

Warszawa, dn. 13 maja 2015r

dr hab. inż. Andrzej Krawiecki
Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej
Koszykowa 75
00-662 Warszawa

**Recenzja rozprawy habilitacyjnej dr inż. Piotra Fronczaka
pt. "Współoddziaływanie własności strukturalnych i procesów dynamicznych w
sieciach złożonych "**

Przedłożona do oceny rozprawa habilitacyjna dr inż. Piotra Fronczaka dotyczy teoretycznych i numerycznych badań procesów dynamicznych w układach o strukturze sieci złożonych (tj. wpływu struktury na przebieg zjawisk dynamicznych), badań topologii i struktury samych sieci złożonych oraz, w pewnym zakresie, wpływu zjawisk dynamicznych na strukturę sieci. Rozprawa składa się z 10 prac w języku angielskim, opublikowanych w czasopismach z listy JCR, do których dołączony jest przewodnik w języku polskim, zawierający autoreferat dotyczący ww. prac oraz podsumowanie całości dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego Habilitanta. Artykuły naukowe, wchodzące w skład rozprawy, opublikowano w czasopismach o wysokiej randze (1 praca w *Physical Review Letters*, 6 w *Physical Review E*, 2 w *European Physical Journal B* i 1 w *Journal of Physics A*) w latach 2006-2014, a więc po uzyskaniu przez dr inż. P. Fronczaka stopnia naukowego doktora, co nastąpiło w 2003r. Dr inż. P. Fronczak jest jedynym autorem jednego spośród ww. artykułów. Pozostałe prace są wieloautorskie: w pięciu z nich dr inż. P. Fronczak jest pierwszym, a w czterech pozostałych – drugim autorem; we wszystkich pracach wkład Habilitanta był decydujący lub bardzo istotny.

Publikacje, wchodzące w skład rozprawy, można podzielić na grupy, różniące się tematyką i metodami badawczymi. Prace [1,3] (numeracja zgodna z numeracją w przewodniku) dotyczą własności strukturalnych sieci złożonych; prace [2,8,9] stanowią próbę zastosowania teorii grafów przypadkowych do badania sieci rzeczywistych i modelowych, np. sieci handlu światowego i sieci współpracy naukowej; prace [4,5] dotyczą badania przejść fazowych w logicznych sieciach przypadkowych; prace [6,7] dokonują opisu generacji i przepływu pakietów w sieciach transportowych przy pomocy formalizmu błędzenia przypadkowego na sieciach złożonych; prace [8,10] stanowią próbę analizy pewnych aspektów sieci handlu światowego na gruncie teorii sieci złożonych i zbiorów fraktalnych. Tak szerokie spektrum poruszonych zagadnień powoduje, że rozprawa habilitacyjna może sprawiać wrażenie zbioru publikacji o różnorodnej tematyce, powiązanych jedynie bardzo ogólnie przewijającym się przez wszystkie prace pojęciem sieci złożonych. Ponadto tytuł rozprawy wydaje się niezbyt adekwatny do jej zawartości. Jedynie w pracy [1] można mówić o rzeczywistym współoddziaływaniu (wzajemnym oddziaływaniu) struktury sieci i zjawiska dynamicznego w układzie o strukturze sieci złożonej; w większości pozostałych prac dominuje relacja w jedną stronę, tj. badany jest wpływ struktury sieci na zjawiska dynamiczne, zaś w pracy [3] badane są jedynie własności strukturalne sieci, bez obecności zjawisk dynamicznych. Tym niemniej dorobek Habilitanta broni się sam: każda jego część stanowi istotny wkład w odpowiednią dziedzinę fizyki, o czym świadczy m.in. ranga prac, wchodzących w skład rozprawy habilitacyjnej (sumaryczny współczynnik Impact Factor wynosi dla nich 25.961), wysoka ogólna liczba cytowań (359 według bazy Web of Science) i indeks Hirscha 10. Przede wszystkim zaś w rozprawie uzyskano szereg ważnych wyników, bardziej szczegółowo omówionych w dalszej części niniejszej recenzji, wskazujących na istotny wpływ, nawet pozornie drugorzędnych, własności strukturalnych sieci (jak obecność liniowych i nieliniowych korelacji między stopniami wierzchołków lub obecność klastrów w sieciach na progu perkolacji) na zjawiska dynamiczne

o potencjalnie dużym znaczeniu (jak przesyłanie pakietów w sieciach transportowych lub przejście do chaosu w przypadkowych sieciach logicznych).

