



# Электроснабжение предприятий

**Раздел 4.** Компенсация реактивной  
мощности.

**Тема 4.2.** Выбор компенсирующих  
устройств, и их распределение в  
электрической сети

# ВЫБОР УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

---

- Реактивная мощность, потребляемая предприятием, может быть получена из энергосистемы и от установленных на предприятии компенсирующих устройств. В качестве компенсирующих устройств (КУ) предприятия могут быть использованы компенсирующие устройства низшего и высшего напряжения, а так же синхронные двигатели, при их наличии.

- ✦ Величина реактивной мощности, передаваемой из системы, определяется на основании заключаемых договоров на поставку электроэнергии и характеризуется двумя значениями:
- ✦  $Q_{э1}$  – реактивная мощность, переданная предприятию в режиме наибольшей нагрузки (определяет суммарную мощность КУ предприятия);
- ✦  $Q_{э2}$  – реактивная мощность, переданная предприятию в режиме наименьшей нагрузки (определяет регулируемую часть КУ).
- ✦ Суммарную мощность КУ определяют по балансу реактивной мощности на границе раздела предприятия и энергосистемы в период наибольшей активной нагрузки энергосистемы
- ✦ 
$$Q_{КУ} = Q_p - Q_{э1}.$$

- 
- При решении задачи компенсации реактивной мощности необходимо установить оптимальное соотношение между источниками реактивной мощности НН и ВН, принимая во внимание потери электроэнергии на генерацию реактивной мощности, потери электроэнергии на передачу из сети ВН в сеть НН и удорожание цеховых трансформаторных подстанций при загрузке их реактивной мощностью.

# ВЫБОР МОЩНОСТИ НИЗКОВОЛЬТНЫХ КОНДЕНСАТОРНЫХ БАТАРЕЙ

- ✳ Одновременно с выбором числа и мощности цеховых трансформаторов должен решаться вопрос об экономически целесообразной величине реактивной мощности, передаваемой через трансформатор в сеть 0,4 кВ.
- ✳ В общем случае определение мощности компенсирующих устройств является оптимизационной задачей, основанной на минимуме суммарных затрат [7]

- ✳ 
$$Z = Z_{\Pi} + Z_{\text{к}}, \quad (2.5)$$

- ✳ где  $Z_{\Pi}$  – затраты, обусловленные активными потерями, связанными с потоками активных и реактивных мощностей;  $Z_{\text{к}}$  – затраты на компенсирующие устройства.

- ✳ При использовании конденсаторных батарей принимают

- ✳ 
$$Z_{\text{к}} = z_{\text{к}} Q_{\text{к}} \quad (2.6)$$

- ✳ где  $z_{\text{к}}$  – удельные затраты на конденсаторные батареи в год,  $Q_{\text{к}}$  – реактивная мощность батареи.

✘ Целевая функция при установке конденсаторной батареи на подстанции

✘ 
$$Z = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} RC_0 + z_k(Q_p - Q), \quad (2.7)$$

✘ где  $Q_p$  – расчетная реактивная мощность подстанции;  $C_0$  – удельная стоимость активных потерь;  $R$  – эквивалентное активное сопротивление сети;

✘  $Q = Q_p - Q_k$  подставим в 2.7 и получим  $z_k * Q_k$  – реактивная мощность, протекающая в сети после установки конденсаторной батареи.

✘ Минимум целевой функции (2.7) находится приравниванием нулю первой производной

✘ 
$$\frac{dZ}{dQ} = \frac{2Q}{U^2} RC_0 - z_k = 0, \quad (2.8)$$

✘ откуда

✘ 
$$Q = \frac{z_k U^2}{2RC_0}. \quad (2.9)$$

✳ Суммарную расчетную мощность конденсаторных батарей низшего напряжения (НКБ), устанавливаемых в цеховой сети рассчитывают в два этапа:

- 1) определение мощности НКБ  $Q_{\text{нкб1}}$  с учетом пропускной способности трансформаторов;
- 2) определение дополнительной мощности НКБ  $Q_{\text{нкб2}}$  в целях оптимального снижения потерь в трансформаторах и в сети 6 - 20 кВ предприятия.

