

Janusz BROŻEK*
Wojciech BĄCHOREK*

OPTIMALIZACJA STRUKTUR ELEKTROENERGETYCZNYCH SIECI PROMIENIOWYCH

Optimalizacja promieniowych struktur sieci elektroenergetycznych należy do problemów NP – trudnych. Funkcją celu analizowanego problemu stanowią koszty roczne struktury sieci elektroenergetycznej (roczny koszt inwestycyjny i zmienny). Do poszukiwania rozwiązań suboptymalnych zaproponowano metodę wykorzystującą algorytm genetyczny i algorytm symulowanego wyżarzania. Oba algorytmy optymalizują (minimalizują) tą samą funkcję celu. Uzyskanie takich samych rozwiązań dwoma algorytmami zwiększa prawdopodobieństwo, że otrzymana struktura sieci promieniowej jest strukturą optymalną w sensie przyjętej funkcji celu. W artykule przedstawiono przykład obliczeniowy ilustrujący zastosowanie programu komputerowego do optymalizacji struktury sieci promieniowej. Uzyskane wyniki porównano z rozwiązaniem otrzymanym w wyniku przeglądu zupełnego.

SŁOWA KLUCZOWE: optymalizacja, struktury sieci, algorytmy genetyczne, symulowane wyżarzanie

1. WSTĘP

1.1. Sformułowanie problemu

W promieniowej sieci rozdzielczej zakładu przemysłowego składającej się z Głównego Punktu Zasilania (GPZ), stacji transformatorowych SN/nn oraz odbiorów znane są:

- a) położenie (lokalizacja) GPZ,
- b) m możliwych lokalizacji stacji transformatorowych SN/nn,
- c) lokalizacje wszystkich n odbiorów,
- d) szczytowe obciążenia mocą czynną i bierną $S_i = P_i + jQ_i$, $i = 1, \dots, n$ odbiorów,
- e) czas użytkowania mocy szczytowej w linii T_i ,
- f) czas trwania maksymalnych strat w linii τ_i ,
- g) jednostkowe koszty strat mocy k_p i energii k_a ,
- h) koszty i parametry elementów sieci,

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie.

- i) minimalne koszty roczne wszystkich możliwych połączeń każdego odbioru z każdą stacją transformatorową.

Optymalizacja struktury sieci promieniowej polega na zaprojektowaniu optymalnej struktury sieci zasilającej, którą tworzą:

- sieć średniego napięcia SN – łączącej k stacji transformatorowych ST z głównym punktem zasilania GPZ, przy czym $1 \leq k \leq m$,
- sieć niskiego napięcia nn – łączącej n odbiorów z k stacjami transformatorowymi ST.

Zaprojektowana sieć musi spełniać następujące wymagania techniczne [4]:

- prądowe i napięciowe prawa Kirchhoffa,
- nieprzekroczenie dopuszczalnej obciążalności cieplnej i zwarciowej elementów sieci,
- nieprzekroczenie dopuszczalnych spadków napięcia,
- dotrzymanie warunków minimalnego przekroju przewodów ze względów mechanicznych.

Minimalizowaną funkcją celu jest koszt roczny K_r projektowanej sieci rozumiany jako suma rocznych kosztów stałych K_s i rocznych zmiennych K_z (1).

$$K_r = \sum_j^k \sum_{i=1}^n (K_{nnij}) + \sum_{j=1}^k (K_{snj} + K_{trj}) \Rightarrow \min \quad (1)$$

gdzie: K_{nnij} – minimalny koszt roczny linii niskiego napięcia i – tego odbioru, K_{snj} – minimalny koszt roczny linii średniego napięcia, K_{trj} – minimalny roczny koszt transformatorów.

Prezentowana praca jest kontynuacją prac [1], [2].

2. METODA OPTIMALIZACJI STRUKTUR SIECI PROMIENIOWYCH

Do optymalizacji struktury elektroenergetycznych sieci promieniowych wykorzystano algorytmy genetyczne AG oraz symulowanego wyżarzania SW. Zmienne decyzyjne badanego problemu (ilość stacji transformatorowych wybranych do rozwiązania) w obu algorytmach są zakodowane w postaci „0” – „1” ciągu kodowego. W proponowanej metodzie „1” oznacza akceptację danej stacji transformatorowej, a „0” jej brak w strukturze sieci elektroenergetycznej. Każdy ciąg kodowy składa się z m elementów. Wyniki uzyskane algorytmem genetycznym stanowią dane wejściowe do algorytmu symulowanego wyżarzania. W algorytmie genetycznym AG, każdy chromosom (ciąg kodowy) składa się m genów. Algorytm genetyczny zawiera standardowe procedury [3].

Populacja początkowa jest tworzona w sposób losowy tak, aby każdy chromosom w populacji początkowej reprezentował dopuszczalne rozwiązanie zadania. Przyjęto stałą liczebność populacji N będącą parametrem zadania.

Funkcja oceny (przystosowania) stanowi miernik użyteczności ciągu kodowego. Funkcję oceny ciągu kodowego zdefiniowano jako:

$$p_i = f_i(x) / \sum_{i=1}^N f_i(x) \quad (2)$$

gdzie: $f_i(x)$ jest wartością funkcji przystosowania i -tego ciągu kodowego, a $\sum_{i=1}^N f_i(x)$ jest sumą przystosowania wszystkich ciągów. Funkcja przystosowania zazwyczaj jest wprost funkcją celu.

Krzyżowanie proste. Ciągi kodowe kojarzy się w sposób losowy z puli rodzicielskiej (nowej populacji) w pary. Następnie każda para z określonym prawdopodobieństwem p_k będącym parametrem zadania przechodzi proces krzyżowania.

Mutacja polega na sporadycznej (zachodzącej z pewnym niewielkim prawdopodobieństwem p_m określonym jako parametr zadania) przypadkowej zmianie wartości genu ciągu kodowego na inną wartość określoną przez allel reprezentujący dany gen.

W algorytmie SW [1] zakłada się możliwość akceptacji rozwiązań o wyższych kosztach rocznych niż dotychczas uzyskane. Postępowanie według algorytmu SW sprowadza się do następujących reguł:

- w każdym kroku iteracji wylicza się zmianę kosztów ΔK jako różnicę rozwiązania bieżącego i ostatnio zaakceptowanego,
- jeżeli koszty ulegają zmniejszeniu ($\Delta K < 0$) to rozwiązanie jest akceptowane,
- zwiększenie kosztów ($\Delta K > 0$) nie powoduje bezpośredniego odrzucenia obliczonej konfiguracji sieci. Dopuszcza się jej akceptację, gdy spełniony jest warunek:

$$r < \exp(-\Delta K / T) \quad (3)$$

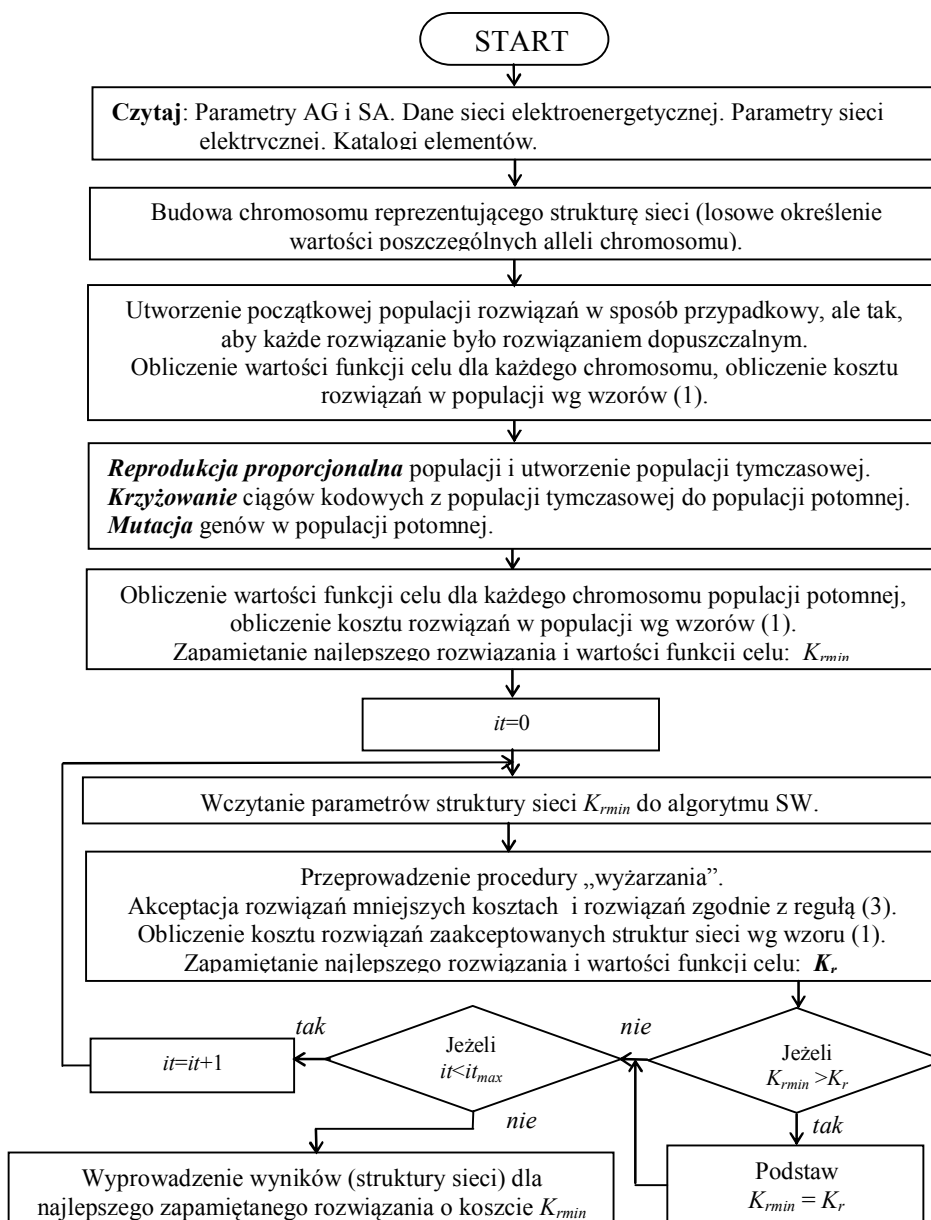
gdzie: T – parametr symulujący temperaturę wyrażoną w jednostkach kosztów; r – liczba losowa rozkładu równomiernego z przedziału (0, 1).

Parametr T oblicza się według zależności $T_n = \alpha \cdot T_S$ gdzie T_n i T_S to aktualna i poprzednia wartość parametru T , α - współczynnik "oziębienia".

3. OPRACOWANIE PROGRAMU KOMPUTEROWEGO DO OPTYMALIZACJI STRUKTURY PROMIENIOWEJ SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ

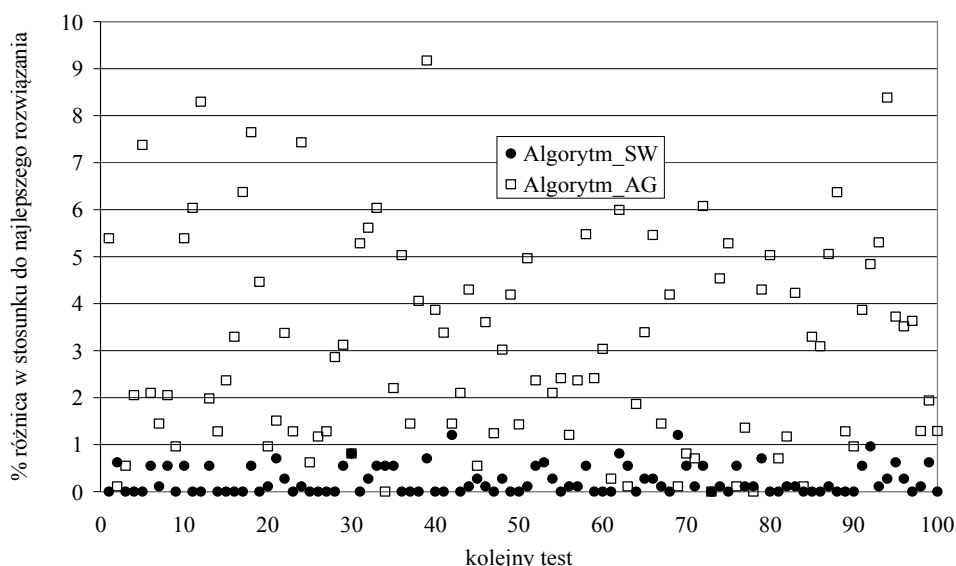
Wykorzystując algorytm genetyczny AG i symulowanego wyżarzania SW utworzono roboczą wersję programu komputerowego do optymalizacji struktury elektroenergetycznej sieci promieniowej. Opracowany algorytm został oprogramowany w środowisku PASCAL, a na potrzeby tej pracy przeniesiony do

środowiska C++ [5]. Uproszczony schemat blokowy algorytmu AG-SW do optymalizacji promieniowej sieci elektroenergetycznej przedstawiano na rys. 1.



