УДК 621.311
Т. М. ХАЛІЛ, аспирант
О. В. ГОРПИНИЧ, канд. техн. наук, доцент
Приазовський державний технічний університет, г. Мариуполь

# ЗАСТОСУВАННЯ СЕЛЕКТИВНОГО МЕТОДУ РОЮ ЧАСТИНОК ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНФІГУРАЦІЇ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ

*Наведено новий алгоритм вирішення проблеми оптимізації конфігурації розподільної мережі. Цей алгоритм є простою модифікацією бінарного методу рою частинок. Запропонований алгоритм застосовано до двох тестових схем. Щоб показати ефективність запропонованого алгоритму, результати, отримані за його допомогою, порівняно з існуючими методами.*

*Приведен новый алгоритм решения проблемы оптимизации конфигурации распределительной сети. Этот алгоритм представляет собой простую модификацию бинарного метода роя частиц. Предложенный алгоритм применили к двум тестовым схемам. Чтобы показать эффективность предложенного алгоритма, результаты, полученные с его помощью, сравнили с существующими методами.*

## Введение

В умовах експлуатації періодично виникає потреба зміни топології розподільних мереж за допомогою вмикання або розмикання комутаційних апаратів (КА) (наприклад, з метою підвищення надійності або зниження втрат потужності). Процес зміни топології розподільних мереж шляхом зміни стану розімкнених або замкнених комутаційних апаратів (КА) називається реконфігурацією і може бути використаний для покращення ефективності функціонування електричних систем. Проблема реконфігурації розподільних мереж є проблемою складної багатоцільової оптимізації, складність якої виникає за рахунок того, що топологія розподільної мережі повинна бути радіальною та обмеження, які накладаються на потоки потужності, є нелінійними за своєю природою. Таким чином, існує проблема реконфігурації або оптимізації конфігурації розподільних мереж (ОКРМ).

Останіми роками було розроблено багато алгоритмів в галузі ОКРМ, переважна кількість яких базується на евристичних методах та методах штучного інтелекту. Достатньо докладний аналіз сучасних евристичних методів в галузі ОКРМ з метою зниження втрат потужності наведено в [1]. Для вирішення проблеми ОКРМ широко використовують методи штучного інтелекту: метод імітації відпалу, штучні нейронні мережі, генетичні алгоритми, алгоритм пошуку із заборонами та інші. Останнім часом для вирішення проблем оптимізації в розподільних мережах все частіше використовують метод рою частинок (МРЧ). Таким чином, виникає задача розробки достатньо простого та разом з тим ефективного алгоритму, який дозволив би викростати МРЧ для вирішення проблеми ОКРМ.

## Основная часть

Для розв’язання поставленої задачі запропоновано просту модифікацію бінарного методу рою частинок (БМРЧ) – селективний метод рою частинок (СМРЧ). Простір розв’язань в БМРЧ може приймати тільки значення 0 або 1, проте після модифікації простір розв’язань представлятиме набір будь-яких змінних. Така модифікація робить МРЧ дуже зручним для вирішення проблеми ОКРМ. Щоб показати ефективність запропонованого СМРЧ, він був використаний для розподільних мереж, що складаються з 33 та 69 вузлів, після чого результати порівнювалися з результатами, отриманими за допомогою інших сучасних методів.

Проблему ОКРМ можна сформулювати таким чином: необхідно оптимізувати цільову функцію (наприклад, вибрати конфігурацію з мінімальними втратами активної потужності $\Delta P$) з урахуванням наступних умов.

1. Струми в гілках не повинні перевищувати гранично допустимих значень

$$I_i \le I_{imax},$$

де $I_i$ – струм в гілці $i$; $I_{imax}$ – максимально допустимий струм гілки $i$.

2. Напруга у вузлах повинна знаходитися в допустимих межах

$$V_{jmin} \le V_j \le V_{jmax},$$

де $V_j$ – напруга у вузлі $j$; $V_{jmin}$ та $V_{jmax}$ – мінімально і максимально допустима напруга у вузлі $j$, відповідно.

3. У розподільній мережі не повинно бути відключених навантажень.

4. Конфігурація розподільної мережі повинна мати радіальну структуру.

