

Prof. dr hab. Paweł Miłobędzki
Katedra Ekonometrii
Wydział Zarządzania
Uniwersytet Gdański
ul. Armii Krajowej 101
81-824 Sopot
tel/fax: +48 585231408
e-mail: pawel.milobedzki@ug.edu.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej p. Giuseppe Orlando
pt. „A Parsimonious Approach to Forecasting the Yield Curve: The CIR# Model”¹**

Pan Giuseppe Orlando podjął w swojej rozprawie doktorskiej ważny problem badawczy prognozowania stóp procentowych. Za narzędzie prognozowania wybrał model CIR#, tj. model Coxa-Ingersolla-Rossa, zaadaptowany przez Niego, Rosę Marię Mininni oraz Michele Bufalo do realiów rynkowych czasu po kryzysie na światowych rynkach finansowych lat 2007–2009, w szczególności zaś do ujemnych stóp procentowych i ich skoków². Zadeklarował wykazanie jego przewagi nad innymi modelami jednoczynnikowymi w dokładności prognozowania stóp procentowych oraz przydatności w modelowaniu ich struktury terminowej³. Przyjęcie tak nakreślonego celu zapowiada realizację ambitnego programu badawczego osadzonego w trzech głównych nurtach współczesnych finansów i ekonomii finansowej, tj. E43 – *Interest Rates: Determination, Term Structure, and Effects*; E47 – *Forecasting and Simulation: Models and Applications*, G12 – *Asset Pricing, Trading Volume, Bond Interest Rates*⁴, co wymaga dobrej znajomości teorii wyceny aktywów, podstaw analizy stochastycznej oraz umiejętności programowania. Po zapoznaniu się z rozprawą oraz pracami przywołanymi w przypisie nr 2, których Doktorant jest współautorem i zarazem autorem korespondującym stwierdzam, że umiejętności te posiadał On w stopniu co najmniej dobrym.

Tytuł rozprawy dobrze oddaje istotę rozważań w niej zawartych. Jej konstrukcja oraz zapowiedziany we *Wstępie* podział treści między poszczególne rozdziały są właściwe. Praca liczy 186 stron maszynopisu. Składa się z 7 rozdziałów⁵. Zawarte w niej rozważania są ilustrowane

¹ Podstawą sporządzenia recenzji jest pismo z dnia 20.09.2021 r. skierowane do mnie przez Dziekana Wydziału Ekonomii i Finansów Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu prof. dr. hab. Andrzeja Graczyka, zawierające prośbę o zrecenzowanie rozprawy. Recenzję przygotowałem kierując się zapisami art. 187 Ustawy z dnia 20.07.2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668 z późn. zm.).

² Zob.: [1] Orlando G, Mininni RM, Bufalo M (2018) A New Approach to CIR Short-Term Rates Modelling [in] Mili M, Samaniego Medina R, di Pietro F (eds). *New Methods in Fixed Income Modelling. Contributions to Management Science*. Springer, Cham: 35–44; [2] ----- (2019) Interest rates calibration with a CIR model. *Journal of Risk Finance* 20 (4): 370–387; [3] ----- (2020) A new approach to forecast market interest rates through the CIR model. *Studies in Economics and Finance* 37 (2), 267–292; [4] ----- (2020) Forecasting interest rates through Vasicek and CIR models: A partitioning approach. *Journal of Forecasting* 39: 569–579; [5] Orlando G, Buffalo M (2021) Interest rates forecasting: Between Hull and White and the CIR#—How to make a single-factor model work. *Journal of Forecasting* 40:1566–1580.

³ Zob. rozdz. 1.1 – *Goal, original contribution and hypotheses*, s. 8.

⁴ Zob. system klasyfikacji *Journal of Economic Literature*, <https://www.aeaweb.org/econlit/jelCodes.php>.

