

Andrzej TOMCZEWSKI*

EFEKTYWNOŚĆ MODYFIKACJI ALGORYTMU GENETYCZNEGO W OPTYMALIZACJI ZŁOŻONYCH SYSTEMÓW OŚWIETLENIA ELEKTRYCZNEGO

W artykule podjęto tematykę modyfikacji metaheurystyki algorytmu genetycznego wykorzystanego do optymalizacji złożonego systemu oświetlenia wnętrz. Podano charakterystykę zadania, zastosowane kryterium oceny jakości rozwiązań oraz złożoność zagadnienia rzutującą na przebieg procesu optymalizacji. Przedstawiono modyfikacje związane bezpośrednio ze strukturą realizowanego zadania. Wykonano obliczenia optymalizacyjne dla obiektu testowego wykazujące wzrost efektywności metody w stosunku do algorytmu odniesienia.

1. WPROWADZENIE

Zagadnienia optymalizacji mogą być rozwiązywane z zastosowaniem metod deterministycznych, stochastycznych oraz hybrydowych. Dla licznej grupy zadań optymalizacji układów elektrycznych klasyczne ich postaci nie zawsze pozwalają uzyskiwać poprawne rozwiązania. Wynika to przede wszystkim ze złożonych struktur analizowanych układów oraz dużej liczby stawianych im wymagań. W strukturze zadania jest to odzwierciedlone poprzez wzrost liczby zmiennych decyzyjnych, często o niejednorodnym charakterze, rozbudowę ograniczeń, rozszerzenie wielkości obszaru rozwiązań dopuszczalnych X oraz niejawne występowanie zmiennych w wielomodalnej funkcji kryterialnej. Uwzględniając, że dla zadań inżynierskich wystarczające są często rozwiązania przybliżone, za celowe uznaje się stosowanie w takich przypadkach metod optymalizacyjnych, które w akceptowalnym dla użytkownika czasie pozwalają wyznaczyć rozwiązanie z zadowalającą dokładnością. Kryteria te spełnia grupa metod heurystycznych [4].

Szczególnie efektywnymi metodami należącymi do wymienionej grupy są metaheurystyki populacyjne, w których jednoczesnemu przetwarzaniu podlega zbiór rozwiązań. Proces prowadzony jest z zastosowaniem elementów stochastycznych, co przy zdeterminowanej strukturze algorytmu pozwala rozwiązywać zadania wielomodalne, o dużej liczbie zróżnicowanych typów zmiennych decyzyjnych.

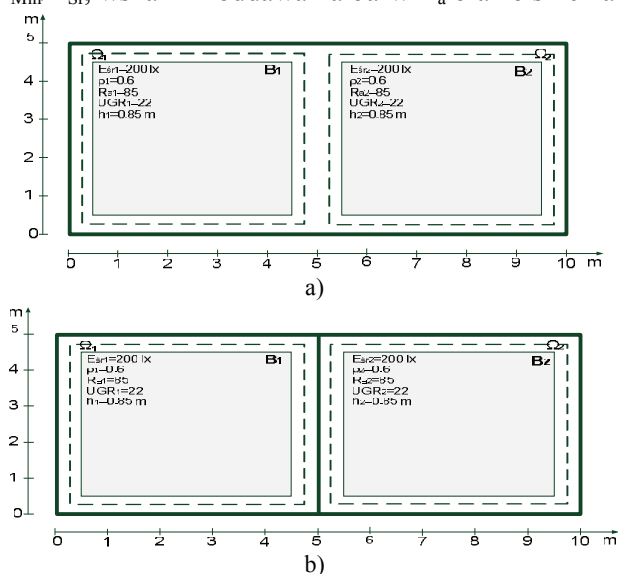
* Politechnika Poznańska.

W referacie podjęto problematykę zastosowania metaheurystyki populacyjnej algorytmu genetycznego do optymalizacji systemu oświetlenia elektrycznego wewnątrz. Złożoność wymienionego zadania jest na tyle wysoka, że jego efektywna realizacja wymaga opracowania i implementacji modyfikacji wybranych elementów metody w stosunku do jej postaci klasycznej (tzw. algorytm prosty).

