

**ДВНЗ «Національний гірничий  
університет»**

**Кафедра систем електропостачання**

**Дисципліна «Управління електроспоживанням»**

**ТЕМА 3 – «УПРАВЛІННЯ ПОТОКАМИ  
РЕАКТИВНОЇ ЕНЕРГІЇ»**

*(Вибір потужності компенсуючих  
установок та їх розміщення у  
системі електропостачання)*

## ***1. Вибір потужності компенсуючих установок***

На практиці вибір джерел реактивної потужності (РП) вирішують, розглядаючи її баланс на рівні електричних мереж до 1 кВ, а потім на рівні електричних мереж 6-20 кВ. У першому випадку враховується та обставина, що ***кількість та потужність трансформаторів 6-10/0,38-0,66 кВ залежать від міри компенсації реактивних навантажень на вторинній напрузі***, а в другому – ***договірні умови підприємства з енергопостачальною організацією (ЕО) щодо режиму компенсації РП***.

*Електричні мережі напругою до 1 кВ.* Потужність низьковольтних конденсаторних батарей (НБК) знаходять у два етапи.

На першому з умови мінімуму витрат у НБК і трансформаторні підстанції (ТП) розраховується значення  $Q_{НК1}$ .

На другому за умовою зниження втрат потужності у трансформаторах та лініях, що живлять ці трансформатори, знаходиться додаткова потужність  $Q_{НК2}$ .

Сумарна розрахункова потужність НБК

$$Q_{НК} = Q_{НК1} + Q_{НК2}.$$

**Етап 1. Визначення  $Q_{нк1}$ .** Для кожної групи однотипних ТП потужністю  $S_{\Sigma om}$  (див. рис.) технологічної дільниці (цеху, виробництва), визначається їх мінімальна кількість:

$$N_{\Sigma om \min} = P_M / \beta_T S_T + \Delta N$$

де  $P_M$  – максимальне розрахункове навантаження СП, що живляться від трансформаторів;  $\beta_T$  – коефіцієнт завантаження трансформаторів,  $\Delta N$  – доавка до найближчого цілого числа.

Оптимальна їх кількість оцінюється за виразом:

$$N_{\Sigma om} = N_{\Sigma om \min} + m$$

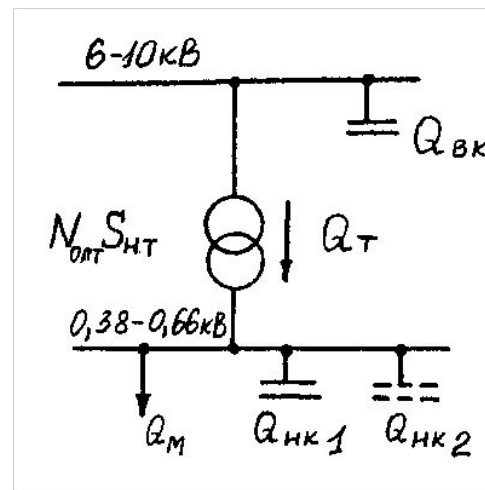


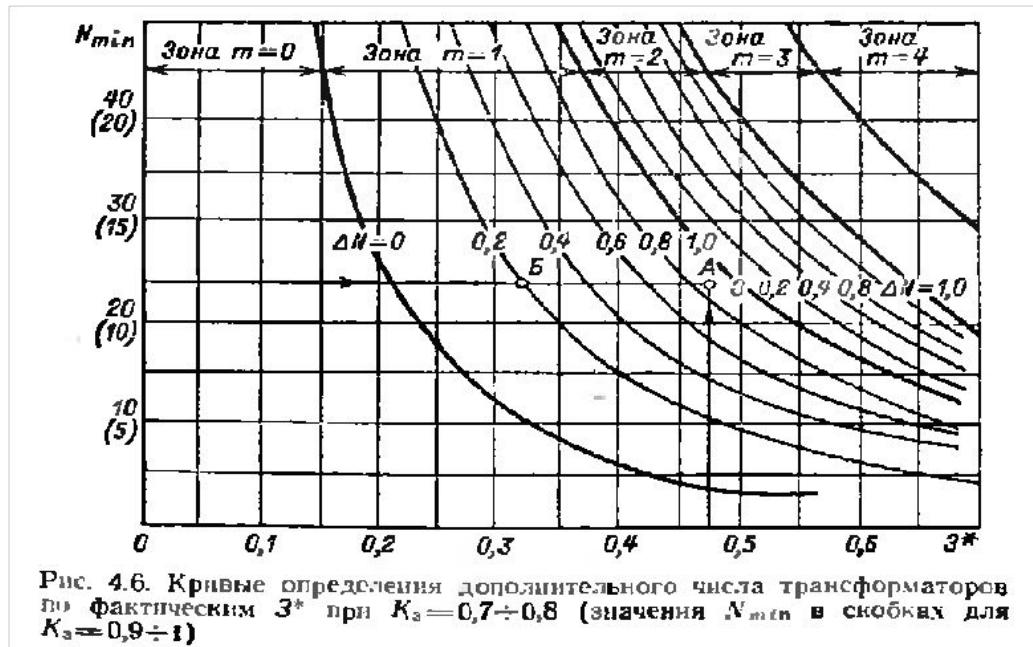
Рис.1 Пояснювальна схема до вибору потужності трансформаторів напругою 6-10/0,4 кВ

