

# Optymalizacja systemów elektroenergetycznych z zastosowaniem obliczeń ewolucyjnych

Mirosław Gajer

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Informatyki Stosowanej

**Streszczenie:** Tematyka artykułu dotyczy zagadnień związanych z optymalizacją pracy urządzeń wchodzących w skład systemu elektroenergetycznego. W artykule optymalizacja sposobu pracy urządzeń systemu elektroenergetycznego została potraktowana jako optymalizacja wielokryterialna. Głównymi kryteriami brany pod uwagę podczas poszukiwania rozwiązania są przede wszystkim koszt produkcji energii elektrycznej w rozpatrywanym horyzoncie czasowym oraz całkowita moc termicznych strat przesyłowych powstających w liniach wysokich napięć. Ponadto moc w systemie elektroenergetycznym powinna być zbilansowana, co stanowi kolejne kryterium oceny jakości uzyskiwanych rozwiązań. W celu rozwiązania rozpatrywanego w artykule zagadnienia optymalizacyjnego zaproponowano wykorzystanie techniki obliczeń ewolucyjnych.

**Słowa kluczowe:** systemy elektroenergetyczne, optymalizacja wielokryterialna, obliczenia ewolucyjne

Systemy elektroenergetyczne stanowią układy o bardzo dużym stopniu złożoności, w skład których wchodzi różnego typu urządzenia wytwarzające energię elektryczną, elektroenergetyczne linie przesyłowe pracujące na różnych poziomach napięć, stacje transformatorowo-rozdzielcze oraz urządzenia stanowiące odbiorniki energii elektrycznej. Z pracą systemu elektroenergetycznego wiąże się konieczność nieustannego nadążania urządzeń wytwórczych za zmieniającym się zapotrzebowaniem na moc elektryczną ze strony odbiorców [1]. Pragnąc produkować energię elektryczną po możliwie jak najniższych kosztach, zużywając przy tym jak najmniejsze ilości paliw kopalnych i minimalizując termiczne straty przesyłowe występujące w liniach wysokich napięć i transformatorach, stajemy przed koniecznością rozwiązania bardzo złożonego zagadnienia optymalizacyjnego, dla którego w ogólnym przypadku nie są znane metody analityczne pozwalające na jego rozwiązanie [2]. Z tego powodu koniecznością staje się zastosowanie odpowiednich heurystycznych metod poszukiwań, które pomimo tego, że nie gwarantują w żaden sposób odszukania pożądanego optimum, to jednak mogą doprowadzić do odnalezienia akceptowalnego rozwiązania suboptymalnego. Do tego typu metod heurystycznych należą między innymi algorytmy ewolucyjne, które swe powstanie zawdzięczają przede wszystkim odkryciom w dziedzinie nauk biologicznych. Algorytmy ewolucyjne odznaczają się wyjątkowo dużą odpornością na wystąpienie niebezpieczeństwa ugrzęźnięcia poszukiwań w minimum lokalnych eksplorowanej przestrzeni rozwiązań.

Algorytmy ewolucyjne były już w przeszłości wielokrotnie stosowane na potrzeby rozwiązania różnorodnych zadań związanych z optymalizacją i syntezą struktury wybranych systemów technicznych, gdzie wielokrotnie udowodniły swą wysoką skuteczność i dużą praktyczną przydatność. Z tego powodu w artykule zdecydowano się na wybór właśnie algorytmów ewolucyjnych jako skutecznego narzędzia optymalizacyjnego, które może być wykorzystane również w celu rozwiązania problemu poszukiwania możliwie jak najlepszego sposobu pracy urządzeń tworzących system elektroenergetyczny (w sensie minimalizacji ilości zużywanych paliw kopalnych).

## 1. Systemy elektroenergetyczne

Jak już uprzednio wspomniano, charakterystyczną cechą pracy systemów elektroenergetycznych jest konieczność nieustannego nadążania z wartościami mocy generowanych przez bloki energetyczne za zmieniającym się ciągle zapotrzebowaniem na moc elektryczną zgłaszanym ze strony odbiorców. Taki stan rzeczy wymusza konieczność odpowiedniego rozłożenia generowanej mocy pomiędzy poszczególne bloki energetyczne, aby sumaryczne zużycie paliwa w poszczególnych blokach energetycznych było utrzymywane na możliwie jak najniższym poziomie [3].

