



Politechnika  
Wroclawska

Prof. dr hab. inż. Halina Kwaśnicka  
Katedra Sztucznej Inteligencji  
Wydział Informatyki i Telekomunikacji

Politechnika Wroclawska

Wyb. Wyspiańskiego 27, 50 370 Wrocław

E-mail: halina.kwasnicka@pwr.edu.pl

18 kwietnia 2022r.

## Recenzja rozprawy doktorskiej (poprawionej)

Tytuł rozprawy: METAHEURYSTYCZNA METODA OPTIMALIZACJI PSZCZELEJ Z UŻYCIEM  
WYBRANEJ ARYTMETYKI LICZB ROZMYTYCH

Autor rozprawy: mgr inż. Dawid Ewald

Promotor: dr hab. Marcin Paprzycki

Promotor pomocniczy: dr inż. Jacek M. Czerniak

Recenzja wykonana jest na zlecenie Rady Naukowej Instytutu Badań Systemowych PAN  
w dyscyplinie *Informatyka techniczna i telekomunikacja*

### 1. Obszar problemowy pracy

Rozprawa pana mgra inż. Dawida Ewalda dotyczy dwóch obszarów – inteligencji roju oraz logiki rozmytej, których połączenie, w założeniu miało przynieść poprawę działania metaheurystyki inteligencji roju. Autor skupił się na optymalizacji pszczelej, której inspiracją są zachowania naturalnych pszczół. Dokładniej, Autor skupił się na metodzie ABC (ang. Artificial Bee Colony) opracowanej w pierwszej dekadzie obecnego wieku, uznając że jest on nadal rozwijana i stosunkowo często stosowana. Nasuwa się uwaga, że Doktorant wybrał stosunkowo starą metodę inteligencji roju. Można się jednak zgodzić z Doktorantem, że algorytm ABC bywa stosowany i rozwijany. Przykładowe prace świadczące o aktualności ABC, w tym również o próbach jego hybrydyzacji, to: (1) Weifeng Gao et al., "A global best artificial bee colony algorithm for global optimization", *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 236, Issue 11, (2012), <https://doi.org/10.1016/j.cam.2012.01.013>; (2) Kashif Hussain et al., "Artificial bee colony algorithm: A component-wise analysis using diversity measurement", *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 32, Issue 7, (2020), <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2018.09.017>; (3) Yinghao Zhao et al., "A Novel Artificial Bee Colony Algorithm for Structural Damage Detection", *Advances in Civil Engineering*, vol. 2020, (2020), <https://doi.org/10.1155/2020/3743089>.

W opinii Doktoranta, wspartej przez pierwszego opiekuna naukowego, profesora Witolda Kosińskiego, włączenie do algorytmów pszczelich liczb rozmytych, jako elementu bardziej naturalnej arytmetyki liczb, powinno poprawić działanie metaheurystyk pszczelich. Doktorant skupił się na skierowanych liczbach rozmytych, zaproponowanych przez W. Kosinskiego jako alternatywy do klasycznych liczb rozmytych. Przedwczesna śmierć prof. Kosińskiego pozbawiła Doktoranta opiekuna naukowego, ale Doktorant starał się kontynuować wizję prof. Kosińskiego pod opieką nowych opiekunów – kontynuować pracę nad podstawami teoretycznymi umożliwiającymi wykorzystanie skierowanych liczb rozmytych w opisie zachowań sztucznych pszczół. Z pewnością utrata opiekuna naukowego przyczyniła się do znacznego wydłużenia okresu realizacji doktoratu.

To właśnie włączenie liczb skierowanych w metaheurystykę stanowi nową jakość w grupie algorytmów rojowych. Aby możliwe było wykorzystanie liczb skierowanych w podejściu ABC, Doktorant musiał **opracować brakujące elementy teoretyczne dotyczące operacji na liczbach skierowanych**.

Podsumowując tę część rozprawy stwierdzam, że Autor **podjął ważny problem naukowy – opracowanie sposobu włączenia liczb skierowanych do metaheurystyki jako metody optymalizacyjnej. Zaproponował autorskie rozwiązanie – metodę nazwaną OFBBee. Metoda ta łączy skierowane liczby rozmyte (ang. Ordered Fuzzy Numbers) z optymalizacją pszczelą. Przeprowadził badania eksperymentalne**, pozwalające ocenić efekt swojej pracy. Połączenie metod wykorzystujących inteligencję roju, jaką są algorytmy pszczele, ze skierowanymi liczbami rozmytymi wydaje się godne uwagi. Jest to nowy pomysł, potencjalnie poprawiający działanie wielu metaheurystyk.