Кількість ТП може збільшуватися, залежно від:

а) співвідношення питомих витрат на НК –  $z_{НК}$ , та ВК –  $z_{ВК}$  і ТП –  $z_{ТП}$  (за умови наявності точних даних про витрати);

$$z^* = \beta_T (z_{НК} - z_{ВК}) / z_{ТП};$$

$$z_{ТП}^* = (z_{НК} - z_{ВК}) / z_{ТП}$$



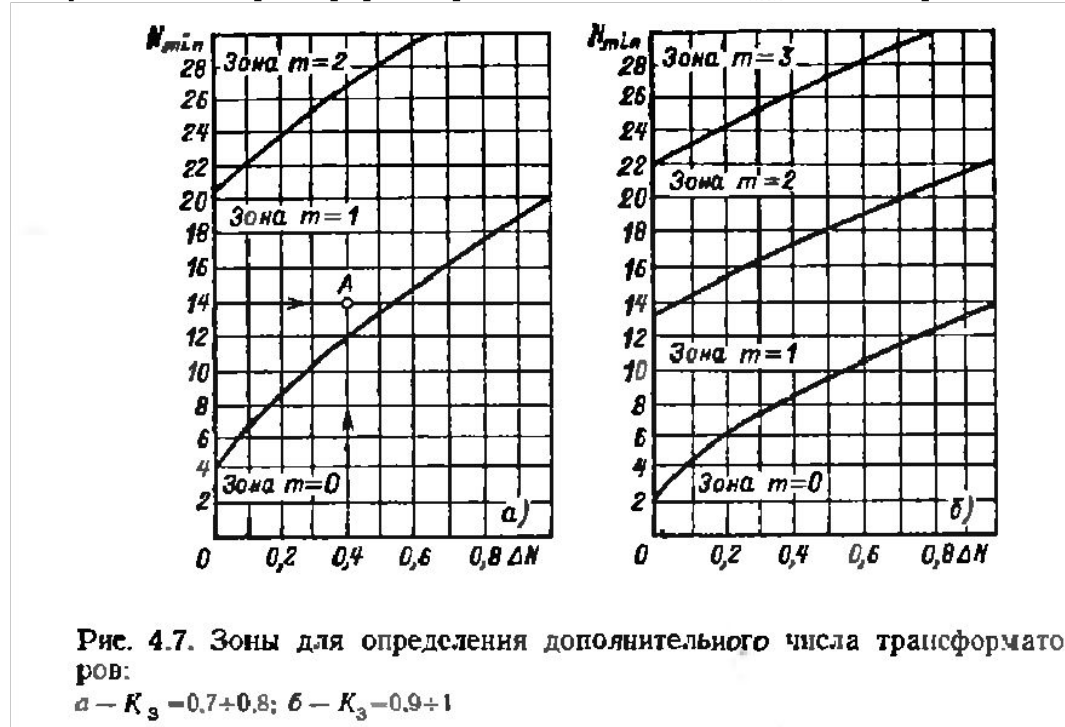
Порядок визначення  $m$ :

- за значеннями  $N_{min}$  і  $z_{ТП}$  знаходиться точка А;

- за значеннями  $N_{min}$  і  $\Delta N$  знаходиться точка Б;

Якщо точка А, розташована в зоні  $m$  графіка, знаходиться правіше точки Б цієї ж зони, то до  $N_{min}$  додається число  $m$ , а в іншому випадку – число  $(m-1)$

б) при відсутності достовірних вартісних показників для практичних розрахунків допускається приймати  $Z_{ТП}^* = 0,5$ , після чого визначати додаткову кількість трансформаторів  $m$  залежно від  $N_{min}$  і  $\Delta N$  за кривими:



За обраною кількістю ТП визначають реактивну потужність, яку припускається передати через ТП у мережу напругою до 1 кВ

$$Q_{\text{втт}} = \sqrt{(N_{\text{ном}} \beta S_M)^2 - P^2}$$

Звідси потужність

$$Q_{\text{НК1}} = Q_M - Q_T$$

де  $Q_M$  — сумарне максимальне реактивне навантаження ТП.

Якщо з розрахунку отримуємо, що  $Q_{\text{НК1}} < 0$ , то  $Q_{\text{НК1}} = 0$ .

