

Prof. dr hab. Janusz Hołyst

2 grudnia 2023

Wydział Fizyki
Politechniki Warszawskiej
ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

Recenzja

rozprawy doktorskiej magistra Jarosława Klamuta
pt. "Badanie stochastycznych sprzężeń dynamicznych metodami fizyki statystycznej"
przedstawionej Radzie Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu
Warszawskiego

1. Wstęp

Przedmiotem recenzowanej rozprawy były badania wybranych procesów stochastycznych za pomocą metod fizyki statystycznej, w szczególności badania aktywności rynków kapitałowych.

Jako **cele rozprawy** Doktorant podał:

1. Wyprowadzenie odpowiedniego formalizmu należącego do rodziny tzw. błędzeń losowych w czasie ciągłym będącego w stanie modelować pamięci związane z czasami międzyzdarzeniowymi charakterystycznymi dla analizowanych w pracy procesów.
2. Uogólnienie analizy multifraktałnych procesów stochastycznych.

Główną hipotezą badawczą rozprawy jest istnienie wpływu długookresowych zależności między czasami międzyzdarzeniowymi na autokorelację prędkości procesu stochastycznego. Rozprawa została przygotowana w języku polskim, łącznie z dodatkami ma 160 stron, podzielona jest na 7 rozdziałów i 10 dodatków a cytowana literatura obejmuje 136 pozycji.

Wyniki rozprawy zostały opublikowane w trzech publikacjach w czasopiśmie o zasięgu światowym oraz w jednym rozdziale monografii i są już cytowane przez innych autorów.

2. Najważniejsze elementy rozprawy

Rozdział pierwszy wprowadza nas do przedmiotu rozprawy. Autor przedstawia główne cele i tezy pracy, krótko omawia poszczególne rozdziały zawierające opisy dotychczasowego stanu badań i oryginalne wyniki swoich badań. Przedstawia także ogólne charakterystyki układów stochastycznych ze szczególnym uwzględnieniem pojęcia aktywności.

Rozdział drugi dotyczy danych empirycznych wykorzystywanych w rozprawie. Autor skupia się na szeregach czasowych opisujących transakcje na Warszawskiej Giełdzie Papierów Wartościowych i na tak zwanych faktów stylizowanych. Omówione zostały między innymi prawa dotyczące rozkładów logarytmicznym zwrotów, definicje aktywności, liniowe i nieliniowe autokorelacje zmian cen.

Rozdział trzeci poświęcony jest istniejącym modelom błędzenia losowego w czasie ciągłym. Autor przedstawia podstawy matematyczne takich teorii oraz ograniczenia tych narzędzi.

Rozdział czwarty jest pierwszym rozdziałem zawierającym oryginalne wyniki doktoranta. Pokazany jest wpływ czasów wyczekiwania, czyli czasów odpowiadających okresom między poszczególnymi transakcjami na giełdzie, na funkcję autokorelacji modułów zmian cen. Kluczowe dla tego rozdziału, a być może nawet dla całej rozprawy są rysunki 4.1 i 4.2. Na pierwszym z nich wykazano, że empiryczne autokorelacje krokowych szeregów okresów między transakcyjnych mają o wiele dłuższą pamięć (o wiele wolniej zanikają z ilością okresów) w porównaniu do analogicznej krokowej autokorelacji modułów logarytmicznych zmian cen. Na drugim z tych rysunków pokazano wykresy znormalizowanej autokorelacji czasowej modułów zmian cen dla czterech szeregów czasowych. Porównano dane empiryczne z danymi zastępczymi, które uzyskano poprzez przemieszanie wielkości skoków cenowych i/lub okresów międzytransakcyjnych. Zauważono, że pozostawienie oryginalnego szeregu okresów międzytransakcyjnych prowadzi do uzyskania znormalizowanej autokorelacji czasowej modułów zmian transakcji, która zanika z podobnym wykładnikiem jak oryginalny szereg czasowy. Wskazuje to na **dominującą rolę autokorelacji szeregów międzytransakcyjnych czasów szeregów czasów międztransakcyjnych w**

autokorelacji czasowej modułów prędkości całego procesu stochastycznego dla badanego szeregu czasowego.

Rozdział piąty jest zasadniczym modelem dotyczącym rozdziałem dotyczącym teoretycznej części tej rozprawy. Wprowadzony został oryginalny model błędzenia losowego w czasie ciągłym, który pozwala na uwzględnienie długookresowej pamięci szeregów czasowych czasów wyczekiwania, czyli czasów między transakcyjnych dla danych giełdowych. Model ten jest jednym z możliwych wytłumaczeń efektów opisywanych w rozdziale czwartym. W modelu przyjęto, że czasy wyczekiwania Δt^n losowane są z pewnego rozkładu statystycznego $\Psi(\Delta t^n)$ (zgodnym z rozkładem empirycznym okresów międzytransakcyjnych badanego szeregu czasowego) oraz, że każdy czas oczekiwania może posiadać **pewną liczbę powtórzeń** $v_n = 1, 2, 3 \dots$, która jest również losowana z innego rozkładu statystycznego $\omega(v_n)$. Funkcja $\omega(v_n)$ przyjęta jest w postaci dyskretnego rozkładu potęgowego z charakterystycznym wykładnikiem $\rho > 2$. Dla tego typu funkcji wykazano, że znormalizowana funkcja krokowej autokorelacji czasu wyczekiwania zanika potęgowo z wykładnikiem $\rho - 2$ (wzór 5.10). Ten sam zanik potęgowy pojawia się również dla autokorelacji prędkości zmian procesu stochastycznego, przy założeniu braku korelacji czasowych w szeregu zmian procesu. Prowadzi to do bardzo ciekawego wyniku prezentowanego w równaniu 5.63.

