

УДК 621.311

В.А. Баженов, канд. техн. наук**В.М. Сулейманов**, канд. техн. наук**Т.Л. Кацадзе**, канд. техн. наук

Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ, Україна

**ФОРМУВАННЯ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ РОЗВИТКУ
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ****В.А. Баженов**, канд. техн. наук**В.М. Сулейманов**, канд. техн. наук**Т.Л. Кацадзе**, канд. техн. наук

Национальный технический университет «КПИ», г. Киев, Украина

**ФОРМИРОВАНИЕ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ РАЗВИТИЯ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ****V.A. Bazhenov**, Candidate of Technical Sciences**T.M. Suleimanov**, Candidate of Technical Sciences**T.L. Katsadze**, Candidate of Technical Sciences

National Technical University of Ukraine «Kyiv Politechnic Institute», Kyiv, Ukraine

FORMATION OF DESIGN SOLUTIONS FOR ELECTRIC POWER SYSTEMS

Проведено аналіз діючої методики техніко-економічного обґрунтування проектних рішень з перспективного розвитку електроенергетичних систем. Показано потенційні загрози, спрямовані на зниження якості прийнятих проектних рішень, серед яких – недостатня об'єктивність економічних критеріїв ефективності технічних рішень, штучне обмеження простору пошуку на попередньому етапі відбору можливих рішень. Представлено математичні моделі та метод формування і техніко-економічного обґрунтування проектних рішень з перспективного розвитку електроенергетичних систем на основі математичного апарату генетичних алгоритмів. Показано, що запропонований підхід забезпечує стійку збіжність процесу пошуку за прийнятну кількість кроків без штучного обмеження простору пошуку і використання додаткової експертної інформації щодо доцільності можливих проектних рішень.

Ключові слова: електроенергетична система, прийняття проектних рішень, оптимізація, техніко-економічне обґрунтування, інтелектуальний пошук, генетичний алгоритм.

Проведен анализ действующей методики технико-экономического обоснования проектных решений по перспективному развитию электроэнергетических систем. Показаны потенциальные угрозы, направленные на снижение качества принимаемых проектных решений, среди которых – недостаточная объективность экономических критериев эффективности технических решений, искусственное ограничение пространства поиска на предварительном этапе отбора возможных решений. Представлены математические модели и метод формирования и технико-экономического обоснования принятия проектных решений по перспективному развитию электроэнергетических систем на основе математического аппарата генетических алгоритмов. Показано, что предлагаемый подход обеспечивает устойчивую сходимость процесса поиска за приемлемое количество шагов без искусственного ограничения пространства поиска и использования дополнительной экспертной информации о целесообразности возможных проектных решений.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, принятия проектных решений, оптимизация, технико-экономическое обоснование, интеллектуальный поиск, генетический алгоритм.

The paper analyzes existing technique feasibility of design decisions on long-term development of electric power systems. Showing the potential threats to reduce the quality of the design decisions, among them – the lack of objective economic criteria of efficiency of technical solutions, the artificial restriction of the search space at the preliminary stage of the selection of possible solutions. The paper presents the mathematical model and method of formation and feasibility making design decisions concerning future development of electric power systems based on mathematical apparatus of genetic algorithms. It is shown that the proposed approach provides a stable convergence of the search process in a reasonable amount of steps without artificial restrictions of the search space and without use of additional expert information on the feasibility of possible design solutions.

Key words: power system, making design decisions, optimization, feasibility study, intelligent search, genetic algorithm.

Вступ. Ефективність функціонування систем виробництва, передачі та розподілу електричної енергії багато в чому визначається конструкторськими рішеннями, які були використані у процесі формування електричних мереж і систем. Взагалі, завдання проектування розвитку електроенергетичних систем та електричних мереж полягає у розробленні й економічному обґрунтуванні технічних рішень, що забезпечують надійне та якісне енергопостачання споживачів електричної енергії з урахуванням усіх технічних, технологічних, екологічних, соціальних та інших обмежень. При цьому суть техніко-економічного обґрунтування конструкторського рішення полягає у вирішенні оптимі-

заційної задачі мінімізації функції економічної ефективності, наприклад, зведених дисконтованих витрат, серед можливих альтернативних варіантів проектних рішень [1-3].

