

УДК 621.311

**СТОХАСТИЧНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ МІСЦЬ ПІДКЛЮЧЕННЯ
ТА ПОТУЖНОСТІ ДЖЕРЕЛ РОЗОСЕРЕДЖЕНОГО ГЕНЕРУВАННЯ**

О.В. Кириленко, академік НАН України, **Л.М. Лук'яненко**, канд.техн.наук, **І.С. Гончаренко**
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна. E-mail: okjraa@gmail.com

Переваги джерел розосередженого генерування обумовлюють їхнє активне впровадження в енергосистеми розвинених країн світу. Однак їхнє неоптимальне впровадження може погіршити параметри усталеного режиму електричних мереж. У попередніх роботах [1, 9, 11, 17, 21] було розроблено метод для розв'язання задачі оптимального підключення джерел розосередженого генерування та виявилось, що цей метод має обмежену сферу застосування. Метою даної роботи є розробка нового методу розв'язання задачі визначення оптимальних місць підключення та потужності джерел розосередженого генерування. Для досягнення поставленої мети сформульовано вимоги до методу, складено систему критеріїв та обмежень, розроблено відповідну цільову функцію та представлено новий метод розв'язання цієї задачі. Запропонований стохастичний метод поєднує механізми еволюційних алгоритмів. Суть роботи нового методу полягає у «еволюційному відборі» шин, на яких базуються найкращі розв'язки, між різними ітераціями розв'язання задачі. Результати розрахунково-модельних випробувань показали, що ефективність роботи нового методу є високою та не залежить від властивостей досліджуваної мережі. Бібл. 22, рис. 4, табл. 5.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, метод Монте-Карло, еволюційні алгоритми, оптимізація, розосереджене генерування.

Вступ. Економічні та екологічні переваги систем з розосередженими джерелами генерування (РГ), у тому числі й відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ), обумовили зростання частки РГ у структурі генерування електроенергії в розвинених країнах світу. Так, у деяких з них частка ВДЕ перевищує 50% (не враховуючи гідроелектростанції) від загального обсягу виробленої електроенергії [16]. Однак для забезпечення цих переваг від впровадження таких джерел в електричних мережах (ЕМ) необхідно розв'язати задачу визначення оптимальних місць підключення та величин потужностей джерел розосередженого генерування (далі – задача оптимального підключення джерел РГ). В іншому випадку підключення джерел РГ до ЕМ у неоптимальному місці може призвести до виникнення низки проблем та погіршення техніко-економічних показників роботи мережі [6, 7].

У світі приділяється значна увага розв'язанню задачі оптимального підключення джерел РГ [9, 13, 21], але, незважаючи на величезну кількість досліджень у цій сфері, ця задача не є повністю вирішеною навіть у розвинених країнах. Так, у запропонованих підходах до розв'язання цієї задачі метою оптимізації найчастіше є лише мінімізація втрат потужності [15, 22], яка в сучасних умовах існування енергетики не може бути єдиним критерієм оптимізації. Крім того вказані методи орієнтовані на проведення оптимізації в розімкнених мережах [15]. Навіть ті методи, де використовується багатокритеріальна постановка задачі, практично не враховують стохастичний характер роботи ВДЕ [14, 18], вони не пристосовані до особливостей ЕМ України [14].

Електричні мережі в Україні майже не розвиваються, а системний оператор та власники розподільних мереж намагаються «перекласти» розвиток ЕМ на плечі інвесторів. Проте інвестор жодним чином не зацікавлений у розвитку мереж, його єдиною метою є спорудження якомога більш рентабельного джерела РГ. В Україні також відомі роботи з визначення оптимальних місць підключення джерел РГ, але вони зазвичай не враховують особливостей ЕМ України [12] або орієнтовані лише на мінімізацію втрат потужності [4]. Цілеспрямовані підходи до розв'язання цієї задачі наведено в [8, 20], де пропонується більш узагальнений підхід до проблеми оптимального підключення джерел РГ в ЕМ.

У [9] для розв'язання задачі оптимального підключення джерел РГ було розроблено метод, в якому застосовуються статистичні випробування Монте-Карло в поєднанні з багатокритеріальною постановкою задачі. Було проведено дослідження, що дозволило вдосконалити запропонований метод [1, 17, 21]. У ході подальших досліджень працездатності методу на різних схемах ЕМ, а саме на

відомих дослідницьких мережах Інституту інженерів з електротехніки та електроніки (ІЕЕЕ), встановлено, що розроблений метод у представленому вигляді має обмежену сферу використання. Тобто необхідно перейти до розробки більш універсального методу.

Тому **метою цієї роботи є** розробка ефективного методу розв'язання задачі визначення оптимальних місць підключення та потужності джерел розосередженого генерування, який відрізняється високою швидкодією, а ефективність його роботи не залежить від топології, параметрів та властивостей досліджуваної мережі й дозволяє мінімізувати втрати потужності в електричній мережі та максимізувати економічну ефективність встановлюваних джерел розосередженого генерування.

Формування вимог до методу. Основні вимоги до методу розв'язання задачі оптимального підключення джерел РГ (з врахуванням попередніх напрацювань [1, 9, 11, 17, 21]) сформульовані так.

1). **Багатокритеріальна постановка задачі.** Задача оптимального підключення джерел РГ є однією з першочергових, що мають бути враховані на етапі проектування ЕМ. Коректно вибрана точка підключення джерел РГ до мережі та потужність агрегатів можуть покращити роботу мережі та забезпечити додаткові економічні переваги як для споживачів, так і для постачальників електричної енергії [2, 3]. Ця задача є багатокритеріальною, оптимізаційною. У сучасних умовах вона ще більше ускладнюється, оскільки існує необхідність врахування не лише економічних інтересів постачальників та споживачів електричної енергії, а й можливих проблем, що виникають на рівні системного оператора при встановленні значних потужностей РГ. Тому може виникати необхідність врахування достатності запасу пропускної спроможності ліній, оцінки якості електричної енергії тощо.