**Етап 2. Визначення  $Q_{НК2}$ .** Додаткова потужність НБК для даної групи трансформаторів

1)

$$Q_{НК2} = Q_M - Q_{НК1} - \frac{(z_{НК} - z_{БК})U_{ном}^2}{2R_e c_0},$$

де  $R_e$  – еквівалентний активний опір елементів мережі (ліній, трансформаторів) між точками ввімкнення низько- та високовольтних БК (див. рис. 1);  $U_{ном}$  – номінальна напруга, до якої зводиться  $R_e$ .

При радіальній схемі живлення СП (див. рис. 1) еквівалентний опір

$$R_e = 1 / \sum (1/r_i),$$

де  $r_{кли} = r_{Ti} + r$  – активний опір  $i$ -ї радіальної ділянки мережі;  $r_{кли}$ ,  $r_{Ti}$  – активні опори  $i$ -ї КЛ та відповідного  $i$ -го трансформатора.

Для магістральних та змішаних схем живлення ТП додатково вимагається урахування опору головної ділянки живильної магістральної лінії.

Коли у результаті розрахунку за формулою отримаємо, що  $Q_{НК2} < 0$ , то приймаємо  $Q_{НК2} = 0$ .

**Альтернативне визначення  $Q_{НК2}$ .** Додаткова потужність НБК для даної групи трансформаторів

$$Q_{НК2} = Q_M - Q_{НК1} - \gamma N_{opt} S_{ном.т},$$

$\gamma = f(K_{p1}, K_{p2})$  - розрахунковий коефіцієнт, що залежить від схеми живлення цехової ТП та питомих приведених витрат на НБК і ВБК ( $K_{p1}$ ), а також потужності трансформатора і параметрів живлячої лінії ( $K_{p2}$ ).

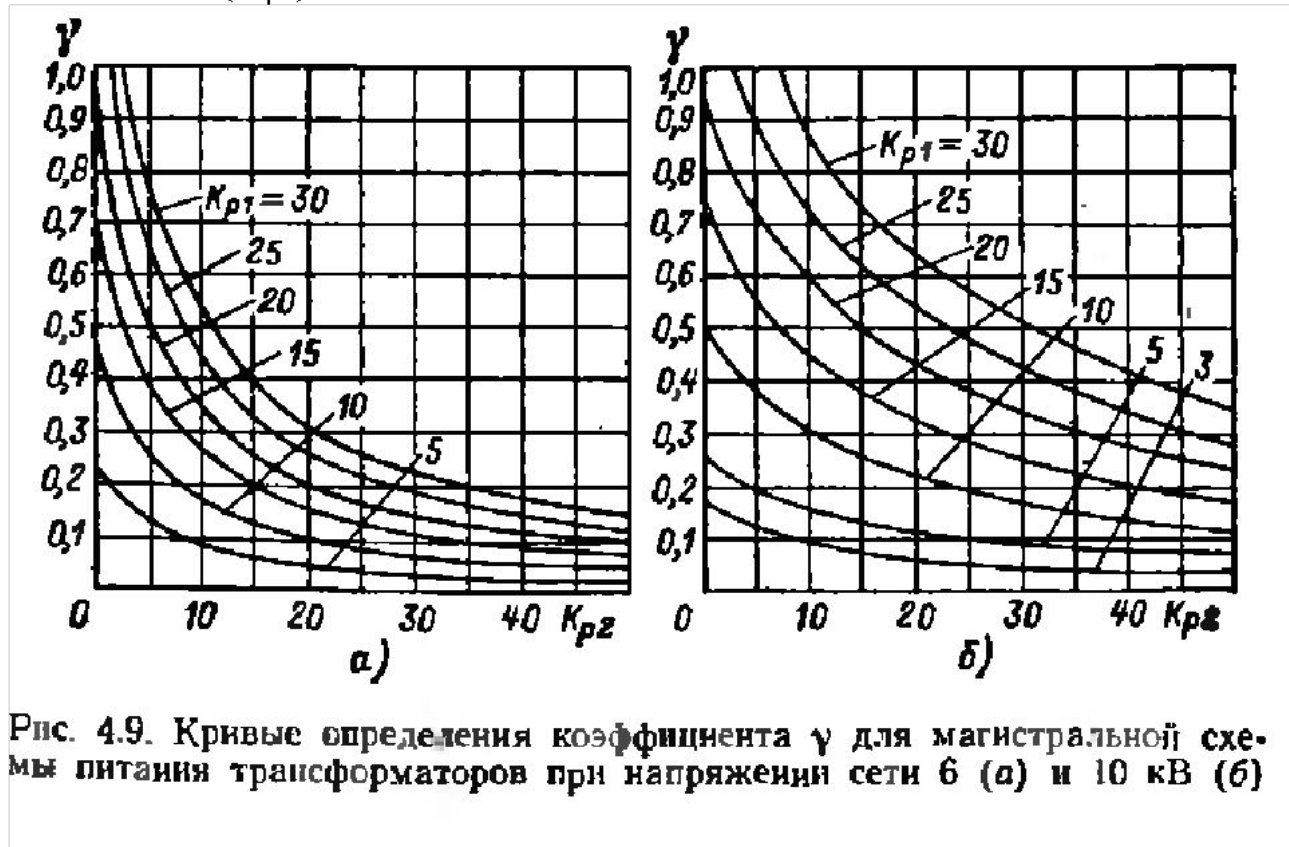
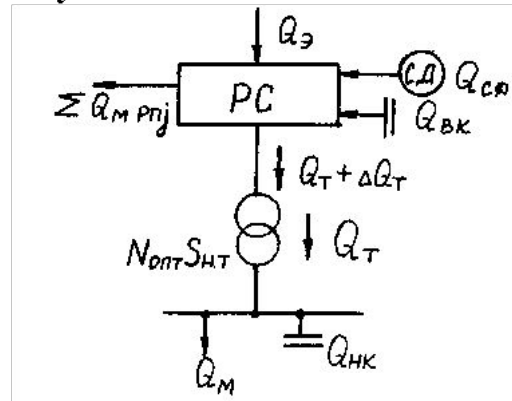