## 2. Kompozycja i zawartość pracy

Pierwsza część pracy – *Wprowadzenie teoretyczne*, składa się z czterech rozdziałów, w tym Wstępu, numerowanego jako rozdział 1. Część druga – *Nowa metoda optymalizacji i jej zastosowania*, składa się z kolejnych czterech rozdziałów. Dalej, praca zawiera bibliografię oraz cztery załączniki. Poniżej omawiam krótko zawartość poszczególnych rozdziałów, jeśli zauważam w nich elementy dyskusyjne, czy też elementy, do których mam jakieś zastrzeżenia, to je wskazuję.

We wstępie Autor rozprawy prezentuje motywację zajęcia się tematem, cel pracy i tezę. Doktorant postawił cel rozprawy jako **zastosowanie skierowanych liczb rozmytych do wybranej metody optymalizacji stadnej inspirowanej rojem pszczół w celu uzyskania nowej, lepszej metody**. Z uwagi na brak znanych, omówionych w literaturze operatorów rozmywania **w odniesieniu do liczb skierowanych, należało zaproponować potrzebne operatory**. Kolejnym, koniecznym subcelem były eksperymentalne badania zaproponowanych rozwiązań na funkcjach testowych, zarówno będących funkcjami matematycznymi, jak i problemami konstrukcyjnymi. To ostatnie ma wskazywać praktyczną użyteczność zaproponowanej metody.

Doktorant sformułował tezę doktoratu. W ogólności jestem przeciwniczką formułowania tez w doktoratach z obszaru Informatyki technicznej, zwykle są to tezy nieweryfikowalne w pełni. Postawiona w recenzowanej dysertacji teza mówi, że „[...] nowa hybrydowa metoda optymalizacji, polegająca na połączeniu inteligentnego pszczelego roju z arytmetyką skierowanych liczb rozmytych, pozwala na polepszenie rezultatów optymalizacji poprzez uniknięcie utkania rozwiązań w ekstremach lokalnych. Pozwala ona również na zwiększenie dokładności rozwiązań i zmniejszenie liczebności populacji, [...]”. Doktorant postarał się, by ta teza była możliwie weryfikowalna, wskazał warunki, kiedy teza będzie uznana za spełnioną, np.: unikanie utkania w optimach lokalnych – przynajmniej w 55% metoda ma znaleźć optimum globalne; dokładność – co najmniej w 80% przypadków wynik powinien być bliżej optimum w odniesieniu do metody referencyjnej (ABC); itd. Z uwagi na losowość, metoda była uruchamiana 30 razy dla każdej konfiguracji.

Rozdział drugi jest wprowadzeniem do algorytmów pszczelich. Po ogólnym wprowadzeniu, omówione są warianty metod pszczelich – MBO, BCO, ABC. Wprowadzenie teoretyczne jest napisane na odpowiednim stopniu ogólności. Sekcja „Zastosowania MBO” nie powinna być wydzielana jako podrozdział (2.2.1) z dwóch powodów: (i) jest jednoakapitowa, tworzenie jednoakapitowych rozdziałów nie jest zalecane, (ii) nie ma kolejnego podrozdziału nie tworzymy rozdziału, jeśli ma być tylko jeden. W takich sytuacjach wystarczy zaznaczyć śródtytuł lub nową sekcję (akapit) z odstępem od poprzedniego akapitu. Podobnie niespełna czterolinijkowy podrozdział 2.3.1. Nie jest to merytoryczna uwaga do pracy, a jedynie drobna uwaga odnośnie struktury dokumentu. Doktorant poprawił jakość prezentacji pseudokodów metod w stosunku do poprzedniej wersji dysertacji. Nadal nie jest wydzielone wyraźnie co jest wejściem do algorytmu (dane WE:) i co jest wyjściem algorytmu (WY:). Są ‘dane wejściowe’, ale nie są w żaden sposób wydzielone od samego algorytmu (inicjalizacja...). Oczywiście, można zrozumieć gdzie kończą się dane wejściowe i zaczyna działanie algorytmu, wyjście algorytmu również można znaleźć w samym algorytmie (najlepsze rozwiązanie), ale byłoby bardziej ‘elegancko’ gdyby te elementy, tzn. dane wejściowe, wyjście algorytmu i sam algorytm, były wyraźnie wydzielone.