2. CHARAKTERYSTYKA ZADANIA OPTIMALIZACJI SYSTEMU OŚWIETLENIA WNĘTRZ

2.1. Opis badanego systemu

Obiektem podlegającym optymalizacji jest złożony system oświetlenia elektrycznego umieszczony w obiekcie wewnętrznym o wymiarach 10x5m i wysokości 5m. Analizie podlegają dwie struktury wewnętrzne obiektu różniące się występowaniem, w środkowej części, przegrody budowlanej o wysokości równej wysokości budynku. Przegroda stanowi przeszkodę dla promieniowania widzialnego i wprowadza zróżnicowane warunki rozchodzenia się strumienia świetlnego Φ zarówno w zakresie składowej bezpośredniej Φ' jak i pośredniej Φ'' . Przyjęta struktura systemu zakłada dwa obszary rozmieszczenia opraw (Ω_1 i Ω_2) oraz dwa pola obliczeniowe (B_1 i B_2), na których kontroli, na zgodność z wartościami podanymi w zaleceniach normatywnych, podlegają wybrane parametry fotometryczne: średnie natężenie oświetlenia E_{sr} , równomierność natężenia $\rho = E_{Min}/E_{sr}$, wskaźnik oddawania barw R_a oraz oślnienia UGR.



Rys. 1. Rzut poziomy oraz struktura podlegającego analizie obiektu wewnętrznego : a) bez przegrody budowlanej (przykład A), b) z przegrodą budowlaną (przykład B)

Podobszary rozmieszczenia opraw są strukturami przestrzennymi (prostopadłościowymi), w których rozmieszczane są źródła promieniowania z zastosowaniem metody blokowej (metoda s-s/2 we wskazanym fragmencie podobszaru). Na rysunku 1 przedstawiono rzut poziomy obiektu, wymiary geometryczne, położenie przegrody budowlanej (rysunek 1b), podobszary rozmieszczenia opraw (linie przerywane) oraz pola obliczeniowe (prostokąty w kolorze szarym), a także wartości wymaganych w obszarach pracy wzrokowej parametrów fotometrycznych.

2.2. Funkcja celu, zmienne decyzyjne, ograniczenia, wybór metody optymalizacji

Jednym z ważnych aspektów oceny jakości układów technicznych są parametry ekonomiczne. Wiąże się to zarówno z działaniami producentów (obniżenie kosztów produkcji) jak i żądaniami użytkowników (niska cena zakupu oraz eksploatacji). Do porównywania ekonomicznych aspektów budowy oraz funkcjonowania układów pobierających z sieci elektroenergetycznej energię elektryczną np. systemów oświetleniowych stosowane mogą być różne wskaźniki ekonomiczno - techniczne [2]. Jednym z często wykorzystywanych jest średnioroczny koszt jednostkowy, który sprowadza poniesione w okresie inwestycji (okresy przeszłe) i eksploatacji (okresy przyszłe) koszty całkowite systemu do okresu jednego roku. Realizacja tak zdefiniowanego wskaźnika wymaga zastosowania czynnika wycofania kapitału z rynku r i dyskontującego $a_t=(1+p)^{-t}$. Pierwszy z nich stosowany jest do ustalenia wartości nakładów rocznych (uwzględnianych na końcu każdego roku) w stosunku do zainwestowanej jednorazowo wartości początkowej, przy znanym poziomie stopy p oprocentowania kredytów oraz czasie eksploatacji systemu T . Drugi natomiast pozwala uwzględnić rozciągnięcie kosztów eksploatacji (w tym energii elektrycznej) na okres T lat z uwzględnieniem stopy p oprocentowania kredytów. W przypadku zakończenia inwestycji w okresie jednego roku średnioroczny koszt jednostkowy układu k_j definiowany jest jako [3]:

$$k_j = rK_i^{(0)} + \frac{\sum_{t=1}^T K_e^{(t)} (1+p)^{-t}}{T} \quad (1)$$

gdzie: p – stopa dyskontowa równa oprocentowaniu kredytów, t – indeks roku eksploatacji, $K_i^{(0)}$ – składowa kosztów inwestycyjnych ponoszonych w tzw. „roku zerowym”, $K_e^{(t)}$ – składowa kosztów eksploatacyjnych ponoszonych w roku t , T – okres eksploatacji systemu oświetleniowego.

