

СИНТЕЗ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАЛЬНИХ СИСТЕМ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ ДИСКРЕТНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

© Гоголюк П.Ф., Гречин Т.М., Парфенюк А.О., 2013

Запропоновано метод синтезу електропостачальних систем промислових об'єктів із застосування методів дискретної оптимізації й обчислювальної геометрії. Здійснена програмна реалізація інтелектуальної автоматизованої системи проектування електропостачальних систем.

Ключові слова: електропостачальна система, автоматизована система проектування, дискретна оптимізація.

The method of synthesis of the power distribution systems of industrial objects offers from application of methods of discrete optimization and calculable geometry. Realizable programmatic realization of SmartCAD of planning of the power distribution systems.

Key words: power distribution system, design automation system, discrete optimization.

Постановка проблеми

Визначення оптимальних місць розташування трансформаторних підстанцій (ТП), розподіл навантажень між ними, пошук оптимальних трас прокладання електричних ліній є основою для побудови економічно ефективної електропостачальної системи (ЕПС) промислового об'єкта [1–4]. Досі ці проектні процедури не мають чіткого математичного формулювання й однозначної алгоритмічної формалізації в умовах обмежених можливостей обчислювальних засобів. Серед низки проектних процедур чинної технології проектування ЕПС вони мають найнижчий рівень автоматизації [2–4]. Це зумовлено істотною складністю загальної оптимізаційної задачі синтезу схеми ЕПС промислового об'єкта через наявність дискретних змінних, що визначається властивостями проєктованих об'єктів.

Аналіз останніх досліджень

Під час створення оптимальних проєктів ЕПС застосовуються методи лінійного та нелінійного програмування, що вимагає прийняття істотних спрощень під час формування оптимізаційної математичної моделі проєктованого об'єкта [2, 3]. Тому спроба залучити ці методи під час пошуку оптимальних проєктних вирішень ЕПС промислових об'єктів зумовлює істотні відхилення від можливих оптимальних проєктних вирішень. Це зумовлено особливостями, які необхідно враховувати точніше. Зокрема конфігурація трас прокладання електричних ліній має враховувати складну форму елементів території об'єкта, оскільки в окремих випадках довжина кабельних ліній є співвимірною з розмірами завод, які вони обгинають. Також виникає необхідність врахувати геометричні розміри пунктів розподілу електроенергії (ПРЕ) для того, щоб знайти їхнє бажане місце розташування. Особливо дискретність змінних такої оптимізаційної задачі проявляється під час розподілу навантаження між різними ПРЕ, де в окремих випадках існує складність вибору варіанта, який задовольняв би технічні вимоги й обмеження, не кажучи вже про його економічну ефективність. Із наведених вище причин на практиці цей етап проєктувальник виконує вручну, що в силу складності такої задачі не завжди забезпечує створення квазіоптимального проєктного вирішення. Наявні спеціалізовані автоматизовані системи проектування (АСП) ЕПС, що ґрунтуються на багатоваріантній технології проектування за ітераційним принципом, також не забезпечують створення оптимального проєкту ЕПС [2–4]. Тому проєктувальник змушений багаторазово

коригувати результати проектних процедур і виконувати значну кількість уточнень шляхом інтерактивної взаємодії з АСП. Така технологія автоматизованого проектування є евристичною й вимагає від проектувальника когнітивних здібностей, що стало однією з причин їх недостатньо широкого застосування. Наявні евристичні методи синтезу схем ЕПС (зокрема генетичні алгоритми) через згадані вище специфічні особливості електропостачання промислових об'єктів є неефективними в цій сфері.

Задачі досліджень

Розроблення ефективного методу синтезу схем ЕПС промислових об'єктів з метою підвищення ефективності функціонування інтелектуальних АСП ЕПС.

