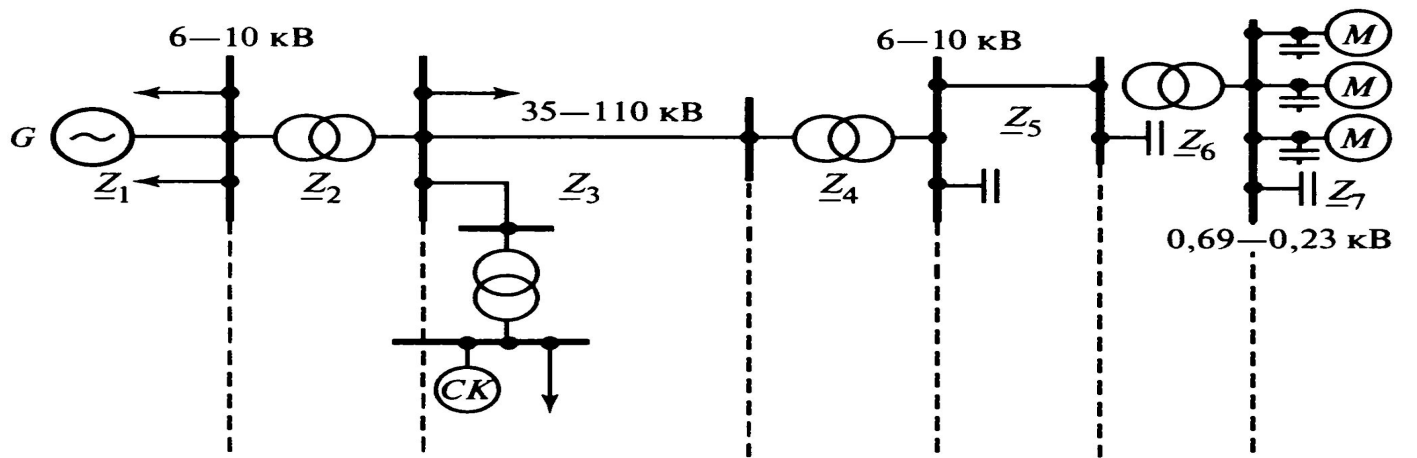


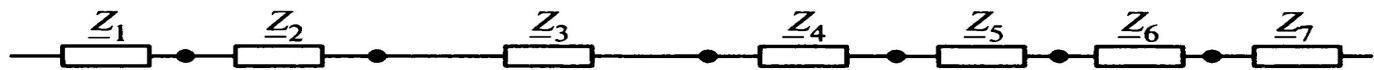
Выбор мощностей компенсирующих устройств

Представим пример схемы электроснабжения промышленного предприятия со схемой замещения и векторными диаграммами, характеризующими:

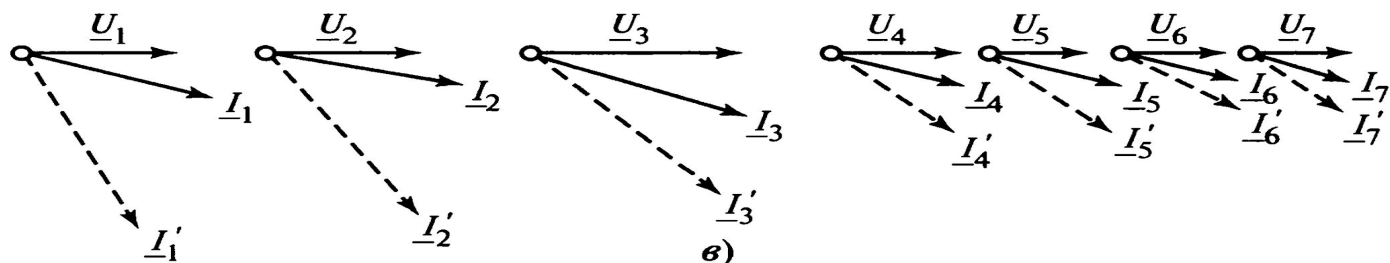
- увеличение угла сдвига фаз между током и
- напряжением по всем элементам сети Z — от генераторов электрической энергии G до потребителей M .
- Укажем возможные места включения компенсирующих устройств (синхронные компенсаторы СК, конденсаторные батареи).
- Действительные места их расстановки определяются технико-экономическими расчетами.



а)



б)



в)

Схема, поясняющая принцип и необходимость компенсации реактивной мощности: а — схема питания; б — схема замещения; в — векторные диаграммы, характеризующие угол между током и напряжением в различных точках системы электроснабжения до компенсации реактивной мощности и после; значения векторов тока и напряжения взяты условно; ---- векторы токов до компенсации; — — векторы токов после компенсации

Для компенсации РМ мощности,
потребляемой электроустановками
промышленного предприятия, используют

- генераторы электростанций,
 - синхронные двигатели (СД),
 - а также *дополнительно устанавливаемые компенсирующие устройства*
- ✓ синхронные компенсаторы (СК),
 - ✓ батареи конденсаторов (БК),
 - ✓ специальные статические источники реактивной мощности (ИРМ).

- СК являются **синхронными двигателями (СД)** облегченной конструкции без нагрузки на валу. Они могут работать в режиме как генерации реактивной мощности (при перевозбуждении компенсатора), так и ее потребления (при недовозбуждении).
- Изменение генерируемой или потребляемой реактивной мощности компенсатора осуществляют регулированием его возбуждения.
- В н. вр. отечественная промышленность изготавливает синхронные компенсаторы мощностью от 5 до 160 МВ*А.

