

УДК 621.316.176

**ФОРМУВАННЯ ТОПОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАЛЬНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ ДИСКРЕТНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ Й ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ГЕОМЕТРІЇ****А.О. Парфенюк, П.Ф. Гоголюк**, канд. техн. наук, **Т.М. Гречин**, канд. техн. наукНаціональний університет "Львівська політехніка",  
вул. Степана Бандери, 12, Львів-13, 79013, Україна  
e-mail: AParfen@mail.ru

*Запропоновано метод синтезу електропостачальних систем із застосуванням методів дискретної оптимізації й обчислювальної геометрії. Задача розподілу електричних навантажень між трансформаторними підстанціями представлена задачею оптимального покриття множинами. Для визначення оптимальних місць встановлення трансформаторних підстанцій створено дискретний аналог методу еквіпотенціальних контурів, що враховує довільну геометрію будівель і заборонених зон. Здійснено програмну реалізацію інтелектуальної системи проектування електропостачальних систем. Бібл. 8, рис. 4.*

**Ключові слова:** електропостачальна система, інтелектуальна система проектування, дискретна оптимізація, обчислювальна геометрія.

**Вступ.** Найвідповідальнішим етапом проектування електропостачальної системи (ЕПС), що характеризує її техніко-економічні показники, є синтез топології її мереж [5]. Синтез включає комплекс взаємопов'язаних задач, які потребують одночасного розв'язання. До них належить визначення кількості й потужності трансформаторних підстанцій (ТП), місць їхнього встановлення, розподілу електричних навантажень електроспоживачів (ЕП) між ними та пошуку оптимальної геометрії трас прокладання електричних ліній (ЕЛ). Досі ці процедури не мають чіткого математичного формулювання й однозначної алгоритмічної формалізації [2, 7]. Основні складності задачі синтезу схем ЕПС пов'язані з наявністю дискретних змінних, що визначаються фізичними властивостями проєктованих об'єктів. Зокрема, конфігурація трас прокладання ЕЛ має враховувати складну форму елементів території об'єкта (будівель, заборонених ділянок), оскільки зазвичай довжина кабельних ліній є співмірною з розмірами завад, які вони огинають. Також виникає необхідність урахування геометричних розмірів пунктів розподілу електроенергії (ПРЕ), для того щоб знайти їхнє бажане місце розташування й тип конструкційного виконання. Особливо дискретність змінних такої оптимізаційної задачі проявляється під час розподілу навантаження ЕП між різними ТП, де в окремих випадках існує складність вибору варіанта, який задовольняв би технічним вимогам й обмеженням, не кажучи вже про його економічну ефективність. За таких причин застосування методів лінійної й нелінійної оптимізації для розв'язання задачі формування топології мережі зумовлює суттєві похибки та не може гарантувати формування оптимальних варіантів ЕПС. На практиці цей етап здійснюється в ручному режимі та, як наслідок, серед низки проектних процедур чинної технології проектування ЕПС характеризується досить низьким рівнем інтелектуальної автоматизації.

Метою роботи є розроблення ефективного методу синтезу схем ЕПС загального призначення для підвищення ефективності функціонування інтелектуальних систем проектування ЕПС. Для цього необхідно: а) на основі засобів дискретної математики здійснити формалізацію та наступну алгоритмізацію задачі синтезу топології ЕПС; б) вибрати й обґрунтувати методи реалізації окремих проектних процедур; в) здійснити програмну реалізацію методів і провести аналіз якості синтезованих варіантів ЕПС.