2). **Універсальність застосовності методу.** Ефективність роботи методу не повинна залежати від топології, параметрів та властивостей досліджуваної мережі.

3). **Визначення граничної потужності джерел РГ.** Для підвищення ефективності процесу розв'язання задачі оптимального підключення джерел РГ необхідно визначити діапазон потужності кожного джерела РГ, що дозволить підключити джерело РГ до шини мережі без застосування додаткових пристроїв компенсації.

4). **Врахування ремонтно-аварійних схем роботи ЕМ.** Стан та топологія мережі не є постійними. Це необхідно враховувати при розв'язанні задачі оптимального підключення джерел РГ, оскільки зміна конфігурації мережі може значно вплинути на оптимальність отриманого розв'язку задачі.

5). **Врахування режимів роботи ВДЕ.** Відновлювані джерела енергії, наприклад, на відміну від газотурбінних установок, мають стохастичний характер роботи. Нехтування врахуванням режимів роботи ВДЕ може призвести до невірної практичного розв'язку задачі.

Зважаючи на обмежений обсяг статті, пункти 3-5 цих вимог більш детально не розкриваються, однак деякі з них розглянуто в роботах [11, 17].

Формування набору критеріїв та обмежень. З врахуванням вимог до методу та попереднього досвіду сформовано ряд критеріїв, за якими проводилася оцінка різних варіантів розв'язання задачі (табл. 1).

Таблиця 1

Критерії, за якими оцінюються різні варіанти розв'язання задачі оптимального підключення джерел РГ	
Назва	Характеристика
Втрати потужності в ЕМ ΔP	Джерела РГ безпосередньо впливають на втрати потужності в ЕМ, до якої вони приєднані. Цей критерій характеризує ефективність підключення джерел РГ з точки зору оператора електричної мережі
Тип джерела РГ	Різні типи джерел РГ мають різні робочі характеристики (сонячні, вітрові електростанції) Окрім цього різні типи генераторних установок мають різне регулювання реактивної потужності, різну вартість спорудження та виробленої електричної енергії
Підключення джерел РГ до ЕМ	Джерела РГ доцільно підключати до мережі класу напруги, який узгоджується з потужністю джерела. Інакше вартість підключення джерел РГ до мережі може значно зростати
Обмеження, які можуть бути використані при розв'язанні задачі оптимального підключення джерел РГ	
Назва	Характеристика
Відхилення напруги у вузлах ЕМ $ U - U_{ном} $	Режимні параметри ЕМ, до якої приєднані джерела РГ, не мають виходити за допустимі межі. Наприклад, значення напруги на шинах має знаходитися в діапазоні $0,9 \dots 1,1 U_{ном}$; обтяження елементів має бути $\leq 100\%$
Обтяження елементів ЕМ I_{max}	
Втрати потужності у мережі ΔP	Підключення джерел РГ в ЕМ не має призводити до збільшення втрат потужності. Це обмеження стає надзвичайно актуальним, якщо розв'язувати задачу, враховуючи лише економічні інтереси інвестора, як критерій оптимальності розв'язків. Інакше можливі випадки, коли оптимальні розв'язки задачі можуть давати результати зі значними втратами потужності в мережі

Формування цільової функції. Цільова функція (ЦФ) з врахуванням системи критеріїв та обмежень (табл. 1) сформована у вигляді

$$W^{(i)} = (\alpha_1 \cdot C_1^{(i)} + \alpha_2 \cdot C_2^{(i)}) \cdot D^{(i)}, \quad (1)$$

де (i) – i -й варіант розв'язання задачі оптимального підключення джерел РГ; α_1, α_2 – вагові коефіцієнти; C_1 – складова ЦФ, яка враховує особливості мереж; C_2 – складова ЦФ, яка враховує особливості джерел РГ; D – штрафна функція.

Складова C_1 описує зменшення втрат електроенергії та економію коштів при експлуатації мережі внаслідок застосування певного варіанта підключення джерел РГ

$$C_1^{(i)} = (\Delta P_\Sigma^0 - \Delta P_\Sigma^{(i)}) \cdot \tau_{\max} \cdot T_{e/e.em} \cdot \sum_{t=1}^{T_p} \left(\frac{1}{(1+E)^t} \right), \quad (2)$$

де ΔP_Σ^0 – втрати потужності у початковій схемі ЕМ до підключення джерел РГ, кВт; $\Delta P_\Sigma^{(i)}$ – втрати потужності при i -му варіанті підключення джерел РГ в ЕМ, кВт; τ_{\max} – час максимальних втрат, год/рік; $T_{e/e.em}$ – вартість електроенергії в мережі, грн/(кВт·год); T_p – тривалість розрахункового періоду, за роками; E – норма дисконтування.

Складова C_2 описує економічну ефективність застосування джерел РГ, тобто визначає доцільність вкладення коштів інвестором у джерела РГ

$$C_2^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^{N^{(i)}} (P_{PG,j}^{(i)} \cdot (k_{вук,j}^{(i)} \cdot T_{PG,j}^{(i)} \cdot 8760 - c_{об,j}^{(i)})) \cdot \sum_{t=1}^{T_p} \left(\frac{1}{(1+E)^t} \right) - \sum_{j=1}^{N^{(i)}} (P_{PG,j}^{(i)} \cdot c_{PG,j}^{(i)} \cdot k_{n,j}^{(i)})}{\sum_{j=1}^{N^{(i)}} P_{PG,j}^{(i)}}, \quad (3)$$

де N – кількість джерел РГ; $P_{PG,j}$ – встановлена потужність j -го джерела РГ, кВт; $k_{вук,j}$ – коефіцієнт використання встановленої потужності j -го джерела РГ; $T_{PG,j}$ – тариф на електроенергію, вироблену j -м джерелом РГ, грн/(кВт·год); $c_{об,j}$ – питома вартість обслуговування j -го джерела РГ, грн/кВт; $c_{PG,j}$ – питома вартість спорудження j -го джерела РГ, грн/кВт; $k_{n,j}$ – коефіцієнт підключення, який характеризує вартість підключення до ЕМ j -го джерела РГ. Вказаний коефіцієнт залежить, як правило, від встановленої потужності джерела РГ та класу напруги, на якій виконується підключення до ЕМ.

