



Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Prof. Zdzisław Burda
tel. +48 12 617 41 57
fax. +48 12 634 00 10
zdzislaw.burda@agh.edu.pl

Kraków, 10 lutego 2016

**Recenzja rozprawy habilitacyjnej dr. inż. Krzysztofa Malarza
pt. „Konstrukcja i wykorzystanie macierzy odległości do badania własności
topologicznych sieci złożonych”**

W ostatnich dwudziestu latach powstała nowa gałąź mechaniki statystycznej, zajmująca się układami statystycznymi reprezentowanymi przez sieci złożone. Terminem *sieci złożone* określa się grafy, które z jednej strony mają charakter losowy, a z drugiej mają własności daleko odbiegające od klasycznych grafów losowych, maksymalizujących entropię, nazywanych grafami Erdösa-Rényiego. Zainteresowanie sieciami złożonymi wyrosło z badań empirycznych dotyczących opisu rzeczywistych sieci występujących w naturze i technice oraz sieci abstrakcyjnych używanych w różnych dziedzinach nauki do opisu emergentnych zjawisk w układach składających się z wielu oddziałujących ze sobą elementów. Przykładem tego typu sieci są genetyczne sieci regulacyjne. Ich wierzchołki reprezentują geny a krawędzie wpływy ekspresji jednych genów na ekspresję innych. Używając języka regulacyjnych sieci genetycznych próbuje się dziś wyjaśniać zjawiska genetyczne. Sieci złożone znajdują zastosowania w fizyce, telekomunikacji, socjologii, ekonomii, biologii, genetyce, ekologii, lingwistyce i wielu innych dziedzinach.

Badania nad sieciami złożonymi przeżyły gwałtowny rozwój pod koniec zeszłego stulecia, kiedy to dzięki rozwojowi komputeryzacji i technik akwizycji danych udało się zgromadzić bogatą dokumentację empiryczną na temat sieci złożonych w wielu różnych dziedzinach. Zainteresowanie tymi badaniami nie ustaje do dziś. Dane empiryczne pokazują wiele wspólnych cech zbadanych sieci. Jedną z nich jest obecność długiego ogona w rozkładzie krotności wierzchołków, który w wielu wypadkach daje się opisać asymptotycznym prawem potęgowym. Obecność takiego ogona oznacza, że na grafie nie ma wierzchołków o typowych krotnościach i że występują na nim wierzchołki, których krotność znacznie odbiega od pozostałych. Są to tzw. centra lub wierzchołki osobliwe. Innymi charakterystycznymi cechami często występującymi w przebadanych sieciach są: zwartość struktury określanej mianem *małego świata*, duży *współczynnik gronowania* i korelacje między krotnościami wierzchołków. Badania teoretyczne skupiają się na poszukiwaniu mechanizmów, które pozwalają wytłumaczyć obserwowane własności sieci. Modele teoretyczne opisują współzawodnictwo procesów wzrostu sieci i procesów równowagowych. Ważną rolę w badaniach teoretycznych odegrało odkrycie związku pomiędzy preferencyjnym dołączaniem a potęgową asymptotyką rozkładu krotności wierzchołków. Preferencyjne dołączanie oznacza, że mechanizm wzrostu sieci preferuje dołączanie nowych elementów sieci do wierzchołków, które mają dużo sąsiadów. Efektem tego odkrycia była fala rozwa-

zań teoretycznych badających związki pomiędzy procesem generującym daną sieć a jej własnościami topologicznymi i statystycznymi.

Przedłożona do recenzji rozprawa habilitacyjna wpisuje się w ten nurt badań. Składa się z sześciu prac opublikowanych w: *International Journal of Modern Physics C*, *TASK Quarterly*, *European Physical Journal B*, *Physica A* oraz *Acta Physica Polonica B*. Z oświadczeń złożonych przez współautorów wynika, że udział dr. Malarza był w nich zdecydowanie dominujący. Publikacje są spójne tematycznie. Rozwinięto w nich metodę badania topologicznych własności sieci za pomocą macierzy odległości, która jest na bieżąco uaktualniana w trakcie wzrostu sieci. Przedstawione wyniki stanowią interesujący wkład do dziedziny.

