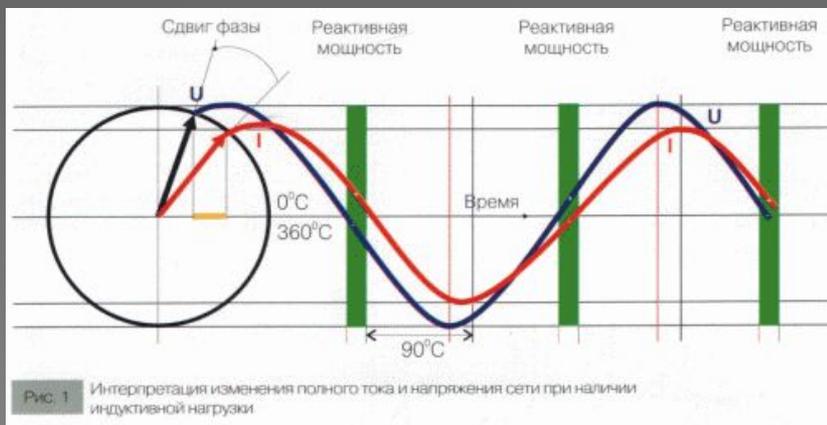


# Компенсация реактивной мощности

## Теоретическая база



К.Т.Н., доцент,  
А.В. Беспалов

# **Задачи компенсации реактивной мощности (КРМ)**

- **снижение расходов на электроэнергию;**
- **снижение требований к мощности системы;**
- **улучшение стабильности напряжения;**
- **снижение потерь.**

# Способы установки источников реактивной мощности (ИРМ):

- индивидуальный (непосредственно у нагрузок, обычно линейных)
- групповой (на присоединении или на подстанции).



## Преимущества индивидуальной установки рядом с нагрузками:

- ✓ предсказуемость; ИРМ не могут создать проблемы в сети при работе без нагрузки;
- ✓ не требуются отдельные выключатели, нагрузка всегда включается вместе с относящимся к нему конденсатором;
- ✓ оптимизация режимов работы нагрузки за счет более эффективного использования электроэнергии и снижения просадок напряжения;
- ✓ нагрузки можно переставлять и переподключать вместе с относящимися к ним конденсаторами;
- ✓ снижение потерь в питающей линии;
- ✓ повышение пропускной способности системы.

## Преимущества установки ИРМ на присоединении или на подстанции:

- ✓ экономичность - ниже цена за квар;
- ✓ технологичность — имеются стандартные комплектные установки
- ✓ простота автоматизации при большой единичной мощности - переключение конденсаторов обеспечивает получение строго необходимой реактивной мощности, что исключает перекомпенсацию и связанные с ней перенапряжения.
- ✓ повышение пропускной способности системы.

Метод	Преимущества	Недостатки
<b>Индивидуальные конденсаторы</b>	Наиболее эффективный метод, наибольшая гибкость	Большая стоимость установки и обслуживания
<b>Нерегулируемая батарея</b>	Наиболее экономичное решение, требуется меньше точек установки	Менее гибкое решение, требуются выключатели и/или контакторы
<b>Автоматически регулируемая батарея</b>	Наилучшее решение при меняющихся нагрузках, исключаются перенапряжения, низкая стоимость установки	Выше стоимость оборудования
<b>Комбинированный</b>	Наиболее подходящее решение при большом количестве двигателей	Менее гибкое решение

## Изучение особенностей объекта

- ❖ *Мощность нагрузки*
- ❖ *Постоянство нагрузки*
- ❖ *Нагрузочная способность*
- ❖ *Способ начисления платы за электроэнергию*

## Баланс реактивной мощности в сети

$$Q_{П_{НБ}} = k_0 \sum_{i=1}^n Q_{НБ_i} + \Delta Q_{T_{\Sigma}} + \sum_{j=1}^m (\Delta Q_j - Q_{C,j})$$

где  $k_0$  – коэффициент одновременности наибольших реактивных нагрузок,  $k_0 \approx 0,98$

$Q_{НБ_i}$  – максимальная реактивная нагрузка  $i$  го узла

$\Delta Q_{T_{\Sigma}}$  – суммарные потери реактивной мощности в СТ,  $\Delta Q_{T_{\Sigma}} \approx 0,1 \cdot S_{max}$