Слід зазначити, що економічні показники ефективності проектних рішень в енергетичній галузі є об'єктивізованими і не забезпечують у повному обсязі всебічне оцінювання альтернативних варіантів конструкторських рішень. У першу чергу, це пояснюється багатofакторністю критеріального простору пошуку. Тут вибір найбільш ефективного варіанта розвитку електроенергетичної системи часто пов'язаний з необхідністю врахування взаємokonфліктних, а іноді і непорівнянних факторів [4; 5]. У сучасних моделях техніко-економічного обґрунтування проектних рішень, зазвичай, використовують непрямі показники якості, надійності та екологічності функціонування об'єктів електричних мереж. Це дозволяє реалізувати масштабування різних функціональних показників і побудувати функцію зведених дисконтованих витрат, яка полягає у мінімізації з метою пошуку найбільш ефективного вирішення [5-7]. Разом з тим у сучасних умовах реформування ринку електричної енергії України, особливо з урахуванням монополізації енергетичного виробництва, впливу фінансово-економічних криз банківських систем та деяких інших факторів, такі показники не забезпечують об'єктивності оцінювання пропонованих технічних рішень.

Крім того, традиційні методи багатовимірної оптимізації, які використовують у задачах техніко-економічного обґрунтування, є методами локального пошуку, їх ефективність істотно залежить від вибору початкової точки пошуку, а самі методи накладають додаткові обмеження на властивості цільової функції [8]. Окрему увагу слід приділити ще одному фактору, який несе потенційну загрозу погіршення якості проектних рішень в енергетичній сфері. Справа в тому, що рішення задачі мінімізації функції економічної ефективності на попередньому етапі передбачає генерацію декількох можливих альтернативних проектних рішень. Тут вибір найбільш ефективного варіанта розвитку електроенергетичної системи часто може виявитися обмеженим недостатнім досвідом проектувальника або «закостенілістю» його мислення, коли нетипове рішення, що забезпечує мінімум оціночної функції, не буде їм виявлено ще на попередньому етапі і, отже, не буде включено до складу рішень, які будуть зіставлятися.

Тут, на нашу думку, досить ефективним може виявитися підхід до формування можливих проектних рішень, заснований на математичному апараті генетичних алгоритмів.

Основна ідея методу. Задачу прийняття проектного рішення щодо вибору оптимального шляху розвитку електроенергетичної системи в загальному випадку можна представити як задачу пошуку оптимального (або прийнятного) рішення в багатofакторному просторі станів. Тут використання моделей інтелектуального пошуку [9]. Методи неінформативного (сліпого) пошуку гарантують визначення оптимального рішення поставленої задачі тільки після повного перебору і порівняння всіх можливих проектних рішень. Однак внаслідок високої розмірності багатofакторного простору пошуку використання таких методів часто пов'язано з проблемою комбінаторного вибуху і в реальних умовах проектування не може бути реалізоване. Інша група евристичних методів базується на штучному обмеженні простору пошуку і подальшому зіставленні економічної ефективності обмеженого обсягу альтернативних проектних рішень. Як вже зазначалося вище, «слабкою ланкою» у використанні евристичних методів пошуку є людський фактор, коли брак практичного досвіду особи, що приймає проектне рішення, приводить до того, що найбільш ефективне і перспективне рішення може бути відкинуто ним ще на попередньому етапі штучного обмеження простору пошуку.

Генетичні алгоритми, пропоновані авторами для вирішення проектних задач у багатofакторному просторі пошуку [8; 10-13], значною мірою позбавлені зазначених недоліків. Основна ідея пропонованого підходу полягає у представленні характеристик і властивостей можливих проектних рішень за допомогою двійкового коду та формуван-

ні вектора, що містить бінарні ланцюжки властивостей варіанта проектного рішення. Очевидно, що такий вектор певною мірою відповідає спрощеній математичній моделі генотипу біологічного організму, який містить повну інформацію про цей організм. Вказана обставина дозволяє застосувати основні генетичні операції схрещування, що буде приводити до формування нових проектних рішень з новими властивостями.

