

**Боднік Вікторія Ігорівна**

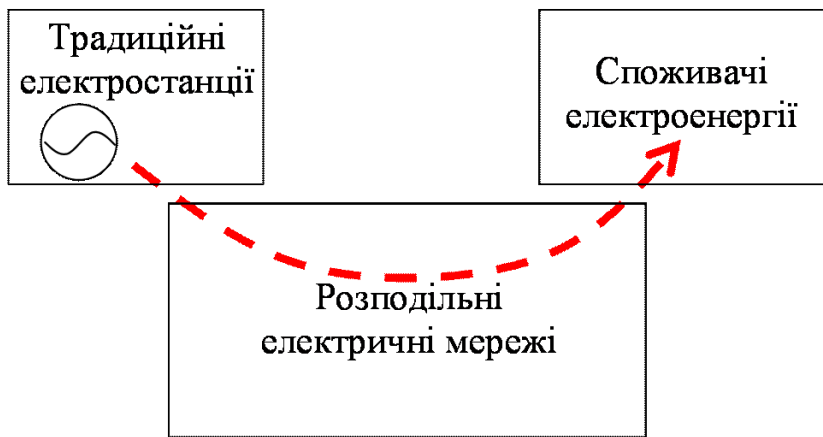
**КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В РОЗПОДІЛЬНИХ  
ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ**

Кваліфікаційна робота за освітньо-кваліфікаційним рівнем «магістр» зі  
спеціальності: 8.05070102 – «Електричні системи і мережі»

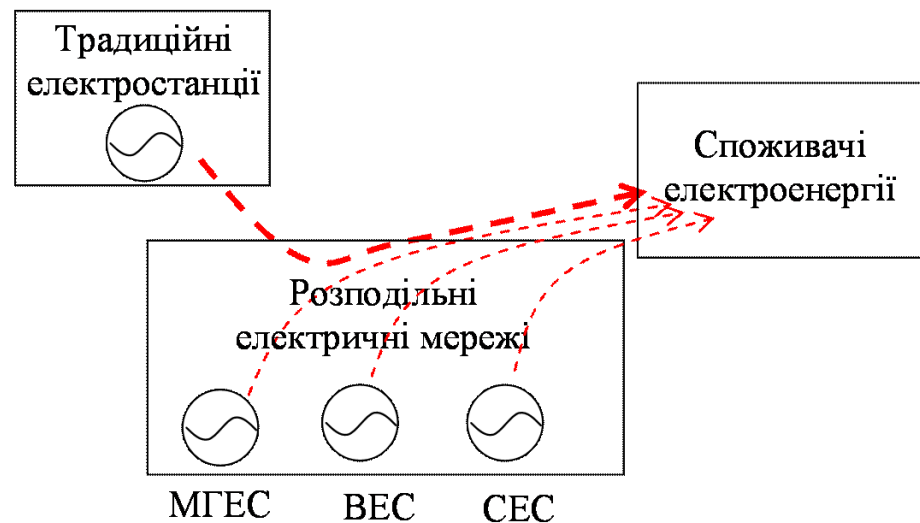
Науковий керівник  
д.т.н., доцент  
Кулик В.В.

# ЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ З РОЗОСЕРЕДЖЕНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

