

prof. dr hab. Bartosz Klin  
Department of Computer Science  
University of Oxford  
Wolfson Building, Parks Road  
Oxford OX1 3QD  
UK



DEPARTMENT OF  
**COMPUTER  
SCIENCE**

## RECENZJA

dorobku naukowego w postępowaniu habilitacyjnym dr. Michała Wrony

### Osiągnięcie naukowe

Pan dr Michał Wrona przedstawił jako osiągnięcie naukowe cykl powiązanych tematycznie ośmiu prac naukowych pod wspólnym tytułem *Metody lokalnej zgodności w rozwiązywaniu problemów spełnialności więzów oraz problemów pokrewnych nad strukturami  $\omega$ -kategorycznymi*. Prace te są oznaczone w autoreferacie numerami od A1 do A8 i tych oznaczeń będę używał w recenzji. Pięć z tych prac to artykuły jednoautorskie. Prace A5 i A6 dr Wrona przygotował z pojedynczymi współautorami, a pracę A4 z trzema współautorami. Z przedstawionych przez habilitanta oświadczeń własnych i współautorów wynika, że jego wkład w powstanie każdej z tych prac był istotny.

Badania dr. Wrony przedstawione w tym cyklu prac koncentrują się wokół tzw. problemu spełnialności więzów (ang. *constraint satisfaction problem*, CSP). W klasycznej wersji, problem ten polega na sprawdzeniu czy istnieje homomorfizm ze struktury relacyjnej  $\mathbb{A}$  do struktury  $\mathbb{B}$ . Zwykle strukturę  $\mathbb{B}$  (zwaną w tym kontekście *szablonem*) traktuje się jako parametr problemu, a strukturę  $\mathbb{A}$  – jako wejście dla tak rozumianego problemu obliczeniowego CSP( $\mathbb{B}$ ). Badania nad tym problemem były przez wiele lat motywowane tzw. hipotezą Federa-Vardiego o dychotomii, która mówi, że dla skończonych szablonów  $\mathbb{B}$  problem CSP( $\mathbb{B}$ ) należy do klasy złożoności **P** albo jest **NP**-zupełny. Próby udowodnienia tej hipotezy, niedawno ostatecznie zakończone sukcesem niezależnie przez Bulatova i Zhuka, doprowadziły do powstania pięknej i głębokiej teorii łączącej w sobie elementy algebry uniwersalnej, logiki, teorii złożoności i algorytmiki.

Prace przedstawione przez dr. Wronę dotyczą rozmaitych wariantów problemu spełnialności więzów, których wspólną cechą jest rozważanie nieskończonych, ale przeliczalnych i  $\omega$ -kategorycznych szablonów  $\mathbb{B}$ . Poza  $\omega$ -kategorycznością zwykle narzuca się na nie

rozmaite dodatkowe założenia. W prawie wszystkich tego rodzaju scenariuszach hipoteza o dychotomii pozostaje nierozstrzygnięta, ale zaawansowane pojęcia i techniki opracowane na potrzeby hipotezy Federa-Vardiego pozostają do pewnego stopnia użyteczne. Prowadzenie badań w tym kierunku wymaga więc bardzo dobrej znajomości tych technik, a także dodatkowych aspektów związanych z nieskończonymi strukturami, takich jak teoria modeli i teoria Ramseya.

W pracach A1 i A2 M. Wrona studiuje zagadnienie, które dla skończonych szablonów  $\mathbb{B}$  jest bardzo dobrze rozpoznane: tzw. szerokość relacyjną, czyli miarę tego, jak rozwiązania instancji problemu  $\text{CSP}(\mathbb{B})$  pojawiają się jako rozszerzenia rozwiązań ich niewielkich podinstancji. Piękny wynik Barto z 2016 r. pokazuje, że jeśli skończona struktura ma ograniczoną szerokość relacyjną to ta szerokość jest bardzo mała. Tego rodzaju kolaps nie zachodzi w ogólności dla struktur nieskończonych, ale dr Wrona dokładnie scharakteryzował szerokość relacyjną dla pewnych klas struktur: reduktów pierwszego rzędu skończenie ograniczonych struktur jednorodnych, z założeniem tzw. ograniczonej ścisłej szerokości. Wymagało to opracowania nowych i zaawansowanych technik dowodowych. Dowód z pracy A1 bazuje na klasyfikacji Lachlana-Woodrowa przeliczalnych grafów jednorodnych i wymaga żmudnej analizy rozmaitych przypadków szczególnych.

