

Wojciech BĄCHOREK\*  
Janusz BROŻEK\*

## OPTYMALIZACJA STRUKTUR ELEKTROENERGETYCZNYCH SIECI PROMIENIOWYCH Z WYKORZYSTANIEM ALGORYTMÓW SZTUCZNEJ INTELIGENCJI

W artykule przedstawiono metodę optymalizacji projektowania struktur dwunapięciowych elektroenergetycznych sieci promieniowych. Metoda wykorzystuje algorytm genetyczny (AG) i algorytm symulowanego wyżarzania (SW). Oba algorytmy optymalizują tą samą funkcję celu. Funkcją celu stanowi koszt roczny sieci elektroenergetycznej, który na etapie działania algorytmów jest minimalizowany. Działanie każdego algorytmu z osobna generuje, w czasie możliwym do przejścia, suboptymalną strukturę sieci. Uzyskanie takich samych rozwiązań dwoma algorytmami zwiększa prawdopodobieństwo, że otrzymana struktura sieci promieniowej jest strukturą optymalną w sensie przyjętej funkcji celu. W metodzie algorytmy wykorzystują przemienne, jako dane wejściowe, najlepsze uzyskane rozwiązania struktur sieci. W artykule przedstawiono krótki opis algorytmów oraz przykład obliczeniowy ilustrujący zastosowanie opracowanej metody do optymalizacji modelowej struktury elektroenergetycznej sieci promieniowej.

### 1. PRZEDSTAWIENIE PROBLEMU

W zadaniu projektowania elektroenergetycznych sieci promieniowych przyjmuje się, że znane są następujące dane:  $n$  odbiorów o szczytowych obciążeniach  $S_1, \dots, S_n$  i znanych lokalizacjach,  $m$  możliwych lokalizacji stacji transformatorowych ST oraz lokalizacja głównego punktu zasilania GPZ. Ponadto dane są koszty jednostkowe strat mocy i energii, czas występowania maksymalnych strat, czas użytkowania mocy szczytowej, koszty i parametry elementów sieci. Należy zaprojektować:

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

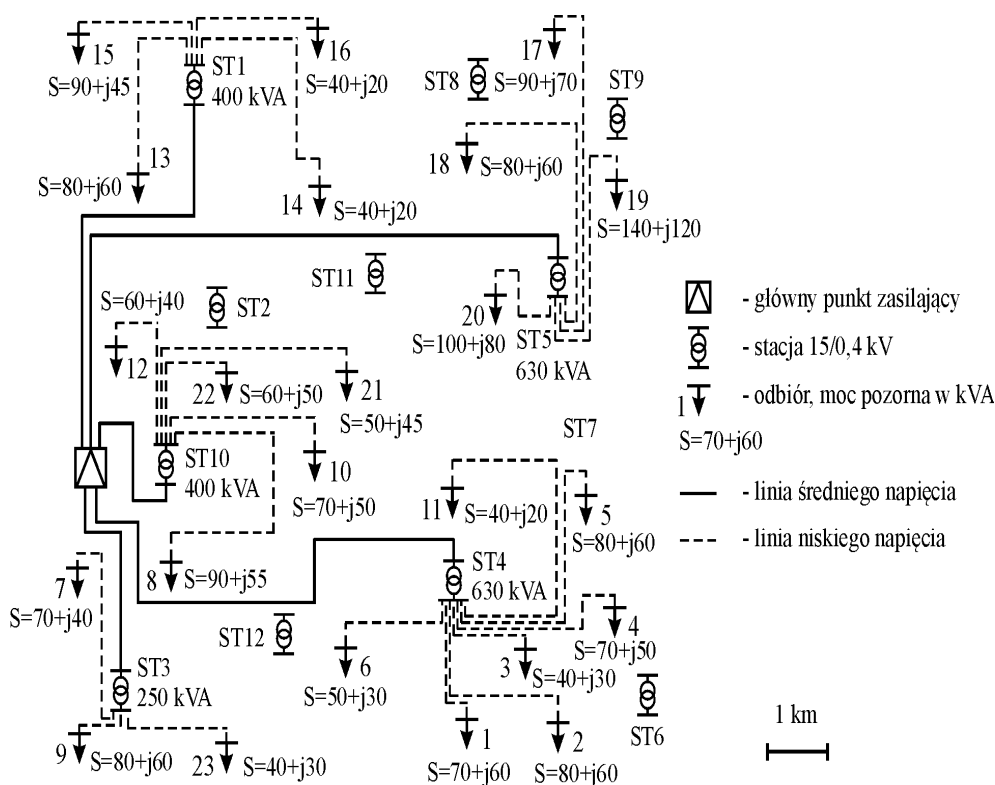
Zaprojektowana sieć musi spełniać wymagania techniczne wynikające z eksploatacji sieci elektroenergetycznej [3].

