

# Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Dariusza Jagodzińskiego p.t. “Metoda optymalizacji inspirowana algorytmami ewolucji różnicowej oraz CMA-ES”

## 1. Tematyka rozprawy

Przedmiotem rozprawy doktorskiej mgr inż. Dariusza Jagodzińskiego są heurystyczne, nieaproxymacyjne metody optymalizacji ciągłej, w szczególności metody pokrewne wymienionej w tytule ewolucji różnicowej (DE) oraz ewolucyjnej strategii adaptacji macierzy kowariancji (CMA-ES). Metody te wychodzą poza podstawowe podejścia ewolucyjne poprzez pozyskiwanie z próby rozwiązań oraz ich ocen dodatkowych informacji, materializowanych w postaci formalizmów które następnie wykorzystywane są do ukierunkowania przeszukiwania. W ten sposób wpisują się one w nurt metod opartych na modelu (*model-based optimization*). Obie metody są dobrze ugruntowane w obrębie metaheurystyk, które z kolei stanowią rozpoznawalny podobszar z jednej strony sztucznej inteligencji, a z drugiej badań operacyjnych. To pozwala mi stwierdzić że praca jednoznacznie wpisuje się w obszar dziedziny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja.

## 2. Ocena treści rozprawy i wkładu oryginalnego

### 2.1 Treść rozprawy

Rozprawa została przygotowana w języku polskim, składa się z 5 rozdziałów i ma objętość 85 stron bez bibliografii, a 127 stron z bibliografią i dodatkami. W Rozdziale 1 Autor zwięźle formalizuje problem optymalizacji ciągłej z ograniczeniami kosztowymi i przytacza argumenty za stosowaniem do nich algorytmów metaheurystycznych, oraz w szczególności motywacje dla hybrydyzacji metody CMA-ES z DE, wskazując na ich komplementarne cechy. To pozwala mu sformułować główny cel rozprawy, tj. zaprojektowanie algorytmu inspirowanego właściwościami CMA-ES, jednak bez polegania na kosztownych obliczeniowo operacjach macierzowych.

Rozdział 2 stanowi gruntowną prezentację metod CMA-ES i DE, z detalicznym opisem ich kluczowych kroków, istotnych parametrów, angażowanych przez nie formalizmów, oraz analizą

złożoności obliczeniowej. Rozdział przedstawia także wybrane warianty obu metod; dla CMA-ES są to warianty 'przybliżone', umotywowane (i) wysokimi nakładami obliczeniowymi, zwłaszcza dla problemów wysokowymiarowych, polegające głównie na pewnej formie uproszczenia sposobu wyznaczania macierzy kowariancji poprzez poczynienie jakiś założeń np. odnośnie możliwości jej zdekomponowania, faktoryzacji, czy narzucenia na nią pewnych ograniczeń (np. diagonalności), oraz (ii) możliwością poprawy zbieżności poprzez dynamiczny dobór wielkości populacji, restarty algorytmu i/lub adaptacyjne przełączanie się pomiędzy różnymi strategiami przeszukiwania. Dla DE są to warianty dotyczące poprawy szybkości zbieżności i zmniejszenia czułości algorytmu na ustawienia parametrów (np. przez adaptacyjne ustawianie wartości parametrów na podstawie pamięci ich skutecznych użyć).

