

**Самойлик О.В.**

Черкаський державний технологічний університет

**Ткаченко В.Ф.**

Черкаський державний технологічний університет

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ У СКЛАДІ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ

*Проведений аналіз базових тенденцій під час використання малої розподіленої генерації показав, що застосування її із боку споживачів електроенергії у складі електротехнічного комплексу має низку позитивних ефектів і є своєрідним трендом, обумовленим, зокрема, актуальним нормативно-правовим середовищем. Установлено, що існує певний «дефіцит» науково обґрунтованих підходів (методів, процедур і правил) до визначення фізично обґрунтованих характеристик енергоблоків РГ у складі електротехнічного комплексу із розподіленою генерацією та ефективною топологією такого ЕТК. У роботі розглянуто алгоритм оптимізації параметрів РГ на етапі проєктування окремого електротехнічного комплексу та об'єднання декількох ЕТК на основі РГ в єдину електричну мережу із забезпеченням оптимальної топології отриманої електричної мережі.*

*На основі залежностей, що характеризують вплив параметрів і структури електротехнічних комплексів із розподіленими джерелами енергії на показники режиму роботи розподільної мережі, запропоновано цільову функцію оптимізації цих параметрів і структури. Запропоновано методичку параметричної оптимізації ЕТК із РГ щодо визначення фізично обґрунтованих характеристик енергоблоків, яка містить три етапи: формування вихідних даних, визначення граничних потужностей енергоблоку, прямий відбір (оптимізація). Проаналізовано ефективність об'єднання декількох електротехнічних комплексів на основі малої розподіленої генерації в єдину електричну мережу із забезпеченням оптимальної топології отриманої електричної мережі. Особливістю такого технологічного об'єднання є додаткова «опція», яка полягає у солідарному покритті навантаження за рахунок організації, зокрема, додаткових ліній електропередачі. Розглянуто імовірне об'єднання на прикладі групи раніше незалежних електротехнічних комплексів на основі малої розподіленої генерації. Ідеологія формування «технологічного об'єднання» наявних ЕТК спрямована на підвищення ефективності електропостачання за рахунок максимального використання усього потенціалу розподіленої генерації.*

**Ключові слова:** розподілена генерація, оптимізація, енергоблок, моделювання, електрична потужність.

**Постановка проблеми.** Одним із напрямів модернізації вітчизняної електроенергетики є активне впровадження малої розподіленої генерації (РГ), зокрема на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Використання розподільної генерації із боку споживачів електроенергії у складі електротехнічного комплексу (ЕТК) має низку загальновідомих позитивних ефектів [1, с. 1] і є своєрідним трендом, обумовленим, зокрема, актуальним нормативно-правовим середовищем. Але недослідженість питань визначення комплексного підходу до вибору фізично обґрунтованих характеристик енергоблоків РГ і їх оптимального застосування у складі ЕТК, відсутність типових алгоритмів визначення структури і топології таких комплексів, істотно невелика методична пропрацьованість і обмеженість застосування багатьох формалізованих підходів

ускладнює можливість ефективно використовувати всі переваги розподільної генерації. Тому актуальним є комплексний підхід до визначення оптимальних характеристик блоків розподільної генерації і вибору ефективною топологією можливого технологічного об'єднання (ТО) декількох ЕТК на базі РГ в єдину електричну мережу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз базових тенденцій у роботах [2, с. 54-56; 3, с. 24-26; 4, с. 75-66 ] показав, що більшість досліджень висвітлюють питання оптимізації таких параметрів РГ, як довгострокове планування розвитку; зменшення втрат під час передачі і розподілення електроенергії шляхом певної локалізації; раціональне планування розміщення генерації у вузлах енергосистеми; підвищення стійкості, збереження і поліпшення параметрів якості електроенергії; оптимальний розподіл активного і

реактивного навантаження електричних мереж між відновлювальними джерелами електроенергії. Такий підхід застосовується зазвичай під час розгляду оптимізації переважно зовнішніх розподільних електропостачальних компаній.

Водночас існує певний «дефіцит» науково обґрунтованих підходів (методів, процедур і правил) до визначення фізично обґрунтованих характеристик енергоблоків РГ у складі електротехнічного комплексу із розподіленою генерацією та ефективною топологією такого ЕТК.

Надалі ми будемо керуватися концепцією «внутрішнього» підходу до реалізації РГ в електрогосподарстві споживача. Отже, вихідною базою для побудови зазначеного підходу є процеси і параметри, які спостерігаються у системі внутрішнього електропостачання споживачів.

