

УДК 621.311

**STUDY OF THE EFFICIENCY OF THE TOPOLOGY OF INTEGRATED  
ELECTROTECHNICAL COMPLEX ON THE BASIS OF DISTRIBUTED  
GENERATION**

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТОПОЛОГІЇ ОБ'ЄДНАНОГО  
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ НА БАЗІ РОЗПОДІЛЕНОЇ  
ГЕНЕРАЦІЇ**

**Samoilyk O. V. / Самойлик О.В.**

*s.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0001-8482-8996

**Tkachenko V. F. / Ткаченко В.Ф.**

*s.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0001-6290-2286

Cherkasy State Technological University

Черкаський державний технологічний університет

Cherkasy , Shevchenko blvd, 460, 18006

Черкаси, бул. Шевченка, 460, 18006

***Анотація.** В статті запропонована ідеологія формування «технологічного об'єднання» з окремих існуючих електротехнічних комплексів на базі розподіленої генерації, що забезпечує підвищення ефективності електропостачання за рахунок максимального використання всього потенціалу розподіленої генерації. Виконано структурний аналіз отриманого технологічного об'єднання, який дозволяє всебічно оцінити топологію новоствореної мережі та адаптувати її до конкретних умов.*

***Ключові слова:** розподілена генерація, оптимізація, структурний аналіз, електрична потужність*

**Вступ**

В даний час активно формується децентралізована модель енергетики з акцентом на розвиток розподіленої генерації (РГ) , як на основі відновлюваних

джерел енергії (ВДЕ), так і традиційних видів палива. Перехід енергетичної системи на новий рівень призводить до стійкого територіального розвитку, енергетичної безпеки, а також дозволяє вирішити глобальні екологічні проблеми.

Використання розподільної генерації на стороні споживачів електроенергії у складі електротехнічного комплексу (ЕТК) має ряд загальновідомих позитивних ефектів [1] і представляє свого роду тренд, який обумовлений, у тому числі, актуальним нормативно-правовим середовищем.

Сучасний технологічний базис створює умови для кардинальної зміни економічної поведінки відповідних агентів ринку – споживачів з «пасивної» на «активну»: змінюються функції і роль агентів-споживачів послуг в енергосистемі, відбувається трансформація споживача від сторони, що приймає умови взаємодії, які диктуються енергосистемою, до ролі «замовника» послуг – активного споживача. Це передбачає створення достатньо інтегрованої, саморегулювальної і самовідновлювальної системи електропостачання (СЕП), що має відповідну мережеву топологію.

Очевидним шляхом, як нам представляється, є агрегація наявних у даному регіоні не пов'язаних між собою окремих ЕТК на базі розподільної генерації у єдину електромережу. Зазначена обставина, звісно, ускладнює можливість ефективно використовувати всі переваги розподільної генерації, у тому числі, у можливостях солідарного покриття навантаження, згладжування графіків навантажень і інших типових задач малої енергетики.

При цьому якщо проблемам оптимізації функціонування РГ на рівні окремих ЕТК, а також сумісності РГ з енергосистемою присвячено достатньо робіт, наприклад, [2, 3], то у таких питаннях, як побудова оптимальної топології об'єднаної електромережі існує певний «дефіцит» наукових досліджень. Тому актуальними є питання вибору ефективної топології можливого технологічного об'єднання (ТО) декількох ЕТК на базі РГ в єдину електричну мережу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз базових тенденцій у роботах [1, 3, 4] показав, що більшість досліджень пов'язані з оптимізацією таких параметрів РГ, як: довгострокове планування розвитку; зменшення втрат при передачі і розподілі електроенергії шляхом певної локалізації; раціональне планування розміщення генерації у вузлах енергосистеми; підвищення стійкості, збереження і поліпшення параметрів якості електроенергії, оптимальний розподіл активного та реактивного навантаження електричних мереж між відновлювальними джерелами електроенергії.

Такий підхід застосовується, як правило, при розгляді оптимізації з точки зору переважно зовнішніх розподільних електропостачальних компаній.