Masa paliwa zużywanego przez blok energetyczny w jednostce czasu jest funkcją nieliniową zależną od aktualnej wartości mocy generowanej przez dany blok energetyczny. Na potrzeby praktycznych obliczeń rozważana funkcja nieliniowa przybliżana jest odcinkiem funkcji wielomianowej, przy czym najczęściej jest to wielomian drugiego stopnia. W związku z powyższym masa zużywanego w jednostce czasu paliwa w  $i$ -tym bloku energetycznym wyraża się następującym wzorem

$$M_i = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad (1)$$

Wartości występujących we wzorze (1) stałych współczynników  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  zależą od parametrów konstrukcyjnych  $i$ -tego bloku energetycznego oraz od rodzaju i jakości stosowanego w danym bloku energetycznym paliwa (głównie od stopnia jego kaloryczności).

Ponieważ w systemie elektroenergetycznym występują zazwyczaj wiele różnego typu bloków energetycznych różniących się rodzajem stosowanego w nich paliwa oraz parametrami konstrukcyjnymi charakterystycznymi dla różnych etapów rozwoju techniki (urządzenia pochodzące z różnych okresów produkcji, cechujące się odmiennymi stopniami sprawności dla zachodzących w nich przemian energetycznych), dlatego powstaje problem ustalenia ta-

kiego rozdziału generowanej mocy na poszczególne bloki energetyczne, aby dana wzorem (2) całkowita masa paliwa zużywanego w jednostce czasu przez wszystkie  $N$  bloki energetyczne wchodzące w skład rozważanego systemu elektroenergetycznego była możliwie jak najmniejsza

$$M = \sum_{i=1}^N M_i \quad (2)$$

Dodatkowo w przypadku rozważanego zagadnienia optymalizacyjnego występują liczne ograniczenia, które muszą zostać uwzględnione podczas poszukiwania jego rozwiązania.

Przed wszystkim moc  $i$ -tego bloku energetycznego nie może przybierać dowolnych wartości, tylko musi zawierać się w ściśle określonym przedziale, określonym z jednej strony przez poziom dopuszczalnej dla niego mocy minimalnej  $P_{MINi}$ , a z drugiej strony przez poziom dozwolonej jego mocy maksymalnej  $P_{MAXi}$ .

Również dla całego systemu elektroenergetycznego musi być spełniony warunek zbilansowania mocy, polegający na tym, że suma mocy generowanej w poszczególnych blokach energetycznych musi być równa łącznej wartości mocy zapotrzebowanej przez odbiorców  $P_D$ , powiększonej dodatkowo o sumaryczną moc strat przesyłowych, przy czym dla każdego z pracujących bloków energetycznych przyjmuje się, że związana z nim wartość mocy strat przesyłowych jest wprost proporcjonalna do kwadratu wartości mocy generowanej w danym bloku energetycznym.

W związku z powyższym warunek zbilansowania mocy w systemie elektroenergetycznym wyraża się następującym wzorem

$$\sum_{i=1}^N P_i = P_D + \sum_{i=1}^N s_i P_i^2 \quad (3)$$

Występujący we wzorze (3) stały współczynnik  $s_i$  jest współczynnikiem strat przesyłowych związanych z wyprawieniem mocy z  $i$ -tego bloku energetycznego, który zależy od wartości parametrów konstrukcyjnych elektroenergetycznych linii przesyłowych i stacji transformatorowych.

Występowanie opisanych powyżej ograniczeń sprawia, że rozwiązanie zagadnienia optymalizacji sposobu pracy systemu elektroenergetycznego, pod kątem minimalizacji zużywanego w poszczególnych blokach energetycznych paliwa oraz redukcji całkowitej mocy termicznych strat przesyłowych, nie jest możliwe za pomocą metod analitycznych. Taki stan rzeczy sprawia, że koniecznością staje się zastosowanie odpowiednich heurystycznych technik poszukiwań, takich jak na przykład algorytmy ewolucyjne.