Do oceny jakości rozwiązania zadania optymalizacji systemu oświetlenia elektrycznego obiektu z rysunku 1 wykorzystano podaną zależnością (1) funkcję celu $J(\mathbf{x})$ o charakterze ekonomicznym, gdzie \mathbf{x} jest wektorem zmiennych

decyzyjnych. Charakterystyczną cechą zadania jest brak bezpośredniego występowania składowych wektora \mathbf{x} w przyjętej funkcji celu. Do zmiennych definiowanych w jednym podobszarze rozmieszczenia opraw należą: typ rozmieszczanych opraw (łącznie z odbłyśnikiem, układem zapłonowym i źródłem), wysokość montażu, ustawienia katowe opraw oraz parametry geometryczne rozmieszczenia blokowego (w tym sumaryczna liczba opraw). Dla każdego z wydzielonych podobszarów definiowanych jest 9 zmiennych, co dla K podobszarów daje sumarycznie $4 \cdot K$ zmiennych decyzyjnych. Dla obiektów o szczególnie złożonej strukturalnie i geometrycznie budowie liczba zmiennych decyzyjnych jest wysoka osiągając często wartość kilkudziesięciu.

Zdefiniowany dla rozpatrywanego typu układów elektrycznych wskaźnik jakości rozwiązania (1) zastosowany jako funkcja celu $J(\mathbf{x})$ nie uwzględnia zbioru ograniczeń obejmujących kontrolę parametrów strukturalnych (związanych z wektorem zmiennych decyzyjnych \mathbf{x}), funkcjonalnych (kontrola parametrów fotometrycznych) oraz innych (często nietechnicznych) warunków konstrukcji systemu oświetlenia (np. estetyka opraw oraz ich rozmieszczenia). Uwzględniane w algorytmie ograniczenia obejmują kontrolę: wysokości montażu opraw, typ oprawy i źródła dostosowane do rodzaju obiektu oraz wymagań normatywnych, a także wartości parametrów fotometrycznych na płaszczyznach pracy wzrokowej. Przy tak przyjętej strukturze zadania i zastosowaniu metody dynamicznej funkcji kary [4] zmodyfikowana funkcja celu $J_z(\mathbf{x})$ przyjmuje postać:

$$J_z(\mathbf{x}) = J(\mathbf{x}) + \lambda^k \sum_{i=1}^M \max(0, g_i(\mathbf{x}))^2 \quad (2)$$

gdzie $g_i(\mathbf{x})$ są funkcjami ograniczeń nierównościowych ($i = 1, 2, \dots, M$), λ jest bezwymiarowym współczynnikiem kary, natomiast k jest numerem iteracji.

Celem unormowania przestrzeni ograniczeń wykorzystuje się przekształcenia prowadzące do ich bezwymiarowej postaci [5].

Realizacja scharakteryzowanego powyżej zadania optymalizacji wymaga, dla każdego rozwiązania, prowadzenia analizy pola świetlnego. W obiektach wewnętrznych jest to równoznaczne z uwzględnieniem zjawiska wielokrotnych odbić, co istotnie wydłuża proces obliczeniowy. W związku z tym w wielu przypadkach koniecznym staje się stosowanie metod zrównoleglenia obliczeń [1].

Uwzględniając wszystkie wymienione aspekty rozpatrywanego zadania optymalizacji, a szczególnie dużą liczbę zróżnicowanych typów zmiennych decyzyjnych, wielomodalność funkcji celu oraz wielkość obszaru rozwiązań X do praktycznej jego realizacji zastosowano metodę heurystyki populacyjnej algorytmu genetycznego. W związku z tym, że prosty algorytm genetyczny nie gwarantuje odpowiednio wysokiej efektywności w przypadku złożonych zagadnień technicznych [6] zastosowano jego formę zmodyfikowaną. Zmianom w stosunku do algorytmu odniesienia podlegają: elementy strategii elitarniej oraz postać operatora krzyżowania. Szczegóły dotyczące wymienionych modyfikacji przedstawiono w punkcie 3.1 referatu.