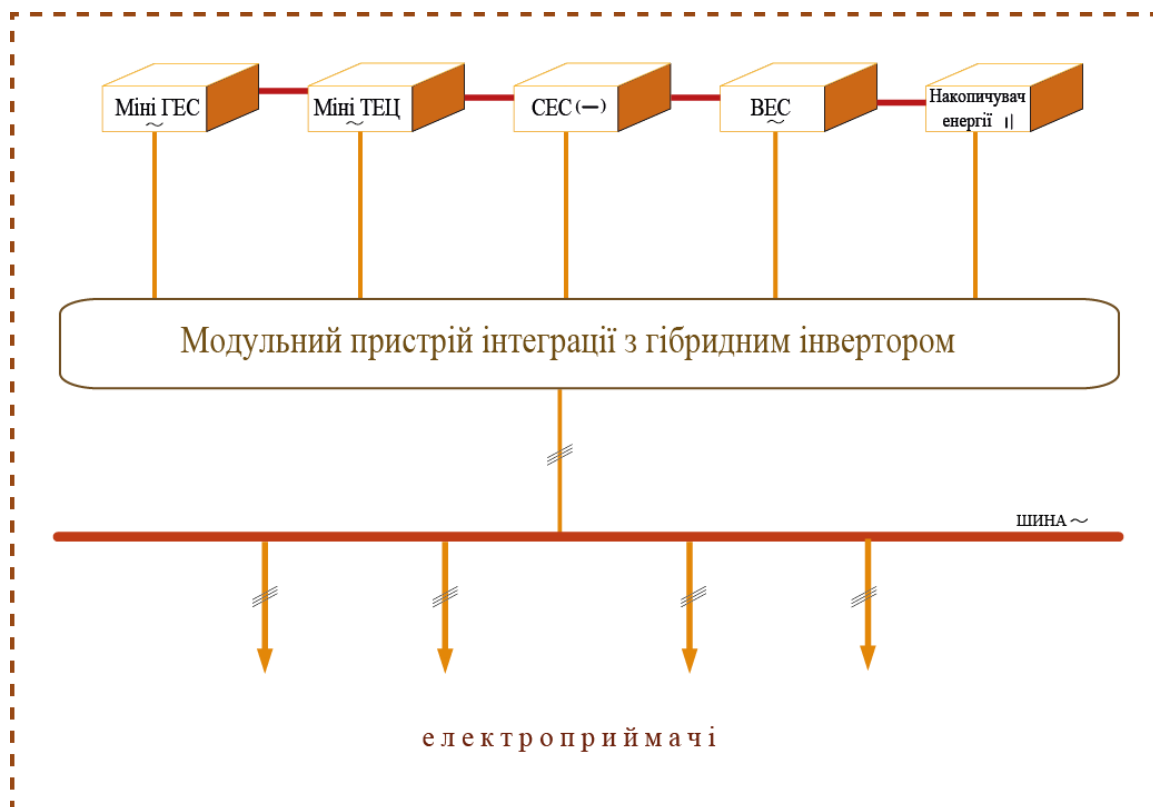
Разом з тим, майже відсутні науково обґрунтовані підходи (методи, процедуру, правила) визначення фізично обґрунтованих характеристик ефективної топології електромережі об'єднаного ЕТК.

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

**Постановка завдання.** Запропонувати ідеологію формування «технологічного об'єднання» з окремих існуючих електротехнічних комплексів на базі розподіленої генерації та механізм вибору ефективної топології такого об'єднання.

### **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Розглянемо типову схему ЕКТ на базі розподіленої генерації. Найбільш досконалими схемами за погодженням вихідних параметрів різнорідних джерел енергії мають, як правило, модульні конструкції на основі гібридних інверторів (рисунк 1) [2]. Вони дозволяють об'єднувати в одній системі живлення різнотипні енергоустановки на ВДЕ та накопичувачі електроенергії.



