

УДК 621.316

ЗАСТОСУВАННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ З ЗАДАНИМ РОЗПОДІЛОМ РАНЖОВАНИХ ЗМІННИХ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ

І.В. Трач, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03580, Україна

e-mail: trachi@ied.org.ua

Розглянуто багатокритеріальну багатовимірну оптимізацію з заданим розподілом ранжованих змінних, що застосована для зменшення втрат в електричній мережі. Оптимізацію втрат здійснено шляхом визначення місць встановлення конденсаторних установок. Запропоновано метод послідовних поступок. У якості першого критерію вибрано вартісну функцію. Формування множини розв'язків за першим критерієм виконано модифікованим методом рою часток (PSO-методом). Запропоновано також додатковий критерій, за яким розподіл ранжованих змінних шуканого вектора має бути схожим на змінні вектора з заданою аналітичною залежністю. Евклідова відстань використана як міра схожості. Бібл. 10, рисунок.

Ключові слова: багатокритеріальна багатовимірна оптимізація, метод послідовних поступок, розподіл ранжованих змінних, PSO-метод, критерій схожості векторів, втрати в електричній мережі, конденсаторні установки.

Вступ. Методи багатокритеріальної багатовимірної оптимізації активно розвиваються і успішно використовуються в електроенергетиці. Пропонуємо алгоритм, який дає змогу отримати розв'язки для ранжованого параметричного розподілу змінних шуканого вектора, схожого на вектор з заданою аналітичною нелінійною залежністю. Зокрема, аналітична залежність може мати вигляд гіперболи. Метод застосовано для зменшення втрат в електричній мережі шляхом визначення потужності та місць встановлення конденсаторних установок (КУ) у певних точках розподільних електричних мереж (ЕМ).

При виборі місць розміщення КУ в ЕМ [4, 9, 10] зазвичай в якості критерію використовується вартісна функція B , що підлягає мінімізації:

$$B = k_1 K_p \sum \Delta P_{\Sigma} T_j + k_2 \sum_{i=1}^{nc} K_{Ci} Q_{Ci} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де $\Delta P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \Delta P_i$ – загальні активні втрати; ΔP_i – активні втрати в i -му фрагменті на інтервалах часу T_j ; K_p – еквівалент річної вартості активних втрат; Q_{Ci} – потужність КУ; K_{Ci} – еквівалент річних витрат на встановлення та експлуатацію КУ; k_1 та k_2 – вагові коефіцієнти багатокритеріальної оптимізації. В роботі використано вагові коефіцієнти $k_1 = k_2 = 1$.

Функція (1) розраховується при цілому ряді обмежень – обмеження за допустимих значень напруги, коефіцієнта несинусоїдальності за напругою, за реактивною потужністю КУ та інших. При оптимізації вартісної функції (1) ємності КУ, встановлені в ЕМ, подаються у вигляді вектора ємнісних провідностей $y(y_1, y_2, \dots, y_{nc})$, де y_i – ємнісна провідність окремої КУ, nc – кількість КУ. Запропоновано два додаткові критерії оптимізації: другий критерій – схожість ранжованого параметричного розподілу змінних шуканого вектора на вектор з заданою аналітичною нелінійною залежністю; третій – мінімізація першої ранжованої змінної.

Модифікація PSO-методу. Для формування багатовимірного простору розв'язків згідно з першим критерієм використано метод оптимізації за допомогою рою часток (*Particle Swarm Optimization-PSO*). У PSO-методі організовано керування роєм часток, що переміщуються в багатовимірному просторі розв'язків (ПР), кожна з яких є потенціальним розв'язком оптимізаційної задачі. При цьому позиція частки x_k визначається при взаємодії з усіма іншими частками рою, що в ітеративному процесі покривають ПР і рухаються до глобального екстремуму.

Для задачі визначення параметрів та місць розміщення конденсаторних установок в електричній мережі використовують PSO-метод і його модифікації. В роботі використано

класичний алгоритм оптимізації безперервних нелінійних функцій, а саме метод рою часток [5]. На кожній ітерації для розрахунку напрямку та довжини вектора швидкості частки використовуються такі вихідні дані для пошуку цільової функції:

$$V_{k+1} = \omega \cdot V_k + a_1 \cdot \text{rnd} \cdot (pbest_k - x_k) + a_2 \cdot \text{rnd} \cdot (gbest_k - x_k);$$

$$x_{k+1} = x_k + V_{k+1},$$

де x_k – поточне положення k -ї компоненти частки; V_k – вектор швидкості k -ї компоненти частки; a_1 , a_2 – постійні прискорення; $pbest$ – найкраща знайдена часткою точка; $gbest$ – найкраща точка, пройдена усіма частками системи; ω – коефіцієнт інерції; rnd – функція, яка повертає випадкове число від 0 до 1.

