УДК 621.316.11

АЛГОРИТМ ФОРМУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ СХЕМОТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ЩО МІСТЯТЬ ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

ЗАБОЛОТНИЙ А.П. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри Електропостачання промислових підприємств Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: zap@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8696-661X;

ФЕДОША Д.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри Електропостачання промислових підприємств Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: fdv@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0683-0561;

ДЬЯЧЕНКО В.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри Електропостачання промислових підприємств Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: dvv.epp@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8705-9683.

Мета роботи. *Формування оптимальних схемотехнічних рішень локальних електроенергетичних систем що містять відновлювані джерела електроенергії з точки зору мінімуму втрат електричної енергії та зниження річних приведених витрат.*

Методи дослідження. *Математичне моделювання локальних електроенергетичних систем що містять відновлювані джерела електроенергії. Методи декомпозиції та редукції схем систем електропостачання, що оптимізуються. Метод потенційних поверхонь. Методи параметричної оптимізації отриманих схемотехнічних рішень.*

Отримані результати. *Зазначено, що хоча частка відновлюваних джерел електричної енергії продовжує зростати і стрімко розвивається, однак галузь все ще стикається з багатьма проблемами, зокрема, як продовжувати знижувати втрати електричної енергії та річні приведені витрати, покращити ефективність експлуатації та обслуговування, підтримувати стабільність електромережі, забезпечити безпеку та надійність роботи системи електропостачання що містять відновлювані джерела електричної енергії.*

Показано, що ефективне рішення зазначених проблем можливе лише на основі аналізу перспектив розвитку локальних електроенергетичних систем, які містять відновлювані джерела електричної енергії, розробки механізмів технічного та організаційного забезпечення, які сприятимуть побудові сучасних системних (схемотехнічних) рішень.

Наукова новизна. *Запропоновано застосувати метод потенційної поверхні для побудові оптимальної структури локальної електроенергетичної системи при її проектуванні та модернізації в умовах присутності в ній відновлюваних джерел електричної енергії, який дозволяє оптимізувати структуру мережі з точки зору втрат електричної енергії та зниження річних приведених витрат.*

Практична цінність. *Описано алгоритм формування структури систем електропостачання, що реалізує одночасне вирішення завдань визначення кількості вузлів навантаження, розподілу електроприймачів між ними, визначення конструкції джерел живлення з урахуванням дискретності дизайн елементів системи.*

Запропонована формалізована методика побудови оптимальних схемотехнічних рішень локальної електромережі з відновлюваними джерелами живлення при її проектуванні та модернізації, що дозволяє оптимізувати структуру електромережі з мінімальними втратами електроенергії та зменшити дисконтовані витрати.

Крім того, на основі спільного використання оціночних та оптимізаційних моделей запропонований метод дозволяє оптимізувати завантаження кабельних ліній що призводить до зменшення втрат в них.

Наведено результати чисельного моделювання на основі запропонованого алгоритму на прикладі розв'язання задачі реконструкції ділянки міської магістралі після підключення до неї відновлюваних джерел живлення.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії; метод потенційних поверхонь; структура систем електропостачання; вузол навантаження; електроприймач; втрати електричної енергії.

I. ВСТУП

У сучасних умовах повномасштабної війни та зростання цін на первинні енергоносії всі галузі промислового виробництва України гостро потребують розосереджених та надійних джерел електричної енергії. Особливу потребу в них відчуватимуть у післявоєнні роки промислові комплекси, на яких буде покладено завдання якнайшвидшого відновлення економіки країни.

© Заболотний А.П., Федоша Д.В., Дьяченко В.В., 2024
DOI 10.15588/1607-6761-2024-1-3

Загальновідомо, що системи електропостачання промислових підприємств нерозривно пов'язані з міськими мережами електропостачання, які покликані забезпечувати електроенергією інфраструктурні об'єкти, що обслуговують і забезпечують стабільну роботу цих промислових комплексів.

Міські електричні мережі, як відомо, відрізняються великою протяжністю, розгалуженістю при порівняно малої потужності, що передається, а також використанням низьких класів напруги.

Тенденції зростання тарифів на електричну енергію обумовлюють значне збільшення складової вартості втрат електричної енергії (ВЕЕ) в таких мережах при її передачі та розподілі й як наслідок - збільшення річних приведених витрат.

Ще в довоєнний період спостерігалося постійне зростання частки «малої» генерації в енергобалансі як промисловіх підприємств так і міських системах електропостачання. Це пов'язано з впровадженням відновлюваних джерел електроенергії (ВДЕ) як засобу забезпечити безпеку та надійність роботи системи електропостачання та підтримувати стабільність електромережі в цілому. Найбільш широке впровадження отримали сонячні та вітроелектростанції, когенераційні енергоустановки на біопаливі тощо.