$\Delta Q_j$  – потери реактивной мощности в  $j$  ой линии

$Q_{C,j}$  – реактивная мощность, генерируемая  $j$  ой линией

сеть 110 кВ

сеть 35 кВ

сеть 220 кВ

$$\Delta Q_L = Q_C$$

$$x_0 = 0,41 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$$

$$x_0 = 0,42 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$$

$$Q_{П_{НБ}} = Q_{Г_{\Sigma}} \text{ баланс}$$

$$q_C = 0,14 \frac{\text{Мвар}}{\text{км}}$$

Если  $Q_{П_{НБ}} > Q_{Г_{\Sigma}}$ , то

$$Q_{П_{НБ}} > Q_{Г_{\Sigma}}$$

$$Q_{КУ_{\Sigma}} = Q_{П_{НБ}} - Q_{Г_{\Sigma}}$$

## Размещение КУ в сети

1. КУ нужно распределять так, чтобы потери мощности в сети были минимальными.
2. В электрических сетях двух уровней напряжения следует в первую очередь устанавливать КУ на шинах НН ПС с более низким номинальным напряжением высокой стороны.
3. В сети с одним уровнем напряжения целесообразно компенсировать реактивную мощность в первую очередь у наиболее электрически удаленных потребителей.
4. При незначительной разнице в электрической удаленности ПС от ИП в сети одного номинального напряжения расстановку КУ следует производить по условию равенства  $\operatorname{tg}\varphi$  на шинах НН, исходя из баланса реактивной мощности:

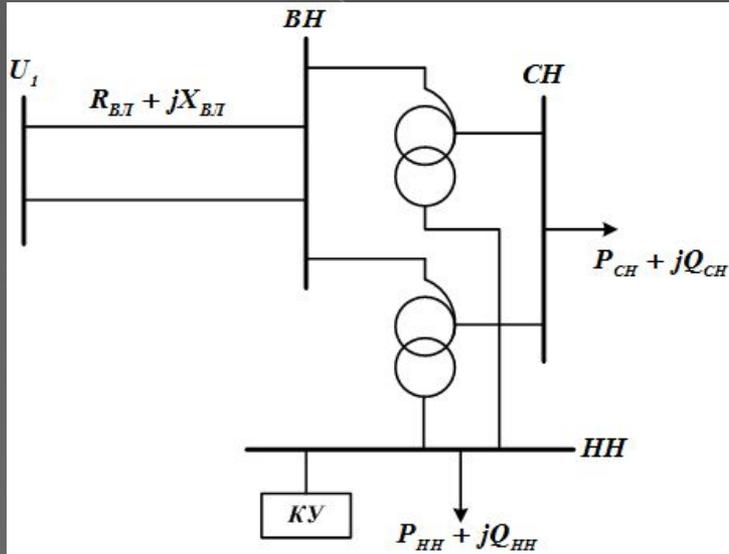
$$\operatorname{tg}\varphi_B = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{НБ_i} - Q_{КУ_\Sigma}}{\sum_{i=1}^n P_{НБ_i}}$$

Мощность КУ в каждом узле  $Q_{КУ_i} = \operatorname{tg}_{\max_i} (\operatorname{tg} \varphi_i - \varphi_B)$