Тут формується оцінювальна функція, обумовлена параметрами проектних рішень, яка відповідає оцінці пристосованості біологічного організму до умов навколишнього середовища. Формування можливих проектних рішень здійснюється циклічно, на підставі попередніх поколінь, з використанням генетичних операцій кросинговеру (схрещування), інверсії і мутації, застосовуваних випадковим чином за стохастичними законами. При цьому пріоритет під час схрещування мають проектні рішення, які характеризуються найвищими значеннями оціночної функції ефективності, що гарантує поступове поліпшення якості проектних рішень.

Використання генетичних алгоритмів пошуку гарантує розгляд різноманітних, часто вже не типових рішень проектних задач [8; 10-13], що є основною перевагою пропонуваного авторами підходу. Вкажемо також ще на деякі додаткові позитивні якості методів генетичного пошуку [8]:

- 1) простота та прозорість реалізації;
- 2) можливість розпаралелювання процесу пошуку;
- 3) простота кодування та декодування інформації;
- 4) знижена ймовірність зациклювання процесу пошуку в локальних оптимумах.

Разом з тим використання генетичних алгоритмів пошуку оптимального проектного рішення пов'язано з такими вадами методів, які необхідно враховувати у процесі вирішення практичних задач:

- 1) висока ітеративність алгоритмів;
- 2) суттєва залежність ефективності генетичного пошуку від його параметрів;
- 3) висока ймовірність передчасної збіжності циклічного пошуку.

Математичні моделі методу. Рішення задач прийняття проектних рішень з використанням апарату генетичних алгоритмів полягає у послідовному виконанні таких основних процедур [8; 10-13].

1. Визначення складу обмежень, що визначають прагматичні аспекти функціонування проектованої технічної системи і формування складу ознак, характеристик і властивостей, які дозволяють персоніфікувати відмінності між породжуваними проектними рішеннями.

2. Визначення способу кодування генетичної інформації, що визначає характеристики конкретного проектного рішення. Тут кожен атрибут об'єкта проектування кодують бітовим бінарним ланцюжком (вектором) – хромосомою:

$$h = \frac{x - \min}{(\max - \min)(2^n - 1)},$$

де x – числове значення параметра об'єкта проектування у форматі з плаваючою комою; \min , \max – мінімальне та максимальне значення параметра відповідно; n – довжина хромосоми, тобто кількість біт бінарного вектора для зберігання закодованого атрибутивного параметра.

Об'єднання всіх хромосом, які визначають властивості проектного рішення, утворює геном, що містить всю генетичну інформацію в цілому. Тут для формування бінарних ланцюжків, зазвичай, використовують код Грея, який забезпечує одиничну відстань Хеммінга між суміжними значеннями параметрів проектних рішень, що гарантує відсутність породження «глухих кутів» у пошуковому процесі [11].

3. Формування оціночної фітнес-функції, яка визначає доцільність і ефективність породжуваних проектних рішень

$$f(x_1, x_2, \dots, x_m),$$

де x_1, x_2, \dots, x_m – варійовані параметри, що визначають конкретне проектне рішення.

Як оціночна, може бути використана функція зведених дисконтованих витрат, яка визначає економічну ефективність проектного рішення [5], функція сумарних витрат потужності або витрат умовного палива на електростанціях тощо. Раніше ми зазначали, що прийняті у проектній практиці економічні критерії ефективності проектних рішень є об'єктивізованими і не відображають повною мірою оцінку доцільності запропонованого рішення. Тут, на думку авторів, можуть бути використані інші критерії ефективності проектних рішень, що моделюють, наприклад, вербальні оцінки якості породжуваних проектних рішень і побудовані з використанням апарату нечіткої логіки [9; 12].

4. Визначення складу початкової популяції проектних рішень та заповнення за допомогою генератора випадкових чисел їх генотипів.

5. Розрахунок значень фітнес-функції ефективності проектних рішень поточного покоління, а також середнього значення фітнес-функції всієї популяції. Тут також розглядають питання щодо досягнення збіжності генетичного алгоритму. Подальші процедури виконують у разі відсутності збіжності.

6. Селекція генетичного матеріалу спрямована на відбір проектних рішень, які характеризуються найвищими значеннями фітнес-функції. У результаті виконання операції селекції формують батьківські пари проектних рішень. При цьому пріоритет мають проектні рішення, які характеризуються найвищими значеннями фітнес-функції.