Штрафна функція D , що дозволяє враховувати порушення режимних обмежень, виглядає так:

$$D^{(i)} = d_U^{(i)} \cdot d_I^{(i)} \cdot d_{\Delta P}^{(i)}, \quad (4)$$

де $d_U, d_I, d_{\Delta P}$ – відповідно складові штрафної функції, що характеризують порушення заданих робочих діапазонів за напругою у вузлах мережі, за обтяженням елементів ЕМ (ліній, трансформаторів тощо) струмом, та обмеження на значні зростання сумарних втрат потужності в мережі. Значення складових штрафної функції з врахуванням проведених досліджень [9, 21] наведено в табл. 2.

Як відомо [19], з метою порівняння між собою різних величин проводиться їхнє стандартизування, яке для складових ЦФ виконується таким чином:

$$Z_k^{(i)} = \frac{C_k^{(i)} - \bar{C}_k}{S_k}, \quad (5)$$

де k – k -та складова ЦФ; $C_k^{(i)}$ – значення k -ї складової ЦФ i -го варіанта розв'язання задачі; \bar{C}_k – середнє значення k -ї складової; S_k – стандартне відхилення k -ї складової ЦФ. Після стандартизування ЦФ матиме вигляд

$$W^{(i)} = (\alpha_1 \cdot Z_1^{(i)} + \alpha_2 \cdot Z_2^{(i)}) \cdot D^{(i)}, \quad (6)$$

де Z_1 – стандартизована складова ЦФ, що враховує особливості мережі; Z_2 – стандартизована складова ЦФ, яка враховує особливості джерел РГ.

Вагові коефіцієнти складових цільової функції, як правило, визначаються експертним методом. Було проведено попередні дослідження зміни співвідношення між α_1 та α_2 з кроком 0,01 та визначено значення вагових коефіцієнтів для трьох основних підходів до розв'язання задачі визначення оптимальних місць підключення джерел РГ:

1 — враховуються лише інтереси мережі (системного оператора): $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0$;

Таблиця 2

Діапазон	$ U - U_{ном} $, в. о.	I_{max} , в. о.	ΔP , в. о.	$d_U, d_I,$ $d_{\Delta P}$, в. о.
I	$\leq 0,1$	$\leq 1,1$	$\leq 1,1$	1,0
II	$\leq 0,2$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	0,8
III	—	—	$\leq 2,0$	0,5
IV	$> 0,2$	$> 1,5$	$> 2,0$	0,1

2 — враховуються лише інтереси інвестора, що збирається побудувати електростанцію на базі ВДЕ: $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 1$;

3 — компромісний варіант, коли враховуються інтереси як мережі, так і інвесторів. Через те, що значення Z_1 та Z_2 мають різний характер, то для збалансованого їхнього врахування були запропоновані такі значення вагових коефіцієнтів: $\alpha_1 = 0,31, \alpha_2 = 0,69$.

Таким чином, сформована цільова функція є досить універсальною та дає змогу порівняти різні варіанти підключення джерел РГ в ЕМ з врахуванням як різних техніко-економічних характеристик, так і різних цілей розв'язання задачі. Чим більше значення цільової функції, тим кращим є відповідний варіант підключення джерел РГ певних потужності та типу в ЕМ.

Опис розробленого методу. З врахуванням попередніх напрацювань [5] та встановлених вимог розроблено метод розв'язання задачі оптимального підключення джерел РГ. Він поєднує механізми еволюційних алгоритмів, що показали свою ефективність при розв'язанні оптимізаційних задач [5], та методику звуження простору пошуку. Таке поєднання дозволяє значно підвищити ефективність методу та зменшити вплив властивостей мережі на роботу методу.

Розв'язок цієї задачі полягає у визначенні комбінації системних шин в електромережі, до яких можуть бути підключені джерела РГ, та величин їхніх потужностей. Весь простір пошуку розв'язків — це сукупності комбінацій шин мережі та відповідних діапазонів потужності РГ, поєднання яких утворює усі можливі варіанти рішення цієї задачі.

Базові підходи до підвищення ефективності процесу розв'язання задачі розглядалися в [1]. Одним із таких підходів є зменшення кількості можливих розв'язків задачі. Це дозволяє зменшити кількість необхідних випробувань методу Монте-Карло, але змушує встановлювати певні допущення, які призведуть до зниження точності розв'язку задачі. Погіршення точності можна уникнути, зменшуючи кількість можливих розв'язків задачі за певними критеріями та зберігаючи найкращі розв'язки (визначаються значенням цільової функції — чим більше значення ЦФ, тим кращим є певний розв'язок) задачі. Оскільки розв'язок — це, зокрема, й комбінація шин, то відповідно зберігаються й «найкращі» шини. Таким чином, суть роботи методу полягає у звуженні від ітерації до ітерації «популярності» шин, які використовуються для формування можливих розв'язків задачі (рис. 1), та у «еволюційному виживанні» шин, на яких базуються найкращі розв'язки, між різними популяціями. Звуження простору пошуку схоже на природний відбір живих організмів — найменш пристосовані особини популяції відкидаються та не беруть подальшої участі в еволюції виду. За такими самими принципами відбувається звуження простору пошуку — уточнюються діапазони потужності та відкидаються шини ЕМ, які утворюють найменш ефективні розв'язки задачі, а найкращі шини зберігаються та беруть участь у подальших розрахунках.

У роботі розробленого методу можна виділити два етапи.