## 2. Algorytmy ewolucyjne

Obecnie pod pojęciem systemów ewolucyjnych rozumie się różnego typu techniki optymalizacyjne, które swe powstanie zawdzięczają odkryciom dokonany w obszarze biologii. Próby odwzorowania przebiegu procesów związanych z biologiczną ewolucją za pomocą programów komputerowych doprowadziły do powstania techniki obliczeniowej określanej mianem algorytmów genetycznych [4]. Z kolei ich dalsze ulepszenia i modyfikacje spowodowały wyłonienie się algorytmów i strategii ewolucyjnych, w przypadku

których realizowane operacje genetyczne ograniczają się zazwyczaj do zastosowania jedynie operatora mutacji bez wzajemnego krzyżowania się osobników, co ma miejsce w przypadku klasycznych algorytmów genetycznych. Innym typem systemów obliczeniowych zaliczanych również do szeroko rozumianej klasy systemów ewolucyjnych są systemy programowania genetycznego i ewolucyjnego [5]. W ich przypadku celem symulowanej za pomocą komputera ewolucji jest odnalezienie struktury programów komputerowych przeznaczonych do realizacji określonych zadań.

Pokrewnymi technikami obliczeniowymi zaliczanymi również do szeroko rozumianych systemów inspirowanych biologicznie są także algorytmy wzorowane na zachowaniu się owadów społecznych, takich jak na przykład mrówki bądź pszczoły, oraz algorytmy immunologiczne, które naśladują procesy leżące u podstaw funkcjonowania systemów odpornościowych organizmów żywych [6, 7].

Wszystkie wymienione techniki obliczeniowe bazujące na odkryciach dokonanych w zakresie nauk biologicznych należą do szerokiej klasy heurystycznych algorytmów optymalizacyjnych. Tego rodzaju metody kierują się w swym działaniu zawsze pewnymi przesłankami dotyczącymi optymalizowanych systemów i raczej nigdy nie są w stanie zapewnić odnalezienia rozwiązania najlepszego. Odnajdywane przez nie rozwiązania są zatem jedynie rozwiązaniami suboptymalnymi, które stanowią tylko pewnego rodzaju przybliżenie pożądanego rozwiązania optymalnego. W związku z powyższym odnalezienie za pomocą tego typu technik obliczeniowych rozwiązania muszą zostać każdorazowo poddane gruntownej analizie pod kątem ich jakości i dalszych możliwości ich praktycznego zastosowania [8].

Przeszukiwanie wielowymiarowych przestrzeni rozwiązań, często o bardzo skomplikowanej topologii, nie jest w ogólnym przypadku łatwym zadaniem i żadna z wymienionych technik obliczeniowych nie daje gwarancji, że znalezione za jej pomocą rozwiązania suboptymalne będą odznaczały się odpowiednio wysoką jakością, ponieważ może się tak zdarzyć, że proces poszukiwań ugrzęźnie na dobre w pewnym minimum lokalnym, które znacznie odbiega od poszukiwanego rozwiązania optymalnego. Z tego powodu do suboptymalnych rozwiązań dostarczonych za pomocą wymienionych inspirowanych biologicznie technik obliczeniowych należy podchodzić z dużą dozą krytycyzmu i dokładnie przeanalizować skutki ich ewentualnych zastosowań praktycznych w danych systemach technicznych.

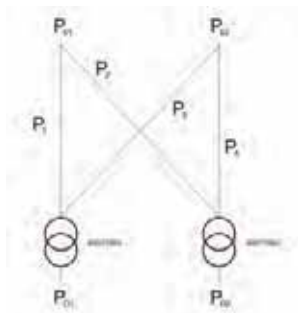
Liczne przykłady praktycznych zastosowań technik obliczeniowych opartych na wykorzystaniu algorytmów ewolucyjnych można znaleźć między innymi w następujących pracach autora [9–19]. Zaprezentowane w wymienionych pracach wyniki symulacji komputerowych dowodzą, że algorytmy ewolucyjne mogą być postrzegane jako skuteczne narzędzie, które może być z powodzeniem wykorzystane na potrzeby optymalizacji wybranych systemów technicznych. W szczególności algorytmy ewolucyjne mogą zostać zastosowane do realizacji wybranych zadań związanych z optymalizacją sposobu pracy urządzeń tworzących system elektroenergetyczny.

### 3. Optymalizowany system

Możliwości zastosowania technik obliczeniowych opartych na algorytmach ewolucyjnych na potrzeby optymalizacji sposobu pracy urządzeń tworzących system elektroenergetyczny zostaną przeanalizowane na przykładzie pewnego hipotetycznego systemu elektroenergetycznego, który został schematycznie przedstawiony na rys. 1.

