

Т. Л. Кацадзе, к. т. н., доц.

## ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО РАЦІОНАЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ НЕОДНОРІДНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

*Стаття присвячена дослідженню можливості використання апарату генетичних алгоритмів у розв'язанні задач оптимізації режимів неоднорідних електричних мереж. Запропонована математична модель прийняття рішень щодо раціонального регулювання режимів електроенергетичних систем з високим ступенем неоднорідності мереж.*

**Ключові слова:** електроенергетична система, неоднорідність, прийняття рішень, оптимізація, інтелектуальний пошук, генетичний алгоритм.

### Вступ

Сучасні електроенергетичні системи поєднують у своєму складі електричні мережі різних класів номінальної напруги, які складаються з ліній електропередавання повітряного або кабельного виконань, виконаних проводами різного типу з різним взаємним розташуванням фазних проводів у просторі тощо. Перелічені чинники визначають неоднорідність електричних мереж електроенергетичних систем. Формально неоднорідність електричних мереж визначають як неоднаковість імпедансних кутів ділянок електричної мережі. Відомо, що неоднорідність електричних мереж пов'язана із додатковими паразитними перетоками потужності в електричних системах, які зумовлюють додаткові втрати потужності та погіршують техніко-економічні показники роботи електроенергетичної системи. До того ж паразитні потоки потужностей у замкнених контурах неоднорідних електричних мереж розвантажують лінії електропередавання вищого класу номінальної напруги та перевантажують електропередачі нижчої напруги, що призводить до неефективного використання електричних мереж надвисокої номінальної напруги та зниження пропускної здатності електричної мережі загалом [1 – 4].

На сьогодні відомий широкий спектр заходів, спрямованих на часткову або повну компенсацію неоднорідності електричних мереж, зокрема зміна геометричних характеристик повітряних ліній електропередавання, застосування пристроїв поздовжньої компенсації параметрів електропередач, використання додаткових джерел реактивної потужності, застосування фазоповоротних трансформаторів і лінійних регуляторів, зміна коефіцієнтів трансформації силових трансформаторів й автотрансформаторів та інші сучасні технології гнучких електропередач [1, 5, 6]. Насиченість електричних мереж різноманітними засобами компенсації неоднорідності визначає задачу їхнього раціонального використання. Тут можна розглядати оптимізаційну задачу мінімізації деякої функції параметрів пристроїв компенсації, яка визначає найменші можливі витрати ресурсів на доцільну компенсацію неоднорідності електричних мереж. Традиційні методи розв'язання таких задач ґрунтуються на мінімізації техніко-економічних показників функціонування електричних систем, зокрема сумарних втрат активної потужності, витрат умовного палива на електричних станціях, дисконтованих зведених витрат на будівництво та експлуатацію електричної мережі тощо [1, 6, 7]. Зазначимо, що застосування традиційних методів оптимізації багатофакторних функцій обмежено низкою чинників. Зокрема, прийнята практика техніко-економічного обґрунтування рішень на основі економічних показників ґрунтується на об'єктивізованих непрямих показниках функціонування енергосистем і не забезпечує всебічного оцінювання альтернативних варіантів можливих рішень [8]. До того ж слід зважати на дискретний характер цільової функції, що вимагає застосування додаткових прийомів під час розв'язання оптимізаційної задачі.

## Матеріал і результати досліджень

Задачу прийняття рішення щодо вибору оптимального складу та параметрів пристроїв компенсації неоднорідності електричних мереж у загальному випадку можна представити як задачу пошуку оптимального (або прийняттого) рішення в багатофакторному просторі станів. Тут використання моделей інтелектуального пошуку [9] обмежене низкою чинників. Методи неінформативного (сліпого) пошуку гарантують визначення оптимального рішення поставленої задачі тільки після повного перебору й порівняння всіх можливих проектних рішень. Однак унаслідок високої розмірності багатофакторного простору пошуку використання таких методів часто пов'язано з проблемою комбінаторного вибуху й у реальних умовах не може бути реалізоване. Інша група евристичних методів ґрунтується на штучному обмеженні простору пошуку й подальшому зіставленні економічної ефективності обмеженого обсягу альтернативних рішень. «Слабкою ланкою» у використанні евристичних методів пошуку є людський чинник, коли брак практичного досвіду особи, що приймає рішення, призводить до того, що найефективніше і найперспективніше рішення може бути відкинуто ним ще на попередньому етапі штучного обмеження простору пошуку.