Rozdział szósty zawiera oryginalną metodę multifraktalnej analizy aktywności. Dzięki zastosowaniu lokalnych średnich czasów międzytransakcyjnych uzyskano niemonotoniczne zachowania uogólnionego wykładnika Hursta $h(q)$ oraz Hoeldera $\alpha(q)$ w funkcji rzędu fluktuacji q . Z uwagi na niemonotoniczność tej charakterystyki uzyskanie spektrum tych wykładników było niemożliwe przy zastosowaniu transformaty Legendra i wykorzystana w tym została w tym celu transformacja Legendre-Fenchela, którą może być stosowana dla funkcji wklęsło-wypukłych lub wypukło-wklęsłych. W efekcie doprowadziło to do **wielogłęziowej analizy multifraktalnej** analizowanego systemu. Osobliwości związane z punktami krytycznymi takich gałęzi przeanalizowane zostały z punktu widzenia teorii przejść fazowych.

Rozdział siódmy zawiera podsumowanie oraz główne wnioski z rozprawy.

3. Najciekawsze osiągnięcia rozprawy

Praca opiera się na ciekawych wynikach badań prowadzonych przez doktoranta, a sama rozprawa jest dobrze zredagowana.

Jako najciekawsze wyniki rozprawy uznaję:

- a) Wykazanie, że dla dużych okresów czasowych efekty pamięciowe dla autokorelacji szeregu okresów międzytransakcyjnych **badanych szeregów czasowych** mogą być o wiele silniejsze niż dla autokorelacji modułów logarytmicznych zmian cen (rys.4.1).
- b) Wykazanie, że znormalizowana autokorelacja czasowa modułów zmian cen jest zależna przede wszystkim od empirycznych czasów międzytransakcyjnych (rys.4.2).
- c) Stworzenie modelu błędzenia losowego w czasie ciągłym z uwzględnieniem efektów pamięciowych poprzez odpowiednie losowanie czasów wyczekiwania (rozdział 5.1).
- d) Przeprowadzenie obliczeń analitycznych pozwalający na wyznaczenie auto korelacji prędkości procesu stochastycznego z pamięcią czasów wyczekiwania (rozdział 5.2).
- e) Przeprowadzenie wielogałęziowej analizy multifraktalnej dla średnich czasów międzytransakcyjnych (rozdział 6).

4. Uwagi krytyczne

Lektura opiniowanej pracy nasunęła mi następujące uwagi krytyczne.

- 1) W rozprawie wysunięte zostały ciekawe tezy dotyczące układów z pamięcią ale analiza wykonana została jedynie dla kilku szeregów czasowych opisujących transakcje dla najbardziej płynnych spółek z Giełdy Papierów Wartościowych w Warszawie. Zabrakło analizy dla większej grupy szeregów czasowych, na przykład innych rynków finansowych lub danych dotyczących rytmu serca. Dlatego nie jest jasne, na ile hipoteza o dominującej roli pamięci okresów międzyzdarzeniowych ma ogólne zastosowanie.

- 2) Nie jestem przekonany czy charakterystyczne punkty na wykresie 6.10 można nazwać punktami przejść fazowych bowiem parametr q nie jest tutaj parametrem definiującym **równowagę termodynamiczną** układu ale parametrem określającym **sposób analizy układu**.
- 3) Brakuje informacji na czym miałyby polegać stabilność lub niestabilność „faz” omawianych na rysunku 6.10. Jak należałoby wyobrażać sobie zaburzenie układu prowadzące do zniknięcia „fazy” niestabilne?
- 4) Wyznaczone zostały wykładniki skalowania rozkładów potęgowych (np. rys. 5.7) ale nie została określona istotność statystyczna tak otrzymanych parametrów.
- 5) Nie znalazłem informacji jakie dane empiryczne posłużyły do analizy przedstawionej na rys. 4.1 i 4.2.

5. Wnioski końcowe

Pomimo moich krytycznych jestem w pełni przekonany, że rozprawa mgr Jarosława Klamuta jest interesującym opracowaniem w dziedzinie zastosowań metod fizyki statystycznej i dynamiki stochastycznej do analizy **skorelowanych czasowo** układów złożonych, w których w naturalny sposób można zdefiniować **zdarzenia**, ich amplitudy oraz czasy **międzyzdarzeniowe**. Uzyskano szereg oryginalnych wyników, które opisałem części trzeciej tej recenzji. Potwierdza to m.in. fakt opublikowania części badań uzyskanych przez autora rozprawy w trzech pracach w dobrych czasopiśmie o zasięgu światowym.

Recenzowana praca w zupełności spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim.
Stawiam wniosek o dopuszczenie pracy do publicznej obrony.



Prof. dr hab. Janusz Hołyst