## Централізоване електропостачання

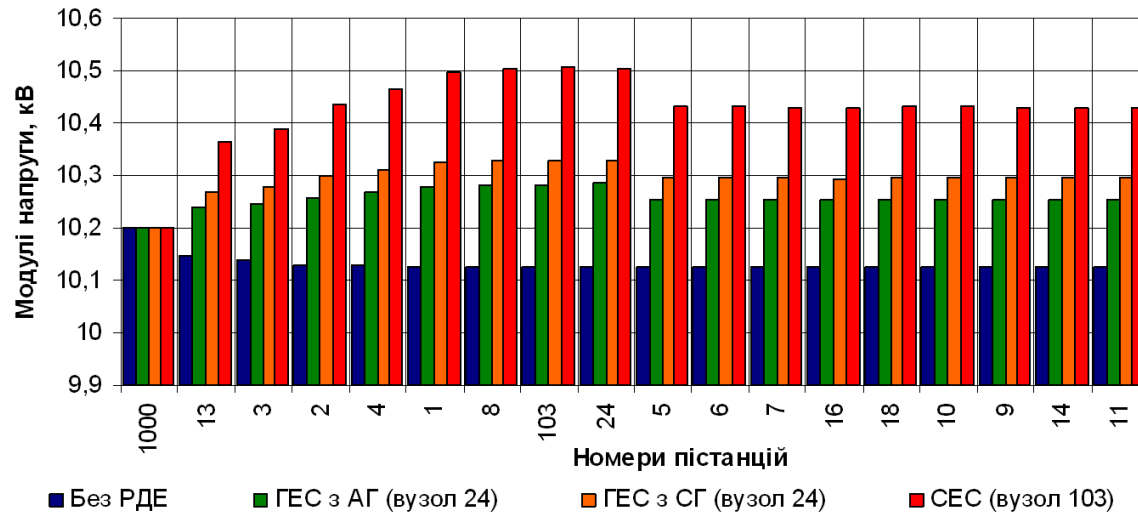


## Комбіноване електропостачання – з централізованими та розосередженими джерелами електроенергії

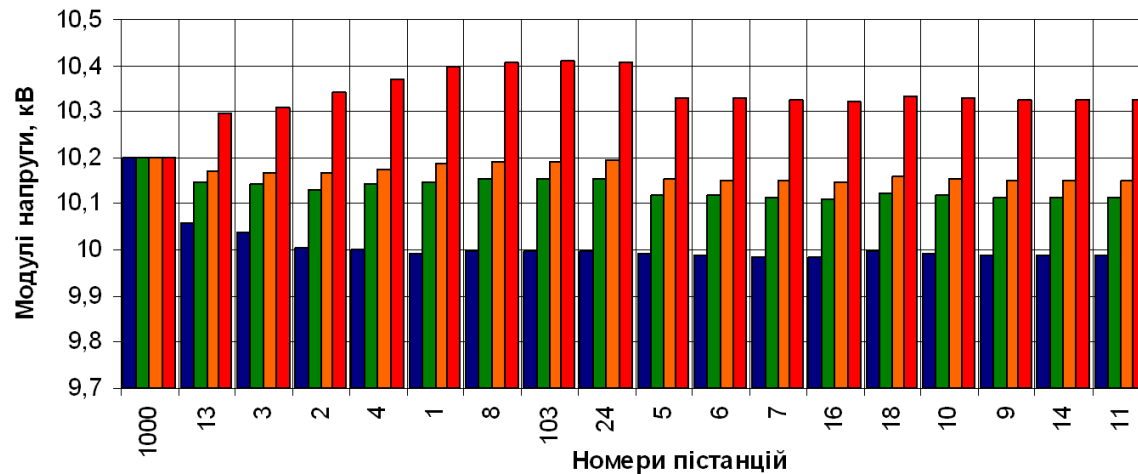


# РОЗПОДІЛ НАПРУГИ ПО ВУЗЛАХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ З РДЕ

## У режимі мінімальних навантажень



## У режимі середніх навантажень



## КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

**Мета роботи:** вдосконалення засобів оптимізації рівнів компенсації реактивної потужності в розподільних електромережах з урахуванням впливу розосереджених джерел електроенергії для зменшення її додаткових втрат.

### Основні завдання:

- аналіз стану компенсації реактивних навантажень в електричних мережах енергопостачальних компаній та її методичного забезпечення;
- аналіз існуючих методів обчислення економічних еквівалентів реактивної потужності в електричних мережах;
- дослідження та аналіз задач пов'язаних з особливостями реактивних перетікань та характером розподілу напруги в розподільних мережах з РДЕ;
- розроблення алгоритму розрахунку оптимальних рівнів компенсації реактивної потужності споживачів в електричних мережах з урахуванням впливу розосередженого генерування на втрати електроенергії з використанням відомих методів та підходів;
- проведення обчислювальних експериментів з підтвердження адекватності вибраних методів та розроблених алгоритмів розв'язання поставленої задачі з урахуванням нестабільності функціонування розосереджених джерел енергії.

## ВИЗНАЧЕННЯ ПЛАТИ ЗА ВТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ВІД ПЕРЕТІКАННЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАМИ

Плата за споживання і генерування реактивної електроенергії виконується за трьома складовими:

$$\Pi = \Pi_1 + \Pi_2 - \Pi_3, \quad (4.1)$$

де  $\Pi_1$  – основна плата за перетікання реактивної електроенергії, грн.;  $\Pi_2$  – надбавка за недостатнє оснащення електричної мережі споживача засобами КРПІ, грн.;  $\Pi_3$  – знижка плати при залученні споживача до регулювання балансу реактивної потужності (електроенергії), грн.