Należy zauważyć, że prace [2,8,9] weszły uprzednio w skład habilitacji dr hab. inż. Agaty Fronczak, małżonki Habilitanta, uzyskanej przez nią w 2014r. Włączenie tych prac do rozprawy habilitacyjnej dr inż. Piotra Fronczaka nie stanowi jednak ich powtórniego wykorzystania, gdyż we wszystkich przypadkach wkład obojga Autorów w ich powstanie był istotny i może być rozdzielony, jak to jednoznacznie wynika z załączonych deklaracji.

Obecnie przejdę do omówienia najważniejszych wyników prac, składających się na przedstawioną rozprawę habilitacyjną.

Praca [1] jest jedyną, w której, zgodnie z tytułem rozprawy habilitacyjnej, zbadano współdziałanie struktury sieci i zjawisk dynamicznych, zachodzących na niej. W pracy rozpatrzono znany z literatury przedmiotu model samoorganizującej się krytyczności (SOC) na sieci, poszerzony o możliwość przełączania krawędzi zgodnie z algorytmem, w którym krawędzie od dawna nie przełączane są przekierowywane do węzła, który w danym kroku czasowym zainicjował lawinę. Wzajemne oddziaływanie lawin i przełączania krawędzi prowadzi do sytuacji, w której dowolna początkowa sieć przypadkowa (np. klasyczny graf przypadkowy) samoorganizuje się do stanu sieci bezskalowej, przy czym wykładniki w prawach potęgowych, opisujących rozmiary lawin i rozkład stopni wierzchołków, stają się równe. Autorzy sugerują, że uzyskana wartość równowagowa obu wykładników, równa 2, może być uniwersalna dla szerokiej klasy modeli, w których SOC i struktura sieci wzajemnie na siebie wpływają.

W pracy [3] zastosowano, uzyskane wcześniej przez Habilitanta we współpracy z A. Fronczak i J.A. Hołystem w formalizmie zmiennych ukrytych, wyrażenie na średnią najkrótszą drogę między węzłami sieci do wyjaśnienia obserwowanych w sieciach o dużej gęstości połączeń log-periodycznych oscylacji średniej najkrótszej drogi w funkcji iloczynu stopni węzłów. W istocie otrzymane wzory (4), (6) przewidują oscylacje w funkcji iloczynu zmiennych ukrytych, związanych z węzłami; w pracy [3] zabrakło bezpośredniego „przetłumaczenia” uzyskanych wyników na zależność średniej drogi od iloczynu stopni wierzchołków. Pokazano, że oscylacje wynikają z dyskretnych efektów rozkładu długości średnich najkrótszych dróg w sieciach. W przeciwieństwie jednak do zjawiska tzw. dyskretnej niezmienniczości skali (discrete scale invariance), które najczęściej prowadzi do wystąpienia log-periodycznych oscylacji w okolicach punktu krytycznego (np. zwrotów cen akcji tuż przed załamaniem na giełdzie), tutaj efekty dyskretne nie są związane z fraktalną strukturą sieci złożonej.

W pracy [2], posługując się formalizmem wykładniczych grafów przypadkowych, zbadano przejścia fazowe w sieci złożonej, stanowiącej model współpracy w ramach projektów naukowych. Hamiltonian strukturalny sieci uwzględnia zarówno produktywność węzłów, którą przyjęto jako wykładniczą funkcję stopni, jak i ich klasteryzację, której wzrost odpowiada wzrostowi współpracy między uczestnikami projektów naukowych (co jest często jednym z założonych celów projektu). Przy założonym silnym nacisku na klasteryzację zbadano strukturalne przejścia fazowe (wyraźne zmiany konfiguracji połączeń) w funkcji pola sprzężonego z produktywnością. Wyniki tej pracy, choć niewątpliwie interesujące, trudno uznać za konkluzywne: zaobserwowano różne, nieraz bardzo skomplikowane zmiany preferowanych konfiguracji w badanym zespole sieci oraz różne rodzaje histerezy, nie poddające się jakiejś bardziej ogólnej klasyfikacji. Co więcej, w pracy znalazło się stwierdzenie, że wiele spośród zaobserwowanych przejść fazowych jest efektem skończonych rozmiarów sieci i zanika w granicy termodynamicznej.