$$Q_{КУ_{\text{факт}}} = 1,1 \cdot Q_{КУ_i} \quad - \text{ для резервирования}$$

# Регулирование напряжения в сети с помощью КРМ

Условие выбора – поддержание желаемого напряжения на сторонах СН и НН



$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U}$$

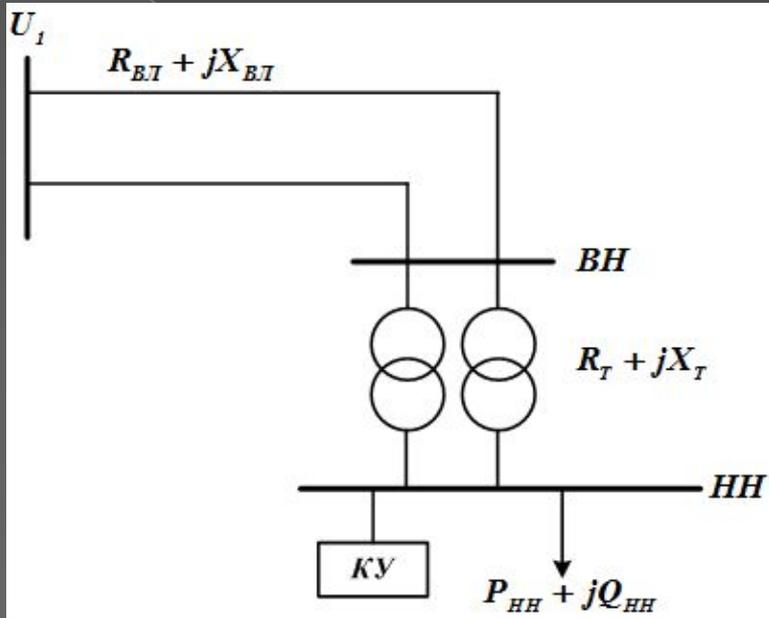
Суммарные потери напряжения в сети

$$\Delta U_{\Sigma} = \frac{(P_{ВН} + P_{НН})(R_{СН} + R_{ТС}) + P_{ТН} R_{НН} + P_{СН} R_{НН} + (Q_{КУ} + Q_{ВЛ} - Q_{ТВ})(X_{СН} + X_{ТС}) + Q_{НН} X_{КУ} + (Q_{ТН} - Q) X}{U_1}$$

Мощность КУ

$$Q_{КУ} = \frac{P_{ВН} (R_{ТВ} + R_{ТС} + R_{НН}) + P_{ВЛ} (R_{ТВ} + R_{ТН} + R_{НН}) + Q_{ВЛ} (X_{ТВ} + X_{ТС} + X_{НН}) + Q_{ВЛ} (X_{ТВ} + X_{ТН} + X_{НН}) - \Delta U_{\Sigma} U}{X_{ВЛ} + X_{ТВ} + X_{ТН}}$$

# Регулирование напряжения в сети с помощью КРМ



$$Q_{KY} = Q_{HH} - \frac{\Delta U_{\Sigma} U_{BЛ} - P_{HH} (R_{BЛ} + R_T)}{X_{BЛ} + X_T}$$

$$\Delta U_{CH} = U_1 - U_{CH}^{BЛ} = U_1 - U_{CH} \frac{U_1}{U_{CH_{НОМ}}}$$

$$\Delta U_{HH} = U_1 - U_{HH}^{BЛ} = U_1 - U_{HH} \frac{U_1}{U_{HH_{НОМ}}}$$

$$\Delta U_{\Sigma} = \Delta U_{CH} + \Delta U_{HH}$$

$$\Delta U_{\Sigma} = 2U_{CH} - U_{\text{жел}} \frac{U_1}{U_{HH_{НОМ}}} - U_{\text{жел}} \frac{U_1}{U_{НОМ}}$$

# Регулирование напряжения в сети с помощью КРМ

## Продольная КРМ

1. Потери напряжения в ВЛ без КРМ

$$\Delta U = \frac{PR_{Л} + QX_{Л}}{U}$$

2. Допустимые потери напряжения, кВ

$$\Delta U_{\text{доп}} = \frac{\Delta U_{\text{доп}} \% U_{\text{ном}}}{100}$$

3. Сопротивление КУ из условия снижения  $\Delta U$  до  $\Delta U_{\text{доп}}$

$$\Delta U_{\text{доп}} = \frac{KR_{Л} + Q(X_{Л} - X_{КУ})}{U_{\text{ном}}}$$

4. Ток в линии

$$I_{Л} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3}U_{\text{ном}}}$$

откуда

$$X_{КУ} = \frac{PR_{Л} + QX_{Л} - \Delta U_{\text{доп}}U_{\text{ном}}}{Q}$$

5. Выбор серийно выпускаемого однофазного конденсатора для снижения потерь напряжения

6. Номинальный ток конденсатора

$$I_{К_{\text{ном}}} = \frac{Q_{К_{\text{ном}}}}{U_{К_{\text{ном}}}}$$

7. Число конденсаторов, включенных параллельно в одну фазу  
(обеспечение расчетного тока линии)

$$m = \frac{I_{Л}}{I_{К_{\text{ном}}}}$$

# Регулирование напряжения в сети с помощью КРМ

## Продольная КРМ

8. Сопротивление конденсатора

$$X_{K_{НОМ}} = \frac{U_{K_{НОМ}}}{I_{K_{НОМ}}}$$

9. Число конденсаторов, включенных последовательно в одну фазу (обеспечение  $\Delta U_{жел}$ )