Рис. 4.9. Кривые определения коэффициента  $\gamma$  для магистральной схемы питания трансформаторов при напряжении сети 6 (а) и 10 кВ (б)

Розподільні мережі напругою вище 1 кВ. Сумарна розрахункова реактивна потужність ВБК, установлюваних у розподільній мережі (РМ) підприємства, визначається з умов балансу реактивної потужності для РМ



Пояснювальна схема до вибору потужності високовольтних конденсаторів (ВБК)

$$Q_{ВК} = \left( \sum_{j=1}^m Q_{М.РПj} + Q_T + \Delta Q_T \right) - Q_{СД} - Q_E,$$

де  $m$  – кількість РП у мережі;  $Q_{М.РПj}$  – розрахункове реактивне навантаження високовольтних споживачів на шинах 6-10 кВ  $j$ -го РП-6 (10) кВ (некомпенсоване реактивне навантаження ТП  $Q_T$  та втрат в них  $\Delta Q_T$  враховується додатково);  $Q_{СД}$  – реактивна потужність, яка генерується СД;  $Q_E$  – економічне значення реактивної потужності, споживаної з мережі в години максимуму навантаження енергосистеми.



Розглянемо способи визначення величин  $Q_{CD}$  та  $Q_E$ . Раніше відзначалося, що СД з умов нагріву можуть тривало генерувати максимальну реактивну потужність, яка дорівнює  $\alpha_m Q_{ном}$ . Однак цю потужність економічно доцільно використовувати лише у тому разі, коли  $P_{ном.СД}$  рівна або більша граничної активної потужності  $P_{гр}$  СД, котра визначається залежно від низки конкретних факторів, тобто:

$$P_{гр} = f(c_0, m_{зм}, \omega),$$

де  $c_0$  – питома вартість втрат активної потужності, грн/кВт·рік,  $m_{зм}$  – кількість змін роботи СД на добу;  $\omega$  – частота обертання СД.

Для СД, в яких  $P_{ном.СД} < P_{гр}$ , економічно доцільне завантаження з реактивної потужності знаходиться за виразом:

$$Q_{СД.ек} = Q_{ном.СД} \left( \frac{D_{ВК}}{D_{ном.СД}} - 1 \right) / (2 \cdot \frac{c_0}{P_{ном.СД}}).$$

Якщо виявиться, що  $Q_{СД.ек} < Q_{мін.СД} = \beta_{СД} P_{ном.СД} \operatorname{tg} \varphi_{ном} / \eta$ , то приймають  $Q_{СД.ек} = Q_{мін.СД}$ . Тут  $Q_{мін.СД}$  – мінімальне значення реактивної потужності, необхідне для сталої роботи СД.

При  $P_{ном.СД} > P_{гр}$  економічно доцільне повне завантаження СД з реактивної потужності, яке знаходиться за виразом:

$Q_{СД.ек} = \alpha_E \sqrt{P_{ном.СД}^2 + Q_{ном.СД}^2}$ . Параметр  $\alpha_E$  знаходиться за номограмою.