МРЧ був розроблений Кенеді і Еберхартом у 1995 р. [2]. Метод заснований на моделюванні соціальної поведінки і достатньо ефективний для вирішення проблем нелінійної оптимізації. МРЧ – це стохастичний оптимізаційний алгоритм, який моделює соціальну поведінку птахів в зграї або косяків риб і методи, за допомогою яких вони знаходять відповідні місця для проживання, джерела їжі і т.д. У МРЧ агентами є "частинки", які відображають можливе розв'язання проблеми. Кожна частинка переміщується в багатовимірному просторі розв'язань із швидкістю, яка постійно оновлюється на основі власного досвіду та досвіду сусідів. Розглянемо основні положення МРЧ.

1. Нехай простір розв'язань є $d$-вимірним та кожна частинка $i$ характеризується $d$-вимірним вектором $X_i = [x_{i1}, x_{i2},\dots, x_{id}]$.

2. Кількість частинок в рої, який називається "популяцією", позначимо через $n$. Популяцію можна представити як $pop = [X_1, X_2,\dots, X_n]$.

3. Нехай також $PB_i = [pb_{i1}, pb_{i2},\dots, pb_{id}]$– найкраще з положень кожної частинки (particle best), $GB=[gb_1, gb_2,\dots, gb_d]$ – найкраще з положень рою в цілому (global best), а $V_i = [v_{i1},v_{i2},\dots, v_{id}]$ – швидкість переміщення кожної частинки у $d$-вимірному просторі розв'язань.

Тоді на ітерації $k$ швидкість оновлюється за допомогою виразу:

$$v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1 r_1 (pb_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (gb_d^k - x_{id}^k), \tag{1}$$

де $i = 1,2,..,n$, а $n$ – розмір популяції;

$w$ – коефіцієнт, що характеризує інерцію;

$c_1$ и $c_2$ – сталі, що характеризують прискорення; $r_1$ и $r_2$ – дві випадкові величини в діапазоні [0,1].

4. Положення частинки оновлюється за допомогою виразу

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1}. \tag{2}$$

У 1997 р. Кенеді і Еберхарт [3] адаптували МРЧ для пошуку в бінарному просторі розв'язань, застосувавши сигмоїдальне перетворення до швидкості частинки:

$$sigmoid(v_{id}^{k+1}) = \frac{1}{1+\exp(-v_{id}^{k+1})}. \tag{3}$$

Вираз для оновлення положення частинки в цьому випадку перетвориться до вигляду

$$x_{id}^{k+1} = \begin{cases} 1, & if \ rand < sigmoid\left(v_{id}^{k+1}\right) \\ 0, & otherwise \end{cases} \tag{4}$$

У СМРЧ простір розв'язань для кожного $d$-вимірного вектору $S_d = [s_{d1}, s_{d2},\dots, s_{dn}]$ є набором з $dn$ положень, де $dn$ – кількість вибраних положень для $d$-вимірного вектору. Цільова функція в цьому випадку – вибрати розв'язання з $dn$ положень кожного $d$-вимірного вектору простору розв'язань $S_d$, причому положення кожної частинки визначається набором вибраних змінних. Отже, сигмоїдальна функція матиме такий вигляд

$$sigmoid(v_{id}^{k+1}) = dn\frac{1}{1+\exp(-v_{id}^{k+1})}, \tag{5}$$

а координата $i$ кожного положення частинки для даного $d$-вимірного вектору є вибраною змінною, оновлювати яку можна за допомогою виразу

$$x_{id}^{k+1} = \begin{cases} s_{d1} & if \quad sigmoid(v_{id}^{k+1}) < 1 \\ s_{d2} & if \quad sigmoid(v_{id}^{k+1}) < 2 \\ s_{d3} & if \quad sigmoid(v_{id}^{k+1}) < 3 \\ . \quad . & . \\ . \quad . & . \\ . \quad . & . \\ s_{dn} & if \quad sigmoid(v_{id}^{k+1}) \le dn \end{cases}, \tag{6}$$

де $s_{d1}, s_{d2}, s_{d3}, \ldots, s_{dn}$ – вибрані змінні у $d$-вимірному векторі.