Генетичні алгоритми, запропоновані автором для розв'язання задач оптимізації режиму неоднорідної електричної мережі в багатофакторному просторі пошуку [10 – 13], значною мірою позбавлені зазначених недоліків. Класичний генетичний алгоритм, запропонований Дж. Голландоті, імітує адаптацію популяції до заданої функції пристосованості. При цьому під пристосованістю генотипу розуміють середню кількість нащадків, породжуваних за час життя особи цього генотипу в певних умовах навколишнього середовища. Загалом процес роботи класичного генетичного алгоритму являє собою послідовну зміну популяцій (поколінь), що складаються з фіксованої кількості осіб. Чим більше значення фітнес-функції особи, тим більше шансів вона має залишити нащадків у наступному поколінні й тим більше пристосованість відповідного генотипу (цей принцип легко адаптується і стосовно завдань мінімізації). Під час формування наступного покоління частина нащадків повністю ідентична батьківським особам, а частина змінюється деяким випадковим чином під дією операторів мутації і кросинговеру (схрещування). Очевидно, що класичний генетичний алгоритм можна пристосувати до розв'язання оптимізаційних задач, зокрема задач пошуку оптимального складу параметрів пристроїв компенсації неоднорідності електричних мереж.

Основна ідея запропонованого підходу полягає у представленні характеристик і властивостей можливих рішень за допомогою двійкового коду та формування вектора, що містить бінарні ланцюжки властивостей варіанту рішення. Очевидно, що такий вектор певною мірою відповідає спрощеній математичній моделі генотипу біологічного організму, який містить повну інформацію про цей організм. Указана обставина дозволяє застосувати основні генетичні операції схрещування, що призводитиме до формування нових рішень з новими властивостями.

Тут формують оцінювальну функцію, зумовлену параметрами пристроїв компенсації неоднорідності, яка відповідає оцінці пристосованості біологічного організму до умов навколишнього середовища. Формування можливих рішень здійснюють циклічно, на підставі попередніх поколінь, із використанням генетичних операцій кросинговеру (схрещування), інверсії і мутації, застосовуваних випадковим чином за стохастичними законами. При цьому пріоритет під час схрещування мають рішення, які характеризуються найвищими значеннями оціночної функції ефективності, що гарантує поступове поліпшення якості запропонованих рішень.

Використання генетичних алгоритмів пошуку гарантує розгляд різноманітних, часто не типових рішень представлених задач [11 – 14], що є основною перевагою запропонованого автором підходу. Зазначимо також ще на деякі додаткові позитивні якості методів генетичного пошуку [12]:

- 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 рішення пов'язано з такими вадами методів, які необхідно враховувати у процесі розв'язання 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

Розв'язок задач прийняття рішень щодо визначення складу та параметрів пристроїв компенсації неоднорідності електричних мереж із використанням апарату генетичних алгоритмів полягає в послідовному виконанні таких основних процедур [11 – 14].

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

2. Визначення способу кодування генетичної інформації, що визначає характеристики конкретного можливого рішення. Тут кожен атрибут пристроїв компенсації неоднорідності кодують бітовим бінарним ланцюжком (вектором) – хромосомою:

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

де  $x$  – числове значення параметра пристрою компенсації неоднорідності 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 усю генетичну інформацію загалом. Тут для формування бінарних ланцюжків зазвичай використовують код Грея, що 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 рішення.

Як оціночна може бути використана функція зведених дисконтованих витрат, яка визначає економічну ефективність запропонованого рішення, функція сумарних витрат потужності або витрат умовного палива на електростанціях тощо. Раніше було зазначено, що прийняті у проектній практиці економічні критерії ефективності проектних рішень є об'єктивізованими й не відображають повною мірою оцінку доцільності запропонованого рішення. Тут, на думку автора, можуть бути використані інші критерії ефективності запропонованих рішень, що моделюють, наприклад, вербальні оцінки якості породжуваних рішень і побудовані з використанням апарату нечіткої логіки [9, 13].

4. Визначення складу початкової популяції можливих рішень і заповнення за допомогою генератора випадкових чисел їх генотипів.

5. Розрахунок значень фітнес-функції ефективності запропонованих рішень поточного

покоління, а також середнього значення фітнес-функції всієї популяції загалом. Тут також розглядають питання щодо досягнення збіжності генетичного алгоритму. Подальші процедури виконують у разі відсутності збіжності.

6. Селекція генетичного матеріалу, спрямована на відбір пропонованих рішень, які характеризуються найвищими значеннями фітнес-функції. У результаті виконання операції селекції формують батьківські пари пропонованих рішень. При цьому пріоритет мають 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 полягає у випадковому визначенні двох точок розриву і «перевертанні» частини геному дочірнього елемента між цими точками.

9. Визначення випадковим чином елемента популяції, який замістить утворений дочірній генотип в наступному поколінні. Тут пріоритет у заміщенні мають рішення, що характеризуються найменшими значеннями фітнес-функції.

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

Зазначимо, що розглянутий алгоритм не є єдино можливим, часто використовують різні його модифікації, наприклад, на етапі виконання селекції склад батьківських пар можна визначати шляхом відкидання найменш ефективних рішень або методом організації турнірів.