3. MODYFIKACJE ALGORYTMU MINIMALIZACJI KOSZTU ŚREDNIOROCZNEGO SYSTEMU OŚWIETLENIA ELEKTRYCZNEGO WNEŹTRZ

3.1. Modyfikacje algorytmu

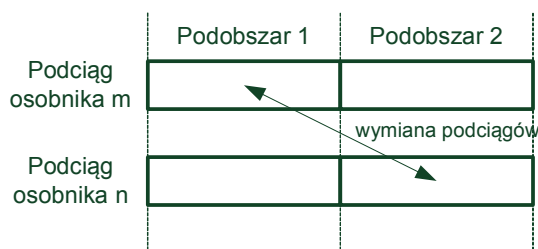
Wysoką skuteczność algorytmu genetycznego można uzyskać poprzez modyfikację jego składowych uwzględniając specyficzne cechy realizowanego zadania. W przypadku procesu minimalizacji zmodyfikowanej funkcji celu $J_2(\mathbf{x})$ postaci (2) dla opisanego w punkcie 2 systemu oświetlenia obiektu wewnętrznego, wprowadzono dwie istotne modyfikacje:

- dynamiczna strategia elitarna: liczba najlepszych osobników przenoszonych do następnego pokolenia według reguły strategii elitarniej jest zmieniana dynamicznie w funkcji parametrów statystycznych pokoleń,
- krzyżowanie po podobszarach: część osobników podlega nowemu rodzajowi operatora krzyżowania związanego ze strukturą fizyczną i funkcjonalną systemu oświetlenia wewnątrz.

W przypadku pierwszej modyfikacji przyjęto, że istotne informacje o zmianach struktury populacji w kolejnych pokoleniach przenosi przyrost wskaźnika zmienności funkcji przystosowania $\Delta V = V_k - V_{k-1}$ (gdzie k , $k-1$ są indeksami pokoleń). Przyjęto, że w początkowej fazie procesu iteracyjnego, zgodnie z zasadą strategii elitarniej, przenoszony jest jeden osobnik. Następnie liczba ta liniowo wzrasta do wartości maksymalnej N_{MAX} , po czym w środkowej części algorytmu (pokolenia między 30%, a 70% liczby pokoleń) zmienia się w funkcji przyrostu wskaźnika zmienności ΔV funkcji przystosowania. Ujemne wartości przyrostu ΔV informują o zmniejszeniu rozproszenia, co w algorytmie skutkuje zmniejszeniem o jeden liczby osobników przenoszonych. Przyrost dodatni prowadzi natomiast do zwiększenia o jeden liczby osobników przenoszonych. Ograniczeniami w zakresie dolnym jest jeden osobnik, górnym natomiast przyjęta N_{MAX} liczba osobników. Dla dalszych pokoleń liczba osobników zmniejsza się liniowo do wartości 1 i utrzymuje na tym poziomie do końca procesu iteracyjnego.

Nowy rodzaj krzyżowania polega na wymianie fragmentów ciągów kodowych osobników, które obejmują zmienne decyzyjne definiowane dla jednego podobszaru rozmieszczenia opraw. Metoda wykorzystuje zatem charakterystyczne dla obiektów wewnętrznych wydzielenie K podobszarów rozmieszczenia opraw, w których powtarzają się liczba, typ i długość ciągów kodowych zmiennych decyzyjnych. Losowemu wyborowi podlegają osobniki oraz numery kolejnych podciągów kodowych podlegających wymianie. Ustalono, że liczba osobników podlegających nowej metodzie krzyżowania wynosi maksymalnie 2% liczebności pokolenia i umniejsza liczbę osobników podlegających standardowemu (czteropunktowemu) krzyżowaniu. Warunkiem jej realizacji jest proces

stochastyczny identyczny do stosowanego w przypadku klasycznej metody krzyżowania. Na rysunku 2 przedstawiono ogólną ideę nowego rodzaju krzyżowania dla dwóch osobników (indeksy m i n) w przypadku systemu oświetleniowego o dwóch wydzielonych podobszarach rozmieszczenia opraw.