Виклад основного матеріалу

Для покращання ефективності функціонування методу синтезу схем ЕПС належно впорядкуємо та формалізуємо вхідну інформацію. Вважаємо що задана множина цехів промислового об'єкта $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$. Для кожного цеху $r_i \in R$ відома активна P_i й повна S_i розрахункові потужності. Для ТП вибрана номінальна потужність їхніх трансформаторів S_{min} залежно від питомої густини електричного навантаження основних цехів і діапазон коефіцієнта завантаження трансформаторів $\beta_{min} \leq \beta_i \leq \beta_{max}$ з урахуванням категорії надійності електроспоживачів, сукупність точок, якими описується геометрія цехів і заборонених зон на території промислового об'єкта. За типом улаштування ТП приймаються вбудованими й розташованими біля стіни цеху. На початковому етапі синтезу ЕПС електричні лінії беруть радіальними.

Запропонуємо формальний опис алгоритму, яким користується проектувальник під час ручного формування схеми ЕПС промислового об'єкта. В узагальненому вигляді його можна подати такою сукупністю проектних процедур:

1) пошук груп цехів промислового об'єкта $T = \{T_1, T_2, \dots, T_k\} \in R$, що можуть отримувати живлення від ТП рекомендованої номінальної потужності та її допустимого діапазону завантаження:

$$\beta_{min} S_H \leq \sum_{T_i \in R} w_{ij} P_i \leq \beta_{max}, \quad \text{де } w_{ij} = \{1, 0\}; \quad (1)$$

2) оцінка доцільності встановлення ТП для знайдених груп цехів з метою здійснення прогнозу майбутніх витрат, які необхідні для спорудження цехової ЕПС. Цю інформацію запишемо так, що у відповідність до кожної знайденої підмножини цехів $T = \{T_1, T_2, \dots, T_k\}$ встановлюється відповідне числове значення $B = \{B_1, B_2, \dots, B_k\}$, що достовірно характеризує дисконтовані витрати на спорудження цехової ЕПС;

3) пошук комбінації знайдених груп цехів, за яких виконуються такі умови:

- всі цехи промислового об'єкта входять у ці групи, один цех може входити тільки до одної з них;
- результівна вартість ЕПС усіх груп має бути мінімальною.

Алгоритм виконання цієї процедури можна інтерпретувати як розв'язання задачі оптимального розбиття множин, а саме:

$$\sum_{i=1}^k x_i B_i \rightarrow \min, \quad \text{де } x_i \in \{0, 1\}. \quad (2)$$

$$X_i \cap X_j = \emptyset \quad \forall i \neq j, \quad \bigcup_{i=1}^k x_i T_i \equiv R; \quad (3)$$

4) синтез ЕПС для сформованих груп цехів. За відомого розподілу навантажень між ТП визначаються оптимальні координати розташування ТП, пунктів розподілу електроенергії нижчої напруги та здійснюється пошук оптимальних трас прокладання кабельних ліній. За вищевказаного

формулювання задача синтезу схеми ЕПС може бути ефективно вирішена на основі детермінованого алгоритму. Така декомпозиція практично не зменшує ймовірності пошуку квазіоптимального варіанта ЕПС, оскільки послідовна реалізація цих процедур є варіацією спрямованого перебору можливих варіантів ЕПС. Це своєю чергою зумовлює істотні складнощі, оскільки процедури 1 і 3 можна інтерпретувати як задачі комбінаторної (дискретної) оптимізації, що належать до класу важко розв'язуваних NP-складних задач [5, 7]. Отже, пошук оптимального варіанта ЕПС за певної значної кількості електроприймачів і за прийнятний час є практично недоцільним. На початку досліджень була спроба залучити швидкі ймовірнісні й евристичні методи для їхнього вирішення. Але навіть із візуальної оцінки їхнього застосування здебільшого синтезовані варіанти схем ЕПС не були оптимальними. Застосування методу безпосереднього перебирання варіантів через обчислювальну складність й часову тривалість також виявилось неефективним, оскільки можливість його застосування обмежувалася кількістю не більше 6–8 цехів промислового об'єкта.