Rozdział trzeci prezentuje elementy teorii zbiorów rozmytych. Jest to poprawnie napisany rozdział. Wprowadza on krótko w teorię zbiorów rozmytych, w szczególności odnośnie liczb rozmytych, co ułatwia zrozumienie pracy osobom nie znającym logiki rozmytej.

Rozdział czwarty poświęcony jest skierowanym liczbom rozmytym, jest ważny z punktu widzenia tematu pracy. Początek rozdziału to podstawy teoretyczne, podane są podstawowe definicje, pokazane ilustracje. Następnie Autor opisuje arytmetykę skierowanych liczb rozmytych. Pokazane przykłady znacznie ułatwiają zrozumienie podawanych definicji.

Rozdział 4.2 jest ważny z punktu widzenia wkładu naukowego Doktoranta, zawiera opis autorskich operatorów rozmywania. Autor prezentuje również przesłanki prowadzące do zaproponowanych operatorów. Zaproponowane operatory to:

*Odwrócona metoda Golden Ratio (GRf)* – operator inspirowany metodą złotego podziału, jest zdefiniowany dla liczb skierowanych pozytywnie i negatywnie, dla kształtu trójkątnego oraz trapezoidalnego.

*Operator beeT* – Autor zaprezentował *beeT* dla kształtu trapezowego, trójkąta prostokątnego oraz dowolnego trójkąta. W rzeczywistości, jest to ten sam schemat o różnych wartościach parametrów; zaproponowanie jednego schematu operatora i podanie wartości parametrów odpowiednich dla poszczególnych kształtów byłoby może bardziej przejrzyste, zwarte, ale obecna forma prezentacji, zawarta w dysertacji, jest również poprawna, nie budzi zastrzeżeń.

*Operator beeM* – zdefiniowany jest podobnie jak powyższy, dla trapezu, trójkąta prostokątnego i trójkąta dowolnego.

Autor podkreśla, że **w literaturze nie ma operatorów rozmywania czułych na skierowanie liczby rozmytej, dlatego, aby zrealizować główny cel pracy, zaproponowanie autorskich operatorów było niezbędne. Jest to oryginalny wkład Autora w obszarze skierowanych liczb rozmytych**, co potencjalnie umożliwia ich zastosowanie w innych zadaniach, nie tylko w metodach pszczelich. Szkoda, że nie znajduję żadnej publikacji Doktoranta (jako autora bądź współautora) na temat zaproponowanych operatorów, weryfikacja tych propozycji na szerszym forum naukowym byłaby cenną wskazówką do obecnej i dalszej pracy w tym obszarze.

Rozdział 4.3 omawia operatory wyostrzania skierowanych liczb rozmytych. Podobnie jak przy rozmywaniu, operatory wyostrzania muszą uwzględniać skierowanie liczby rozmytej. Tu Autor mógł skorzystać z opisanych w literaturze operatorów.

Rozdział 5. jest pierwszym rozdziałem drugiej części rozprawy. Na początku Doktorant ciekawie omówił zachowanie pszczół, będące inspiracją optymalizacji pszczelej. Dalsza część prezentuje jądro doktoratu – autorską metodę optymalizacji. Jako element nowatorski Autor słusznie wskazuje włączenie rozmywania (za pomocą opracowanych, autorskich operatorów) do wielkości charakteryzujących (i) kierunek, w którym znajduje się pokarm, (ii) kąt nawigacji wg. słońca, (iii) długość lotu, (iv) zasobność źródła pokarmu. Nadal trudno mi zrozumieć różnicę między kątem nawigacji wg słońca a kierunkiem, w którym znajduje się pokarm. Rysunek 5.6 przedstawia liczbę OFN opisującą informacje przekazane przez pszczołę – zwiadowca, jest to  $aF$  – kąt między słońcem a źródłem pożywienia;  $sF$  – ilość pożywienia;  $dF$  – odległość do pożywienia. Nie ma tu wymienionego wyżej wspomnianego kierunku, w którym znajduje się pokarm.