---

\*AGH, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków.

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

Na rysunku 1 przedstawiono topologię jednej z możliwych struktur (spełniających wymagania techniczne) promieniowej sieci elektroenergetycznej.



Rys. 1. Układ topologiczny, dwupoziomowej elektroenergetycznej sieci rozdzielczej (rozwiązanie spełniające wymagania techniczne i eksploatacyjne). Koszt rozwiązania,  $K_r = 274,395$  tys. zł, liczba odbiorów  $n = 23$ , liczba stacji transformatorowych ST  $m = 12$

Należy zauważyć, że  $n$  odbiorów ma być zasilane z  $k$  stacji transformatorowych gdzie  $1 \leq k \leq m$ . Generuje to dużą liczbę kombinacji możliwych struktur sieci elektroenergetycznej. Poszukiwanie struktury optymalnej, w sensie przyjętych kryteriów, przy użyciu metody umożliwiające pełny przegląd rozwiązań jest zbyt pracochłonne. W pracy proponuje się wykorzystanie algorytmów sztucznej inteligencji (algorytm symulowanego wyżarzania SW i algorytm genetyczny AG) do rozwiązania postawianego zadania. Algorytmy te działając w ramach jednej metody generują rozwiązania bliskie optimum.

Prezentowany artykuł stanowi rozwinięcie pracy [1].

## 1. 1. Optymalizowana funkcja celu

Problem projektowania promieniowych sieci elektroenergetycznych można sformułować następująco: zminimalizować funkcję celu (1) – funkcję kosztu rocznego  $K_r$  [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 transformatora.

Koszt roczny linii niskiego napięcia obliczamy z zależności (2):

$$K_{nnij} = m_{nn} \cdot K_{innij} \cdot d_{ij} + \Delta P_{nnij} \cdot (k_p + \tau_i \cdot k_A) \quad (2)$$

gdzie:  $m_{nn}$  – współczynniki kosztów stałych linii niskiego napięcia,  $K_{innij}$  – inwestycyjny koszt jednostkowy linii niskiego napięcia,  $d_{ij}$  – długość linii niskiego napięcia  $i - j$ ,  $\Delta P_{ij}$  – straty mocy czynnej linii  $i - j$ ,  $k_p$  – jednostkowy koszt roczny straty mocy,  $k_A$  – jednostkowy koszt roczny strat energii,  $\tau_i$  – czas trwania strat maksymalnych w linii  $i - j$ .

Koszt roczny sieci średniego napięcia  $SN$  i transformatorów obliczmy z zależności (3):

$$K_{snj} = m_{sn} \cdot K_{isnj} \cdot d_j + m_{tr} \cdot K_{itrj} + \Delta P_{snj} + \Delta P_{cu j} \cdot (k_A + k_p \cdot \tau_j) + \Delta P_{FEj} \cdot (k_p + k_A \cdot \tau_o) \quad (3)$$

gdzie:  $m_{sn}$ ,  $m_{tr}$  – współczynniki kosztów stałych odpowiednio linii średniego napięcia i transformatorów,  $K_{isnj}$  – inwestycyjny koszt jednostkowy linii średniego napięcia  $d_j$  – długość  $j$ -tej linii średniego napięcia,  $K_{itrj}$  – koszt inwestycyjny transformatora  $SN/nn$ ,  $\Delta P_{snj}$  – straty mocy czynnej linii  $j$ ,  $\tau_j$  – czas trwania strat maksymalnych w linii  $j$ ,  $\Delta P_{cu j}$  – straty mocy czynnej w  $j$ -tym transformatorze,  $\Delta P_{FEj}$  – straty biegu jałowego w  $j$ -tym transformatorze,  $\tau_o$  – czas trwania maksymalnych strat jałowych.

