

doi:10.15199/48.2017.01.76

Zastosowanie hybrydowej metody ewolucyjnej do optymalizacji strategii rozwoju sieci dystrybucyjnych

Streszczenie. Artykuł przedstawia zastosowanie hybrydowej metody ewolucyjnej do optymalizacji rozwoju sieci dystrybucyjnych energii. Zaproponowana metoda bazuje na algorytmie genetycznym współpracującym ze strategią ewolucyjną. W artykule zawarto koncepcję opracowanej metody oraz opis proponowanych algorytmów a także przedstawiono obliczenia opracowaną metodą dla wybranej elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej.

Abstract. The article represents to optimization of development of electric power nets the use of hybrid evolutionary method. Proposed method applies co-operation of genetic algorithms with evolutionary strategy algorithm. The article contains the results and description of calculations for chosen the electric power nets. (**Application of hybrid evolutionary method to optimization of strategy of development electric power nets**).

Słowa kluczowe: algorytmy genetyczne, strategie ewolucyjne, optymalizacja, sieci elektroenergetyczne.

Keywords: genetic algorithms, evolutionary strategies, optimization, electric power nets.

Wstęp

Zagadnienia dotyczące metodyki optymalizacji systemów elektroenergetycznych są bardzo aktualne [1, 2, 3, 4, 5, 6], szczególnie przy uwzględnieniu wdrażaniu koncepcji sieci inteligentnych [7, 8, 9, 10]. Analizując literaturę można zauważyć, iż w celu realizacji obliczeń optymalizacyjnych opracowuje się m.in. nowe algorytmy heurystyczne [8,11] w tym algorytmy bazujące na metodach symulowanej ewolucji [12, 13, 14, 15, 16]. W artykule przedstawiono koncepcję hybrydowej metody bazującej na obliczeniach ewolucyjnych przeznaczonej do planowania rozwoju sieci dystrybucyjnych. W celu rozwiązania tego problemu autor stosował wcześniej algorytmy ewolucyjne [17]. Jako podejście obliczeniowe dające nowe możliwości, autor proponuje obecnie połączenie możliwości algorytmu genetycznego (AG) oraz strategii ewolucyjnej (μ , λ) (SE) oraz zastosowanie programowania ewolucyjnego (PE).

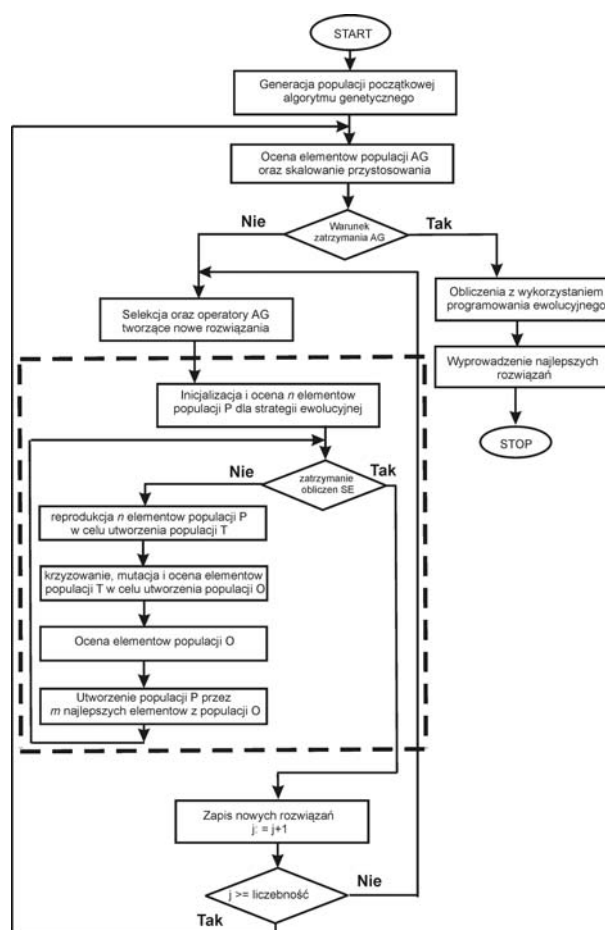
Podstawowym elementem proponowanej metody jest algorytm genetyczny charakteryzujący się globalnością poszukiwań, który współpracuje z procedurami strategii ewolucyjnej oraz programowania ewolucyjnego ukierunkowanymi na lokalne poszukiwania. Celem obliczeń realizowanych przez główny algorytm jest odszukanie optymalnej (ze względu na przyjęte kryteria) drogi przejścia od etapu początkowego do końcowego w grafie opisującym etapy rozwoju sieci. Podczas obliczeń rozpatrywany jest zbiór wielu zmiennych opisujący scenariusze rozbudowy analizowanej sieci. Scenariusze te mogą także uwzględniać m.in. przyłączanie nowych źródeł generacji rozproszonej w wybranych punktach sieci. Wówczas można uwzględnić wpływ źródeł generacji rozproszonej m.in. na stany ustalone pracy sieci (spadki i zmiany napięć, rozptyły mocy, wpływ na straty techniczne). W dokładniejszych analizach należy również uwzględnić wpływ źródeł generacji rozproszonej na problem pogarszania parametrów jakościowych energii [10, 18, 19, 20, 21].