Słowny opis metody pokazuje jej ideę i jest zrozumiały. W Algorytmie 4 Doktorant już zapomniał, że wypada podawać wymagane dane wejściowe oraz co zwraca dany algorytm (tego nie zauważyłam w żadnym pseudokodzie), a nie tylko sam przebieg algorytmu. Pseudokod samego algorytmu (jego ciała) też mógłby być lepiej napisany. Przykładowo: próbuję zrozumieć początek: mamy w linii trzeciej wprowadzoną ‘tablicę startową’:

3 tablica startowa =  $v = (v_1, \dots, pr)$  gdzie  $v_j = (x_{1j}, x_{2j})$

Jest to tablica czego? Czy wypełniona jest danymi losowymi? Mogę się domyślać (na podstawie linii nr 2), że to jest tablica robotnic, czyli  $v_j$  jest  $j$ -tą robotnicą. Czy każda robotnica to punkt w przestrzeni dwuwymiarowej i  $x_1$  oraz  $x_2$  to współrzędne? Metoda nie będzie działać na przestrzeniach o większych wymiarach niż 2?

Zakładając, że dobrze interpretuję  $v_j$ , to mamy w linii 8.:

8 | |  $k = \text{Random}(1, \dots, pr)$  dla każdego  $j = 1, \dots, pr$  przy czym  $k \neq j$

Czy to oznacza, że dla każdej robotnicy ( $j$ ?) losujemy liczbę z zakresu od 1 do liczby robotnic, ale wylosowana liczba nie może być równa ‘numerowi’ tej robotnicy, dla której losujemy  $k$ ? Czym jest  $k$ ? Czy to numer ‘partnerskiej’ robotnicy? Ale w takim razie czym jest  $v_{ij}$  w linii 10.? W linii 3. Jest  $v$  z pojedynczym indeksem, wskazującym na numer robotnicy. A czym jest  $v$  ale z podwójnym indeksem? Podobna sytuacja jest w części „for każda obserwatorka do”. Chyba nikt nie lubi, gdy czytanie pseudokodu zmusza go do zgadywania co autor miał na myśli. Ja nie lubię. Pseudokod powinien być zrozumiały. Zaprezentowanie autorskiej metody, którą się nie tylko zna bardzo dobrze, ale samemu tworzyło, bywa dla niektórych trudniejsze niż jej opracowanie. Opis słowny jest jasny, ale nie mogę tego powiedzieć o pseudokodzie (choć trzeba przyznać, że jest dużo lepiej niż w pierwszej wersji pracy, bo tamten, moim zdaniem, nie miał prawa działać).

Kolejny rozdział pracy to „Zastosowanie nowej metody OFNBee”. Autor zapowiedział dwa etapy badań: po pierwsze, sprawdzenie działania metody na znanych funkcjach, stosowanych w podobnych pracach. Pozwoliło to sprawdzić różne kombinacje parametrów metody. Jeśli chcemy sprawdzić zdolność metody do znajdowania optymalnych rozwiązań, to jest to jak najbardziej właściwy sposób. Drugi etap miał na celu ocenę jak sprawdza się zaproponowana metoda w rozwiązywaniu praktycznych, trudnych problemów, tu Autor zdecydował się na problemy konstrukcyjne. Takie zaplanowanie eksperymentów wydaje się jak najbardziej poprawne. Do pierwszego etapu Doktorant wybrał sześć funkcji: Sphere, Rosenbrock, Rastrigin, Griewank, Schwefel, Ackley. Wybrane funkcje zostały zobrazowane w dwóch wymiarach, co niesie informację o stopniu trudności tych funkcji w zadaniu optymalizacji. Są to często stosowane benchmarki w analizie skuteczności metaheurystyk. Funkcja Ackleya została błędnie podana, wzór (6.6), ilustracja graficzna wydaje się poprawna. Postać analityczna funkcji powinna być (przynajmniej ja taką znam):

$$f(x) = -a \exp \left( -b \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i^2} \right) - \exp \left( \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \cos(2\pi x_i) \right) + a + \exp(1)$$

Parametry metody, tj. operatory rozmycia i wyostrenia zostały dobrane na drodze eksperymentalnej. Dla wybranych operatorów, dobrano wartość parametru rozmiar populacji. Wyniki autorskiej metody OFNBee porównano z wynikami ABC oraz MBO, IMBO (Improved Marriage in Honey-Bees), TLBO (Teaching-Learning-Based Optimization), HBMO (Honey Bees Mating Optimization Algorithm) i BBMO (Bumble Bees Mating Optimization). Ponieważ



zapropozowana metoda jest losowa, to każda seria badań składała się z 30 prób, co jest akceptowalnym i stosowanym rozwiązaniem.