Установлено, що в таких випадках доцільне застосування методів дискретної оптимізації, за допомогою яких можливо відшукати оптимальний розв'язок комбінаторної задачі за істотно більшої кількості цехів. Використання методів дискретної оптимізації обґрунтовано шляхом оцінки ефективності програмної реалізації запропонованого методу. Для практичних потреб достатньо, щоб створений алгоритм синтезу квазіоптимального варіанта ЕПС виконувався за час до однієї хвилини за кількості електроспоживачів, що не перевищує 20 об'єктів.

Для наведеної декомпозиції задачі синтезу ЕПС в процедурах, що є NP-складними задачами (1 і 3), зосереджено вирішення процедури формування навантаження на ТП, а в інших процедурах (2 і 4) – визначення оптимальних місць встановлення ПРЕ. Тому для спрощення розуміння реалізації цих процедур є сенс розглянути їх окремо.

Група процедур для формування електричного навантаження на ТП. Для відшукування оптимальних розв'язків задач комбінаторної оптимізації найуживанішими є метод гілок і меж та метод динамічного програмування [6, 7]. Оскільки за допомогою першого можливо істотно скоротити кількість варіантів, які необхідно перебрати, а за допомогою другого – тривалість обчислень, що необхідно виконати для кожного варіанта. Але для того, щоб стало можливим їхнє безпосереднє застосування, необхідно певним чином організувати операцію розбиття множин допустимих значень конкретної оптимізаційної задачі на неперетинальні підмножини.

З огляду на зручність алгоритмічної реалізації, у роботі це здійснено на основі моделі дерева прийняття рішень (рис. 1).

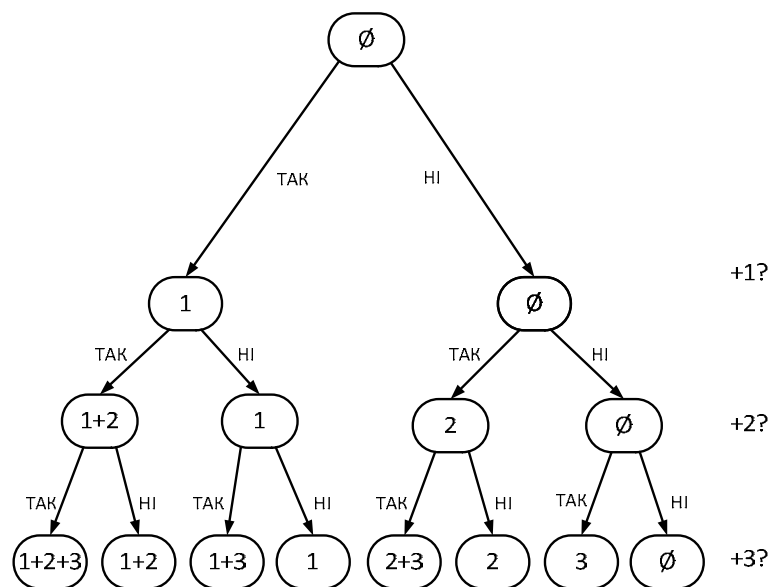


Рис. 1. Модель дерева прийняття рішень

На i -му кроці побудови такого дерева описується рішення щодо включення i -го елемента до комбінаторної варіації. Лівий вузол по гілці відносно батьківського відповідає включенню даного елемента ($x=1$), правий – ні ($x=0$). У результаті формування такого дерева його листки будуть відповідати кінцевим вирішенням – можливим комбінаторним варіаціям заданих елементів. Кожна варіація однозначно визначатиметься конкретним шляхом від листка до кореня дерева. На основі вищенаведеного принципу формування дерева прийняття рішень, запишемо реалізації розрахунку конкретних оптимізаційних задач етапу 1 і етапу 3.

Етап 1. Для кожного вузла дерева задамо атрибут – розрахункове навантаження P_k можливої сформованої групи цехів. Тоді на i -му кроці побудови дерева описуватиметься прийняття рішення щодо можливості включення до варіативної комбінації i -го цеху промислового об'єкта з розрахунковою активною потужністю P_i .