**Постановка завдання.** Мета роботи – розроблення методики параметричної оптимізації засобів розподіленої генерації у складі локальних електротехнічних комплексів та оцінювання доцільності, ефективною топологією можливого технологічного об'єднання декількох ЕТК на основі РГ в єдину електричну мережу.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Поставлена мета роботи має два зазначених складники, що дозволяє аргументовано застосувати запропонований нижче дворівневий підхід, а саме: на першому рівні розглянемо алгоритм оптимізації параметрів РГ на етапі проектування окремого електротехнічного комплексу, на другому – об'єднання декількох ЕТК на основі РГ в єдину електричну мережу із забезпеченням оптимальної топології отриманої електричної мережі. Це дозволяє коректно означити шляхи визначення оптимізації засобів РГ у складі локальних ЕТК та розглянути допустимість та ефективність технологічного об'єднання окремих ЕТК на базі РГ в єдину електричну мережу за типом «віртуальної електростанції».

*Перший рівень.* Під час побудови методики оптимізації параметрів РГ ми розділимо алгоритм рішення на три етапи: формування вихідних даних; визначення граничних потужностей енергоблоку; безпосередній відбір (оптимізація). Відзначимо, що водночас кожен запропонований етап може бути адаптований під умови конкретного завдання; є можливість його практичного здійснення для неоднорідних задач різного ступеня складності і комплексності поставлених цілей.

Метою першого етапу є збір первинної інформації про об'єкт дослідження і технологічні можливості здійснення завдання, отже, він утворює

передпроектну стадію роботи. Далі відбувається розв'язання задачі; цей процес навмисно розділено на три послідовні етапи. Розглядаючи оптимізацію РГ як комплексний процес, доцільно виділити у ньому окремими стадіями алгоритми структурної і параметричної оптимізації.

Параметрична оптимізація полягає у визначенні номінальних параметрів елементів системи. Метою параметричної оптимізації нашої задачі стане визначення фізично обґрунтованих характеристик енергоблоків стосовно розв'язання завдань можливості і допустимості здійснення запланованих варіантів. Структурна оптимізація спрямована, з одного боку, на вибір оптимальної топології і режиму функціонування систем, із другого – на досягнення максимального техніко-економічного ефекту.

Надалі ми опишемо поетапний алгоритм оптимізації.

Етап I – формування первинних вихідних даних. На першому етапі відбувається запис бази вихідних даних для оптимізації параметрів енергоблоків і навантаження. Із математичного погляду для подальшого вирішення зручною формою запису є матриці. На основі оброблення первинних даних обчислюються розрахункові характеристики, які надалі використовуються на подальших етапах (як для умовного відбору, так і для обчислення критеріїв оптимізації).

I-I. Масиви параметрів навантаження визначаються електроспоживанням споживача (активної  $P_i$ , реактивної  $Q_i$  і повної потужностей  $S_i$ ) у максимальному і мінімальному стані (наприклад, для режимних днів) та у загальному вигляді записуються в такий спосіб:

$$\mathbf{MP}_{\min/\max} = \begin{bmatrix} P_1 & \dots & P_t \\ Q_1 & \dots & Q_t \\ S_1 & \dots & S_t \\ \cos \varphi_1 & \dots & \cos \varphi_t \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де  $t$  – кількість періодів усереднення.

Кожний стовпець матриці відображає параметри режимів електропостачання за період усереднення, отже, описуються графіки навантаження споживача. На підставі подальшого розрахунку характеристик графіків формується матриця  $\mathbf{MC}$ , у рядках якої записуються результати у вигляді коефіцієнтів і величин, що характеризують графіки активного і реактивного навантаження ( $P, Q$ ):

$$\mathbf{MC}_{\min/\max} = \begin{bmatrix} K_{\max.P} & K_{\phi.e.P} & K_{z.e.P} & P_{ск.P} & \dots \\ K_{\max.Q} & K_{\phi.e.Q} & K_{z.e.Q} & P_{ск.Q} & \dots \end{bmatrix}. \quad (2)$$

де  $K_{\max.P}$ , ( $K_{\max.Q}$ ) – коефіцієнт максимуму навантаження активного (реактивного);

$K_{\phi, \epsilon, P}$ , ( $K_{\phi, \epsilon, Q}$ ) – коефіцієнт форми графіку навантаження активного (реактивного);

$K_{\phi, \epsilon, P}$ , ( $K_{\phi, \epsilon, Q}$ ) – коефіцієнт заповнення графіка навантаження активного (реактивного);

$P_{ck, P}$ , ( $P_{ck, Q}$ ) – середньоквадратична потужність навантаження активного (реактивного).

