



## МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

**Мета і задачі дослідження.** Метою магістерської кваліфікаційної роботи є зменшення втрат електричної енергії за рахунок підвищення ефективності використання компенсувальних установок з використанням Smart Grid технологій.

**Задачі,** які необхідно вирішити для досягнення поставленої мети:

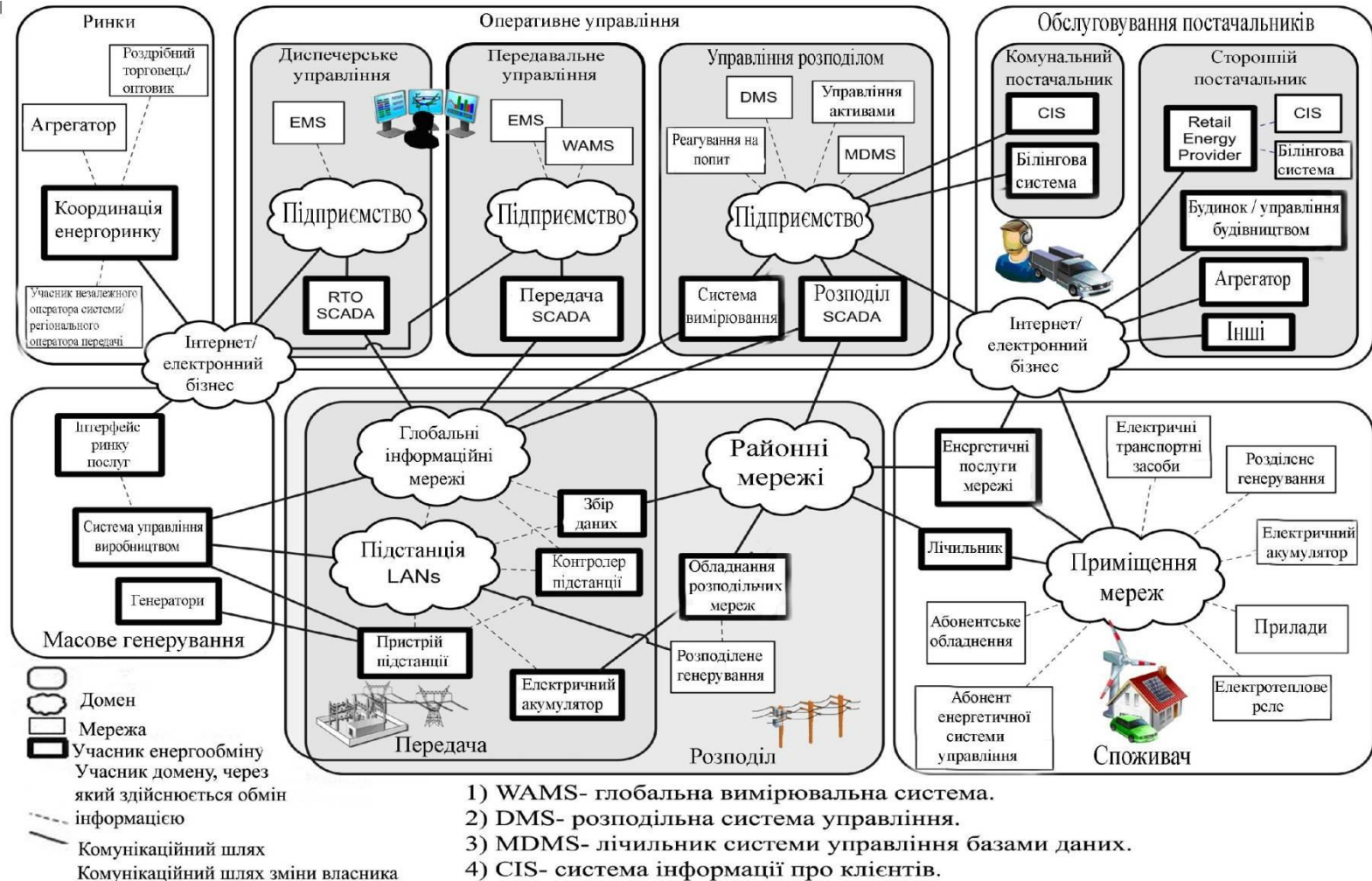
1. Вдосконалити моделі управління конденсаторними установками при заданій вхідній реактивній потужності на основі Smart Grid технологій.
2. Розробити метод використання оперативних надлишків компенсувальних установок в мережах споживачів.
3. Розробити метод вдосконалення генераторів місцевих електростанцій для компенсації реактивних навантажень розподільчих мереж.