Істотною проблемою, пов'язаною з використанням генетичних алгоритмів у задачах оптимізації режимів неоднорідних електричних мереж, 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 й не має типового однозначного розв'язку. Так, наприклад, знижене значення обсягу популяції характеризується недостатньою різноманітністю генотипів і може призвести до передчасної збіжності алгоритму до локального оптимуму, який не відповідає бажаному розв'язку задачі оптимізації. Навпаки, надмірно завищена кількість елементів популяції часто призводить до неефективного схрещування неперспективних рішень, що ускладнює й істотно уповільнює збіжність алгоритму. Схожа ситуація спостерігається і з налаштуванням характеристик мутацій. Основне призначення мутацій тут полягає в 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 автора, для налаштування генетичних алгоритмів пошуку ефективного рішення компенсації неоднорідності електричних мереж вельми корисним може виявитися апарат нечіткої логіки, що забезпечує «тонке» налаштування алгоритму в багатовимірному просторі регулювання [9, 13].

Зазначимо, що пропонований алгоритм оптимізації неоднорідних електричних мереж можна застосовувати як на етапі проектування електроенергетичних систем, зокрема вибору

складу та визначення місць розташування пристроїв компенсації неоднорідності [15], так і на етапі визначення поточних параметрів таких пристроїв у процесі експлуатації електричних систем.

### Висновки

1. Електричні мережі сучасних електроенергетичних систем характеризуються високим ступенем неоднорідності, що визначає застосування спеціальних заходів, спрямованих на компенсацію неоднорідності, зменшення втрат потужності та підвищення пропускної здатності електричної мережі. Широкий спектр можливих засобів компенсації неоднорідності визначає постановку задачі визначення оптимального складу та параметрів таких пристроїв на етапі проектування електричної системи та її експлуатації. Цільова функція такої задачі має дискретний характер, що вимагає застосування спеціальних прийомів і модифікацій оптимізаційних методів.

2. Розроблено математичну модель та алгоритм прийняття рішень із визначення складу та параметрів пристроїв компенсації неоднорідності електричних мереж, які ґрунтуються на апараті генетичних алгоритмів. Запропонований підхід забезпечує розгляд різноманітних, особливо нетипових рішень оптимізаційних задач, що гарантує виявлення найефективнішого рішення в багатофакторному просторі пошуку.

3. Застосування генетичних алгоритмів оптимізації режиму неоднорідних електричних мереж характеризується 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.

4. Ефективне використання математичного апарату генетичних алгоритмів у задачах прийняття рішень із визначення складу та параметрів пристроїв компенсації неоднорідності електричних мереж вимагає розв'язання проблеми налаштування параметрів алгоритму – обсягу початкової популяції, тривалості життєвого циклу породжуваних рішень, способу формування батьківських пар, імовірнісних характеристик генетичних операцій тощо. Для розв'язання такої задачі автор передбачає використання апарату нечіткої логіки, що забезпечує виконання «тонкого» налаштування генетичного алгоритму на основі вербальних оцінок його функціонування.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Холмский В. Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей. / В. Г. Холмский. – М.: Высшая школа, 1975. – 280 с.
2. Сулейманов В. М. Електричні мережі та системи: підручн. / В. М. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе. – Київ: НТУУ «КПІ», 2008. – 456 с. – ISBN 978-966-622-300-8.
3. Поспелов Г. Е. Потери мощности и энергии в электрических сетях / Г. Е. Поспелов, Н. М. Сыч ; под ред. Г. Е. Поспелова. – Москва: Энергоиздат, 1981. – 216 с
4. Железко Ю. С. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических системах / Ю. С. Железко, А. В. Артемьев, О. В. Савченко. – Москва: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. – 280 с. – ISBN 5-93196-364-6.
5. Экономия энергии в электрических сетях / [И. И. Магда, С. Я. Меженный, В. Н. Сулейманов и др.] ; под ред. Н. А. Качановой и Ю. В. Щербины. – К.: Технік, 1986. – 167 с.
6. Лежнюк П. Д. Оптимальное керування потоками потужності і напругою у неоднорідних електричних мережах / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 188 с.
7. Кузнецов В. Г. Оптимизация режимов электрических сетей / В. Г. Кузнецов, Ю. И. Тугай, В. А. Баженов. – К.: Наукова думка, 1992. – 216 с.
8. Кацадзе Т. Л. Принятие оптимальных проектных решений по развитию электроэнергетических систем/ Т. Л. Кацадзе // Материалы III ежегодной Международной научно-практической конференции "Повышение эффективности энергетического оборудования - 2013", Москва. – 2013. – Том 1. – С. 257 – 274.
9. Бондарев В. Н. Искусственный интеллект: учеб. 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, Наукові праці ВНТУ, 2016, № 1

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, С. А. Сергеев]. – Х.: ОСНОВА, 1997. – 112 с.

12. 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.

13. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы: пер. с польского / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.

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

15. Кацадзе Т. Л. Применение аппарата генетических алгоритмов для принятия проектных решений по развитию электроэнергетических систем / Т. Л. Кацадзе, В. Н. Сулейманов, В. А. Баженов // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2013. – № 2. – С. 58 – 65.

**Кацадзе Теймураз Луарсабович** – к. т. н., доцент кафедри електричних мереж та систем НТУУ «КПІ», teymuraz@ukr.net.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут».