

Zastosowanie programowania ewolucyjnego do optymalizacji niezawodności elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych

Streszczenie. Artykuł dotyczy zastosowania programowania ewolucyjnego do optymalizacji niezawodności elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych. W artykule przedstawiono koncepcję i opis proponowanej metody oraz algorytm obliczeniowy. W końcowej części zaprezentowano przykładowe rezultaty obliczeń dla wybranej elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej.

Abstract. In the article is presented the evolutionary programming using the optimization of reliability the power distribution grids. The article presents the conception and description the evolutionary programming. The final part of the article describes sample calculations for power distribution grids using the developed method. (**Application of evolutionary programming to optimization of reliability power distribution grids**).

Słowa kluczowe: programowanie ewolucyjne, optymalizacja niezawodności, sieci elektroenergetyczne.

Keywords: evolutionary programming, optimization of reliability, electric power nets.

Wstęp

Elektroenergetyczne sieci dystrybucyjne podlegają zmianom wynikającym m.in. z przyłączania źródeł generacji rozproszonej [1, 2, 3], działań modernizacyjnych [4, 5] oraz rozwijaniem koncepcji sieci inteligentnych [6, 7, 8, 9]. Ważną cechą elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych jest niezawodność ich pracy [10, 11]. W celu oceny niezawodności sieci elektroenergetycznych stosuje się m.in. metody bazujące na ocenie za pomocą współczynników zawodności, średniej intensywności awarii i średniego czasu trwania awarii [12, 13, 14]. Do oceny niezawodności złożonych struktur elektroenergetycznych zastosowanie znajdują sieci Petriego [15, 16, 17].

Prezentowany artykuł poświęcono zastosowaniu programowania ewolucyjnego do odszukiwania fragmentów sieci o wysokich wartościach współczynników zawodności, aby następnie wyznaczyć scenariusze poprawy analizowanej sieci. W dalszych pracach autorzy planują rozszerzenie metody o możliwość opisu niezawodności elementów sieci poprzez określanie funkcji niezawodności elementów sieci.

Metoda współczynników zawodnościowych bazująca na wielkościach średnich nie uwzględnia wpływu okresu eksploatacji urządzenia. Do dokładniejszych analiz należy stosować metody oparte na analizie funkcji niezawodności $R(t)$ i funkcji trwałości $F(t)$ (funkcja zawodności), która jest prawdopodobieństwem uszkodzenia urządzenia w przedziale czasu [11, 12]:

$$(1) \quad F(t) = 1 - R(t)$$

Ważne znaczenie w teorii niezawodności ma funkcja intensywności uszkodzeń, którą można zdefiniować jako prawdopodobieństwo uszkodzenia urządzenia w przedziale czasu, do wielkości przedziału kiedy przedział ten zmniejsza się do zera oraz przy zachowaniu warunku, że do chwili t uszkodzenie urządzenia nie nastąpiło:

$$(2) \quad \lambda(t) = \frac{F'(t)}{1 - F(t)} = -\frac{R'(t)}{R(t)}$$

Przy określaniu funkcji niezawodności w całym okresie eksploatacji urządzenia na ogół nie jest spełniony warunek stałej intensywności uszkodzeń, w związku z tym zachodzi konieczność określania rozkładu wypadkowego funkcji niezawodności z funkcji składowych. Wówczas użyteczną metodą jest ocena niezawodności struktur elektroenergetycznych za pomocą sieci Petriego [17, 18].

W pracy [17] przedstawiono metodę bazującą na współpracy sieci Petriego oraz algorytmów ewolucyjnych w zakresie ocenie niezawodności struktur sieci dystrybucyjnych oraz planowania pracy tych sieci w stanach awarii. Metoda oparta na teorii sieci Petriego pozwala na ocenę niezawodności elektroenergetycznych sieci, przy różnych rozkładach funkcji niezawodności i odnowy poszczególnych elementów struktur elektroenergetycznych. Za pomocą tej metody można określić prawdopodobne stany awarii sieci, a następnie za pomocą algorytmów ewolucyjnych odszukać optymalne poawaryjne konfiguracje sieci dla prognozowanych stanów awarii.