Значення швидкості обмежуються деякими мінімальними та максимальними величинами [$V_{min}$, $V_{max}$], використовуючи вираз

$$v_{id}^{k+1} = \begin{cases} V_{max} & if \quad v_{id}^{k+1} > V_{max} \\ v_{id}^{k+1} & if \quad \left|v_{id}^{k+1}\right| \le V_{max} \\ V_{min} & if \quad v_{id}^{k+1} < V_{min} \end{cases}. \tag{7}$$

Щоб уникнути постійного значення швидкості для кожної ітерації та змусити кожну частинку переміщуватися в просторі розв’язань, необхідно використовувати вираз:

$$v_{id}^{k+1} = \begin{cases} rand * v_{id}^{k+1} & if \quad \left|v_{id}^{k+1}\right| = \left|v_{id}^{k}\right| \\ v_{id}^{k+1} & otherwise \end{cases}. \tag{8}$$

Використання СМРЧ для вирішення проблеми ОКРМ можна представити у вигляді трьох етапів:

1) визначення кількості $d$-вимірних векторів;

2) знаходження простору розв’язань для кожного $d$-вимірного вектору;

3) вибір оптимального розв’язння серед просторів розв’язань.

Розглянемо докладніше усі три етапи.

*Визначення кількості d-вимірних векторів*

Розподільна мережа, як правило, має радіальну структуру без замкнених контурів. Для визначення кількості $d$-вимірних векторів необхідно замкнути усі нормально розімкнені комутаційні апарати (НРКА), внаслідок чого вийде деяка кількість контурів. Кількість $d$-вимірних векторів буде дорівнювати кількості контурів.

*Знаходження простору розв’язань для кожного d-вимірного вектору*

Щоб продемонструвати процедуру знаходження простору розв’язань для кожного $d$-вимірного вектору, як приклад на рис. 1 представлена спрощена структура розподільної мережі. Розглянемо послідовність виконання операцій.

1. Розподільна мережа, представлена на рис. 1, *а*, має 17 гілок, 15 нормально замкнених комутаційних апаратів (НЗКА) та 2 НРКА.

2. Замикання НРКА призведе до утворення 2 контурів.

3. Гілки, які не належать жодному контуру, з розгляду виключаються. У нашому прикладі з розгляду слід виключити гілки 1, 2, 7, 8 та 9. Ці гілки не відображаються в просторі розв’язань, тому надалі замість схеми, представленої на рис. 1, *а*, може бути використана спрощена схема, представлена на рис. 1, *б*.

4. Кількість $d$-вимірних векторів дорівнює кількості контурів, тому в нашому випадку ми маємо 2 $d$-вимірних вектори.

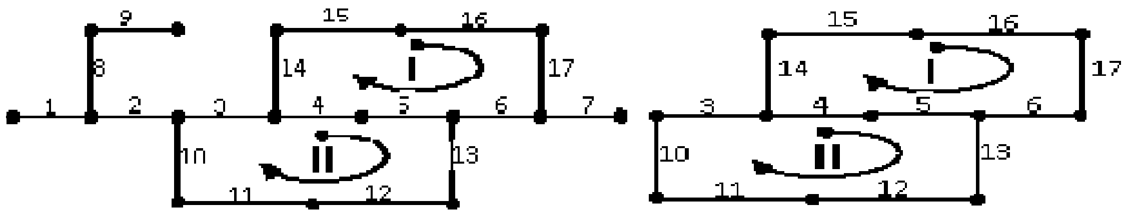
5. Простір розв’язань для кожного $d$-вимірного вектору складатиметься з гілок, які належать контуру, що відображається за допомогою цього $d$-вимірного вектору. У нашому прикладі

d1=[10, 11, 12, 16, 4, 5, 6],
d2=[3, 4, 5, 13, 14, 17, 15].

6. Гілки 4 та 5 належать одночасно двом контурам і, відповідно, двом $d$-вимірним векторам, тому ці дві гілки повинні використовуватися тільки в одному $d$-вимірному векторі, який вибирається випадковим чином.

*Вибір оптимального розв’язання серед просторів розв’язань*

Після визначення кількості $d$-вимірних векторів та знаходження простору розв’язань для кожного $d$-вимірного вектору, вибір оптимального розв’язання серед просторів розв’язань можна здійснити, послідовно використовуючи вирази (1), (7), (8), (5) та (6).