I-II. Массив параметрів генерації є матрицею, аналогічною MP, проте стовпці матриці характеризують вихідні параметри установок:

$$RG = \begin{bmatrix} P_{RG1} & \dots & P_{RGn} \\ Q_{RG1} & \dots & Q_{RGn} \\ S_{RG1} & \dots & S_{RGn} \\ \cos \varphi_{RG1} & \dots & \cos \varphi_{RGn} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Отже, матриця RG є повною базою розглянутих у задачі установок. Під час розгляду декількох виробників або типів установок можна зробити проміжний поділ бази на підмасиви, що не виключає об'єднання на наступних стадіях для зручності розв'язання глобальної і локальних задач.

Етап II – визначення граничних потужностей енергоблока. Основним завданням цієї дії є встановлення меж вибору, які визначають мінімальну і максимальну потужність, що видається енергоблоком. Під мінімальною потужністю розуміють нижню межу вироблюваної потужності (потужність одиначної установки). Максимальна потужність визначає виконання вимог до необхідного і достатнього забезпечення розрахункового навантаження об'єкта. Визначення граничних потужностей енергоблока залежить від мети оптимізації і планованого профілю роботи джерела живлення: паралельна або ізолювана робота, повна або часткова компенсація зовнішнього споживання. Для завдань із повною компенсацією мінімальний рівень потужності, що виробляється, визначають мінімальними значеннями графіка навантаження:

$$P_{\Sigma, PG, \min} = \frac{P_{MP \min}}{k_k}, \quad (4)$$

де  $P_{MP \min}$  – мінімальне значення потужності, обране з масиву  $MP_{\max}$ ;

$k_k \approx 0,7 \div 0,8$  – коригуючий коефіцієнт, який умовно є коефіцієнтом запасу і приймається відповідно до максимального значення ККД для одиначної установки.

Для забезпечення розрахункових навантажень споживача потрібні і достатні межі енергоблоку визначаються такою системою:

$$\begin{cases} P_{\Sigma, PG, \max} \geq \frac{P_{MP \max}}{k_k} \\ P_{\Sigma, PG, \max} \leq \frac{P_{MP \max}}{k_k k_s} \end{cases}, \quad (5)$$

де  $P_{MP \max}$  – максимальне значення потужності, обране з масиву  $MP_{\max}$ ;

$k_s$  – коефіцієнт запасу, який приймається з урахуванням кількості агрегатів, можливих за вимогами технологічного резервування.

Практично неможливо сформувати незмінний у часі графік навантаження споживачів. Водночас за рахунок скоординованого використання зовнішніх джерел енергії та засобів РГ можна досягти певного підвищення однорідності графіків навантаження, що формуються в електричних мережах. Тоді ступінь однорідності характеризуватиметься коефіцієнтом форми відповідного графіка навантаження. Теоретично здійснити подібну політику можна шляхом застосування диференційованих тарифів на електроенергію, наприклад, подібно до формування оплати за спожиту реактивну потужність для споживачів, які беруть участь у її регулюванні спільно із енергосистемою.

Для задач із неповною компенсацією, спрямованою на зрізання піків навантаження під час паралельної роботи із енергосистемою, вводяться межі, зумовлені формою графіка навантажень:

$$P_{\Sigma, PG, \min} = \frac{P_{MP \min}}{k_k \cdot K_{\phi, \epsilon, P}}, \quad (6)$$

$$P_{\Sigma, PG, \max} = \frac{P_{MP \max}}{k_k \cdot K_{\phi, \epsilon, P}}, \quad (7)$$

де  $P_{MP \min}$  – мінімальне значення потужності, обране з масиву  $MP_{\min}$ ;

$K_{\phi, \epsilon, P}$  – коефіцієнт форми графіка навантаження споживача.

Етап III – безпосередній відбір (оптимізація). На етапі безпосереднього відбору проводиться структурна оптимізація. Математичним відображенням критерію оптимальності є цільова функція (ЦФ)  $f$ , яку складають на основі базового математичного апарату задачі. Зазвичай основою для синтезу ЦФ виступають як технічні, так і економічні показники. Серед останніх найбільшої популярності набувають критерії окупності та оцінювання ефективності інвестицій у будівництво об'єктів РГ. Іншим шляхом визначення оптимальності рішення є розрахунок технічних характеристик як визначальних критеріїв: мінімум втрат електроенергії, підвищення надійності електропостачання і показників якості електроенергії.