7. Реалізація операції кросинговеру, яка полягає у схрещуванні інформаційних ланцюжків генетичного матеріалу всіх батьківських пар і формуванні дочірніх проектних рішень, які успадковують характеристики обох «батьків». Тут випадковим чином визначається тип кросинговеру та точки розриву геномів і формується дочірній генотип.

8. Реалізація операції мутації, яка полягає у випадковій зміні генотипу дочірніх елементів, визначених на попередньому етапі виконання алгоритму. Тут випадковим чином визначається тип мутації (проста мутація або інверсія). У випадку простої мутації випадково визначається ген, який змінює своє бінарне значення на протилежне. Інверсія, у свою чергу, полягає у випадковому визначенні двох точок розриву і «перевертання» частини геному дочірнього елемента між цими точками.

9. Визначення випадковим чином елемента популяції, який замінить утворений дочірній генотип у наступному поколінні. Тут пріоритет до заміщення мають проектні рішення, що характеризуються найменшими значеннями фітнес-функції.

Далі управління передають процедурі 5 для виконання чергового кроку генетичного алгоритму та формування нового покоління можливих проектних рішень.

Зазначимо, що розглянутий алгоритм не є єдиноможливим, часто використовують різні його модифікації, наприклад, на етапі виконання селекції, склад батьківських пар можна визначати завдяки відкиданню найбільш неефективних рішень або методом організації турнірів.

Істотною проблемою, пов'язаною з використанням генетичних алгоритмів у задачах оптимізації проектних рішень розвитку електроенергетичних систем, є налагодження алгоритму. Тут вибору підлягають такі характеристики алгоритму, як: кількість елементів початкової популяції; тривалість життєвого циклу елементів; спосіб формування батьківських пар на кожному етапі роботи алгоритму; визначення ймовірнісних налаштувань операцій кросинговеру і мутацій тощо. Задача налаштування генетичного алгоритму є багатофакторною і не має типового однозначного розв'язку. Так, наприклад, знижене значення обсягу популяції характеризується недостатньою різноманітністю генотипів і може привести до

передчасної збіжності алгоритму до локального оптимуму, який не відповідає точному розв'язку задачі оптимізації. Навпаки, надмірно завищена кількість елементів популяції часто приводить до неефективного схрещування неперспективних рішень, що ускладнює та істотно уповільнює збіжність алгоритму. Схожа ситуація спостерігається і з налаштуванням характеристик мутацій. Основне призначення мутацій тут полягає у забезпеченні достатньої різноманітності генотипів, що дозволяє вивести процес пошуку з локальних оптимумів багатофакторного простору. Тому недостатня інтенсивність мутацій не забезпечує необхідної різноманітності генотипів. Навпаки, надмірне захоплення мутаціями під час виконання генетичних алгоритмів може погіршити якісні характеристики породжуваних проектних рішень та суттєво загальмувати процес еволюції.

На думку авторів, для налаштування генетичних алгоритмів пошуку ефективного проектного рішення розвитку електроенергетичних систем корисним може виявитися апарат нечіткої логіки, що забезпечує «тонке» налаштування алгоритму в багатовимірному просторі регулювання [9; 12].

Приклад реалізації генетичного алгоритму. Розглянемо застосування генетичного алгоритму на прикладі розв'язання транспортної задачі забезпечення живлення споживачів деякого району. На рис. 1 представлено надлишкову схему електричної мережі, що забезпечує живлення споживачів у пунктах 1, 2 і 3 від електростанції, розташованої в пункті 0. На схемі вказані також навантаження споживачів у мегаватах і відстані між підстанціями в кілометрах. Розв'язання задачі полягає у виборі мінімальної оптимальної конфігурації електричної мережі та визначенні перерізів проводів на ділянках схеми.