Хоча частка відновлюваних джерел електричної енергії продовжує зростати і стрімко розвивається, однак галузь все ще стикається з багатьма проблемами, зокрема, як продовжувати знижувати ВЕЕ та річні приведені витрати, покращити ефективність експлуатації та обслуговування, підтримувати стабільність електромережі, забезпечити безпеку та надійність роботи системи електропостачання що містять ВДЕ.

Ефективне рішення зазначених проблем можливе лише на основи аналізу перспектив розвитку локальних електроенергетичних систем (ЛЕС), які містять ВДЕ, розробки механізмів технічного та організаційного забезпечення, які сприятимуть побудові сучасних системних (схемотехнічних) рішень [1].

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Останнім часом, все більш широко стали вводитися в експлуатацію об'єкти з комплексним використанням декількох ВДЕ, які виробляють вже промислові обсяги електроенергії як для власних цілей з можливістю мережевого підключення, так і для продажу електроенергії в мережу або іншим споживачам [2].

На жаль, на сьогоднішній день при використанні електроустановок на основі альтернативних джерел енергії стикаються із низкою проблем системного характеру. Так, якщо питання оцінки потенціалу сонячної та вітрової енергії досить докладно вирішені, то при підключенні ВДЕ до існуючої мережі виникає задача пошуку місця її підключення. Найчастіше підключення таких джерел генерації до ЛЕС неузгоджене, що призводить до складності керування та прогнозування режимів роботи мереж, зростання складової ВЕЕ, оскільки структура їх перестає бути оптимальною з точки зору мінімуму приведених витрат [3] - [4].

Крім того, збільшення частки ВДЕ в загальному обсязі генерованої електроенергії створює ряд загальносистемних технічних проблем [5] - [7]:

- ускладнення диспетчерського управління електроенергетичною системою;

- кожне ВДЕ має свої динамічні характеристики і можливості управління, що тягне необхідність вирішення проблем електромагнітної сумісності;

- ускладнення системи релейного захисту та автоматики, а також протиаварійного управління;

- збільшення струмів короткого замикання, що призводить до заміни комутаційних апаратів, зміни налаштувань захистів та ін.

Але основна проблема неузгодженого приєднання розрізнених ВДЕ до мережі - це складність керування та прогнозування режимів роботи енергосистеми, пов'язані з перетіканням потужностей у мережі та як наслідок – збільшення втрат електричної енергії [8].

Ключовою проблемою при формуванні оптимальної структури ЛЕС є задача визначення кількості джерел живлення і розподіл за ними приймачів електроенергії, а також обладнання проміжних вузлів навантаження (рівнів розподільчої мережі) з урахуванням розрізнених ВДЕ.

Основні підходи при вирішенні задачі побудови оптимальної структури мережі електропостачання базуються на використанні оціночних та оптимізаційних моделей [9]. Перші служать для визначення техніко-економічних показників для заданого проектувальником варіанту мережі. Другі - для визначення оптимального варіанту конфігурації мережі в межах прийнятих проектувальником припущень відповідно до прийнятого критерієм оптимальності. При цьому в оптимізаційних моделях необхідно враховувати дискретність деяких величин (переріз проводів та кабелів, потужність і кількість трансформаторів, кількість приєднань до ВДЕ та ін.).

Визначальним чинником формування схеми електричної мережі є місце розташування джерела живлення та траси прокладання її ділянок, які отримані в результаті оптимізації топологічної задачі з урахуванням метричних обмежень, зумовлених розташуванням природних та технологічних об'єктів [10].

Щодо установки ВДЕ, то їх потужність обумовлена потенціалом первинної енергії, соціально-екологічними обмеженнями, а також технічними факторами (встановленою потужністю, коефіцієнтом корисної дії, напругою генерації та ін.) [11]. Останні тісно пов'язані з конструктивними та техніко-

економічними показниками мережі.

Існуючі підходи до оцінки ефекту від запровадження ВДЕ засновані на обчисленні наступних техніко-економічних показників [12] - [14]:

- початкові капітальні вкладення для будівництва енергетичного об'єкта;

- вартість землі, що відведена під об'єкт;

- вартість заходів на охорону навколишнього середовища;

- витрати на демонтаж об'єктів при виведенні основних фондів або реконструкції;

- поточні витрати на обслуговування та ремонт;

- амортизаційні відрахування на реновацію основних фондів об'єкта, які є витратною частиною проекту.

Очевидний взаємозв'язок між техніко-економічними показниками ЛЕС та ВДЕ вимагає розробки нової моделі електричної мережі, яка буде покладена у методологічну основу її оптимізації з урахуванням застосування всього ряду техніко-економічних показників альтернативних джерел електроенергії [15].

Аналіз існуючих підходів до формування структури систем електропостачання показав, що існує метод, здатний вирішувати вище перераховані задачі одночасного - це метод потенційних поверхонь [9].