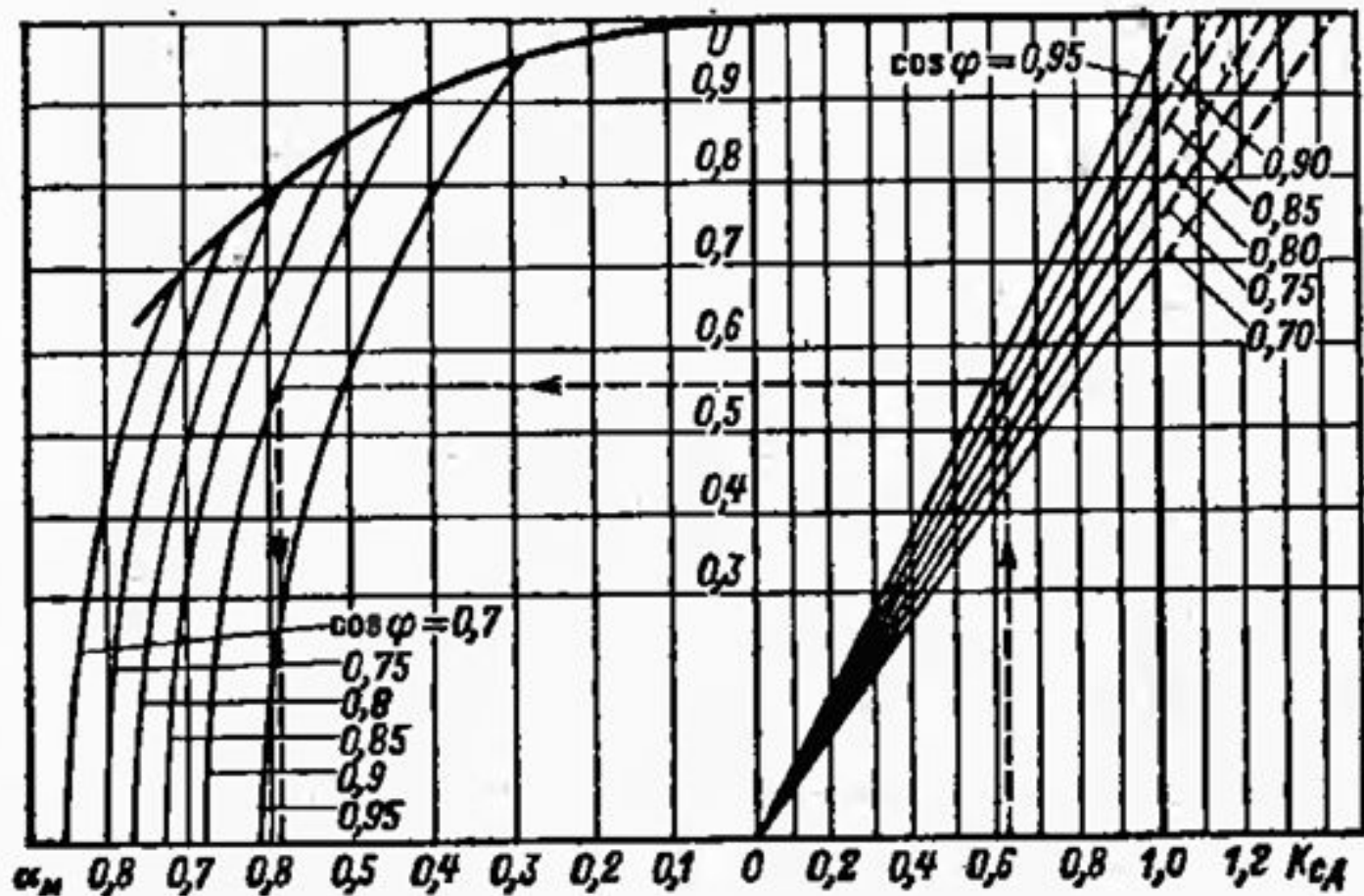


Рис. 9.4. Номограмма определения располагаемой реактивной мощности синхронных двигателей при номинальном токе возбуждения в зависимости от коэффициента загрузки двигателя по активной мощности

## Приклад 1.

### ЕКОНОМІЧНО ДОЦІЛЬНА РЕАКТИВНА ПОТУЖНІСТЬ СД

Визначити економічно доцільну реактивну потужність, що може генерувати СД типу СТД при завантаженні за активною потужністю  $\beta=0,8$ ,  $P_{\text{НОМ}}=6300$  кВт,  $n=3000$  об/хв,  $U_{\text{НОМ}}=6$  кВ,  $\text{tg}\varphi_{\text{НОМ}}=0,43$ ,  $\eta = 0,94$ . Компресорна працює у дві зміни, а електроенергію одержує від системи «Дніпроенерго».