Rys. 2. Ogólna idea nowego rodzaju operatora krzyżowania osobników o indeksach m i n

Dodatkowo w stosunku do algorytmu prostego zastosowano: selekcję metodą wyboru losowego według reszt, liniowe skalowanie funkcji przystosowania oraz metodę kary dynamicznej.

3.2. Badania porównawcze z algorytmem odniesienia

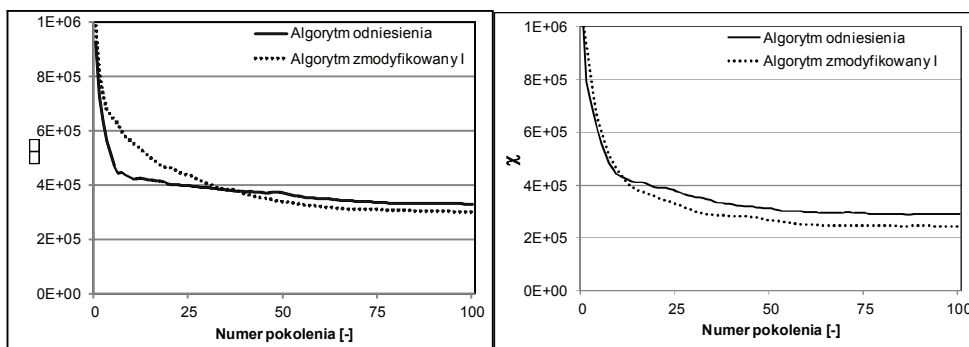
Badania opracowanych modyfikacji obejmują porównanie ich wpływu na wyniki optymalizacji przykładowego systemu oświetlenia elektrycznego (punkt 2.1 referatu) w stosunku do algorytmu odniesienia. Algorytm odniesienia obejmuje: selekcję metodą wyboru losowego wg reszt, krzyżowanie dwupunktowe, strategię elitarną z przenoszeniem jednego osobnika, funkcję kary dynamicznej (metoda Powella - Skolnica, ze zmianami Michalewicza) [4] oraz liniowe skalowanie funkcji przystosowania. Porównanie obejmuje trzy algorytmy zmodyfikowane:

- uwzględnienie dynamicznej struktury strategii elitarniej (modyfikacja I),
- uwzględnienie nowego operatora krzyżowania (modyfikacja II),
- uwzględnienie obu modyfikacji: dynamicznej struktury strategii elitarniej i nowego operatora krzyżowania (modyfikacja III - pełna).

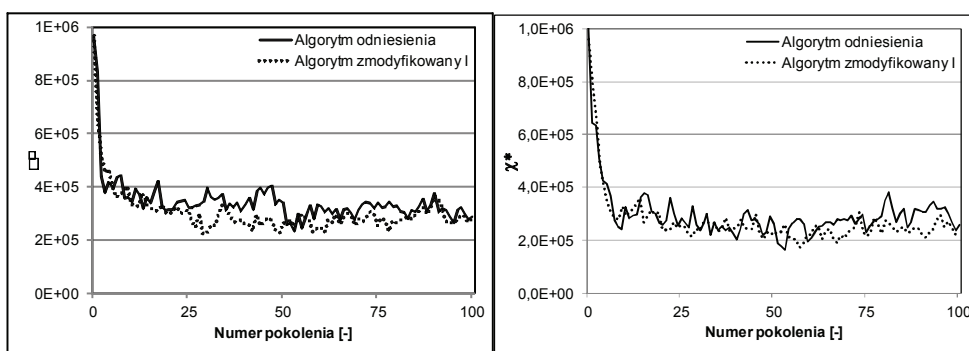
Do porównania wyników wykorzystano dwa parametry algorytmu: efektywność on-line χ oraz off-line χ^* z 5 uruchomień dla dwóch konfiguracji obiektu wewnętrznego (rysunek 1a i 1b).