Достоинствами СК как ИРМ

являются:

- положительный регулирующий эффект, заключающийся в том, что при уменьшении напряжения в сети генерируемая СК мощность увеличивается;
- возможность плавного и автоматического регулирования генерируемой РМ;
- достаточная терм. и эл.динам. стойкость обмоток СК во время коротких КЗ;
- возможность восстановления поврежденных СК путем проведения ремонтных работ.

- К недостаткам СК относятся
- удорожание
- и усложнение эксплуатации (сравнивая с КБ),
- значительный шум во время работы.
- Высокая стоимость, знач. уд. потери активной мощности, сложные условия пуска ограничивают применение СК на пром. предприятиях.

- В качестве доп. ИРМ для обеспечения ЭП пром.пред. сверх того количества, которое можно получить от эн.системы и от СД, имеющихся на предприятии, используются установки на базе КБ.

КБ включаются параллельно (поперечная компенсация) или последовательно нагрузке продольная компенсация).

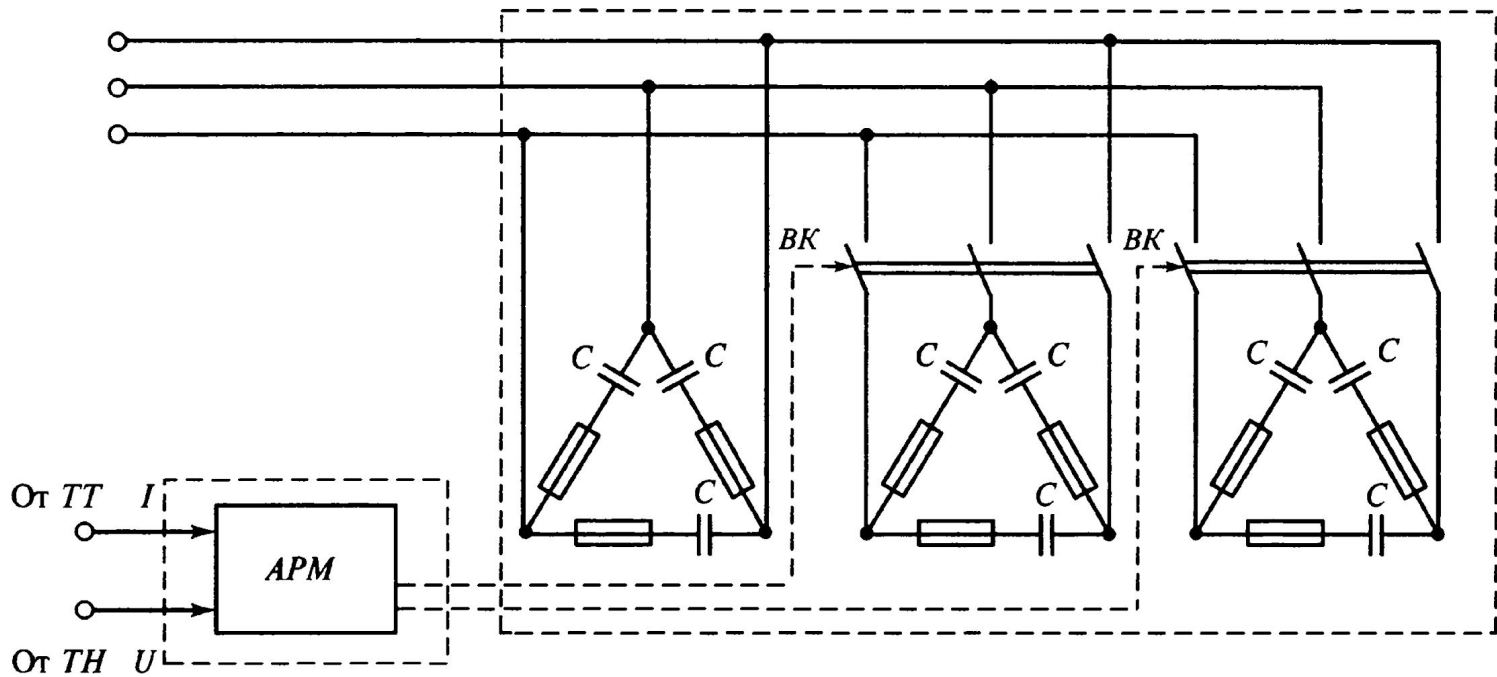
Для компенсации РМ и регулирования уровня напряжения применяют параллельное включение КБ, в кот-х конденсаторы, соединяются в **«треугольник»** и реже — в **«звезду»**.