## 2. ALGORYTMY DO ROZWIĄZANIA PROBLEMU OPTIMALIZACJI STUKTURY SIECI PROMIENIOWEJ

Rozważany problem jest kodowany w algorytmie SW i AG w kodzie [0, 1] (tabela 1). Jeżeli element kodu wynosi 1 – stacja ST jest w rozwiązaniu struktury sieci. Jeżeli element kodu wynosi 0 – stacja ST nie jest uwzględniana w rozwiązaniu.

Równocześnie znane jest każde dopuszczalne połączenie, (o minimalnym koszcie rocznym), każdego odbioru z każdą stacją ST. Ciąg kodowy rozwiązania (tabela 1) jednoznacznie więc definiuje strukturę sieci elektroenergetycznej

przestawianej na rysunku 1, co umożliwi dobór jej elementów, obliczenie parametrów struktury sieci i obliczenie kosztu rocznego  $K_r$ .

Tabela 1. Kodowanie struktury sieci w algorytmie SW i AG

Nr stacji ST	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ciąg kodowy rozwiązania	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0

## 2.1. Opis algorytmów symulowanego wyżarzania SW i genetycznego AG

### *Algorytm SW*

W algorytmie symulowanego wyżarzania SW w każdym kroku iteracji wylicza się zmianę kosztu  $\Delta K$  jako różnicę rozwiązania bieżącego i ostatnio zaakceptowanego. Zwiększenie kosztu ( $\Delta K > 0$ ) nie powoduje bezpośredniego odrzucenia nowej konfiguracji sieci, lecz dopuszcza się jej akceptację, gdy prawdziwe jest wyrażenie

$$r < \exp(-\Delta K / T) \quad (4)$$

gdzie  $T$  oznacza parametr wyrażoną w jednostkach kosztu,  $r$  jest liczbą losowaną z przedziału  $[0,1]$  rozkładu równomiernego.

Tak skonstruowany algorytm obliczeniowy stwarza możliwość zaakceptowania rozwiązania gorszego (większy koszt roczny) i efekcie możliwe jest uniknięcie minimum lokalnego i poszukiwanie rozwiązania optymalnego. Z zależności (4) wynika, że przy dużych wartościach parametru  $T$  prawie każdy ruch zmieniający konfigurację analizowanej sieci będzie z dużym prawdopodobieństwem akceptowany. W miarę obniżania wartości  $T$  akceptowane będą zawsze te ruchy, które prowadzą do obniżenia wartości funkcji celu [1].

### *Algorytm AG*

Algorytm genetyczny AG stosowany do optymalizacji struktur elektroenergetycznych sieci promieniowych zawiera następujące elementy [2]:

#### **Reprezentacja zadania w ujęciu algorytmów genetycznych**

W proponowanej metodzie optymalizacji promieniowej sieci elektroenergetycznej, jako zmienne decyzyjne określono  $k$  lokalizacji stacji transformatorowych ST. Przykład chromosomu (ciąg kodowy) opisujący jednoznacznie strukturę sieci elektroenergetycznej (rysunek 1) podano w tabeli 1.

#### **Populacja początkowa**

Populacja początkowa jest tworzona w sposób losowy tak, aby każdy ciąg kodowy w populacji początkowej reprezentował dopuszczalne rozwiązanie zadania. Przyjęto stałą liczebność populacji  $N = 2 \cdot n_s$  ( $n_s$  – liczba stacji transformatorowych).

**Funkcja oceny (przystosowania)**

Funkcja oceny (przystosowania) stanowi miernik użyteczności ciągu kodowego. Do optymalizacji analizowanej struktury sieci funkcję oceny ciągu kodowego zdefiniowano jako:

$$f(x_i) = [(\max(K)+1) - K_{Ri}]^3 \quad (5)$$

gdzie:  $f(x_i)$  - wartość przystosowania  $i$ -ego ciągu kodowego (rozwiązania);  $x_i$  -  $i$ -ty ciąg kodowy (chromosom);  $\max(K)$  - maksymalny koszt rozwiązania w danej populacji;  $K_{Ri}$  - koszt roczny rozwiązania reprezentowanego przez chromosom  $x_i$ .