PSO-метод модифіковано шляхом запам'ятовування проміжних результатів кожної ітерації обчислень x_k , які не відкидаються, а групуються у відповідні ПР алгоритму оптимізації та обмежені поступкою δ_1 першого критерію.

У результаті застосування процедур оптимізації модифікованим *PSO*-методом формується багатовимірний ПР згідно з першим критерієм (1), в якому кожній частці рою m відповідає вектор $y(y_1, y_2, \dots, y_{nc})$ у складі nc ємнісних провідностей КУ, встановлених у відповідних n вузлах ЕМ.

Багатовимірна оптимізація з заданим розподілом ранжованих змінних. Для розв'язання багатокритеріальної задачі за кількома критеріями застосовано метод послідовних поступок [2], який має переваги, що використані у роботі. У методі послідовних поступок вибирається послідовність критеріїв за важливістю. Мінімальному значенню відповідного критерію призначається поступка δ , %. Для першого критерію (1) визначається мінімальне значення цільової функції та призначається поступка δ_1 , %. Формується ПР за першим критерієм. У ПР за першим критерієм визначається мінімальне значення за другим критерієм, призначається поступка δ_2 та формується ПР за другим критерієм. Далі процедура повторюється для наступного за важливістю критерію. У нашому прикладі за перший за важливістю критерій вибрано вартісну функцію (1), відповідно наступними за важливістю вибрані другий та третій критерії, які будуть описані далі. Таким чином, розрахунки за другим критерієм виконуються для малої кількості векторів, розрахованих за першим критерієм, які обмежені першою поступкою δ_1 . Це призводить до зменшення кількості векторів, вибраних за другим та третім критеріями, та відповідно зменшення обчислювальних процедур, пов'язаних з розрахунками за другим критерієм.

У якості другого за важливістю критерію прийнято вимогу, щоб розподіл ранжованих змінних вектора був схожий на задане аналітичне рівняння. Формується ПР Y_H за другим критерієм. У роботі розглянуто лише один аналітичний вираз для формування другого критерію (критерію схожості), а саме гіперболічна залежність [7, 8]. Можливе використання інших аналітичних виразів, зокрема, експоненціальної та поліноміальної залежностей.

Гіперболічна залежність має такий вигляд: $H(r) = H_1 / r^\beta$, $r = 1, 2, \dots, g$, де r – параметричний ранг; H_1 – значення параметра H з рангом $r=1$; β – ранговий коефіцієнт, що характеризує ступінь крутизни кривої розподілення; g – загальна кількість рангів (змінні вектора).

Вибір гіперболічної залежності пов'язаний з параметричним ранжуванням змінних при застосуванні техноценологічного (ТЦ) підходу [1], за яким встановлюється, що розподіл ранжованих змінних має бути схожим на гіперболічний розподіл з певними кількісними характеристиками. У цьому випадку параметричними змінними є провідності КУ $y_H(y_1, y_2, \dots, y_{nc})$. Гіперболічний розподіл дає змогу отримати деякі корисні специфічні властивості для великих технічних систем, зокрема, це стосується розподілу провідностей КУ в електричних мережах [7, 8]. У статті не розглядаються практичні результати застосування ТЦ-критерію, а показується лише алгоритм отримання оптимального розв'язку з ранжованим параметричним розподілом змінних шуканого вектора, схожого на вектор з заданою аналітичною нелінійною залежністю.

Для визначення складу та розміщення КУ в ЕМ вектор ємнісних провідностей з гіперболічною залежністю подається у вигляді

$$\mathbf{y}_H = y_{H(r=1)} / r^\beta, \quad (2)$$

де $r=1,2,\dots,nc$. Вектор ємнісних провідностей \mathbf{y}_H має nc -вимірний розмір. У подальших розрахунках провідності КУ визначаються у відносних одиницях.

Евклідова відстань d_E використана для оцінки міри схожості між нормованими вектором з гіперболічною залежністю \mathbf{y}_H^{nor} та ранжованим шуканим вектором $rank(\mathbf{y}^{nor})$.