Idea iteracyjnej konstrukcji macierzy odległości dla sieci rosnącej została sformułowana w pracy K. Malarz, et al., *Average distance in growing trees*, *International Journal of Modern Physics C* 14, 1201 (2003). Metodę zastosowano do badania własności zespołów drzew rosnących z różnymi jądrami wzrostu. W szczególności rozpatrzono przypadki jąder jednorodnych i preferencyjnych, które prowadzą w granicy termodynamicznej do drzew wykładniczych i potęgowych. Nazwy tych zespołów pochodzą od asymptotycznego zachowania się rozkładu krotności wierzchołków w granicy termodynamicznej. Przypadek drzew wykładniczych z jednorodnym jądrem wzrostu został rozwiązany również analitycznie. Dzięki temu można było przetestować numeryczną metodę Monte-Carlo. Porównanie wyników na średnią odległość węzłów pokazało idealną zgodność obliczeń analitycznych i symulacji numerycznych w badanym zakresie rozmiarów. Najważniejszy wynik pracy, oprócz samej metody, to wyznaczenie asymptotycznego prawa wzrostu średniej odległości i jej wariancji. Zarówno średnia jak i wariancja rosną w obu wspomnianych zespołach statystycznych logarytmicznie z rozmiarem drzew. Pokazano, że wartość współczynnika przy logarytmie w wiodącym wyrazie asymptotycznego wzoru na średnią odległość wynosi odpowiednio dwa i jeden dla drzew wykładniczych i potęgowych. Innymi słowy, rosnące drzewa wykładnicze mają dwa razy większą rozpiętość niż potęgowe. Te ostatnie tworzą bardziej zbite struktury w wyniku obecności wierzchołków o dużej krotności. Skupiają one wokół siebie dużą część drzewa, wzmacniając w ten sposób wspomniany efekt małego świata.

W pracy K. Malarz, et al., *Node-node distance distribution for growing networks*, *TASK Quarterly* 8, 115 (2004), uogólniono związki rekurencyjne dla rosnących drzew wykładniczych na wyższe momenty rozkładu odległości i za ich pomocą wyznaczono zależność skośności i kurtozy rozkładu odległości od rozmiaru drzew i pokazano, że w granicy dużych rozmiarów dążą one do pewnych dodatnich stałych. Równoległe do obliczeń analitycznych, kontynuowano pracę nad iteracyjnym algorytmem do wyliczania macierzy odległości. Algorytm zaadaptowano do grafów niedrzewiastych, dla których odległość zdefiniowana jest jako długość najkrótszej ścieżki pomiędzy wierzchołkami. Ponieważ znajdowanie najkrótszych ścieżek na grafie jest operacją nielokalną, w każdym pojedynczym kroku iteracji tworzenia macierzy odległości wymagane jest przeprowadzenie testu sprawdzającego, czy dołączony nowy fragment grafu nie wprowadza skrótów między istniejącymi wierzchoł-

kami. Złożoność obliczeniowa takiego testu jest proporcjonalna do rozmiaru grafu, co sprawia, że wydajność algorytmu maleje ze wzrostem rozmiaru systemu. Rozszerzoną wersję algorytmu zastosowano do wyliczenia rozkładu odległości dla kilku klas grafów, między innymi sieci rosnących, które wzrastają poprzez dołączanie do nich m -nogów z preferencyjną albo jednorodną regułą przyłączania. Dla $m = 1, 2$ wyznaczono współczynniki dwóch wiodących członów w logarytmicznym prawie wzrostu średniej odległości i jej wariancji.