W zaproponowanym podejściu obliczeniowym założono, iż zastosowanie strategii ewolucyjnej oraz programowania ewolucyjnego miałyby na celu odszukiwanie zakresu prac modernizacyjnych dla wybranych etapów rozwoju analizowanej sieci dystrybucyjnej SN.

Koncepcja hybrydowej metody ewolucyjnej

Schemat blokowy realizowanych obliczeń proponowaną metodą pokazano na rysunku 1. Główna pętla ewolucyjnych obliczeń realizowana jest z zastosowaniem algorytmu genetycznego, którego kolejne etapy obliczeń zaznaczono na schemacie blokowym. Proponowana hybrydowa metoda

bazuje na włączeniu w proces poszukiwania algorytmu genetycznego dodatkowych obliczeń realizowanych przez strategię ewolucyjną. Zastosowanie której pozwala na wyznaczenie szczegółowego zakresu planowanych przedsięwzięć. Strategie ewolucyjne bazują na koncepcji symulowanej ewolucji przy czym stosuje się w nich najpierw rekombinację, następnie ocenę i selekcję. Potem jest wynikiem krzyżowania dwóch rodziców i mutacji. Utworzona zostaje populacja tymczasowa, która podlega selekcji, która redukuje rozmiar tej populacji do rozmiaru populacji rodziców, poprzez wybór najlepszych wariantów rozwiązań.



Rys. 1. Schemat blokowy ilustrujący przebieg obliczeń realizowanych przez AG oraz SE

Widoczny na schemacie prostokąt (wrysowany linią przerywaną) zaznacza obliczenia realizowane przez strategię ewolucyjną. Alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie w tej części obliczeń algorytmu programowania ewolucyjnego, które realizowałoby podobny proces poszukiwań jak SE. Ostatecznie w opracowanej hybrydowej metodzie do tej części obliczeń wybrano strategię ewolucyjną, natomiast opracowane procedury programowania ewolucyjnego zastosowano w końcowej części obliczeń w celu weryfikacji uzyskanych wcześniej wyników (jak zaznaczono na schemacie blokowym).

Rozpatrując szczegółowo algorytm strategii ewolucyjnej można rozróżnić etapy [11, 22]:

- losowego generowania (oraz oceny) początkowej populacji rodzicielskiej P, zawierającej μ osobników,
- utworzenie poprzez reprodukcję, populacji tymczasowej T zawierająca λ osobników, przy czym $\lambda \geq \mu$.
- reprodukcja polega na wielokrotnym losowym wyborze λ osobników z populacji P (losowanie ze zwracaniem) i umieszczenie ich w populacji tymczasowej T (przy braku nacisku selekcyjnego),
- osobnicy z T podlegają krzyżowaniu i mutacji, w wyniku czego powstaje populacja O, również o liczności λ ,
- ostatnim krokiem jest wybór μ najlepszych potomków z obydwu populacji P oraz O, które będą stanowić nową populację rodzicielską.

Można zauważyć, że strategia (μ, λ) ma podobne działanie jak strategia $(\mu + \lambda)$, różnica polega na tym, że w strategii $(\mu + \lambda)$ nową populację P zawierającą μ osobników wybiera się tylko spośród najlepszych λ osobników populacji O [11].

W strategii ewolucyjnej (μ, λ) każdy osobnik posiada dodatkowy chromosom σ , zawierający wartości standardowych odchyłek wykorzystywanych podczas mutacji poszczególnych genów chromosomu x [11, 16].

Operacjom genetycznym ulegają obydwa chromosomy, zarówno wektor zmiennych niezależnych x, jak i wektor σ . Krzyżowanie polega na wylosowaniu dwóch osobników i wymianie bądź uśrednianiu wartości ich genów, dwa nowe osobniki zastępują swoich rodziców.