На *першому етапі* створюється початкова вибірка — сукупність шин ЕМ та діапазонів потужності джерел РГ, що отримуються внаслідок експертного обмеження всього простору пошуку — усіх шин ЕМ та невизначених діапазонів потужності джерел РГ — за певними евристичними правилами. Так, на першому етапі заздалегідь відкидаються шини та певні значення потужності джерел РГ, які можуть призвести до виникнення очевидно неефективних варіантів підключення джерел РГ у мережі.

Створення початкової вибірки починається з формування набору шин, які відбираються за результатами двох незалежних розрахунків (рис. 2).

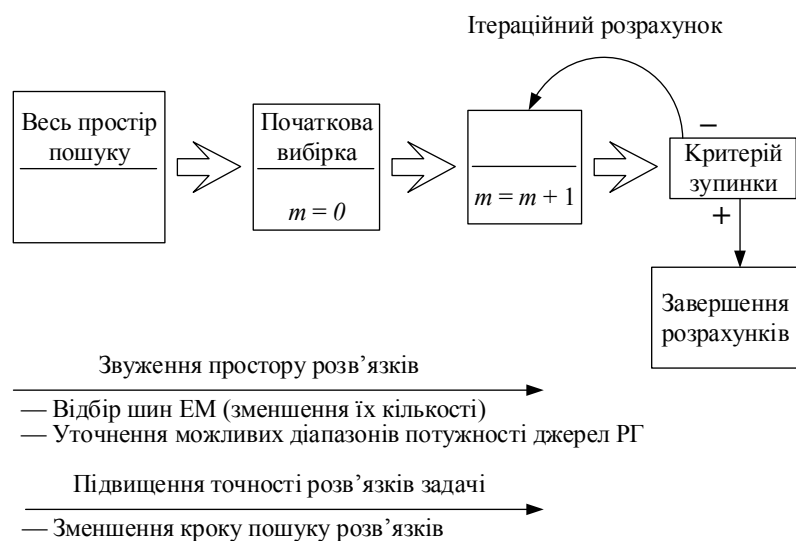


Рис. 1

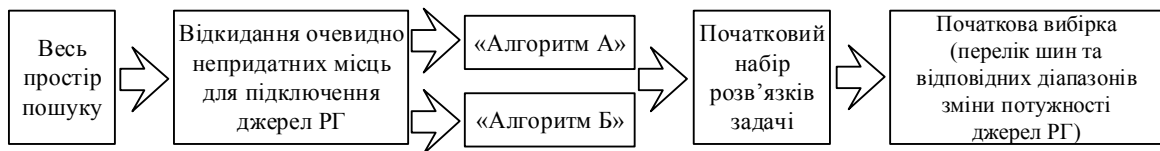


Рис. 2

Метою розрахунку за алгоритмом *A* є пошук шин, які беруть участь у найкращих розв'язках задачі при підключенні одного джерела РГ в ЕМ. Також за алгоритмом *A* визначається оптимальна потужність джерела РГ P_b^{\max} для кожної b -ї шини, якщо одне джерело РГ підключати саме до цієї шини. Визначена таким чином потужність P_b^{\max} буде використовуватися як обмеження діапазону допустимої потужності джерел РГ. Як було встановлено у ході попередніх досліджень, зокрема [9, 11, 13], оптимальний рівень впровадження (відношення сумарної потужності джерел РГ до сумарного навантаження мережі) зростає при збільшенні кількості джерел РГ в ЕМ, але при цьому потужність кожного окремого джерела РГ знижується.

Метою розрахунку за алгоритмом *B* є пошук шин, які з найбільшою ймовірністю будуть брати участь у найкращих розв'язках задачі при підключенні заданого числа N джерел РГ в ЕМ. Для цього проводиться певна кількість N_c випробувань методом Монте-Карло. Потужність джерел РГ P_{PG} може набувати певного значення, що визначається критерієм K_2 [11]. Критерій K_2 дає змогу з технічної точки зору визначити таку потужність джерела РГ, яку можна підключити до шини ЕМ без застосування додаткових засобів компенсації.

За результатами розрахунків за алгоритмами *A* та *B* формується набір шин початкової вибірки, до якого входить основна частка шин, що беруть участь у розрахунках. Запропоновано встановити цю частку на рівні 0,75 від загальної кількості шин. Більша частка негативно вплине на збіжність ітераційного розрахунку, менша – збільшує ризик втрати тих шин, що входять до найкращого розв'язку задачі. Певна кількість шин до початкової вибірки відбирається на підставі результатів розрахунків за алгоритмом *A*, решта — за алгоритмом *B*.

Необхідність проведення розрахунків за обома алгоритмами обумовлена наступним:

- найкращі розв'язки задачі для різної кількості джерел РГ зазвичай є схожими [9, 21], тому виконується пошук оптимальних місця підключення та потужності одного джерела РГ (алгоритм *A*);
- інколи найкраще місце підключення одного джерела РГ вже не є найкращим при підключенні декількох джерел РГ в ЕМ [17]; аби не втратити шини, що можуть входити до найкращих розв'язків задачі при підключенні в ЕМ декількох джерел РГ, виконується наближений пошук оптимальних місць підключення заданого числа N джерел РГ (алгоритм *B*).

Таким чином, початкова вибірка охоплює 0,75 від загальної кількості шин ЕМ, що брали участь у розрахунках за алгоритмами *A* та *B*, а також діапазони потужності джерел РГ на кожній шині b , що задаються дискретно двома можливими значеннями потужності $P_{b,\min}$ та $P_{b,\max}$. При цьому $P_{b,\max} = P_b^{\max}$, що було визначено під час розрахунку за алгоритмом *A*, а $P_{b,\min} = P_{b,\max} / N$.

На другому етапі роботи методу відбуваються еволюційне уточнення та звуження області пошуку. Крок за кроком зменшується перелік шин, до яких можуть бути підключені джерела РГ, та уточнюються можливі діапазони потужностей джерел, які використовуються для пошуку найкращого варіанта підключення джерел РГ у мережі. Завершення розрахунків відбувається, коли найкращий розв'язок задачі не змінюється протягом двох ітерацій.