*а*) *б*)

Рис. 1. Спрощена структура розподільної мережі

Щоб переконатися в коректності запропонованого СМРЧ, він був перевірений на прикладі двох конфігурацій розподільної мережі, опублікованих в [4] та [5] (див. рис. 2 та 3). Для обох схем усі НРКА та НЗКА, які належать будь-якому контуру, розглядалися як можливі розв’язання проблеми ОКРМ.

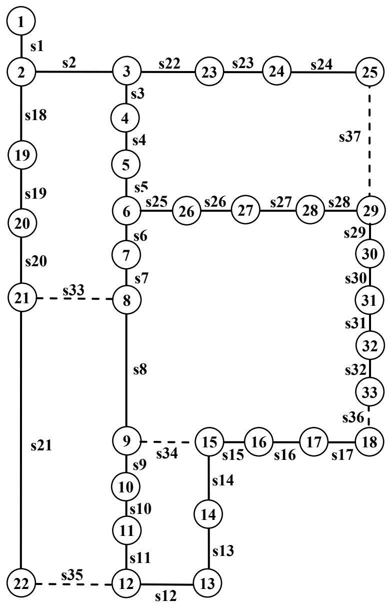


Рис. 2. 33-вузлова розподільна мережа

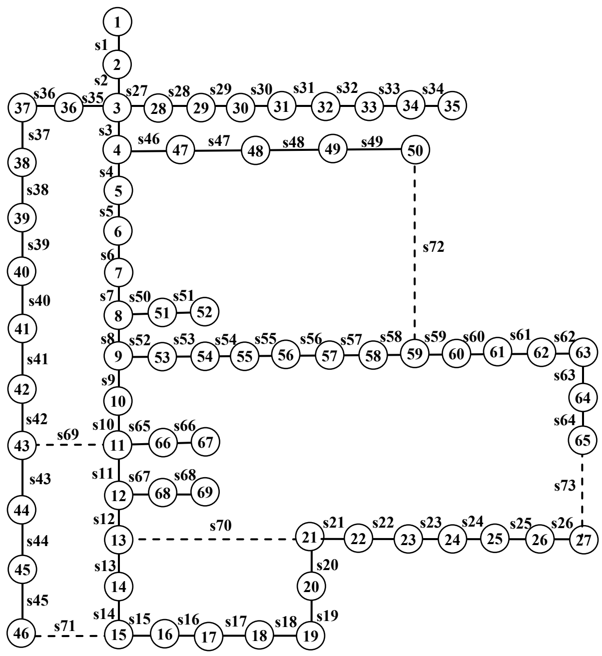


Рис. 3. 69-вузлова розподільна мережа

33-вузлова розподільна мережа напругою 12,66 кВ містить 1 головну ділянку, 3 приєднання та 5 НРКА (рис. 2). КА 33, 34, 35, 36 та 37 нормально розімкнені. У цьому початковому стані втрати активної потужності дорівнюють $\Delta P$ = 202,6 кВт. Оптимальна конфігурація, отримана за допомогою запропонованого методу, формується таким чином: КА 37 залишається нормально розімкненим, КА 33, 34, 35 та 36 слід замкнути, а КА 7, 9, 14 та 32 – розімкнути. В цьому випадку втрати активної потужності знизяться на 31 %. Отримана за допомогою запропонованого методу оптимальна конфігурація відповідає конфігураціям, отриманим в [4] та [5] за допомогою інших методів.

69-вузлова розподільна мережа напругою 12,66 кВ містить 1 головну ділянку, 7 приєднань та 5 НРКА (рис. 3). КА 69, 70, 71, 72 та 73 нормально розімкнені. У цьому початковому стані втрати активної потужності дорівнюють $\Delta P$ = 224,96 кВт. Оптимальна конфігурація, отримана за допомогою запропонованого методу, формується таким чином: КА 69 та 70 залишаються нормально розімкненими, КА 71, 72 та 73 слід замкнути, а КА 14, 56 та 63 – розімкнути. В цьому випадку втрати активної потужності знизяться на 44 %. Отримана за допомогою запропонованого методу оптимальна конфігурація відповідає конфігураціям, отриманим в [5] та [6] за допомогою інших методів.