На основі залежностей, які характеризують вплив параметрів і структури електротехнічних комплексів із розподіленими джерелами енергії на показники режиму роботи розподільної мережі, може бути представлена цільова функція оптимізації цих параметрів і структури.

В якості першого критерію пропонують приймати мінімум втрат активної потужності в електротехнічному комплексі у режимі максимального навантаження ( $P_{втрат.мін.н}$ ), який є функцією активної ( $P_{РГ}$ ) і реактивної ( $Q_{РГ}$ ) потужностей генератора, а також місця його установки ( $\lambda_{РГ}$ ):

$$f_1 = P_{втрат.макс.н}(P_{РГ}, Q_{РГ}, \lambda_{РГ}). \quad (8)$$

Наступним критерієм обрано мінімум втрат активної потужності в електротехнічному комплексі у режимі мінімального навантаження ( $P_{втрат.мін.н}$ ), який також є функцією активної і реактивної потужностей генератора і місця його установки:

$$f_2 = P_{втрат.мін.н}(P_{РГ}, Q_{РГ}, \lambda_{РГ}). \quad (9)$$

Основною умовою обмеження під час оптимізації режиму роботи розподільної мережі промислового підприємства є очевидні вимоги до значень тривало допустимого струму  $I_{доп.м}$  у лінії  $ij$ :

$$I_{ij} \leq I_{доп.м}, \quad (10)$$

де  $I_{ij}$  – діюче значення струму у лінії  $ij$ ;  
 $I_{доп.м}$  – тривало допустимий струм у лінії  $ij$ .

Окрім того, напруга у вузлі ( $i$ ) має перебувати, згідно з діючими нормативами, у межах проміжку  $[0,9 \cdot U_{ном}; 1,1 \cdot U_{ном}]$ :

$$0,9 \cdot U_{ном} \leq U_i \leq 1,1 \cdot U_{ном}, \quad (11)$$

де  $U_i$  – діюче значення напруги вузла ( $i$ );  
 $U_{ном}$  – номінальна напруга розподільчої мережі.

Для визначення оптимальної структури електротехнічного комплексу із локальними джерелами енергії передбачається застосування цільової функції, отриманої методом скаляризації:

$$F = \mu_{\min(\max)} \cdot f_1 + \mu_{\min(\min)} \cdot f_2, \quad (12)$$

$$\mu_{\min(\max)} = \frac{t_{P_{\max}} + t_{Q_{\max}}}{(t_{P_{\max}} + t_{Q_{\max}}) + (t_{P_{\min}} + t_{Q_{\min}})}$$

ваговий коефіцієнт за функції мінімуму втрат активної потужності в години максимуму навантаження;

$$\mu_{\min(\min)} = \frac{t_{P_{\min}} + t_{Q_{\min}}}{(t_{P_{\max}} + t_{Q_{\max}}) + (t_{P_{\min}} + t_{Q_{\min}})}$$

ваговий коефіцієнт за функції мінімуму втрат активної потужності в години мінімуму навантаження;

$t_{P_{\max}}$  – тривалість максимуму навантаження з активної потужності;

$t_{Q_{\max}}$  – тривалість максимуму навантаження з реактивної потужності;

$t_{P_{\min}}$  – тривалість мінімуму навантаження з активної потужності;

$t_{Q_{\min}}$  – тривалість мінімуму навантаження з реактивної потужності.

Застосування обмежень до функції (12) помітно зменшує розмірність множини допустимих значень і, як наслідок, рішень. Водночас цільова функція має мінімальне значення, що відповідає оптимальній потужності генератора.

*Другий рівень.* Розглянемо ефективність об'єднання декількох ЕТК на базі РГ в єдину електричну мережу із забезпеченням оптимальної топології отриманої електричної мережі. Відмітимо, що це об'єднання має таку додаткову «опцію», як солідарне покриття навантаження за рахунок організації, зокрема, додаткових ліній електропередачі (ЛЕП).

Проаналізуємо імовірне об'єднання на прикладі групи раніше незалежних ЕТК, яке представлено на рис. 1. Два ЕТК (ЕТК1 і ЕТК3) автономні, не мають зв'язку з електроенергетичною системою (ЕЕС); ЕТК2 має зв'язок із ЕЕС. Досить імовірно, що у разі створення такого альянсу роль Центрального управляючого пункту виконує ЕТК2. Але цілком можливо, що кожному ЕТК вигідніше буде побудувати власні зв'язки із зовнішньою системою. За такої умови місця приєднання ЛЕП та їхні характеристики є невідомими і підлягають подальшому визначенню.