Wyniki OFNBee dla wybranych funkcji testowych, przy różnych operatorach są zebrane w tabelach od 6.1 do 6.6. Dyskusje pod tabelami dotyczą czasów (znajdowania rozwiązania?). Dla czterech z sześciu testowanych funkcji metoda znajduje wartość zero (optimum). Dla funkcji Schwefela oraz Rosenbrocka metoda daje wyniki bliskie zeru, ale nie zerowe. Za lepszą konfigurację operatorów można uznać tę, przy której metoda daje wyniki bliższe optimum. Rysunki 6.7 i 6.8 przedstawiają wyniki OFNBee dla funkcji odpowiednio Rosenbrocka i Schwefela. Dwie kombinacje operatorów, beeT f010207 i wyostrzanie GR oraz beeT f010405 i wyostrzanie MF, dają najlepsze wyniki. Następnie Autor ustalił jaka wielkość populacji jest najefektywniejsza, przy rozumieniu efektywności jako czasu, w którym osiągnany jest oczekiwany wynik (optimum). Eksperymenty powtarzano dla siedmiu różnych rozmiarów populacji: 10, 50, 100, 300, 500, 800 i 1000, wyniki zestawiono w tabelach 6.7, 6.8 i 6.9. Uzyskane wyniki są nie tylko ciekawe, ale intrygujące. Tylko przy rozmiarze populacji równym 50 otrzymano dokładne wartości minimum (= 0) dla czterech funkcji (Sphere, Rastrigin, Griewank i Ackley). Dla każdej większej populacji (100, 300, 500, 800, 1000), zwiększał się czas działania metody, ale jednocześnie spadała dokładność – wyniki oscylowały bardzo blisko wokół wartości 0, ale nie osiągały dokładnie tego punktu. Szkoda że Doktorant nie pokusił się o jakieś wyjaśnienie braku równowagi pomiędzy eksploracją a eksploatacją, przynajmniej w końcowej fazie działania metody przy większych populacjach.

Kolejna seria eksperymentów to porównanie autorskiej metody z sześcioma referencyjnymi, dla sześciu funkcji testowych. Doktorant porównywał autorską metodę napisaną w języku R z metodami, dla których dostępna była implementacja w R (ABC i MBO). Z uwagi na fakt, że implementacje w innych językach, zaimplementowane mniej optymalnie, mogłyby wpływać na wyniki, to pozostałe metody porównywano biorąc ich najlepsze osiągnięcia z literatury. Metoda OFNBee osiągnęła optimum dla funkcji Sphere, Rosenbrock, Rastrigin i Griewank, podobnie jak ABC i MBO (tabela 10). Dla funkcji Schwefel oraz Ackley żadna z tych trzech metod nie osiągnęła optimum, ale OFNBee dała wynik najbliższy optimum. Tabela 6.11 zawiera wyniki metod z rodziny MBO, czyli IMBO, TLBO, HBMO, BBMO, dla dwóch ostatnich nie ma wyników dla funkcji Schwefela i Ackleya. Przeprowadzone eksperymenty potwierdzają, że dla testowanych funkcji matematycznych nowa hybrydowa metoda optymalizacji uzyskuje lepsze lub takie same wyniki jak referencyjne algorytmy pszczelej optymalizacji. Nie osiągnęła gorszych wyników.

Powyższe badania są badaniami wstępnymi, mającymi wyłonić rozmiar populacji oraz operatory rozmycia i wyostrzania dające najlepsze rezultaty. Przystąpiono do badania na kolejnych sześciu benchmarkach: Bukin N.6, Cross-in-tray, Drop Wave, Eggholder, Levy, Holder Table. Są to trudne funkcje stosowane do porównywania metod optymalizacji. Na początek, przy rozmiarze populacji 50 porównano OFNBee z różnymi kombinacjami operatorów z ABC – najpopularniejszą z tradycyjnych metod pszczelich. Wyniki dla

testowanych funkcji pokazano na wykresach. W eksperymentach tych autorska metoda OFNBee osiąga lepsze lub takie same wyniki jak ABC, nie osiąga gorszych.