Rys. 1. Uproszczony schemat blokowy algorytmu AG-SW do optymalizacji promieniowej sieci elektroenergetycznej

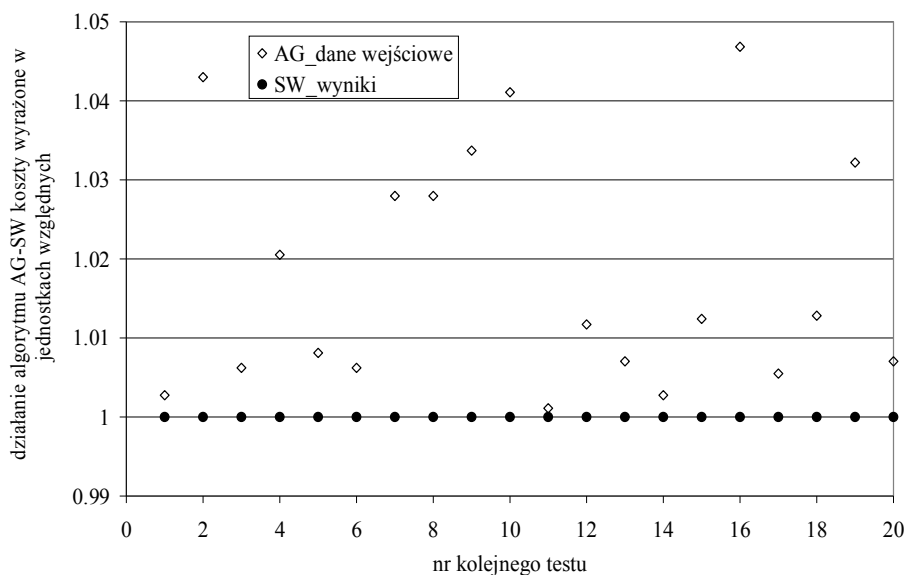
transformatorowych ST. Całkowity koszt roczny tego rozwiązania wynosi $K_{rmin} = 702687.1$ zł. W celu zbadania powtarzalności algorytmu AG-SW wykonano obliczenia dla osobno działających algorytmów AG i SW oraz algorytmu AG-SW. Na rysunku 3 przedstawiono procentowe różnice pomiędzy uzyskanymi rozwiązaniami z programów AG i SW w odniesieniu do najlepszego rozwiązania. Na rysunku 4 przedstawiano wyniki powtarzalności działania programu AG-SW (koszty podano jednostkach względnych w stosunku do najlepszego rozwiązania). Porównanie czasów obliczeń rozwiązań struktur sieci paragramami AG, SW z czasem przeglądu zupełnego w funkcji ilości stacji transformatorowych przedstawiano na rysunku 5.