Отже, об'єктом подальших досліджень є технологічне об'єднання (ТО), утворене окремо розташованими електротехнічними комплексами на основі розподіленої генерації, заснованої на ВДЕ з накопичувачами енергії (рис. 2).

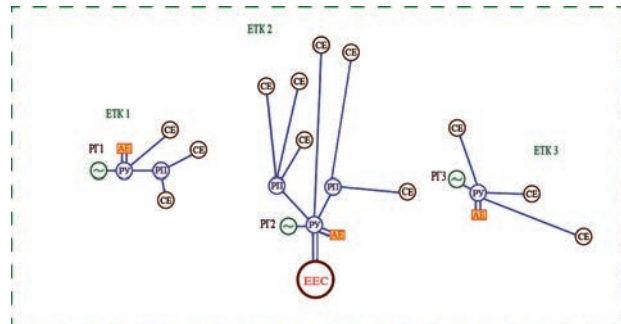


Рис. 1. Група незалежних ЕТК: ЕЕС – електроенергетична система; СЕ – споживач електроенергії; РГ – розподілена генерація; ЕТК – електротехнічний комплекс; РУ – розподільча установка; АЕ – акумулятор енергії; РП – розподільчий пункт

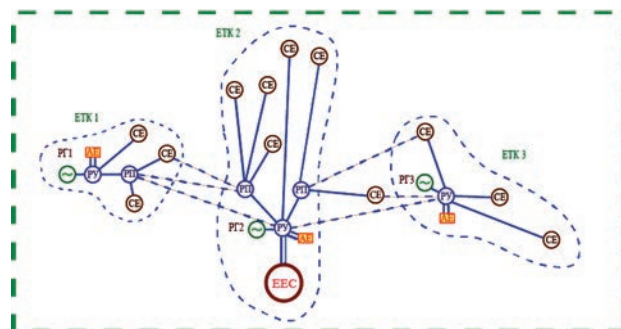


Рис. 2. Технологічне об'єднання ЕТК

Вибір в якості ТО вихідних електротехнічних комплексів зі структурою, представленою на рис. 1, апіорі передбачає потребу у роботі джерел РГ із максимальною видачею потужності незалежно від рівня навантаження як окремих споживачів, так і сумарного навантаження. Водночас позитивний ефект полягає у можливості продажу надлишків потужності (енергії) власниками окремих ЕТК та у розширенні можливості покриття графіка навантаження (для споживачів).

Зрозуміло, що на характер такого об'єднання накладаються загальновідомі обмеження. Першим очевидним обмеженням є співвідношення між робочим струмом ( $I_{ij}$ ) у нормальному режимі і тривало припустимим ( $I_{ij\text{ доп.т}}$ ) для цієї лінії електропередачі (співвідношення) (10).

Водночас проходження робочого струму поданої лінії не повинно спричинювати падіння напруги нижче допустимого значення:

$$\Delta U_{ij} = \sqrt{3} \cdot I_{ij} \cdot L_{ij} \cdot (r_{o\ ij} \cdot \cos \varphi_{ij} + x_{o\ ij} \cdot \sin \varphi_{ij}) \leq 0,1 \cdot U_{ном}, \quad (13)$$

де  $L_{ij}$  – довжина ( $i, j$ )-го приєднання;

$r_{o\ ij}, x_{o\ ij}$  – відповідно питомий активний і реактивний опір ( $i, j$ ) – ої лінії електропередачі;

кут  $\varphi_{ij}$  – характеризує зсув фаз між струмом і напругою в лінії ( $i, j$ ).

Кількість новостворених ліній між діючими ЕТК (рис. 2) та їхні техніко-економічні характеристики повинні мати характеристики залежно від основних цілей такого технологічного об'єднання, до яких можна віднести, наприклад, забезпечення потрібного класу надійності енергопостачання, отримання додаткової гнучкої потужності, новий рівень роботи зі споживачами, можливість пропонувати нові програми керування споживанням та інші. Поставлені завдання мають бути відповідним чином скоординованими.

Очевидно, що повнота і якість отриманих переваг за технологічного об'єднання значною мірою визначається додатковими варіантами топології новоствореної мережі.