W pracy K. Malarz i K. Kułakowski, *Dependence of the average to-node distance on the node degree for random graphs and growing networks*, European Physical Journal B 41, 333 (2004), rozszerzono zakres stosowalności algorytmu na klasyczne grafy losowe. Rozważono grafy z zespołu $G(p, N)$, który w granicy termodynamicznej posiada te same własności co grafy Erdösa-Rényiego. Kluczową obserwacją było zauważenie, że perkolacyjny proces generowania grafów $G(p, N)$ może być wykonany sekwencyjnie, dzięki czemu można do niego zastosować iteracyjną metodę tworzenia macierzy odległości. Głównym celem pracy było zbadanie mapy odległości na grafie i określenie relacji pomiędzy stopniem wierzchołka a średnią odległością do pozostałych wierzchołków. Na tej podstawie można ocenić efektywność strategii przeszukiwań w okolicy węzłów o dużej krotności, która odgrywa ważną rolę w ocenie wydajności procesów kontaktowych na grafie. Ilościową miarą, która została wyznaczoną w pracy, był indeks efektywności strategii przeszukiwań w okolicy węzłów o danym stopniu. Indeks zdefiniowany został jako pochodna średniej odległości po stopniu wierzchołka, od którego ta odległość jest mierzona. Został wyliczony dla kilku klas grafów i na tej podstawie wyciągnięto wnioski dotyczące wyboru strategii przeszukiwań. Pokazano, że strategia przeszukiwania w okolicy węzła o największej liczbie koordynacyjnej przynosi lepsze efekty na sieci wykładniczej niż na sieci potęgowej. To bardzo interesujący wynik.

Praca K. Malarz i K. Kułakowski, *Matrix representation of evolving networks*, Acta Physica Polonica B 36, 2523 (2005), zawiera przegląd zastosowań macierzy odległości do analizy topologii różnych statystycznych zespołów grafów i niektórych ich charakterystyk związanych z procesami kontaktowymi na sieciach złożonych. Zebrano w niej najciekawsze koncepcje i rezultaty wcześniejszych prac i wzbogacono je o nowe wyniki numeryczne.

W pracy K. Malarz i K. Kułakowski, *Memory effect in growing trees*, Physica A 345, 326 (2005), badano efekt pamięci w procesach wzrostu grafu. Rozważano grafy rosnące, które wzrastają według ustalonej reguły dołączania, a różnią się jedynie konfiguracją początkową, od której rozpoczyna się proces wzrostu. Poszukiwano odpowiedzi na pytanie, czy na podstawie własności otrzymanych grafów da się ustalić konfigurację początkową. A jeżeli tak, czy pamięć o tej konfiguracji nie znika, gdy rozmiar grafów dąży do nieskończoności. W pracy zbadano cztery klasy grafów: grafy Albert-Barabásiego, dla $m = 1, 2$ i grafy z jednorodną regułą przyłączania dla $m = 1, 2$. Dla każdej z tych klas porównano dwie rodziny grafów, które różniły się jedynie konfiguracją początkową. W jednej wzrost rozpoczynał się od czterowierzchołkowego grafu liniowego L_4 a w drugiej od czterowierzchołkowego drzewa K_{13} . Dla każdej rodziny badano zależność pierwszego i drugiego

momentu rozkładu odległości. Pokazano, że średnie odległości w obu rodzinach różnią się między sobą dla grafów o tym samym rozmiarze i że różnica między nimi dąży do stałej, gdy rozmiar dąży do nieskończoności. Dla drugich momentów różnica pomiędzy wartościami dla obu rodzin rośnie logarytmicznie z rozmiarem. Wyznaczając te momenty z wystarczającą dokładnością dla danego zespołu grafów można zatem ustalić z jakiej konfiguracji rozpoczął się proces wzrostu. Innymi słowy ewolucja zachowuje w mapie odległości informację na temat konfiguracji startowej. To bardzo ciekawy wynik.