**Рисунок 1 – Схема поєднання різноманітних джерел енергії з застосуванням модульної конструкції на основі гібридного інвертора:**  
**СЕС – сонячна електростанція; ВЕС – вітроелектростанція**

Міні- ГЕС і міні- ТЕЦ виробляють електроенергію напругою 0,4–6(10)кВ промислової частоти (50 Гц), що задовольняє вимогам до напруги і частоти мережі. Сонячні електричні установки не мають безпосереднього контакту зі споживачем, оскільки генерують постійний струм, і з'єднані з ними через інвертор.

Для узгодження режимів виробництва, передачі, зберігання і споживання електроенергії при інтеграції ВДЕ в централізовану електричну мережу необхідно контролювати значення основних електричних параметрів. Для цього на шинах розподільних пристроїв споживачів встановлюються необхідні датчики, вихідні сигнали з яких надходять в систему управління. Рівняння балансу потужності для розглянутого електротехнічного комплексу системи електропостачання в поточний момент часу має вигляд

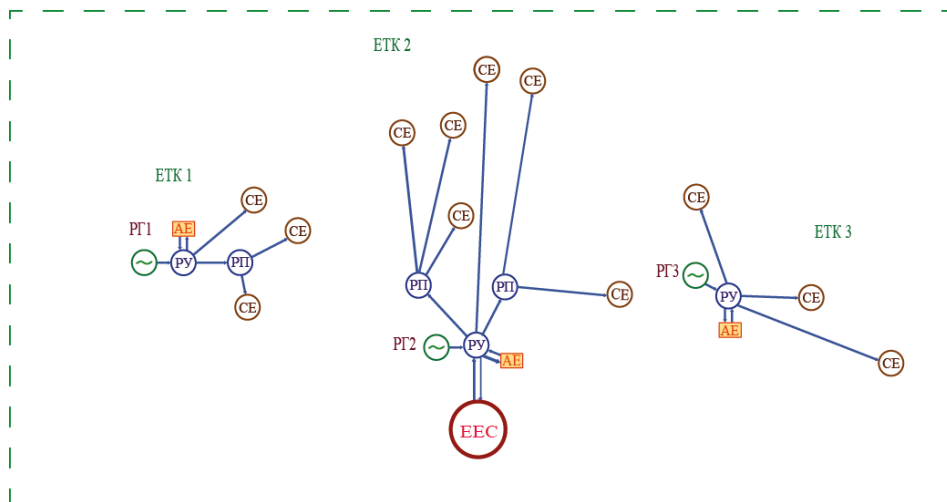
$$P_{ЕС}(t) + P_{ВДЕ}(t) \pm P_{НЕ}(t) = P_H(t), \quad (1)$$

де  $P_{EC}(t)$  – поточне значення потужності, що виробляється енергосистемою;  $P_{ВДЕ}(t)$  – поточні значення потужностей, що виробляють електроустановки на ВДЕ;  $P_{НЕ}(t)$  – поточне значення потужності заряду (розряду) накопичувачів електроенергії;  $P_H(t)$  – поточне значення потужності навантаження.

Розглянемо ефективність об'єднання декількох ЕТК на базі РГ, що мають в своєму складі всі або деякі елементи, зазначені на рис.1, в єдину електричну мережу з забезпеченням оптимальної топології отриманої електричної мережі. Відмітимо, що таке об'єднання має таку додаткову «опцію», як солідарне покриття навантаження за рахунок організації, в тому числі, додаткових ліній електропередачі (ЛЕП).

Проаналізуємо ймовірне об'єднання на прикладі групи попередньо незалежних ЕТК, що представлено на рисунку 2. Два ЕТК (ЕТК1 і ЕТК3) автономні, не мають зв'язку з електроенергетичною системою (ЕЕС); ЕТК2 має зв'язок з ЕЕС. Досить імовірно, що в разі створення такого альянсу роль Центрального управляючого пункту приймає на себе ЕТК2. Але не виключено, що кожному ЕТК вигідніше буде побудувати власні зв'язки з зовнішньою системою. При цьому місця приєднання ЛЕП та їх характеристики є невідомими, що підлягають наступному визначенню.