Celem pracy [8] było zastosowanie osiągnięć teorii wykładniczych grafów przypadkowych do zbadania sieci handlu światowego, w której państwa odpowiadają węzłom, a wagi połączeń

czeń są proporcjonalne do wielkości wymiany handlowej. Wykazano, że w każdym roku sieć handlu światowego można traktować jako typowego reprezentanta zespołu sieci, opisywanego hamiltonianem strukturalnym, którego parametry zależą jedynie od iloczynu PKB handlujących państw; w ten sposób częściowo odtworzono znane w ekonomii tzw. grawitacyjne prawo handlu światowego. Ponadto do sieci handlu światowego zastosowano twierdzenie fluktuacyjno-dyssypacyjne dla zespołów statystycznych sieci złożonych, sformułowane wcześniej przez A. Fronczak, Habilitanta i J.A. Hołysta. Na jego podstawie wyprowadzono równanie, pozwalające oszacować zmiany wymiany handlowej na podstawie zmian PKB handlujących państw w poszczególnych latach. Należy podkreślić, że w omawianej pracy wykorzystano model wykładniczych grafów przypadkowych do uzyskania wyników ilościowych dla sieci rzeczywistej, wykazujących dobrą zgodność z danymi empirycznymi.

W pracy [9] zastosowano po raz pierwszy teorię wykładniczych grafów przypadkowych do modelowania sieci o strukturze modularnej (blokowej). Poprzez odpowiednią modyfikację hamiltonianu strukturalnego, wprowadzono model blokowy z korektą na stopnie wierzchołków, który umożliwia uzyskanie - jako typowych reprezentantów zespołu grafów przypadkowych - sieci, różniących się rozkładem stopni wierzchołków oraz rozmiarem modułów. W modelu tym wyznaczono m.in. średnie wartości tzw. wewnętrznych i zewnętrznych stopni wierzchołków, tj. średnie liczby najbliższych sąsiadów węzła, należących do tego samego i do innych modułów, odpowiednio. Pokazano, że pomiędzy tymi średnimi zachodzi zależność liniowa, przypominająca relacje skalowania, zaobserwowane w samopodobnych rzeczywistych sieciach złożonych; zależność ta nie wynika z jakiegokolwiek procedury konstrukcji sieci modularnej. Warto jednak zauważyć, że relacja wyłącznie dla średnich ww. wielkości nie wystarcza do wytworzenia samopodobnej struktury sieci. Ponadto sieci fraktalne powinny posiadać co najmniej kilka szczebli hierarchii, podczas gdy rozpatrywane w pracy [9] „sieci sieci” mają tylko dwa szczeble hierarchii.

W pracach [4,5] celem badań było wyznaczenie teoretycznego progu przejścia fazowego pomiędzy fazą zamrożoną i chaotyczną w nieskierowanych losowych sieciach logicznych, w tym w sieciach bezskalowych, oraz wyjaśnienie rozbieżności między przewidywaniami teoretycznymi i wynikami symulacji, szczególnie dla klasycznych grafów przypadkowych z niskim średnim stopniem wierzchołków. Jest to zagadnienie ważne, ponieważ sieci logiczne stanowią model sieci regulacji genów w żywych organizmach, które działają, jak się sądzi, na progu chaosu; jednocześnie przypadek sieci nieskierowanych jest łatwiejszy do analizy teoretycznej niż częściej badany przypadek sieci skierowanych. Próg stabilności fazy zamrożonej wyznaczono teoretycznie w przybliżeniu pola średniego dla sieci przypadkowych, pozbawionych korelacji dwupunktowych i korelacji wyższego rzędu. W szczególności dla sieci bezskalowych wykazano, że przejście fazowe zachodzi w sieciach nieskierowanych z wykładnikiem w potęgowym rozkładzie stopni wierzchołków większym niż 3 i że jego próg zależy od minimalnego stopnia wierzchołków w sieci. Natomiast w przypadku klasycznych grafów przypadkowych najważniejszym wynikiem jest stwierdzenie, że uzyskane numerycznie wartości progu stabilności fazy zamrożonej odbiegają istotnie od przewidywań teoretycznych, szczególnie dla sieci z niską średnią liczbą połączeń na węzeł. W pracy [5] pokazano, że w tym ostatnim przypadku znacznie lepszą zgodność uzyskuje się, biorąc pod uwagę, iż sieci te znajdują się na progu perkolacji, w związku z tym zaburzenia, świadczące o niestabilności fazy zamrożonej, rozchodzą się w głównym komponencie sieci i niezależnie w mniejszych klastrach. Oszacowanie progu stabilności fazy zamrożonej w głównym komponencie poprawiono, uwzględniając, że w komponencie tym występują dysasortatywne korelacje stopni wierzchołków. Ponadto pokazano jakościowo, że wyznaczony numerycznie na podstawie obserwacji propagacji zaburzeń w całej sieci próg stabilności fazy zamrożonej jest wyższy niż w głównym komponencie, ponieważ zaburzenia nie rozchodzą się w mniejszych klastrach i izolowanych węzłach, niepołączonych z głównym komponentem. Taki efekt „maskowania” nie-

stabilności fazy zamrożonej jest bardzo istotny; szkoda, że Autorzy nie wyjaśnili bliżej, w jaki sposób uzyskiwano wyniki numeryczne, dotyczące propagacji zaburzeń jedynie w głównym komponencie, które na rys.7 wykazują dobrą zgodność z przewidywaniami teoretycznymi prognozy stabilności fazy zamrożonej w głównym komponencie.