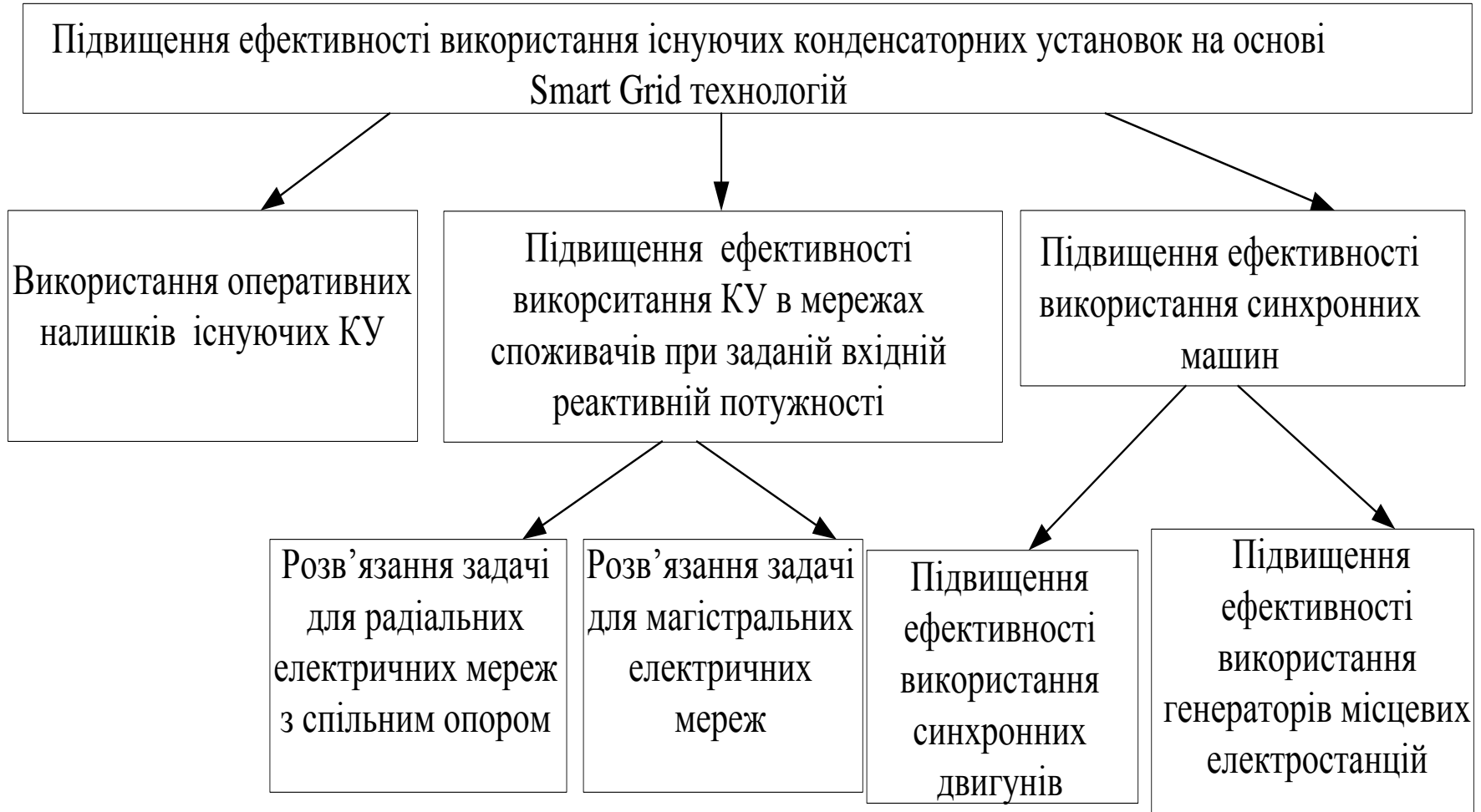
Концепція Smart Grid передбачає побудову цілком інтегрованої, саморегульованої та самовідновлюваної системи, що містить всі генеруючі джерела, магістральні та розподільні мережі, а також всі види споживачів електроенергії, які керуються єдиною мережею автоматизованих пристроїв в реальному часі.

## Порівняльна характеристика функціональних властивостей сьогоденної енергосистеми і енергосистеми на базі концепції SMART Grid

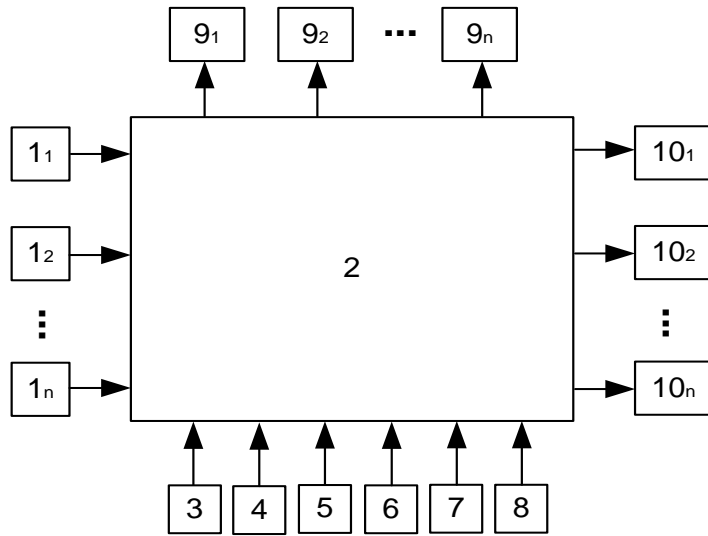
Енергосистема сьогодні	Енергосистема на базі концепції SMART Grid
Одностороння комунікація між елементами або їх відсутність	Двосторонні комунікації
Централізоване генерування	Розподілене генерування
Топологія – переважно радіальна	Радіальна і замкнена
Реакція на наслідки аварії	Реакція на попередження аварії
Робота обладнання до відмови	Моніторинг та самодіагностика, яка продовжує роботу обладнання
Ручне відновлення	Автоматичне відновлення – самовідновлення мережі
Схильність до системних аварій	Попередження розвитку системних аварій
Ручне і фіксоване виділення мережі	Адаптивне виділення
Перевірка стану обладнання на місці	Дистанційний моніторинг обладнання
Обмежений контроль перетоків потужності	Керування потоками потужності
Диспетчерське керування режимами	Самооптимізація режимів
Недоступна або запізнена інформація про ціну електроенергії для споживача	Ціна в реальному часі

# АВТОМАТИЗАЦІЯ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ КОМПЕНСАЦІЄЮ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ SMART GRID ТЕХНОЛОГІЙ





# РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ КОМПЕНСАЦІЄЮ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ НА ПРИНЦИПАХ SMART GRID



В обчислювальному пристрої 2 проводиться розрахунок за моделлю б.1.

Блок-схема автоматичного регулятора конденсаторних установок на якій: 11, 12, ..., 1n – датчі реактивної потужності, встановлені у вузлах мережі, де розміщені КБ; 2 – обчислювальний пристрій; 3 – задавач уставки ВРП на ввіді підприємства; 4 – датч фактичної ВРП; 5 – датч опорів ліній схеми заміщення підсистеми; 6 – датч базової напруги, до якої приведені опори віток схеми заміщення; 7 – пристрій задаючий конфігурацію мережі (матрицю шляхів); 8 – блок задання параметрів ВДЕ; 91, 92, ..., 9n – виконуючі органи для ввімкнення або вимкнення секцій КБ; 101, 102, ..., 10n – виконуючі органи для перемикання режимів роботи ВДЕ.