Mutacja wykonywana jest na pojedynczym osobniku, jako pierwszy poddawany jest mutacji chromosom $\sigma = [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n]$. Następnie nowe zakresy mutacji $\sigma = [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n]$ wpływają na zmianę wartości głównego chromosomu. Zmiana parametrów $\sigma = [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n]$ pozwala na samoadaptację procesu mutacji. Ponadto można również wykorzystać samoczynną adaptację zasięgu mutacji zgodnie ze znaną w literaturze metodą 1/5 sukcesów [16]. W zastosowanym algorytmie genetycznym przyjęto kodowanie binarne. Ciągi zerowejedynkowe oznaczono przez zmienne logiczne $a_1 \dots a_{10}$, które to zmienne określają realizację planowanych dla poszczególnych etapów przedsięwzięć rozwojowych.

Natomiast dla strategii ewolucyjnej oraz programowania ewolucyjnego przyjęto kodowanie w postaci wektorów rzeczywisto liczbowych o liczbie elementów takiej jak liczba elementów w ciągach binarnych algorytmu genetycznego.

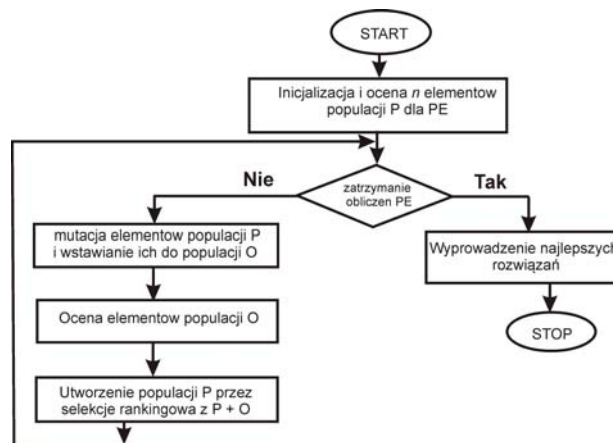
Założono, że wartości elementów wektorów rzeczywisto liczbowych (zawierające się w przedziale od 0.1 do 1) po zdekodowaniu określają numery elementów macierzy opisujących w jednostkach względnych, stopień realizacji poszczególnych przedsięwzięć rozwojowych ($y_1 \dots y_{10}$) oraz odpowiadające im wartości nakładów inwestycyjnych ($x_1 \dots x_{10}$). W tym celu utworzono macierze, które przy 25 etapach rozwojowych sieci miałyby wymiary 250x20. Liczba wierszy 250 wynikałaby z założonych 25 etapów z opisem 10 przedsięwzięć rozwojowych (dla każdego etapu). Macierze zawierałyby po 20 kolumn z wartościami opisującymi w

jednostkach względnych nakłady na planowane przedsięwzięcia rozwojowe. Opracowano także efektywne procedury przeszukiwania tych macierzy.

Przeliczenia na jednostki względne dokonano odnosząc poszczególne wartości kosztów eksploatacyjnych, nakładów inwestycyjnych oraz realizacji przedsięwzięć rozwojowych do ich maksymalnych wartości. Zależą zastosowanych sposobów kodowania dla algorytmu genetycznego oraz strategii ewolucyjnej jest możliwość swobodnego zwiększania liczby rozpatrywanych etapów rozwojowych jak również możliwa jest rozbudowa opisu przedsięwzięć rozwojowych w poszczególnych etapach rozbudowy sieci.

Programowanie ewolucyjne (PE) wykazuje podobieństwo do strategii ewolucyjnej $(\mu + \lambda)$. Różnica polega na tym, że podczas każdej generacji algorytmu PE nowa populacja O jest tworzona przez mutację każdego z osobników populacji rodzicielskiej P. W SE (μ, λ) każdy osobnik ma natomiast jednakową szansę na pojawienie się w populacji tymczasowej T. W PE populacje P oraz O są tak samo liczne, tzn. $\mu = \lambda$. Ostatecznie nowa populacja rodzicielska P jest tworzona za pomocą selekcji rankingowej, której podlegają osobniki zarówno ze starej populacji P jak i osobniki zmutowane z populacji O. Mutacja w PE polega na losowej perturbacji wartości poszczególnych genów [16, 22].

Na rysunku drugim zaprezentowano schemat blokowy obliczeń realizowanych przez algorytm programowania ewolucyjnego.



Rys.2. Schemat blokowy ilustrujący przebieg obliczeń realizowanych przez programowanie ewolucyjne (PE)

Stosowana w programowaniu ewolucyjnym selekcja rankingowa polega na tym, że osobniki ustawiane są kolejno zgodnie z wartością funkcji przystosowania od najlepszego do najgorszego. Każdy osobnik (wariantowe rozwiązanie analizowanego zadania) ma numer określający jego pozycję na liście, czyli swoją rangę. Liczba kopii każdego osobnika wprowadzana do nowej populacji jest zdefiniowana przez wcześniej ustaloną funkcję, która zależy od rangi osobnika. Zależą selekcji rankingowej jest to, że liczba kopii możliwych do osiągnięcia dla gorszych osobników nie zależy od tego, o ile są gorsze od osobnika najlepszego co jest problemem w selekcji proporcjonalnej. Ponadto można również tę metodę selekcji wykorzystać do zadań minimalizacji jak i maksymalizacji funkcji [16].

W opracowanym modelu przyjęto następujące kryteria optymalizacyjne zastosowane do odszukiwania rozwiązań:

- minimalizacja kosztów eksploatacyjnych analizowanej sieci w założonym horyzoncie czasowym,

- minimalizacja nakładów inwestycyjnych w założonym horyzoncie czasowym
- maksymalizacja zakresu planowanych przedsięwzięć rozwojowych.

W celu testowych obliczeń algorytmu odniesiono wartości zdyskontowanych kosztów eksploatacyjnych sieci oraz nakładów inwestycyjnych do ich wartości maksymalnych, co pozwoliło na opis w jednostkach względnych. Do oceny odszukiwanych przez hybrydowy algorytm rozwiązań zastosowano następujące zależności opisujące zagregowaną funkcję celu:

$$(1) F = \left(\sum_{j=1}^n \left(\frac{\sum_{i=1}^k a_i \cdot x_i \cdot N_{j,i}}{\sum_{i=1}^k a_i \cdot y_i \cdot P_{j,i}} \right) \right) \cdot \frac{1}{n} + \left(\sum_{t=1}^m w_t \cdot K_t \right) \cdot \frac{1}{m}$$

$$\text{if } F_i \leq F_i^{\min} \quad \mu_i = 1$$

$$(2) \quad \text{if } F_i^{\min} \leq F_i \leq F_i^{\max} \quad \mu_i = \frac{F_i^{\max} - F_i}{F_i^{\max} - F_i^{\min}}$$

$$\text{if } F_i \geq F_i^{\max} \quad \mu_i = 0$$

przy czym: N_i , P_i , K_i – opisane w jednostkach względnych nakłady inwestycyjne, przedsięwzięcia rozwojowe oraz koszty eksploatacyjne, n – liczba planowanych etapów rozwojowych, m – liczba lat, a – zmienna logiczna określająca realizację danych przedsięwzięć rozwojowych, x , y , w – zmienne o wartościach od 0.01 do 1 określające poziom nakładów inwestycyjnych oraz zakres rozbudowy sieci, oraz poziom kosztów eksploatacyjnych dla t -ego roku.