Рекурентне співвідношення під час побудови дерева записується в такому вигляді:

$$P_{k+1} = P_k + xP_i. \quad (4)$$

Умова, згідно з якою гілка дерева відсікається, має вигляд

$$P_k < \beta_{\max} S_{\text{тнн}}. \quad (5)$$

Для кращого функціонування процедури оптимізації цехи попередньо впорядковуються за розрахунковою потужністю й формування дерева розпочинається з тих цехів, яким відповідає більша потужність. Оптимальним варіантам оптимізаційної задачі відповідають листки дерева, для яких атрибут електричного навантаження становить

$$P_k > \beta_{\min} S_{\text{тнн}}. \quad (6)$$

Етап 3. Для кожного вузла дерева задаємо атрибути: вартість можливої сформованої ЕПС промислового об'єкта B_k і бінарний вектор-стовпець інцидентності T_k , що відображає наявність певних цехів у її складі. Тоді на i -му кроці побудови дерева описується прийняття рішення про можливість включення до комбінаторної варіації з визначеним складом T_i (етап 1) і оціненою (етап 2) вартістю спорудження цехової ЕПС B_i i -ї групи цехів.

Рекурентні співвідношення під час побудови дерева записують в такому вигляді:

$$\begin{aligned} B_{k+1} &= B_k + xB_i; \\ T_{i+1} &= T_i \cup (xT_i). \end{aligned} \quad (7)$$

Умова, згідно з якою ліва гілка дерева відсікається, має вигляд:

$$\begin{aligned} T_k \cap (x_i T_i) &\neq \emptyset; \\ B_k &\leq B_{\min}. \end{aligned} \quad (8)$$

де B_{\min} – вартість найдешевшої варіації, що покриває усі цехи R промислового об'єкта.

Оптимальний варіант оптимізаційної задачі визначається за листком дерева, атрибут якого відповідає повному покриттю цехів промислового об'єкта, а саме: $T_k \equiv R$.

Група процедур для визначення оптимальних місць встановлення ПРЕ. Як підготовчий етап формуються матриця: $L = \left\| l_{ij} \right\|$ попарних відстаней між центрами навантажень (ЦН) цехів промислового об'єкта. Шлях між ЦН навантажень конкретної пари цехів знаходять так, що непрохідними елементами є заборонені зони, які накладаються на територію промислового об'єкта й інші цехи, що не належать до цієї пари (рис. 2, а). За відсутності інформації про конкретні координати ЦН приймаються їхні геометричні центри для визначення яких використовується метод триангуляції (розбиття на трикутники). Для пошуку шляхів використаний алгоритм пошуку на графах A-star [8]. Простір, у якому здійснюється пошук, є планарним графом, що отримується дискретизацією території промислового об'єкта на квадрати розміром (1x1) м. Отже, структура трас кабельних ліній є прямокутною. Належність окремих вершин планарного графа тим чи іншим елементам території промислового об'єкта визначається за допомогою методу трасування променя [9]. На

підготовчому етапі обчислюються значення довжинних дисконтованих витрат на спорудження електричних ліній до окремих електроспоживачів B_{oi} і для ТП заданої номінальної потужності $B_{тпн}$.