⁵ Treści wypełniające rozdz. 4–6 są prawie w całości bezpośrednio zaczerpnięte odpowiednio z artykułów [3], [4] i [5] przywoływanych w przypisie nr 2. Z informacji, którą uzyskałem w dniu 14.01.2022 roku po wcześniejszym skierowaniu prośby do Dziekana Wydziału Ekonomii i Finansów Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu o udokumentowanie przez Doktoranta jego wkładu w ich powstanie wynika, że udział ten był równy udziałowi

licznymi rysunkami i tablicami. Tych pierwszych jest w rozprawie aż 49, zaś tych drugich – 37. Zrozumienie treści komunikowanych na niektórych rysunkach bez odwołania się do tekstu rozprawy jest trudne z uwagi na niewielki ich rozmiar oraz/lub czarno-biały charakter⁶. Rozprawę kończy *Podsumowanie* oraz w miarę wyczerpujące, aktualne zestawienie stosownej literatury, na które składają się 162 pozycje z zakresu finansów i wyceny aktywów, w tym pozycje o zasadniczym znaczeniu w obranej przez Doktoranta dziedzinie. Rozprawa jest dość starannie przygotowana pod względem redakcyjnym. Język angielski, którym posługuje się Doktorant jest zrozumiały i naturalny.

W rozdz. 1 (*Interest rates and the role of central banks*) p. Orlando wprowadza Czytelnika w problematykę kształtowania się stóp procentowych. Przedstawia w nim kolejno pojęcie krzywej dochodowości, jej rodzaje i kształty, zależność od cyklu koniunkturalnego, sposoby jej estymacji, oddziaływanie na krzywą przez banki centralne oraz czynniki wpływające na realne stopy procentowe. Czyni to w sposób rzetelny, niemniej tylko w miarę wyczerpujący ze względu na wielość poruszanych zagadnień i niekiedy nazbyt syntetyczną formę przekazu⁷.

W rozdz. 2 (*Stochastic processes and short rate models*) Doktorant zapoznaje Czytelnika z podstawowymi pojęciami matematycznymi przydatnymi w modelowaniu stóp procentowych (m.in. procesów Wienera i Ornstein-Uhlenbecka, zwykłego i geometrycznego ruchu Browna, martynała, miary prawdopodobieństwa), przedstawia model-równanie dla stopy krótkiej oraz wybrane modele jedno- i wieloczynnikowe. Nie wykracza przy tym poza treści przekazywane na kursowym wykładzie z modelowania instrumentów finansowych, w tym stóp procentowych⁸. Pewną wartość dodaną tego rozdziału stanowi tabelaryczne zestawienie podstawowych modeli jedno- i wieloczynnikowych wraz z ich krótkim omówieniem w tekście (zob. tabl. 2.1 i 2.2, s. 43–44).

Z kolei rozdz. 3 (*The CIR, Vasicek and the Hull-White models*) jest poświęcony omówieniu trzech podstawowych modeli jednoczynnikowych: modelu Coxa-Ingersolla-Rossa (CIR), Vasicka oraz Hulla-White'a. Doktorant przybliży w nim własności tych modeli oraz ukazuje ograniczenia w ich zastosowaniu do modelowania stóp procentowych. Przedstawienie jest w miarę wyczerpujące i stanowi dobry punkt wyjścia do rozważań ujętych w rozdz. 4 (*The CIR# model: a new approach to forecast market interest rates*): najpierw do krótkiego omówienia zaproponowanych w literaturze przedmiotu modyfikacji modelu CIR, umożliwiających jego bardziej precyzyjne dopasowanie do obserwowanej krzywej dochodowości, a następnie do prezentacji własnej modyfikacji tego modelu – modelu CIR#, po raz pierwszy przedstawionego w pracy [1] przywoływanej w przypisie nr 2, oraz wyników jego zastosowania do modelowania i prognozowania stóp procentowych dla instrumentów denominowanych w euro i dolarze USA o zapadalnościach 1/360A–360/360A (dane ICE LIBOR) oraz 1Y–50Y (dane ICE swap).