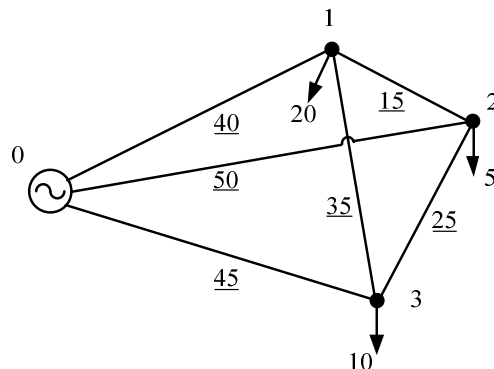


Рис. 1. Надлишкова схема електричної мережі

Інформаційний генетичний ланцюжок проектованої електричної мережі складається з шести ділянок – хромосом, кожна з яких несе інформацію про конструктивне виконання відповідної лінії електропередачі. Під конструктивним виконанням лінії будемо розуміти марку і переріз проводів на відповідній ділянці мережі. Як показано в табл. 1, така інформація може бути представлена одним із восьми можливих значень. Тут коду «000» відповідає відсутність лінії електропередач на відповідній ділянці між підстанціями. Як випливає з табл. 1, для подання генетичної інформації кожної хромосоми необхідно 3 біта, а для всього геному – 18 біт, що визначає простір пошуку з 2^{18} можливих рішень.

Таблиця 1

Кодування інформаційного змісту хромосом

№ п/п	Марка проводу	Індекс	Код Грея
1	–	0	000
2	АС 70/11	1	001
3	АС 95/16	2	011
4	АС 120/19	3	010
5	АС 150/24	4	110
6	АС 185/29	5	111

7	AC 240/32	6	101
8	2×AC 240/32	7	100

Ефективність проектного рішення будемо оцінювати за величиною сумарних зведених дисконтованих витрат на спорудження електричної мережі та покриття втрат потужності на передачу електричної енергії по лініях. Для спрощення задачі та підвищення її наочності будемо нехтувати витратами на експлуатацію лінії, а також постійної складової втрат. Таким чином, оцінна функція оптимальності пропонованого рішення має вигляд

$$F = \sum_{i=1}^6 Z_{0i} l_i = \sum_{i=1}^6 (K_{0i} E + I_i^2 r_{0i} \tau C) l_i,$$

де Z_{0i} – погонні значення зведених дисконтованих витрат; K_{0i} – погонні значення капіталовкладень у будівництво ліній електропередач; E – норма дисконту; I_i – робочий струм у лінії в режимі максимальних навантажень; r_{0i} – погонні активні опори ліній електропередач; τ – час максимальних втрат; C – тариф на покриття втрат потужності в електричній мережі; l_i – довжина ліній електропередач. Тут для кожного можливого конструктивного виконання ділянок електричної мережі зведені дисконтовані витрати визначаються поліномами:

$$\begin{aligned} Z_{70} &= (27,5 + 0,015 I_p^2) l; & Z_{95} &= (28,5 + 0,011 I_p^2) l; \\ Z_{120} &= (29,5 + 8,78 \cdot 10^{-3} I_p^2) l; & Z_{150} &= (31 + 7,34 \cdot 10^{-3} I_p^2) l; \\ Z_{185} &= (32,5 + 5,72 \cdot 10^{-3} I_p^2) l; & Z_{240} &= (35 + 4,25 \cdot 10^{-3} I_p^2) l; \\ Z_{2 \times 240} &= (50 + 2,12 \cdot 10^{-3} I_p^2) l, \end{aligned}$$

де індекси означають переріз проводів на ділянках електричної мережі.

Для організації генетичного пошуку за допомогою генератора випадкових чисел формуємо початкову популяцію, наприклад, з 10 випадкових рішень:

553614 113331 464064 125075 700375
751327 424111 354451 656110 532560

Тут використано восьмеричну систему кодування конструктивного виконання ділянок електричної мережі відповідно до даних табл. 1.

Для кожного з елементів початкової популяції розраховуємо значення фітнес-функції (табл. 2) та визначаємо склад батьківських пар для виконання операцій кросинг-оверу. Тут у визначенні батьківських пар пріоритет мають елементи популяції, які характеризуються найкращими, для цієї задачі – найменшими значеннями фітнес-функції. Батьківські пари визначаємо методом рулетки (рис. 2).