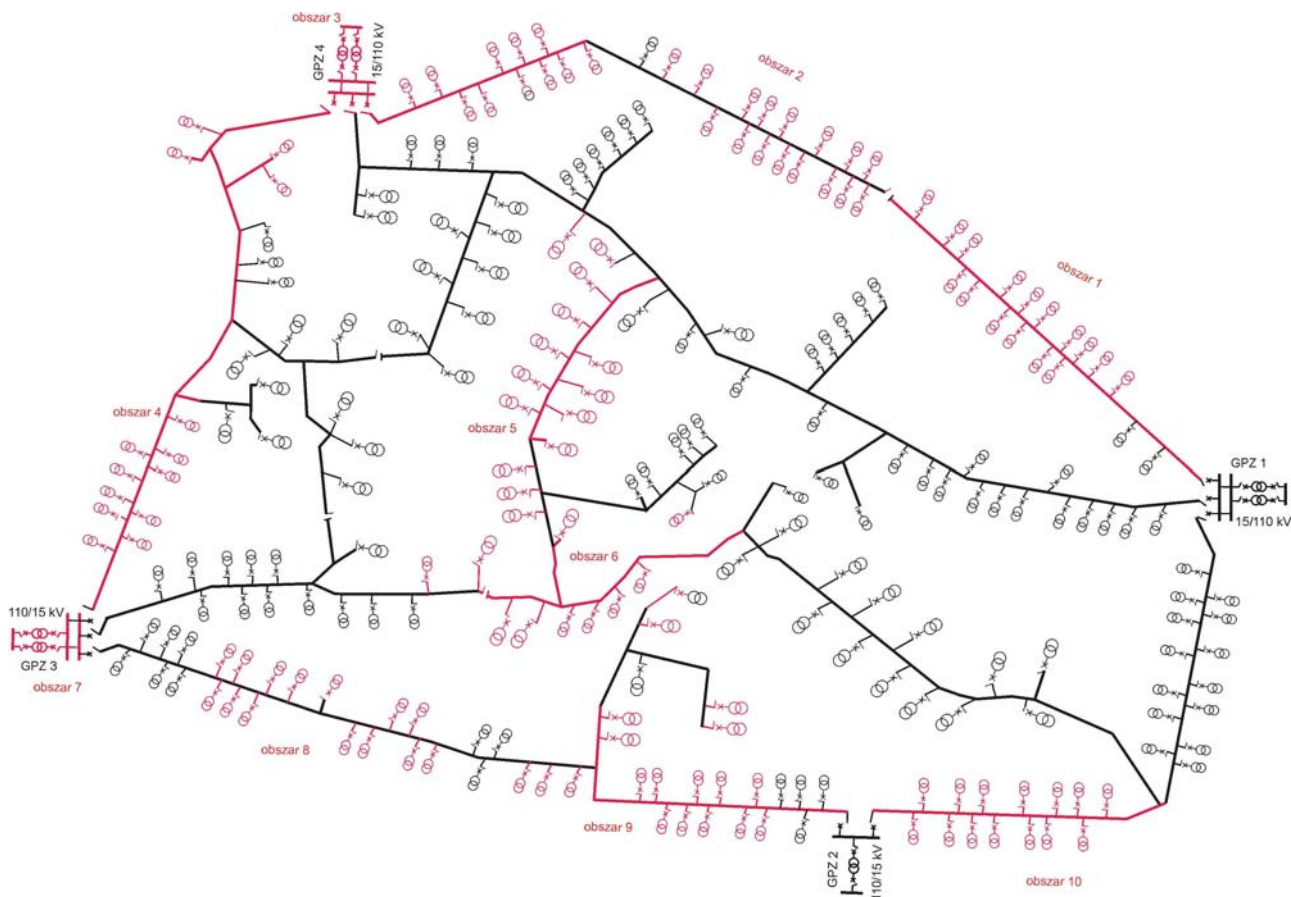
Obliczenie pierwszego składnika funkcji celu F określa iloraz nakładów inwestycyjnych do wielkości określającej stopień realizacji przedsięwzięć rozwojowych (obliczenia realizowane w jednostkach względnych). Obliczenie tego składnika funkcji celu pozwala określić efektywność wykorzystania nakładów inwestycyjnych. Drugi składnik pozwala na uwzględnienie kosztów eksploatacyjnych wyliczanych dla kolejnych lat założonego okresu. Przyjęto ponadto, iż zakres wartości dla minimalizowanej funkcji F będzie po przeliczeniu za pomocą zależności normalizującej (2) zawierał się w przedziale od 0 do 1.

Założono również, że analizowana sieć SN po rozbudowie będzie spełniała poprawne warunki techniczne takie jak: prądowe i napięciowe prawa Kirchhoffa oraz zachowanie dopuszczalnej obciążalności cieplnej i zwarciowej elementów sieci.

Analiza obliczeniowa

Do obliczeń przyjęto dane techniczne elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej, przedstawionej na rysunku 3. Na rysunku sieci zaznaczono na czerwono fragmenty planowane do modernizacji lub rozbudowy. Dla rozwiązania rozpatrywanego problemu obliczeniowego testowano następujące warianty algorytmów:

- algorytm genetyczny stosowany w celu odszukania optymalnej strategii rozwoju sieci, współpracujący ze strategią ewolucyjną ukierunkowana na odszukiwanie szczegółowego zakresu przedsięwzięć rozwojowych,
- algorytm genetyczny stosowany w celu odszukania optymalnej strategii rozwoju sieci, współpracujący z programowaniem ewolucyjnym,
- porównano także dla testowego problemu efektywność strategii ewolucyjnej oraz programowania ewolucyjnego.



Rys. 3. Schemat przyjętej do analizy sieci dystrybucyjnej SN z zaznaczonymi planowanymi etapami rozbudowy

Zaproponowany podział zadań obliczeniowych w algorytmie hybrydowym umożliwia m.in. wykorzystanie strategii ewolucyjnej. Pozwala to na rozszerzenie zakresu obliczeń optymalizacyjnych oraz umożliwia uzyskanie rozwiązań zawierających dodatkowe użyteczne informacje.

Obliczenia zrealizowano w środowisku programu Matlab, skorzystano z modułu „Optimization Tool” a w szczególności zastosowano funkcję bazującą na teorii algorytmu genetycznego. W celu realizacji obliczeń według opracowanego algorytmu strategii ewolucyjnej oraz programowania ewolucyjnego opracowano własne procedury w postaci skryptów i funkcji w języku programu Matlab. Dla zastosowanego algorytmu genetycznego przyjęto dostępne w programie Matlab metodę selekcji „stochastic uniform”, operator krzyżowania „scattered” i mutacji „uniform”. W celu zachowania odpowiedniego naporu selekcyjnego, zastosowano rankingową metodą skalowania rozwiązań. Dobrano parametry algorytmu $p_k = 0,98$, $p_m = 0,08$, oraz liczebności populacji $n=50$. Kryterium zatrzymania obliczeń określono w postaci zadanej liczby iteracji bez poprawy rezultatów. Przy włączeniu opracowanej strategii ewolucyjnej do głównej pętli ewolucyjnej, zmodyfikowano parametry pracy SE w takim kierunku aby możliwe zmniejszyć nakład obliczeń pojedynczej iteracji realizowanej przez SE.