**Основна плата за реактивні перетікання для простих схем приєднання споживачів:**

$$\Pi_1 = \sum_{i=1}^n (W_{Q_{СПi}} + K \cdot W_{Q_{Гi}}) \cdot D \cdot \Pi_{\text{опт}}, \quad (4.2)$$

де  $n$  – кількість точок вимірювання реактивної електроенергії;  $i$  – номер точки вимірювання реактивної електроенергії;  $W_{Q_{СПi}}$  – споживання реактивної електроенергії в точці вимірювання;  $W_{Q_{Гi}}$  – генерування реактивної електроенергії в точці вимірювання;  $K$  – коефіцієнт врахування збитків, які виникають за умов надлишкового генерування реактивної електроенергії з боку споживачів;  $D$  – економічний еквівалент реактивної потужності;  $\Pi_{\text{опт}}$  – прогнозована оптова ринкова ціна електроенергії.

**Економічний еквівалент реактивної потужності (ЕЕРП) визначається так:**

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial Q_k} = \frac{\partial \Delta P_1}{\partial Q_k} + \frac{\partial \Delta P_2}{\partial Q_k} = D_1 + D_2 = D, \quad (4.3)$$

де  $\Delta P_1, \Delta P_2$  – складові втрат для магістральних замкнених і розімкнених розподільних мереж;  $Q_k$  – реактивна потужність вузла;  $D_1, D_2$  – складові ЕЕРП для цього вузла.

Розрахунок  $D_1$  виконується методом чисельного диференціювання з високою точністю, а складова ЕЕРП  $D_2$  – для розімкнених розподільних мереж – розраховується з використанням матриці вузлових опорів.

**Інтегральний ефект за  $k$ -м варіантом улаштування КРПІ розраховують за формулою**

$$IE_{k,j} = \sum_{j=1}^t \frac{\Delta \Pi_k + (\Delta \Delta W_{Pk} - \Delta W_{КТk}) \cdot \Pi_{\text{рзд}} - B_k}{(1 + E)^t} - K_k, \quad (4.4)$$

де  $\Delta \Pi_k$  – розрахункове зменшення річної плати за перетікання реактивної енергії;  $\Delta \Delta W_{Pk}$  – розрахункове зменшення втрат активної енергії в елементах мережі споживача внаслідок КРПІ;  $\Delta W_{КТk}$  – втрати активної енергії в засобах КРПІ;  $B_k$  – річні витрати на технічне обслуговування засобів КРПІ;  $K_k$  – капітальні вкладення в КУ.

## КРИТЕРІЙ ОПТИМАЛЬНОСТІ ДЛЯ ЗАДАЧ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕАКТИВНИХ ПЕРЕТІКАНЬ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ

Структура витрат ЕК, пов'язаних з обслуговуванням реактивних навантажень споживачів:

$$B_Q = B_{ТП} + B_{КУ} + (B_{СП} - П_{СП}) + (B_{РДЕ} - П_{РДЕ}). \quad (5.1)$$

де  $B_{ТП}$ ,  $B_{СП}$ ,  $B_{РДЕ}$  – витрати, пов'язані з компенсацією втрат електроенергії, що виникають в ЕМ в наслідок транспортування некомпенсованої реактивної потужності, відповідно, до вузлів технологічного споживання ЕК, до споживачів та РДЕ;  $B_{КУ}$  – витрати на засоби КРП в електромережах;  $П_{СП}$ ,  $П_{РДЕ}$  – плата споживачів та РДЕ за перетікання реактивної потужності в ЕМ.

За рахунок внесення змін в сучасну практику розподілу надходжень ЕК від споживачів та РДЕ за транспортування реактивної потужності цільова функція (5.1) задачі оптимізації рівнів КРП набула вигляду:

$$B_Q = B_{КУ} + B_{ТП} + B_{СП} + B_{РДЕ}. \quad (5.2)$$

$$B_{ТП} = \Delta W_{Q_{ТП}}(Q_{КУ_i}, i = \overline{1, n_{КУ}}) \cdot c_0; \quad (5.3)$$

$$B_{КУ} = \sum_{i=1}^{n_{КУ}} Q_{КУ_i} \cdot v_0; \quad (5.4)$$

$$B_{СП} = \sum_{j=1}^{n_{СП}} \Delta W_{Q_{СП_j}}(Q_{КУ_i}, i = \overline{1, n_{КУ}}) \cdot c_0; \quad (5.5)$$

$$B_{РДЕ} = \sum_{j=1}^{n_{РДЕ}} \Delta W_{Q_{РДЕ_j}}(Q_{КУ_i}, i = \overline{1, n_{КУ}}) \cdot c_0, \quad (5.6)$$