Niniejszy artykuł jest tematycznie zbliżony do metodyki przedstawiony w pracy [17] gdyż również zaproponowano połączenie oceny niezawodności z ewolucyjnymi obliczeniami optymalizacyjnymi. Przy czym zasadniczą różnicą w podejściach obliczeniowych (powodującą, iż nie da się bezpośrednio porównać rezultatów tych sposobów obliczeniowych), jest to że podejście zaproponowane w bieżącym artykule dotyczy oceny i optymalizacji wartości współczynników zawodności sieci elektroenergetycznych dla poszukiwanej optymalnej strategii rozwoju sieci (w założonym horyzoncie czasowym). Czyli zastosowane programowanie ewolucyjne nie rozpatruje poawaryjnych zmian w konfiguracji sieci (jak algorytm ewolucyjny w [17]), ale określa scenariusze zmian modernizacji sieci (w kolejnych etapach rozwoju) i związaną z tym zmianą wartości współczynników zawodności sieci.

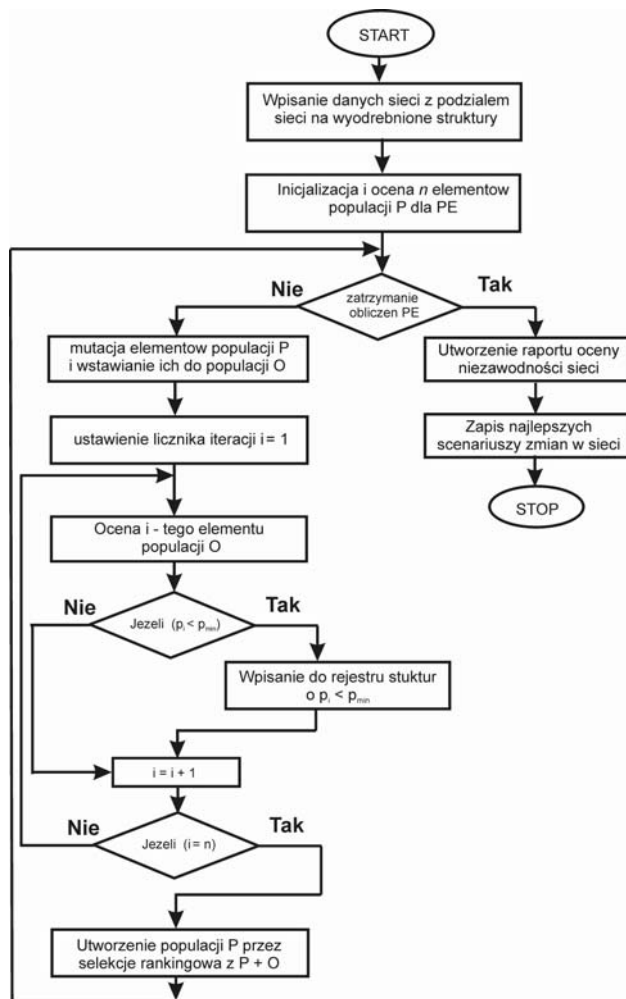
Metoda optymalizacji niezawodności sieci bazująca na programowaniu ewolucyjnym

Zaproponowana metoda optymalizacji niezawodności sieci dystrybucyjnych zakłada podział analizowanej sieci na wyodrębnione fragmenty (zawierające zgrupowania węzłów odbiorczych). Celem obliczeń jest wyznaczenie współczynników zawodności zasilania poszczególnych fragmentów sieci, oraz optymalizacja niezawodności analizowanej sieci.

Strukturę ścieżek zasilania wyodrębnionych fragmentów sieci określano począwszy od punktu zasilania do najbardziej odległego węzła odbiorczego w wyodrębnionym fragmencie sieci. Ścieżki te zawierały elementy sieci, począwszy od łącznika w stacji zasilającej a skończywszy na lokalnych stacjach SN/Nn. Informacje o wyłonionym zbiorze najbardziej awaryjnych struktur są wykorzystywane w celu określenia zbioru elementów do modernizacji jak też profilaktycznych wymian wybranych urządzeń sieciowych.

Programowanie ewolucyjne jest zaliczane do grupy metod określanych wspólną nazwą metod symulowanej ewolucji. Zasadniczą cechą programowania ewolucyjnego jest wykorzystanie operatora mutacji jako głównego operatora rekombinacji odpowiedzialnego za tworzenie nowych wariantów rozwiązań. Na rysunku 1 pokazano schemat blokowy realizowanych obliczeń.

W genetyce organizmów mutacja jest odpowiedzialna za losowe zmiany w strukturach genów co umożliwia dostosowywanie się organizmów do warunków środowiskowych. Koncepcję tę przeniesiono na poziom obliczeń matematycznych i wykorzystano ją do wprowadzania zmian w populacjach alternatywnych rozwiązań [19, 20]. Celem tych działań jest poszukiwanie rozwiązań jak najlepiej dostosowanych do przyjętej funkcji przystosowania.