Rozważany system elektroenergetyczny charakteryzuje się celowo bardzo prostą strukturą, ponieważ składa się jedynie z dwóch bloków energetycznych, w przypadku których generowane moce czynne  $P_{b1}$  i  $P_{b2}$  muszą zawierać się w dopuszczalnych przedziałach – odpowiednio  $[P_{bMIN1}, P_{bMAX1}]$  oraz  $[P_{bMIN2}, P_{bMAX2}]$ .

Moc generowana w rozważanych blokach energetycznych wyprowadzona jest w analizowanym systemie elektroenergetycznym za pośrednictwem czterech elektroenergetycznych linii przesyłowych pracujących pod napięciem 400 kV.



**Rys. 1.** Struktura analizowanego systemu elektroenergetycznego  
**Fig. 1.** The structure of analyzed electrical energetic system

Moce czynne przesyłane za pośrednictwem kolejnych linii zostały oznaczone na rys. 1 odpowiednio jako:  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  i  $P_4$ . Moce czynne przesyłane przez poszczególne linie nie mogą przekraczać dopuszczalnych wartości, wynikających z termicznej obciążalności elektroenergetycznych linii przesyłowych, które oznaczono jako:  $P_{MAX1}$ ,  $P_{MAX2}$ ,  $P_{MAX3}$  i  $P_{MAX4}$ . Rozważane elektroenergetyczne linie przesyłowe pracujące pod napięciem 400 kV doprowadzają moc do dwóch stacji transformatorowych, za pośrednictwem których napięcie obniżane jest do poziomu 110 kV. Przyjęto, że sprawność rozważanych stacji transformatorowych wynosi  $\eta = 0,985$ .

Zapotrzebowanie na moc zgłaszane ze strony odbiorców, które mierzone jest w obu stacjach transformatorowych 400/110 kV, oznaczone zostało na rys. 1 odpowiednio jako:  $P_{D1}$  i  $P_{D2}$ .

Rozwiązanie powyższego zagadnienia optymalizacyjnego polega na ustaleniu takich wartości mocy czynnych generowanych przez oba bloki energetyczne  $P_{b1}$  i  $P_{b2}$ , aby sumaryczne jednostkowe zużycie paliwa w obu blokach energetycznych osiągnęło możliwie jak najmniejszą wartość.

Ponadto moc generowana w każdym z bloków energetycznych może zostać przesłana za pośrednictwem dwóch linii pracujących pod napięciem 400 kV. W związku z powyższym kolejnym zadaniem przeprowadzanej opty-

malizacji jest dokonanie takiego rozdziału przesyłanej mocy pomiędzy obie linie, aby powstałe w nich sumaryczne termiczne straty przesyłowe osiągały możliwie jak najmniejszą wartość.

Dodatkowo analizowany system elektroenergetyczny musi być zbilansowany, czyli moc generowana w obu blokach musi pokrywać w całości zapotrzebowanie zgłaszane ze strony odbiorców  $P_{D1}$  i  $P_{D2}$  oraz straty przesyłowe powstałe w liniach pracujących pod napięciem 400 kV i w stacjach transformatorowych 400/110 kV. W związku z powyższym stopień zbilansowania systemu elektroenergetycznego jest kolejnym kryterium, które musi być brane pod uwagę podczas poszukiwania rozwiązania optymalnego [20].

Dla mocy przesyłanych przez poszczególne linie pracujące pod napięciem 400 kV można zapisać następujące równania

$$P_1 = \alpha_1 P_{b1} \quad (4)$$

$$P_2 = (1 - \alpha_1) P_{b1} \quad (5)$$

$$P_3 = \alpha_2 P_{b2} \quad (6)$$

$$P_4 = (1 - \alpha_2) P_{b2} \quad (7)$$

Występujące w równaniach (4)–(7) współczynniki  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  są liczbami rzeczywistymi zawartymi w przedziale (0, 1) i decydują o sposobie podziału mocy czynnej generowanej w bloku energetycznym pomiędzy dwie elektroenergetyczne linie przesyłowe wysokich napięć.