Мощность трехфазной КБ ной установки, соединенной в «треугольник»,

$$Q_{\text{КБ}} = 3\omega C_{\phi} U^2,$$

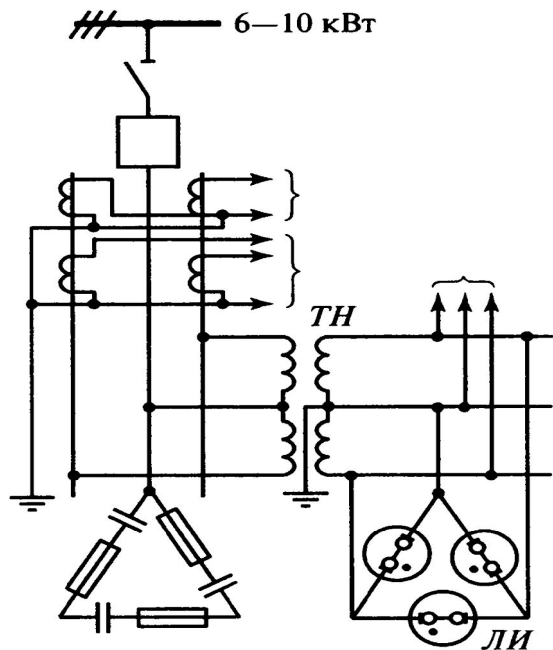
в «звезду»

$$Q_{\text{КБ}} = \omega C_{\phi} U^2.$$

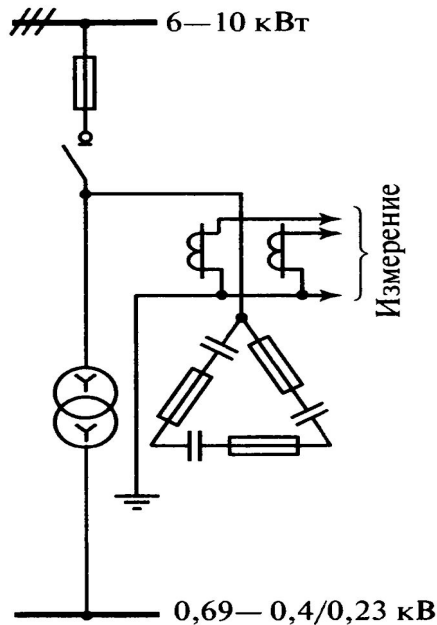


Принципиальная **схема регулируемой конденсаторной установки мощностью 112,5 квар**: С — конденсатор; ВК — вакуумный контактор; АРМ — блок автоматического управления; ТТ - трансформатор тока; ТН — трансформатор напряжения

- Регулирование м. б. **одно- или многоступенчатым**.
- При одноступенчатом регулировании автом. включается и отключается вся установка.
- При многоступенчатом регулировании автом. переключаются отдельные секции КБ



а)



б)

Схема включения КБ:

а — с отдельным выключателем;
 б — с выключателем нагрузки;
 ТН — трансформатор напряжения,
 используемый в качестве
 разрядного сопротивления для КБ;
 ЛИ — сигнальные индикаторные
 лампы

- Во избежание существенного возрастания затрат на отключающую, измер. и др. аппаратуру не рекомендуется установка КБ 6—10 кВ $Q < 400$ квар при присоединении конденсаторов с помощью отдельного выключателя (рис. а) и $Q < 100$ квар при присоединении конденсаторов через общий выключатель с силовым трансформатором, асинхронным двигателем и др. приемниками (рис. б).
- При отключении конденсаторов необходимо, чтобы запасенная в них энергия разряжалась автоматически на постоянно включенное активное сопротивление (например, ТН). Значение сопротивления д. б. таким, чтобы при отключении конденсаторов не возникло перенапряжения на их зажимах.

СТК

Элементами СТК являются :

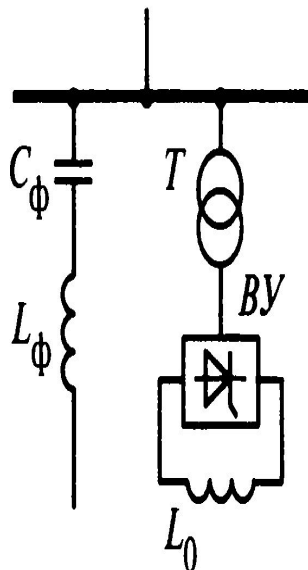
- **конденсатор**
- и **реактор** — накопители
- электромагнитной энергии
- и **вентили (тиристоры)**, обеспечивающие ее быстрое преобразование.

Группы вариантов схем:

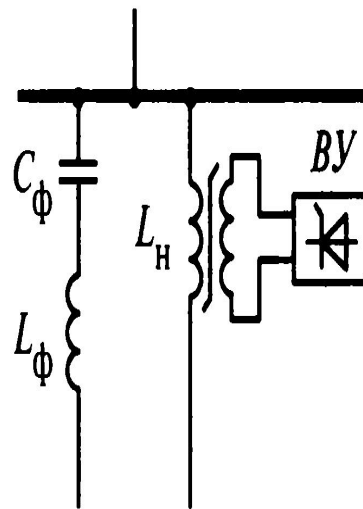
а - *мостовые ИРМ* с индуктивным накопителем L_0 , подключенным к сети через выпрямительное устройство ВУ и трансформатор Т ;

б - реакторы насыщения с нелин. ВАХ L_H ;

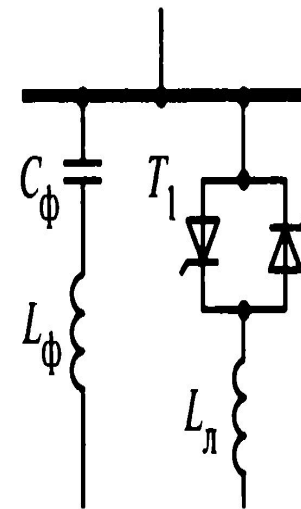
в - *реакторы* с линейной ВАХ L_l и последовательно включенным тиристорным ключом T_1



а)



б)



в)

Принципиальные схемы статических компенсирующих устройств. Содержат фильтры высших гармоник (генерирующая часть) $L\phi C\phi$ и регулируемый реактор в различных исполнениях.