Dla wszystkich obliczeń przyjęto stałe parametry wejściowe algorytmu o następujących wartościach: binarne kodowanie wektora zmiennych decyzyjnych x w postaci blokowego zapisu pozycyjnego ze standaryzacją parametrów, liczba bitów na zmienną 10, liczba osobników $O = 100$, liczba pokoleń $P = 100$, prawdopodobieństwo krzyżowania $p_k = 0.7$, prawdopodobieństwo mutacji $p_m = 0.05$.

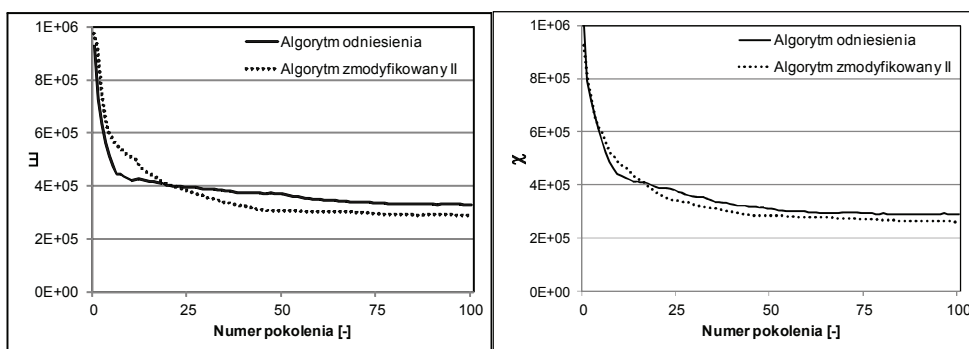
Na rysunkach od 3 do 8 przedstawiono porównanie efektywności on - line i off - line algorytmu odniesienia (linia ciągła) i trzech algorytmów zmodyfikowanych dla przykładów obliczeniowych A i B.



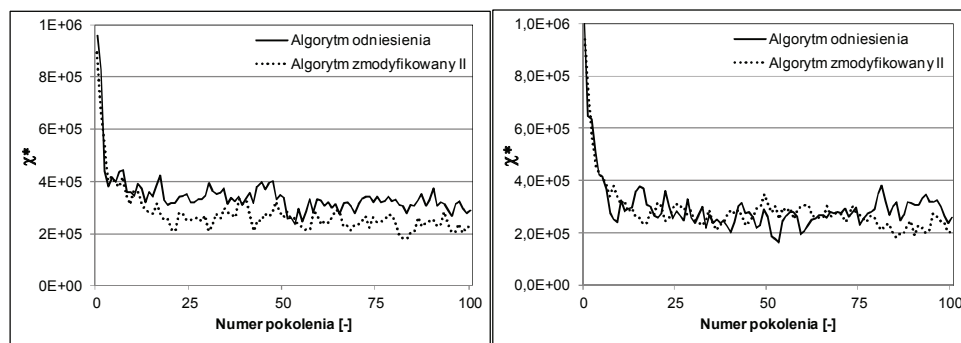
Rys. 3. Porównanie efektywności on - line algorytmu odniesienia i zmodyfikowanego I dla: a) przykładu obliczeniowego A, b) przykładu obliczeniowego B



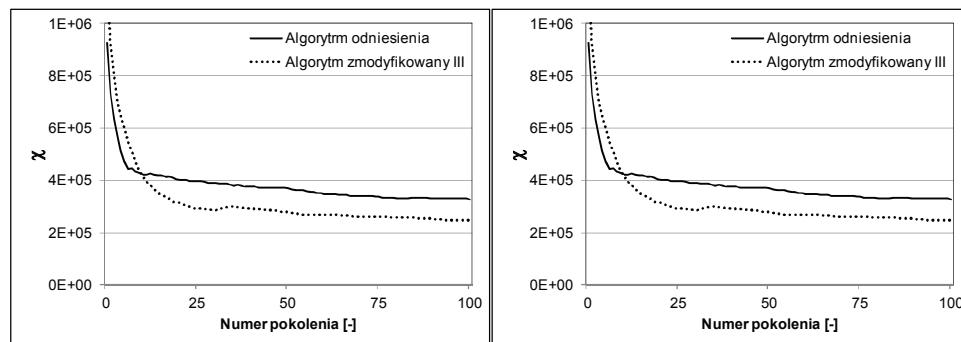
Rys. 4. Porównanie efektywności off - line algorytmu odniesienia i zmodyfikowanego I dla: a) przykładu obliczeniowego A, b) przykładu obliczeniowego B