Таким чином, об'єктом подальших досліджень стає технологічне об'єднання (ТО), що утворено окремо розташованими електротехнічними комплексами на базі розподіленої генерації, заснованої на ВДЕ з накопичувачами енергії (рисунок 3).



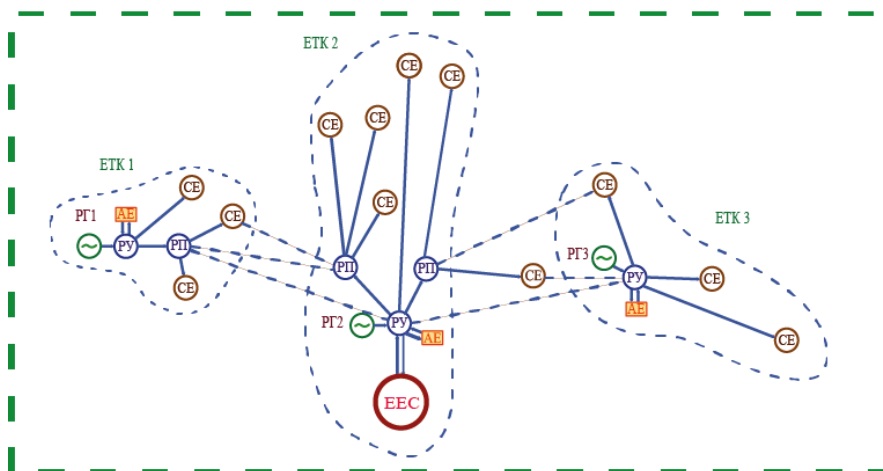
**Рисунок 2 – Група незалежних ЕТК:**

**ЕЕС – електроенергетична система; CE – споживач електроенергії;**

**РГ – розподілена генерація; ЕТК – електротехнічний комплекс;**

**РУ – розподільча установка; АЕ – акумулятор енергії;**

**РП – розподільчий пункт**



**Рисунок 3 - Технологічне об'єднання ЕТК**

Вибір в якості ТО вихідних електротехнічних комплексів зі структурою, представленою на рисунку 2 апіорі передбачає необхідність роботи джерел РГ на максимальну видачу потужності незалежно від рівня навантаження як окремих споживачів, так і сумарного навантаження. При цьому позитивний ефект полягає в можливості продажу надлишків потужності (енергії) – для

власників окремих ЕТК та в 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  $I_{ij}$  в нормальному режимі і тривало припустимим  $I_{ij \text{ доп.т}}$  для даної  $ij$  – лінії електропередачі – співвідношення

$$I_{ij} \leq I_{ij \text{ доп.т}} \quad (2)$$

При цьому проходження робочого струму поданої лінії не повинно викликати падіння напруги нижче допустимого [5]

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

де  $L_{ij}$  – довжина  $(i, j)$ -го приєднання;  $r_{o \text{ } ij}$ ,  $x_{o \text{ } ij}$  – 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 існуючими ЕТК (рисунок 3) та їх техніко-економічні характеристики повинні мати характеристики у залежності від основних цілей такого технологічного об'єднання, до яких можна віднести, наприклад, забезпечення необхідного класу надійності енергопостачання; отримання додаткової гнучкої потужності; новий рівень роботи зі споживачами, можливість пропонувати нові програми керування споживанням та інші. Поставлені завдання повинні бути відповідним чином скоординовані.

Очевидно, що повнота і якість отриманих переваг при технологічному об'єднанні значною мірою визначається додатковими варіантами топології новоствореної мережі.

Розглянемо один з можливих алгоритмів оцінки структурних властивостей на прикладі технологічного об'єднання ЕТК, що утворено трьома ЕТК (рис. 2). Як інструмент використовуємо структурний аналіз систем [6]. Формалізацію опису структури проведемо на основі теорії графів. Найбільш наочна форма формалізованого завдання графа – графічне представлення –

застосоване нами для подання взаємовідносин взаємозв'язків між елементами на рисунку 2. Окремі ЕТК (на рисунку 2 ЕТК 1 – ЕТК 3), являють собою підсистеми, а окремі об'єкти (розподільні установки й пункти, споживачі тощо), що утворюють їх – елементи системи.