Достоинства СТК — высокое быстродействие, надежность работы и малые потери активной мощности. **Недостатком** является необходимость установки дополнительного регулируемого реактора.

СТК могут работать по принципу компенсации

прямой - предусматривает

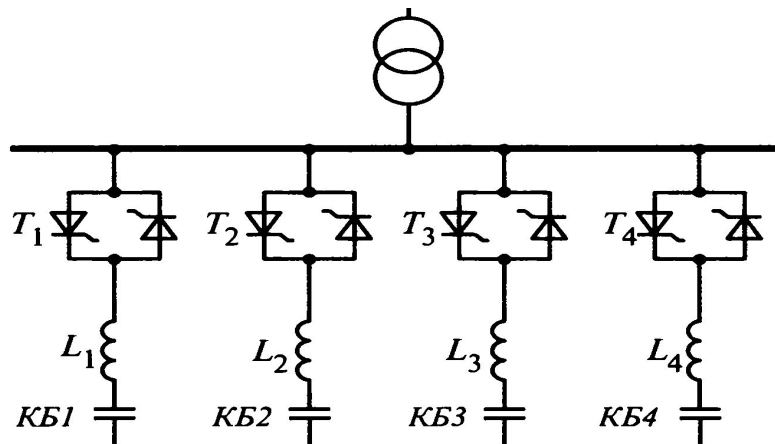
генерирование РМ СТК

Различают **ступенчатое** (секции КБ подключают с помощью

тиристорных ключей) и **плавное**

регулирование РМ (используют преобразователи частоты, преобразователи с искусственной коммутацией тиристором).

СТК с ступ. регулированием



Косвенная компенсация РМ

заключается в том, что параллельно нагрузке включается стабилизатор РМ, обеспечивающий

неизменную РМ $Q_{\Sigma} = Q_{H}(t) + Q_{CT}(t) = \text{const}$,

В качестве стабилизаторов в настоящее время используются тиристорные компенсаторы РМ.

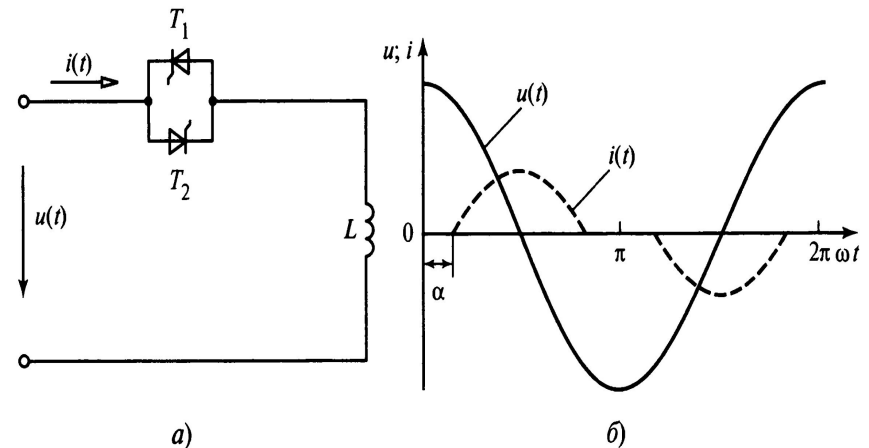
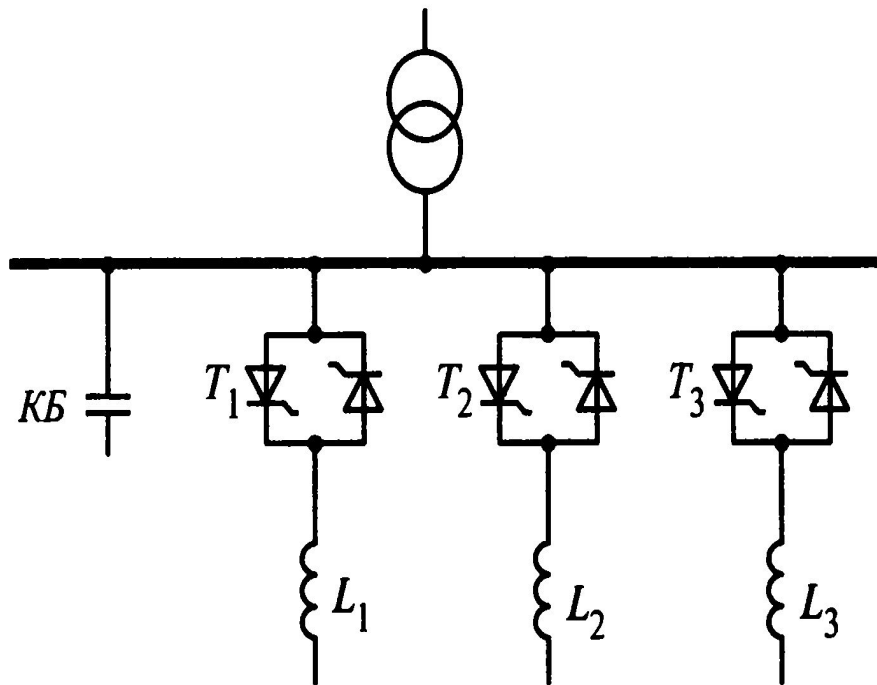