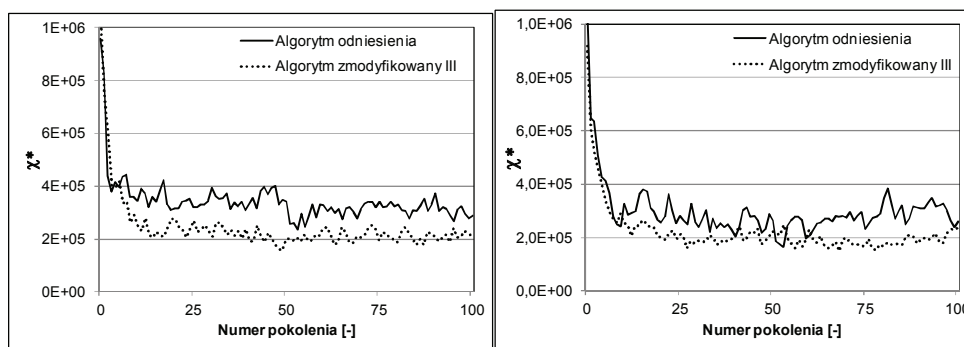
Rys. 5. Porównanie efektywności on - line algorytmu odniesienia i zmodyfikowanego II dla: a) przykładu obliczeniowego A, b) przykładu obliczeniowego B



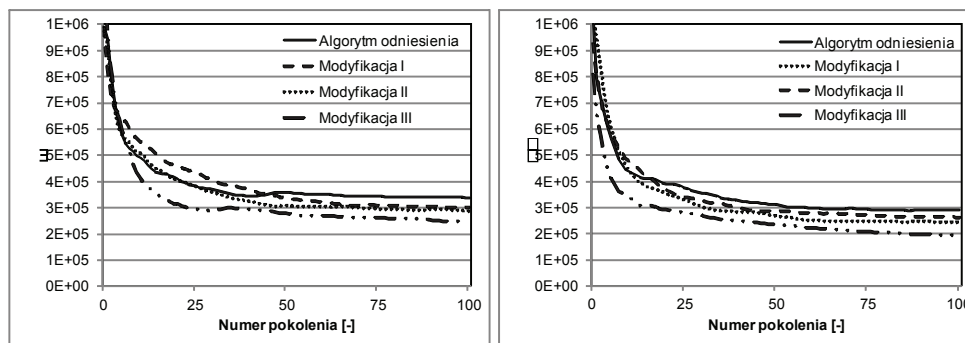
Rys. 6. Porównanie efektywności off - line algorytmu odniesienia i zmodyfikowanego II dla:
a) przykładu obliczeniowego A, b) przykładu obliczeniowego B



Rys. 7. Porównanie efektywności on - line algorytmu odniesienia i zmodyfikowanego III dla:
a) przykładu obliczeniowego A, b) przykładu obliczeniowego B



Rys. 8. Porównanie efektywności off - line algorytmu odniesienia i zmodyfikowanego III dla:
a) przykładu obliczeniowego A, b) przykładu obliczeniowego B



Rys. 9. Porównanie efektywności on - line wszystkich typów modyfikacji (I, II i III) z algorytmem odniesienia dla: a) przykładu obliczeniowego A, b) przykładu obliczeniowego B

4. WNIOSKI

Przy obecnym poziomie skomplikowania układów technicznych procesy optymalizacji wymagają często stosowania metod heurystycznych. W przypadku systemu oświetlenia elektrycznego wnętrza wynika to ze złożoności układu oraz rozbudowanej struktury wektora zmiennych decyzyjnych oraz zbioru ograniczeń strukturalnych i funkcjonalnych. Celem efektywnego rozwiązania przykładowego zadania zastosowano metodę algorytmu genetycznego. Jego skuteczność musi jednak zostać dodatkowo podniesiona poprzez wprowadzenie modyfikacji.