10. Общее число конденсаторов в УПК

$$n_{\Sigma} = 3 \cdot n \cdot m$$

$$n = \frac{m X_{КУ}}{X_{K_{НОМ}}}$$

11. Установленная мощность УПК

$$Q_{КУ}^{уст} = n_{\Sigma} Q_{K_{НОМ}}$$

12. Номинальное напряжение КУ (УПК)

$$U_{КУ_{НОМ}} = n U_{K_{НОМ}}$$

13. Номинальный ток УПК

$$I_{КУ_{НОМ}} = m I_{K_{НОМ}}$$

14. Фактическое сопротивление КУ

$$X_{КУ_{факт}} = \frac{n X_{K_{НОМ}}}{m}$$

15. Фактические потери напряжения после КРМ

$$\Delta U_{факт} = \frac{RR_{Л} + Q(X_{Л} - X_{КУ_{факт}})}{U_{НОМ_{сети}}}$$

16. Сравнение  $\Delta U_{факт}$  с  $\Delta U_{доп}$

$$\Delta U_{факт} \leq \Delta U_{доп}$$

# Экономическая задача КРМ

$$Z = EK + И \Rightarrow \min$$

Зима

$tg\varphi_3$

Лето

$$Q_{KV_i}^3 = P_{max}^3 (tg\varphi_3 - tg\varphi_3)$$

$$Q_{KV_{факт}}^3 \geq \frac{Q_{KV_i}^3}{N_{с.ш}}$$

$$Q_{KV_i}^L = P_{max}^L (tg\varphi_L - tg\varphi_3)$$

$$Q_{KV_{факт}}^L \geq \frac{Q_{KV_i}^L}{N_{с.ш}}$$

Предельные значения  $tg\varphi$

$U_{НОМ}$	$tg\varphi_{ПРЕД}$
110 кВ	0,5
35 кВ	0,4
6 ÷ 20 кВ	0,4
0,4 кВ	0,35

Сравнение  $tg\varphi_3$ ,  $tg\varphi_3$ ,  $tg\varphi_{ПРЕД}$

$$tg\varphi_3 \leq tg\varphi_{ПРЕД}$$

$$tg\varphi_3 < tg\varphi_{ПРЕД}$$

## Оптимальное размещение КУ в распределительной сети

1. Исключение узлов, в которых установка КУ невозможна или нежелательна.
2. Определение граничного значения уменьшения потерь мощности в сети, при котором установка КУ еще выгодна

$$\delta P_{ГР} = \frac{3_{КУ}}{C_{\Delta W} T} = \frac{(E + \alpha_{\Sigma}) K_{КУ}}{C_{\Delta W} T}$$