потужності в  $i$ -ій лінії, зумовлені реактивним навантаженням цих ліній;  $U_n$  – базова номінальна напруга, до якої приведені опори віток схеми заміщення ЕМ;  $R_{ii}$  – вхідний опір  $i$ -го вузла навантаження;  $Q_i, Q_j$  – реактивні навантаження відповідно  $i$ -го та  $j$ -го вузлів навантаження;  $R_{ij}$  – взаємний опір  $i$ -го та  $j$ -го вузлів навантаження;  $i, j = 1, \dots, n, i \neq j$ ;  $n$  – кількість вузлів навантаження ЕМ,  $\Delta P_{ВДЕ}(Q_{ВДЕ})$  – функція втрат у ВДЕ в залежності від реактивного навантаження  $Q_{ВДЕ}$ , та визначається максимальне або мінімальне зменшення втрат активної потужності, що дозволяє визначити вузол, в якому необхідно здійснити ввімкнення або вимкнення секцій КБ або збільшити чи зменшити реактивне навантаження ВДЕ.

Розрахунок та аналіз зменшення втрат активної потужності за реактивними навантаженнями вузлів (1), відповідне визначення місця комутації та контроль за виконанням умови балансу реактивної потужності на ввіді підприємства виконується в обчислювальному пристрої 2 за допомогою відповідної програми.

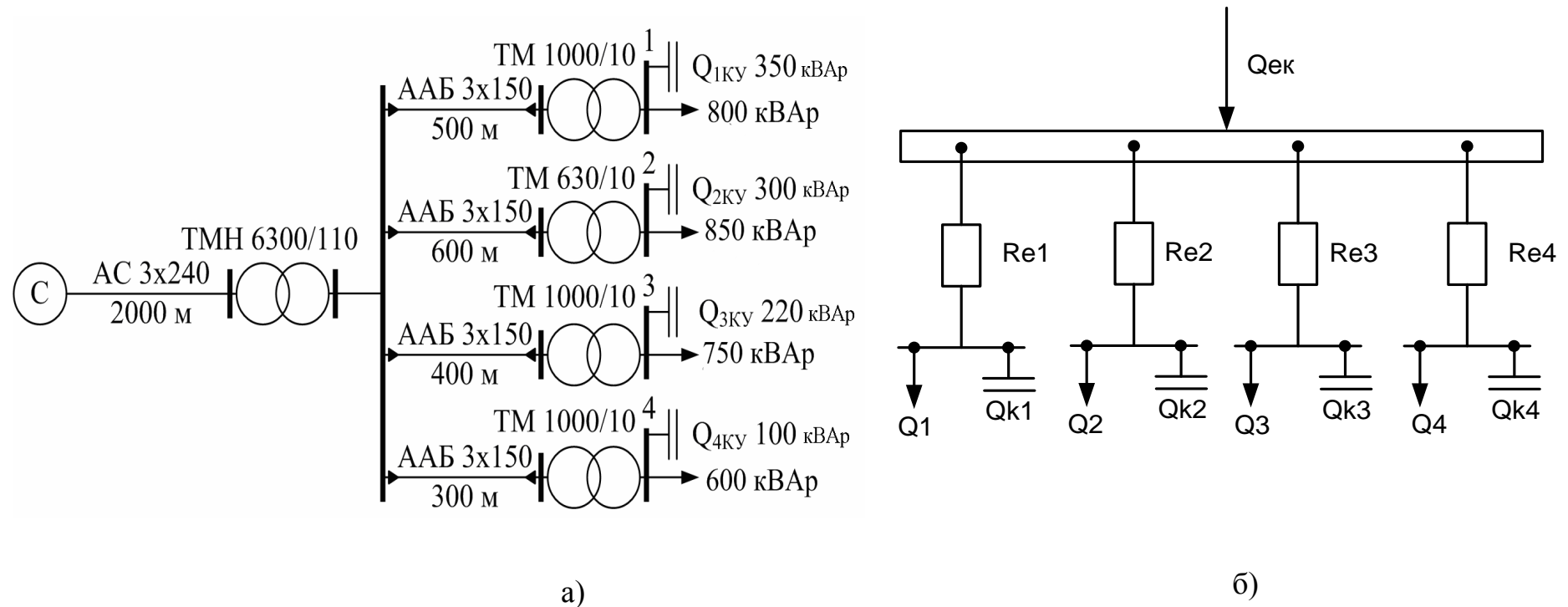
$$\Delta P^{\max} = \max_{i=1}^n \left( \Delta P_i, \Delta P_{ВДЕ}(Q_{ВДЕ}) \right), \quad (6.1)$$

$$\text{де } \Delta P_i = \frac{1}{U_n^2} \left( Q_1 Q_i R_{1i} + Q_2 Q_i R_{2i} + \dots + Q_i^2 R_{ii} + \dots + Q_n Q_i R_{ni} \right) - \text{втрати активної}$$

Таблиця 1 – Моделі керування потужностями конденсаторних установок

№ п/п	Коротка характеристика методу	Аналітична модель керування	Переваги методу
1	Забезпечення в.р.п. по мінімуму втрат мереж окремого дерева	$Q_i^2 R_i \rightarrow \min$	Додаткове зниження втрат
2	Забезпечення в.р.п. по прогнозованому максимуму зниження втрат для радіальних мереж	$\frac{(2Q_i Q_{ci} - Q_{ci}^2) R_i}{U^2} \rightarrow \max$	Додаткове зниження втрат
3	Забезпечення в.р.п. по максимуму зниження втрат для радіальних мереж з спільним опором	$\frac{2Q_{ci} R \sum_{i=1}^m Q_i - Q_{ci}^2 R}{U^2} + \frac{(2Q_i Q_{ci} - Q_{ci}^2) R_i}{U^2} \rightarrow \max$	Додаткове зниження втрат
4	Забезпечення в.р.п. по максимуму зниження втрат для магістральних мереж	$\frac{(2Q_i Q_{ci} - Q_{ci}^2) R_{ii}}{U^2} + \frac{1}{U^2} \cdot 2Q_{ci} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Q_j R_{ji} \rightarrow \max$	Додаткове зниження втрат

# ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ ВТРАТ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В МЕРЕЖАХ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТІ ЗА РАХУНОК КЕРУВАННЯ ПОТУЖНОСТЯМИ КУ