Представлений граф є орієнтованим, так як 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. Вони характеризуються напрямком передачі потужності, довжиною, величинами питомого активного і реактивного опорів, обраними техніко-економічними показниками. На рисунку 3 потенційно можливі доцільні варіанти електричних зв'язків зображені пунктирними лініями.

Для подальшого аналізу зручно представити граф в числовому вигляді, а саме – у вигляді матриці. Представлений на рисунку 3 граф технологічного об'єднання описується за допомогою матриці суміжності вершин

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

де  $a_{ij}$  – елементи матриці  $A$ ;  $n$  – число вузлів графа;  $m$  – число гілок (дуг) графа.

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

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

Вид матриці суміжності орієнтованих графів істотно 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  $a_{ij}=0$  при  $j>i$ . Матриця суміжності вершин  $A$  є матрицею безпосередніх шляхів графа, що мають довжину, що дорівнює 1. Загальну кількість транзитних шляхів від вершини  $i$  до  $j$  довжиною  $k$  може бути отримано в результаті зведення матриці  $A$  в ступінь  $k$ .

Структурні властивості електричної мережі, що створюється 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 з позицій системного підходу слід визначити основні структурні характеристики.

Зв'язність структури. Цей кількісний параметр дозволяє виявити наявність обривів в структурі, висячі вершини та інші. Найбільш повно, кількісно, зв'язність елементів орієнтованого графа визначається матрицею зв'язності  $C=\|c_{ij}\|$ . Чим більше величина  $C$ , тим вище значення зв'язності і тим потенційно більш надійною є розглянута топологія електричної мережі. Для орієнтованого графа параметр  $C$  може бути визначена згідно виразу:

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

де  $n$  – число вузлів графа,  $c_{ij}$  – елемент матриці зв'язності  $C$ , що 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  $A_{\Sigma}$ , що визначає сумарне число шляхів від вузла  $i$  до вузла  $j$ .

Матриця  $A_{\Sigma}$  може бути визначена наступним чином:

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

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

Структурна надмірність. Структурний параметр, що відображає перевищення загального числа зв'язків над мінімально необхідним, називається структурною надмірністю  $R$  і визначається наступним 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  $A$ ;  $n$  – число вершин графа.

Найбільш економічна топологія повинна мати мінімальну кількість надлишкових електричних зв'язків, наявність яких збільшить витрати на будівництво додаткових ЛЕП, необхідної комутаційної і захисної апаратури.

Таким чином, в якості кращої повинна розглядатися топологія з найменшим значенням характеристики.

Нерівномірність розподілу зв'язків – параметр, що характеризує недовикористання можливостей заданої топології в досягненні максимальної зв'язності. Враховується показником – квадратичне відхилення заданого розподілу ступеня вершин. 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 (число ребер, інцидентних  $i$ -ої вершині графа);  $m$  – число ребер графа;  $n$  – число вершин графа.

Значення параметра, рівне нулю, характеризує рівномірну топологію. Чим більше величина  $\varepsilon^2$ , тим більше нерівномірність зв'язків. Таким чином, більш оптимальною буде вважатися топологія з найменшою величиною параметра.

Структурна компактність. Для кількісної оцінки структурної компактності вводиться параметр, що відображає близькість елементів між собою. Близькість двох елементів  $i$  і  $j$  між собою будемо визначати через

мінімальну довжину шляху для орієнтованого графа (ланцюга – для неорієнтованого)  $d_{ij}$ . Тоді величина  $W$  відображає загальну структурну близькість елементів між собою в системі

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

де  $d_{ij}$  – мінімальна довжина шляху з вершини  $i$  в вершину  $j$ ;  $n$  – число вершин графа.

Для кількісної оцінки структурної компактності дуже часто використовують відносний показник:

$$W_{\text{відн}} = W / W_{\text{пг}}^1,$$

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

Структурну компактність можна характеризувати і іншим показником - діаметром структури:

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

Ступінь централізації в структурі. Для кількісної оцінки ступеня централізації в структурі використовується поняття індексу центральності

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

де  $n$  – число вершин графа.