Rys. 1. Schemat blokowy obliczeń programowania ewolucyjnego zastosowanego do optymalizacji niezawodności sieci

Programowanie ewolucyjne operuje na pewnym zbiorze rozwiązań co sprawia że charakteryzuje się ono naturalną równoległością obliczeń [21, 22]. W tej metodzie podczas każdej generacji nowa populacja O jest tworzona przez mutację każdego z osobników populacji rodzicielskiej P . Populacja rodzicielska P oraz nowotworzona populacja O są tak samo liczne. Nowa populacja rodzicielska jest tworzona za pomocą selekcji rankingowej, której podlegają osobniki ze starszej populacji P jak i osobniki zmutowane z nowej populacji O . Operacja mutacji realizowana jest wskutek losowych perturbacji wartości poszczególnych genów. W selekcji rankingowej osobniki porządkowane są zgodnie z ich wartością funkcji przystosowania. Liczba kopii każdego osobnika wprowadzana do nowej populacji jest

określana przez funkcję, która zależy od rangi osobnika. Odpowiednie procedury obliczeniowe opracowano w środowisku programu Matlab.

Celem obliczeń jest optymalizacji niezawodności sieci dystrybucyjnych poprzez wyznaczenie scenariuszy modernizacji sieci, przy uwzględnieniu kryteriów dotyczących minimalizacji strat technicznych oraz efektywnego wykorzystania nakładów inwestycyjnych. W zaproponowanym modelu optymalizacyjnym przyjęto następujące kryteria:

- minimalizacja współczynników zawadności sieci,
- minimalizacja kosztów strat technicznych w sieci,
- minimalizacja kosztów zwiększenia niezawodności oraz modernizacji sieci.

Biorąc pod uwagę powyższe kryteria optymalizacyjne określono rozważany jako zadanie optymalizacji wielokryterialnej. Zadanie optymalizacji wielokryterialnej związane jest z poszukiwaniem zbioru punktów niezdominowanych (zbioru rozwiązań Pareto-optymalnych) [19, 23]. Zadanie wielokryterialne można sprowadzić do skalarnego poprzez wprowadzenie dodatkowego kryterium, porządkującego punkty niezdominowane. Można to uczynić poprzez wprowadzenie funkcji agregującej, której argumentami są wartości poszczególnych składników wektorowego wskaźnika jakości. Otrzymuje się zagregowany, skalarny wskaźnik jakości $W(x)$, który jest przedmiotem optymalizacji.

$$(3) \quad W(x) = Q(f_1(x), \dots, f_m(x))$$

gdzie Q - oznacza funkcję agregującą.

W zależności od wyboru funkcji Q można rozróżnić różne metody skalaryzacji. Dla rozważanego zadania wybrano metodę punktu idealnego [22, 23]. Punkt ten to idealne wartości wektorowego wskaźnika jakości. Zadanie optymalizacji wielokryterialnej sprowadza się wówczas do znalezienia rozwiązań niezdominowanych znajdujących się najbliższe punktu idealnego (punktu utopii), którego współrzędne są określone przez najlepsze wartości poszczególnych kryteriów dla danego zbioru rozwiązań dopuszczalnych. Dla testowych obliczeń punkt idealny wybrano arbitralnie jako jeden z punktów zbioru rozwiązań Pareto-optymalnych (dla rozpatrywanego zadania) wyznaczonych przez wielokryterialny algorytm ewolucyjny NSGA zaimplementowany w funkcji „gamultiobj” programu Matlab. Funkcję agregującą określono następująco:

$$(4) \quad Q(f_1(x), \dots, f_m(x)) = |f(x) - f^i|$$

Gdzie f^i oznacza punkt idealny, $f_1(x)$, $f_2(x)$, ..., $f_m(x)$ są to składniki wektorowego wskaźnika jakości (związane z kryteriami), natomiast $|\cdot|$ to symbol normy wektora. Składniki wektorowego wskaźnika jakości opisano wzorami:

$$(5) \quad \min_j f_1(x_j) = \max_i (1 - p_i)$$

gdzie: $f_1(x)$ określa obliczeniowy współczynnik zawadności sieci, j – numer wariantu rozwiązania, i – numer fragmentu analizowanej sieci, p_i – współczynnik niezawodności ścieżki zasilania i -tego fragmentu sieci, $q_i = 1 - p_i$ współczynnik zawadności ścieżki zasilania i -tego fragmentu sieci.