✳ Суммарная расчетная мощность  $Q_{\text{нкб}}$

✳ 
$$Q_{\text{нкб}} = Q_{\text{нкб1}} + Q_{\text{нкб2}}, \quad (2.10)$$

✳ 
$$Q_{\text{нкб1}} = Q_p - Q_{\text{м.т}}, \quad (2.11)$$

✳ где  $Q_p$  – расчетная реактивная мощность цеха (производственного помещения),  $Q_{\text{м.т}}$  – максимальная реактивная мощность, которую целесообразно передать через трансформаторы в сеть 0,4 кВ

✳ 
$$Q_{\text{м.т}} = \sqrt{(NK_3 S_{\text{н.т}})^2 - P_p^2} \quad (2.12)$$

- 
- ✦ Если в расчетах оказывается, что  $Q_{\text{нкб}1} < 0$ , то установка НКБ при выборе оптимального числа трансформаторов не требуется, т.е.  $Q_{\text{нкб}1} = 0$ .
  - ✦ Дополнительная мощность  $Q_{\text{нкб}2}$  НКБ для данной группы трансформаторов определяется
  - ✦ 
$$Q_{\text{нкб}2} = Q_p - Q_{\text{нкб}1} - \gamma N S_{\text{н.т}}, \quad (2.14)$$
  - ✦ где  $\gamma$  – расчетный коэффициент, зависящий от расчетных параметров  $K_{p1}$  и  $K_{p2}$ .
  - ✦ В зависимости от схемы питания сети  $\gamma$  так же определяется по-разному:

✘ Значение  $K_{p1}$  зависит от удельных приведенных затрат на НКБ и ВКБ и потерь активной мощности

$$\times \quad K_{p1} = \frac{3_{\text{НК}} - 3_{\text{ВК}}}{C_{\text{р.п}}} \cdot 10^3, \quad (2.15)$$

✘ где  $C_{\text{р.п}}$  – расчетная стоимость потерь (только для расчета компенсации реактивной мощности)

✘ Значения  $K_{p2}$  определяются по формуле

$$\times \quad K_{p2} = \frac{l S_{\text{н.т}}}{F}, \quad (2.16)$$

✘ где  $l$  – длина линии (при магистральной схеме с двумя трансформаторами – длина участка, км, до первого трансформатора),  $F$  – сечение питающей линии.

✘ Если в расчетах оказывается, что  $Q_{\text{НКБ}2} < 0$ , то  $Q_{\text{НКБ}2}$  принимается равной 0.

# ВЫБОР МОЩНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

- ✦ Реактивная мощность в сетях 6 – 10 кВ промышленных предприятий  $Q_B$  складывается из расчетной реактивной мощности приемников 6 – 10 кВ  $Q_{p.v}$ , некомпенсированной реактивной нагрузки сети напряжением ниже 1 кВ  $Q_{max.T}$ , потерь реактивной мощности в сети 6 – 10 кВ  $\Delta Q$  (в трансформаторах, реакторах)
- ✦ 
$$Q_B = Q_{p.v} + Q_{max.T} + \Delta Q. \quad (2.17)$$
- ✦ Выбор оптимальной мощности компенсирующих устройств проводят для режима максимальных нагрузок.

✱ В общем случае, принимая во внимание незначительную протяженность линий на предприятии, можно представить все предприятие как узел сети 6 – 10 кВ, к которому подключены реактивная нагрузка и четыре возможных источника реактивной мощности (при наличии): синхронные двигатели (СД) 6 – 10 кВ  $Q_{СД}$ , синхронные компенсаторы  $Q_{СК}$ , синхронные генераторы ТЭЦ  $Q_{ТЭЦ}$ , энергосистема  $Q_{Э1}$  и конденсаторные батареи на высшее напряжение  $Q_{ВКБ}$ .

✱ Баланс реактивной мощности будет иметь вид

$$✱ Q_{В} - Q_{СД} - Q_{СК} - Q_{ТЭЦ} - Q_{Э1} - Q_{ВКБ} = 0 \quad (2.18)$$

- Синхронные компенсаторы (СК) на предприятиях применяются очень редко.
- Они имеют высокую стоимость, дополнительные потери активной мощности, сложные условия пуска.
- Основное достоинство СК – возможность быстродействующего плавного автоматического регулирования уровня напряжения.
- Использование реактивной мощности генераторов электростанции предприятия экономически целесообразно. Решение принимается на основании технико-экономического расчета на минимум приведенных затрат.

✘ Для большинства предприятий основными компенсирующими устройствами служат СД и конденсаторные батареи и задача компенсации реактивной мощности сводится к определению оптимальных значений  $Q_{\text{СД}}$  и  $Q_{\text{вкб}}$  в сетях 6 – 10 кВ.

✘ Высоковольтный СД является источником реактивной мощности, минимальная величина которой определяется из условия устойчивой работы СД, по формуле

$$\text{✘ } Q_{\text{СД}} = P_{\text{СД.н}} K_{\text{СД}} \text{tg}\varphi_{\text{н}}, \quad (2.19)$$

✘ где  $P_{\text{СД.н}}$  – номинальная активная мощность двигателя;  $K_{\text{СД}}$  – коэффициент загрузки двигателя по активной мощности;  $\text{tg}\varphi_{\text{н}}$  – номинальный коэффициент мощности.