III. МЕТА РОБОТИ

Пропонується застосувати метод потенційних поверхонь з метою формування оптимальних схемотехнічних рішень локальних електроенергетичних систем що містять відновлювані джерела електроенергії з точки зору мінімуму втрат електричної енергії та зниження річних приведених витрат.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРИАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Суть методу потенційних поверхонь полягає в проведенні аналогії між навантаженням приймачів (P_i), розташованих в точках (x_i,y_i), і потенціалами деяких джерел енергії, розташованих у тих же точках. Потенціали цих джерел дорівнюють навантаженням приймачів. При віддаленні від точки розташування приймача потенціал від джерела, розташованого в тій самій точці, зменшуватиметься і в деяких віддалених точках потенціал буде близький до нуля. Сукупність усіх потенціалів джерел енергії утворює потенційну поверхню, яку можна описати потенційної функцією

$$\Pi(x,y)=\sum_{i=1}^{n} P_i \cdot e^{-1\cdot\alpha_{\Delta P_i}\left[(x-x_i)^2+(y-y_i)^2\right]}$$

де: $\alpha_{\Delta Pi}$ – коефіцієнт, який враховує втрати потужності від джерела живлення до приймача:

$$\alpha_{\Delta P_i}=\frac{P_i^{\,2}\cdot\rho}{U^{\,2}\cdot F\,(P_i)}$$

де: P_i - потужність приймача; ρ – питомий опір матеріалу провідника; U_i - напруга; $F(P_i)$- переріз провідника визначається як функція від переданої потужності.

Використання запропонованого коефіцієнта $\alpha_{\Delta Pi}$ дає можливість відразу оцінити ступінь майбутніх ВЕЕ в провідниковому матеріалі під час визначення центру електричних навантажень [9].

Потенційної функція є основою для "потенційного" критерію відбору, за яким на потенційній поверхні, яку утворює функція, визначається точка максимуму потенціалу. Ця точка надалі виступає в ролі центру електричних навантажень. Приймачі, які будуть отримувати живлення від цього центру електричних навантажень за "потенційним" критерієм визначаються як приймачі, які брали участь у формуванні максимуму потенційної функції. Ці приймачі зараховуються до "потенційної" групи.

Аналогічну поверхню можна побудувати і для ВДЕ, де P_i приймає значення рівне величині енергії, що генерується таким джерелом енергії, але зі знаком мінус.

Накладення цих двох поверхонь призводить до зміни координат максимуму, тим самим уточняються координати встановлення джерела живлення.

Важливим моментом у визначенні цих координат є урахування зон неприпустимості прокладання ліній та встановлення джерел живлення.

«Потенційна група» є закінченим структурним елементом майбутньої розподільчої мережі, але той факт, що при формуванні "потенційної" групи були враховані лише розташування приймачів відносно один одного і очікувані ВЕЕ в розподільчій мережі, не дає можливості запровадити "потенційну" групу в майбутню розподільну мережу, так як крім врахованих факторів ще необхідно провести узгодження майбутньої "потенційної" групи з можливим конструктивним виконанням вузла мережі.

Для вирішення цієї задачі використовується "технічний" критерій. "Технічний" критерій відбору виконує функцію узгодження приймачів "потенційної" групи з можливим конструктивним виконанням її джерела живлення. Критерій діє на основі принципу надлишковості "потенційної" групи по відношенню до граничних умов "технічного" критерію. На основі взаємодії "потенційного" і "технічного" критеріїв відбору складається алгоритм методу, принцип роботи якого базується на утворенні зворотних зв'язків, які охоплюють обидва критерії і створюють умови для становлення алгоритму як самоорганізуючої моделі побудови структури мережі [15].

Таким чином, побудову структури ЛЕС, що містить ВДЕ, можна представити у вигляді наступного алгоритму.

На першому етапі будується потенційна поверхня для електроприймачів в режимі споживання.

На другому етапі будується поверхня для режиму,

в яких ВДЕ виробляють електроенергію в мережу.

Потім проводитися накладення цих поверхонь і на сумарній поверхні виділяється максимум функції, в координатах якого і буде розташоване джерело живлення. Важливим моментом у визначенні цих координат є облік зон неприпустимості прокладки ліній і встановлення джерел живлення.

На наступному етапі проводитися відбір електроприймачів за «потенційним» критерієм, а потім за «технічним» з урахуванням дискретності конструктивного виконання елементів.

Згідно з "потенційним" критерієм відбору на потенційній поверхні, визначається точка максимуму потенціалу. Ця точка надалі виступає в ролі центру електричних навантажень. Приймачі, які будуть отримувати живлення від цього центру електричних навантажень зараховують до "потенційної" групи.

«Технічний» критерій відбору виконує функцію узгодження приймачів "потенційної" групи з можливим конструктивним виконанням її вузла живлення.

В результаті відбору електроприймачів за вищевказаними критеріями формується група електроприймачів першого джерела живлення, що виключається з подальшого розгляду при формуванні структури ЛЕС.

Після цього, знову будуються дві (якщо залишилися ВДЕ), або одна (якщо всі ВДЕ приєднані до джерел живлення) потенційні поверхні і здійснюється формування групи електроприймачів другого джерела живлення.