Autorska procedura umożliwiająca odzwierciedlenie i prognozowanie za pomocą modelu CIR# natychmiastowych stóp procentowych jest czteroetapowa. Na pierwszym etapie Doktorant dzieli próbę realizacji natychmiastowej stopy procentowej dla pożyczki o danej zapadalności na podpróby. Podział przeprowadza w taki sposób, aby uchwycić istotne zmiany w wariancji tej stopy i zidentyfikować jej skoki. Następnie dokonuje translacji danych powiększając poszczególne realizacje stopy natychmiastowej o odpowiednią wielkość odpowiadającą 99-

pozostałych współautorów i został odpowiednio udokumentowany pisemnymi oświadczeniami. W identyczny sposób udokumentowany został wkład Autora rozprawy w powstanie artykułu nr [2].

⁶ Tak się dzieje np. w wypadku rys. 4.4, 4.12–4.16 oraz 6.4–6.6. Te same rysunki zamieszczone w artykułach są czytelne ponieważ sporządzono je w kolorze.

⁷ Zob. np. rozdz. 1.2.3–1.2.6, w których Doktorant przedstawia Europejski Bank Centralny, System Rezerwy Federalnej w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej oraz banki centralne Japonii i Szwajcarii, a także rozdz. 1.2.9 – *Importance of interest rate models for central banks* i rozdz. 1.2.10 – *Supervision and regulation*.

⁸ Zob. np. Brigo D, Mercurio F (2006) *Interest Rate Models—Theory and Practice with Smile, Inflation and Credit*. Springer, Berlin, rozdz. 3–5; Musiela M, Rutkowski M (2007) *Martingale Methods in Financial Modelling*. Springer, Berlin, rozdz. 10–11.

temu centylowi jej warunkowego rozkładu, przez co rozwiązuje problem ujemnych stóp procentowych zachowując przy tym ich dynamikę. Na drugim etapie dopasowuje model ARIMA(p, i, q) do danych w każdej podpróbie. Celem tego etapu jest uzyskanie reszt o odpowiednich własnościach (stacjonarności, normalności rozkładu, braku skorelowania), które zostaną wykorzystane na kolejnym, trzecim etapie procedury do kalibracji parametrów modelu CIR#. Na ostatnim etapie uzyskany na podstawie tego modelu szereg stóp procentowych Doktorant ponownie przekształca stosując tym razem przekształcenie przeciwne do przekształcenia z etapu drugiego. Etap ten i całą procedurę kończy porównanie dobroci dopasowania ponownie przekształconego szeregu do danych rzeczywistych za pomocą współczynnika zbieżności R^2 i błędu RSME.

Zaproponowana procedura w oryginalny sposób rozwiązuje problem uwzględnienia w modelu CIR skoków stóp procentowych oraz kalibracji parametru σ odzwierciedlającego zmienności natychmiastowej stopy krótkiej. Stanowi wkład p. Orlando w rozwój metod modelowania stóp procentowych. Uzyskane na jej podstawie wyniki wskazują na przewagę autorskiego modelu CIR# nad jego pierwowzorem. Wyznaczone na jego podstawie szeregi stóp procentowych dla instrumentów denominowanych w obu walutach i dla większości zapadalności, w tym wszystkie dla zapadalności do 360/360A, są lepiej dopasowane do szeregów stóp rzeczywistych niż te wyznaczone na podstawie oryginalnego modelu CIR (zob. rys. 4.8–4.11).