- ✦ СД имеют большие потери на 1 квар вырабатываемой реактивной мощности по сравнению с конденсаторами.
- ✦ Но при номинальной мощности СД свыше 2500 кВт или частотой вращения свыше 1000 мин<sup>-1</sup> независимо от номинальной мощности синхронные двигатели во всех случаях используются для компенсации реактивной мощности без выполнения обосновывающих расчетов.
- ✦ При этом генерируемая номинальная реактивная мощность учитывается при расчете электрических нагрузок.
- ✦ Значение реактивной мощности, генерируемой СД, за исключением реактивной мощности, учтенной при определении электрических нагрузок
- ✦ 
$$Q_{\text{СД}} = \Sigma(Q_{\text{СД.р}} - Q_{\text{СД.н}}) \approx 0,2Q_{\text{СД.н}}, \quad (2.20)$$
- ✦ где  $Q_{\text{СД.н}} = P_{\text{СД.н}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{н}}$  – номинальная реактивная мощность СД;  $Q_{\text{СД.р}}$  – располагаемая мощность СД.

✘ Под располагаемой мощностью понимается максимальная реактивная мощность СД, генерируемая при номинальном токе возбуждения и ~~номинальном напряжении статора, с учетом того, что СД имеет загрузку по активной мощности меньше номинальной.~~

✘ Учитывая, что для большинства СД коэффициент загрузки по активной мощности меньше 0,85 для располагаемой мощности может быть принято соотношение

$$✘ \quad Q_{\text{СД.р}} \approx 1,2Q_{\text{СД.н}}. \quad (2.21)$$

✘ Использование СД с номинальной мощностью до 2500 кВт и с частотой вращения менее  $1000 \text{ мин}^{-1}$  определяется значением величины

$$✘ \quad R = \frac{C_{Q_3}}{C_{\text{р.г}}}, \quad (2.22)$$

✘  $C_{\text{р.г}}$  – удельная стоимость потерь активной мощности при генерации реактивной мощности в СД и конденсаторных установках.

✘  $C_{Q_3}$  – удельная стоимость потребления реактивной мощности и энергии, не превышающего экономическое значение, руб./квар·год

$$\boxed{\times} C_{Q_3} = (c_1 + d_1 T_{MQ_3}) \cdot 1,6K_1, \quad (2.23)$$

- $\times$  где  $c_1$  – стоимость 1 квар потребляемой реактивной мощности, руб./квар·год.;
- $\times$   $d_1$  – стоимость за 1 квар·ч потребляемой реактивной мощности, руб./квар·ч.;
- $\times$   $T_{MQ_3}$  – годовое число часов использования максимальной реактивной мощности при потреблении, не превышающем экономическое значение,
- $\times$   $K_1$  – коэффициент удорожания компенсирующих устройств, принимается равным кратности повышения тарифа на электроэнергию.
- $\times$  Минимальные значения  $R$ , при которых использование реактивной мощности СД целесообразно приведены справочниках

- ✦ Если номинальная мощность СД больше 2500 кВт или частота вращения более  $1000 \text{ мин}^{-1}$ , а так же  $K_{\text{СД}} < 1$ , экономически целесообразно полностью использовать располагаемую реактивную мощность, определяемую по формуле

- ✦ 
$$Q_{\text{СД.э}} = \alpha_{\text{м}} \sqrt{P_{\text{СД.н}}^2 + Q_{\text{СД.н}}^2} \quad (2.24)$$

- ✦ где  $\alpha_{\text{м}}$  – коэффициент допустимой перегрузки СД, зависящей от его загрузки по активной мощности (определяется по номограмме, например Федоров, Старкова);
- ✦  $Q_{\text{СД.н}}$  – номинальная реактивная мощность СД.

✦ Для СД с номинальной активной мощностью менее 2500 кВт и частотой вращения менее 1000 мин<sup>-1</sup>.

✦ Экономически целесообразную нагрузку по реактивной мощности определяют по формуле

$$Q_{\text{СД.э}} = Q_{\text{СД.н}} (Z_{\text{вк}} Q_{\text{СД.н}} - D_1 C_{\text{р.г}}) / (2D_2 \cdot C_{\text{р.г}}), \quad (2.25)$$

✦ где  $Z_{\text{вк}}$  – приведенные затраты на выработку реактивной мощности,  $D_1$  и  $D_2$  – потери в СД при его номинальной реактивной мощности.

✦ Суммарная мощность высоковольтных конденсаторных батарей для всего предприятия определяется из условия баланса реактивной мощности

$$Q_{\text{вкб}} = Q_{\text{РП}} - Q_{\text{СД.р}} - Q_{\text{э1}}, \quad (2.26)$$

✦ где  $Q_{\text{РП}}$  – расчетная реактивная нагрузка на шинах 6 – 10 кВ РП.