Уточнення області пошуку найкращого розв'язку починається з проведення розрахунків за обмеженнями початкової вибірки (рис. 3) – нульова ($m = 0$) ітерація. Для цього проводиться певна кількість N_c випробувань методом Монте-Карло. Кількість можливих значень R потужності джерел РГ у діапазоні від $P_{b,\min}$ до $P_{b,\max}$ дорівнює двом (рис. 3). Верхні $P_{b,\max}$ та нижні $P_{b,\min}$ границі діапазонів потужності визначені на першому етапі.

Обсяг кожної наступної популяції зменшується та становить 0,75 від обсягу попередньої популяції, поки не досягне заданого мінімуму. До m -ї популяції входять 80% шин з попередньої ($m - 1$) популяції та 20% – з популяції ($m - 2$). Такий підхід дає змогу уникнути помилкового відкидання «найкращих» шин. Також захистом від помилкового відкидання оптимальних варіантів є збереження певної кількості найкращих варіантів розв'язання задачі на кожній ітерації.

Далі виконується уточнення діапазонів потужності джерел РГ. Для цього, наприклад, з 1-2% від кількості найкращих варіантів підключення джерел РГ розраховується середнє значення потуж-

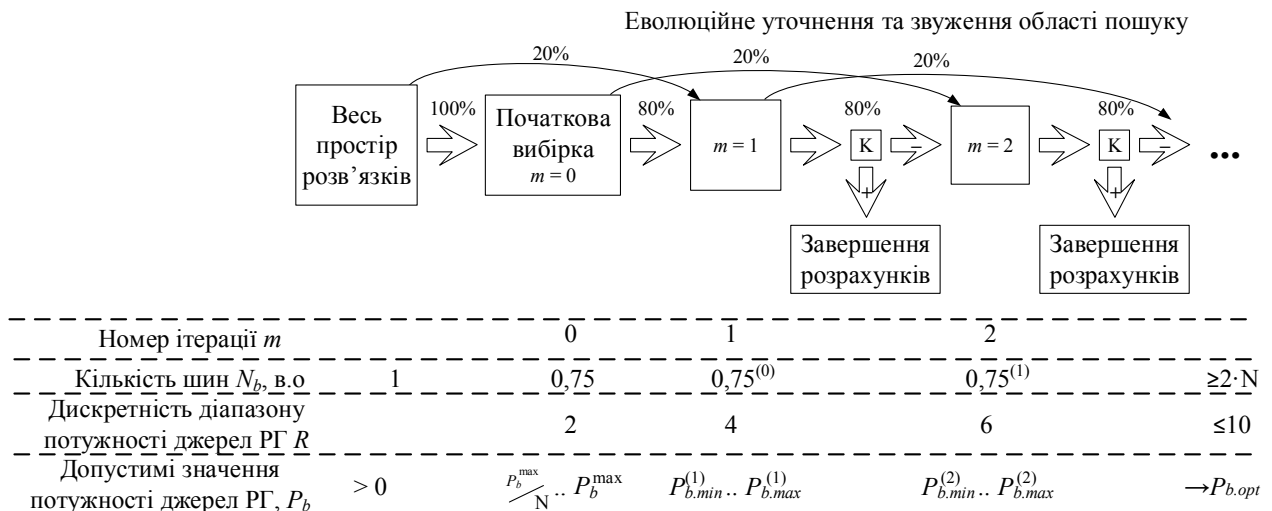


Рис. 3

ності $P'_{av,b}$ b -ї шини, яке порівнюється з середнім значенням потужності $P_{av,b}$ діапазону, що використовувався у розрахунку

$$k_{av,b} = P'_{av,b} / P_{av,b} \quad (7)$$

Діапазони потужності від $P_{b,\min}$ до $P_{b,\max}$ b -ї шини коригуються з урахуванням коефіцієнта (7):

$$P'_{b,\min} = P_{b,\min} \cdot k_{av}, \quad P'_{b,\max} = P_{b,\max} \cdot k_{av}$$

Після кожної наступної ітерації перевіряється критерій завершення розрахунку (позначено літерою К на рис. 3): якщо найкращий розв'язок не змінюється протягом двох ітерацій, то вважається, що досягнуто глобального оптимуму і розрахунки можна припинити. На кожній ітерації кількість значень R , які може приймати потужність джерела РГ P_b у діапазоні від $P_{b,\min}$ до $P_{b,\max}$, збільшується. Так, на m -й ітерації $R = (m + 1) \cdot 2$. Таким чином зростає точність розв'язків. Максимальне значення дискретності R обмежено на рівні десяти, що обумовлено достатньою точністю розв'язків при якомог меншому зростанні кількості можливих розв'язків.

Результати розрахунково-модельних випробувань. Розрахунки виконувалися на відомих дослідних 9-, 14-, 39- та 57-шинній ЕМ IEEE. Для проведення досліджень розроблено додатки до програмного забезпечення DIgSILENT PowerFactory [10]. Зважаючи на обмежений обсяг статті, результати розрахунків представлені лише для випадку підключення двох джерел РГ до мережі IEEE 9 (рис. 4). У табл. 3 для довідки наведено потужності навантаження та генерування (зі знаком «мінус») вузлів мережі.

По два найкращих варіанти розв'язання задачі з різних точок зору – мережі, інвестора та компромісної – наведено в табл. 4, з якої видно, що з точки зору мережі найкращим варіантом є підключення джерел РГ сумарною потужністю 88 МВт на певних шинах, що дає змогу зменшити втрати потужності в мережі на 11%, проте з точки зору інвестора такий варіант є надзвичайно неефективним. При врахуванні лише інтересів інвестора необхідно підключити джерела РГ сумарною потужністю 280 МВт у цю мережу, однак при цьому втрати потужності зростають на 10,8%. Розв'язком задачі, де враховані інтереси обох сторін, є підключення в мережі джерел РГ сумарною потужністю 174 МВт, що, з одного боку, знизить втрати потужності в ЕМ на 4,25%, а з іншого – термін окупності такого варіанта не значно відрізняється від найприбутковішого.

Таблиця 3

Вузол мережі	Потужність, МВт
1	Балансувальний
2	-163
3	-85
4, 7, 9	—
5	125
6	90
8	100

У табл. 5 наведено порівняння ефективності роботи розробленого методу для різних ЕМ. Кількісною оцінкою (8) ефективності роботи методу є відношення різниці кількості існуючих варіантів розв'язання задачі $N_{\text{всїх}}$ та кількості випробувань $N_{\text{розр}}$, які необхідно виконати для знаходження оптимального розв'язку задачі, до кількості існуючих варіантів. У табл. 5 також наведено орієнтовні тривалості розрахунків за запропонованим стохастичним методом $T_{\text{запр}}$ та для повного перебору варіантів $T_{\text{повн}}$.

Кількісна оцінка ефективності k_{ef} роботи методу

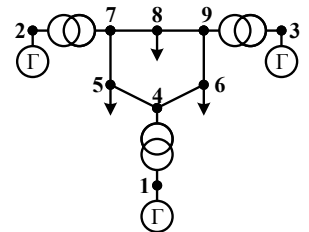


Рис. 4

$$k_{\text{эф}} = 1 - \frac{N_{\text{розр}}}{N_{\text{всіх}}} \times 100\% \quad (8)$$

Як можна побачити з табл. 5, запропонований метод має високу швидкодію, а ефективність його роботи є високою для більшості розглянутих схем. Отже, ефективність роботи нового методу не залежить від властивостей мережі, а вимоги до методу були виконані у повному обсязі.

Висновки. Для оптимального підключення джерел розосередженого генерування в електричних мережах запропоновано стохастичний метод у поєднанні з механізмами еволюційних алгоритмів, який дає змогу мінімізувати втрати потужності в електричних мережах та максимізувати економічну ефективність встановлених джерел розосередженого генерування, враховуючи особливості електричних мереж України. Представлений метод відрізняється високою швидкодією, а ефективність його роботи не залежить від топології, параметрів та властивостей досліджуваної мережі, що підтверджується результатами розрахунково-модельних випробувань на відомих дослідницьких мережах IEEE.

Таблиця 4

Тип розв'язку, оптимальний для	Характеристика розв'язку				
	Загальна потужність, МВт	Місце (шина) підключення, потужність (МВт) та тип джерел РГ	ΔP	Термін окупності, років	W
мережі (підхід-1)	88	Bus 5 52 BEC Bus 6 36 BEC	- 11,0%	> 35	1,156
	82	Bus 4 30 BEC Bus 5 52 BEC	- 6,63%	> 35	1,081
інвестора (підхід-2)	280	Bus 4 150 BEC Bus 5 130 BEC	+ 10,8%	12,6	1,374
	270	Bus 4 150 BEC Bus 6 120 BEC	+ 17,1%	12,8	1,370
компроміс (підхід-3)	174	Bus 4 150 BEC Bus 6 24 BEC	- 4,25%	13,8	1,247
	176	Bus 4 150 BEC Bus 5 26 BEC	- 4,18%	13,9	1,245

Таблиця 5

ЕМ	N джерел РГ	$k_{\text{эф}}, \%$		$T_{\text{запр}}$	$N_{\text{всіх}} \text{ при } R = 10$	$T_{\text{повн}}$
		метод на базі Монте-Карло [9]	запропонований стохастичний метод			
IEEE 9	2	39,30%	93,53%	3 с	11 200	45 с
	3	95,31%	99,84%	4 с	448 000	35 хв
	4	—	>99,99%	< 1 с	11 200 000	18 год
IEEE14	2	95,83%	79,60%	30 с	26 400	140 с
	3	—	96,58%	6 хв	1 760 000	175 хв
	4	—	99,76%	22 хв	79 200 000	150 год
IEEE 39	2	25,00%	76,60%	20 хв	281 200	85 хв
	3	—	99,48%	110 хв	67 488 000	350 год
	4	—	>99,99%	50 хв	11 810 400 000	7,2 років
IEEE 57	2	0%	81,40%	25 хв	616 000	135 хв
	3	—	99,91%	45 хв	221 760 000	840 год
	4	—	>99,99%	40 хв	58 766 400 000	27 років

1. Гончаренко І.С. Окремі питання підвищення ефективності методу розв'язання задачі визначення оптимальних місць встановлення та потужності розосередженої генерації // Праці Інституту електродинаміки Національної академії Наук України. – 2015. – № 42. – С. 47-51.
2. Ерошенко С.А., Дмитриев С.А., Кузнецов Д.В., Кокин С.Е., Паздерин А.В. Вопросы размещения источников распределенной генерации в электрических сетях мегаполисов // Вестник Самарского государственного технического университета. – 2011. – № 4. – С. 126-134.
3. Ерошенко С.А., Карпенко А.А., Паздерин А.В. Выбор оптимальной мощности и местоположения источника распределенной генерации в сети // Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды всероссийской научно-технической конференции: сборник статей. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – С. 170-175.
4. Кирик В.В., Губатюк О.С. Оптимізація методу пошуку розташування джерел розподіленої потужності // Науковий вісник Академії муніципального управління. Серія «Техніка». – 2015. – № 2 (10). – С. 67-74.
5. Кириленко О.В., Буткевич О.Ф., Лук'яненко Л.М. Розв'язання на базі генетичних алгоритмів задачі відновлення електроживлення аварійно знеструмлених споживачів // Техн. електродинаміка. Тематичний випуск. "Силова електроніка та енергоефективність". – 2009. – Ч. 1. – С. 55-60.
6. Кириленко О.В., Павловський В.В., Лук'яненко Л.М. Технічні аспекти впровадження джерел розподільної генерації в електричних мережах // Техн. електродинаміка. – 2011. – № 1. – С. 46-53.
7. Кириленко О.В., Павловський В.В., Лук'яненко Л.М., Трач І.В. Основні проблеми інтеграції відновлюваних джерел електроенергії в «слабкі» мережі // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 3. – С. 25-26.