W celu końcowej weryfikacji rozwiązań (w zakresie stopnia realizacji przedsięwzięć rozwojowych) uzyskanych przez hybrydowy algorytm dodatkowo zastosowano programowanie ewolucyjne z procedurami samoadaptacji parametrów operatorów rekombinacji.

Poniżej zaprezentowano przykładową końcową populację algorytmu genetycznego:

```
populacja AG = [1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 0 0 0
1 0 0 1 1 1 0 1 1 0 0 1 0 1 0 1 0 0 1 0 1 1 1 1 0 1 1 0 1 0
0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0
0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 1 1 0 1 1 1 0 0 1 1 0 1 1 0
1 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 1 0 1 1 1 1 1 0 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 0 1 0
1 1 1 0 1 0 0 1 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 1
0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1];
```

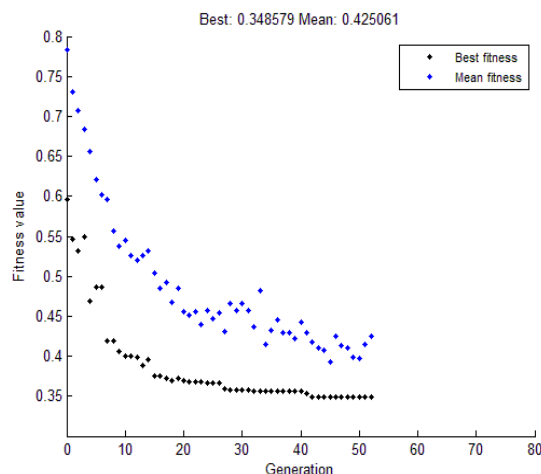
W dalszej części pokazano przykładową końcową populację strategii ewolucyjnej (liczebność 30 elementów):

```
populacja SE = [0.5314; 0.4579; 0.3584; 0.3485; 0.3492;
0.6148; 0.5488; 0.3485; 0.5265; 0.3485; 0.3587; 0.3487;
0.3485; 0.5161; 0.5392; 0.5405; 0.4212; 0.3488; 0.4700;
0.3486; 0.3598; 0.5453; 0.4961; 0.3488; 0.38455; 0.3485;
0.3487; 0.3845; 0.3488; 0.5122];
```

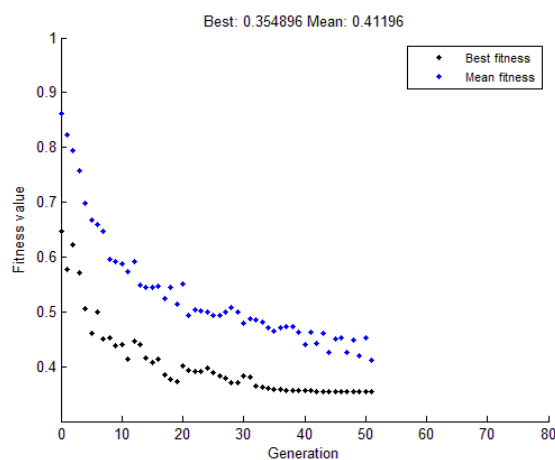
Przy obliczeniach funkcji celu F pierwszy jej składnik opisuje iloraz nakładów inwestycyjnych wyrażonych w jednostkach względnych odniesionych do wielkości opisującej poziom realizacji przedsięwzięć rozwojowych (również wyrażonej w jednostkach względnych). Natomiast drugi składnik funkcji celu opisuje przeliczone na jednostki względne koszty eksploatacyjne sieci w założonym horyzoncie czasowym.

Optymalna odszukaną wartość optymalizowanej zagregowanej funkcji celu (po przeliczeniu normalizującym do zakresu wartości od 0.0 do 1.0) wyniosła $\min F = 0,3486$ co potwierdzają wartości widoczne na rysunku 4.

Przebieg obliczeń ewolucyjnych zrealizowanych przez algorytm genetyczny współpracujący ze strategią ewolucyjną przedstawiono na wykresach z rysunków 4 i 5. Wykresy te pokazują zmiany wartości najlepszych odszukiwanych rozwiązań oraz zmiany średniego przystosowania populacji wariantowych rozwiązań.