а) схема розподільчої мережі; б) Схема заміщення розподільчої мережі



Втрати активної потужності визначаються за формулою :

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n Q_i^2 r_i / U^2 \quad (9.1)$$

Виконаємо розрахунки з відключенням на кожній КУ по 50 кВАр для визначення втрат активної потужності

$$\Delta P_1 = \frac{1,163 \cdot (800 - 300)^2}{10^2} = 2,91 \text{ (кВт)}$$

$$\Delta P_2 = \frac{2,024 \cdot (850 - 250)^2}{10^2} = 7,29 \text{ (кВт)}$$

$$\Delta P_3 = \frac{1,142 \cdot (750 - 170)^2}{10^2} = 3,84 \text{ (кВт)}$$

$$\Delta P_4 = \frac{1,12 \cdot (600 - 50)^2}{10^2} = 3,39 \text{ (кВт)}$$

Визначимо величину збільшення втрат внаслідок відключення КУ.

$$\Delta P_{11} = 2,91 - 2,36 = 0,55 \text{ (кВт)}$$

$$\Delta P_{21} = 7,29 - 6,14 = 1,148 \text{ (кВт)}$$

$$\Delta P_{31} = 3,84 - 3,21 = 0,63 \text{ (кВт)}$$

$$\Delta P_{41} = 3,39 - 2,8 = 0,59 \text{ (кВт)}$$

Визначимо втрати активної потужності від перетоків реактивної енергії

$$\Delta P_1 = \frac{1,163 \cdot (800 - 350)^2}{10^2} = 2,36 \text{ (кВт)}$$

$$\Delta P_2 = \frac{2,024 \cdot (850 - 300)^2}{10^2} = 6,14 \text{ (кВт)}$$

$$\Delta P_3 = \frac{1,142 \cdot (750 - 220)^2}{10^2} = 3,21 \text{ (кВт)}$$

$$\Delta P_4 = \frac{1,12 \cdot (600 - 100)^2}{10^2} = 2,8 \text{ (кВт)}$$

виконаємо розрахунки із включенням по 50 кВАр на кожній КУ

$$\Delta P_1 = \frac{1,163 \cdot (800 - 400)^2}{10^2} = 1,86$$

$$\Delta P_2 = \frac{2,024 \cdot (850 - 350)^2}{10^2} = 5,1$$

$$\Delta P_3 = \frac{1,142 \cdot (750 - 270)^2}{10^2} = 2,63$$

$$\Delta P_4 = \frac{1,12 \cdot (600 - 150)^2}{10^2} = 2,27$$

Визначимо величину зменшення втрат внаслідок додаткового включення КУ.

$$\Delta P_{12} = 2,36 - 1,86 = 0,5 \text{ (кВт)}$$

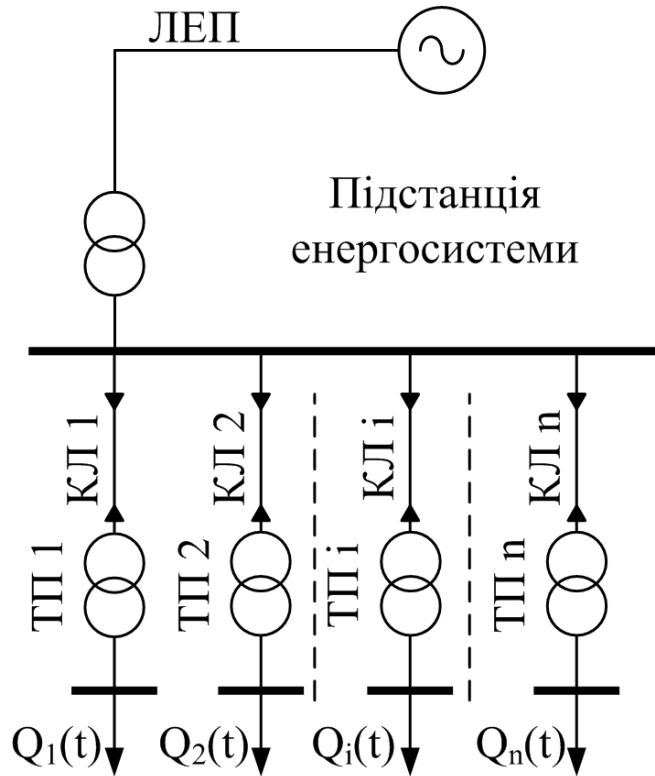
$$\Delta P_{22} = 6,14 - 5,1 = 1,04 \text{ (кВт)}$$

$$\Delta P_{31} = 3,21 - 2,63 = 0,58 \text{ (кВт)}$$

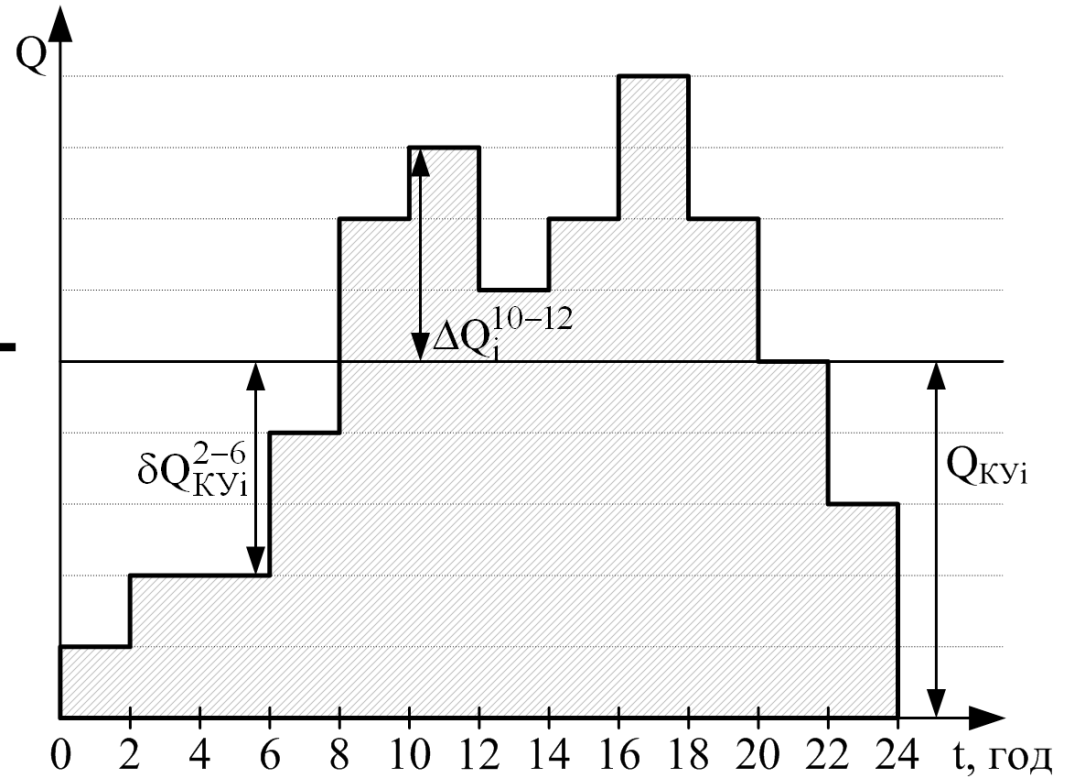
$$\Delta P_{41} = 2,8 - 2,27 = 0,53 \text{ (кВт)}$$