**Результати роботи.** Вважаємо, що відомий перелік ЕП промислового об'єкта  $O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$  із заданими повними розрахунковими потужностями  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ . Визначені прийняті до встановлення дисконтована вартість ТП  $B_{ts}$  і довжинна дисконтована вартість трас ЕЛ  $B_o = f(s)$  як функція від їхньої потужності. Відомі також фізичні розміри ТП  $w_{ts}, h_{ts}$  та сукупність точок, якими описується геометрія елементів території промислового

об'єкта: будівель, заборонених ділянок. Прийmemo такі обмеження: допустимий діапазон завантаження ТП  $S_{don} \in [S_{min}...S_{max}]$ , множини точок, що визначають можливі місця встановлення ТП і ділянок трас прокладання ЕЛ,  $R_{dp} = f(x, y) \in \{1, 0\}$ . Необхідно визначити кількість ТП, здійснити розподіл навантаження між ними, знайти координати оптимальних місць встановлення ТП та геометрію трас прокладання ЕЛ.

На основі засобів дискретної математики здійснимо формалізацію задачі формування топології ЕПС у вигляді послідовності таких проектних процедур (рис. 1):

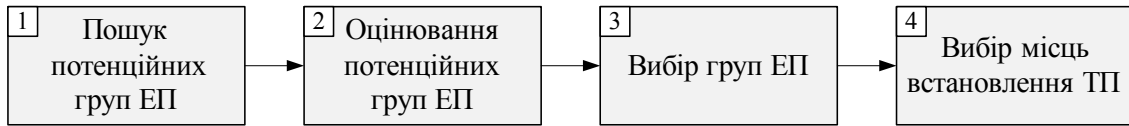


Рис. 1

1. Пошук потенційних груп ЕП, здійснюється шляхом відбору множин ЕП  $T = \{T_1, T_2...T_m\} \subseteq O$ , які можуть отримувати живлення від однієї ТП з огляду на допустимий діапазон завантаження:

$$\forall T_i \in T, S_{min} < \sum_{j=1}^{|T_i|} Re(\dot{s}_j) < S_{max}. \quad (1)$$

2. Оцінювання потенційних множин ЕП  $T = \{T_1, T_2...T_m\}$  виконується з метою прогнозу витрат на встановлення для них ТП:  $B = \{b_1, b_2...b_m\} \in R$ . Зважаючи на значну кількість оцінювальних множин, вартість для них із достатньою точністю та прийнятною швидкістю можна отримати шляхом припущення про розташування ТП у геометричному центрі одного з ЕП множини та розв'язування як задачі пошуку ваги мінімального кістякового дерева  $E$  обмеженого ступеня:

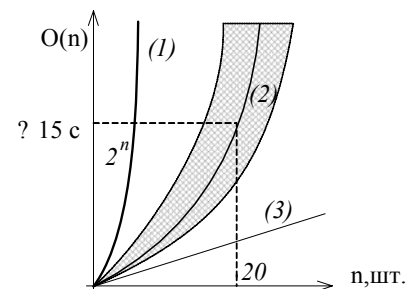
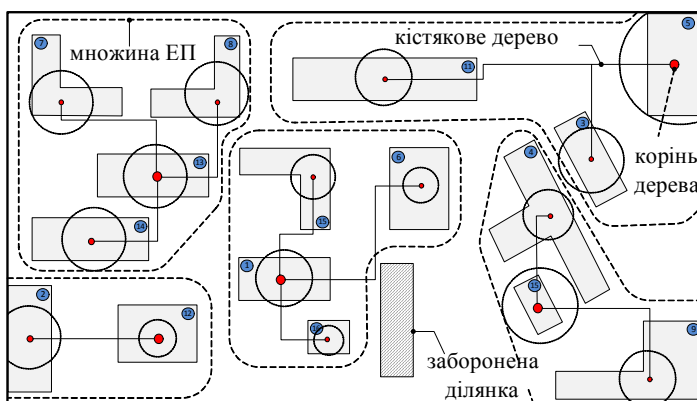
$$b_i = \sum_{(u,v) \in E} B_o(s) \cdot l_{uv}, \quad (2)$$

де  $l_{uv}$  – попередньо обчислена довжина шляху між центрами навантажень  $u$ - та  $v$ -го ЕП із урахуванням огинання від завад території об'єкта (будівель, заборонених ділянок).

