

**УДК**

**К.К. Моргун, О.О. Хоружий**, студенти

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»  
03056 ; м. Київ вул. Борщагівська, 103, корпус 22

### ОПТИМАЛЬНЕ РОЗМІЩЕННЯ ДЖЕРЕЛА РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ В МЕРЕЖАХ НАПРУГОЮ 10 кВ

*Розосереджена генерація є одним з перспективних напрямків розвитку світової енергетики. Одною з перепон на шляху реалізації таких проектів є взаємовідносини між енергопостачальною компанією і незалежними постачальниками електроенергії (власниками джерел розосередженої генерації). Саме тому для подальшого розвитку децентралізованої енергетики важливим є пошук компромісного рішення, яке дасть можливість підключення генеруючих установок малої та середньої потужності до енергосистеми, забезпечуючи максимально позитивний ефект з точки зору впливу на ефективність роботи електропостачальних систем, наприклад, на втрати потужності та енергії. Вказані обставини дозволили сформулювати принципову мету досліджень.*

Джерела розосередженої генерації малої та середньої потужності здатні забезпечувати електроенергією не лише їх власників, а й споживачів на прилеглих територіях. Для передачі надлишку електроенергії необхідно або будувати нові електричні мережі, що потребує значних капіталовкладень, або використовувати вже існуючі. Підключення генеруючих установок до електропостачальної мережі робить їх активними учасниками процесу формування перетоків потужності. У зв'язку з цим виникає проблема вибору правильного місця розміщення джерел РГ, оскільки саме від їх положення буде залежати ступінь позитивного впливу на мережу .

Одна з можливих позитивних дій проявляється у зменшенні втрат потужності та енергії за рахунок зміни потокорозподілення на ділянках мережі, що знаходяться між підстанцією живлення та точкою підключення розосередженої генерації. При цьому на ділянках, що знаходяться за місцем підключення джерел розосередженої генерації, потокорозподілення, а, отже, втрати енергії та потужності, залишаються не змінними. Слід зазначити, що зменшення втрат призводить до підвищення пропускної здатності ліній електропередач та більш ефективного їх функціонування.

На першому етапі досліджень критерієм вибору точки підключення джерела розосередженої генерації до мережі будемо вважати мінімізацію втрат потужності. Даний критерій застосовується при вирішенні однієї з двох задач:

- 1 вибір оптимального місця встановлення джерела генерації з відомою потужністю;
- 2 визначення потужності джерела розосередженої генерації, що встановлено у певному місці.

*Розміщення джерел розосередженої генерації в магістральних лініях*

Для оцінки зміни втрат потужності при використанні джерел розосередженої генерації спочатку розглянемо гіпотетичну лінію з рівномірно розподіленим навантаженням (рисунку 1).

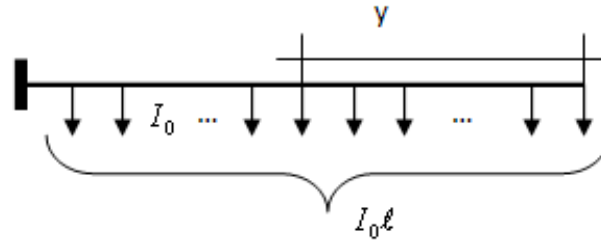


Рисунок 1 - Лінія з рівномірно розподіленим навантаженням  
 $I_0$  – навантаження, яке припадає на одиницю довжини лінії з питомим опором  $r_0$ .  
 Втрати потужності для довільного моменту часу визначаються за формулою:

$$\Delta P = \int_0^{\ell} 3I_0^2 x^2 r_0 dx = 3I_0^2 r_0 \int_0^{\ell} x^2 dx = I_0^2 r_0 \ell^3 \quad (1)$$

Припустимо, що на відстані  $y$  від кінця лінії підключається джерело розосередженої генерації, потужність якого відповідає навантаженню  $I_d$ . Характер зміни навантаження уздовж лінії для розглянутого випадку представлений на рисунку 2.