W pracach [6,7] badano zjawisko błędzenia przypadkowego cząstek w sieci, w którym prawdopodobieństwo przejścia do sąsiedniego węzła („reguła nawigacji”) zależy od lokalnej konfiguracji sieci (w szczególności zależy potęgowo od stopnia kolejnego węzła). Jest to problem istotny, np. z punktu widzenia badań nad optymalnymi strategiami wyszukiwania drogi przy przesyłaniu pakietów informacji w Internecie. W szczególności w pracy [6] znaleziono stacjonarny rozkład cząstek w węzłach sieci, w którym prawdopodobieństwo obsadzenia węzła okazało się potęgowo zależne od jego stopnia. Rozkład ten ma formę taką jak dla pakietów informacji, błędzących w sieciach bezskalowych w tzw. stanie swobodnego przepływu, co oznacza, że pakiety te można traktować jak gaz nieoddziałujących cząstek, wykonujących błędzenie przypadkowe. Wyznaczono również średni czas powrotu do węzła. Jest on najkrótszy w przypadku, gdy prawdopodobieństwo przejścia cząstki do sąsiedniego węzła (tj. waga krawędzi w sieci, łączącej węzeł początkowy i sąsiedni) jest odwrotnie proporcjonalne do jego stopnia; ciekawe, że również inne zjawiska, w pewnym sensie związane z przepływem informacji w sieci, np. synchronizacja oscylatorów chaotycznych na sieciach złożonych, zachodzą najłatwiej dla takiego samego skalowania wag krawędzi. Podjęto również próbę oszacowania czasu przejścia cząstki między dwoma zadanymi węzłami, który okazał się zależny jedynie od stopnia węzła docelowego. Sposób uzyskania odpowiedniego równania (16) jest niejasny, a sam wynik ma, jak się wydaje, jedynie charakter zgrubnego oszacowania. Z kolei w pracy [7] wyznaczono teoretycznie krytyczną szybkość generacji pakietów, prowadzącą do zatkania sieci. Okazuje się, że w sieciach heterogenicznych węzły o różnych stopniach blokują się (tworzą się w nich kolejki niewysłanych pakietów) dla różnych szybkości generacji pakietów. Na podstawie starannej analizy numerycznej prawdopodobieństwa obsadzenia węzłów w klasycznych grafach przypadkowych i sieciach bezskalowych wyjaśniono jakościowe różnice w funkcyjnej zależności krytycznej szybkości generacji pakietów od wykładnika, opisującego zależność potęgową prawdopodobieństwa przejścia do danego węzła od jego stopnia. Pokazano, że prawdopodobieństwo zatkania węzła o zadanym stopniu zależy również od średniego stopnia wierzchołków w jego otoczeniu. Cennym wynikiem jest zatem wykazanie, że optymalnie zwiększając dysasortatywność sieci, można zwiększyć jej próg zatkania przy tych samych lokalnych regułach nawigacji.

Praca [10], opublikowana w prestiżowym czasopiśmie *Physical Review Letters*, stanowi próbę rozwiązania tzw. zagadki globalizacji. Otóż powszechnie akceptowanym modelem, opisującym strukturę sieci handlu światowego, jest tzw. model grawitacyjny, w którym wartość wymiany handlowej między krajami jest proporcjonalna do iloczynu ich PKB i odwrotnie proporcjonalna do odległości (np. między stolicami) w pewnej potęgzie α ; okazuje się, że wykładnik α rośnie systematycznie z czasem, tak że rola odległości w handlu światowym, pomimo postępującej globalizacji, paradoksalnie wydaje się wzrastać. Autorzy pracy [10] wykazują, że wykładnik α jest bezpośrednio powiązany (w istocie równy) z wymiarem fraktalnym „przestrzeni handlu”, zdefiniowanej poprzez pokrycie mapy świata kołami o promieniu proporcjonalnym do PKB i środkach w środkach geometrycznych państw. Zmiany, głównie polityczne (wzrost liczby państw), lecz również gospodarcze (zmiana PKB) powodują wzrost wymiaru fraktalnego i wykładnika α w czasie. Alternatywną metodą wykazania związku między strukturą przestrzeni handlu i wykładnikiem α jest model wyborów przestrzennych na sferze. Proponowane wyjaśnienie wzrostu wykładnika α w czasie jest dobrze udokumentowane przez porównanie z danymi empirycznymi, bardzo pomysłowe, „fizyczne” i nie wprowadza do modelu grawitacyjnego nowych parametrów i niepotrzebnej komplikacji.