Wyniki z prac A1 i A2 szybko wzbudziły zainteresowanie innych badaczy. Obie prace były istotnie (tj. obszernie, a nie zdawkowo) zacytowane w pracy A. Motteta i M. Pinskera *Smooth approximations and CSPs over finitely bounded homogeneous structures* (2021). Autorzy następnie połączyli siły, co zaowocowało powstaniem pracy A3. W tej pracy analizę szerokości relacyjnej rozszerzono do struktur bez założenia ograniczonej ścisłej szerokości. Wkład M. Wrony w tę pracę polegał na opracowaniu i analizie redukcji struktur nieskończonych do skończonych, w której elementy skończonego szablonu powstają z orbit grupy automorfizmów na szablonie nieskończonym. Nie jest to najbardziej zaawansowana technicznie część pracy, ale jest jasne że poprzednie doświadczenie dr. Wrony istotnie przyczyniło się do uzyskania jej głównych wyników.

Historia powstania prac A1-A3 jest dobrym przykładem skutecznego i wartościowego dialogu badacza ze społecznością naukową. Samodzielnie uzyskane wyniki z prac A1-A2 wzbudziły zainteresowanie badaczy ze światowej czołówki w danej dziedzinie, którzy najpierw poczuli się w obowiązku omówić te wyniki we własnej pracy, a jednocześnie nawiązali współpracę z ich autorem i wspólnie uzyskali nowe, mocniejsze wyniki.

Pojęcie ścisłej szerokości struktury relacyjnej, traktowane jako założenie w pracach A1-A2, jest głównym tematem (jednoautorskiej) pracy A4. Autor rozważa tu szczególnie rodzaj szablonów: relacje opisane szczególnego rodzaju klauzulami Horna na gęstym liniowym porządku bez końców (tj. na porządku liczb wymiernych). Takie relacje, nazywane *Ord-Horn*, są dobrze znane badaczom złożoności obliczeniowej rachunków temporalnych. W pracy A4, M. Wrona podał pełną syntaktyczną charakteryzację tych szablonów Ord-Horn, które mają ograniczoną ścisłą szerokość relacyjną. Dowód jest niełatwy i wymaga analizy wielu przypadków szczególnych.

Najciekawszą, moim zdaniem, częścią osiągnięcia M. Wrony jest praca A5, napisana wspólnie z M. Bodirskym. Autorzy potwierdzili w niej hipotezę o dychotomii dla szczególnego rodzaju szablonów nieskończonych: reduktów pierwszego rzędu uniwersalnej przeliczalnej relacji równoważności. Tego samego rodzaju twierdzenia znano wcześniej dla reduktów czystego zbioru, uniwersalnego porządku liniowego i uniwersalnego grafu i każdy z tych przypadków stanowi cenny, nietrywialny wynik. W pracy A5 autorzy zastosowali nową technikę dowodową, użytą później z sukcesami przez grupę badawczą M. Bodirsky'ego i innych. W rezultacie jest to najczęściej cytowana praca dr. Wrony: 16 cytowań wg. Google Scholar.

W pracach A6 i A7 habilitant ponownie rozważył szablony typu Ord-Horn, jednak tym razem w kontekście ogólniejszego problemu obliczeniowego QCSP( $\mathbb{B}$ ). O ile w problem spełnialności więzów polega w istocie na sprawdzeniu spełnialności formuły logicznej zbudowanej z formuł atomowych za pomocą koniunkcji i kwantyfikatorów egzystencjalnych, w problemie QCSP dopuszcza się także kwantyfikatory ogólne. Żadna ogólna klasyfikacja szablonów ze względu na złożoność obliczeniową tego problemu nie jest znana. W pracy A6 M. Wrona (wspólnie z H. Chenem) pokazuje algorytm wielomianowy dla problemu QCSP nad szablonami Ord-Horn spełniającymi pewne dodatkowe warunki. Zarówno sam algorytm jak i dowód jego wielomianowej złożoności jest nietrywialny i bazuje na nowego rodzaju grach kamikowych. W (już samodzielnej) pracy A7 te wyniki są rozszerzone o interesującą część "trudnościową", co doprowadziło do syntaktycznej charakteryzacji łatwych obliczeniowo szablonów Ord-Horn, pod pewnymi dodatkowymi warunkami.