**Stosowane operatory genetyczne**

**Reprodukcja proporcjonalna.** Prawdopodobieństwo  $p_i$  wybrania  $i$ -tego ciągu kodowego  $x_i$  do reprodukcji jest określone wzorem:

$$p_i = \frac{f(x_i)}{\sum_{j=1}^N f(x_j)} \quad (6)$$

gdzie:  $f(x_i)$  jest wartością funkcji przystosowania  $i$ -ego ciągu kodowego, a  $\sum_{j=1}^N f(x_j)$

jest sumą przystosowania wszystkich ciągów.

**Krzyżowanie proste** – ciągi kodowe kojarzy się w sposób losowy z puli rodzicielskiej (nowej populacji) w pary. Następnie każda para z określonym prawdopodobieństwem przechodzi proces krzyżowania. Do krzyżowania wybiera się w sposób losowy z jednakowym prawdopodobieństwem punkt krzyżowania. Następnie zamienia się miejscami w obu ciągach wszystkie geny.

**Mutacja** – polega na sporadycznej, zachodzącej z pewnym niewielkim prawdopodobieństwem przypadkowej zmianie wartości genu ciągu kodowego na inną wartość.

**Warunek zakończenia algorytmu**

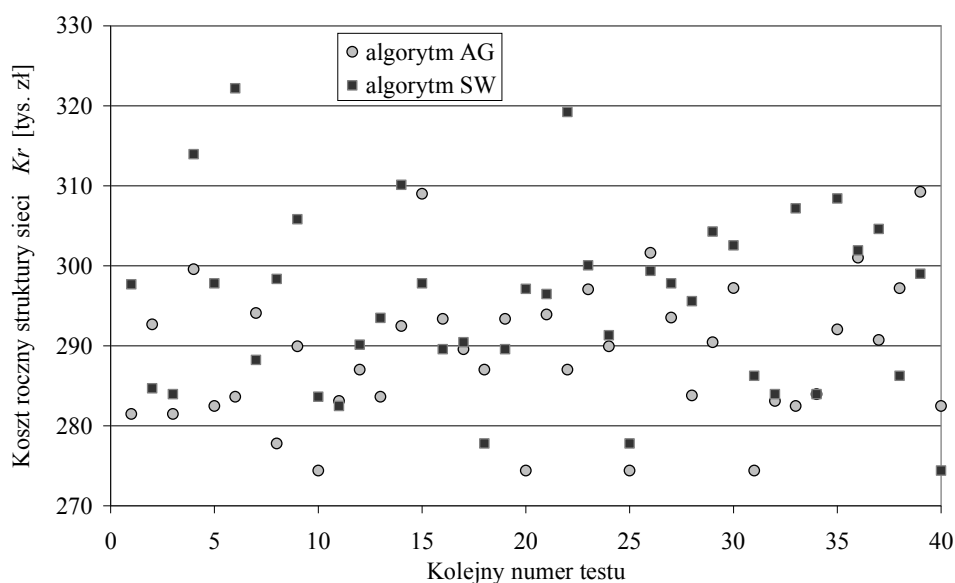
Przyjęto, że proces optymalizacji zostanie zakończony, gdy zostanie przekroczona maksymalna liczba iteracji.

Działanie każdego algorytmu z osobna generuje w czasie możliwym do przejścia suboptymalną strukturę sieci. Na rysunku 2 przedstawiano uzyskaną powtarzalność wyników obliczeń struktur sieci w 40 testach przy użyciu algorytmów SW i AG.