$$(6) \quad \min_j f_2(x_j) = \sum_{k=1}^m (k_p \cdot \Delta P_k + k_a \cdot \Delta A_k)$$

gdzie: funkcja $f_2(x)$ określa koszty strat technicznych w sieci w zł/a, k – numer elementu sieci, m – liczba elementów

sieci, ΔP_k – roczne straty mocy czynnej w k -tym elemencie sieci, ΔA_k – roczne straty energii w k -tym elemencie sieci, k_p, k_a – współczynniki strat mocy (zł/kW) i energii (zł/kWh).

$$(7) \min f_3(x_j) = \sum_{i=1}^l x_{1,i} \cdot k_{m1} \cdot d_i + \sum_{i=1}^a x_{2,i} \cdot k_{m2} \cdot \dots + \sum_{i=1}^s x_{3,i} \cdot k_{m3}$$

gdzie: funkcja $f_3(x)$ określa koszty modernizacji sieci w zł/a, l, a, s – liczby linii, łączników, oraz stacji 15/0,4 dla których rozważano prace modernizacyjne, x_1, x_2, x_3 – zmienne logiczne określające realizację działań modernizacyjnych w analizowanej sieci, d – długość linii, k_{m1}, k_{m2}, k_{m3} – nakłady związane z określonym stopniem modernizacji [zł/a].

Ponieważ funkcje $f_1(x), f_2(x), f_3(x)$ określane są w różnych jednostkach bazowych, w celu porównywalności kryteriów zastosowano normalizujące przeliczenie do (0÷1):

$$\text{if } f_j \geq f_j^{\max} \quad \mu_j = 1$$

$$(8) \text{if } f_j^{\min} \leq f_j \leq f_j^{\max} \quad \mu_j = 1 - \frac{f_j^{\max} - f_j}{f_j^{\max} - f_j^{\min}}$$

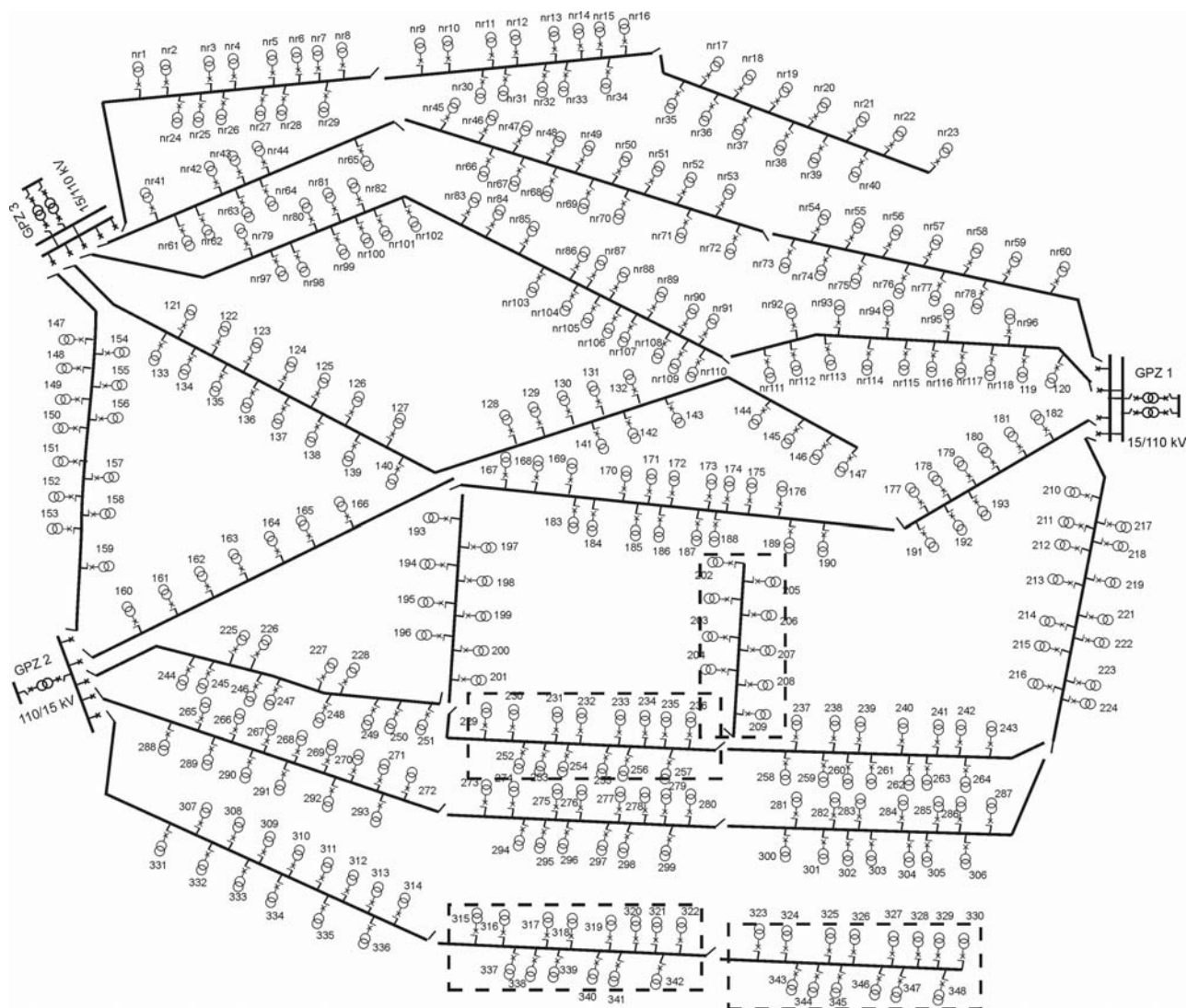
$$\text{if } f_j \leq f_j^{\min} \quad \mu_j = 0$$