# МЕТОД РОЗРАХУНКУ ВИКОРИСТАННЯ ОПЕРАТИВНИХ НАДЛИШКІВ КОМПЕНСУВАЛЬНИХ УСТАНОВОК

10



а)



б)

а) схема розрахункової мережі; б) графік споживання реактивної потужності  $i$ -им споживачем (ЛЕП – лінія електропередачі; КЛ – кабельна лінія; ТП – трансформаторна підстанція;  $Q_{КУi}$  – потужність КУ, встановлених в  $i$ -му вузлі)

**Надлишки реактивної потужності КУ:**

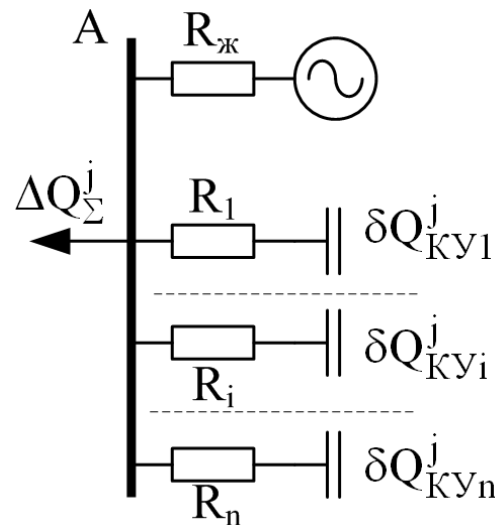
$$\delta Q_{КУi}^j = Q_{КУi}^j - Q_i^j > 0, i = 1..n, j = 1..m, \quad (11.1)$$

**Дефіцит реактивної потужності:**

$$\Delta Q_k^j = Q_k^j - Q_{КУk}^j > 0, k = 1..q, \quad (11.2)$$

**Надлишок реактивної потужності для компенсації дефіциту реактивної потужності:**

$$\Delta Q_{\Sigma}^j = \sum_{k=1}^q \Delta Q_k^j. \quad (11.3)$$



Заступна схема ( $R_i$  – сумарний активний опір лінії та трансформатора, що живить  $i$ -й вузол;  $R_{ж}$  – сумарний активний опір лінії живлення та трансформатора підстанції)

**Зниження плати за електроенергію визначається:**

$$\Delta \Pi = \sum_1^q \Delta \Pi_p \tag{12.1}$$

де  $\Delta \Pi_p$  – зниження плати на  $p$ -ому кроці;  $q$  – кількість кроків для пошуку оптимального розв’язку.

**Математична модель керування оперативним надлишком КУ**

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= \max_{i=1}^{i=m} (\Delta \Pi_i)_1 \\ f_2 &= f_1 + \max_{i=1}^{i=m} (\Delta \Pi_i)_2 \\ &\dots\dots\dots \\ f_p &= f_{p-1} + \max_{i=1}^{i=m} (\Delta \Pi_i)_p \\ &\dots\dots\dots \\ f_q &= f_{q-1} + \max_{i=1}^{i=m} (\Delta \Pi_i)_q \end{aligned} \right\} \tag{12.2}$$

де  $f_p$  – максимальна величина зниження плати за електроенергію на  $p$ -ому кроці.

**Обмеження на підвищення напруги в місці встановлення КУ:**

$$U_{ni} \leq U_{дон} \tag{12.3}$$

де  $U_{ni}$ ,  $U_{дон}$  – відповідно поточний та допустимий рівні напруги в  $i$ -му вузлі.