Rozdział 3 wprowadza metody hybrydujące CMA-ES i DE, które stanowią główne przyczynki pracy, i zaczyna się od ponownego umotywowania hybrydyzacji, głównie brakiem skalowania się wydajności CMA-ES. W kolejnych rozdziałach autor wprowadza metodę CMA-DE oraz metodę różnicowej strategii ewolucyjnej (DES). W przypadku CMA-DE, autor dowodzi że macierz kowariancji populacji jest (przy mało kłopotliwych założeniach) identyczna z macierzą wyznaczaną przez metodę CMA-ES, choć koszty obliczeniowe jej wyznaczenia są jakościowo niższe. Natomiast metoda okupuje to znacznym zapotrzebowaniem na pamięć, ponieważ wyznacza ona wektory różnicowe na bazie losowo wybranych historycznych populacji, a zatem konieczne jest przechowywanie w pamięci całego 'śladu' procesu optymalizacyjnego, w tym kompletnych populacji rozwiązań kandydackich z wszystkich dotychczasowych pokoleń. Omawiana dalej metoda DES adresuje ten problem przez ograniczenie rozważanego okna historycznych pokoleń do maksymalnej liczby 'horyzontu czasowego' oraz próbkowaniu funkcji oceny w środku ciężkości populacji. W dalszej części rozdziału Autor bada empirycznie dynamikę zmian wartości własnych macierzy kowariancji w celu stwierdzenia czy modelowane przez metodę rozkłady dopasowują się adekwatnie do poziomicy funkcji celu. Wynik tych badań potwierdza zgodność algorytmu DES z CMA-ES, i w mniejszym stopniu metody CMA-DE, co przejawia się niejednostajnym stosunkiem wartości własnych (choć są one jednostajne w badanej funkcji). W dalszej części rozdziału proponowane algorytmy zostały porównane z CMA-ES na ośmiu zróżnicowanych unimodalnych problemach testowych (benchmarkach), skonstruowanych pod kątem analizy odporności algorytmów na różne charakterystyki problemów (adaptacja wielkości kroku, precyzji, etc.). Analiza ta, przeprowadzona dla instancji problemów o niskiej i wysokiej wymiarowości, wskazała na wysoką skuteczność algorytmu DES.

Rozdział 4 kontynuuje część empiryczną Rozdziału 3 na problemach jedno- i wielomodalnych znanych z konkursów optymalizacyjnych, i skupia się na metodzie DES. Przedmiotem eksperymentu są zestawy problemów CEC, BBOP i BBComp – gdzie ostatni z nich stanowi szczególne wyzwanie, ponieważ uniemożliwia wielokrotne uruchamianie algorytmów na tych samych problemach, a zatem utrudnia strojenie ich parametrów, w duchu optymalizacji czarnoskrzynkowej. Dodatkowym utrudnieniem była obecność w tych problemach ograniczeń kostkowych – Autor wybrał tutaj technikę obsługi generowanych przez metodę DES rozwiązań niedopuszczalnych poprzez przyznawanie im sztucznej wartości funkcji celu, zawyżonej w stopniu zależnym od stopnia naruszenia ograniczeń. Zadbano także o to aby populacja początkowa składała się wyłącznie z

rozwiązań dopuszczalnych. Eksperymenty dotyczyły zarówno oceny nakładów obliczeniowych jak i zbieżności algorytmów do rozwiązań o dobrej wartości funkcji celu – te ostatnie zostały zaprezentowane zbiorczo z wykorzystaniem użytecznej formy wykresów ECDF. Wykazały one znaczącą przewagę algorytmu DES nad CMA-ES na problemach wielomodalnych, w szczególności tych wysokowymiarowych, dla grupy benchmarków CEC, oraz dla problemów wysokowymiarowych w grupie BBComp (z racji zamkniętego charakteru tej kolekcji, nie jest pewne czy były to problemy jedno- czy wielomodalne, choć należy się spodziewać przewagi tych drugich). Autor omówił także skuteczność metody DES w kontekście innych metod startujących w konkursach; obserwacje te potwierdziły w znacznym stopniu wcześniej zidentyfikowane zależności.

Rozdział 5 podsumowuje rozprawę i wyznacza kierunki dalszych prac na podstawie wniosków wyciągniętych z rozważań teoretycznych i empirycznych przeprowadzonych we wcześniejszych rozdziałach, w szczególności wskazując na konieczność i możliwości poprawy właściwości eksploatacyjnych metody oraz inne zabiegi, np. dynamiczne zmiany wielkości populacji.

## 2.2 Ocena wkładu oryginalnego i prezentacji pracy

Główne oryginalne przyczynki rozprawy to w mojej ocenie:

1. Metody DES i CMA-DE, a w nich zaadresowanie ograniczeń CMA-ES relatywnie prostymi środkami.
2. Twierdzenia wskazujące na “zgodność” obu metod z charakterystyką statystyczną metody CMA-ES.
3. Wyniki eksperymentów obliczeniowych porównujących proponowane metody z innymi, przemawiające za trafnością decyzji projektowych Doktoranta.
4. Wyniki obiektywnej konfrontacji proponowanych metod w zewnętrznych konkursach o charakterze globalnym.