Z kolei z warunku zbilansowania systemu elektroenergetycznego otrzymuje się następujące równania

$$(P_1 - s_1 P_1^2 + P_3 - s_3 P_3^2) \eta = P_{D1} \quad (8)$$

$$(P_2 - s_2 P_2^2 + P_4 - s_4 P_4^2) \eta = P_{D2} \quad (9)$$

W związku z koniecznością minimalizacji ilości paliwa zużywanego w jednostce czasu w obu blokach energetycznych oraz minimalizacji mocy termicznych strat przesyłowych w liniach pracujących pod napięciem 400 kV oraz w stacjach transformatorowych 400/110 kV, a także w związku z koniecznością zapewnienia zbilansowania systemu elektroenergetycznego w optymalizowanym systemie występują trzy różne funkcje celu, których wartości muszą podlegać minimalizacji.

Pierwsza z rozważanych funkcji celu związana jest z minimalizacją ilości paliwa zużywanego w jednostce czasu w obu blokach i przyjmuje następującą postać

$$f_1 = a_1 + a_2 + b_1 P_{b1} + b_2 P_{b2} + c_1 P_{b1}^2 + c_2 P_{b2}^2 \quad (10)$$

Z kolei druga funkcja celu związana jest z minimalizacją mocy termicznych strat przesyłowych i wyraża się wzorem

$$f_2 = s_1 P_1^2 + s_2 P_2^2 + s_3 P_3^2 + s_4 P_4^2 + (1 - \eta)(P_1 + P_2 + P_3 + P_4 - s_1 P_1^2 - s_2 P_2^2 - s_3 P_3^2 - s_4 P_4^2) \quad (11)$$

Natomiast trzecia funkcja celu będąca miernikiem stopnia zbilansowania systemu elektroenergetycznego przyjmuje następującą postać

$$f_3 = \left( (P_1 + P_3)\eta - P_{D1} - s_1 P_1^2 - s_3 P_3^2 \right)^2 + \left( (P_2 + P_4)\eta - P_{D2} - s_2 P_2^2 - s_4 P_4^2 \right)^2 \quad (12)$$

W przypadku idealnego zbilansowania systemu elektroenergetycznego funkcja celu dana wzorem (12) powinna przyjąć wartość równą zero. W pozostałych przypadkach funkcja ta przyjmuje wartości dodatnie, które są tym większe, im bardziej naruszony jest warunek zbilansowania systemu elektroenergetycznego.

Występowanie w optymalizowanym systemie aż trzech różnych funkcji celu sprawia, że mamy do czynienia w rozważanym wypadku z optymalizacją wielokryterialną. W ogólnym przypadku rozwiązanie tego typu zagadnień nie jest rzeczą łatwą i sprowadza się najczęściej do poszukiwania zbioru rozwiązań optymalnych w sensie Pareto. Tego typu zbiór nazywany jest zbiorem Pareto optymalnym i zawiera wszystkie rozwiązania, które nie są zdominowane przez jakiegokolwiek inne rozwiązanie [21].

W sytuacji, gdy występuje kilka różnych kryteriów oceny rozwiązań danego problemu optymalizacyjnego, mówimy, że dane rozwiązanie jest Pareto optymalne, gdy nie jest gorsze niż żadne inne rozwiązanie pod względem wszystkich kryteriów oraz jest lepsze niż wszystkie pozostałe rozwiązania pod względem co najmniej jednego kryterium.

W związku z powyższym w przypadku optymalizowanego systemu elektroenergetycznego rozwiązanie A będzie uznane za lepsze niż rozwiązania B, tylko w przypadku gdy będzie spełniony jeden z poniższych warunków

$$f_1(A) < f_1(B) \wedge f_2(A) \leq f_2(B) \wedge f_3(A) \leq f_3(B) \quad (13)$$

$$f_1(A) \leq f_1(B) \wedge f_2(A) < f_2(B) \wedge f_3(A) \leq f_3(B) \quad (14)$$

$$f_1(A) \leq f_1(B) \wedge f_2(A) \leq f_2(B) \wedge f_3(A) < f_3(B) \quad (15)$$

#### 4. Implementacja obliczeń ewolucyjnych

Na potrzeby rozwiązania przedstawionego w artykule problemu wielokryterialnej optymalizacji sposobu pracy urządzeń wchodzących w skład systemu elektroenergetycznego zastosowany został algorytm ewolucyjny, którego działanie opiera się na zastosowaniu genetycznych operacji mutacji i selekcji.