Для двох векторів $\mathbf{a}(a_1,\dots,a_M)$ та $\mathbf{c}(c_1,\dots,c_M)$ у декартових координатах (*Cartesian coordinates*) евклідова відстань визначається таким чином [6]:

$$d_E(\mathbf{a},\mathbf{c}) = \sqrt{\sum_{i=1}^M (a_i - c_i)^2}.$$

Задається dy_{max} – припустимий поріг відстані між нормованими векторами, який означає схожість векторів. Оператор ранжування $rank()$ означає операцію ранжування змінних y_1, y_2, \dots, y_{nc} вектора. Другий критерій (критерій схожості) має вигляд

$$\begin{cases} \mathbf{Y}_H \subset \mathbf{Y}_{Cost}, \\ \mathbf{y}_H^{nor}(r) = y_{H(r=1)}^{nor} / r^\beta, \quad r=1,2,\dots,nc \\ d_E(\mathbf{y}_H^{nor}, \mathbf{y}^{nor}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{nc} (y_{Hi}^{nor} - rank(y_i^{nor}))^2} \leq dy_{max}. \end{cases} \quad (3)$$

Припустима поступка другого критерію $\delta_2 = dy_{max}$ являє собою задану максимальну відстань між двома нормованими векторами $d_E(\mathbf{y}_H^{nor}, \mathbf{y}^{nor})$.

У виразі (3) застосовуються нормований ортогональний вектор гіперболи та нормований вектор, що підлягає визначенню. Це означає, що вектори мають одиничну довжину $|\mathbf{y}_H^{nor}| = |\mathbf{y}^{nor}| = 1$. Масив нормованих гіпербол \mathbf{Y}_H формується шляхом варіації параметра β .

Третій за важливістю критерій дає змогу мінімізувати першу ранжовану змінну вектора. ПР $\mathbf{Y}_{H(r=1)}$ згідно з третім критерієм формується з множини \mathbf{Y}_H :

$$\begin{cases} \mathbf{Y}_{H(r=1)} \subset \mathbf{Y}_H, \\ y_{H(r=1)}^{nor} \rightarrow \min. \end{cases} \quad (4)$$

Задається масив $\mathbf{Y}_{H(r=1)}$ векторів нормованих гіпербол \mathbf{y}_H^{nor} , які обмежуються діапазоном $y_{Hmin} \leq y_{H(r=1)}^{nor} \leq y_{Hmax}$ для рангу $r=1$. Це пояснюється тим, що для нормованої гіперболи параметр $y_{H(r=1)}^{nor}$ з рангом $r=1$ однозначно визначає значення та діапазон варіації змінних гіперболи і відповідно потужностей КУ. Масив нормованих гіпербол $\mathbf{Y}_{H(r=1)}$ формується шляхом варіації параметра $\beta = [\beta_{min} : \Delta\beta : \beta_{max}]$. Припустима поступка третього критерію $\delta_3 = \beta_{max} - \beta_{min}$. У результаті отримуємо масив векторів $\mathbf{Y}_{H(r=1)}$, для яких виконується обмеження $y_{Hmin} \leq y_{H(r=1)}^{nor} \leq y_{Hmax}$ для рангу $r=1$. Далі з масиву нормованих гіпербол $\mathbf{Y}_{H(r=1)}$ вибирається шуканий вектор $\mathbf{y}_{H(r=1)}^{nor} \rightarrow \min$.

Таким чином, множина розв'язків формується з підмножин за трьома за важливістю критеріями $\mathbf{Y}_B \subset \mathbf{Y}_H \subset \mathbf{Y}_{H(r=1)}^{nor}$ з відповідними поступками $\delta_1, \delta_2, \delta_3$, а шуканий вектор \mathbf{y} схожий до заданої нелінійної гіперболічної залежності (2) та має мінімальне значення першої ранжованої змінної.

Критерії (1), (3) та (4) використані у алгоритмі вибору КУ в радіальних ЕМ, в якому вектор провідностей схожий на заданий нелінійний гіперболічний розподіл змінних:

1. Формується множина рішень за першим критерієм (1). За результатом обчислення з застосуванням *PSO*-методу кожній частці рою m відповідає вектор $\mathbf{y}_B(y_1, y_2, \dots, y_{nc})$ провідностей КУ у відповідних nc вузлах ЕМ. Знаходиться мінімальне значення вартісної функції B_{\min} . Вводиться припустима поступка δ_1 . Формується перша множина рішень \mathbf{Y}_B .



2. Формується масив нормованих гіпербол \mathbf{y}_H^{nor} . З множини \mathbf{Y}_B вибирається множина рішень \mathbf{Y}_H за другим критерієм (3), де ранжовані змінні векторів \mathbf{y}^{nor} схожі на вектори нормованих гіпербол \mathbf{y}_H^{nor} . Використовується евклідова відстань між нормованими векторами для оцінки схожості векторів: $d_E(\mathbf{y}_H^{nor}, \mathbf{y}^{nor}) < \delta_3$.