Розглянемо один із можливих алгоритмів оцінки структурних властивостей на прикладі технологічного об'єднання ЕТК, утвореного трьома ЕТК (рис. 1). В якості інструмента ми використовуємо структурний аналіз систем [5, с. 50-52]. Формалізацію опису структури проведемо на основі теорії графів. Найбільш наочна форма формалізованого завдання графа – графічне представлення – застосоване нами для подання взаємодіючих взаємозв'язків між елементами на рис. 2. Окремі ЕТК (на рис. 2 ЕТК 1 – ЕТК 3) є підсистемами, тоді як окремі об'єкти (розподільні установки і пункти, споживачі тощо), які утво-

рюють їх – елементами системи. Представлений граф є орієнтованим, оскільки складається тільки з орієнтованих ребер. Орієнтація відповідає переважним напрямкам передачі потужності в мережі. Вершинами графа є елементи системи – розподільні установки, розподільчі пункти, розподілені генератори, акумулятори енергії і споживачі електроенергії. Вершини (вузлів) графа відповідають величинам електричної потужності, ємності і споживання (навантаження). Гілками графів служать лінії електропередачі, які характеризуються напрямком передачі потужності, довжиною, величинами питомого активного і реактивного опорів, обраними техніко-економічними показниками. На рис. 2 потенційно можливі доцільні варіанти електричних зв'язків зображені пунктирними лініями.

Для подальшого аналізу зручно представити граф у числовому вигляді, а саме у вигляді матриці. Представлений на рис. 2 граф технологічного об'єднання описується за допомогою матриці суміжності вершин:

$$A = \|a_{ij}\|_{m}^n, \quad i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, m}$$

де  $a_{ij}$  – елементи матриці  $A$ ;

$n$  – кількість вузлів графа;  $m$  – кількість гілок (дуг) графа.

Елементи матриці  $a_{ij}$  суміжності вершин  $A$  для орієнтованого графа визначаються таким чином:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{при наявності зв'язку (якщо з вершини і можна перейти в вершину j);} \\ 0 & \text{при відсутності зв'язку} \end{cases}$$

Вид матриці суміжності орієнтованих графів суттєво залежить від обраного порядку нумерації вершин  $i$ , вибравши певний принцип нумерації вершин для деяких видів графів (без контурів), можна звести матрицю  $A$  до трикутного вигляду, де  $a_{ij} = 0$  за  $j > i$ . Матриця суміжності вершин  $A$  є матрицею прямих шляхів графа, що мають довжину, яка дорівнює 1. Загальну кількість транзитних шляхів від вершини ( $i$ ) до ( $j$ ) довжиною ( $k$ ) можна отримати унаслідок зведення матриці ( $A$ ) у ступінь ( $k$ ).

Структурні властивості електричної мережі, створеної після технологічного об'єднання декількох ЕТК, можна визначити на основі структурно-топологічних характеристик графа, які розраховуються за допомогою матриці суміжності вершин.

Для оцінки якості структури ТО і її елементів із позицій системного підходу слід визначити основні структурні характеристики.

*Зв'язність структури.* Цей кількісний параметр дає змогу виявити наявність обривів у структурі, висячі вершини та інші. Найбільш повно і кількісно зв'язність елементів орієнтованого графа визначається матрицею зв'язності  $C = \|c_{ij}\|$ .

Чим більшою є величина  $C$ , тим вище значення зв'язності, тим потенційно більш надійною є розглянута топологія електричної мережі. Для орієнтованого графа параметр  $C$  можна визначити згідно з виразом:

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij},$$

де  $n$  – кількість вузлів графа,  
 $c_{ij}$  – елемент матриці зв'язності  $C$ , який визначається за співвідношенням:

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } a_{ij}^{\Sigma} \geq 1 \\ 0, & \text{якщо } a_{ij}^{\Sigma} = 0 \end{cases}$$

де  $a_{ij}^{\Sigma}$  – елемент сумарної матриці суміжності  $A_{\Sigma}$ , який визначає сумарну кількість шляхів від вузла ( $i$ ) до вузла ( $j$ ).

Матрицю  $A_{\Sigma}$  можна визначити таким чином:

$$A_{\Sigma} = \sum_{k=1}^n A^k,$$

де  $A$  – матриця суміжності вершин графа;  
 $k$  – довжина шляху (кількість ділянок) від вершини ( $i$ ) до вершини ( $j$ ).

*Структурна надмірність.* Структурний параметр, який відображає перевищення загальної кількості зв'язків над мінімально необхідними, називається структурною надмірністю ( $R$ ) і визначається таким чином:

$$R = \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \right] \cdot \frac{1}{n-1} - 1, i \neq j$$

де  $a_{ij}$  – елемент матриці суміжності вершин  $A$ ;  
 $n$  – кількість вершин графа.