Ponadto w zastosowanym algorytmie ewolucyjnym zastosowane zostało kodowanie oparte bezpośrednio na liczbach rzeczywistych, które znacznie ułatwiło implementację algorytmu. Ogólnie rzecz biorąc, każdy z osobników wchodzących w skład populacji składał się z czterech genów, z których każdy był liczbą rzeczywistą. Pierwsze dwa geny każdego osobnika wykorzystane zostały do zakodowania wartości mocy czynnych obu bloków energetycznych  $P_{b1}$  i  $P_{b2}$ . Natomiast dwa pozostałe geny każdego z osobników wykorzystane zostały do zakodowania wartości współczynników  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$ , które decydują o sposobie

podziału mocy czynnych przesyłanych za pomocą dwóch elektroenergetycznych linii wysokich napięć wyprowadzających moc z danego bloku energetycznego. Na podstawie wartości współczynników  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  można następnie wyznaczyć wartości mocy czynnych  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  i  $P_4$  przesyłanych przez poszczególne linie elektroenergetyczne pracujące pod napięciem 400 kV za pomocą wzorów (4)–(7).

W celu realizacji algorytmu ewolucyjnego utworzona została populacja składająca się ze 100 osobników. Osobniki wchodzące w skład populacji podlegały sukcesywnie genetycznym operacjom mutacji i selekcji.

Realizacja genetycznej operacji mutacji polegała na tym, że najpierw losowany był osobnik, a następnie losowana była jego pozycja genu. Wylosowany w ten sposób gen podlegał mutacji, co polegało na tym, że do jego wartości z równym prawdopodobieństwem była dodawana lub była odejmowana pewna niewielka wartość dodatnia. Ponieważ dwa pierwsze geny osobników służyły do zakodowania wartości mocy czynnych wyrażonych w megawatach, dlatego też przyjęto wartość modyfikacji poszczególnych genów jako równą 0,1 MW.

Z kolei w przypadku dwóch pozostałych genów, kodujących wartości współczynników decydujących o sposobie podziału przesyłanej mocy pomiędzy dwie alternatywne linie elektroenergetyczne wysokich napięć, jako krok modyfikacji ich wartości przyjęto wartość równą 0,001.

Dodatkowo po przeprowadzeniu operacji mutacji każdorazowo sprawdzano, czy zakodowana przy użyciu zmutowanego genu moc bloku energetycznego mieści się w dopuszczalnych granicach wyznaczonych poziomami jego mocy minimalnej i maksymalnej. Podobnie w przypadku dokonania mutacji genów kodujących wartości współczynników decydujących o wartości mocy czynnych przesyłanych za pośrednictwem poszczególnych elektroenergetycznych linii wysokich napięć każdorazowo sprawdzano, czy uzyskane wartości mocy czynnych nie przekraczają wartości wynikających z dopuszczalnego poziomu obciążalności termicznej elektroenergetycznych linii przesyłowych.

W przypadku gdy po wykonaniu mutacji danego genu okazywało się, że uzyskana w ten sposób wartość mocy czynnej wychodzi poza dopuszczalny zakres, wówczas taka operacja mutacji była anulowana, a danemu genowi przywracana była jego pierwotna wartość.

Zrealizowaną w ten sposób operację mutacji można nazwać mutacją warunkową, ponieważ jej skutki są zawieszane jedynie w przypadku spełnienia określonych warunków. Dzięki przyjęciu takiego rozwiązania zyskujemy pewność, że kodowane za pomocą materiału genetycznego osobników wartości mocy czynnych generowanych przez oba bloki elektroenergetyczne oraz wartości mocy czynnych przesyłanych za pośrednictwem poszczególnych linii wysokich napięć zawsze będą mieściły się w dopuszczalnym zakresie.

Kolejną operacją genetyczną, która została zastosowana, była operacja selekcji. Operacja ta została zrealizowana jako tzw. selekcja turniejowa, co polegało na tym, że najpierw osobniki były łączone w sposób losowy w pary, a następnie w ramach każdej takiej pary realizowano turniej.

Realizacja turnieju polegała na porównaniu ze sobą rozwiązań obu osobników, i wygrywał ten, którego rozwiązanie potrafiło zdominować rozwiązanie reprezentowane przez materiał genetyczny pozostałego osobnika.