У результаті циклічної дії (до того, поки всі електроприймачі не отримають своє джерело живлення) формується радіальна структура системи електропостачання, після чого здійснюється перевірка можливості організації проміжних джерел живлення [15], для чого «потенційний» та «технічний» критерій відбору згруповані у окрему функцію «ФормуванняСтурктуриМережі», рекурсивний виклик якої для вже сформованого вузла дозволяє виконати спробу сформаувати проміжні вузли навантаження.

На останньому етапі проводиться оцінка можливості (за критеріями мінімуму капітальних витрат і ВЕЕ) заміни окремих ділянок радіальної мережі на магістральні ділянки.

Даний підхід дозволяє не тільки автоматизувати побудову оптимальної структури розподільної мережі, що містить джерела «малої генерації», а й знизити розміри капітальних вкладень при побудові такої мережі за рахунок застосування проміжних вузлів навантаження (визначення їх оптимальної кількості та розташування). Блок схема алгоритму побудови структури ЛЕС що містять ВДЕ подано на рис. 1.

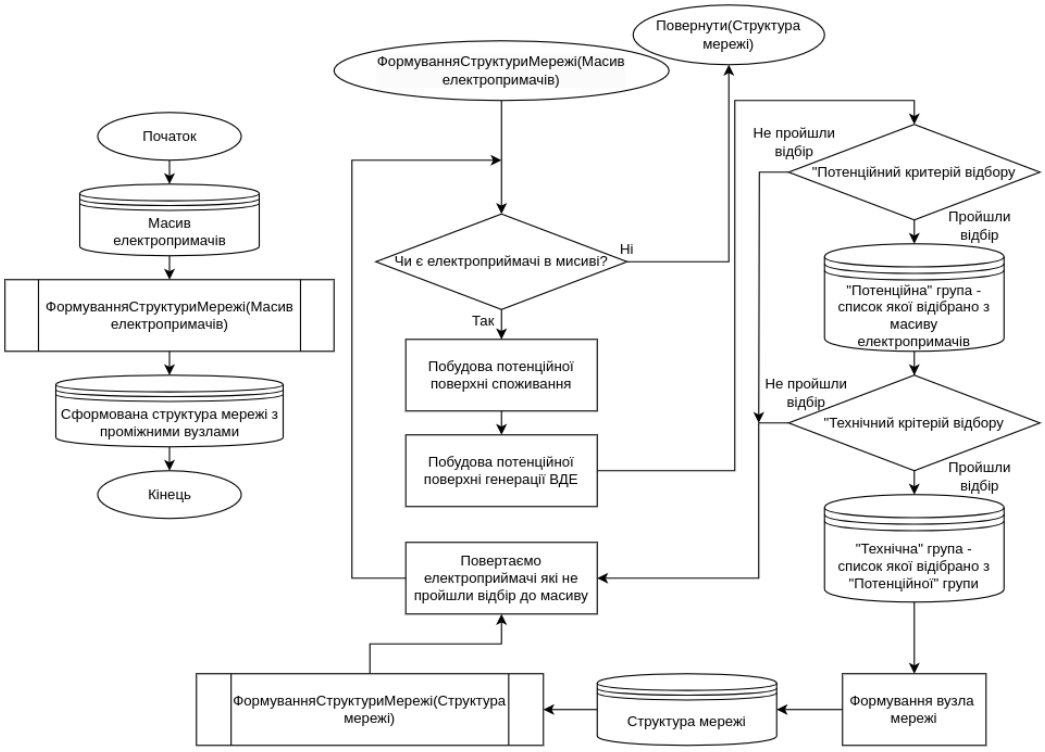

Рисунок 1. Блок схема алгоритму побудови структури ЛЕС що містять ВДЕ.

Запропонований алгоритм був реалізований програмно за допомогою мови програмування Python і пакета математичного обчислення SciPy.

Використання даного алгоритму дозволяє побудувати інженерні методики для попереднього розрахунку структури ЛЕС що містять ВДЕ, оцінити потенціал вже існуючих розподільних мереж, проводити оцінку ефективності їх роботи при модернізації, а також провести оцінку капіталовкладень при реконструкції частини мережі [16].

Результати чисельного моделювання.

Запропонований алгоритм було апробовано на прикладі вирішення задачі реконструкції ділянки міської електричної мережі площею 17 км^2 з розрахунковим навантаженням на повну потужність 31 МВА

Міський район розподілене на 3 мікрорайони, розділених вулицями і проспектами (мікрорайон 1, 2 та 3).

Розрахункові дані навантажень мікрорайонів наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Розрахункові дані навантажень мікрорайонів

Навантаження	Мікрорайон		
	МкР 1	МкР 2	МкР 3
ΣP, кВт	9 437	8 040	9 835
ΣS, кВА	10 070	9 007	11 030

Крім цього к ЛЕС міського району підключена кондитерська фабрика з розрахунковим навантаженням P= 2684,9кВт, S= 3903,7 кВА.