Найбільш економічна топологія повинна мати мінімальну кількість надлишкових електричних зв'язків, наявність яких збільшить витрати на будівництво додаткових ЛЕП, потрібну комутаційну і захисну апаратуру.

Отже, в якості кращої має розглядатися топологія із найменшим значенням характеристики.

Нерівномірність розподілу зв'язків – параметр, який характеризує недовикористання можливостей заданої топології за досягнення максимальної зв'язності; він виражається показником квадратичного відхилення заданого розподілу ступеня вершин і визначається відповідно до виразу:

$$\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^n \left( \rho_i^2 - \frac{4m^2}{n} \right),$$

де  $\rho_i$  – дійсний ступінь  $i$ -ої вершини графа (кількість ребер, інцидентних  $i$ -ої вершині графа);  
 $m$  – кількість ребер графа;  
 $n$  – кількість вершин графа.

Значення параметра, яке дорівнює нулю, характеризує рівномірну топологію. Чим більшою є величина  $\varepsilon^2$ , тим більша нерівномірність зв'язків.

Отже, більш оптимальною вважатиметься топологія із найменшою величиною параметра.

*Структурна компактність.* Для кількісної оцінки структурної компактності вводиться параметр, який відображає близькість елементів між собою. Близькість двох елементів ( $i$  і  $j$ ) між собою визначатимемо через мінімальну довжину шляху для орієнтованого графа (ланцюга – для неорієнтованого)  $d_{ij}$ . Тоді величина  $W$  відображає загальну структурну близькість елементів між собою у системі:

$$W = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij}, i \neq j$$

де  $d_{ij}$  – мінімальна довжина шляху із вершини  $i$  у вершину  $j$ ;

$n$  – кількість вершин графа.

Для кількісної оцінки структурної компактності дуже часто використовують відносний показник:

$$W_{\text{відн}} = W / W_{n2}^1,$$

де  $W_{n2}^1 = n(n-1)$  – значення компактності для структури системи типу «повний граф».

Структурну компактність можна характеризувати й іншим показником – діаметром структури:

$$d = \max_{ij} d_{ij}.$$

*Ступінь централізації у структурі.* Для кількісної оцінки ступеня централізації у структурі використовується поняття «індекс центральності»:

$$\delta = (n-1) \frac{2Z_{\max} - n}{Z_{\max}(n-2)}$$

де  $n$  – кількість вершин графа.

Компонент указаної формули можна знайти у такий спосіб:

$$Z_{\max} = \max \{Z_i\},$$

де  $Z_i$  – величина, що визначається відповідно до наступного виразу:

$$Z_i = \frac{W}{2} \left( \sum_{j=1}^n d_{ij} \right), i = \overline{1, n}; i \neq j,$$

де  $W$  – структурна компактність топології;

$d_{ij}$  – мінімальна довжина шляху ( $i$ ) вершини ( $i$ ) у вершину ( $j$ );

$n$  – кількість вершин графа.

Чим меншим є значення параметра, тим надійніша топологія. Високе значення ступеня централізації висуває підвищені вимоги до пропускної здатності центрального елемента у топології мережі, через який встановлюється велика кількість зв'язків, а також до надійності його функціонування, оскільки відмова цього елемента призводить до порушення нормальної роботи всієї системи. За великої величини параметра має сенс дублювання центрального елемента із метою

підвищення надійності топології. Топологія мережі із меншим значенням параметра є кращою.

Оцінка і подальше порівняння варіантів топології мережі окремо за кожною структурно-топологічною характеристикою зазвичай є досить тривіальним завданням. Однак вибір оптимальної топології мережі з урахуванням усього комплексу розглянутих параметрів, тобто рішення багатокритеріальної задачі, представляє певні труднощі. Урахування впливу окремих факторів (наприклад, наявність, характеристики та режимні обмеження акумуляторів енергії), додає задачі додаткові особливості мультифакторної проблеми.

Нині існує досить велика кількість методів розв'язання багатокритеріальних задач. Остання часто зводиться до однокритеріальної. Цей підхід має на увазі використання суперкритерію у вигляді скалярної функції векторного аргументу:

$$q_0(x) = q_0(q_1(x), q_2(x), \dots, q_p(x)),$$

де  $q_1(x), q_2(x), \dots, q_p(x)$  – критерії;  
 $x$  – альтернатива із множини  $X$ .