8. Лежнюк П.Д., Ковальчук А.А., Кулик В.В., Собчук Д.С. Оптимизация схем присоединения рассредоточенных источников энергии к электрическим сетям на основе анализа чувствительности // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов. Сборник трудов. – 2013. – С. 102-105.
9. Лук'яненко Л.М., Гончаренко І.С., Блонська О.В. Визначення оптимальних місць встановлення та величин потужності відновлюваних джерел енергії // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2014. – № 37. – С. 26-33.
10. Офіційна мережева сторінка компанії DIgSILENT – розробника ПЗ PowerFactory. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://digsilent.de/>
11. Павловський В.В., Лук'яненко Л.М., Гончаренко І.С., Захаров А.М. Обмеження потужності відновлюваних джерел енергії за умовами приєднання до електричної мережі // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2016. – № 43. – С. 18-23.
12. Праховник А.В., Попов В.А., Кулик О.В. Модель інтеграції децентралізованої генерації в енергетичну систему на найнижчому рівні ієрархії управління // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2006. – № 1. – С. 101-109.
13. Akorede M.F., Hizam H., Aris I., Ab Kadir M.Z.A. A Review of Strategies for Optimal Placement of Distributed Generation in Power Distribution Systems // Research Journal of Applied Sciences. – 2010. – No 5 (2). – Pp. 137-145.
14. Aref A., Davoudi M, Seifi A., Ganjkhany I., id Davoudi M. Particle Swarm Optimization Based Method for Optimal Placement and Estimation of DG Capacity in Distribution Networks // International Journal of Science and Technology. – 2012. – Vol. 2. – No 7. – Pp. 486-491.
15. Atwa Y.M., El-Saadany E.F., Salama M.M.A., Seethapath R. Optimal Renewable Resources Mix for Distribution System Energy Loss Minimization // IEEE Transactions on Power Systems. – 2010. – Vol. 25. – No. 1. – P. 360-370.
16. Energy from renewable sources. Eurostat. Режим доступу: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_from_renewable_sources.
17. Goncharenko I.S. Distributed generation optimal placement. Climatic pattern consideration // Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS-2016). – 2016. – Pp. 93-96.
18. Harrison G.P., Piccolo A., Siano P., Wallace A.R. Exploring the Tradeoffs Between Incentives for Distributed Generation Developers and DNOs // IEEE Transactions on Power Systems. – 2007. – Vol. 22. – No 2. – Pp. 821-828.
19. Johnson R.A., Wichern D.W. Applied Multivariate Statistical Analysis. – Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2007. – 773 p.
20. Lezhniuk P.D., Komar V.A., Sobchuk D.S. Method for Determination of Optimal Installed Capacity of Renewable Sources of Energy by the Criterion of Minimum Losses of Active Power in Distribution System // Energy and Power Engineering. – 2014. – No 6. – Pp. 37-46.
21. Lukianenko L.M., Goncharenko I.S., Blonska O.V. Determination of the Optimal Placement and Capacity of Distributed Generation // Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS-2014). – 2014. – Pp. 159-162.
22. Safari A., Jahani R., Shayanfar H.A., Olamaei J. Optimal DG Allocation in Distribution Network // International Journal of Electrical and Electronics Engineering. – 2010. – Vol. 8. – No 4. – Pp. 550-553.

УДК 621.311

СТОХАСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ МЕСТ ПОДКЛЮЧЕНИЯ И МОЩНОСТИ ИСТОЧНИКОВ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

А.В. Кириленко, академик НАН Украины, Л.Н. Лукьяненко, канд.техн.наук, И.С. Гончаренко
Институт электродинамике НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина. Е-mail: okiraa@gmail.com

Преимущества распределённой генерации над централизованной генерацией обуславливают активное внедрение источников распределённой генерации в структуру генерации энергосистем развитых стран мира. Однако неоптимальное внедрение источников распределённой генерации может ухудшить параметры установившегося режима электрических сетей. В предыдущих работах [1, 9, 11, 17, 21] был разработан метод для решения задачи оптимального подключения источников распределённой генерации, но оказалось, что указанный метод имеет ограниченную область применения. Целью настоящей работы является разработка нового метода решения задачи определения оптимальных мест подключения и мощности источников распределённой генерации. Предложенный стохастический метод сочетает в себе механизмы эволюционных алгоритмов. Суть работы нового метода заключается в постепенном сужении пространства возможных решений задачи. Результаты расчетно-модельных испытаний показали высокую скорость работы нового метода и что эффективность метода не зависит от свойств исследуемой сети. Библ. 22, рис. 4, табл. 5.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, метод Монте-Карло, оптимизация, распределённая генерация, эволюционные алгоритмы.

STOCHASTIC APPROACH TO DETERMINATION OF THE DISTRIBUTED GENERATION OPTIMAL PLACEMENT

O.V. Kyrylenko, L.M. Lukianenko, I.S. Goncharenko
The Institute of Electrodynamics of The National Academy of Sciences of Ukraine.
Peremohy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine. Е-mail: okiraa@gmail.com

Constant growth of distributed generation in power systems has not only positive changes. Incorrect placement of distributed generation can worsen steady-state parameters of a power grid, for example, voltage profile. Method for optimal distributed

generation placement had been developed previously [1, 9, 11, 17, 21]. Examination of the method shown that method had limited usage. Performance of the method greatly depended on power grid. The object of this paper was to develop a new method for optimal distributed generation placement. The object of the paper was reached in four steps: 1) optimal distributed generation placement method requirements creation; 2) development of the criteria and constraints system; 3) objective function formulation; 4) optimal distributed generation placement method development. The proposed stochastic method is combined of mechanisms of evolutionary algorithms. The core idea of the new method is an evolutionary narrowing of power grid buses list, which form all the possible solutions to the problem. Thus, the buses, which form the worst solutions, are banned and do not take part in evolutionary selection of the buses. Examination of the method has been carried out on the IEEE 9-, 14-, 39- and 57-bus test systems. The results of simulation tests show that the effectiveness of the new method is high and does not depend on the properties of the studied grids. References 22, figures 4, tables 5.