Badania opisane w rozprawie są dobrze umotywowane: zgodnie z twierdzeniem *No Free Lunch* dla optymalizacji Wolperta i Macready’ego, oczekiwana skuteczność wszystkich algorytmów optymalizacyjnych jest taka sama, a zatem jedyną drogą do konstruowania skuteczniejszych algorytmów jest dopasowywanie ich do pewnych podklas problemów, co można osiągnąć m.in. przez wyposażanie ich w założenia odnośnie właściwości problemu, reprezentowane np. jako modele. Punktem wyjścia dla prac jest szeroko znana i uważana za wiodącą metoda CMA-ES, tj. Autor zdecydował się mierzyć z najlepszymi.

W związku z powyższym uważam że rozprawa mgr Jagodzińskiego prezentuje interesujące i nowe wyniki, które wypracowane zostały w oparciu o dobrze przemyślany warsztat badawczy i rozpoznanie natury problemu, w tym słabości wcześniejszych metod. Wywód przeprowadzony w pracy jest klarowny i zwięzły. Wyniki empiryczne uzyskane zostały na bazie rzetelnie przeprowadzonych eksperymentów obliczeniowych, zrealizowanych na zróżnicowanych instancjach problemów. **Moja ocena rozprawy jest zatem zdecydowanie pozytywna.** Moją pozytywną opinię utwierdzają też cytowane w rozprawie i powiązane z nią prace współautorskie Doktoranta, które ukazały się w bardzo dobrych i dobrych czasopismach (*IEEE Transactions on*

*Evolutionary Computation, Swarm and Evolutionary Computation*), oraz w materiałach konferencyjnych rozpoznawalnych wydarzeń, m.in. ICONIP. Podobnie przekonujące są wysokie miejsca zajmowane przez algorytmy mgr Jagodzińskiego w międzynarodowych konkursach, tj. piąte miejsce w konkursie CEC'2017 i trzecie w konkursie BBComp.

Lektura pracy rodzi jednak też pewne **pytania** na które chętnie usłyszałbym odpowiedzi podczas obrony:

1. Odnośnie niniejszego fragmentu na s. 39: "Zerowa wartość oczekiwana wektorów różnicowych sprawia, że w kolejnych generacjach nie będzie występowało zjawisko dryfu genetycznego (zjawisko Wrighta), będącego procesem polegającym na fluktuacji częstości występowania danej cechy w populacji, która nie wynika z mutacji, ani sposobu selekcji. " Zgadzam się z tym sformułowaniem; ale czy to nie powinna być oczywistość? Tego typu obciążenie byłoby ewidentnym błędem konstrukcyjnym metody. Czy możemy wskazać przykłady znanych metod optymalizacji ciągłej które dopuszczają się takich niedociągnięć?
2. W sekcji 4.2.1 zaprezentowano wyniki dla 2 z 30 wybranych problemów ze zbioru CEC. Czy są one reprezentatywne? (chyba nie doszukałem się takiej deklaracji w tekście pracy)
3. Nieco rozczarowuje fakt że Autor nie pokusił się o statystyczną charakteryzację otrzymanych wyników, jak prezentacji choćby elementarnych miar dyspersji. Na przykład wykresy na Rys. 3.4 (ani też na żadnym kolejnym) nie ilustrują widełek przedziału ufności mimo że są efektem 50 powtórzeń uruchomień algorytmów. W tym kontekście stwierdzenie "metoda DES osiąga statystycznie najlepsze rozwiązania" na s. 76 wydaje się słabo podparte wynikami eksperymentalnymi.

Odnośnie drobnych **niedociągnięć w prezentacji** treści pracy, Autor dopuszcza się czasami skrótów myślowych które mogą być mylące. Na przykład na s. 36 pojawia się fraza "każdy punkt bazowy jest realizacją zmiennej losowej o rozkładzie jednostajnym", co nie jest tam prawdą – realizacją zmiennej losowej jest *indeks* punktu, a nie sam punkt. Z kolei na s. 37 czytamy "punkt bazowy jest ważoną sumą punktu losowego oraz najlepszego w populacji", gdzie moim zdaniem zamiast frazy "punktu losowego" powinno się użyć "losowo wybranego punktu z populacji".