3. Вибір груп ЕП  $I \subseteq \{1, 2...m\}$  реалізується як розв'язання задачі оптимального покриття множинами:

$$\sum_{i \in I} b_i \rightarrow \min; \bigcup_{i=1}^m T_i = O. \quad (3)$$

У результаті отримаємо кількість ТП й розподіл навантажень між ними, враховуючи обмеження на можливість живлення окремого ЕП тільки від однієї ТП і мінімальну вартість спорудження ЕПС у цілому. Приклад оптимального покриття множинами ЕП промислового об'єкта показаний на рис. 2 а.



1 - повний перебір варіантів, 2 - метод динамічного програмування та метод віток і меж. 3 - евристичні алгоритми

Рис. 2

4. Визначення оптимальних місць встановлення ТП для кожної з груп ЕП виконується незалежно шляхом мінімізації значення дисконтованих витрат на спорудження трас ЕЛ:

$$B_g(x, y) = \sum_{i=1}^n B_{oi}(s_i) \cdot l_{Ei}(x, y) + B_{TS} \rightarrow \min, R_{dp}(x, y) \neq 0, \tag{4}$$

де  $l_{Ei}(x, y)$  – довжина траси ЕЛ для живлення  $i$ -го ЕП групи як функція від координат розміщення ТП;  $n$  – кількість ЕП у групі.

Процедури (1), (2) і (3) є класичними задачами теорії складності обчислень. Причому для (1) і (3) не існує поліномних (ефективних) алгоритмів вирішення [6]. Тому на сьогодні задача формування структури мереж ЕПС (зокрема, задача розподілу навантажень між ТП), здійснюється на основі використання евристичних методів (генетичних алгоритмів [3], нейронних [8] мереж тощо), які не гарантують оптимального результату. Проблеми використання точних методів дискретної оптимізації до сьогодні були пов’язані з недостатньою обчислювальною потужністю персональних комп’ютерів у минулому та з відсутністю ефективних теоретичних засад, зокрема розвинутої теорії NP-складних задач. Виявилося, що використання точних методів дискретної оптимізації, методу динамічного програмування та методу віток і меж, дає змогу (рис. 2 б) здійснити на комп’ютері синтез квазіоптимального варіанта ЕПС за кількості до 25 ЕП і рекомендованих діапазонів завантажень ТП –  $S_{дон} \in [0.6...0.7, 0.7...0.85, 0.85...1]$  за час до 30 с, що для практичних потреб є достатньо. Докладна реалізація цих методів розглянута в [2].

Процедура (4) на практиці виконується зазвичай у ручному режимі. Також використовуються методи безумовної оптимізації [2] та метод екіпотенціальних контурів [7]. Такі методи використовують нелінійну цільову функцію витрат на спорудження ЕПС від розташування ТП, що унеможливує врахування можливих ділянок прокладання трас ЕЛ і розташування ПРЄ. Для вирішення цієї проблеми пропонується розвинути метод екіпотенціальних контурів шляхом реалізації його в дискретній формі на основі такого алгоритму:

1. Спочатку здійснюється розбиття території об’єкта на ділянки розміром (1×1) м. За допомогою методу трасування променя встановлюється належність окремих ділянок тим чи іншим елементам території об’єкта (забороненим зонам, будівлям). У результаті формується планарний граф, на якому здійснюватиметься пошук геометрії трас прокладання ЕЛ.

2. На основі отриманого графа за допомогою алгоритму Дейкстри [8] для кожного ЕП об’єкта формуються карти витрат  $L_{EL1}...L_{EL,m}$  як двовимірні масиви  $l_{ELi} = f(x, y) \in R$ , кожний елемент якого вказує на довжину шляху від точки із заданими координатами  $x, y$  до ЕП. На рис. 3 а зображений приклад візуалізації карти витрат для одного ЕП групи в формі екіпотенціальних поверхонь.