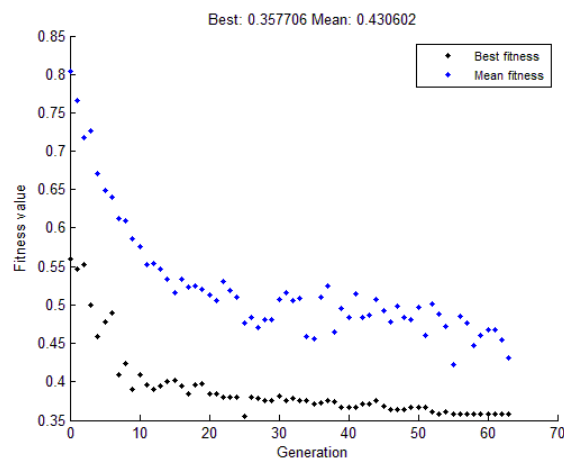


Rys. 4. Przebieg zmian najlepszych rozwiązań odszukiwanych przez hybrydowy algorytm AG + SE



Rys. 5. Przykład kolejny procesu obliczeniowego realizowanego przez hybrydowy algorytm AG + SE

Natomiast na rysunku 6 pokazano proces odszukiwania rozwiązań przez algorytm w wersji AG + PE. Porównując wyniki obliczeń dla wariantów obliczeń AG + SE oraz AG + PE stwierdzono, iż lepsze rezultaty osiągnęto w wariancie AG + SE co potwierdzają wyniki pokazane na wykresie 6.



Rys. 6. Przykładowy przebieg zmian najlepszych rozwiązań odszukiwanych przez hybrydowy algorytm AG + PE

Analizując rezultaty obliczeń zrealizowanych za pomocą metody hybrydowej można stwierdzić, iż połączenie AG (charakteryzującego się globalnością poszukiwań) oraz SE (ukierunkowanej na lokalne przeszukiwanie) daje w rezultacie efektywną metodę odszukiwania rozwiązań dla złożonych zadań optymalizacyjnych.

Porównując rezultaty SE oraz PE można zauważyć, iż dla rozpatrywanych problemów testowych uzyskiwano zbliżone rezultaty przy zauważalnej przewadze strategii ewolucyjnej, która jednocześnie charakteryzowała się większym nakładem obliczeniowym. Programowanie ewolucyjne charakteryzuje się krótszym czasem obliczeń co wynika m.in. z mniejszego nakładu obliczeniowego iteracji PE m.in. ze względu na brak operatora wymiany genów.

Wnioski

Zaproponowane podejście obliczeniowe zastosowano i przetestowano na zadaniu optymalnego planowania rozwoju sieci dystrybucyjnej SN. Do zalet przedstawionego sposobu obliczeń można zaliczyć:

- wykorzystanie wbudowanych funkcji programu Matlab (w tym procedury realizacji m.in. selekcji, skalowania oraz operatorów rekombinacji),
- rozszerzenie obliczeń realizowanych przez AG o dodatkowe procedury strategii ewolucyjnej,
- zastosowanie w ostatnim etapie obliczeń procedur programowania ewolucyjnego celem końcowego poprawienia i weryfikacji uzyskanych rezultatów.

Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, iż powyższe założenia pozwalają na uzyskanie efektywnej metody, łączącej globalność poszukiwań z algorytmami ukierunkowanymi na poszukiwania lokalne.

Na podstawie przeprowadzonych analiz zauważono, iż metoda pozwala na odszukiwanie optymalnych strategii modernizacji i rozbudowy sieci wraz ze szczegółowymi planami przedsięwzięć dla poszczególnych planowanych etapów strategii rozwoju sieci dystrybucyjnych.

Podobne obliczenia można również przeprowadzić traktując opisywany problem jako problem obliczeń wielokryterialnych. Wówczas można potraktować niezależnie kryteria optymalizacyjne uwzględnione w zagregowanej funkcji celu. W celu realizacji obliczeń optymalizacji wielokryterialnej można również wykorzystać program Matlab a w szczególności funkcję "gamultiobj".