Następnie przyjęto do obliczeń normę maksimum, którą można opisać następująco [23]:

$$(9) |f| = \max |f_i|$$

Norma maksimum wyraża dążenie do uzyskania takiego rozwiązania, dla którego wartość najgorszego kryterium jest jak najbliższa idealnemu. Zależność (9) zastosowano jako funkcję przystosowania dla oceny otrzymywanych rozwiązań. W tym celu obliczono wartości składników wektorowego wskaźnika jakości $f_1(x), f_2(x), f_3(x)$, aby najmniej korzystną spośród nich wartość przyjmować jako wartość przystosowania danego rozwiązania.

Funkcja $f_1(x)$ określa obliczeniowy współczynnik zawodności sieci, którego wartość wyznaczano jako największą z spośród obliczonych współczynników zawodności dla zbioru wyodrębnionych fragmentów sieci. Obliczenie funkcji $f_2(x)$ określało koszty strat technicznych w sieci (wylczone w zł/a). Obliczenie funkcji $f_3(x)$ wyznaczało planowane koszty zmian i modernizacji sieci (które to koszty wylczone w zł/a). Do obliczeń przyjęto strukturę sieci dystrybucyjnej SN ze schematu na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat analizowanej sieci SN z wyodrębnionymi strukturami o największych wartościach współczynników zawodności

Przykładowe obliczenia dla wybranej sieci SN

W celu realizacji obliczeń przyjęto dane techniczne i niezawodnościowe elementów sieci, ich przykładowe

wartości zestawiono w tabelach 1 oraz 2. Do realizacji obliczeń zaproponowaną metodą przyjęto strukturę oraz dane techniczne sieci elektroenergetycznej jej schemat

pokazano na rysunku 2 (gdzie zaznaczono wyodrębnione fragmenty sieci).

Dla programowania ewolucyjnego przyjęto kodowanie w postaci wektorów rzeczywisto liczbowych, których elementy zawierały się w przedziale $0.1 \div 1$, a po zdekodowaniu określały zakres realizacji działań modernizacyjnych w analizowanej sieci, których podstawowym celem była poprawa niezawodności analizowanej sieci dystrybucyjnej.

Tabela 1. Wybrane przykładowe dane linii analizowanej sieci SN

| w_1 | w_2 | p | $I_{dd} [A]$ | $d [km]$ | $R [\Omega]$ | $X [\Omega]$ |
|-------|-------|---------|--------------|----------|--------------|--------------|
| 87 | 88 | 0,99997 | 235 | 0,190 | 0,057 | 0,040 |
| 88 | 89 | 0,99995 | 235 | 0,306 | 0,091 | 0,064 |
| 89 | 90 | 0,99989 | 235 | 0,070 | 0,021 | 0,010 |
| 90 | 91 | 0,99996 | 235 | 0,070 | 0,021 | 0,010 |
| 91 | 92 | 0,99994 | 170 | 0,590 | 0,309 | 0,155 |