Własności rzadkich grafów losowych można badać analitycznie za pomocą formalizmu funkcji generujących, będącego rodzajem przybliżenia średniego pola. Przewidywania tego formalizmu dotyczące liczby wierzchołków w danej odległości średniej odległości między wierzchołkami o danych stopniach itp. wyraża się za pomocą pierwszego i drugiego momentu Bernoulliego rozkładu krotności na grafie, przy założeniu braku korelacji między stopniami wierzchołków. W pracy K. Malarz, *Numbers of n -th neighbors and node-to-node distances in growing networks*, Acta Physica Polonica B 37, 309 (2006), habilitant porównał przewidywania wynikające z tego formalizmu z wynikami numerycznymi otrzymanymi za pomocą metody Monte-Carlo zintegrowanej z iteracyjną metodą opartą o macierz odległości. Formalizm średniopolowy jest z natury *drzewiasty*, można więc naiwnie oczekiwać, że jego przewidywania powinny być poprawne jedynie dla grafów drzewiastych. Wyniki przedstawione w pracy pokazały jednak, że przewidywania tego formalizmu sprawdzają się dla grafów wykładniczych niezależnie od tego, czy grafy są drzewiaste czy nie, natomiast nie sprawdzają się dla grafów potęgowych, nawet dla drzew. To ważny głos w dyskusji na temat granic stosowalności formalizmu funkcji generujących.

Podsumowując, przedstawiona rozprawa habilitacyjna stanowi oryginalny wkład dr. inż. Krzysztofa Malarza do badań sieci złożonych. Rozwinięta w niej iteracyjna metoda tworzenia macierzy odległości dla grafów rosnących znajduje zastosowanie w licznych zagadnieniach dotyczących własności statystycznych i topologicznych grafów rosnących. Między innymi pozwala wyznaczyć własności rozkładu odległości między wierzchołkami, wykrywać i kwantyfikować efekty pamięci procesu wzrostu grafu oraz weryfikować przewidywania teoretyczne formalizmu funkcji generujących.

Prace wchodzące w skład rozprawy habilitacyjnej stanowią jedynie część dorobku naukowego dr. Malarza. Cały dorobek obejmuje łącznie ponad pięćdziesiąt prac naukowych, z czego czterdzieści siedem zostało opublikowanych po doktoracie. Prace były cytowane przez innych autorów około dwustu dwudziestu razy. Czterdzieści sześć prac zostało opublikowanych w czasopismach o zasięgu międzynarodowym z listy JCR, a dziewięć w czasopismach spoza tej listy. Indeks Hirscha dorobku wynosi dziesięć. Dr Malarz jest też autorem sześciu nieopublikowanych manuskryptów i czterech prac popularno-naukowych, które ukazały się między innymi w *European Physics News* i *Postęпах Fizyki*.

Dr Malarz posiada wiele zainteresowań badawczych, które oprócz wspomnianych sieci złożonych obejmują również: modele spinowe, perkolację, automaty komórkowe, modele wzrostu powierzchni, procesy kontaktowe i modelowanie zjawisk socjologicznych. Dr Ma-

larz rozwinął solidny warsztat analityczny i numeryczny, który z dużym powodzeniem stosuje do badania zagadnień z fizyki statystycznej i socjo-fizyki, do opisu przejść fazowych, procesów dynamicznych i zjawisk zachodzących w układach złożonych. Swoje badania prowadził we współpracy międzynarodowej. Przebywał na krótkoterminowych stażach naukowych w Instytucie Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu w Kolonii, w Instytucie Fizyki Teoretycznej Instytutu Józefa Stefana w Ljubljanie, na Uniwersytecie Piotra i Marii Curie w Paryżu. Wyniki badań były prezentowane przez niego na licznych konferencjach krajowych i międzynarodowych w postaci referatów i plakatów. Dr Malarz był wykonawcą w dwóch europejskich projektach badawczych: w VII Programie Ramowym i programie COST-P10. Obecnie jest wykonawcą w granie OPUS Narodowego Centrum Nauki. Działalność naukowa dr. Malarza została wyróżniona dwoma indywidualnymi nagrodami pierwszego i drugiego stopnia oraz sześcioma nagrodami zespołowymi Rektora AGH.

Choć to nie jest bezpośrednim przedmiotem oceny w postępowaniu habilitacyjnym, warto podkreślić ogromny dorobek organizacyjny i duży dorobek dydaktyczny dr. Malarza.