Autor: dr hab. inż. Sylwester Filipiak, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Zakład Podstaw Energetyki, Aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: filipiak@tu.kielce.pl

LITERATURA

- [1] Machowski J., Kacejko P., Robak S., Miller P., Wanczer M.: Simplified angle and voltage stability criteria for power system planning based on the short-circuit power, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, pp. 3096-3108, published 26 November 2014.
- [2] Machowski J., Kacejko P., Robak S., Miller P., Wanczer M.: Badania systemów elektroenergetycznych w planowaniu rozwoju - Analizy statyczne, *Wiadomości Elektrotechniczne* s. 3-12, Nr 7/2013.
- [3] Machowski J., Kacejko P., Robak S., Miller P., Wanczer M.: Badania systemów elektroenergetycznych w planowaniu rozwoju. Część 2. Analizy dynamiczne. *Wiadomości Elektrotechniczne*, tom LXXXI, pp. 3 -12, nr 8/2013, 2013.
- [4] Machowski J., Kacejko P., Robak S., Miller P., Wanczer M.: Analizy systemu elektroenergetycznego w średniookresowym planowaniu rozwoju. *Przegląd Elektrotechniczny*, s. 234 - 243, Nr 6/2013.
- [5] Stępień J.: Charakterystyka planowanych prac eksploatacyjnych elektroenergetycznych sieci rozdzielczych i ich skutków. *Przegląd Elektrotechniczny*. Nr. 7/2008, s.: 162-165.
- [6] Stępień J.: Kompleksowy model niezawodnościowy głównych punktów zasilających 110/15 kV. *Przegląd Elektrotechniczny*, Nr. 4/2008, s:128-131.
- [7] Marzecki J., Mikołajczuk P.: Analiza algorytmów rozwiązywania zadania optymalizacji wieloetapowej przy badaniu rozwoju stacji 110 kV/SN, *Prace Instytutu Elektrotechniki*, Nr 270, pp. 27-38, listopad, 2015.
- [8] Marzecki J., Pawlicki B., Dukat P., Sosnowski, Ł.: Kierunek rozwoju inteligentnych sieci elektroenergetycznych w aglomeracji miejskiej, *Wiadomości Elektrotechniczne* pp. 42-44, maj, Nr 5, 2014.
- [9] Stępień J., Madej Z.: Evaluation of structural redundancy effects in medium voltage cable networks., *Rynek Energii*, Issue: 4, pp. 55-60, AUG 2009.
- [10] Parol M.: Aspekty techniczne i prawne dotyczące pracy i przyłączania źródeł generacji rozproszonej do sieci dystrybucyjnych niskich napięć, *Przegląd Elektrotechniczny* pp. 326-330, Nr 5, 2013.
- [11] Helt P., Parol M., Piotrowski P.: Metody sztucznej inteligencji – przykłady zastosowań w elektroenergetyce. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2012.
- [12] Isabela Miranda de Mendonça, Ivo Chaves Silva Junior, André L.M. Marcató: Static planning of the expansion of electrical energy transmission systems using particle swarm optimization. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. Volume 60, September 2014, pp. 234–244.
- [13] Abedini M., Moradi M.H. A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for optimal DG location and sizing in distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. Volume 34, Issue 1, January 2012, pp. 66–74.
- [14] Biplab Bhattacharyya, Vikash Kumar Gupta: Fuzzy based evolutionary algorithm for reactive power optimization with FACTS devices. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. Volume 61, October 2014, Pages 39–47.
- [15] Niknam T., Farsani E. A., Nayeripour M., Firouzi B. B.: Hybrid fuzzy adaptive particle swarm optimization and differential evolution algorithm for distribution feeder reconfiguration. *Electric Power Components and Systems*, vol. 39, Issue 2, 2011, pp. 158 – 175.
- [16] Sood Y.R.: Evolutionary programming based optimal power flow and its validation for deregulated power system analysis, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* January (2007) pp. 65–75.
- [17] Filipiak S.: Selected evolutionary algorithms for multicriterial optimization based on the example of the programming of the energy distribution systems development. *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 92 Nr. 1/2016, s. 196 – 200.
- [18] Parol M.: Prognozowanie ultrakrótkoterminowe mocy generowanej w odnawialnych źródłach energii z wykorzystaniem logiki rozmytej, *Przegląd Elektrotechniczny*, pp. 265-268, Nr 6, 2014.
- [19] Parol M.: Magazynowanie energii w sieciach dystrybucyjnych niskich napięć. *IX Konferencja Naukowo-Techniczna "Optymalizacja w Elektroenergetyce"*, 7 październik 2015, PSE S.A., Konstancin-Jeziorna, pp. 201-211, 2015.
- [20] Marzecki J., Drab M.: Obciążenia i rozpyły mocy w sieci terenoj średniego napięcia-wybrane problemy. *Przegląd Elektrotechniczny*, R.91, pp. 192-195, luty, Nr 2, 2015.
- [21] Parol M.: Analiza wskaźników dotyczących przerw w dostarczaniu energii elektrycznej na poziomie sieci dystrybucyjnych. *Przegląd Elektrotechniczny* s. 122-126 Nr 8/2014.
- [22] .Kumar Y., Das, B., Sharma, J.: Multiobjective, Multiconstraint Service Restoration of Electric Power Distribution System With Priority Customers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, no. 23, Issue 1, 2008, pp. 261-270.