W przypadku gdy rozwiązanie reprezentowane przez żadnego z dwóch stających do turnieju osobników nie było w stanie zdominować rozwiązania reprezentowanego przez materiał genetyczny pozostałego osobnika, wówczas za zwycięskiego osobnika uznawany był osobnik losowo wybrany spośród dwóch stających do turnieju osobników.

Osobnik, który zwyciężył w turnieju zawsze wprowadzał do ewoluującej populacji jedną swoją kopię, natomiast osobnik, który turniej przegrał, był usuwany z populacji. Tego rodzaju podejście zapewnia utrzymanie liczebności populacji na stałym poziomie.

Wymienione operacje genetyczne mutacji i selekcji wykonywane były dla 100 tysięcy pokoleń. Po upływie wymienionej liczby pokoleń rozwiązania reprezentowane przez każdego z osobników należących do końcowego pokolenia były kolejno porównywane ze sobą w celu znalezienia rozwiązania, które było w stanie zdominować rozwiązania reprezentowane przez wszystkie pozostałe osobniki. W przypadku gdy rozwiązania niezdominowane przeważały liczebnie, wszystkie te rozwiązania były przyjmowane jako rozwiązania końcowe rozważanego problemu optymalizacji wielokryterialnej. Rozwiązania takie stanowią zbiór rozwiązań Pareto optymalnych.

Na pytanie, które z uzyskanych w ten sposób rozwiązań jest lepsze, nie można jednoznacznie odpowiedzieć, ponieważ rozwiązania należące do zbioru rozwiązań Pareto optymalnych stanowią kompromisy pomiędzy poszczególnymi kryteriami branymi pod uwagę podczas poszukiwania rozwiązań danego zagadnienia optymalizacji wielokryterialnej.

## 5. Podsumowanie

Przeprowadzone przez autora symulacje komputerowe wykazały, że algorytmy ewolucyjne mogą być postrzegane jako skuteczna technika obliczeniowa, która może zostać z powodzeniem zastosowana w celu przeprowadzenia optymalizacji sposobu pracy urządzeń wchodzących w skład systemu elektroenergetycznego.

Zastosowany algorytm ewolucyjny odznaczał się dobrą zbieżnością, a podczas jego realizacji obserwowano systematyczny spadek wartości funkcji celu  $f_1$ ,  $f_2$  i  $f_3$ , przy czym funkcja celu  $f_3$  będąca miernikiem stopnia zbilansowania systemu elektroenergetycznego malała szybko do wartości bliskich zeru, co świadczy o bardzo dobrym zbilansowaniu mocy w analizowanym systemie elektroenergetycznym.

W artykule zagadnienie optymalizacji sposobu pracy urządzeń wchodzących w skład systemów elektroenergetycznych zostało zilustrowane na pewnym hipotetycznym przykładzie, w przypadku którego analizowany system elektroenergetyczny charakteryzował się celowo bardzo prostą strukturą. Jednak przez analogię można domniemywać, że technika obliczeniowa oparta na zastosowaniu algorytmów ewolucyjnych okaże się również skuteczna w przypadku podejmowania prób optymalizacji sposobu pracy systemów elektroenergetycznych o znacznie bardziej

złożonej strukturze, odpowiadającym rozwiązaniom technicznym spotykanym w praktyce.

Dalsze prace autora prowadzone w rozważanym obszarze optymalizacji sposobu pracy systemów elektroenergetycznych zmierzały będą do rozwiązania zagadnienia optymalizacji całych harmonogramów produkcji energii elektrycznej w systemach elektroenergetycznych. Tego rodzaju harmonogramy sporządzane są dla okresu jednej doby lub jednego tygodnia, co odzwierciedla długość podstawowych cykli charakterystycznych dla sposobu pracy systemów elektroenergetycznych, wynikającego ze zróżnicowanego w czasie poziomu zapotrzebowania na energię elektryczną.

W przypadku dokonywania prób przeprowadzenia tego rodzaju optymalizacji dodatkowo uwzględniony musi być fakt występowania w systemach elektroenergetycznych magazynów energii występujących zwykle w postaci elektrowni szczytowo-pompowych lub elektrowni gazowych, w przypadku których energia elektryczna magazynowana jest w postaci sprężonego gazu tłoczonego do podziemnych zbiorników.

W związku z powyższym celem optymalizacji harmonogramów sposobu wytwarzania energii elektrycznej będzie również wyznaczenie okresów pracy pompowej i generatorowej dla elektrowni szczytowo-pompowych oraz określenie wartości mocy generowanych lub pobieranych przez tego typu urządzenia.