Схема фазоуправляемого тиристорного регулятора (а), кривые $i(t)$, $u(t)$ при угле управления $\alpha \neq 0$ (б)



- **Схема стабилизатора РМ с синхронизированными тиристорными ключами**

- В качестве ИРМ при косвенной компенсации также используют стабилизаторы с синхронизи-
- рованными тиристорными ключами $T_1 \dots T_3$. При изменении РМ нагрузки подключается различное количество реакторов. Для снижения тока переходного процесса вкл. и отк. реакторов производятся при $\alpha = \pi/2$, когда проходящий ток равен нулю. В связи с этим запаздывание на включение
- и отключение реакторов не превышает 10мс. Достоинством этого ИРМ является отсутствие высших гармоник в спектре тока.

Баланс реактивной мощности в узле 6-10 кВ

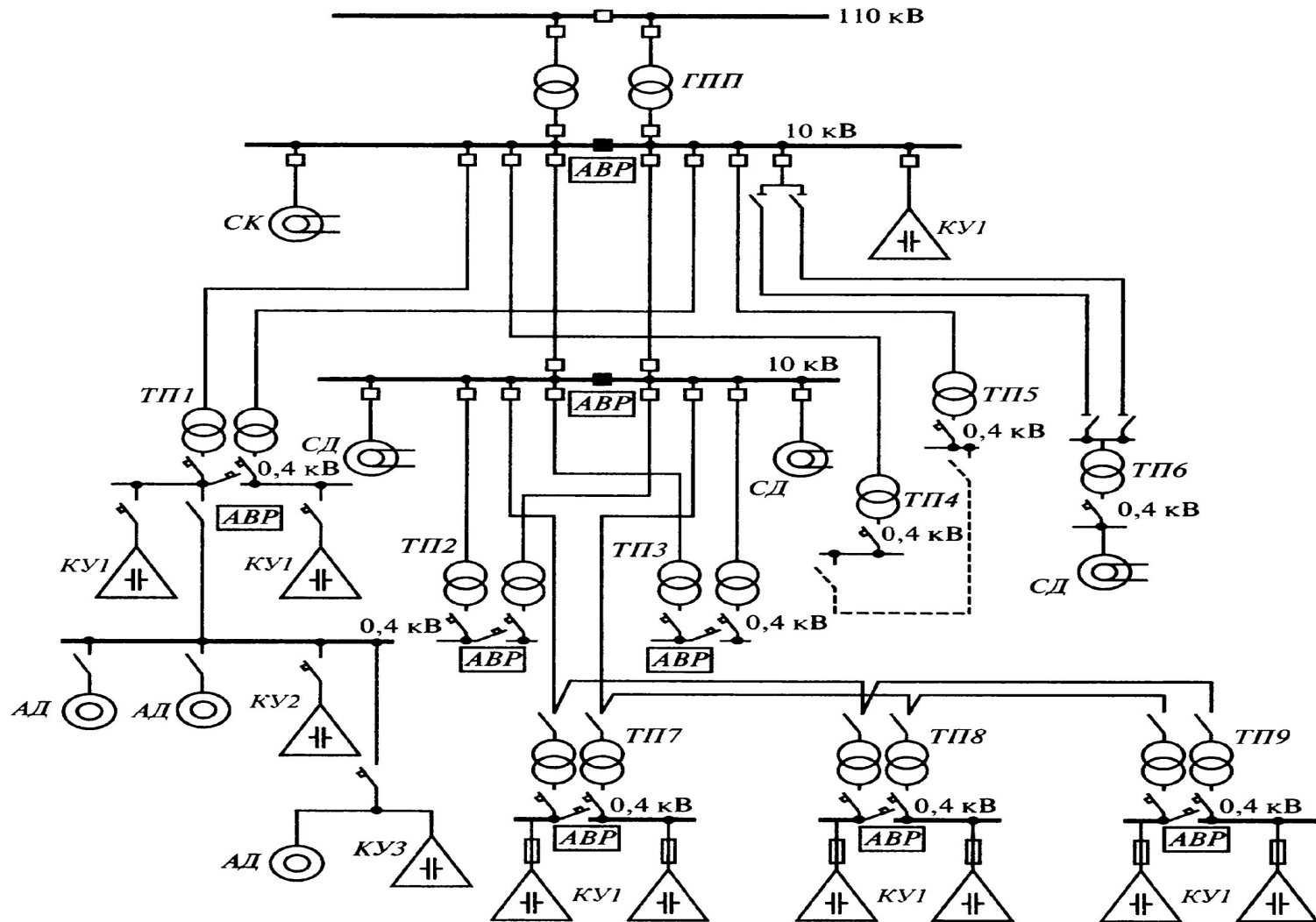
$$Q_{ВН} + Q_{ТП} + \Delta Q - Q_{сд} - Q_{КБ} - Q_{эл} = 0,$$

$Q_{ВН}$ — расчетная реактивная нагрузка приемников ВН 6 - 10 кВ;

$Q_{ТП}$ — некомпенсированная РМ нагрузки $Q_{Н}$ сети до 1 кВ, питаемой через цеховые ТП;

ΔQ — потери РМ в сети 6—10 кВ, особенно в трансформаторах ГПП.