де  $\Delta W_{Q_{СП_i}}$ ,  $\Delta W_{Q_{РДЕ_i}}$ ,  $\Delta W_{Q_{ТП}}$  – складові змінних втрат електроенергії в ЕМ, зумовлені перетіканнями реактивної потужності, відповідно, до  $i$ -го споживача, до (від)  $i$ -го розосередженого джерела електроенергії та для забезпечення технологічного процесу розподілу електроенергії в ЕМ;  $Q_{КУ_i}$  – встановлена потужність  $i$ -ої компенсаційної установки;  $c_0$ ,  $v_0$  – відповідно, ціна електроенергії у межах балансової належності енергопостачальної компанії та укрупнена питома вартість засобів КРП;  $n_{СП}$ ,  $n_{РДЕ}$ ,  $n_{КУ}$  – відповідно, кількість споживачів електромереж, РДЕ, приєднаних до них, та КУ, що плануються до встановлення в ЕМ.

Головною проблемою адекватного визначення (5.2) і підвищення, таким чином, обґрунтованості та ефективності оптимальних рішень з КРП є моделювання змінних втрат електроенергії для електромереж з РДЕ та виділення їх складових від реактивних перетікань в умовах обмеженості інформаційного забезпечення.

## РОЗПОДІЛ ЗМІННИХ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ МІЖ ОКРЕМИМИ РЕАКТИВНИМИ ПЕРЕТІКАННЯМИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ БЕРП

Вираз сумарних втрат від реактивних перетікань в ЕМ з урахуванням розподілу втрат між окремими споживачами (джерелами) з використанням диференційного методу розподілу можна записати як:

$$\Delta W_{Q\Sigma} = \sum_{j=1}^m \left\{ \sum_{i \in N_j} \left( \frac{\partial \Delta P_j}{\partial Q_i} Q_i \right) k_{\Phi Q_j}^2 \right\} t, \quad (6.1)$$

або після перегрупування складових

$$\Delta W_{Q\Sigma} = \sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{j \in M_i} \left( \frac{\partial \Delta P_j}{\partial Q_i} k_{\Phi Q_j}^2 \right) Q_i \right\} t = \sum_{i=1}^n \Delta W_{Q_i}, \quad (6.2)$$

де  $n$  – кількість вузлів ЕМ, у яких приєднані споживачі, розосереджені джерела електроенергії та засоби компенсації реактивної потужності;  $\Delta P_j$  – сумарні втрати потужності у  $j$ -ій вітці ЕМ;  $Q_i = Q_{Hi} - Q_{Ky_i} - Q_{PDE_i}$  – реактивна потужність, що споживається (генерується) у  $i$ -му вузлі ЕМ з урахуванням локальних та групових засобів КРП;  $M_i$  – множина віток ЕМ, якими здійснюється транспортування реактивної потужності до  $i$ -го вузла.

Записавши втрати від реактивного перетікання до  $i$ -го вузла через БЕРП вигляді  $\Delta W_{Q_i} = D_i Q_i t$  вираз для економічного еквівалента реактивної потужності можна подати у вигляді:

$$D_i = \sum_{j \in M_i} \left( \frac{\partial \Delta P_j}{\partial Q_i} k_{\Phi Q_j}^2 \right). \quad (6.3)$$

Складові витрат ЕК на транспортування реактивних перетікань в ЕМ (5.5), (5.6) набудуть вигляду:

$$\begin{aligned} W_{СП} &= \sum_{i \in N_{СП}} [D_i (Q_{Hi} - Q_{Ky_i})] \Pi_0 t; \\ W_{PDE} &= \sum_{i \in N_{PDE}} [D_i (Q_{PDE_i} - Q_{Ky_i})] \Pi_0 t, \end{aligned} \quad (6.4)$$

де  $N_{СП}$ ,  $N_{PDE}$  – відповідно, множини вузлів ЕМ, до яких приєднані споживачі та розосереджені джерела електроенергії.

Як видно з (6.4), основною проблемою розрахунку значень цільової функції оптимізації рівнів компенсації реактивної потужності в ЕМ та керування засобами КРП є визначення та оперативне коригування економічних еквівалентів реактивної потужності  $D_i$ .

## ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ РІВНІВ КРПІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ З РОЗОСЕРЕДЖЕНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

Цільова функція для визначення оптимальних рівнів компенсації реактивної потужності у вузлах ЕМ з розосередженим генеруванням (через вхідні реактивні потужності вузлів  $\psi_i$ ):

$$B = \sum_{i \in N_{KV}} Q_i (1 - \psi_i) \cdot B_0 + \left\{ \sum_{i \in N_{СП}} D_i Q_{Hi} \psi_i + \sum_{i \in N_{РДЕ}} D_i Q_{РДЕi} \psi_i + \sum_{i \in N_{ТП}} D_i Q_{ТПi} \psi_i \right\} \rho_0 t \rightarrow \min, \quad (7.1)$$

або після об'єднання множин вузлів  $N_{СП}$ ,  $N_{РДЕ}$  та  $N_{ТП}$  у множину вузлів  $N$ :

$$B = \sum_{i \in N} [Q_i (B_0 + (D_i \rho_0 t - B_0) \psi_i)] \rightarrow \min, \quad (7.2)$$

де  $Q_i$  – реактивна потужність споживання (генерування) у  $i$ -му вузлі ЕМ.

Відповідно до постановки задачі оптимізації рівнів КРПІ в ЕМ (складу незалежних параметрів) цільова функція має вигляд:

1. Оптимізація рівнів компенсації реактивних навантажень споживачів:

$$B = \sum_{i \in N_{СП}} [Q_{Hi} (B_0 + (D_i \rho_0 t - B_0) \psi_i)] + \sum_{i \in N_{РДЕ} \cup N_{ТП}} D_i Q_i \rho_0 t \rightarrow \min, \quad (7.3)$$

2. Оптимізація рівнів КРПІ у межах балансової належності енергопостачальної компанії:

$$B = \sum_{i \in N_{ТП}} [Q_{ТПi} (B_0 + (D_i \rho_0 t - B_0) \psi_i)] + \sum_{i \in N_{РДЕ} \cup N_{СП}} D_i Q_i \rho_0 t \rightarrow \min, \quad (7.4)$$

3. Комплексна оптимізація рівня компенсації реактивних навантажень ЕМ засобами споживачів та ЕК:

$$B = \sum_{i \in N_{СП} \cup N_{ТП}} [Q_i (B_0 + (D_i \rho_0 t - B_0) \psi_i)] + \sum_{i \in N_{РДЕ}} D_i Q_{РДЕi} \rho_0 t \rightarrow \min. \quad (7.5)$$

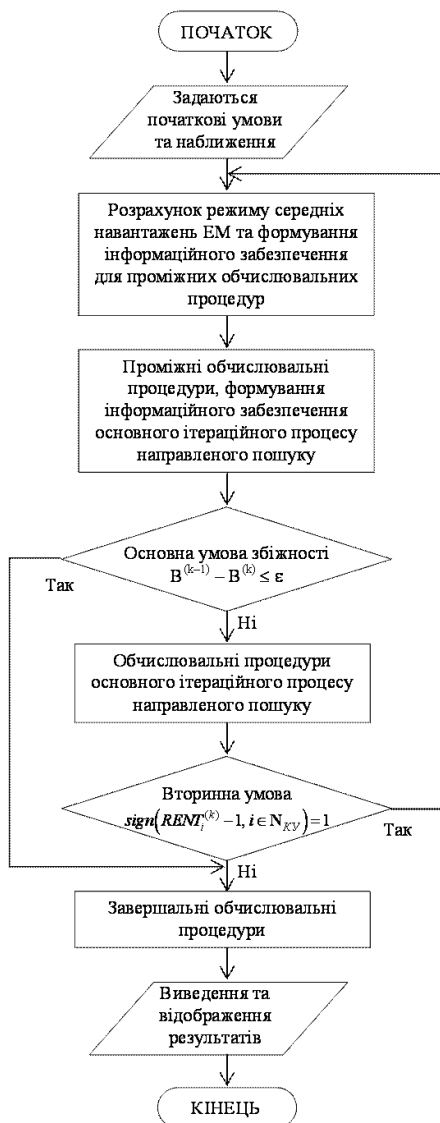
Аналізуючи (7.3)-(7.5) для забезпечення мінімуму витрат на обслуговування перетікань реактивної потужності необхідно зменшувати вхідну реактивну потужність за рахунок КРПІ лише у вузлах ЕМ, для яких  $D_i \rho_0 t - B_0 > 0$ , або враховуючи, що  $B_0 > 0$ :

$$RENT_i = \frac{D_i \rho_0 t}{B_0} > 1, \quad (7.6)$$

де  $RENT_i$  – за певних умов чисельно дорівнює рентабельності капіталовкладень у розміщення засобів КРПІ у  $i$ -му вузлі.



# ОПТИМІЗАЦІЯ РІВНІВ КРП В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ЗА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИМ КРИТЕРІЄМ



Уточнюється множина незалежних змінних; уточнюється представлення варіантів незалежних змінних: у вигляді переліку допустимих встановлених потужностей  $Q_{KV}$ , або у вигляді ступеня коригування встановленої потужності компенсувальних установок  $\Delta Q_{KV}$ ; визначається максимальна кількість незалежних змінних  $n_{\max}$ , які коригуються на кожному кроці ітераційного процесу направлено пошуку; визначаються реактивні потужності  $Q_i$  у незалежних вузлах ЕМ (множина  $N$ ), в тому числі для РДЕ; задаються графіки реактивного навантаження для всіх незалежних вузлів у вигляді термів нечітких множин; задаються вартісні коефіцієнти  $c_0$ ,  $v_0$  та інтервал аналізу  $t$ ; задаються постійні параметри, що характеризують діапазони допустимих значень режимних параметрів ЕМ.

Розраховується режим середніх навантажень ЕМ; перевіряються обмеження на параметри режиму (5.1); визначаються вагові коефіцієнти вузлів, приведені до віток ЕМ для ідентифікації коефіцієнтів форми навантажень споживачів.

По рядках визначається матриця коефіцієнтів розподілу втрат потужності  $\bar{T}$  та вектор коефіцієнтів чутливості  $\bar{T}_\psi$ ; для кожної вітки ЕМ ідентифікуються коефіцієнти форми графіків перетікань реактивної потужності до сукупності споживачів, що отримують живлення даною віткою; ідентифікуються коефіцієнти форми графіків зворотних перетікань реактивної потужності, зумовлені розосередженим генеруванням та засобами групової компенсації реактивної потужності; для кожної вітки розраховуються коефіцієнти форми графіків реактивних перетікань реактивних потужностей, в тому числі знакозмінних (5.3); для кожного вузла розраховується значення ЕЕРП; виходячи з потужностей  $KV$ , що встановлені у вузлах з множини  $N_{KV}$  визначаються вхідні реактивні потужності у відносних одиницях  $\psi_i^{(k)}$ ; розраховується значення цільової функції  $B^{(k)}$  (8.1) для контролю збіжності ітераційного процесу.

Перевіряється виконання основної умови збіжності ітераційного процесу: припинення зменшення цільової функції порівняно з попереднім  $(k-1)$ -им наближенням процесу розрахунку:  $B^{(k-1)} - B^{(k)} \leq \epsilon$ , де  $\epsilon$  – наперед задана точність процесу розрахунку.

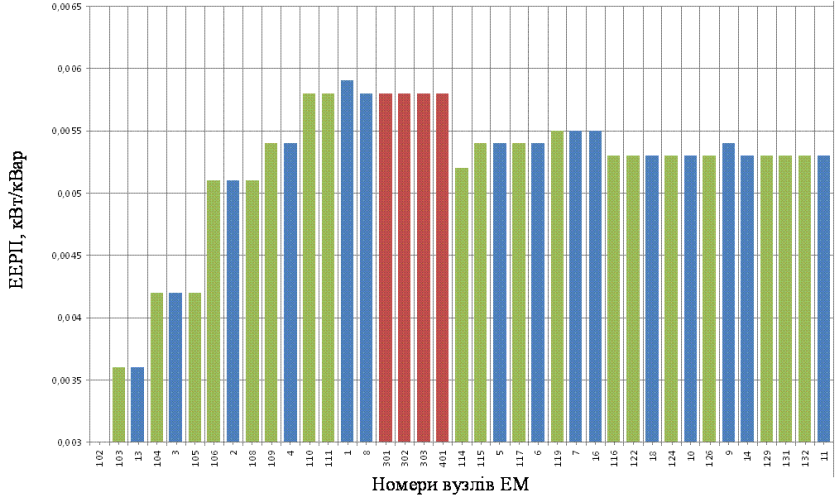
Для кожного вузла, де передбачається встановлення  $KV$  (множина  $N_{KV}$ ) розраховується значення індикатора доцільності встановлення (нарощування потужності) компенсувальної установки  $RENT_i^{(k)}$  (8.6); залежно від постановки задачі для вузлів з множини  $N_{KV}$ , для яких  $RENT_i > 1$  потужність компенсувальної установки  $Q_{KV_i}$  збільшується до наступної з переліку  $Q_{KV}$ , або на ступінь  $\Delta Q_{KV}$ :  $Q_{KV_i}^{(k)} = Q_{KV_i}^{(k-1)} + \Delta Q_{KV}$ ; кількість змінних, що коригуються на поточному кроці процесу не має перевищувати  $n_{\max}$ .

Перевіряється вторинна умова збіжності ітераційного процесу, що полягає у перевірці наявності хоча б одного вузла для встановлення (нарощування) встановленої потужності  $KV$  на поточному кроці процесу пошуку:  $sign(RENT_i^{(k)} - 1, i \in N_{KV}) = 1$ .

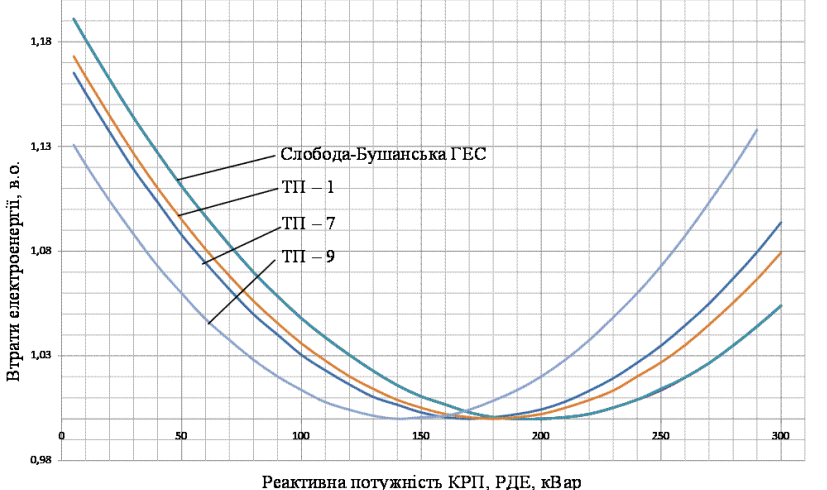
Аналіз режиму електричної мережі; остаточна перевірка виконання технічних обмежень на залежні та незалежні параметри режиму; визначення втрат електроенергії та інших показників ефективності впровадження КРП; визначення оптимальних вхідних реактивних потужностей  $\psi_{opt}$  для вузлів, в яких пропонується встановлення  $KV$ ; визначення оптимальних рівнів компенсації реактивної потужності  $\alpha_{opt}$  для вузлів, в яких пропонується встановлення  $KV$ .

# ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОВПЛИВУ ЕЕРП ТА ОПТИМАЛЬНИХ РІВНІВ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

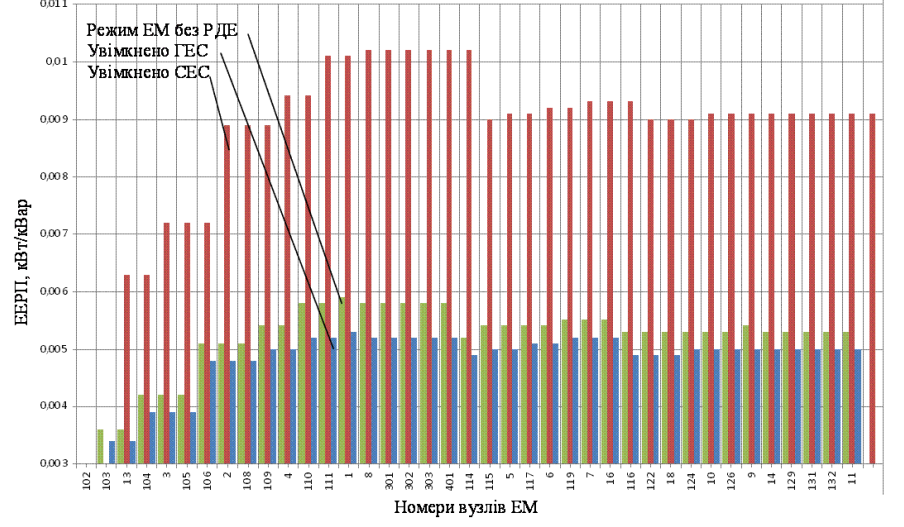
Результати розрахунку ЕЕРП для електромережі Л-45 ТП-110/10 «Михайлівка»