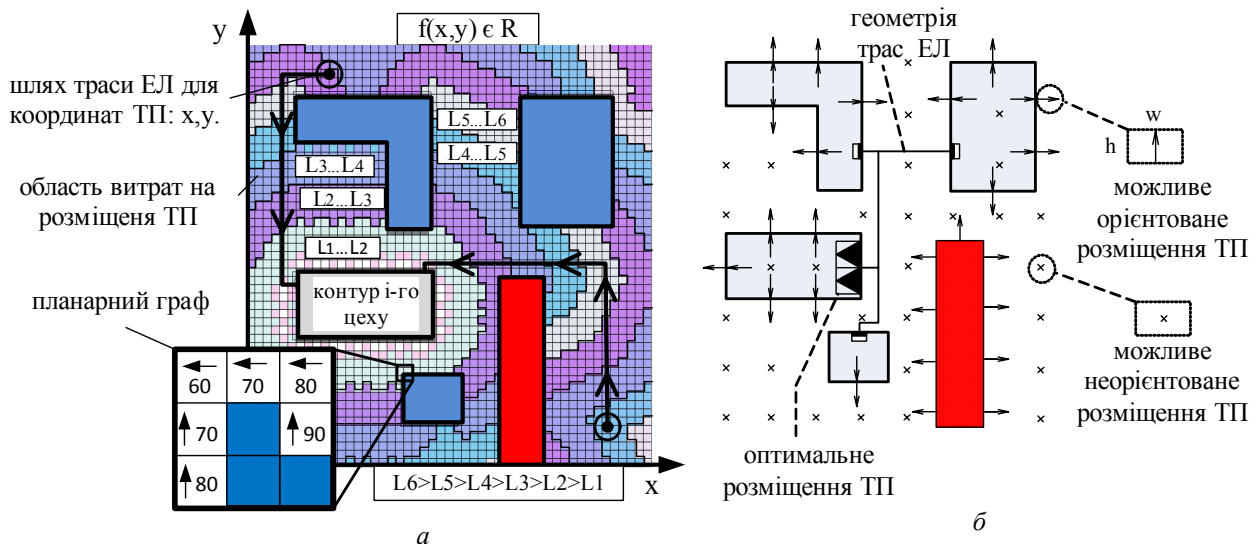


Рис. 3

Особливістю такого підходу є те, що під час реалізації алгоритму Дейкстри вираз оцінювання сусідніх вершин при обході графа дає змогу врахувати штрафи за згини, формуючи бажану ортогональну структуру геометрії трас прокладання ЕЛ, за будь-якої геометрії завади. Формування карт витрат відповідно до часової складності алгоритму Дейкстри:  $O(n \cdot \log(n))$ , здійснюється потягом 20-30 мс і дає змогу за константний час (миттєво) для заданих координат розташування ТП  $x, y$  отримати кількісні витрати на спорудження ЕПС як для одного ЕП  $l_{ELi}(x, y) \cdot Bo_i(s_i)$ , так і для їх множини:  $B(x, y) = l_{EL1}(x, y) \cdot Bo_1(s_1) + \dots + l_{ELn}(x, y) \cdot B_n(s_n)$ , що одержують живлення від однієї ТП.

3. Пошук оптимального місця встановлення ТП здійснюється шляхом перебору можливих позицій їхнього розташування, тобто розв'язується як оптимізаційна задача за лінійний час. Для цього можливі місця встановлення ТП попередньо визначаються за допомогою елементарних методів обчислювальної геометрії й подаються у вигляді множини відрізків (рис. 3 б). Крок дискретності при цьому є співмірним з фізичними розмірами ПРЕ. Поблизу будівель і заборонених ділянок можливі місця встановлення ПРЕ приймають з орієнтацією вздовж ліній їхніх контурів, оскільки розмірами цих ділянок не можна знехтувати, тоді як в інших місцях території об'єкта вони мають неорієнтований стан. Це дає змогу для окремих місць неявно врахувати відповідне конструкційне виконання ТП (вбудоване, прибудоване чи окреме).