Таблиця 2

Значення фітнес-функції елементів початкової популяції

№ п/п	1	2	3	4	5
код	553614	113331	464064	125075	700375
f	110167	150299	108956	137697	93356
№ п/п	6	7	8	9	10
код	751327	424111	354451	656110	532560
f	106390	119773	116127	95320	113378

■ 553614 ■ 113331 ■ 464064 ■ 125075 ■ 700375
 ■ 751327 ■ 424111 ■ 354451 ■ 656110 ■ 532560

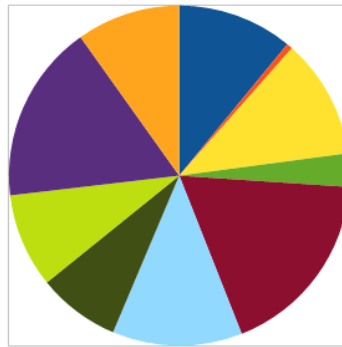


Рис. 2. Ілюстрація методу рулеткового відбору

Очевидно, що найбільша ймовірність формування батьківських пар спостерігається у п'ятого елемента початкової популяції, а найменша – у другого.

Реалізація операцій кросинговеру та мутацій з отриманими батьківськими парами породжує нові проектні рішення, які утворюють перше покоління. Далі організуємо циклічне виконання генетичних операцій за наведеним вище алгоритмом. Еволюційний процес пошуку оптимального рішення транспортної задачі представлений на діаграмі рис. 3, де показана динаміка зміни трьох характеристик найкращого (min), найгіршого (max) і середньозваженого (mid).

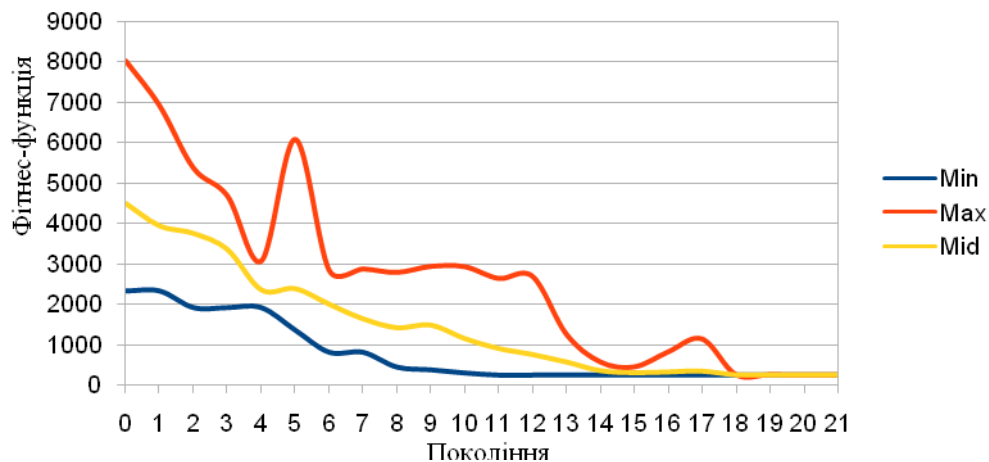


Рис. 3. Діаграма динаміки еволюційного процесу пошуку

Як впливає з даних рис. 3, після виконання 20 ітерацій генетичний алгоритм повністю збігається з оптимальним розв'язком транспортної задачі, схему електричної мережі якого наведено на рис. 4.

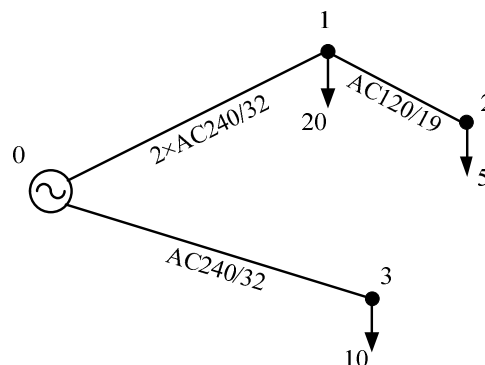


Рис. 4. Оптимальний розв'язок транспортної задачі

Аналіз отриманого результату свідчить, що оптимальне рішення транспортної задачі було отримано після перегляду менше 200 варіантів спорудження електричної мережі, що становить менше 0,1 % простору пошуку. Зазначимо, що при цьому не була задіяна жодна додаткова експертна інформація щодо доцільності можливих проектних рішень, що становить про перспективи ефективного використання генетичних алгоритмів у практиці прийняття проектних рішень з розвитку електроенергетичних систем.