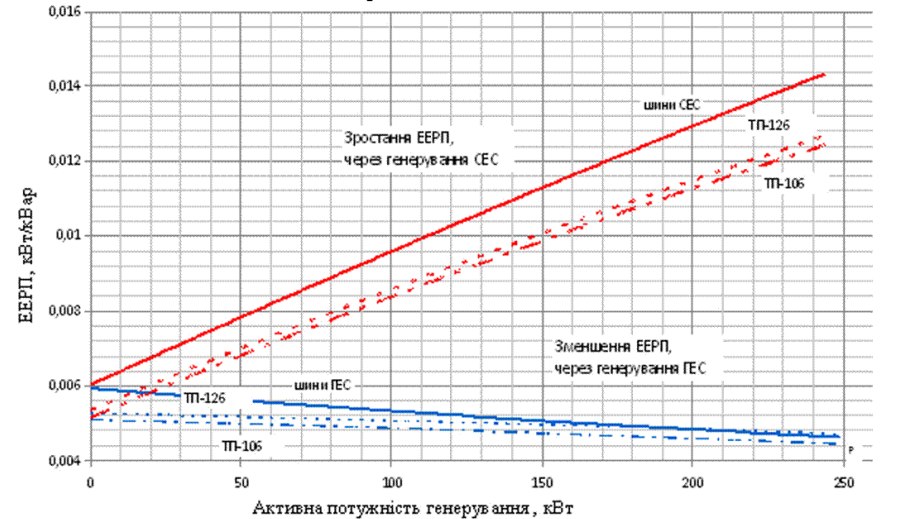
Залежності втрат активної потужності від потужностей пристроїв КРП та реактивного генерування РДЕ



Залежність ЕЕРП від типу розосередженого генерування в ЕМ



Залежності ЕЕРП від потужності, що видається з шин ТП-401



## НАУКОВА НОВИЗНА ТА ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

**Наукова новизна результатів** полягає у тому, що показано залежність економічних еквівалентів реактивної потужності від оптимальних рівнів компенсації реактивної потужності в електромережах з розосередженим генеруванням, що розширює область застосування ЕЕРП і дозволяє обґрунтувати взаємовигідні умови діяльності енергопостачальних компаній, розосереджених джерел енергії та споживачів щодо оптимізації реактивних перетікань в електромережах.

1. Показано, що питання взаємовпливу розосередженого генерування та електроспоживання в електромережах на сьогодні є мало дослідженими, що призводить до погіршення умов функціонування окремих суб'єктів енергетичного ринку. Разом з тим, формуються сприятливі умови для впровадження засобів індивідуальної та групової компенсації реактивної потужності. Однак, невідповідність класичної постановки задачі та особливостей компенсації реактивної потужності в умовах розбудови засобів розосередженого генерування, не дозволяє формувати ефективні технічні рішення у даному напрямку.

2. На підставі виконаних досліджень визначено структуру витрат енергопостачальної компанії, пов'язаних з обслуговуванням реактивних перетікань. Врахування витрат, пов'язаних з транспортуванням реактивної потужності для потреб технологічного процесу ЕМ, а також більш адекватне моделювання витрат, які виникають за рахунок транспортування реактивної потужності від РДЕ забезпечує можливість використання сукупних витрат в якості цільової функції для розв'язання ряду актуальних задач, пов'язаних з компенсацією реактивної потужності.

3. Показано, що задачі оптимізації рівнів компенсації реактивної потужності в ЕМ, незалежно від критерію оптимальності, фактично можуть бути зведені до оптимізації економічних еквівалентів реактивної потужності, математична модель яких отримана у роботі. Обґрунтовано доцільність застосування дискретно-ітераційного підходу до алгоритмічної реалізації задачі оптимізації рівнів компенсації реактивних потужностей.

4. Працездатність та ефективність запропонованих у роботі алгоритмів перевірена шляхом виконання розрахунків з оптимізації розміщення та параметрів засобів компенсації реактивної потужності на прикладі електричних мереж 10 кВ ПАТ «Вінницябленерго». Їх впровадження, у вигляді відповідного програмного забезпечення, потенційно дасть змогу зменшити навантажувальні втрати електроенергії на 2-5% та забезпечити відповідність поточних та нормативних витрат електроенергії.

5. Одним з головних питань є забезпечення безпеки життєдіяльності та нормальних умов праці. Тому в розділі «Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях» було розглянуто основні заходи щодо створення та забезпечення безпечних умов праці.