W przypadku minimalizacji kosztu średniorocznego złożonych systemów oświetlenia elektrycznego wnętrza ustalono taką strukturę ciągu kodowego wektora zmiennych decyzyjnych x , w której powtarzany jest sekwencyjnie zbiór zmiennych związanych z pojedynczym podobszarem rozmieszczenia opraw. Dostosowując zmiany algorytmu do charakterystyki obiektu i zadania zaproponowano nowy typ operatora krzyżowania polegający na wymianie podciągów odpowiadających wydzielonym fizycznie podobszaram rozmieszczenia opraw. Dodatkowo zaproponowano dynamiczną zmianę liczby osobników przenoszonych do kolejnego pokolenia w ramach strategii elitarniej, która poprzez powiązanie z parametrami statystycznymi populacji pozwala regulować poziom zróżnicowania pokolenia. Zastosowano zatem modyfikacje, które wykorzystują specyficzną dla zadania strukturę fizyczną układu oraz jej model informatyczny.

Wprowadzone modyfikacje pozwoliły osiągnąć w zakresie efektywności on - line oraz off - line (10 uruchomień) poprawę właściwości algorytmu w stosunku do algorytmu odniesienia. Należy zwrócić uwagę, że zastosowany algorytm odniesienia jest już istotnie zmieniony w stosunku do postaci prostej. W przypadku obu zaimplementowanych modyfikacji cząstkowych (I i II) obejmujących kolejno dynamiczną strategię elitarną i nowy rodzaj krzyżowania

uzyskano poprawę efektywności on - line (rysunki 3 i 5) i off - line (rysunki 4 i 6), czego efektem jest obniżenie przebiegów (linia przerywana) w stosunku do algorytmu odniesienia (linia ciągła). Najlepszą poprawę efektywności on - line i off - line uzyskano dla modyfikacji pełnej (III) - rysunki 7 i 8. Porównanie wszystkich metod modyfikacji w zakresie efektywności on - line (rysunek 9) wskazuje, że nie można w jednoznaczny sposób określić, że efekty uzyskiwane przez modyfikacje I i II sumują się w sposób prosty w przypadku jednoczesnego ich uwzględniania w uruchamianym algorytmie. Zależnie od typu obiektu oraz składu osobniczego pokolenia początkowego zachowanie to jest zróżnicowane w funkcji numeru pokolenia. Można zdefiniować jednak jednoznaczny wniosek, że modyfikacja pełna (III) daje w przypadku badanego obiektu najwyższy przyrost efektywności algorytmu.

LITERATURA

- [1] Bednarek K., Kasprzyk L., Tomczewski A., Rozproszenie obliczeń elektromagnetycznych i optymalizacyjnych układów elektrycznych z zastosowaniem procesorów wielordzeniowych, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 2011, Nr 11b, ss. 82 – 85.
- [2] Bednarek K., Tomczewski A., Economic Aspects of Optimization of Technological Systems, *Poznań University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering*, 2010, No. 64, pp. 41 - 51.
- [3] Laudyn D., *Rachunek ekonomiczny w elektroenergetyce*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1999.
- [4] Michalewicz Z., Fogel D.B., *How to Solve It: Modern Heuristics*, Springer-Verlag, New York, 2000.
- [5] Szelaż W., *Analiza stanów pracy i synteza silników synchronicznych magnetoelektrycznych. Ujęcie polowe*, Rozprawy 331, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1998.
- [6] Tomczewski A., Optymalizacja kosztów systemu oświetlenia elektrycznego wewnątrz z zastosowaniem algorytmu genetycznego, *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Elektryka*, 2006, Nr 50, s.159 – 170.

EFFICIENCY OF GENETIC ALGORITHM MODIFICATION OF OPTIMIZATION OF THE ELECTRIC LIGHT COMPLEX SYSTEMS

The article shows the metaheuristics modification of a genetic algorithm used to optimize the lighting complex system. The characteristics of the tasks and the evaluation criterion of the quality of solutions and the complexity of the issues to bear on the process of optimization was presented. Modifications connected to the structure of the task executed was shown. Optimization calculations were performed for the test object, showing an increase of the efficiency of the method compared to a reference algorithm.