Key words: distributed generation, Monte-Carlo method, optimization, renewable energy sources, evolutionary algorithm.

1. *Goncharenko I.S.* Some Problems of the Efficiency Improvement of the Method for Determination of the Optimal Placement and Capacity of Distributed Generation // Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2015. – No 42. – Pp. 47-51. (Ukr)
2. *Yeroshenko S.A., Dmitriiev S.A., Kuznetsov D.V., Kokin S.E., Pazdierin A.V.* Problems of Distributed Generation Placement in Megacities // Vestnik Samarskogo gosudarsvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2011. – No 4. – Pp. 126-134. (Rus)
3. *Yeroshenko S.A., Karpienko A.A., Pazdierin A.V.* Determination of Optimal Capacity and Allocation of Distributed Generation in the Power Grid // Elektrotehnika glazami molodezhi: nauchnye trudy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. – Yekaterinburg: UrFU, 2010. – Pp. 170-175. (Rus)
4. *Кырык V.V., Gubatyyk O.S.* Optimization of the Search Method of the Distributed Generation // Naukovyi Visnyk Akademii munitsipalnoho upravlinnia. Seriya "Tekhnika". – 2015. – No 2 (10). – Pp. 67-74. (Ukr)
5. *Kyrylenko O.V., Butkevych O.F., Lukianenko L.M.* Power Supply of Disconnected Due to Fault Consumers Restoration Problem Solution Based on Genetic Algorithms // Tekhnichna Elektrodynamika. Tematychnyi vypusk "Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist". – 2009. – Vol. 1. – Pp. 55-60. (Ukr)
6. *Kyrylenko O.V., Pavlovskiy V.V., Lukianenko L.M.* Technical Aspects of Adoption of Distributed Generation Sources // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2011. – No 1. – Pp. 46-53. (Ukr)
7. *Kyrylenko O., Pavlovskiy V., Lukianenko L., Trach I.* The Problem of Integration of Renewable Source of Energy into the "Weak" Electrical Networks // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2012. – No 3. – Pp. 25-26. (Ukr)
8. *Lezhniuk P.D., Kovalchuk A.A., Kulyk V.V., Sobchuk D.S.* Optimization of the dispersed energy sources connection schemes to the power grids based on sensitivity analysis // Energetika: upravlenie, kachestvo i effektivnost ispolzovaniia energoresursov. Sbornik trudov. – 2013. – Pp. 102-105. (Rus)
9. *Lukianenko L.M., Goncharenko I.S., Blonska O.V.* Determination of the Optimal Placement and Capacity of Distributed Generation // Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2014. – No 37. – Pp. 26-33. (Ukr)
10. Official web page of DIGSILENT – the developer of PowerFactory. – Access mode: <http://digsilent.de/> (accessed 14.11.2016)
11. *Pavlovskiy V.V., Lukianenko L.M., Goncharenko I.S., Zaharov A.M.* Limitation of RES Power Under the Terms of Connection to Electric Network // Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2016. – No 43. – Pp. 18-23. (Ukr)
12. *Prakhovnyk A.V., Popov V.A., Kulyk O.V.* Model of decentralized generation integration into power system on the lowest level of control hierarchy // Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia. – 2006. – No 1. – Pp. 101-109. (Ukr)
13. *Akorede M.F., Hizam H., Aris I., Ab Kadir M.Z.A.* A Review of Strategies for Optimal Placement of Distributed Generation in Power Distribution Systems // Research Journal of Applied Sciences. – 2010. – No 5 (2). – Pp. 137-145.
14. *Aref A., Davoudi M, Seifi A., Ganjkhany I., id Davoudi M.* Particle Swarm Optimization Based Method for Optimal Placement and Estimation of DG Capacity in Distribution Networks // International Journal of Science and Technology. – 2012. – Vol. 2. – No 7. – Pp. 486-491.
15. *Atwa Y.M., El-Saadany E.F., Salama M.M.A., Seethapathe R.* Optimal Renewable Resources Mix for Distribution System Energy Loss Minimization // IEEE Transactions on Power Systems. – 2010. – Vol. 25. – No. 1. – P. 360-370.
16. Energy from renewable sources. Eurostat. Режим доступа: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_from_renewable_sources.
17. *Goncharenko I.S.* Distributed generation optimal placement. Climatic pattern consideration // Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS-2016). – 2016. – Pp. 93-96.
18. *Harrison G.P., Piccolo A., Siano P., Wallace A.R.* Exploring the Tradeoffs Between Incentives for Distributed Generation Developers and DNOs // IEEE Transactions on Power Systems. – 2007. – Vol. 22. – No 2. – Pp. 821-828.
19. *Johnson R.A., Wichern D.W.* Applied Multivariate Statistical Analysis. – Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2007. – 773 p.
20. *Lezhniuk P.D., Komar V.A., Sobchuk D.S.* Method for Determination of Optimal Installed Capacity of Renewable Sources of Energy by the Criterion of Minimum Losses of Active Power in Distribution System // Energy and Power Engineering. – 2014. – No 6. – Pp. 37-46.
21. *Lukianenko L.M., Goncharenko I.S., Blonska O.V.* Determination of the Optimal Placement and Capacity of Distributed Generation // Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS-2014). – 2014. – Pp. 159-162.
22. *Safari A., Jahani R., Shayanfar H.A., Olamaei J.* Optimal DG Allocation in Distribution Network // International Journal of Electrical and Electronics Engineering. – 2010. – Vol. 8. – No 4. – Pp. 550-553.

Надійшла 17.11.2016

Остаточний варіант 03.01.2017