На прикладі розподільної мережі, представленої на рис. 3, розглянемо докладніше послідовність виконуваних операцій при використанні СМРЧ. Спрощена схема представлена на рис. 4. В даному випадку ми маємо 5 контурів. Гілки 1, 2, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 50, 51, 65, 66, 67, 68 не належать жодному контуру, тому після виключення цих гілок ми отримаємо наступні *d*-вимірні вектори:

d1= [s46, s47, s48, s49, s72];
d2= [s3, s35, s36, s37, s38, s39, s40, s41, s42];
d3= [s43, s44, s45, s71];
d4= [s21, s22, s23, s24, s25, s26, s59, s60, s61, s62, s63, s64, s73];
d5= [s15, s16, s17, s18, s19, s20].

Гілки, які належать одночасно двом контурам, випадковим чином використовуються тільки в одному *d*-вимірному векторі. Наприклад, гілки 4, 5, 6, 7 та 8 належать контурам I та II. Ці гілки можуть використовуватися в d1 при одній ітерації та в d2 – при іншій.

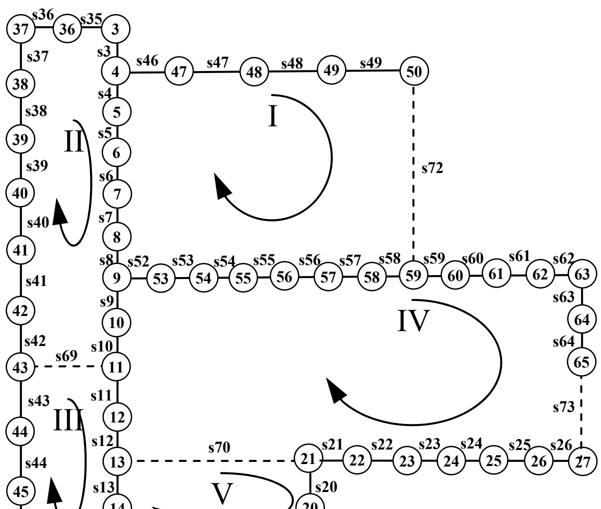



Рис. 4. Спрощена схема 69-вузлової розподільної мережі

## Висновки

1. Запропоновано просту модифікацію бінарного методу рою частинок для вирішення проблеми оптимізації конфігурації розподільної мережі.

2. Новий метод, який запропоновано назвати селективним методом рою частинок, може бути застосований в інженерній практиці, де простір розв’язань складається із специфічних величин (наприклад, стандартні величини потужності батарей конденсаторів та місця їх

розміщення при вирішенні проблеми оптимального розміщення та вибору потужності батарей конденсаторів).

3. Головною перевагою селективного методу рою частинок є його простота.

4. Запропонований метод був застосований до двох тестових схем, одна з яких містить 33 вузли, а інша – 69. Порівняння отриманих результатів з результатами застосування інших існуючих методів підтвердило точність та ефективність селективного методу рою частинок.

**Список літератури**


1. G. K. Viswanadha Raju, and P. R. Bijwe, "An efficient algorithm for minimum loss reconfiguration of distribution system based on sensitivity and heuristics," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 3, August 2008, pp. 1280–1287.
2. J. Kennedy and R. C. Eberhart, "Particle swarm optimization," Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks, vol. IV, Perth, Australia, 1995, pp. 1942–1948.
3. J. Kennedy and R. C. Eberhart, "A discrete binary version of the particle swarm algorithm," Proc. of the Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC97), 1997, pp.4104-4109.
4. M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, April 1989, pp. 1401–1407.
5. J. S. Savier and Debapriya Das, "Impact of network reconfiguration on loss allocation of radial distribution systems," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, No. 4, Oct. 2007, pp. 2473–2480.
6. Cui-Ru Wang and Yun-E Zhang, "Distribution network reconfiguration based on modified particle swarm optimization algorithm", Proc. IEEE Int. Conf. on Machine Learning and Cybernetics, Aug. 2006, pp. 27–34.


## DISTRIBUTION NETWORK RECONFIGURATION USING SELECTIVE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

T. M. Khalil, graduate student, A. V. Gorpinich, Cand. Tech. Scie.

*A new algorithm for solving the distribution network reconfiguration is presented. This algorithm is a simple modification to the binary particle swarm optimization. The proposed algorithm is applied to two test systems. The results obtained via presented method are compared with some previous techniques to demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm.*

*Поступила в редакцию 01.11 2010 г.*