W opisie rezultatów uzyskanych w wyniku zastosowania powyższej procedury dwie kwestie wydają się być wartymi pogłębionego wyjaśnienia w trakcie obrony. Obie dotyczą sposobu podziału próby realizacji natychmiastowej stopy procentowej na podpróby i jego uzasadnienia. Pierwsza kwestia wynika z propozycji posłużenia się w tym celu jednoczynnikową analizą wariancji w wersji parametrycznej. Na s. 60 rozprawy Doktorant składa następującą deklarację: „... we start to partition the whole data sample into sub-samples, which we call groups, by a one-way ANOVA analysis to highlight statistically significant changes of variance in market spot rates and so give an account of possible jumps”. Jak wiadomo i co przywołuje Doktorant na tej samej stronie w akapicie poprzedzającym powyższą deklarację, jednoczynnikowa ANOVA to metoda służąca testowaniu hipotezy o równości średnich w wielu populacjach. Zakłada się w niej, że wariancje w populacjach są takie same. W sprawozdaniu z tego etapu badania empirycznego, zamieszczonego w rozdz. 4.4.1 (*Step 1: ANOVA test and market data translation*) nie odnalazłem weryfikacji tego założenia. Co więcej, choć z rozważań teoretycznych wynika, że w interesujących Doktoranta modelach CIR, Vasicka oraz Hulla-White’a stopa natychmiastowa jest stacjonarna⁹, w rozdziałach empirycznych rozprawy nie natrafiłem na potwierdzenia tego przypuszczenia za pomocą stosownego testu. Druga kwestia związana jest z użyciem algorytmu Lavielle’a do wykrycia nagłych zmian wariancji procesu (zob. rozdz. 4.4.4 – *The change points detection problem*)¹⁰. Czy algorytm ten może być stosowany w wypadku stwierdzenia niestacjonarności stopy krótkiej?

W kolejnych rozdziałach, tj. rozdz. 5–7, p. Orlando ukazuje przydatność zaproponowanego przez siebie podejścia do modelowania i prognozowania stóp procentowych dla depozytów w różnych walutach i o różnych zapadalnościach. I tak w rozdz. 5 (*Forecasting interest rates through Vasicek and CIR models: a partitioning approach*) czyni to w oparciu o modele Vasicka i CIR w odniesieniu do stóp procentowych o częstotliwości tygodniowej dla depozytów w euro o zapadalnościach 30/360A i 30Y z lat 2020–2016 (dane ICE LIBOR i ICE swap), a w rozdz. 6 (*The CIR# model: real data versus test data*) – w oparciu o model CIR#, zmodyfiko-

⁹ Zob. Tabela 2.1—Alternative Specifications of the Spot Interest Rates Process of Single Factor Models, zaczerpnięta z pracy Ait-Sahalia y (1996) Nonparametric Pricing of Interest Rate Derivative Securities. *Econometrica* 64 (3), 527–560 (tabl. 1, s. 528).

¹⁰ Zob. Lavielle M (2005) Using penalized contrasts for the change-point problem. *Signal Processing* 85, 1501–1510.

wany model CIR oraz model Hull-White'a w odniesieniu do stóp LIBOR o takiej samej częstotliwości dla depozytów w euro, dolarze USA, franku szwajcarskim oraz jenie japońskim o zapadalnościach od 1M do 6M z okresu 2009–2020. Z kolei w rozdz. 7 (*The predictive power of the CIR# model: An empirical analysis on Polish zloty interest rates*) kontynuuje analizy z rozdziałów poprzednich w odniesieniu do stóp WIBOR o częstotliwości tygodniowej dla depozytów o zapadalnościach od O/N do 1Y z lat 1995–2021 oraz stóp o częstotliwości dziennej dla depozytów o zapadalności 3M z tego samego okresu. W każdym z tych rozdziałów wnosi pewną wartość dodaną w dziedzinę co składa się w ogólności na dwa istotne osiągnięcia.

Najważniejszym dokonaniem Doktoranta jest wykazanie w rozdz. 5, że prognozy na jeden okres naprzód dla stóp procentowych dla depozytów w różnych walutach i o różnych zapadalnościach uzyskane na podstawie autorskiego modelu CIR# są dokładniejsze od prognoz uzyskanych na podstawie zmodyfikowanego modelu CIR oraz modeli Vasicka i Hull-White'a, tj. charakteryzują się mniejszymi co do wartości ocenami błędów RMSE (*root mean square error*) i NRMSE (*normalized root mean square error*) oraz – dla wszystkich rozważanych zapadalności – poza zapadalnością O/N dla dolara USA i franka szwajcarskiego – większymi wartościami ocen indeksu kierunkowej zgodności prognozy IDX. Są także dokładniejsze od tych, które uzyskuje się stosując procedurę EWMA, tj. od prognoz uzyskanych na podstawie modelu wykładniczo ważonej średniej ruchomej. Własności te model CIR# zachowuje także w okresach podwyższonej zmienności rynków (zob. tabl. 6.1–6.5).

Drugim istotnym dokonaniem Doktoranta jest wykazanie, że przewaga prognostyczna modelu CIR# nad rozważanymi jego konkurentami zostaje zachowana w wypadku zmiany sposobu segmentacji próby stóp procentowych, tj. zastąpienia procedury opartej o model ANOVA przez procedurę takiego podziału, który wynika z sekwencyjnego badania zgodności rozkładu empirycznego stóp procentowych z rozkładem normalnym lub niecentralnym rozkładem χ^2 , znajdującą swoje uzasadnienie w hipotezie głoszącej, iż rozkład stóp procentowych jest mieszaniną takich rozkładów (zob. rys. 5.7).

Zamieszczone w rozdz. 7 wyniki badania nad predykcyjnymi własnościami modelu CIR# dla stóp WIBOR potwierdzają jego własności i przewagi nad zmodyfikowanym modelem CIR i modelem Hull-White'a przedstawione w rozdz. 4–6, niemniej są mniej przekonujące z uwagi na to, że w ich prezentacji Doktorant pominął istotne szczegóły. Nie odniósł się bowiem do sposobu segmentacji próby stóp WIBOR oraz nie określił założeń przyjętych do kalibracji wykorzystanych modeli.

Zgłoszone powyżej krytyczne uwagi do rozprawy nie umniejszają mojej wysokiej jej oceny. Pan Giuseppe Orlando podjął w niej ważny, aktualny i złożony problem badawczy prognozowania stóp procentowych. Za narzędzie prognozowania wybrał model CIR#, tj. model Coxa-Ingersolla-Rossa, zaadaptowany przez siebie i swoich współpracowników do realiów rynkowych po kryzysie na światowych rynkach finansowych lat 2007–2009, zwłaszcza do ujemnych stóp procentowych i ich skoków. W oparciu o zróżnicowane zbiory danych obejmujące szeregi czasowe stóp procentowych dla instrumentów o szerokim spektrum zapadalności (od jednodniowej do 50-letniej), denominowanych w głównych walutach rezerwowych (dolarze USA, euro, franku szwajcarskim, jenie japońskim), a także polskim złotym (stopy WIBOR) wykazał jego przewagę w dokładności ich prognozowania nad wybranymi modelami jednozmiennymi – modelami CIR, Vasicka oraz Hull-White'a. Prowadząc dyskurs wykazał się dobrą znajomością literatury z zakresu wyceny aktywów oraz analizy stochastycznej. W odpowiedni sposób zaprojektował i przeprowadził badanie empiryczne. To, że rozprawa zbudowana jest na bazie 3 opublikowanych wcześniej artykułów nie budzi moim zdaniem wątpliwości. Wkład Doktoranta w ich powstanie był znaczący i został potwierdzony stosownymi oświadczeniami współautorów. Miejsca publikacji – dwukrotnie *Journal of Forecasting* (Wiley, IF=2,306, Cite Score = 3.0) i *Studies in Economics and Finance* (Emerald Publishing, Cite Score = 0,5) potwierdzają wysoki poziom artykułów. Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam,

że rozprawa doktorska p. Giuseppe Orlando spełnia wymagania ustawowe dla prac z dziedziny nauk społecznych i dyscypliny ekonomia i finanse. Wnoszę przeto o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Miksedel'.

Sopot, 20 stycznia 2022 roku.