Оскільки в проектованому районі присутні електроспоживачі I категорії, причому вони рівномірно розподілені по всьому району, то для дотримання умов їх безперебійного електропостачання приймаємо такі схеми живлення

Застосовуємо схему «одна секціонована система шин» з автоматикою АВР на секційному вимикачі для джерела живлення РП2-10 кВ мікрорайону, які підключено до ПС 35/10, та також живить РП1 кондитерської фабрики та інші промислово-міськи елктроспоживачі.

Живлення ТП здійснюється від двох кабелів, кожен з яких повинен витримувати навантаження в післяаварійному режимі.

Кількість силових трансформаторів – 2 шт. Потужність яких обирається з врахуванням можливості роботи в післяаварійному режимі будь-якого з трансформаторів.

Сумарну потужність всіх ТП мікрорайону розраховуємо з урахуванням коефіцієнта запасу трансформаторів, який приймаємо рівним Кз = 0,77.

Розміщення підстанцій на території мікрорайону здійснюється якомога ближче до центрів навантаження (центром навантаження будівлі вважаємо геометричний центр його площі).

Розставляємо підстанції і визначаємо їх координати по системі координат, попередньо нанесену на генплан міського району.

Згідно висунутим раніше вимогам по надійності електропостачання підстанції виконуємо двохтрансфоматорними.

Потужність та кількість ТП мікрорайону:

МкР 1: 2 х 1 000 кВА - 6 шт., 2 х 630 кВА - 3 шт.

МкР2: 2 х 1 000 кВА - 4 шт., 2 х 630 кВА - 4 шт.

МкР3: 2 х 1 000 кВА - 7 шт., 2 х 630 кВА - 1 шт.

Джерелом живлення є двотрансформаторна підстанція із трансформаторами 2хТМН – 25000/35. Електричні мережі напругою 35 кВ конструктивне реалізовані повітряними лініями, прокладеними на залізобетонних опорах.

Електричні мережі напругою 10 кВ конструктивне реалізовані кабельними лініями, прокладеними в траншеях.

План електричних мереж напругою 35 кВ (живильна ділянка) та 10 кВ (розподільна ділянка) представлений на рис. 2.

Для реалізації енергозберігаючих заходів під час модернізації ЛЕС міського району було запропоновано встановити сонячні електростанції (СЕС) на дахах комунальних підприємств. Зокрема, на дахах лікарні (1 шт.), поліклінік (2 шт.), шкіл (6 шт.) та дитячих садків (6 шт.) у кожному із трьох мікрорайонів.

Розподіл споживачів по мікрорайонах наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Розподіл споживачів по мікрорайонах

Громадські будівлі	Кількість обєктів		
	МкР 1	МкР 2	МкР 3
Школа	2	1	3
Дитячий сад	2	3	1
Поліклініка	-	-	2
Лікарня	-	1	-

Крім того, на території кондитерської фабрики передбачається встановити когенераційну установку потужністю 300 кВт.

Використання запропонованого алгоритму дозволяє побудувати попередній розрахунок структури ЛЕС що містять ВДЕ, оцінити потенціал вже існуючих розподільних мереж, проводити оцінку ефективності їх роботи при модернізації.

У процесі дослідження було розглянуто такі варіанти електричної мережі:

перший (I) – існуюча система електропостачання міського району із зазначеними вище параметрами;

другій (II) – електрична мережа, яка отримана на основі оптимізації з урахуванням підключення ВДЕ.

Враховано, що будинки комунальних

підприємств на дахах яких будуть встановлені СЕС розподілені нерівномірно на територіях мікрорайонів та підключені кожен до своєї ТП.