Висновки

1. Ситуація, що склалася на ринку електричної енергії України, характеризується істотним недоліком комерційної свободи; неспроможністю застосування положень про кредитне покриття; неадекватною конкуренцією; неефективним формуванням оптових цін на електричну енергію; монополізацією ринку постачальниками електричної енергії; незавершеністю структури контрактів; перешкодами для приватних інвесторів; перехресними субсидіями в оптових цінах на електроенергію; відсутністю ринку допоміжних послуг.

2. Діючі методики техніко-економічного обґрунтування варіантів розвитку основних мереж енергосистем України є застарілими і не відповідають сучасним реаліям ринкових відносин.

3. Розроблено математичну модель та алгоритм прийняття проектних рішень з розвитку електроенергетичних систем, які базуються на апараті генетичних алгоритмів. Запропонований підхід забезпечує розгляд різноманітних, особливо нетипових рішень проектних задач, що гарантує виявлення найбільш ефективного проектного рішення в багатофакторному просторі пошуку.

4. Застосування генетичних алгоритмів оптимізації проектного рішення характеризуються високою ефективністю і кращими властивостями порівняно з методами неінформативного та евристичного пошуку, що забезпечує виявлення оптимального рішення у всьому просторі пошуку за прийнятну кількість кроків.

5. Ефективне використання математичного апарату генетичних алгоритмів у задачах прийняття проектних рішень розвитку електроенергетичних систем вимагає вирішення проблеми налаштування параметрів алгоритму – обсягу початкової популяції, тривалість життєвого циклу породжуваних рішень, способу формування батьківських пар, імовірнісних характеристик генетичних операцій тощо. Для розв'язання такої задачі автори передбачають використовувати апарат нечіткої логіки, що забезпечує виконання «тонкого» налаштування генетичного алгоритму на основі вербальних оцінок його функціонування.

Список використаних джерел

1. *Поспелов Г. Е.* Электрические системы и сети. Проектирование : учебное пособие для вузов / Г. Е. Поспелов, В. Г. Федин. – Минск : Вышэйшая школа, 1988. – 308 с.
2. *Балаков Ю. Н.* Проектирование схем электроустановок : учебное пособие для вузов / Ю. Н. Балаков, М. Ш. Мисриханов, А. В. Шунтов. – М. : МЭИ, 2006. – 288 с.
3. *Проектування* електричних мереж напругою 0,4-110 кВ. ГІД 34.20.178:2005 : рекомендації (чинні від 01.06.2005). – К., 2005. – 43 с.
4. *Кини Р. Л.* Принятие решений при многих критериях : предпочтения и замещения : пер. с англ. / Р. Л. Кини, Х. Хайфа. – М. : Радио и связь, 1981. – 560 с.
5. *Сулейманов В. М.* Вибір оптимальних схем побудови та режимів електроенергетичних систем на основі багатокритеріального аналізу / В. М. Сулейманов, В. А. Баженов, Т. Л. Кацадзе. – К., 2009. – 128 с.
6. *Непомнящий А. В.* Учёт надёжности при проектировании энергосистем / А. В. Непомнящий. – М. : Энергия, 1978.
7. *Чехов В. И.* Экологические аспекты передачи электроэнергии / В. И. Чехов. – М. : МЭИ, 1991. – 44 с.

8. *Субботін С. О.* Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей : монографія / С. О. Субботін, А. О. Олійник, О. О. Олійник ; під заг. ред. С. О. Субботіна. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2009. – 375 с.

9. *Бондарев В. Н.* Искусственный интеллект : учебное пособие / В. Н. Бондарев, Ф. Г. Аде. – Севастополь : Изд-во Севастоп. нац. техн. ун-та, 2002. – 616 с.

10. *Holland J. H.* Adaptation in natural and artificial systems. An introductory analysis with application to biology, control, and artificial intelligence / J. H. Holland. – London : Bradford book edition, 1992. – 211 p.

11. *Генетические* алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г. К. Вороновский, К. В. Махотило, С. Н. Петрашев и др. – Х. : ОСНОВА, 1997. – 112 с.

12. *Рутковская Д.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы : пер. с польського / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М., 2006. – 452 с.

13. *Гладков Л. А.* Генетические алгоритмы : учебное пособие / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик ; под ред. В. М. Курейчика. – Ростов-на-Дону : ООО «Ростиздат», 2004. – 400 с.