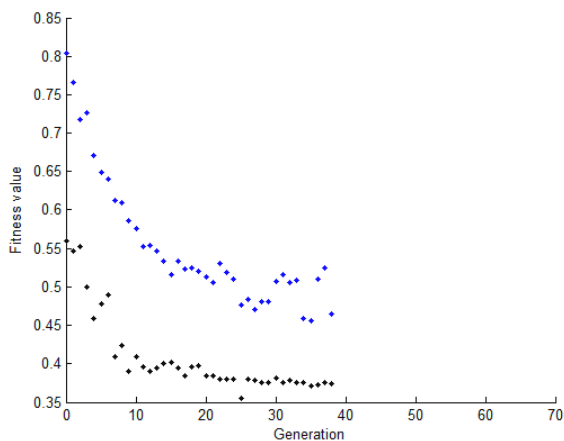
Tabela 2. Przykładowe dane węzłów analizowanej sieci SN

| Nr węzła | Typ | $P_o [kW]$ | $Q_o [kVar]$ | p |
|----------|-----|------------|--------------|---------|
| 48 | 2 | -125 | -38 | 0,99982 |
| 49 | 2 | -80 | -24 | 0,99984 |
| 50 | 2 | -387 | -77 | 0,99983 |
| 51 | 2 | -309 | -31 | 0,99986 |
| 52 | 2 | -158 | -16 | 0,99982 |

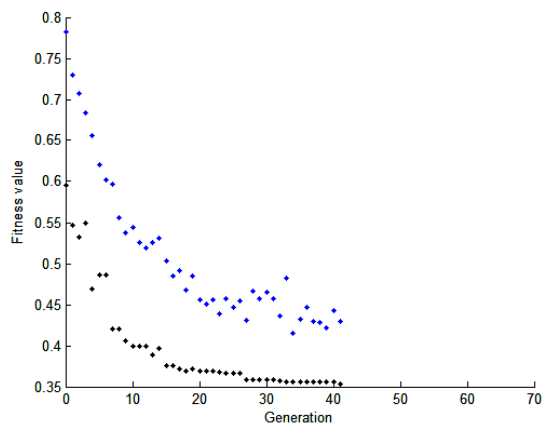
Zastosowano także funkcję kary dla generowanych rozwiązań, które w niewielkim stopniu (nie więcej niż o 10% danego ograniczenia) przekraczały warunki ograniczające (określające obszar rozwiązań dopuszczalnych). Pozostałe niepoprawne rozwiązania były odrzucane. W rezultacie odszukiwane rozwiązania (scenariusze zmian sieci) spełniały wymagania dotyczące: prądowych i napięciowych praw Kirchhoffa, nieprzekraczanie dopuszczalnej obciążalności cieplnej i zwarciowej elementów sieci. Uzyskiwane rezultaty obejmowały:

- określenie wypadkowego współczynnika niezawodności sieci,
- obliczenia wartości współczynników zawodności dla wyodrębnionych fragmentów sieci,
- określenie optymalnych scenariuszy poprawy sieci, w tym zbioru elementów do profilaktycznych wymian.

Zgodnie z zastosowaną metodą punktu idealnego, przyjmowano, że najmniej korzystna wartość spośród obliczonych wartości składników wektorowego wskaźnika jakości $f_1(x)$, $f_2(x)$, $f_3(x)$ będzie przyjmowana jako wartość funkcji przystosowania. Przyjęte normalizujące przeliczenie opisane wzorem (8) umożliwiło prezentację procesów obliczeniowych na przejrzystych wykresach, obrazujących zmiany wartości przystosowania najlepszych rozwiązań oraz zmiany średniego przystosowania populacji rozwiązań. Przebieg obliczeń pokazano na rysunkach 3÷5.



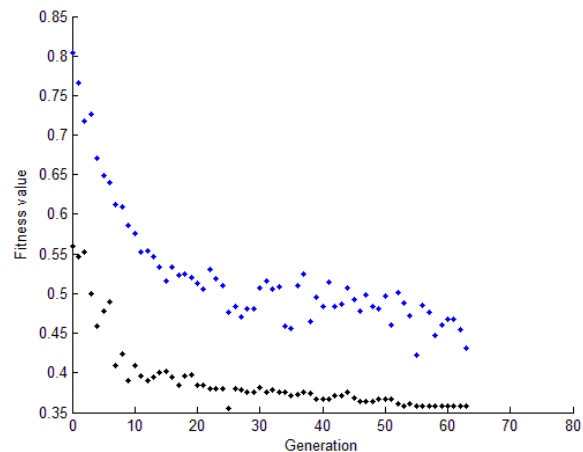
Rys. 3. Przykładowy przebieg zmian najlepszych rozwiązań oraz zmiany średniego przystosowania populacji



Rys. 4. Drugi przykładowy przebieg zmian najlepszych rozwiązań oraz zmiany średniego przystosowania populacji

Kryterium zatrzymania obliczeń przyjęto w postaci zadanej liczby iteracji, po których nie wystąpiła poprawa funkcji celu oraz zadawanego czasu obliczeń.