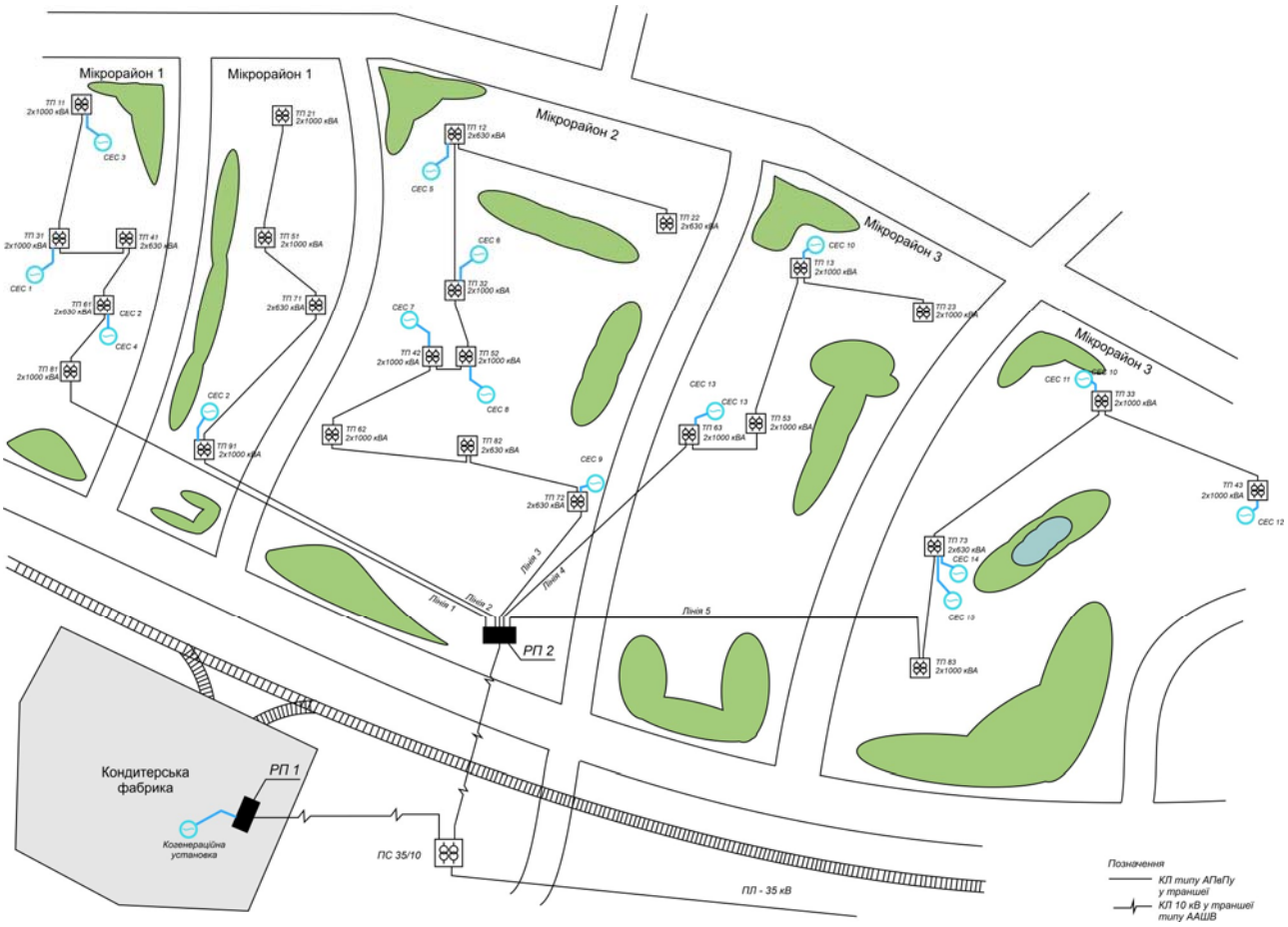

Рисунок 2. План електричних мереж міського району.

Електричне навантаження трансформаторних підстанцій до яких підключені СЕС наведено в табл. 3.

Таблиця 3. Електричне навантаження ТП та потужності СЕС

№ ТП	№ СЕС	І варіант	ІІ варіант	
		$S_{ТП}$, кВА	$P_{СЕС}$, кВт	$S_{ТП}$, кВА
11	3	1538	275	1287,8
61	4	773	275	528
31	1	1358	165	1207
91	2	1107	165	956
32	6	1450	275	1200
52	8	1437	275	1187
72	9	926	275	678
42	7	1174	165	1023
12	5	920	275	673
33	11	1437	275	1187
13	10	1327	165	1176
43	12	11367	165	1216
63	13	1371	250	1143
73	14,15	922	415	559

Результати чисельного моделювання показують, що використання СЕС (15 шт.) загальною потужністю 3415 кВт дозволило знизити коефіцієнти завантаження трансформаторів тих ТП, до яких вони підключаються, що призвело до зниження ВЕЕ на 10,5%.

Втрати електричної енергії у трансформаторах ТП наведено в табл. 4.

Таблиця 4 Втрати електричної енергії у трансформаторах ТП

№ ТП	*Sном*, кВА	І варіант		ІІ варіант	
		Кз, в.од.	$W_{ТП}$, МВт·год	*Кз*, в.од	$W_{ТП}$, МВт·год
11	100	0,77	47,8	0,63	43,4
61	630	0,61	29,5	0,40	26,0
31	1000	0,68	44,6	0,60	42,2
91	1000	0,55	40,8	0,47	38,9
32	1000	0,73	46,2	0,59	33,3
52	1000	0,72	45,9	0,58	42,1
72	630	0,73	32,3	0,52	31,6
42	1000	0,59	41,7	0,50	38,3
12	630	0,73	32,2	0,51	29,4
33	1000	0,72	45,9	0,58	38,2
13	1000	0,66	44,1	0,58	33,3

43	1000	0,68	44,7	0,60	41,9
63	1000	0,69	44,8	0,56	41,8
73	630	0,73	32,5	0,40	32,3
Разом		-	573,0	-	512,8

Крім того, ВЕЕ знижуються також и у розподільчих електричних мережах 0,4 кВ та 10 кВ на 10,1% та 7,3% відповідно. А в мережі живлення 10кВ - до 9%.