**2.2. Algorytm SW+AG do optymalizacji struktury elektroenergetycznej sieci promieniowej**

Na rysunku 3 przedstawiano schemat blokowy algorytmu SW+AG. W proponowanej metodzie algorytmy wykorzystują przemiennie, jako dane wejściowe, najlepsze uzyskane rozwiązania struktur sieci (rysunek 4). W efekcie działania tak skonstruowanego algorytmu znaleziono takie same rozwiązania

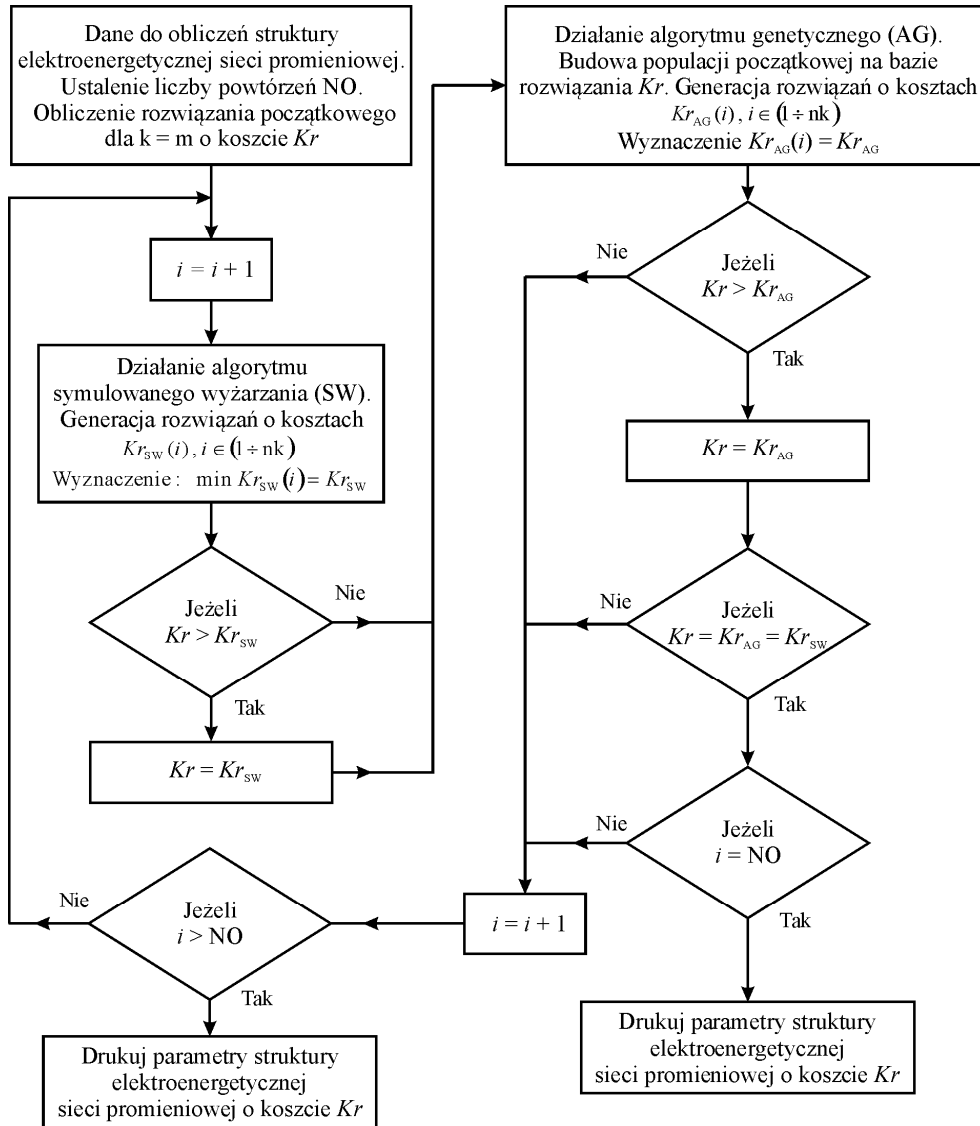
uzyskane przez oba algorytmy. Można więc uznać, że jest to rozwiązanie bliskie rozwiązaniu optymalnemu lub optymalne. Strukturę promieniowej sieci elektroenergetycznej o najniższym koszcie rocznym ( $K_r = 274,395$  tys. zł) przedstawiono na rysunku 1.