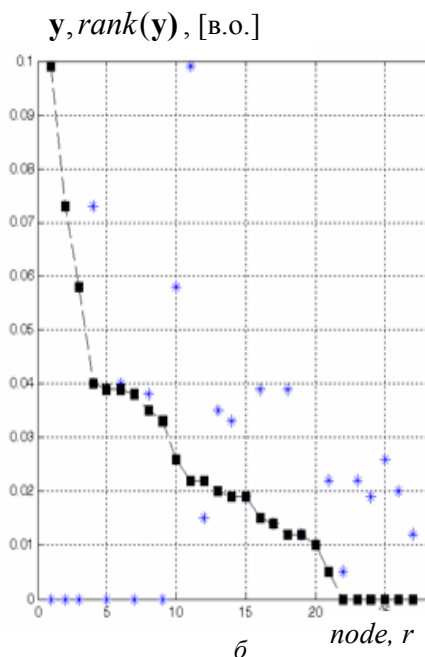
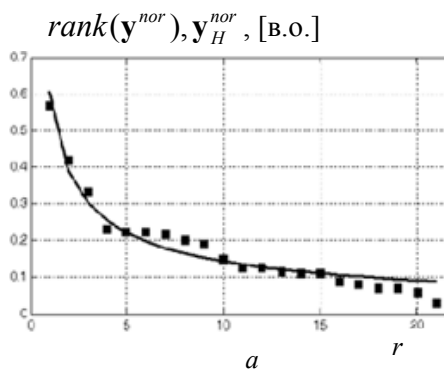


3. За третім критерієм (4) масив нормованих гіпербол $\mathbf{Y}_{H(r=1)}$ формується з \mathbf{Y}_H , використовуючи третю поступку δ_3 . З ПР $\mathbf{Y}_{H(r=1)}$ вибирається шуканий вектор з мінімальним значенням змінної $y_{H(r=1)}^{nor} \rightarrow \min$ з рангом $r=1$.

Примітка. Використання третього критерію (4) та третього етапу алгоритму не є обов'язковим для вибору вектора з гіперболічною залежністю. Цю додаткову специфічну вимогу запропоновано для оптимізації складу КУ в електричній мережі.

Результати розрахунку тестової електричної мережі. З застосуванням комбінованого алгоритму проведено дослідження відомої тестової схеми [3, 9] складної радіальної мережі напругою 23 кВ, що складається з $node=27$ вузлів та 21 навантаження.

На рисунку *a* показано результати вибору нормованого вектора ранжованих змінних



$rank(\mathbf{y}^{nor})$ провідностей КУ (позначено квадратами), схожого до нормованої гіперболічної кривої (позначено суцільною лінією), яка має низьке значення першого рангу $y_{H(r=1)}^{nor}=0,6044$ та ранговий коефіцієнт $\beta=0,625$. Відстань нормованих векторів $d_E(\mathbf{y}_H^{nor}, \mathbf{y}^{nor})=0,127$. Абсолютна похибка y_{err} відхилення елементів шуканого ранжованого вектора від гіперболи $y_{err}=0,061$ в.о. для рангу $r=21$.

На рисунку *б* показано значення параметрів вектора у провідностей КУ (позначено зірочками) у вузлах мережі ($node$) та значення цього вектора після ранжування змінних $rank(y)$ (позначено квадратами). На рисунку використані такі позначення: $node$ – номери вузлів мережі, де встановлені КУ; r – номер рангу змінної.

Результати розрахунків показують, що відстань між нормованими векторами $d_E(\mathbf{y}_H^{nor}, \mathbf{y}^{nor})$ та абсолютна похибка y_{err} відхилення елементів незначні, що вказує на достатню схожість шуканого вектора на вектор з заданою аналітичною залежністю. Вказаний алгоритм можна застосовувати для багатокритеріальної багатовимірної оптимізації для різних технічних застосувань.

Висновки. Запропоновано алгоритм багатокритеріальної багатовимірної оптимізації з ранжованим розподілом змінних шуканого вектора, схожого на вектор з заданою аналітичною залежністю. Комбінований алгоритм включає в себе метод поступок з використанням трьох критеріїв, зокрема, одним з критеріїв є схожість шуканого вектора ранжованих змінних та вектора зі змінними з заданою аналітичною нелінійною залежністю. У якості мі-

ри схожості використана евклідова відстань нормованих векторів. Для формування ПР запропоновано модифікований *PSO*-алгоритм, відмінністю якого є запам'ятовування проміжних результатів та формування ПР за першим критерієм згідно з відповідною поступкою.