V. ВИСНОВКИ

Запропонований на основі спільного використання оціночних та оптимізаційних моделей формалізований метод побудови структури ЛЕС, що містять ВДЕ, дозволяє врахувати зміну режиму роботи таких мереж та оптимізувати їхню структуру з погляду зниження ВЕЕ в мережах при її передачі та розподілі й як наслідок - зменшення річних приведених витрат.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Денисюк С.П., Бєлоха Г.С., Чернещук І.С., Лисий В.В. Світові тенденції впровадження відновлюваних джерел енергії та особливості їх реалізації при відновленні економіки України // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2022. – № 4. – С.7–28.

[2] Праховник А.В. Малая энергетика: распределенная генерация в системах электроснабжения. К.: Освіта України, 2007. – 464 с.

[3] Kjaer S.B., Pedersen J.K., Blaabjerg F. A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules. IEEE Trans. Ind. Appl. 41(5), 1292–1306 (2005).

[4] Meneses D., Blaabjerg F., García O., Cobos J.A. Review and comparison of step-up transformerless topologies for photovoltaic AC-module application. IEEE Trans. Power Electron. 28(6), 2649–2663(2013).

[5] Jenkins N., Allan R., Grossley P., Kirschen D., Strbac G. Embedded Generation. London; IEE, 2000, 273 p.

[6] Barker Ph. P., De Mello R.W. Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 - Radial Distribution Systems // 2000 IEEE PES Summer Meeting, Seattle, WA, USA, July 11-15, 2000, p. 222 - 233.

[7] Papathanassiou S.A., Hatziargyriou N.D. Technical Requirements for the Connection of Dispersed Generation to the Grid // 2001 IEEE PES Summer Meeting, Vancouver, Canada, July 15 - 19, 2001, p. 134 - 138.

[8] Денисюк С.П., Махлін П.В., Шрам О.А., Слинько В.М. Особливості аналізу режимів роботи енергосистеми у районах з альтернативними джерелами електроенергії (вітровими електростанціями) // Техн. електродинаміка. – 2022. – № 1. – С. 41–49.

[9] Федоша Д.В., Заболотный А.П. «Синтез энергоэффективных структур систем цехового электроснабжения радиальной топологии» - Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. - 126с. - ISBN 978-617-529-165-8

[10] V. Dyachenko, D. Fedosha and A. Zabolotnyi, "Algorithm for the Program of Energy Saving for Power Supply System," 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2019, pp. 420-425, doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879915.

[11] А.П. Заболотний, Д.В. Федоша, Ю.В. Даус Побудова структури мереж електропостачання споживачів АПК, що містять джерела «малої генерації» // Вісник ХНТУСГ. Технічні науки «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – 2011. – №. 116. – с. 20-21.

[12] Keshtkar A., Arzanpour S., Keshtkar F. Adaptive Residential Demand-Side Management Using Rule-Based Techniques in Smart Grid Environments. Energy Build. 2016, 133, 281–294.

[13] Espe E., Potdar V., Chang E. Prosumer Communities and Relationships in Smart Grids: A Literature Review, Evolution and Future Directions. Energies 2018, 11 (10).

[14] Verschae R., Kato T., Matsuyama T. Energy Management in Prosumer Communities: A Coordinated Approach. Energies 2016, 9 (7), 562.

[15] V. Dyachenko, D. Fedosha and A. Zabolotnyi, "Algorithm of synthesizing energy effective power supply system of industrial enterprises," 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 2020, pp. 320-325, doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160288.

[16] А.П. Заболотний, Ю.В. Даус Формалізація процедури підключення джерел розподіленої генерації до електричних мереж. // Вісник ТДАТУ «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – 2015. –№. 3. – с.37- 41.

Стаття надійшла до редакції 15.02.2024

ALGORITHM FOR FORMATION OF OPTIMUM SCHEMATIC SOLUTIONS OF LOCAL ELECTRICAL POWER SYSTEMS CONTAINING RENEWABLE SOURCES OF ELECTRIC ENERGY

ZABOLOTNYI A.P. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the power supply of industrial enterprises department of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: zap@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8696-661X;

FEDOSHA D.V. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the power supply of industrial enterprises department of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: fdv@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0683-0561;

DIACHENKO V.V. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the power supply of industrial enterprises department of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: dvv.epp@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8705-9683.

Purpose. *Formation of optimal circuit design solutions of the local mains with renewable power supply with take apart the minimum losses of electrical energy and reduct discounted costs.*

Methodology. *Math model of local mains with renewable power supply. The decomposition and reduction method for the structures of mains that are optimized. The method of potential surfaces. Methods of parametric optimization for the circuit design solutions.*

Findings. *It is noted that although the share of the renewable power supply continues to grow and develop rapidly, the industry still faces many challenges as: reduce electricity losses and annual costs, improve operation and maintenance efficiency, maintain mains stability, ensure safety and reliability of the power supply system with the renewable power supplies.*

It is shown that an effective solution to these problems is possible only on the basis of the analysis of the prospects for the development of the local mains with renewable power supplies, the development of technical and organizational support mechanisms that will contribute to the construction of modern circuit design solutions.