# Алгоритм керування оперативним надлишком КУ в і-их вузлах

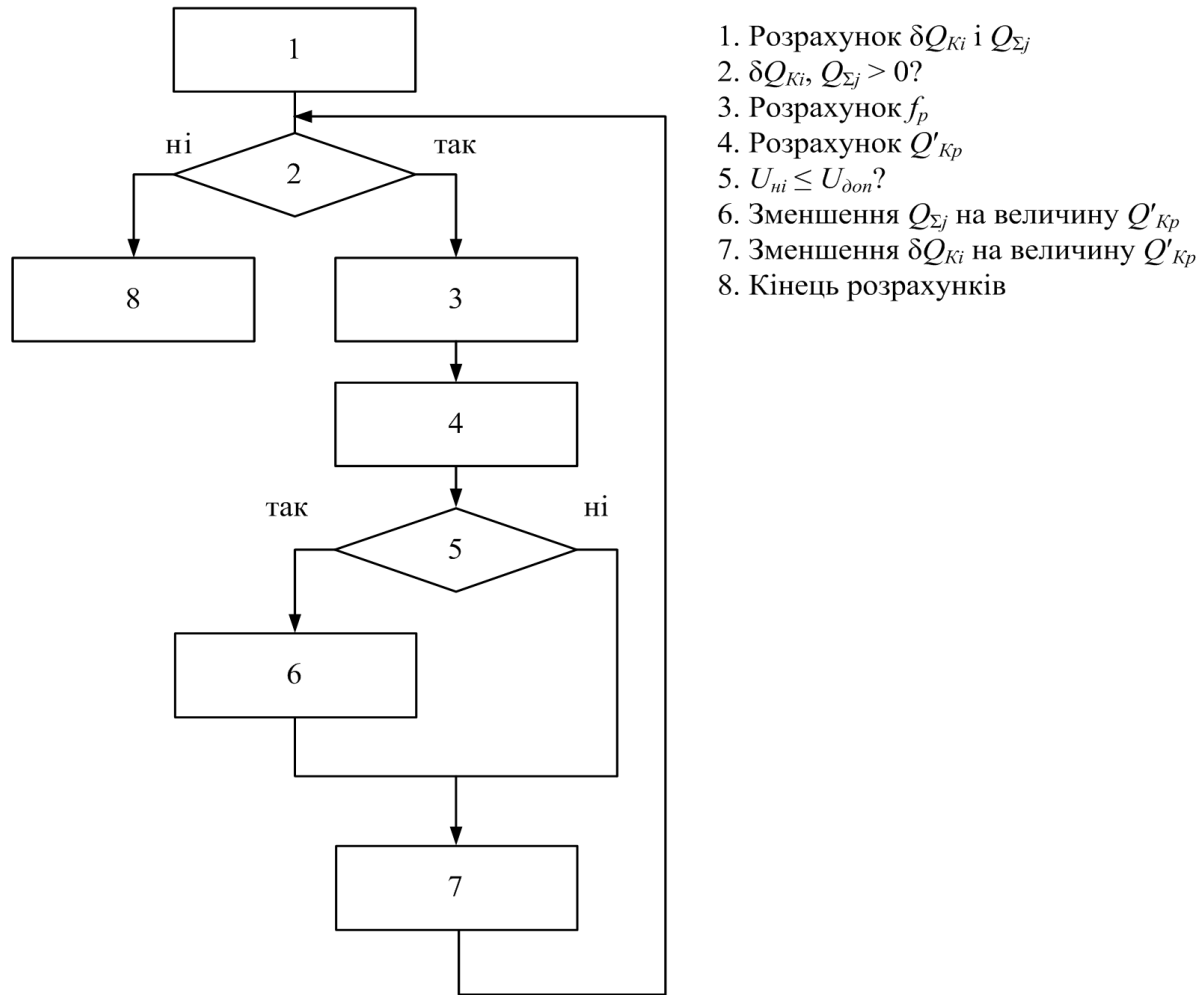


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритму керування оперативним надлишком КУ

ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ ВИКОРИСТАННЯ ОПЕРАТИВНИХ  
НАДЛИШКІВ КОМПЕНСУВАЛЬНИХ УСТАНОВОК

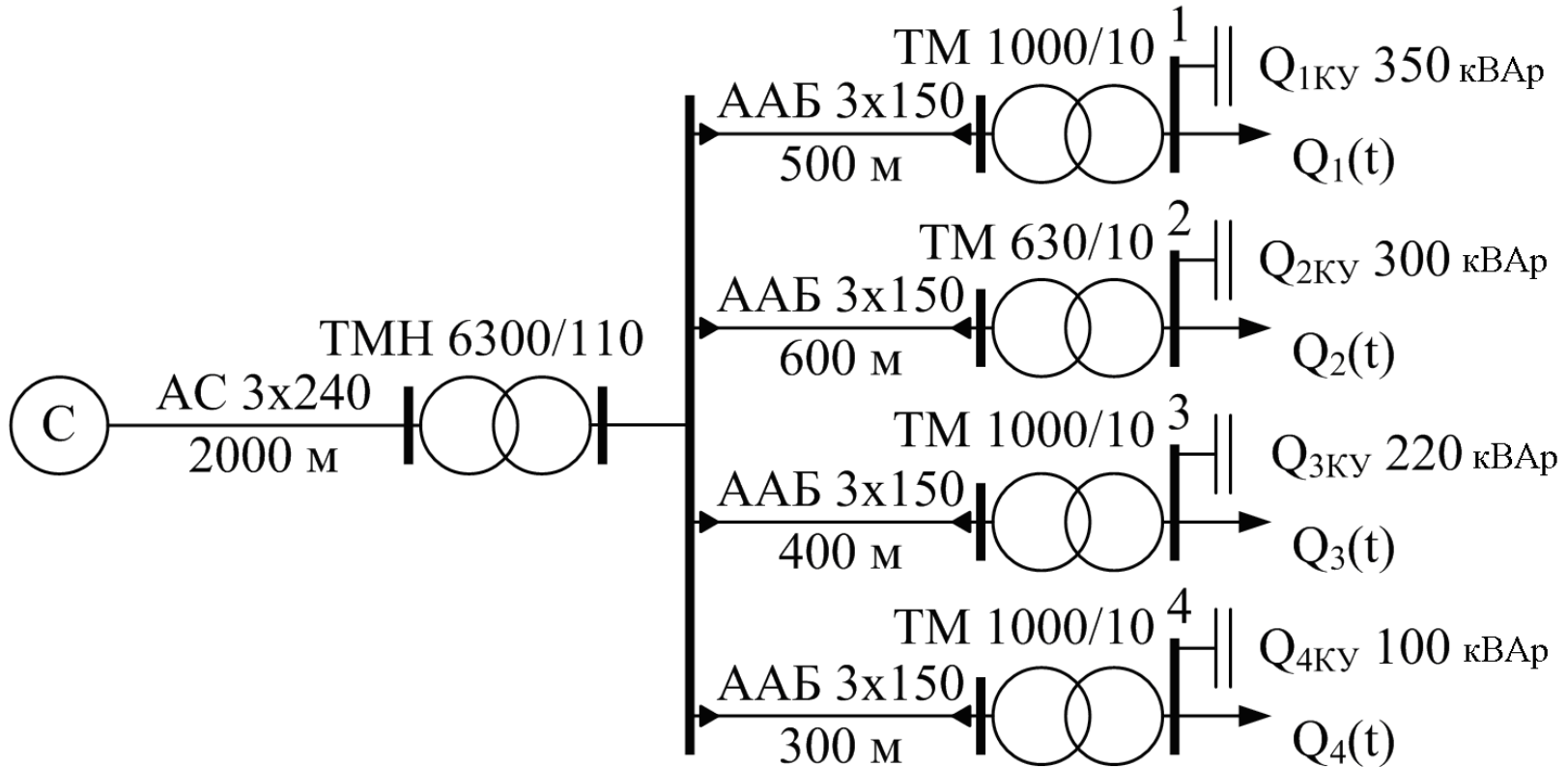
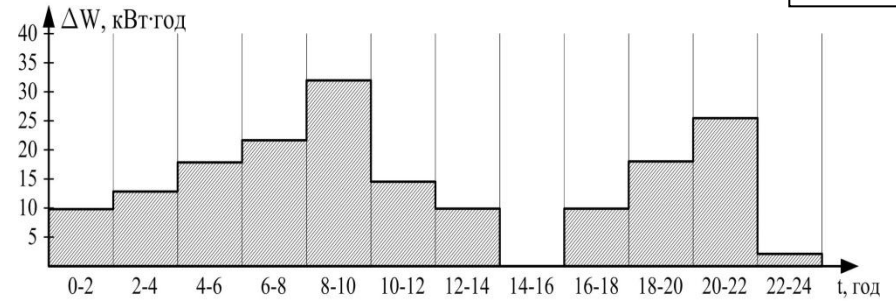
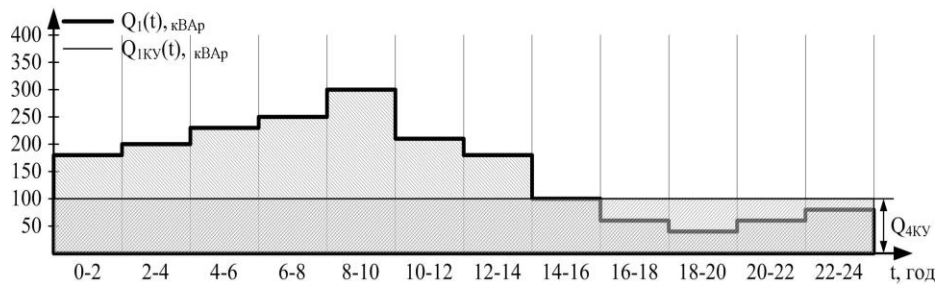
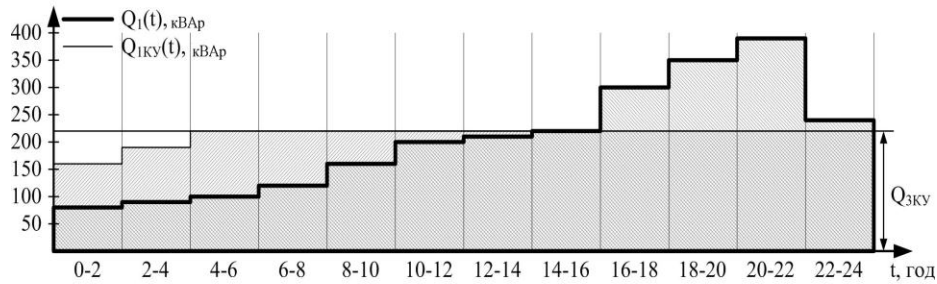
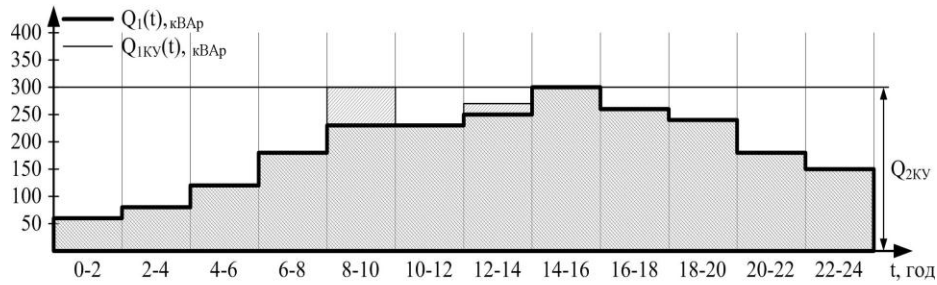
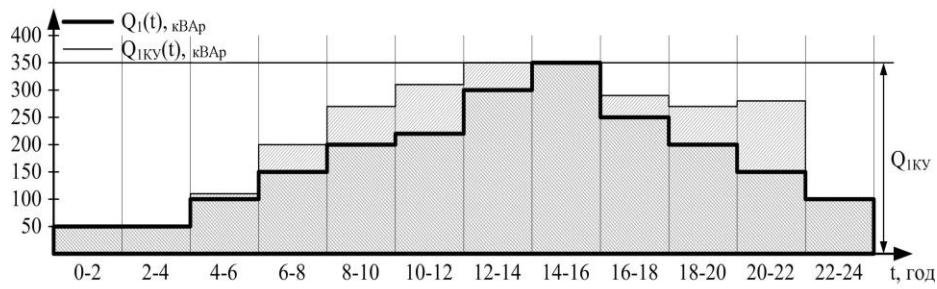


Схема розподільчої мережі

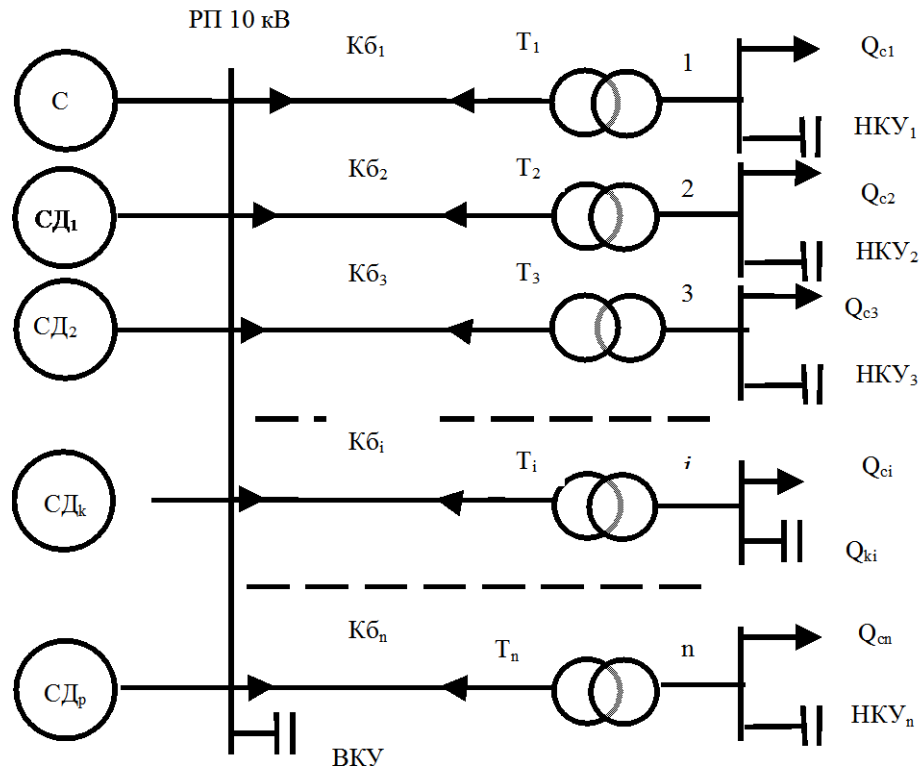


Зниження втрат активної енергії протягом доби

Використання оперативних надлишків КУ на даному підприємстві дасть можливість зекономити 46850 кВт·год. протягом року.

Графіки реактивних навантажень та ввімкнених потужностей КУ

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ІСНУЮЧИХ СИНХРОННИХ МАШИН



Розрахункова схема заводської мережі при управлінні компенсуючими установками



# МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ РЕАКТИВНИМИ ПОТУЖНОСТЯМИ СД

$$J = \{ \beta Q_B + \left[ \sum_{k=1}^p \left( \frac{D_{1k}}{Q_{нк}} Q_{лк} + \frac{D_{2k}}{Q_{нк}^2} (Q_{лк})^2 \right) \alpha \right] \Delta t_q \}$$

$$Q_B + \sum_{k=1}^p Q_{лк} = \Delta Q_c$$

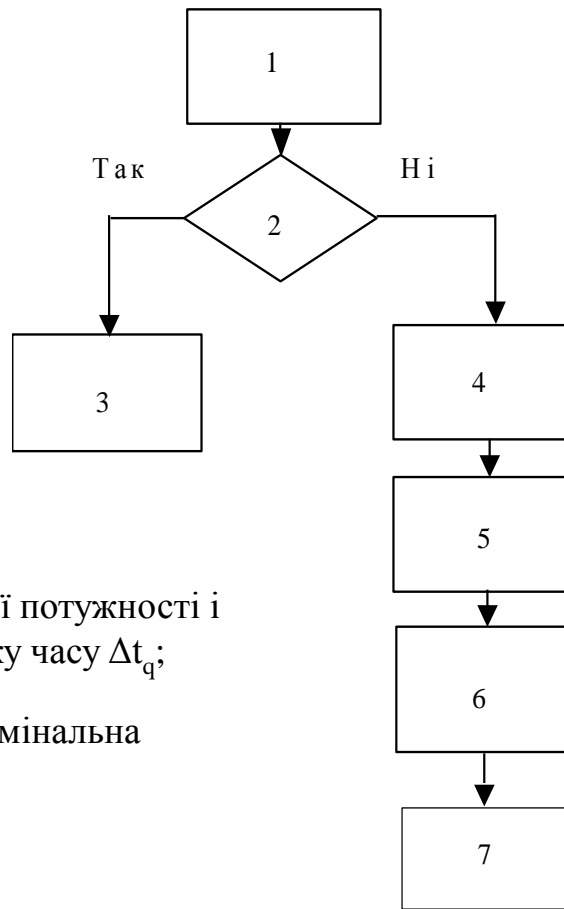
$$0 < Q_{лк} \leq Q_{нк}$$

$$Q_B > 0$$

де  $\alpha, \beta$  - величини тарифів відповідно на активну і реактивну енергію

$Q_B, Q_{лк}$  – середні величини вхідної реактивної потужності і СД впродовж проміжку часу проміжку часу  $\Delta t_q$ ;

$D_{1k}, D_{2k}$  і  $Q_{нк}$  – технічні характеристики і номінальна реактивна потужність к-го СД.



1. Визначення реактивного навантаження  $Q_c$

2.  $Q_{нкУ} + Q_{вкУ} \geq Q_c$  ?

4. Розрахунок  $\Delta Q_c$

3. Кінець розрахунку

5. Розрахунок  $Q_{л\Sigma}^m$

6. Розрахунок  $Q_{л\Sigma}^o$

7. Розрахунок  $Q_B^o$

Блок-схема алгоритму розрахунків  
оптимального управління компенсуючими  
установками в мережах

## ВИСНОВКИ

Проведені в магістерській роботі дослідження показали, що необхідно комплексно впроваджувати нові та підвищувати ефективність керування існуючих компенсувальних установок на основі Smart Grid технологій. При цьому одержані наступні результати:

1. Вдосконалено моделі управління компенсувальними установками на основі Smart Grid технологій при заданій вхідній реактивній потужності дозволяє максимально зменшити втрати активної енергії.

2. Використання оперативних надлишків реактивної потужності компенсувальних установок протягом доби дозволяє додатково знизити втрати електроенергії в електричних мережах. Пошук найкращого варіанту використання оперативного надлишку КУ доцільно здійснювати з допомогою динамічного програмування, що дозволяє враховувати дискретність потужностей КУ. Впровадження запропонованого методу керування оперативним надлишком потужності КУ дозволяє підприємству знизити плату за електроенергію. Проведені розрахунки по використанню оперативних надлишків компенсувальних установок на підприємстві з установленою потужністю 3630 кВА показали можливість додаткового зниження втрат 46850 кВт·год.

3. Використання синхронних машин для компенсації реактивної потужності дає можливість зменшити втрати активної потужності, що поведе за собою зниження плати за активну енергію. Проведені розрахунки по використанню синхронних машин підтвердили зниження плати на 19720 грн, це свідчить про доцільність використання генераторів місцевих електростанцій в живлячих мережах 35кВ і вище..

*Дякую за увагу !*