#### Розв'язання

1. Зіставляємо граничну потужність за економічністю ( $P_{\text{грЕС}}$ ) для даної енергетичної системи і номінальною потужністю двигуна ( $P_{\text{НОМСД}}$ ):

#### так як

$$P_{\text{НОМСД}}=6300 \text{ кВт} \text{ **більше** } P_{\text{грЕС}}=2500 \text{ кВт}$$

(для даних умов при двозмінному графіку роботи,  $n=3000$  об/хв, для «Дніпроенерго» )

\*  $P_{\text{грЕС}}$  знаходиться за таблицею 9.4 [1]

Л-ра [1]: *А.А. Федоров, Л.Е. Старкова «Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования»*

то економічно доцільна реактивна потужність  $Q_{д е,}$  буде знаходитись за наступним виразом:

$$Q_{д е,} = \alpha_E \cdot \sqrt{P_{номСД}^2 + Q_{номСД}^2}, \text{ квар}$$

де  $Q_{номСД}$  – мінімальна величина реактивної потужності, що генерує СД за умови його стійкої роботи для заданого завантаження за активною потужністю та відповідного коефіцієнту потужності;

$Q_{номСД} = P_{ном} \cdot \beta \cdot \text{tg}\varphi_{ном} / \eta = 6300 \cdot 0,8 \cdot 0,43 / 0,94 = 2305$  квар;  
 $\alpha_E$  – коефіцієнт допустимого перевантаження СД, що залежить від його завантаження за активною потужністю (визначається за номограмою рис. 9.4 [1]).

$$\alpha_E = f(\varphi_{СД}, \cos \varphi_{СД})$$

$$\cos \varphi_{СД} = \cos(\text{arctg}(\text{tg}\varphi)) = \cos 23^\circ = 0,9$$

$$\alpha_E = f(\varphi_{СД} = 0,8; \cos \varphi_{СД} = 0,9) = 0,53$$

$$Q_{д е,} = \alpha_E \cdot \sqrt{P_{номСД}^2 + Q_{номСД}^2} = 0,53 \cdot \sqrt{6300^2 + 2305^2} = 3555 \text{ квар}$$

Так як  $Q_{д е,} > Q_{номСД}$ , то  $Q_{д е,} = 3555$  квар.