Оптимізацію втрат здійснено шляхом визначення місць встановлення конденсаторних установок. Для прикладу розглянуто аналітичну залежність у вигляді гіперболи. Запропонований комбінований алгоритм можна застосовувати для багатокритеріальної багатовимірної оптимізації для різних технічних застосувань.

1. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов: Ценологические исследования. – М.: Изд-во ТГУ-Центр системных исследований, 2005. – Вып. 29. – 384 с.
2. Зінько П.М. Математичні методи та числові алгоритми системного аналізу: Навч. посібн. – К.: КНУ ім. Т. Шевченка, 2006. – 243 с.
3. Халил Т.М., Горпинич А.В. Выбор оптимальных сечений проводников и мест установки и мощности батарей конденсаторов в радиальных сетях с помощью селективного метода роя частиц // Наук. пр. Донецького нац. техн. ун-ту. – 2011. – № 11(186). – С. 406–413.
4. Eajal A.A., El-Havary M.E. Optimal Capacitor Placement and Sizing in Distorted Radial Distribution Systems. Part II: Problem Formulation and Solution Method // 14th IEEE Internat. Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP) Bergamo, Italy, 2010. – P. 1–6.
5. Shi Y., Eberhart R. A modified particle swarm optimizer // The 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings, 1998. – P. 69–73.
6. Smart J.R. Modern Geometries. Published by Cengage Learning, 5 edition, 1997. – 480 p.
7. Trach Igor, Zubiuk Yuri. A combined approach to multi-objective optimization of capacitor placement in radial distribution networks // 3rd Internat. Conf. on Electric Power and Energy. *Conversion Systems (EPECS 2013)* / http://www.epecs-conf.org/files/EPECS13_CP_FV.pdf.
8. Зубюк Ю.П., Трач И.В. Применение техноценологического критерия для выбора конденсаторов в радиальных сетях // 18-я международная научно-техническая конференция “Федоровские чтения”. Московский энергетический институт. Издат. дом МЭИ. Москва, 8 нояб. 2013. – С. 25–28.
9. Vahid M., Hossein A.A., Kazem M. Maximum loss reduction applying combination of optimal conductor selection and capacitor placement in distribution systems with nonlinear loads // UPEC 2008. 43rd International. – 2008. – P. 1.
10. Zhang W., Liu Y. Multi-objective reactive power and voltage control based on fuzzy optimization strategy and fuzzy adaptive particle swarm // Int. J. Electr. Power Energy Syst., 30 (9) (2008). – P. 525–532.

УДК 621.316

И.В. Трач, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Применение многоцелевой многомерной оптимизации с заданным распределением ранжированных переменных для уменьшения потерь в электрической сети

Многокритериальная многомерная оптимизация с заданным распределением ранжированных переменных применена для уменьшения потерь в электрической сети. Оптимизация потерь осуществлялась путем определения мест установки конденсаторных установок. Предложен метод последовательных уступок. В качестве первого критерия использована стоимостная функция. Формирование множества решений по первому критерию выполнялось модернизированным методом роя частиц (PSO-методом). Предложен дополнительный критерий, по которому распределение ранжированных переменных искомого вектора должно быть похожим на переменные вектора с заданной аналитической зависимостью. Евклидово расстояние использовано как мера сходства. Библ. 10, рисунок.

Ключевые слова: многокритериальная многомерная оптимизация, метод последовательных уступок, распределение ранжированных переменных, *PSO*-метод, критерий сходства векторов, потери в электрической сети, конденсаторные установки.

I. Trach

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Multidimensional optimization with a given distribution of ranked variables for reducing electrical losses in the electrical network

For multi-criteria multidimensional optimization with a given distribution of ranked variables applied to reduce the loss in the electrical network. Optimization of losses was carried out by determining the placement of capacitor banks. The method of consecutive concessions was proposed. As the first criterion used cost function. A formation of the solution set by first criterion was performed using modernized particle swarm method (PSO-method). An additional criterion was proposed, based on which the distribution of ranked variables of an unknown vector should be similar to the vector variables with a given analytical dependence. Euclidean distance was used as a similarity measure of vectors. References 10, figure.

Key words: Multi-criteria multidimensional optimization, method of consecutive concessions, distribution of ranked variables, *PSO*-method, criterion of similarity vectors, loss of the electrical grid, capacitor banks.

Надійшла 16.01.2015

Received 16.01.2015