При наявності джерела розосередженої генерації втрати потужності визначаються відповідно до формули:

$$\begin{aligned} \Delta P_d &= \int_0^y 3I_0^2 x^2 r_0 dx + \int_y^{\ell} 3(I_0 x - I_d)^2 r_0 dx = I_0^2 y^3 r_0 + \int_y^{\ell} 3I_0^2 x^2 r_0 dx - \int_y^{\ell} 6I_0 I_d x r_0 dx + \int_y^{\ell} 3I_d^2 r_0 dx = \\ &= I_0^2 y^3 r_0 + I_0^2 \ell^3 r_0 - I_0^2 y^3 r_0 - 3I_0 I_d \ell^2 r_0 + 3I_0 I_d y^2 r_0 + 3I_d^2 \ell r_0 - 3I_d^2 y r_0 \\ \Delta P_d &= I_0^2 \ell^3 r_0 - 3I_0 I_d \ell^2 r_0 + 3I_0 I_d y^2 r_0 + 3I_d^2 \ell r_0 - 3I_d^2 y r_0, \end{aligned} \quad (2)$$

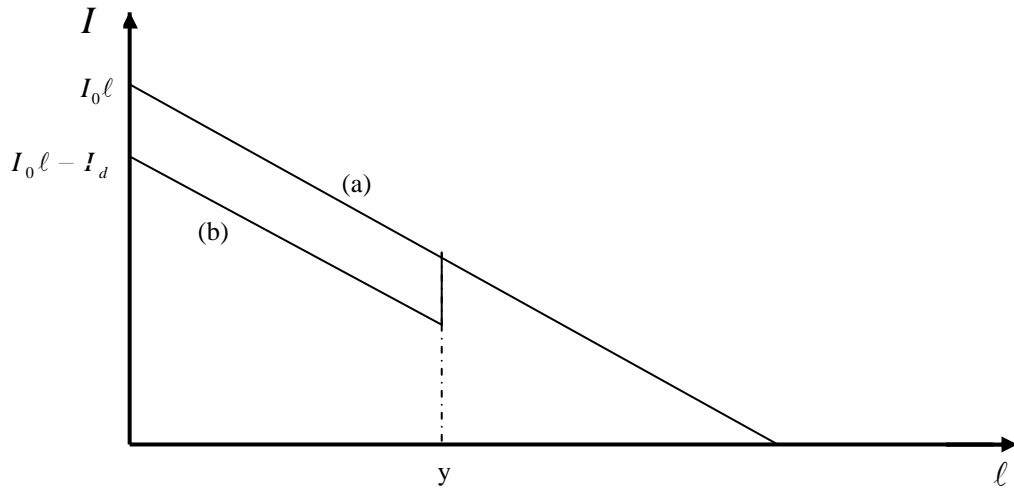


Рисунок 2 - Зміна поточкорозподілення уздовж лінії з рівномірно розподіленим навантаженням:

- а) без джерела розосередженої генерації,
- б) із джерелом розосередженої генерації

Визначаємо координати точки підключення джерела розосередженої генерації при яких забезпечується мінімум втрат потужності в лінії.

Використовуючи вираз (2) знаходимо:

$$\frac{\partial(\Delta P_d)}{\partial y} = 6I_0 I_d y r_0 - 3I_d^2 r_0 = 0, \quad (3)$$

Звідки отримуємо:

$$I_0 y = I_d / 2, \quad (4)$$

Таким чином, якщо потужність підключеного джерела дорівнює сумарному навантаженню лінії ( $I_d = I_0 \ell$ ), то мінімум втрат потужності буде забезпечений у випадку його підключення в середині лінії:

$$I_0 y = \frac{I_0 \ell}{2}, \quad y = \ell / 2, \quad (5)$$

Якщо потужність джерела становить 40% сумарного навантаження лінії ( $I_d = 0,4 I_0 \ell$ ), то оптимальна точка його підключення буде перебувати на відстані  $0,2 \ell$  від кінця лінії. Незважаючи на те, що розглянута схема не відповідає реальним умовам розподілу навантажень в електричних мережах середньої напруги, отримані результати можуть служити для формування правила, що орієнтовно визначає умову раціонального розміщення джерела розосередженої генерації певної потужності з позицій мінімізації втрат потужності. При цьому необхідно приймати до уваги, що з огляду на дискретний характер зміни навантажень окремих ділянок, важко припустити, що безумовне виконання умови (4) може мати місце на практиці. Крім цього необхідно передбачити ситуацію, коли джерело розосередженої генерації підключається до вузла мережі (шин вторинної напруги розподільного трансформатора), що має власне навантаження. У цьому разі відсутність навантаження даного трансформатора розглядається лише як окремий випадок.