Inne rozszerzenie klasycznego problemu CSP stało się tematem pracy A8. Jest to naturalne uogólnienie klasycznego problemu abdukcji logicznej. Autor podał wielomianowy algorytm dla rozwiązywania pewnego szczególnego przypadku abdukcji dla  $\omega$ -kategorycznych szablonów. Jest to więc wynik "łatwościowy", podobnie jak w pracy A6. Mimo wysokiego poziomu technicznego zaawansowania, wśród prac przedstawionych w ocenianym cyklu ta praca wywołała najmniejszy odzew społeczności badawczej. Wydaje się, że rozwiązany tu problem jest raczej niszowy.

Podsumowując, wyniki naukowe dr. Wrony zawarte w przedstawionym cyklu prac uważam za istotne i wartościowe. Tematyka realizowanych tu badań jest aktualnie intensywnie rozwijana, technicznie trudna i wymaga bardzo dobrej znajomości głębokich wyników matematycznych, przede wszystkim z dziedziny algebry uniwersalnej, ale także logiki i teorii modeli. Należy docenić, że kandydatowi udało się nawiązać współpracę z czołowymi badaczami w tej dziedzinie takimi jak M. Bodirsky, M. Pinsker i H. Chen, a przy tym dużą część swoich wyników uzyskał samodzielnie.

## **Pozostały dorobek naukowy**

W autoreferacie kandydat omówił 9 opublikowanych prac, które nie znalazły się w cyklu przedstawionym jako osiągnięcie naukowe. W większości prace te nie są tematycznie

odległe od prac A1-A8: dotyczą złożoności obliczeniowej problemów logicznych, w tym problemów QCSP i abdukcji wspomnianych powyżej. Jedynie dwie prace E1 i F1, sprzed kilkunastu już lat, dotyczą innej tematyki. Wydaje się, że dr Wrona wyspecjalizował się w tematyce problemu spełnialności więzów i nie jest bardzo zainteresowany innymi zagadnieniami. Nie ma w tym nic złego: jest to dziedzina badań na tyle obszerna i głęboka, że można w niej zbudować bardzo udaną karierę naukową.

Przegląd prac M. Wrony potwierdza obraz wyłaniający się z jego centralnego osiągnięcia naukowego: jest to badacz niezależny, nie bojący się samodzielnej pracy, a przy tym w pełni zdolny do skutecznego nawiązywania dialogu i współpracy ze znakomitymi uczonymi. Regularnie publikuje na konferencjach i w czasopismach o dobrej renomie.

### **Inna aktywność naukowa i dydaktyczna**

Michał Wrona odbył staże podoktorskie w Paryżu i w Linköping; w sumie spędził za granicą ponad 2 lata. Należy też podkreślić, że obecnie pracuje na Uniwersytecie Jagiellońskim, chociaż stopień doktora uzyskał na Uniwersytecie Wrocławskim. Biorąc także pod uwagę jego regularną współpracę z badaczami zagranicznymi trudno wątpić, że w swojej dotychczasowej karierze wykazywał on istotną aktywność naukową na więcej niż jednej uczelni, zgodnie z ustawowymi wymaganiami wobec kandydata do stopnia doktora habilitowanego.

Aktywność dydaktyczna M. Wrony przedstawiona w autoreferacie jest zadowalająca. Pewien niedosyt budzi fakt, że przez kilka lat zatrudnienia na obecnym stanowisku wypromował tylko jedną pracę magisterską, ale stosunkowo duża liczba wypromowanych prac licencjackich poprawia ten obraz.

### **Konkluzja**

Przedstawione przez dr. Michała Wronę osiągnięcie naukowe oraz jego pozostałe dokonania spełniają wymagania ustawowe i wystarczają do nadania mu stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie informatyka.

Warszawa, 31 lipca 2022 r.

Bartosz Klin