Вид функції  $q_0$  залежить від внеску кожного окремого критерію у загальний суперкритерій. Зазвичай у цьому випадку застосовують адитивні і мультиплікативні функції виду:

$$q_0 = \sum_{i=1}^p \alpha_i q_i;$$

$$1 - q_0 = \prod_{i=1}^p (1 - \beta_i q_i),$$

де  $\alpha_i$  і  $\beta_i$  – вагові коефіцієнти.

Головною складністю цього методу є визначення вагових коефіцієнтів  $\alpha_i$  або  $\beta_i$ .

Резюмуючи зазначене, можна стверджувати, що ідеологія формування «технологічного об'єднання» діючих ЕТК спрямована на підвищення ефективності електропостачання за рахунок максимального використання всього потенціалу розподіленої генерації.

**Висновки.** Запропоновано методику параметричної оптимізації ЕТК із РГ, яка полягає у визначенні фізично обґрунтованих характеристик енергоблоків і складається із трьох етапів: формування вихідних даних, визначення граничних потужностей енергоблоку, прямий відбір (оптимізація).

Формування вихідної параметричної бази і використання гнучких критеріїв підбору варіантів допускає динамічне настроювання завдання і його застосування як для проектування об'єктів, що будуються, так і для діючих модернізованих систем.

Розглянуто об'єднання декількох ЕТК на основі РГ в єдину електричну мережу та можливі шляхи забезпечення оптимальної топології отриманої електричної мережі.

Перспективними дослідженнями у цьому напрямку, на нашу думку, є розроблення алгоритму раціонального розміщення можливих додаткових споживачів, а також послідовність і алгоритм нарощування навантаження без радикального коригування визначеної раніше топології технологічного об'єднання ЕТК.

#### Список літератури:

1. Лежнюк П.Д., Гунько І.О. Дослідження впливу РДЕ та секціонування на режими роботи локальних електричних систем. *Наукові праці ВНТУ*. 2016, № 2. С. 1-12.
2. Козирський В.В., Гай О.В., Бодунов В.М., Костюк В.А. Формування динамічної моделі відновлення електропостачання споживачів в системах з джерелами розподіленої генерації. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2013. Вип. 13. Т.2. С. 50-56.
3. Самойлик О. В., Курбака Г. В., Дудник М. В. Аналіз балансу потужності локальної системи електропостачання на базі поновлювальних джерел енергії та акумуляторних батарей. *Енергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2016. № 11 (154). С. 22–32.
4. Лежнюк П. Д., Рубаненко О.С., Малогулко Ю.В. Оптимізація функціонування розосереджених джерел енергії у локальних електричних системах. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПИ" : зб. наук. пр. Темат. вип. : Механіко-технологічні системи та комплекси*. Харків. 2014. № 60 (1102). С. 68-77.
5. Воропай Н.И. Теория систем для электроэнергетиков: Учебное пособие. Новосибирск : Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 2000. 273 с.

#### **Samoilyk O.V., Tkachenko V.F. INCREASE OF THE DISTRIBUTED GENERATION EFFICIENCY IN THE ELECTROTECHNICAL COMPLEX**

*The analysis of basic trends in the use of small distributed generation has shown that its use on the part of electricity consumers as a part of the electrotechnical complex has a number of positive effects and is a kind of trend, which is due, inter alia, to the current regulatory environment. It is established that there is a certain "deficit" of scientifically substantiated approaches (methods, procedures and rules) to determine the physically sound characteristics of DG power units in the electrotechnical complex with distributed generation and the effective topology of such ETC. The*

algorithm of optimization of DG parameters at the stage of designing a separate electrotechnical complex, as well as the integration of several ETCs on the basis of DG into a single electrical network with ensuring the optimal topology of the obtained electrical network are considered in the paper.

Based on the dependences characterizing the influence of parameters and structure of electrotechnical complexes with the distributed energy sources on indicators of an operating mode of a distribution network, the target function of optimization of these parameters and structure is offered. The method of parametric optimization of ETS with DG for determination of physically substantiated characteristics of power units, which consists of three stages: formation of initial data; determination of the maximum capacities of the power unit; direct selection (optimization), is offered. The efficiency of integration of several electrical complexes based on small distributed generation into a single electrical network with the provision of the optimal topology of the obtained electrical network is analyzed. A peculiarity of such a technological integration is in an additional "option", which consists in solidarity coverage of the load at the expense of the organization, inter alia, of additional power lines. The probable integration on the example of a group of previously independent electrotechnical complexes based on small distributed generation is considered. The ideology of forming a "technological association" from the existing ETCs is aimed at improving the efficiency of electricity supply by maximizing the full potential of distributed generation.

**Key words:** distributed generation, optimization, power unit, modeling, electric power.