Dla przykładowego procesu obliczeniowego pokazanego na rysunku 5 najlepsze odszukane rozwiązanie charakteryzowało się wartością zagregowanej funkcji celu równą 0,3532, natomiast średnie przystosowanie końcowej populacji rozwiązań wynosiło 0,4294. W ramach otrzymanych wyników jest uzyskanie m.in. wartości współczynników zawodności dla zbioru wyodrębnionych fragmentów sieci, przed oraz po realizacji działań poprawiających ocenę analizowanej sieci. Na rysunku 2 przedstawiającym schemat analizowanej sieci dystrybucyjnej SN, zaznaczono cztery wyodrębnione fragmenty sieci dla których uzyskano największe wartości współczynników zawodności (tabela 3).



Rys. 5. Trzeci przykład procesu obliczeniowego zmian najlepszych wartości rozwiązań oraz średniego przystosowania populacji

W rezultacie obliczeń realizowanych algorytmem programowania ewolucyjnego odszukano scenariusze poprawy sieci, których realizacja spowodowałaby zmniejszenie współczynników zawodności poszczególnych fragmentów analizowanej sieci dystrybucyjnej. Przykładowo zestawienie wartości współczynników zawodności dla czterech fragmentów zaznaczonych na schemacie analizowanej sieci pokazano w tabeli numer 3.

Tabela 3. Zestawienie wybranych współczynników zawodności

| Nr fragmentu sieci | Wartości początkowe | Wartości po modernizacji |
|--------------------|---------------------|--------------------------|
| 1 | 0,01329 | 0,00875 |
| 2 | 0,01215 | 0,00672 |
| 3 | 0,01157 | 0,00421 |
| 4 | 0,01005 | 0,00342 |

W tabeli 4 zestawiono natomiast przykładowe wartości wektorowego wskaźnika jakości (czyli funkcji $f_1(x)$, $f_2(x)$, $f_3(x)$) dla trzech najlepszych rozwiązań (wyrażone w jednostkach względnych) uzyskanych przez opracowanym algorytm obliczeniowy.

Tabela 4. Wartości wektorowego wskaźnika jakości dla trzech najlepszych uzyskanych rozwiązań

| Nr rozwiązania | $f_1(x)$ | $f_2(x)$ | $f_3(x)$ |
|----------------|----------|----------|----------|
| 1 | 0,3532 | 0,4304 | 0,3878 |
| 2 | 0,3972 | 0,3568 | 0,3751 |
| 3 | 0,3642 | 0,3541 | 0,3552 |

Wnioski

W artykule zaprezentowano koncepcję metody optymalizacji niezawodności elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych bazującej na programowaniu ewolucyjnym. Na podstawie zrealizowanych obliczeń można wnioskować, że zastosowanie programowania ewolucyjnego, które jest mniej pracochłonne (bazuje jedynie na operatorze mutacji jako głównym operatorze konfigurującym nowe rozwiązania) niż inne metody obliczeń ewolucyjnych daje dobre rezultaty w zakresie optymalizacji niezawodności złożonych systemów technicznych.

Na podstawie wielokrotnie powtarzanych procesów obliczeniowych stwierdzono, iż opracowane procedury programowania ewolucyjnego umożliwiają odszukiwanie rozwiązań rozpatrywanego zadania, znajdujących się blisko założonego punktu idealnego. W wyniku realizacji obliczeń z zastosowaniem proponowanej metody uzyskuje się raport opisujący scenariusze zmian w analizowanych sieciach dystrybucyjnych przy uwzględnieniu minimalizacji strat technicznych oraz efektywnego wykorzystania nakładów inwestycyjnych na inwestycje sieciowe. Istnieje również możliwość udoskonalenia proponowanej metody poprzez uwzględnienie w obliczeniach funkcji niezawodności elementów sieci, zamiast współczynników zawodności.