Компонент вказаної формули може бути знайдений в такий спосіб

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

де  $Z_i$  – величина, яка 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 і вершини  $i$  в вершину  $j$ ;  $n$  – число вершин графа.

Чим менше значення параметра, тим надійніше топологія. Високе значення ступеня централізації висуває підвищені вимоги до пропускну здатності центрального елемента в топології мережі, через який встановлюється велика кількість зв'язків, а також до надійності його функціонування, так як відмова цього елемента веде до порушення нормальної роботи всієї системи. При великій величині параметра має сенс дублювання центрального елемента з метою підвищення надійності топології. Топологія мережі з меншим значенням параметра, очевидно, є більш кращою.

Резюмуючи викладене, можна стверджувати, що запропонована ідеологія формування «технологічного об'єднання» з існуючих ЕТК направлена на підвищення ефективності електропостачання за рахунок максимального використання всього потенціалу розподіленої генерації.

### **Висновки і основні результати**

Запропоновано механізм формування «технологічного об'єднання» з окремих існуючих електротехнічних комплексів на базі розподіленої генерації та алгоритм вибору ефективної топології такого об'єднання з метою забезпечення необхідного класу надійності енергопостачання, отримання додаткової гнучкої потужності, стимулювання переходу на новий рівень роботи зі споживачами (так звані «активні споживачі»), надання можливості пропонувати нові програми керування споживанням і, таким чином, максимально використовувати весь потенціал розподіленої генерації.

У якості «інструменту» визначення ефективності подібної агрегації використано структурний аналіз систем, який дозволяє:

- повноцінно на етапі проектування врахувати кількість і якість необхідних зв'язків, обґрунтовано позбувшись надлишковості;
- ефективно використовувати механізми прямого і непрямого порівняння розглянутих варіантів топології в процесі її формування із застосуванням загальновідомих методик;
- встановити найбільш критичні елементи топології з підвищеними вимогами до надійності функціонування з врахуванням розглянутих обмежень;

- проводити обґрунтовану корекцію в процесі вибору топології;
- в цілому всебічно оцінити топологію новоствореної мережі та адаптувати її до конкретних умов.

### **Література:**

1. Праховник А. В. Малая энергетика: распределенная генерация в системах энергоснабжения / А. В. Праховник. – К. : Освіта України, 2007. – 464 с.
2. Самойлик О. В., Курбака Г. В., Дудник М. В. Аналіз балансу потужності локальної системи електропостачання на базі поновлювальних джерел енергії та акумуляторних батарей // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2016, ноябрь. – № 11 (154). – С. 22–32.
3. Лежнюк П. Д. Оптимізація функціонування розосереджених джерел енергії в локальних електричних системах / П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко, Ю.В. Малогулко // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Темат. вип. : Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2014. – № 60 (1102). – С. 68-77.
4. Попов В.А. К вопросу рациональной интеграции источников распределенной генерации / В.А. Попов, Е.С. Ярмолюк, В.В. Ткаченко, Саид Банузаде Сахрагард // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України, Спеціальний випуск, Частина 1.- Київ, 2011.- С. 111-121.
5. ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT) Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. Київ МІНЕКОНОМРОЗВИТКУ УКРАЇНИ. 2014
6. Теория систем для электроэнергетиков: Учебное пособие / Н.И.Воропай. – Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 2000. – 273 с.

**Abstract.** The article offers the ideology of formation of "technological association" from separate existing electrotechnical complexes on the basis of distributed generation that provides the increase of power supply efficiency at the

expense of the maximum use of all potential of distributed generation. The structural analysis of the received technological association which allows to estimate comprehensively the efficiency of topology of the newly created network and to adapt it to concrete conditions is carried out.

**Key words:** *distributed generation, optimization, structural analysis, electric power*

Стаття відправлена: 18.09.2021 р.  
© Самойлик О.В., Ткаченко В.Ф.