Podczas lektury początkowych sekcji rozdziału 3 można odnieść wrażenie że akronim DES ma odnosić się do szerszej klasy podejść ('metoda') a akronim CMA-DE reprezentuje konkretny algorytm ('algorytm'). Niestety drugi z nich pojawia się w tekście pracy zarówno w połączeniu ze słowem 'metoda' jak i 'algorytm' (np. na początku sekcji 3.1.1), co nieco rozmywa to rozróżnienie.

Mam też drobne uwagi odnośnie **terminologii**. Na s. 42 we frazie "rośnie nakład obliczeniowy generacji," lepiej byłoby użyć "generowania", bo "generacja" może odnosić się do pokolenia w algorytmach ewolucyjnych. Na s. 43 zamiast "inwariantności rotacyjnej" ładniej byłoby użyć frazy "niezmienniczości ze względu na obrót". Ponadto, mimo pewnego zakorzenienia rozważanych w rozprawie metod w algorytmach ewolucyjnych, unikałbym metafor biologicznych tam gdzie nie są one szczególnie trafne czy pomocne. Lepiej użyć po prostu terminu "zmiennie", a nie "kod" czy "materiał genetyczny". Na przykład na s. 40 w zdaniu "Tworzony jest punkt kandydujący z(t) posiadający kod genetyczny będący kombinacją materiałów obu punktów, biorących udział w

krzyżowaniu.” termin “materiał” jest nieprecyzyjny. Optymalizacja ciągła ma dobrze ugruntowaną terminologię – rzadko kiedy warto ją “owijać” w jakieś metafory. Z drugiej strony w opisie konfiguracji DE/R/k/exp zaskoczył mnie brak wzmianki że exp to zasadniczo krzyżowanie dwupunktowe.

W pracy dopatrzyłem się pewnych niedociągnięć **redakcyjnych**. Algorytmy nie powinny być prezentowane jako ‘rysunki’. Szkoda też że nie mają nagłówków (sygnatur), co ułatwiłoby czytelnikowi zidentyfikowanie argumentów i parametrów metody. Generalnie podczas lektury odnosi się wrażenie że objaśnienia symboli/wielkości pojawiają się w tekście późno względem algorytmów; np. w opisie metody DE wyjaśnienie znaczenia symbolu F pojawia się dopiero na str. 38, po 4 stronach omawiania metody i kilkukrotnym wykorzystaniu F w formułach. W Rys./Algorytmach 3.1 i 3.2, w linii 6, indeks górny w x powinien mieć postać (t) a nie (1).

Wyposażenie wszystkich wykresów w legendy (zamiast umieszczania ich w postaci tekstowej w podpisach rysunków) wyraźnie poprawiło by ich czytelność. Nieco nieszczęśliwe jest prezentowanie przebiegów funkcji zmieniającej znak na skali logarytmicznej, bo prowadzi to do zagadkowej utraty niemonotoniczności (którą na szczęście Autor wskazał w tekście). Warto by rozwijać akronimy metod. Przyklejanie cytowań do poprzedzającego słowa nie jest raczej praktykowane, np. “metody[53]” na s 42 – to utrudnia lekturę.

Wymienione wyżej uwagi mają stanowić przydatną informację zwrotną, i nie wpływają na moją ogólnie pozytywną ocenę przedłożonej rozprawy.

### 3. Konkluzja końcowa

Rozprawa doktorska mgr inż. Dariusza Jagodzińskiego zawiera szereg oryginalnych osiągnięć i wyników, unikalnych w skali globalnej i dotyczących aktualnych tematów badawczych o znaczącym przełożeniu praktycznym. Uważam że hipotezy postawione przez Autora pracy zostały zdecydowanie potwierdzone.

Wobec powyższego stwierdzam, że **rozprawa doktorska mgr inż. Dariusza Jagodzińskiego spełnia z solidną nawiązką warunki stawiane przez ustawę o tytule naukowym i stopniach naukowych w odniesieniu do rozpraw doktorskich, a zatem powinna być dopuszczona do publicznej obrony, o co wnoszę do Rady Dyscypliny Naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej.**

Jednocześnie, biorąc pod uwagę fakt że proponowana w pracy metoda DES systematycznie prześciga renomowany algorytm CMA-ES oraz inne algorytmy optymalizacyjne na problemach o wysokiej wymiarowości, przy jednocześnie zdecydowanie niższych nakładach obliczeniowych, **wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.**