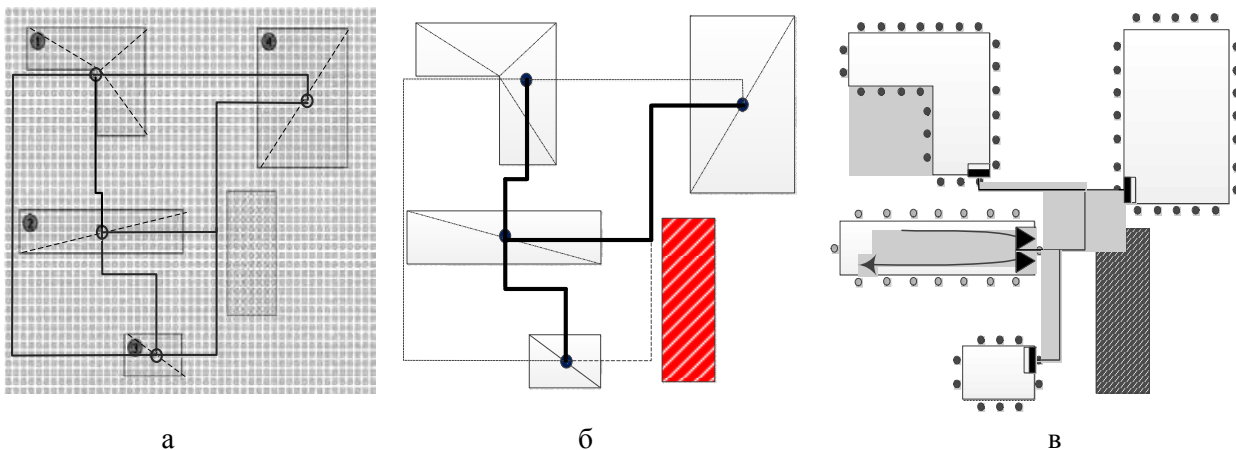


Рис. 2. Принцип визначення оптимальних місць розташування ППЕ

Етап 2. Зважаючи на значну кількість можливих груп цехів (етап 1) оцінка вартості спорудження для них цехової ЕПС повинна здійснюватися максимально швидко. Встановлено, що вона може бути отримана шляхом припущення про можливість розміщення ТП у центрі навантаження одного із цехів певної групи (рис. 2, б). Тоді значення дисконтованих витрат на її спорудження розраховується на основі раніше обчислених змінних, а саме:

$$B_k = \min \left(\bigcup_{j=1}^n \sum_{i=1; i \neq j}^n B_{oi} l_{ij} \right) + B_{тпн}. \quad (9)$$

Етап 4. Оскільки кількість цехових груп, що покривають множину електроприймачів промислового об'єкта є незначною, то є сенс застосувати повний перебір варіантів. За контурами будівель цехів із дискретністю розмірів ППЕ формується список можливих місць розташування ТП і РП НН. Потім здійснюється перебір за можливими місцями встановлення ТП (рис. 2, в). Із кожної позиції ТП знаходяться найближчі відстані до можливих місць встановлення РП НН інших цехів. Для цього використовується алгоритм пошуку на графах Дейкстри [6]. Алгоритм Дейкстри дає змогу знайти мінімальну відстань від початкової точки до однієї з інших кінцевих точок. У такому разі початковою точкою є вхід у ТП, а кінцевими – точки входу РП НН. Коли найкоротші шляхи прокладання електричних ліній до інших цехів знайдені для варіанта розміщення ТП, розраховуються дисконтовані витрати на їхнє спорудження. Запам'ятовується позиція розміщення ТП з мінімальними дисконтованими витратами. Відтворюється варіант ЕПС, який відповідає найменшій результативній дисконтованій вартості всіх ліній. Згідно з цим варіантом вибираються місця встановлення ТП і РП й вибираються траси прокладання електричних ліній.

На основі запропонованого методу синтезу ЕПС здійснена програмна реалізація варіанта інтелектуальної АСП ЕПС мовою С++. У складі АСП ЕПС наявна інфографічна підсистема, яка в режимі інтерактивної взаємодії дає змогу сформувати вхідну інформацію на проектування й згодом відтворити результати синтезу у вигляді схеми електричних сполучень ЕПС з відображенням її на генеральному плані об'єкта. Зазвичай, за коректної вхідної інформації інтелектуальна АСП ЕПС без участі проектувальника демонструє якісні проектні вирішення за час, що не перевищує кількох десятків секунд за кількості цехів не більше 20. На рис. 3 наведений приклад застосування здійсненої програмної реалізації АСП ЕПС за кількості цехів, що становить 17 одиниць. Розрахункове навантаження цехів розподілене за нормальним законом у межах $100-1500$ кВт, $S_{тпн} = 630$ кВт, $\beta_{\min} = (0,7 \dots 0,8)$.