W tej części pracy Autor nie zawsze podawał zakresy zmiennych funkcji zgodnie ze zmiennymi występującymi we wzorach. Przykładowo, funkcja opisana wzorem (6.8) jest funkcją dwóch zmiennych,  $x_1$  i  $x_2$ , ale mamy: „Zalecane wartości zmiennych:  $-10 \leq x_1 \leq 10$ ”. Czy domyślnie  $x_2$  ma ten sam zakres? Podobnie jest przy (6.9), (6.10), (6.12). Niedosyt budzi też problem wymiarowości optymalizowanej funkcji. Czy Autor robił badania tylko dla funkcji dwóch zmiennych? Jak wymiar przestrzeni rozwiązań wpływa na efektywność i skuteczność metody? Czy Autor się tym zainteresował? Czy te same wartości parametrów metody jednakowo dobrze sprawdzają się dla problemów o niskim, jak i wysokim rozmiarze?

Ostatnia tura eksperymentów to problemy konstrukcyjne. Autor chyba lubi liczbę sześć, bo wybrał sześć problemów konstrukcyjnych do eksperymentów: problem optymalizacji spawanej belki, problem optymalizacji zbiornika ciśnieniowego, problem optymalizacji reduktora prędkości, problem optymalizacji rozciągania i ściskania sprężyny, problem optymalizacji przekładni zębatej, problem optymalizacji tarczy hamulcowej. Są to trudne problemy z dużą liczbą różnych ograniczeń. Wszystkie problemy konstrukcyjne zostały przybliżone i zdefiniowane w postaci problemów optymalizacyjnych. Również w tych badaniach Autor 30-krotnie uruchamiał OFNBee dla każdego z tych problemów. Średnie wartości porównano z uśrednionymi wynikami wygenerowanymi przez ABC oraz z literaturowymi wynikami dostępnymi w literaturze. Dla testowanych problemów, metoda OFNBee sprawdza się dobrze lub lepiej niż ABC i / lub literaturowe wyniki.

Podsumowując tę część recenzji stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji **rozprawa doktorska zawiera ważne elementy naukowe, w tym oryginalną metodę optymalizacji, łączącą rozmyte liczby skierowane z metodami pszczelimi, przeprowadzone szerokie eksperymenty**. Zaproponowanie takiej hybrydy **nie byłoby możliwe bez opracowania potrzebnych operatorów rozmywania, co uważam za ważne osiągnięcie**. Na uwagę zasługują eksperymenty przeprowadzone nie tylko na licznych benchmarkach w postaci funkcji matematycznych, ale też na trudnych problemach konstrukcyjnych.

### 3. Oryginalność i waga osiągnięć

Obszar badań wyznaczony celem i tezą zawartą w dysertacji jest **ważny i aktualny z naukowego punktu widzenia**. **Aspekt praktyczny** jest również obecny i ważny.

Praca zawiera oryginalne elementy naukowe, najważniejsze z nich to:

1. Autorskie operatory rozmywania, spełniające oczekiwane właściwości, którymi jest czułość na skierowanie liczby rozmytej
2. Autorska metoda, nazwana OFBBee - metoda ta łączy skierowane liczby rozmyte (ang. Ordered Fuzzy Numbers) z optymalizacją pszczelą. Arytmetykę liczb skierowanych można

włączyć w różne podejścia pszczele. Można sobie wyobrazić włączenie na podobnej zasadzie skierowanych liczb rozmytych do innych metaheurystyk.

3. Obszerne eksperymenty, mające na celu dobór parametrów metody, porównanie autorskiej metody z innymi metodami pszczelimi oraz sprawdzenie, jak autorska metoda sprawdza się na praktycznych problemach konstrukcyjnych.

Pokazane w pracy elementy nowatorskie oraz szeroki zakres badań eksperymentalnych mogą stanowić podstawę ubiegania się o stopień naukowy doktora w dyscyplinie Informatyka techniczna i telekomunikacja. **Wykonana w ramach doktoratu praca jest ważnym wkładem w rozwój teorii liczb skierowanych i ich hybrydyzacji z metodą pszczelą, zawiera elementy nowatorskie.** Otwiera to drogę do szerszego włączania arytmetyki skierowanych liczb do innych metaheurystyk. W podsumowaniu Autor odniósł się do postawionej tezy wskazując na spełnienie ustalonych kryteriów uznania tezy za potwierdzoną.