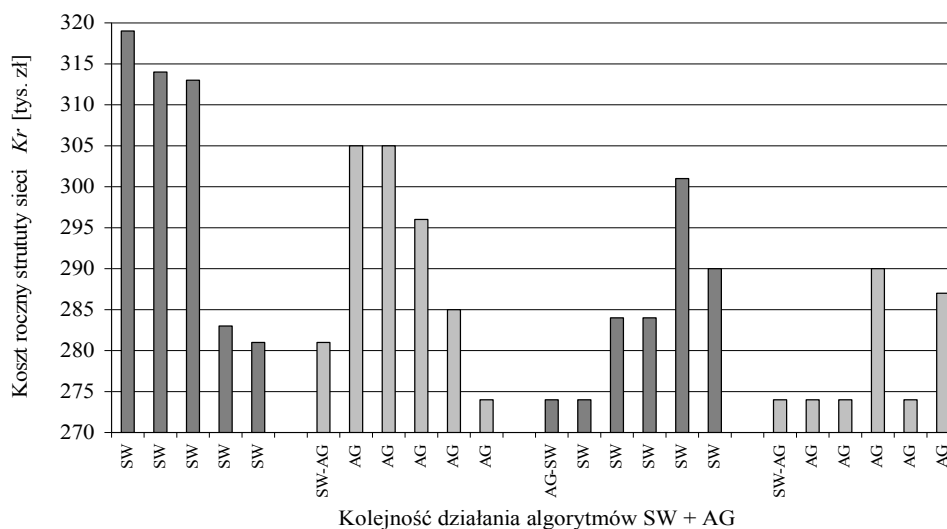
Rys. 2. Powtarzalność wyników obliczania struktur sieci uzyskana w 40 testach przy użyciu algorytmów SW i AG

### 3. WNIOSKI

- Należy prowadzić dalsze badania nad budową opisywanego algorytmu „hybrydowego” (algorytm symulowanego wyżarzania SW + algorytm genetyczny AG) do optymalizacji elektroenergetycznych struktur sieci promieniowych w celu określenia optymalnych parametrów algorytmów usprawniających ich działanie w ramach programu SW+AG.
- Stosowanie algorytmów „hybrydowych” (SW+AG) zwiększa prawdopodobieństwo uzyskania rozwiązań bliskich optimum globalnego.
- Z analizy rysunku 4 wynika, że kolejne rozwiązania uzyskiwane naprzemian algorytmami SW i AG generują rozwiązania coraz „lepsze” (mniejsze koszty roczne struktur sieci).
- Zaproponowana metoda może być stosowana do projektowania optymalnych struktur elektroenergetycznych sieci promieniowych.



Rys. 3. Uproszczony schemat blokowy algorytmu SW+AG (algorytm symulowanego wyżarzania + algorytm genetyczny)



Rys. 4. Kolejność działania algorytmów SW i AG w metodzie SW+AG (nk=5, NO=4)

## LITERATURA

- [1] Brożek J., Designing of optimal electric power radial network with use of algorithm based on the "simulated annealing, Archives of Energetic, vol. 15, No. 4-5, pp.1-14, 1996 (in Polish).
- [2] Goldberg D. E., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison -Wesley Publishing Company, 1989.
- [3] Kulczycki J., Optimization of the Structure of Electric Power Network, WNT, Warszawa 1990 r. (in Polish).

## OPTIMIZATION OF THE STRUCTURE OF ELECTRIC POWER RADIAL NETWORKS WITH THE USE OF AI ALGORITHMS

In the paper the method for optimizing the design process of the structures of two-voltage electric power radial networks is presented. The method takes advantage of a genetic algorithm (GA) as well as a simulated annealing algorithm (SA). Both algorithms minimize the same aim function, which is the annual cost of the electric power network. The execution of each of the algorithms generates – within the same acceptable period of time – a suboptimal structure of the network. If the same result is obtained through the utilization of both methods, the probability increases that the obtained network structure is optimal against the accepted aim function. The implemented algorithms use interchangeably – as the input data – the best obtained network structures. In the paper there is also presented an example illustrating the application of the developed computer program to the optimization of a model structure of an electric power radial network.