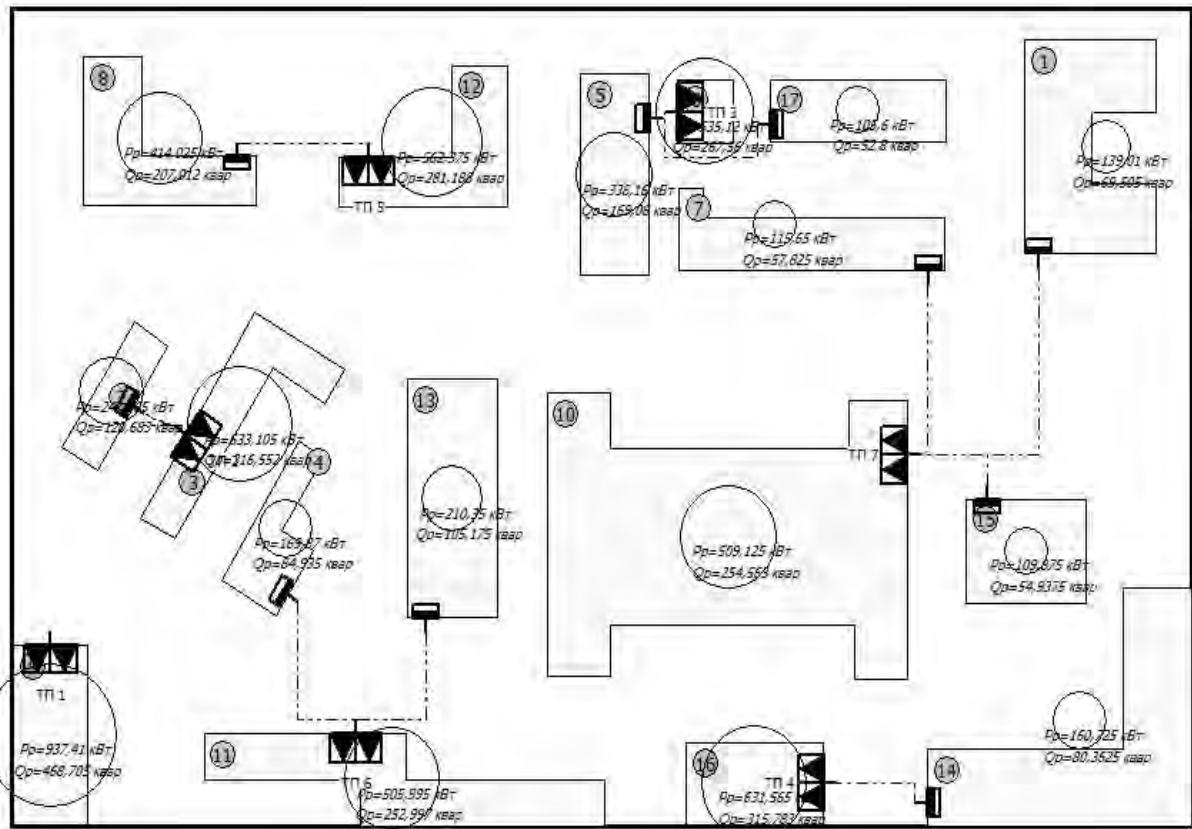


Рис. 3. Приклад синтезу ЕПС за допомогою інтелектуальної АСП ЕПС

Однак завжди існує ймовірність того, що за деякої сукупності вхідної інформації загальна оптимізаційна задача синтезу ЕПС у вищенаведеному формулюванні може не мати оптимальних розв'язків. Це може бути зумовлено відсутністю можливих варіантів розподілу навантажень між ТП, за яких не виконуються технічні вимоги щодо їхнього завантаження. Також ця причина в умовах накладеного обмеження може зумовити синтез економічно неефективного варіанта ЕПС. Тому для пошуку оптимальної ЕПС необхідно синтезувати кілька варіантів ЕПС з різними номінальними потужностями трансформаторів ТП тощо.