#### 4. Uwagi i problemy do dyskusji

Omawiając poszczególne elementy dysertacji starałam się pokazywać niektóre problemy, które napotkałam czytając pracę, nie wpływające w sposób istotny na ocenę pracy. Mimo pozytywnej oceny pracy, dostrzegam też jej pewne słabości.

- Nie ma analizy istotności statystycznej wyników, co zwiększyłoby wartość badań eksperymentalnych.
- Wykonanie analizy złożoności obliczeniowej (jednej iteracji) z włączeniem skierowanych liczb rozmytych oraz bez ich włączania podniosłoby wartość merytoryczną pracy.
- Brakuje mi analizy wpływu wymiaru przestrzeni rozwiązań na efektywność i skuteczność zaproponowanej metody. Problem wymiarowości przestrzeni rozwiązań jest pominięty w pracy.

Uwaga bardziej do dyskusji i ewentualnego późniejszego wykorzystania. Praca z dobrym wkładem teoretycznym w rozwój liczb skierowanych, pokazująca potencjalną użyteczność tej teorii w ulepszeniu ABC, zawierająca bardzo obszerne badania eksperymentalne, obejmujące też inne metody pszczele, budzi jednak mój niedosyt. Widziałabym dwa różne cele, które nieco inaczej 'ustawiają' całą pracę. Pierwszy, to rozwój teorii liczb skierowanych pod kątem ich użyteczności w metaheurystykach jako metodach optymalizacji. Drugi to opracowanie dobrej hybrydy metaheurystyki (wybranego podejścia) z arytmetyką liczb skierowanych. Przy pierwszym podejściu oczekiwałabym pokazania użyteczności arytmetyki liczb skierowanych w kilku metaheurystykach o różnym 'rodowodzie', stanowiących 'state of the art'. Czyli badania skupiałyby się na pokazaniu, że liczby skierowane mogą być użyteczne szeroko, na ile szeroko, w różnych podejściach do optymalizacji. Przy drugim podejściu, w którym celem jest opracowanie nowej, ulepszonej metody pszczelej poprzez hybrydyzację, oczekiwałabym, że Autor porówna autorską hybrydę (z liczbami skierowanymi) z najlepszą obecnie hybrydową metodą pszczelą. Czyli tutaj cel badań, jaki tutaj widziałabym, to na ile hybryda algorytmu



pszczelego z liczbami skierowanymi jest lepsza od hybryd algorytmu pszczelego z innymi technikami. To tylko mój punkt widzenia na tematykę badań dotyczącą łączenia teorii liczb skierowanych i metaheurystyk.

Ponadto, proponuję Autorowi zwracanie większej uwagi na sposób prezentacji algorytmów. Bardziej skomplikowany algorytm można zaprezentować w sposób 'top down'. Najpierw przedstawić go w wersji skondensowanej, ogólnej, np. zawierającej ogólny schemat, a dla głównych funkcji – tylko ich nazwy. Działanie tych głównych funkcji można przedstawiać w postaci oddzielnych pseudokodów. Pseudokod powinien być czytelny i zawierać nie tylko 'ciało' algorytmu / funkcji, ale też jasno podane wymagane dane wejściowe, jak i efekt działania algorytmu (wyjście algorytmu).

Praca zawiera drobne usterki językowe, które nie decydują o merytorycznej ocenie pracy. Przykładowe usterki: str. 64: zaproponowana przez W. Dobrosielskiego jest jedną częścią używanych i dobrze opisaną ... (brakuje 'z' pomiędzy jedną a częścią); str. 73: wielkość populacji (brakuje i w populacji, w liczniku, tak samo w opisie algorytmu); str. 73, wzór 5.2:  $\text{rnadom}(0; 1)$  (zamiast  $\text{random}$ ).

## 5. Konkluzja

Podsumowując stwierdzam, iż przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska, której autorem jest mgr inż. Dawid Ewald, biorąc pod uwagę walory naukowe i sposób zaprezentowania wyników pracy, **spełnia ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuje o dopuszczenie pana Dawida Ewalda do publicznej obrony.**



Halina Kwaśnicka