- Использование конденсаторов на напряжение 6—10 кВ снижает затраты на компенсацию РМ, т.к. конденсаторы НН обычно более дорогие (на 1 квар мощности).
- В сетях НН (до 1 кВ) промпредприятий, к которым подключается большая часть ЭП, потребляющих РМ, коэффициент мощности нагрузки лежит в пределах 0,7 — 0,8.
- Эти сети электрически более удалены от источников питания [энергосистемы или местной тепловой электростанции (ТЭЦ)].
- Поэтому для снижения затрат на передачу РМ компенсирующие устройства располагают непосредственно в сети до 1 кВ.
- На предп. со спец. нагрузками (ударными, резкопеременными) кроме выше указанных КУ сетей второй группы применяют фильтрокомпенсирующие, симметрирующие и фильтросимметрирующие устройства.



- **Размещение КУ в СЭС промышленного предприятия:** ГПП — главная понизительная подстанция предприятия; СК — синхронный компенсатор; АВР — устройство автоматического ввода резерва; КУ1 — КБ для централизованной компенсации РМ; КУ2 — КБ для групповой компенсации РМ; КУ3 — КБ для индивидуальной компенсации РМ; ТП1-ТП9 — цеховые трансформаторные подстанции; СД — синхронные двигатели; АД — асинхронные двигатели

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ КУ

При проектировании определяют

- **наибольшие суммарные расчетные активную P_M**
- **и реактивную Q_M составляющие** электрических нагрузок предприятия, которые обуславливают **естественный коэффициент мощности.**

- **Наибольшая суммарная реактивная нагрузка предприятия**, принимаемая для определения мощности компенсирующих устройств, определяется по выражению
 - $Q_{M1} = K \times Q_M$
- где $K = 0,75 \dots 0,95$ – коэффициент, учитывающий несовпадение во времени наибольших активной нагрузки эн.системы и РМ промпредприятия, и значения коэффициента несовпадения для всех объединенных энергосистем принимаются в зависимости от отрасли промышленности.

- Расчет требуемой **мощности установки компенсации** $Q_{\text{КУдоп}}$ при известном $\cos\varphi$ или $\text{tg}\varphi$ и требуемому $\cos\varphi_{\text{доп}}$

$$Q_{\text{КУдоп}} = P_{\text{н}} \times K,$$

где $P_{\text{н}}$ – активная мощность нагрузки, K – коэффициент при требуемом $\cos\varphi_{\text{доп}}$.

После определения **требуемой мощности** выбирают тип устройства:

- ✓ *регулируемое или нерегулируемое,*
- ✓ *модульное или моноблочное,*
- ✓ *с фильтрами высших гармоник либо без фильтров,*
- ✓ *косинусные (фазовые) конденсаторы,*
- ✓ *тиристорные установки.*
- ✓ **Выбор конкретного устройства определяется как техническими параметрами, так и эконом. соображениями.**

В общем случае **определение мощности КУ** – это оптимизационная задача; целью является задача **поиска РМ устройства**, соответствующей **минимуму суммарных затрат** в системе электроснабжения

$$Z = Z_{п} + Z_{ку}$$

$Z_{п}$ — затраты, обусловленные активными потерями от прохождения потоков активных и реактивных мощностей;

$Z_{ку}$ — затраты на КУ.

При использовании батарей конденсаторов $Z_{ку} = \gamma_{ку} Q_{ку}$,

$\gamma_{ку}$ — удельные затраты на КБ, руб/квар в год;

$Q_{ку}$ — реактивная мощность компенсирующего устройства.

- Целевая функция при установке КБ на подстанции

$$Z = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R c_0 + \gamma_{ку} (Q_{н} - Q)$$

$Q_{н}$ — реактивная мощность нагрузки подстанции;

c_0 — уд.стоимость активных потерь;
 R — эквивалент.сопротивление сети;

$Q = Q_{н} - Q_{ку} - P_{М}$, протекающая в сети после установки КБ.