W szczególności dowodzi, że wzrost wykładnika a nie powinien być wiązany ze wzrostem roli odległości lub kosztów związanych z odległością w handlu światowym, w związku z tym nie przeczy postępowi globalizacji.

Prace, przedstawione jako rozprawa habilitacyjna, stanowią jedynie część dorobku naukowego dr inż. P. Fronczaka, który należy uznać za obszerny i bardzo znaczący. Dr inż. P. Fronczak jest autorem bądź współautorem 28 artykułów, opublikowanych w czasopismach z listy JCR, w tym 24 po uzyskaniu stopnia doktora. Tematyka tych prac dotyczy głównie sieci złożonych, ponadto zagadnień kontroli i synchronizacji układów chaotycznych; ukazały się one w czasopismach o wysokiej randze (*Physical Review Letters, Physical Review E, Journal of Physics A, European Physical Journal B, Physica A, International Journal of Modern Physics C, Reports on Mathematical Physics*), a ich sumaryczny Impact Factor wynosi 59.905. Znaczącym i stosunkowo rzadkim przed uzyskaniem stopnia doktora habilitowanego osiągnięciem jest opublikowanie przez dr inż. P. Fronczaka wraz z żoną, dr inż. Agatą Fronczak, monografii „Świat sieci złożonych: od fizyki do internetu” (PWN, Warszawa, 2009), stanowiącej pierwsze w języku polskim, obszerne kompendium wiedzy na temat tej dynamicznie rozwijającej się dziedziny fizyki. Ponadto wyniki, uzyskane przez dr inż. P. Fronczaka, były przez niego lub osoby z nim współpracujące przedstawiane na wielu konferencjach naukowych, w tym w formie referatów na najbardziej znaczących periodycznych konferencjach środowiskowych, poświęconych fizyce statystycznej i fizyce układów złożonych, jak European Conference on Complex Systems ECCS, International School and Conference on Network Science NetSci, International Conference on Statistical Physics SigmaPhi, ESHIA/WEHIA i in.

Chociaż przy ubieganiu się o stopień doktora habilitowanego ocenie podlegają osiągnięcia naukowe, warto wspomnieć również o osiągnięciach dydaktycznych i organizacyjnych Habilitanta. Działalność dydaktyczna dr inż. P. Fronczaka obejmuje m.in. prowadzenie wykładów z metod numerycznych i podstaw systemów mikroprocesorowych na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej oraz wykładów kursowych z fizyki ogólnej dla studentów innych wydziałów. Ponadto dr inż. P. Fronczak pełni rolę promotora pomocniczego w dwóch przewodach doktorskich na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej, był promotorem prac magisterskich i inżynierskich.

W zakresie działalności organizacyjnej dr inż. P. Fronczak odnosił sukcesy w pozyskiwaniu środków na badania naukowe: jest kierownikiem projektu NCN typu SONATA BIS, był bądź jest głównym wykonawcą i wykonawcą w projektach europejskich w ramach 6. Programu Ramowego UE, akcji COST i współfinansowanych przez Europejską Fundację Nauki oraz przez Fundację Nauki Polskiej i Program Operacyjny Innowacyjna Gospodarka. Ponadto dr inż. P. Fronczak pełnił czasochłonną i odpowiedzialną funkcję asystenta Kierownika Projektu POKL „Przygotowanie i realizacja specjalności fizyka medyczna” i inne funkcje organizacyjne na macierzystym Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej.

Podsumowując, stwierdzam, że przedłożona rozprawa habilitacyjna oraz dorobek naukowy dr inż. Piotra Fronczaka spełniają kryteria, określone w art. 16 i 17 ustawy z dn. 14 marca 2003r O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Habilitant od wielu lat prowadzi działalność badawczą, charakteryzującą samodzielnego pracownika naukowego, w tym w sposób samodzielny i oryginalny formułuje tematykę i cele badawcze, sprawuje faktyczną opiekę nad doktorantami i aktywnie pozyskuje środki na badania naukowe. W związku z powyższym popieram wnioszek o nadanie dr inż. Piotrowi Fronczakowi stopnia doktora habilitowanego oraz wnoszę o dopuszczenie go do dalszych etapów postępowania w przewodzie habilitacyjnym.

A. Krawiecki