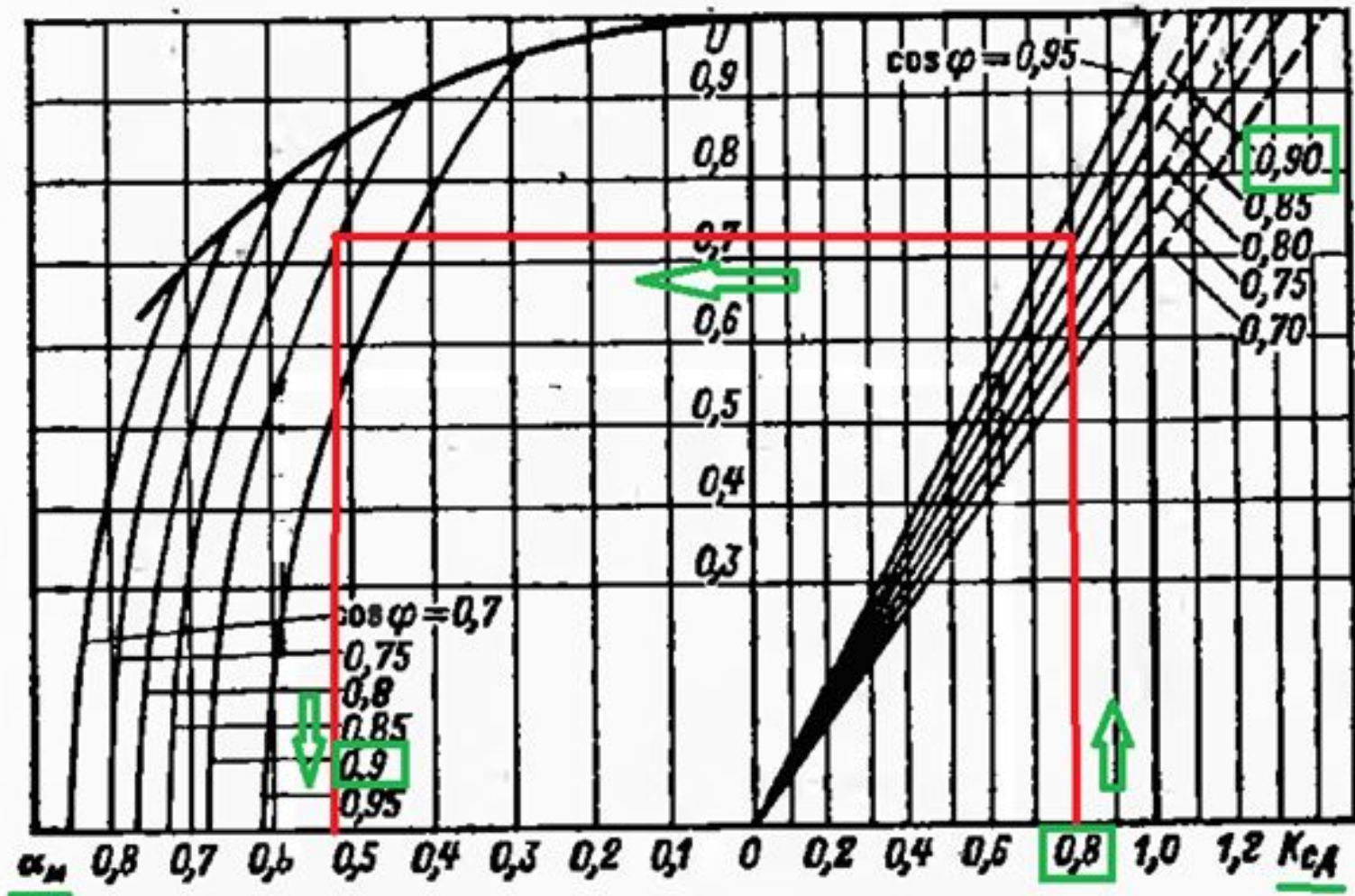


Рис. 9.4. Номограмма определения располагаемой реактивной мощности синхронных двигателей при номинальном токе возбуждения в зависимости от коэффициента загрузки двигателя по активной мощности

## Приклад 2.

### ОЦІНКА СТУПЕНЮ ВИКОРИСТАННЯ СД ЯК ДЖЕРЕЛА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Синхронний двигун типу СТД працює цілодобово. Коефіцієнт завантаження  $\beta=0,6$ ,  $P_{\text{ном}}=2000$  кВт,  $U_{\text{ном}}=6$  кВ,  $\cos\varphi=0,9$  (випереджальний),  $n=3000$  об/хв,  $\eta = 0,92$ . Оцінити ступінь використання СД як джерела реактивної потужності.

#### Розв'язання

1) мінімальна реактивна потужність, що генерує СД при стійкій його роботі (при  $\cos\varphi=0,9$   $\text{tg}\varphi=0,43$ ):

$$Q_{\text{номСД}} = P_{\text{ном}} \cdot \beta \cdot \text{tg}\varphi_{\text{ном}} / \eta = 2000 \cdot 0,6 \cdot 0,43 / 0,94 = 561 \text{ квар};$$

зіставляємо граничну потужність за економічністю для даної енергетичної системи і потужністю двигуна при цілодобовій роботі двигуна для об'єднаної енергетичної системи Центру (табл. 9.4 [1]):

$$P_{\text{номСД}}=2000 \text{ кВт} \text{ менше } P_{\text{грЕС}}=2500 \text{ кВт};$$

$$\underline{P_{\text{номСД}} \leq P_{\text{грЕС}}}$$

1) за даних умов економічно доцільна реактивна потужність визначається за наступним виразом:

$$Q_{\text{СД,е}} = Q_{\text{ном.СД}} \left( \frac{C_{\text{БК}} \cdot D_1 - C_{\text{р.в}}}{2 \cdot C_{\text{р.в}} \cdot D_2} \right),$$

де  $D_1=4,89$ ,  $D_2=6,72$  кВт – втрати в СД при його номінальній реактивній потужності (див. табл. 11.4, 11.5 [2]);

$C_{\text{р.в}} = 112$  \$/кВт- розрахункова вартість втрат (див. табл. 4.6 [1]).

$Z_{\text{БК}}$  – питомі приведені витрати на генерацію реактивної потужності високовольтними (6-10 кВ) конденсаторними батареями (визначається для конкретного об'єкта-підприємства за достовірними даними про ВБК);

Приймаємо  $Z_{\text{БК}} = 3$  \$/квар

$$Q_{\text{СД,е}} = 561 \cdot (3 \cdot 561 - 4,89 \cdot 112) / (2 \cdot 6,72 \cdot 112) = 423 \text{ квар}$$

**Так як** мінімальна генерована реактивна потужність більше, ніж економічно доцільна

$$Q_{\text{номСД}} > Q_{\text{СД,е}}$$

**то**  $Q_{\text{СД,е}}$  приймається рівною  $Q_{\text{номСД}}=561$  квар

Тому, за даних умов і отриманих результатів, можна зробити висновок, що СД в номінальному режимі роботи мінімально генерує більше реактивної потужності, ніж економічно доцільно за розрахунками.

### **Л-ра:**

1. А.А. Федоров, Л.Е. Старкова. Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования – М.: Энергоатомиздат, 1987 – 368 с.

2. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию. Под общ. ред. А.А. Федорова. Т1. – М.: Энергоатомиздат, 1986.



Економічні значення реактивної потужності  $Q_E$  визначаються за нормативними значеннями  $tg\varphi_{норм}$  залежно від типу підприємства, що розглядається, а також від середньомісячного споживання електричної енергії.

Для промислових підприємств та для усіх інших груп споживачів:

$$tg\varphi_{норм} = 0,25 \quad (\cos_{норм} = 0,97).$$

Зрозуміло, що при розрахунках  $Q_{нн} = P_{нн} tg\varphi$  .