Originality. *It is proposed to apply the potential surface method for create the optimal structure of the local mains with renewable power supplies during its design and modernization, which allows optimizing the mains structure with take apart the minimum losses of electrical energy and reduct discounted costs.*

Practical value. *The algorithm of forming the structure of power supply systems is described, which realizes the simultaneous solution of the tasks of determining the count of the load nodes, distributing power receivers between them, determining the design of power supply, taking into account the discreteness of the design of the system elements.*

The proposed formalized method of building optimal the circuit design solutions of the local mains with renewable power supplies during its design and modernization, which allows optimizing the mains structure with take apart the minimum losses of electrical energy and reduct discounted costs.

In addition, based on the joint use of evaluation and optimization models, the proposed method allows optimizing the loading of cable lines, which leads to a decrease in losses in them.

The results of numerical modeling based on the proposed algorithm are presented on the example of solving the problem of reconstruction of a section of the city mains after added renewable power supplies to it..

Keywords: renewable energy supply; method of potential surfaces; mains structure; load node; electric receiver; loss of electrical energy.

REFERENCES

[1] Denisjuk S.P., Bєloha G.S., Cherneshhuk I.S., Lisij V.V. (2022). Svitovi tendencії vprovadzhennja vidnovljuva-nih dzherel energії ta osoblivosti їh realizacії pri vidnovlenni ekonomiki Ukraїni // Energetika: ekonomika, tehnologії, ekologija. 4, 7–28.

[2] Prahovnik A.V. (2007). Malaja jenergetika: raspredelen-naja generacija v sistemah jelektrosnabzhenija. Osvita Ukraїni, 464.

[3] Kjaer S.B., Pedersen J.K., Blaabjerg F. (2005). A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules. IEEE Trans. Ind. Appl. 41(5), 1292–1306.

[4] Meneses D., Blaabjerg F., García O., Cobos J.A. (2013). Review and comparison of step-up transformerless topologies for photovoltaic AC-module application. IEEE Trans. Power Electron. 28(6), 2649–2663.

[5] Jenkins N., Allan R., Grossley P., Kirschen D., Strbac G. (2000). Embedded Generation. London; IEE, 273 p.

[6] Barker Ph. P., De Mello R.W. (2000). Determining

the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 - Radial Distribution Systems // 2000 IEEE PES Summer Meeting, Seattle, WA, USA, July 11-15, 222 - 233.

[7] Papathanassiou S.A., Hatziargyriou N.D. (2001). Technical Requirements for the Connection of Dispersed Generation to the Grid // 2001 IEEE PES Summer Meeting, Vancouver, Canada, July 15 - 19, 134 - 138.

[8] Denisjuk S.P., Mahlin P.V., Shram O.A., Slin'ko V.M. (2022). Osoblivosti analizu rezhimiv roboti ener-gosistemi u rajonah z al'ternativnimi dzherelami elektroenergiї (vitrovimi elektrostancijami) // Tehn. elektrodinamika. 1. 41–49.

[9] Fedosha D.V., Zabolotnyj A.P. (2017). «Sintez jener-gojeffektivnyh struktur sistem cehovogo jelekt-rosnabzhenija radial'noj topologii» - Zaporizhzhja: ZNTU, 126, ISBN 978-617-529-165-8

[10] V. Dyachenko, D. Fedosha and A. Zabolotnyi, (2019). "Algorithm for the Program of Energy Saving for Power Supply System," 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 420-425, doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879915.

[11] A.P. Zabolotnij, D.V. Fedosha, Ju.V. Daus (2011). Pobudova strukturi merezh elektropostachannja spozhivachiv APK, shho mistjat' dzherela «maloї generacії» // Visnik HNTUSG. Tehnichni nauki «Problemi energozabezpechennja ta energozberezhennja v APK Ukraїni». 116, 20-21.

[12] Keshtkar A., Arzanpour S., Keshtkar F. (2016). Adaptive Residential Demand-Side Management Using Rule-Based Techniques in Smart Grid Environments. Energy Build, 133, 281–294.

[13] Espe E., Potdar V., Chang E. (2018). Prosumer Communities and Relationships in Smart Grids: A Literature Review, Evolution and Future Directions. Energies, 11 (10).

[14] Verschae R., Kato T., Matsuyama T. (2016). Energy Management in Prosumer Communities: A Coordinated Approach. Energies, 9 (7), 562.

[15] V. Dyachenko, D. Fedosha and A. Zabolotnyi, (2020). "Algorithm of synthesizing energy effective power supply system of industrial enterprises," 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), , pp. 320-325, doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160288.

[16] A.P. Zabolotnij, Ju.V. Daus (2015). Formalizacija proceduri pidkljuchennja dzherel rozpodilenoi generacії do elektrichnih merezh. // Visnik TDATU «Problemi energozabezpechennja ta energozberezhennja v APK Ukraїni». 3, 37- 41.