Запропонований метод у змозі провести ефективну автоматизацію груп проектних процедур синтезу схеми ЕПС, але можливі ситуації, коли участь проектувальника є необхідною. Для практичного вирішення такої проблеми, можливе створення алгоритмів з різними евристичними методами, які будуть агрегувати реалізацію такого методу синтезу ЕПС. Тому не виникне необхідності в його модифікації, адже такі алгоритми функціонуватимуть поза ним і оперуватимуть його вхідними та вихідними інформаційними потоками. Зокрема на основі такого принципу, з метою пошуку ефективного варіанта ЕПС за досить великої кількості цехів (більше 25), створений спеціалізований алгоритм. Його принцип виконання полягає у численній серії розбивань території промислового об'єкта на окремі зони з подальшим незалежним синтезом для них ЕПС і остаточним вибором оптимального варіанта ЕПС для всієї множини цехів. Для підвищення ефективності функціонування алгоритму формуються варіанти з різними номінальними потужностями ТП в околі їхнього економічно ефективного значення. Ураховуючи експонентну часову складність використаних оптимізаційних методів такий підхід забезпечив істотне зменшення часу синтезу ЕПС без погіршення його якості за розбиття об'єкта на зони з кількістю (12–14) цехів. Як виявилось, у цьому разі істотне значення мав той чинник, що структура та розташування цехів промислового об'єкта характеризується певною мірою впорядкованості. З наведеного вище впливає той факт, що евристичні методи й алгоритми можуть ефективно функціонувати разом із точними методами дискретної оптимізації, делегуючи їм розв'язання певних локальних задач. Очевидно, що евристичний підхід

надає можливість застосування прогресивних у цій царині методів: генетичних алгоритмів, нечіткої логіки, нейронних мереж тощо. Але найбільшого застосування методи дискретної оптимізації можуть набути під час створення інтелектуальних АПС ЕПС, в основу яких покладений насамперед когнітивний підхід до вирішення цієї проблеми.

Висновки

Обґрунтована доцільність й ефективність застосування методів дискретної оптимізації для покращання технології автоматизованого проектування ЕПС промислових об'єктів. На основі їхнього застосування можливе істотне підвищення рівня автоматизації наявних АСП ЕПС і поступово, зважаючи на світові тенденції, розпочати розроблення високоефективних інтелектуальних автоматизованих систем проектування ЕПС.

1. *Автоматизация проектирования систем электроснабжения / В.Н. Винославский, В.И. Тарадай, У. Бути, Д. Хайнце. – К.: Выща шк., 1988. – 208 с.* 2. *Гоголюк П.Ф., Гречин Т.М. Автоматизована система проектування електропостачальних систем промислових об'єктів // Технічна електродинаміка. Спец. випуск за матеріалами 2-ї наук.-техн. конф. "Математичне моделювання в електротехніці, електроніці та електроенергетиці". – 1998. С. 61–69.* 3. *Гречин Т.М. Удосконалення проектних процедур формування та вибору електропостачальних систем із використання мереж Петрі: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Львів. 2002. – 17 с.* 4. *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/5th International Conference on Engineering Design and Automation (EDA 2001), Las Vegas, Nevada, USA, 2001. – P. 164–168.* 5. *Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 416 с.* 6. *Кормен, Томас Х., Лейзерсон, Чарльз И., Ривест, Рональд Л., Штайн, Клиффорд. Алгоритмы: построения и анализ. – 2-е изд.: Пер. с англ. – М.: Изд. дом "Вильямс", 2005. – 1296 с.* 7. *Сигал И.Х., Иванова А.П. Введение в прикладное дискретное программирование: модели и вычислительные алгоритмы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 240 с.* 8. *Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths, IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics SSC4 (2), 1968. P. 100–107.* 9. *Препарату Ф., Шеймос М. Обчислювальна геометрія. Введення. Розділ 2.2: Завдання локалізації точок. – М.: Мир, 1989.*