Взяв производную и приравняв ее нулю имеем

$$\frac{dZ}{dQ} = \frac{2Q}{U^2} R c_0 - \gamma_{ку} = 0,$$

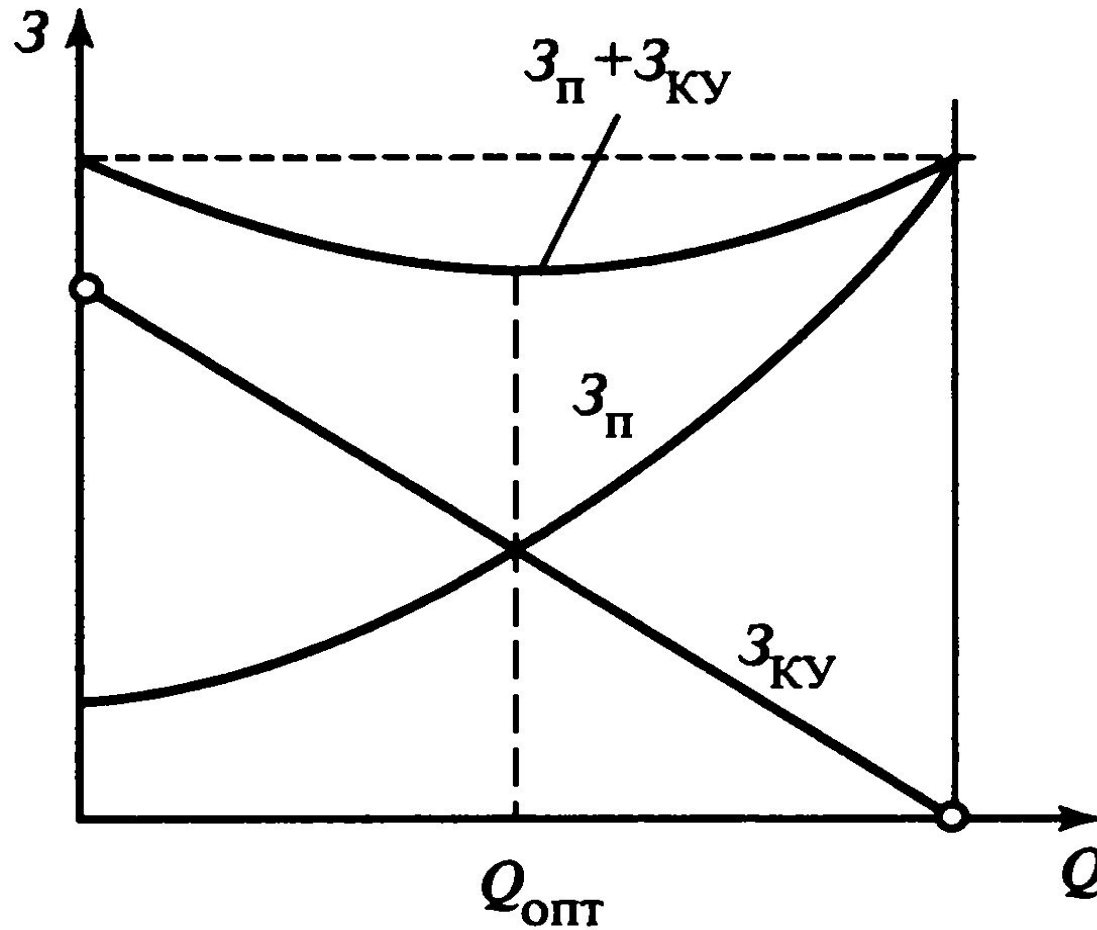
оптимальное значение $Q_{опт}$ после компенсации

$$Q_{опт} = Q \gamma_{ку} U^2 / (2 R c_0)$$

мощности КБ $Q_{ку} = Q_{н} - Q_{опт}$.

При расчете не учтено влияние $Q_{ку}$ и $Q_{опт}$ на U , т.к. $\Delta U = Q_{р} / U \approx 0$.

К определению минимума суммарных затрат на компенсацию



КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СЕТЯХ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ

- БК допускается применять так же, как и в сетях со спокойной нагрузкой, если выполняются следующие условия:

- для вентильных преобразователей (ВП) с мощностью $S_{ВП}$

$$S_K / S_{ВП} \geq 200,$$

- для других нелинейных нагрузок с суммарной мощностью $S_{НЛ}$

$$S_K / S_{НЛ} \geq 100,$$

где S_K — мощность КЗ.

$$K_{НС} = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^m U_n^2}}{U_{НОМ}},$$

- Если $K_{НС} < 5\%$, рекомендуется применять в качестве устройств компенсации КБ в комплекте с защитным реактором P и разрядником $ВР$

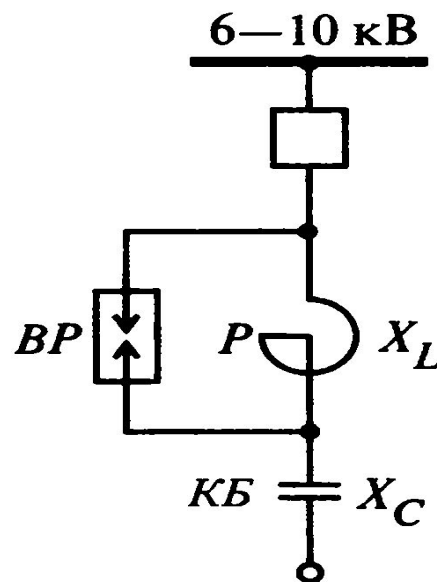
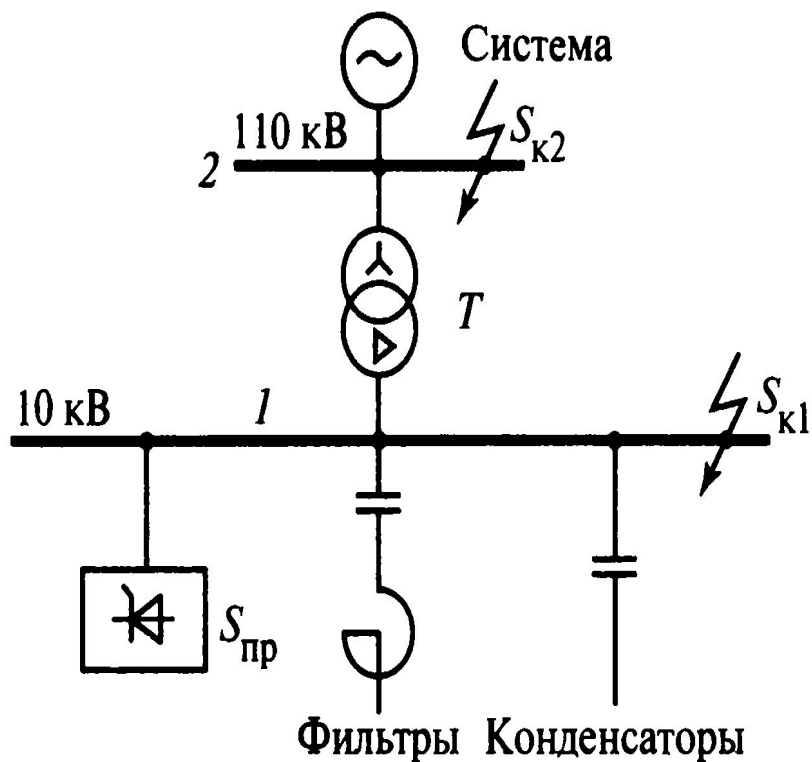