3. Вычисление значений снижения потерь мощности после установки КУ

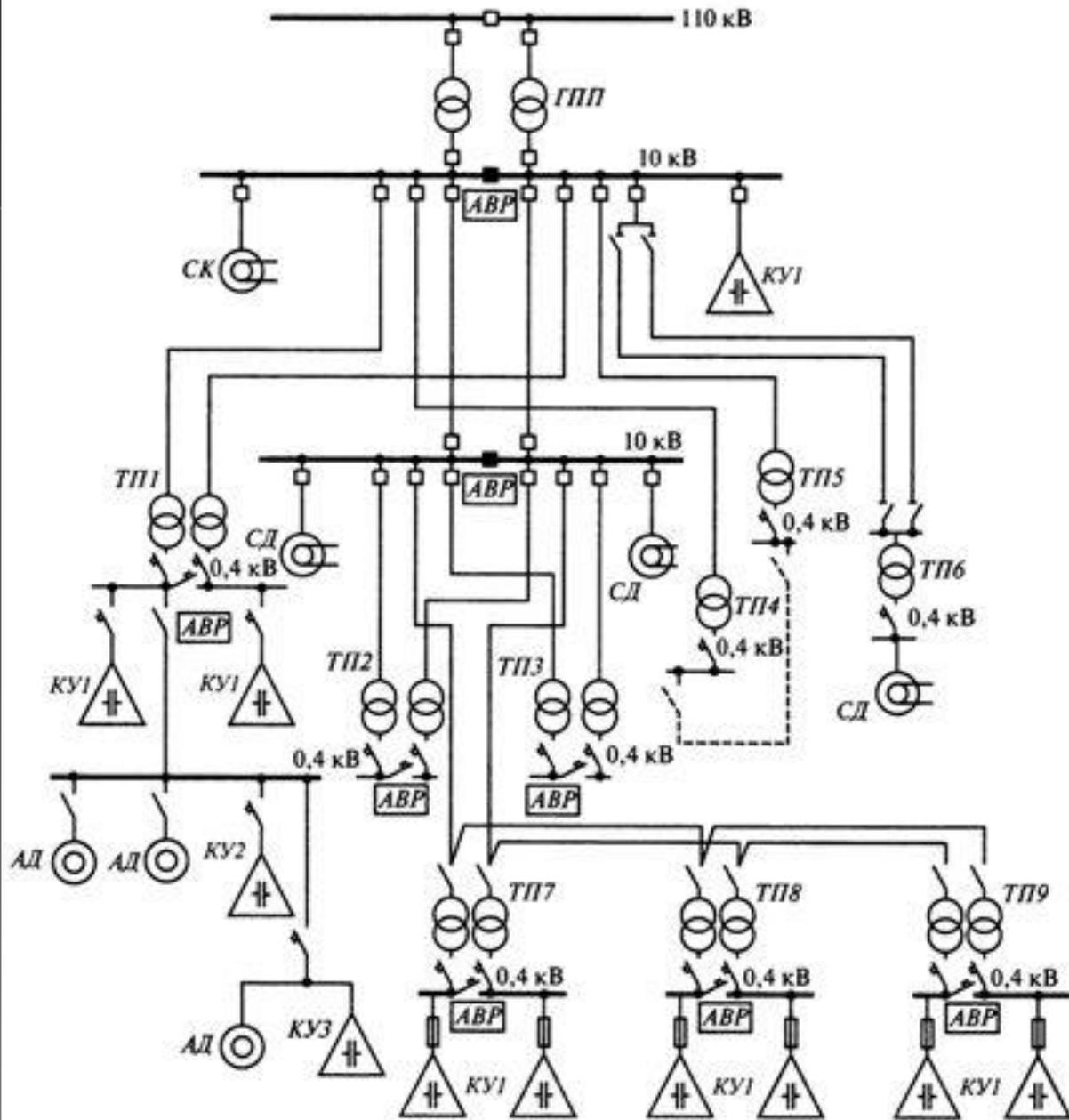
$$\delta P_K = \Delta P_0 - \Delta P_{КУ_i}$$

4. Определение целесообразности установки КУ в узле

**Если  $\delta P_K \geq \delta P_{ГР}$ , то установка КУ оправдана**

5. Определение узла сети, при установке КУ в котором будет наибольшее снижение потерь мощности

$$\delta P_K = \max \{ \delta P_i \}$$



- ❑ «Методические указания по проектированию развития энергосистем», утвержденные приказом Минпромэнерго России от 30 июня 2003 года № 281.
- ❑ «Инструкция по проектированию городских электрических сетей». РД 34.20.185-94 (СО 153-34.20.185-94, приказ ОАО РАО «ЕЭС России» от 14.08.2003 №4 22).
- ❑ Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации, утвержденные приказом Минэнерго России от 19 июня 2003 № 229, зарегистрированные в Минюсте (регистрационный № 4799 от 20 июня 2003 года).
- ❑ Информационное письмо ОАО РАО «ЕЭС России» от 7.07.2006 № ВП-170 «О рекомендациях к разработке программ «Реактивная мощность» и «Повышение надежности распределительных электрических сетей».
- ❑ НТП ЭПП-94 (ТЯЖПРОМЭЛЕКТРОПРОЕКТ имени Ф.Б.Якубовского) «Нормы технологического проектирования. Проектирование электроснабжения промышленных предприятий» М788-1090
- ❑ Правила учета электрической энергии. Минтопэнерго России, 19.09.1996; Минстрой России, 20.09.1996