## Bibliografia

1. Laudyn D., Pawlik M., Strzelczyk F., *Elektrownie*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
2. Kremens Z., Sobierajski M., *Analiza systemów elektroenergetycznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1995.
3. Kujaszczyk S., Brociek S., Flisowski Z., Gryko J., Nazarko J., Zdun Z., *Elektroenergetyczne układy przesyłowe*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997.
4. Goldberg D. E., *Algorytmy genetyczne i ich zastosowania*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996.
5. Arabas J., *Wykłady z algorytmów ewolucyjnych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004.
6. Kennedy J., Eberhart R., *Particle swarm optimization*, [w:] Proceedings of the IEEE Conference on Neural Networks, 1995, 1942–1948.
7. Elhossini A., Areibi S., Dony R., *Strength Pareto particle swarm optimization and hybrid EA-PSO for multi-objective optimization*, „Evolutionary Computation”, vol. 18, 2010, 127–156.
8. Michalewicz Z., *Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003.
9. Gajer M., *Accelerating the rate of evolutionary processes with the use of constant learning*, „Electrical Review”, vol. 87, no. 1, 2011, 204–209.
10. Gajer M., *Implementation of evolutionary algorithms in the discipline of Artificial Chemistry*, „Electrical Review”, vol. 87, no. 4, 2011, 198–202.

11. Gajer M., *The implementation of the evolutionary computations in the domain of electrical circuits theory*, „Electrical Review”, vol. 87, no. 6, 2011, 150–153.
12. Gajer M., *Visualization of particle swarm dynamics with the use of Virtual Reality Modeling Language*, „Electrical Review”, vol. 87, no. 11, 2011, 20–24.
13. Gajer M., *The analysis of impact of learning on the rate of evolution in the case of a multimodal fitness function*, „Electrical Review”, vol. 86, no. 2, 2010, 24–29.
14. Gajer M., *The implementation of the evolutionary algorithm for the analysis of nonlinear electrical circuits*, „Electrical Review”, vol. 86, no. 7, 2010, 342–345.
15. Gajer M., *The optimization of power flow in high-voltage transmission lines with the use of the evolutionary algorithm*, „Electrical Review”, vol. 86, no. 8, 2010, 239–244.
16. Gajer M., *The optimization of load distribution with the use of the evolutionary algorithm*, „Electrical Review”, vol. 86, no. 11a, 2010, 265–270.
17. Gajer M., *Task scheduling in real-time computer systems with the use of an evolutionary computations technique*, „Electrical Review”, vol. 86, no. 10, 2010, 293–298.
18. Gajer M., *Determining the working points of bipolar transistors with the use of the evolutionary strategy*, „Electrical Review”, vol. 87, no. 12a, 2011, 124–128.
19. Gajer M., *Reduction of thermal transmission losses with the implementation of a genetic algorithm*, „Electrical Review”, vol. 88, no. 3a, 2012, 129–130.
20. Marecki J., *Podstawy przemian energetycznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
21. Mouret J. B., Doncieux S., *Encouraging behavioral diversity in evolutionary robotics: An empirical study*, „Evolutionary Computations”, vol. 20, 2012, 91–133.

## Optimization of electrical energetic systems with the use of evolutionary computations

**Abstract:** The topic of the paper is about the optimization of the mode of work of electrical energetic systems. This kind of optimization is considered as multi-objective optimization. The main criteria that are taken under account are the amount of fuel burnt in energetic blocks in the time unit and total thermal losses in power transmission lines. In the paper in order to solve such multi-objective optimization problem the computational technique base on the use of evolutionary algorithms was implemented.

**Keywords:** electrical energetic systems, multi-objective optimization, evolutionary computations

---

### Dr inż. Mirosław Gajer

Zatrudniony na stanowisku adiunkta w Katedrze Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Swoje zainteresowania naukowe łączy z obszarem badawczym sztucznej inteligencji i lingwistyki komputerowej, koncentrując się w szczególności na zagadnieniach związanych z zastosowaniem obliczeń ewolucyjnych na potrzeby optymalizacji wybranych systemów technicznych.

e-mail: [mirek.gajer@gmail.com](mailto:mirek.gajer@gmail.com)

---