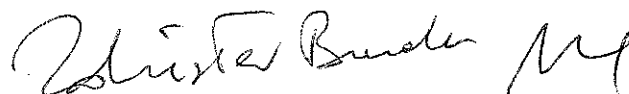
Dr Malarz bardzo aktywnie angażuje się w działalność na rzecz środowiska akademickiego i naukowego. Przez dwie kadencje, w latach 2005–2012, był prodziekanem ds. studenckich na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH. W latach 2006-2014 pełnił funkcję redaktora w *Central European Journal of Physics*. Obecnie jest członkiem redakcyjnym w czasopiśmie naukowych: *Open Physics*, *International Journal of Statistical Mechanics* i *The Scientific World Journal: Computer Science*. Działa aktywnie na rzecz Polskiego Towarzystwa Fizycznego, gdzie już po raz trzeci został wybrany na członka Zarządu Oddziału Krakowskiego. Wcześniej pełnił funkcję sekretarza i zasiadał w Komisji Rewizyjnej tego oddziału. Zasiada również w Komisji Rewizyjnej sekcji *Fizyka w Ekonomii i Naukach Społecznych* PTF. Był zaangażowany w organizację konferencji krajowych i międzynarodowych. Między innymi trzykrotnie zasiadał w Komitecie Doradczym międzynarodowej konferencji $\Sigma\Phi$, która jest jedną z największych regularnych konferencji w dziedzinie fizyki statystycznej w Europie. Był członkiem komitetu organizacyjnego *XL Zjazdu Fizyków Polskich*, członkiem rady programowej konferencji *Workshop on Complex Collective Systems* we Wrocławiu, sześciokrotnie członkiem rady programowej *Ogólnopolskiej Konferencji Inżynierii Gier Komputerowych* w Siedlcach i członkiem komitetu organizacyjnego *Ogólnopolskiego Sympozjum Fizyka w Ekonomii i Naukach Społecznych*.

Dr Malarz posiada również duże osiągnięcia na polu popularyzacji nauki, dydaktyki i edukacji. Za zasługi dla popularyzacji nauki został oznaczony Brązowym Krzyżem Zasługi przez Prezydenta RP, a za zasługi dla edukacji Medalem Komisji Edukacji Narodowej przez Ministra Edukacji Narodowej. W latach 2002-2005 pełnił funkcję opiekuna Studenckiego Koła Naukowego Fizyków *Bozon*. W tym okresie jego podopieczni zorganizowali *Czwartą Ogólnopolską Sesję Kół Naukowych Fizyków* i wydali pod jego redakcją materiały z tej sesji w *Zeszytach Studenckiego Towarzystwa Naukowego*. Trzykrotnie był członkiem komitetu organizacyjnego *Jarmarku Fizycznego*, był sekretarzem Małopolskiego Komitetu Organizacyjnego obchodów *Światowego Roku Fizyki* w 2005 roku, członkiem komitetu

organizacyjnego dwóch edycji *Ogólnopolskiego Konkursu na Doświadczenie Pokazowe z Fizyki*.

Dr Malarz prowadził liczne ćwiczenia laboratoryjne, audytoryjne, seminaryjne i wykłady dla studentów AGH. Był promotorem szesnastu prac magisterskich. Obecnie jest promotorem czterech. Jest również promotorem pomocniczym w jednym przewodzie doktorskim. Praca magisterska pt. „*Budowa nowego systemu sterowania i akwizycji danych separatora fragmentów COMBAS*” napisana przez pana Szymona Myalskiego pod opieką dr. Malarza została wyróżniona nagrodą Polskiego Towarzystwa Nukleonowego w konkursie na najlepsze prace magisterskie w dziedzinie atomistyki w 2007 roku.

Konkludując, uważam, że rozprawa habilitacyjna oraz dorobek naukowy dr. inż. Krzysztofa Malarza spełniają kryteria określone w ustawie o *stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*. W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie pana dr. inż. Krzysztofa Malarza do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego.



Zdzisław Burda