Отже,  $PV$ – критерій і балансовий метод дозволяють визначити потужність та міру використання джерел реактивної потужності, які забезпечують мінімум витрат на їх установаження та функціонування протягом розрахункового періоду.

## *Розміщення компенсуючих установок в системі електропостачання*

Розподіл потужності КУ між окремими вузлами мережі можна виконати виходячи з декількох критеріїв:

- за мінімумом вартості проекту (*PV*-критерій);
- за мінімумом витрат електроенергії;
- пропорційно реактивним навантаженням СП.

Найбільше поширення отримав останній спосіб, в основному через простоту алгоритмів реалізації. Вважається, що розрахунок за цим способом припустимий, якщо збільшення витрат перебуває у межах похибки подання вихідних даних, тобто  $\pm (5...10)\%$ .

Сумарна потужність ВБК розподіляється між окремими РП-6(10) кВ або ТП пропорційно їх некомпенсованому реактивному навантаженню на шинах 6-10 кВ та округляється до найближчої стандартної потужності ККУ, що пропонує ринок. Підключати ККУ слід у першу чергу на РП-6(10) кВ з найбільшим некомпенсованим реактивним навантаженням (ураховуючи наявність приміщень для встановлення ККУ на ньому та резервних КРУ). До кожної секції РП-6(10) кВ рекомендується підключити ККУ однакової потужності, але не менше 1000 квар. Якщо такі умови відсутні, то ВБК об'єднують у групу й переміщують на більш високий рівень СЕП, наприклад, для підключення до шин РУ ГЗП.

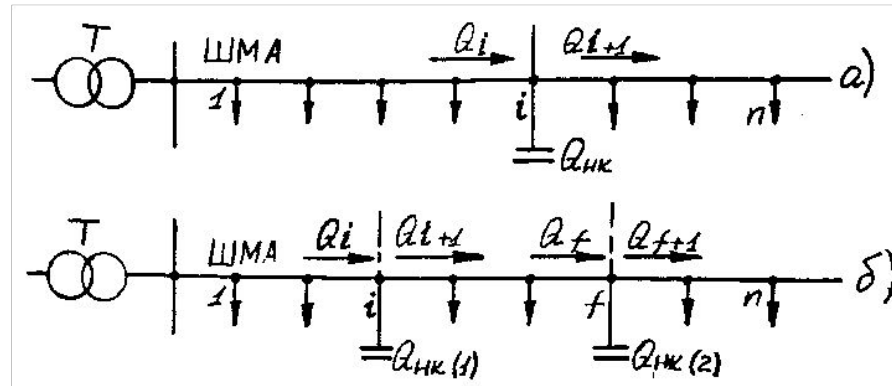
Розподіл НБК між трансформаторами в однотипній групі відбувається аналогічно, як і для ВБК – пропорційно реактивному навантаженню кожної підстанції (ТП).

Знайдена для наданого трансформатора потужність НБК розподіляється в його мережі, виходячи з додаткового зниження витрат та з урахуванням технічних можливостей вмикання окремих батарей (умови середовища, наявність вільного місця та ін.).

Коли розподільна мережа виконана кабельними лініями НБК будь-якої потужності рекомендується приєднувати безпосередньо до низьковольтного розподільного щита трансформатора чи підстанції.

Під час живлення від одного трансформатора двох і більше магістральних шинопроводів до кожного з них приєднується лише по одній НБК. Загальна розрахункова потужність НБК розподіляється між шинопроводами пропорційно їх сумарному реактивному навантаженню.

На одиночному магістральному шинопроводі слід передбачати установлення не більше двох



приблизно однакових НБК сумарною потужністю  $Q_{нк}$

Схема ввімкнення низьковольтних конденсаторів до магістральних шинопроводів: а – одна БК; б – дві БК

Якщо основні реактивні навантаження приєднані до другої половини шинопроводу, слід установлювати тільки одну НБК. Точка її вмикання визначається за такими умовами

$$Q_i \geq Q_{нк} / 2 > Q_{i+1}$$

де  $Q_i$ ,  $Q_{i+1}$  реактивне навантаження шинопроводу перед вузлом  $i$  та після нього відповідно.

При приєднанні до струмопроводу двох НБК (рис.б) точки їх підключення знаходять із таких умов:

– точка підключення дальньої НБК (потужність  $Q_{нк(2)}$ )

$$Q_{fk} \geq Q_{(2)} / 2 > Q_{+1}$$

– точка підключення ближньої НБК (потужність  $Q_{нк(1)}$ )

$$Q_i - Q_{нк(2)} \geq Q_{нк(1)} / 2 > Q_{i+1} - Q_{нк(2)}$$

де  $f$  – дальній вузол на струмопроводі,  $i$  – ближній – до трансформатора.