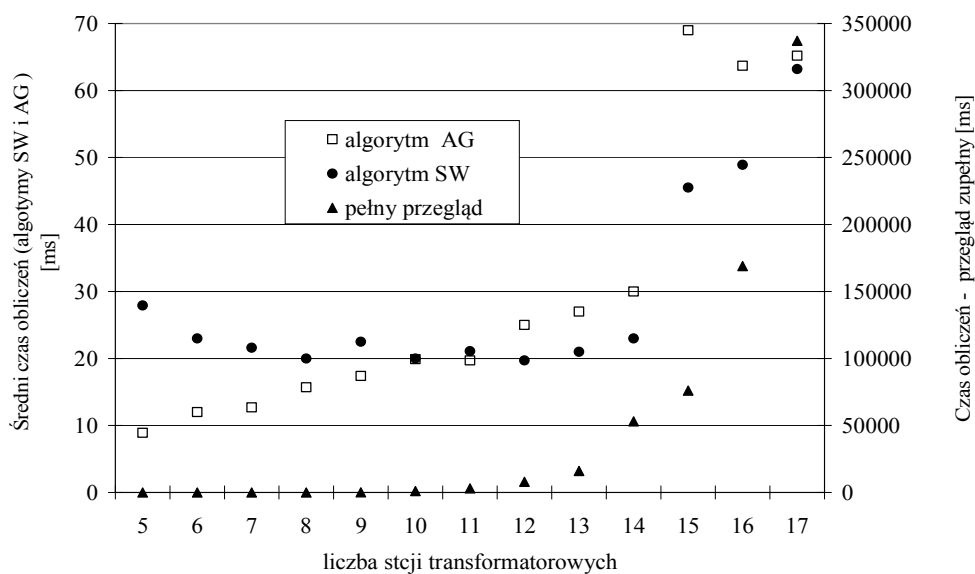
Rys. 3. Procentowe różnice kolejnych rozwiązań w stosunku do rozwiązania najlepszego uzyskane w 100 próbach algorytmów AG i SW

5. WNIOSKI

1. Wykonane badania potwierdziły skuteczność opracowanego algorytmu i programu AG-SW do optymalizacji struktur elektroenergetycznych sieci promieniowych.
2. Połączenie algorytmów genetycznego AG i symulowanego wyżarzania SW pozwoliło uzyskać dużą powtarzalność wyników.
3. W dalszych analizach przewiduje się badanie jakości otrzymywanych rozwiązań w zależności od parametrów algorytmów AG i SW.



Rys. 4. Działanie algorytmu AG-SW, koszty wyrażone w jednostkach względnych w stosunku do najlepszego rozwiązania $Kr_{min} = 702687.1$ zł



Rys. 5. Porównanie czasów obliczeń rozwiązań struktur elektroenergetycznej sieci promieniowej obliczonymi algorytmami AG, SW z czasem przeglądu zupełnego, w zależności od liczby możliwych lokalizacji stacji transformatorowych ST

4. Porównanie czasów obliczeń uzyskiwanych rozwiązań przy użyciu algorytmów AG i SW z czasem uzyskanym przy przeglądzie pełnym wskazuje, że dla analizowanego problemu czas rozwiązania zadania przez przegląd pełny (około 6 minut) jest do zaakceptowania. Czas ten szybko wzrasta z rozmiarem zadania (liczbą stacji transformatorowych ST) co należy uwzględnić przy analizie większych problemów.

LITERATURA

- [1] Brożek J., Projektowanie optymalnych elektroenergetycznych sieci promieniowych przy użyciu symulowanego wyżarzania, *Archiwum Energetyki*, 15 (1996), nr 4-5, str. 1-14.
- [2] Brożek J., Tylek W., Zastosowanie algorytmów genetycznych do projektowania promieniowych sieci elektroenergetycznych, VIII Międzynarodowa Konferencja Naukowa, Aktualne Problemy w Elektroenergetyce APE' 97, Gdańsk - Jurata, 11-13 czerwca 1997, tom V, str. 179–186.
- [3] Goldberg D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [4] Kulczycki J., *Optymalizacja struktur sieci elektroenergetycznych*, WNT, Warszawa, 1990.
- [5] Suder M., *Optymalizacja struktur elektroenergetycznych sieci promieniowych*, Praca dyplomowa, AGH, Kraków, 2013.

OPTIMIZATION OF THE STRUCTURES OF ELECTRIC POWER RADIAL

In the paper, the problem of the optimal design of the structures of two-voltage electric power radial networks is analyzed. The optimization of the structure of electric power networks is an NP-hard problem. The aim function of the analyzed problem is the annual cost of the electric power network structure (the annual investment cost + the annual variable cost). In order to find (suboptimal) solutions to the problem a method using genetic algorithms and simulated annealing is proposed. Both algorithms optimize (minimize) the same function. Obtaining the same solution with the use of two different algorithms increases the probability that the resulting network structure is optimal given the aim function. The paper includes also an example, which illustrates the application of the proposed method (implemented in a computer program) to the optimization of the structure of a radial network. A comparison of the obtained results with the solution resulting from the use of a complete (i.e., non-heuristic) method, is also provided.