Розглянемо ділянку магістральної мережі, на якій встановлено джерело розосередженої генерації.

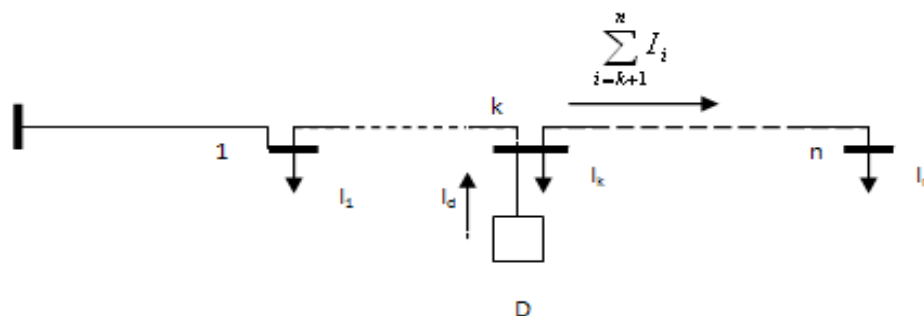


Рисунок 3 – Ділянка розподільної мережі із джерелом розосередженої генерації

Джерело розосередженої генерації ( $I_d$ ) необхідно встановити в першому  $k$  ( $k=1, \dots, n$ ) вузлі навантаження, для якого виконується умова:

$$\frac{I_d}{2} \geq \sum_{i=k+1}^n I_i, \quad (6)$$

де  $I_d$  – струмова ін'єкція в мережу з боку джерела розосередженої генерації;

$\sum_{i=k+1}^n I_i$  – сумарне навантаження розподільних трансформаторів, які розташовані за точкою підключення джерела.

У випадку рівності ефект від встановлення джерела у вузлі  $k$  та  $k+1$  ідентичний.

Можна зробити припущення, що точність виразу (6) буде залежати від рівномірності навантаження мережі. Чим однорідніше розподіл навантаження, тим точніше формула (6) визначить місце встановлення джерела розосередженої енергії.

Для перевірки справедливості формули (6) була розроблена програма імовірнісного модулювання. Дана програма здійснює імовірнісне моделювання електричної мережі з джерелом розосередженої генерації методом Монте-Карло.

В основу метода Монте-Карло покладена можливість моделювання випадкових

величин з заданою вірогідністю або з заданим законом розподілу. Для застосування даного методу моделювання обов'язковим є наявність датчика випадкових величин, який дозволяє отримувати значення випадкових величин, що відповідають певному закону розподілу. В програмі імовірнісного моделювання в якості датчика використовується датчик псевдовипадкових величин, який генерує послідовність чисел, що підпорядковуються рівномірному закону розподілу.

Застосування джерел розосередженої генерації передбачається, в першу чергу, в сільській місцевості. Для сільських розподільчих мереж характерним є велика протяжність у поєднанні з відносно не великою потужністю трансформаторних підстанцій. В більшості випадків номінальна потужність трансформаторів становить від 40 до 250 кВ·А, а номінальна напруга передачі електроенергії складає 10 кВ. Виходячи з таких показників можна встановити, що навантаження на шинах високої сторони трансформаторних підстанцій будуть знаходитись у діапазоні  $I[3...15]$  А, а опори ділянок повітряних ліній, які з'єднують окремі підстанції лежать в межах  $r[0,1...0,5]$  Ом.

*Розміщення джерел розосередженої генерації в розгалужених мережах*

Будь-яка розгалужена мережа може бути представлена у вигляді декількох еквівалентних магістральних схем. Для кожної магістральної схеми, в загальному випадку, існує своє оптимальне місце розміщення джерела розосередженої генерації, яке визначається відповідно до формули (6), при якому спостерігаються найнижчі втрати потужності та електроенергії.

Слід зазначити, що в процесі заміни розгалуженої лінії еквівалентними схемами, початковий більш-менш рівномірний розподіл навантажень стає неоднорідним за рахунок концентрації навантаження всього відгалуження в одній точці еквівалентної лінії, що може викликати певну похибку при визначенні оптимального місця розміщення джерела розосередженої генерації при використанні виразу (6). Тому, наступним етапом досліджень буде аналіз більш складної, з точки зору топології, розгалуженої мережі.

На даному етапі досліджень важливим є використання раніше отриманих, експериментально підтверджених результатів. З цією метою складні розгалужені електричні мережі зводяться до еквівалентних магістральних, для яких вже існує перевірена формула визначення оптимального місця розташування джерела розосередженої генерації енергії.

Таким чином, для розгалуженої мережі необхідно встановити можливість застосування формули (6). Для цього використаємо розроблену програму імовірнісного моделювання розосередженої генерації електроенергії методом Монте-Карло.

В основу роботи програми покладено принцип моделювання випадкових величин із заданим законом розподілу. В якості датчика випадкових величин, наявність якого є необхідною умовою роботи програми, використовуємо датчик псевдовипадкових чисел, що генерує послідовність чисел, котрі підпорядковуються рівномірному закону розподілу.

Розглянемо схему представлену на рисунку 4.

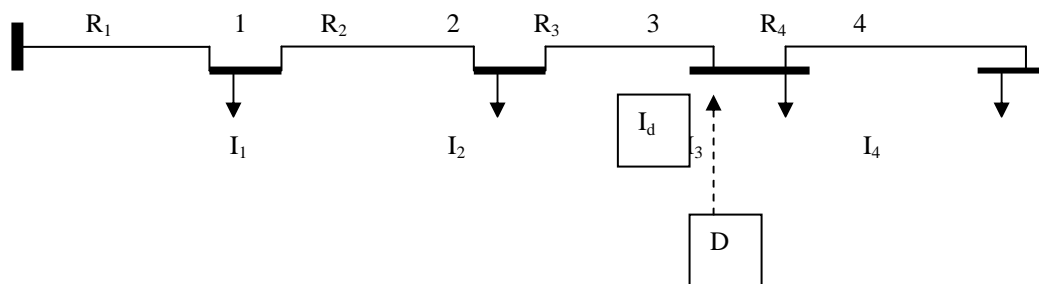


Рисунок 4– Фрагмент лінії розподільчої мережі із джерелом генерації.

Сумарні втрати потужності в представленій лінії без джерела розосередженої генерації, визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned} \Delta P &= 3I_4^2 R_4 + 3(I_4 + I_3)^2 R_3 + 3(I_4 + I_3 + I_2)^2 R_2 + 3(I_4 + I_3 + I_2 + I_1)^2 R_1 = \\ &= 3I_4^2 R_4 + 3I_4^2 R_3 + 6I_3 I_4 R_3 + 3I_3^2 R_3 + 3I_4^2 R_2 + 6I_3 I_4 R_2 + 3I_3^2 R_2 + 6I_2 I_4 R_2 + 6I_2 I_3 R_2 + 3I_2^2 R_2 + \\ &\quad + 3I_4^2 R_1 + 6I_3 I_4 R_1 + 6(I_3 + I_4)(I_1 + I_2)R_1 + 3I_2^2 R_1 + 6I_1 I_2 R_1 + 3I_1^2 R_1 = \\ &= 3I_4^2 R_4 + 3I_4^2 R_3 + 6I_3 I_4 R_3 + 3I_3^2 R_3 + 3I_4^2 R_2 + 6I_3 I_4 R_2 + 3I_3^2 R_2 + 6I_2 I_4 R_2 + 6I_2 I_3 R_2 + 3I_2^2 R_2 + \\ &\quad + 3I_4^2 R_1 + 6I_3 I_4 R_1 + 3I_3^2 R_1 + 6I_1 I_3 R_1 + 6I_1 I_4 R_1 + 6I_2 I_3 R_1 + 6I_2 I_4 R_1 + 3I_2^2 R_1 + 6I_1 I_2 R_1 + 3I_1^2 R_1, \end{aligned} \quad (7)$$