- ❑ СО 153-34.20.112 (РД 34.20.112) Указания по выбору средств регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности при проектировании электроснабжения сельскохозяйственных объектов и электрических сетей сельскохозяйственного назначения: /Утв. Минэнерго СССР
- ❑ СО 153-34.20.544 (РД 34.20.544) Типовая инструкция по оптимальному управлению потоками реактивной мощности и уровнями напряжения в электрических сетях энергосистем: ТИ 34-70-002-82: /Утв. Главтехупр. Минэнерго СССР
- ❑ СТО 56947007-29.180.02.140-2012 Методические указания по проведению расчетов для выбора типа, параметров и мест установки устройств компенсации реактивной мощности в ЕНЭС. ПАО «ФСК ЕЭС»
- ❑ РТМ 36.18.32.6-92 Указания по проектированию установок компенсации реактивной мощности в электрических сетях общего назначения промышленных предприятий

экономическая величина реактивной мощности  $Q_э$  в часы максимальных нагрузок системы определяется как

$$Q_э = \operatorname{tg} \phi_э \cdot P_p$$

1. Если  $Q_э \geq Q_p$ , то применять дополнительные меры по компенсации реактивной мощности не обязательно.
2. Если  $Q_э > Q_p$ , то мощность компенсирующих устройств  $Q_{ку}$  определим как  $Q_{ку} = Q_p - Q_э$ .
3. Если  $Q_p < 0$ , то это говорит о том, что потребитель генерирует реактивную мощность. Величина генерации не должна превышать 10 % от  $P_p$ .

Для нахождения величины компенсирующих устройств подключенных к шинам 6-10 кВ, определяем

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sum Q_{pB}}{\sum P_{pB}}$$

где  $\operatorname{tg} \varphi$  - коэффициент расчетной реактивной мощности, подключенной к шинам 6-10 кВ нагрузки с напряжением  $>1000$  В;  $\sum Q_{pB}$  и  $\sum P_{pB}$  - суммарная реактивная и активная расчетные мощности нагрузки с напряжением 6-10 кВ, подключенной к шинам.

Если  $\operatorname{tg} \varphi_B \leq \operatorname{tg} \varphi_{\text{э}}$  размещать компенсирующие устройства на шинах 6-10 кВ не рекомендуется.

Если  $\operatorname{tg} \varphi_B > \operatorname{tg} \varphi_{\text{э}}$ , то мощность компенсирующих устройств, подключаемых к шинам 6-10 кВ:

$$Q_{\text{ку.В}} = (\operatorname{tg} \varphi_B - \operatorname{tg} \varphi_{\text{э}}) \cdot P_p$$

Оставшуюся часть компенсирующих устройств размещаем на стороне низшего напряжения цеховых подстанций:

$$Q_{\text{ку.н}} = Q_{\text{ку}} - Q_{\text{ку.в}}$$

Распределение компенсирующих устройств производим пропорционально расчетным реактивным нагрузкам цехов.

$$Q_{\text{ку.нi}} = (Q_{\text{ку.н}} \cdot Q_{\text{рнi}}) / \sum Q_{\text{рн}}$$

где  $Q_{\text{ку.нi}}$  - мощность компенсирующих устройств  $i$ -го цеха на низком напряжении;

*Примечание:* 1) устанавливать компенсирующие устройства мощностью менее 150 квар обычно экономически невыгодно;  
2) на шинах низшего напряжения цеховой подстанции может быть установлена компенсирующая установка большей мощности, чем по расчету с целью снижения перетоков реактивной мощности и доведению коэффициента реактивной мощности по конкретной цеховой подстанции до необходимого уровня ( $0,3 \div \text{tg } \phi_3$ ).

Оставшуюся часть компенсирующих устройств размещаем на стороне низшего напряжения цеховых подстанций:

$$Q_{\text{ку.н}} = Q_{\text{ку}} - Q_{\text{ку.в}}$$

Распределение компенсирующих устройств производим пропорционально расчетным реактивным нагрузкам цехов.

$$Q_{\text{ку.ни}} = (Q_{\text{ку.н}} \cdot \Delta P_i) / \Sigma \Delta P_i$$

где  $Q_{\text{ку.ни}}$  - мощность компенсирующих устройств  $i$ -го цеха на низком напряжении;

$\Delta P_i$  – потери в питающей цепи подстанции  $i$ -го цеха

$$\Delta P_i = I^2 (R_{\text{КЛ}i} + R_{\text{Тр}i})$$

В случае распределения на стороне 0,4 кВ одной подстанции, вначале распределяется общая мощность БСК подстанции, а затем по силовым пунктам от подстанции тем же способом.

При этом  $\text{tg}\varphi$  должен быть положительным.