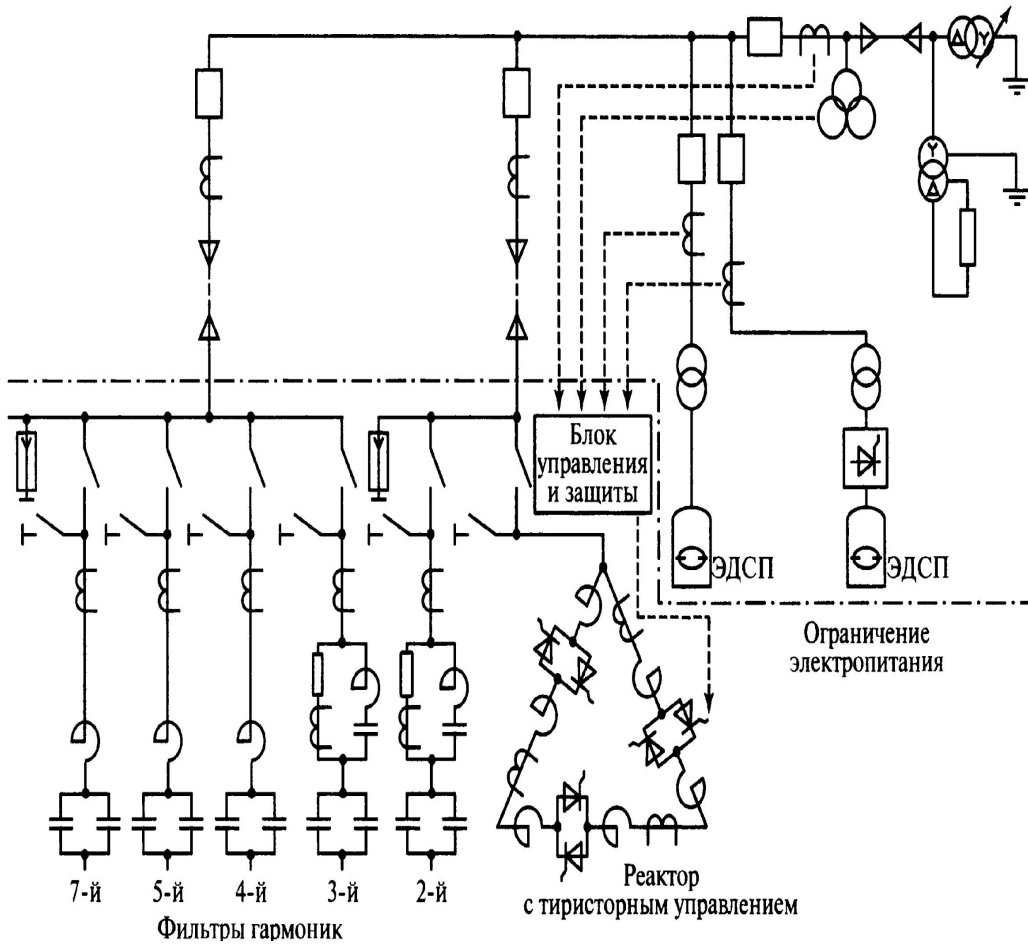
Схема защиты КБ от высших гармоник



- При коэффициенте **$K_{нс} > 5\%$** рекомендуется применять силовые фильтры высших гармоник

Рис. СЭС с КБ и фильтрами высших гармоник:

$S_{k1} > S_{k2}$ — мощность КЗ на шинах 1 и 2;
 Т — силовой трансформатор;
 $S_{пр}$ — мощность преобразователя



Типовая схема включения устройств компенсации реактивной мощности для ЭДСП

Поскольку **снижение уровней высших гармоник** в эл. сетях является частью общей задачи уменьшения влияния нелин. нагрузок на питающую сеть и улучшения качества эл.эн., то решают эту задачу комплексно, применяя многофункциональные устройства.

Таковыми устройствами, обеспечивающими минимизацию уровня высших гармоник и компенсацию реактивной мощности в СЭС предприятий, являются *силовые резонансные фильтры высших гармоник*, получившие название **фильтрокомпенсирующие**

- **устройства (ФКУ).**