Нехай у вузлі 3 встановлене джерело розосередженої генерації, що забезпечує струмову ін'єкцію ( $I_d$ ) у мережу. У цьому випадку сумарні втрати потужності будуть рівні:

$$\begin{aligned} \Delta P_d &= 3I_4^2 R_4 + 3(I_3 + I_4 - I_d)^2 R_3 + 3(I_2 + I_3 + I_4 - I_d)^2 R_2 + 3(I_1 + I_2 + I_3 + I_4 - I_d)^2 R_1 = \\ &= 3I_4^2 R_4 + 3I_3^2 R_3 + 6I_3 I_4 R_3 + 3I_4^2 R_3 - 6I_3 I_d R_3 - 6I_4 I_d R_3 + 3I_d^2 R_3 + 3I_2^2 R_2 + 3I_3^2 R_2 + 6I_2 I_3 R_2 + \\ &\quad + 6(I_2 + I_3)(I_4 - I_d)R_2 + 3I_4^2 R_2 - 6I_4 I_d R_2 + 3I_d^2 R_2 + 3\{(I_1 + I_2) + I_3\}^2 + \\ &\quad + 2(I_1 + I_2 + I_3)(I_4 - I_d)R_1 + (I_4 - I_d)^2 R_1 = \\ &= 3I_4^2 R_4 + 3I_3^2 R_3 + 6I_3 I_4 R_3 + 3I_4^2 R_3 - 6I_3 I_d R_3 - 6I_4 I_d R_3 + 3I_d^2 R_3 + 3I_2^2 R_2 + 3I_3^2 R_2 + 6I_2 I_3 R_2 + \\ &\quad + 6I_2 I_4 R_2 + 6I_3 I_4 R_2 - 6I_2 I_d R_2 - 6I_3 I_d R_2 + 3I_4^2 R_2 - 6I_4 I_d R_2 + 3I_d^2 R_2 + \\ &\quad + 3I_1^2 R_1 + 6I_1 I_2 R_1 + 3I_2^2 R_1 + 6I_1 I_3 R_1 + 6I_2 I_3 R_1 + 3I_3^2 R_1 + 6I_1 I_4 R_1 + 6I_1 I_3 R_1 + 6I_2 I_4 R_1 + \\ &\quad + 6I_3 I_4 R_1 - 6I_1 I_d R_1 - 6I_2 I_d R_1 - 6I_3 I_d R_1 + 3I_4^2 R_1 - 6I_4 I_d R_1 + 3I_d^2 R_1, \end{aligned} \quad (8)$$

Зниження втрат за рахунок використання джерела розосередженої генерації складе:

$$\begin{aligned} \delta(\Delta P) &= \Delta P - \Delta P_d = 6I_3 I_d R_3 + 6I_4 I_d R_3 + 6I_2 I_d R_2 + 6I_3 I_d R_2 + 6I_4 I_d R_2 + 6I_1 I_d R_1 + 6I_2 I_d R_1 + 6I_3 I_d R_1 + \\ &+ 6I_4 I_d R_1 - 3I_d^2 R_3 - 3I_d^2 R_2 - 3I_d^2 R_1 = 6I_d (I_3 R_3 + I_4 R_3 + I_2 R_2 + I_3 R_2 + I_4 R_2 + I_4 R_1 + I_2 R_1 + I_3 R_1 I_1 R_1) - \\ &- 3I_d^2 (R_3 + R_2 + R_1) = 6I_d [I_3 (R_3 + R_2 + R_1) + I_4 (R_3 + R_2 + R_1) + I_2 (R_2 R_1) + I_1 R_1] - 3I_d^2 (R_3 + R_2 + R_1); \end{aligned}$$

$$\delta(\Delta P) = 3I_d [2I_4 (R_3 + R_2 + R_1) + 2I_3 (R_3 + R_2 + R_1) + 2I_2 (R_2 + R_1) + 2I_1 R_1 - I_d (R_3 + R_2 + R_1)]; \quad (9)$$

$$\delta(\Delta P) = 3I_d [2R_1 (I_1 + I_2 + I_3 + I_4) + 2R_2 (I_2 + I_3 + I_4) + 3R_3 (I_3 + I_4) - I_d (R_3 + R_2 + R_1)]. \quad (10)$$

В загальному вигляді зниження втрат потужності від встановлення джерела генерації можна представити у вигляді:

$$\delta(\Delta P) = 3I_d [2 \sum_{i=1}^N (I_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \in \Pi i, d}}^M R_j) - I_d \sum_{\substack{j=1 \\ j \in \Pi d}}^M R_j], \quad (11)$$

Після визначення поточкорозподілення формула (11) приймає вигляд:

$$\delta(\Delta P) = 3I_d [2 \sum_{\substack{j=1 \\ j \in \Pi d}}^M R_j I_j - I_d \sum_{\substack{j=1 \\ j \in \Pi d}}^M R_j], \quad (12)$$

$$\delta(\Delta P) = 6I_d \left( \sum_{\substack{j=1 \\ j \in \Pi d}}^M I_j R_j - \frac{1}{2} I_d R_d \right), \quad (13)$$