На основі запропонованого методу формування топології ЕПС здійснена програмна реалізація мовою С++ версії інтелектуальної системи проектування ЕПС. Розглянемо особливості функціонування запропонованого методу на такому прикладі. На рис. 4 а зображений варіант синтезованої ЕПС з сімома ЕП.

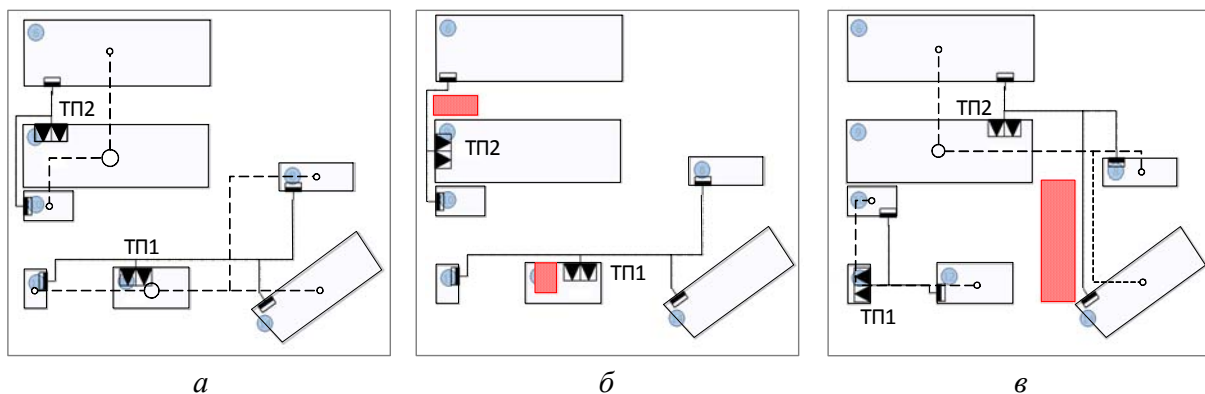


Рис. 4

Цим методом визначено дві групи ЕП (кістякові дерева позначені штриховою лінією), виконано вибір оптимальних місць встановлення ТП і здійснено пошук геометрії трас прокладання ЕЛ. У першому випадку (рис. 4 б) на територію промислового об'єкта нанесено заборонені ділянки. Позиція ТП1 змінюється в зв'язку з неможливістю її знаходження на забороненій ділянці, а позиція ТП2 змінюється з метою мінімізації витрат на прокладання трас ЕЛ. У другому випадку (рис. 4 в) внесена суттєва завада, що здійснює зміну  $l_{uv}$  на етапі попереднього оцінювання множини (2), і, як наслідок, оптимальному розподілу навантажень відповідають нові групи ЕП, інші місця встановлення ТП й інша геометрія трас ЕЛ. Отже, запропонований метод дає змогу ефективно здійснити вирішення комплексу взаємопов'язаних задач, що формують топологію ЕПС. Зазначимо, що за коректної вхідної інформації алгоритм формування топології ЕПС у складі інтелектуальної системи проектування без участі проектувальника формує якісні проектні вирішення протягом кількох секунд за кількості об'єктів не більше 25 одиниць, що підтверджує практичну ефективність запропонованого методу. Формулювання задачі у наведеній вище формі дає змогу застосувати її багаторазово за різних типів обмежень і проектувати ЕПС складної структури.

**Висновки.** 1. Створено метод синтезу топології електропостачальних систем загального призначення на основі методів дискретної математики й обчислювальної геометрії шля-

хом зведення проблеми формування топології мережі до задач визначення мінімального кістякового дерева та пошуку оптимального покриття множинами.

2. Розвинуто метод екіпотенціальних контурів для визначення оптимальних місць встановлення трансформаторних підстанцій і пошуку трас прокладання електричних ліній шляхом реалізації його в дискретній формі.