Autorzy: dr hab. inż. Sylwester Filipiak, Politechnika Świętokrzyska, Zakład Podstaw Energetyki, Aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: filipiak@tu.kielce.pl, dr inż. Andrzej Stobiecki, Politechnika Świętokrzyska, Zakład Podstaw Energetyki, Aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: a.stobiecki@tu.kielce.pl, prof. dr hab. inż. Franciszek Strzelczyk, Politechnika Świętokrzyska, Zakład Podstaw Energetyki, Aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: f.strzelczyk@tu.kielce.pl

LITERATURA

- Parol M.: Aspekty techniczne i prawne dotyczące pracy i przyłączenia źródeł generacji rozproszonej do sieci dystrybucyjnych niskich napięć, *Przegląd Elektrotechniczny* pp. 326-330, Nr 5, 2013.
- Parol M.: Prognozowanie ultrakrótkoterminowe mocy generowanej w odnawialnych źródłach energii z wykorzystaniem logiki rozmytej, *Przegląd Elektrotechniczny*, pp. 265-268, Nr 6, 2014.
- Parol M.: Magazyinowanie energii w sieciach dystrybucyjnych niskich napięć. IX Konferencja Naukowo-Techniczna "Optymalizacja w Elektroenergetyce", 7 października 2015, PSE S.A., Konstancin-Jeziorna, pp. 201-211, 2015.
- 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.
- Marzecki J.: Planowanie rozwoju miejskich Rozdzielczych Punktów Zasilających (RPZ) w warunkach ryzyka. *Przegląd Elektrotechniczny*, s. 234-237, Nr 2, luty 2014,
- 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.
- Marzecki J., Drab M.: Obciążenia i rozpyły mocy w sieci terenowej średniego napięcia-wybrane problemy. *Przegląd Elektrotechniczny*, R.91, pp. 192-195, luty, Nr 2, 2015.
- Machowski J., Kacejko P., Robak S., Miller P., Wancerz M.: Badania systemów elektroenergetycznych w planowaniu rozwoju - Analizy statyczne, *Wiadomości Elektrotechniczne*. s. 3-12, Nr 7/2013.
- Machowski J., Kacejko P., Robak S., Miller P., Wancerz M.: Badania systemów elektroenergetycznych w planowaniu rozwoju. Część 2. Analizy dynamiczne. *Wiadomości Elektrotechniczne*, tom LXXXI, pp. 3 -12, nr 8/2013, 2013.
- Machowski J., Kacejko P., Robak S., Miller P., Wancerz M.: Analizy systemu elektroenergetycznego w średniookresowym planowaniu rozwoju. *Przegląd Elektrotechniczny*, s. 234 - 243, Nr 6/2013.
- Stępień J.: Charakterystyka planowanych prac eksploatacyjnych elektroenergetycznych sieci rozdzielczych i ich skutków. *Przegląd Elektrotechniczny*. Nr. 7/2008, s.: 162-165.
- Stępień J.: Kompleksowy model niezawodnościowy głównych punktów zasilających 110/15 kV. *Przegląd Elektrotechniczny*, Nr. 4/2008, s:128-131.
- Stępień J., Madej Z.: Evaluation of structural redundancy effects in medium voltage cable networks., *Rynek Energii*, Issue: 4, pp. 55-60, AUG 2009
- Parol M: Analiza wskaźników dotyczących przerw w dostarczaniu energii elektrycznej na poziomie sieci dystrybucyjnych. *Przegląd Elektrotechniczny* s. 122-126 Nr 8/2014.
- Każmierczyk A., Chojnacki A.: Zastosowanie sieci Petriego do oceny niezawodności torów zasilania w elektroenergetycznych sieciach dystrybucyjnych. *Logistyka* 2014, Zeszyt: 6, Strony: 5300-5308.
- Chojnacki A., Każmierczyk A.: Wykorzystanie sieci Petriego do analizy wpływu awarii elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej i sterowniczej na niezawodność układów zasilania w energię elektryczną. *Logistyka* 2014, Zeszyt: 6, Strony: 2619-2625.
- Filipiak S., Każmierczyk A.: Zastosowanie Sieci Petriego oraz algorytmów ewolucyjnych do oceny niezawodności i planowania pracy miejskiej sieci dystrybucyjnej, *Przegląd Elektrotechniczny* R. 88 NR 3a/2012, s. 241-245.
- Każmierczyk A.: Zastosowanie sieci Petriego do oceny niezawodności elektroenergetycznych sieci rozdzielczych. Rozprawa doktorska obroniona w 2015 na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Świętokrzyskiej.
- Helt P., Parol M., Piotrowski P.: Metody sztucznej inteligencji – przykłady zastosowań w elektroenergetyce. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2012.
- 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.
- 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.
- 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.
- Arabas J.: Wykłady z algorytmów ewolucyjnych. WNT, Warszawa 2004.