де  $j \in \Pi i, d$  означає, що розглядаються тільки ті ділянки, які одночасно лежать на шляху живлення вузлів навантаження  $i$  й  $d$ ;

$d$  – вузол встановлення джерела розосередженої генерації;

$I_d$  – ін'єкція джерела розосередженої генерації в мережу;

$N$  – кількість вузлів навантаження;

$M$  – кількість ділянок мережі;

$$R_d = \sum_{\substack{j=1 \\ j \in Pd}}^M R_j, \quad (14)$$

Всі вище запропоновані вирази дозволяють адекватно визначити величину зниження втрат потужності у разі використання джерел розосередженої генерації.

*Оцінка впливу джерел розосередженої генерації на втрати електричної енергії в розподільних мережах.*

Застосування критерію мінімуму втрат потужності при виборі місць розміщення джерел розосередженої генерації представляється доцільним, у першу чергу, коли передбачається його використання протягом обмеженого часу, наприклад, у період максимальних навантажень енергосистеми. Разом із тим, з огляду на добову зміну навантажень окремих вузлів мережі, їхня неоднорідність, а також те, що джерело розосередженої генерації може використатися тривалий час, умова (6), у загальному випадку, не гарантує, що отримане рішення буде забезпечувати мінімум втрат електроенергії. Зокрема, це може мати місце, якщо вибір точки підключення здійснюється на основі аналізу режиму максимальних навантажень. Логічно припустити, що при значних добових змінах навантажень і постійній потужності джерела генерації, різними режимами будуть відповідати різні рішення щодо оптимального місця його підключення, прийняті на основі (6). При цьому ступінь розкиду рішень залежить від характеру графіків електричних навантажень окремих вузлів мережі.

Результатом використання децентралізованої енергетики може стати скорочення інвестицій у будівництво крупних енергоблоків, високовольтних ліній електропередач, підстанцій та систему розподілу електроенергії.

До потенційних переваг децентралізованої генерації можна віднести:

- підвищення маневреності енергосистеми;
- підтримання постійних режимів напруги і частоти в мережі;
- підвищення надійності енергосистеми за рахунок використання малих електростанцій;
- зменшення завантаження лінії;
- зменшення величини “гарячого” резерву енергосистеми;
- зменшення витрат традиційного палива при використанні відновлюваних і нетрадиційних джерел енергії,
  - зменшення рівня викидів шкідливих речовин в навколишнє середовище (твердих часток, оксидів сірки і азоту, двоокису вуглецю) за рахунок використання екологічно чистих джерел енергії і когенерації.
- короткий термін реалізації проектів;
- відтягнення в часі строків реконструкції системи передачі і розподілу електроенергії;
- покращення загальної ефективності функціонування інтегрованих систем електропостачання.

Основним недоліком джерел розосередженої генерації є більша, у порівнянні з традиційною енергетикою, вартість вироблення енергії. Однак такі переваги, як можливість використання теплової енергії, підвищенням надійності електропостачання споживачів в точках розміщення джерел децентралізованої генерації, уникненням високих витрат на електроенергію в період максимальних навантажень, зменшенням втрат енергії в лініях електропередач і розподільчих мережах, підвищенням якості електроенергії і можливістю гнучкого управління, роблять розосереджену генерацію перспективним напрямком розвитку світової енергетики.

## СТАЛІЙ РОЗВИТОК ЕНЕРГЕТИКИ

---

Проведене дослідження та отримані результати дозволили зробити наступні висновки.

1. В якості принципового напрямку розвитку електропостачальних систем світове співтовариство розглядає широке впровадження розосередженої генерації, формування в найближчій перспективі інтегрованих систем енергозабезпечення, застосування Smart Grid технологій.

2. Для досягнення максимально позитивного ефекту необхідне координування застосування систем централізованого енергопостачання і джерел розподіленої генерації в плані вибору параметрів, вузлів підключення і режимів роботи останніх.

3. Традиційні методи розрахунку таких характеристик як втрати потужності та електричної енергії, показники надійності та якості електричної енергії у випадку присутності в системі джерел розподіленої генерації, потребують суттєвого корегування.