3. Обґрунтовано доцільність і ефективність застосування точних методів дискретної оптимізації – динамічного програмування й віток і меж – для синтезу електропостачальних систем загального призначення.

1. Авдєєв І.В., Заболотний А.П., Федоша Д.В., Теліпайло С.А., Мамбаєва В.С. Розвиток методу екіпотенціальних контурів для проектування розподільчої мережі // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2009. – № 637. – С. 3–7.
2. Гоголюк П.Ф., Гречин Т.М., Парфенюк А.О. Синтез електропостачальних систем промислових об'єктів на основі методів дискретної оптимізації // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2013. – № 763. – С. 27–33.
3. Тарасенко В.В. Определение возможных путей развития системы электроснабжения студгородка ЮУрГУ на основе генетического алгоритма // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2010. – Вып. 14. – № 32(208). – С. 16–19.
4. Cormen T., Leiserson, C., Rivest, R., Stein, C. Introduction to Algorithms // 3rd ed., MIT Press, 2009. – 232 p.
5. El-Hawary, Mohamed E. Electrical Power Systems: Design and Analysis, Revised Printing // Wiley-IEEE Press, 1995. – 808 p.
6. Garey, M. R., Johnson, D. S., Klee V., ed. Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness. San Francisco, Calif.: W. H. Freeman and Co, 1979. – 338 p.
7. Grinberg I., Fuller D., Gogolyuk P., Gretchyn T. Principles of Development and Organization of Infographical, Mathematical, and Software Components for Engineering Design and Automation Systems // 5<sup>th</sup> International Conference on Engineering Design and Automation, Las Vegas, Nevada, USA, 2001. – P. 164-168.
8. Hayashi Y., Iwamoto S., Furuya S., Liu C.-C. Efficient determination of optimal radial power system structure using Hopfield neural network with constrained noise // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1996. 11(3). – P. 1529–1535.

УДК 621.316.176

**А.О. Парфенюк, П.Ф. Гоголюк**, канд. техн. наук, **Т.М. Гречин**, канд. техн. наук  
 Национальный университет "Львівська політехніка",  
 ул. Степана Бандеры, 12, Львов-13, 79013, Украина

#### **Формирование топологии систем электроснабжения на основе методов дискретной оптимизации и вычислительной геометрии**

*Предложен метод синтеза систем электроснабжения с применением методов дискретной оптимизации и вычислительной геометрии. Задача распределения электрических нагрузок между трансформаторными подстанциями представлена задачей оптимального покрытия множествами. Для определения оптимальных мест установки трансформаторных подстанций создан дискретный аналог метода экипотенциальных контуров, учитывающий произвольную геометрию зданий и запрещенных зон. Осуществлена программная реализация интеллектуальной системы проектирования систем электроснабжения. Библи. 8, рис. 4.*

**Ключевые слова:** система электроснабжения, интеллектуальная система проектирования, дискретная оптимизация, вычислительная геометрия.

**A.O. Parfenyuk, P.F. Gogolyuk, T.M. Hrechyn**

Lviv Polytechnic National University,  
 Bandrera str., 12, Lviv, 79013, Ukraine

#### **Formation of the topology of electrical power distribution systems on the basis of methods of discrete optimization and calculable geometry**

*The method of synthesis of the electrical power distribution systems based on the methods of discrete optimization and calculable geometry is proposed. The distribution of electrical loads between transformer substations presented as the problem of optimal coating sets. To determine the optimal siting of transformer substations created a discrete analogue of the equipotential contours into account arbitrary geometry of buildings and prohibited zones. Realizable software implementation of the intelligent CAD of electrical power distribution systems. References 8, figures 4.*

**Key words:** electrical power distribution systems, intellectual CAD, discrete optimization, calculable geometry.

Надійшла 13.07.2015

Received 13.07.2015

Остаточний варіант 29.04.2016

Accepted 29.04.2016