Wiadomości Statystyczne. The Polish Statistician, 2022, vol. 67, 12, 1–38 DOI: 10.5604/01.3001.0016.1612
Statystyka w praktyce / Statistics in practice
Zgłoszony/submitted: 20.12.2021, poprawiony/revised: 6.11.2022, zaakceptowany/accepted: 25.11.2022

Właściwości statystyczne kursów kryptowalut i ich dynamika na rynku w porównaniu z wybranymi walutami fiducjarnymi[1]

Paweł Rokita[a], Radosław Pietrzyk[b]

Streszczenie. Rozwój kryptowalut nastąpił w wyniku dążenia pewnych grup informatyków kojarzonych z poglądami anarchistycznymi do stworzenia środka wymiany, który byłby zdecentralizowany i niezależny od instytucji kreujących politykę monetarną oraz od rządów państw i polityków i którego funkcjonowanie nie wymagałoby żadnych instytucji rozliczeniowych. Pierwszą kryptowalutą spełniającą większość tych postulatów był bitcoin. W stosunkowo krótkim czasie zyskał dużą popularność wśród inwestorów i osiągnął znaczną kapitalizację na rynkach finansowych, ale szybko stał się bardziej przedmiotem spekulacji niż środkiem wymiany. Dotychczas nie został wypracowany jednoznaczny pogląd na temat tego, czy bitcoin jest bardziej pieniądzem, czy przedmiotem spekulacji, czy też bliżej mu do aktywów inwestycyjnych. Pytanie, czym w praktyce jest bitcoin, nie tylko ma fundamentalne znaczenie dla całego projektu kryptowalut, lecz także jest istotne dla gospodarki w ogóle.

Celem badania omawianego w artykule jest porównanie właściwości statystycznych kursów kryptowalut na przykładzie bitcoina i kursów walut fiducjarnych oraz ocena, czy inwestycje na rynku bitcoina i na rynku walutowym można uznać za podobne pod względem rozpatrywanych cech. Analizowano podstawowe charakterystyki statystyczne względnych przyrostów kursów bitcoina i czterech walut fiducjarnych w parze z dolarem amerykańskim oraz wybrane właściwości procesów stochastycznych, które mogą być wykorzystywane do modelowania ich dynamiki. Ponadto przeprowadzono analizę teoretyczną dotyczącą niektórych kryptoaktywów, wyjaśniającą m.in., dlaczego w omawianym badaniu bitcoin jest porównywany do walut, a nie do aktywów inwestycyjnych.

Badanie wykazało, że bitcoin różni się od walut fiducjarnych pod względem wielu właściwości statystycznych. Poza ogólnie wyższą bezwarunkową zmiennością różnice zaobserwowano również w trendzie kursu względem dolara amerykańskiego czy poziomu względnych przyrostów kursu, warunkowej zmienności i rozkładów reszt.

Słowa kluczowe: kryptoaktywa, bitcoin, kursy walut, zmienność, kryptowaluta, waluta fiducjarna

JEL: C1, C4, G1

[1] Artykuł został opracowany na podstawie referatu wygłoszonego na XXXIX Międzynarodowej Konferencji Naukowej Multivariate Statistical Analysis MSA 2021, która odbyła się w dniach 8–10 listopada 2021 r. w Łodzi. / The article is based on a paper delivered at the 39th International Scientific Conference Multivariate Statistical Analysis MSA 2021, held on 8–10 November 2021 in Łódź.

[a] Empirica Sp. z o.o.; Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu, Wydział Ekonomii i Finansów; Polska / Empirica Sp. z o.o.; Wroclaw University of Economics and Business, Faculty of Economics and Finance; Poland.
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2467-5339. E-mail: pawel.rokita@ue.wroc.pl.

[b] Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu, Wydział Ekonomii i Finansów, Polska / Wroclaw University of Economics and Business, Faculty of Economics and Finance, Poland.
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6583-8424. Autor korespondencyjny / Corresponding author,
e-mail: radoslaw.pietrzyk@ue.wroc.pl.

© Główny Urząd Statystyczny
Artykuł udostępniony na licencji CC BY-SA 4.0 / Article available under the CC BY-SA 4.0 licence

Statistical properties of exchange rates of cryptocurrencies and their market dynamics as compared to selected fiat currencies

Abstract. The development of cryptocurrencies was the consequence of the endeavours of some circles of computer scientists associated with anarchist views to create a medium of exchange that would be decentralised, independent from institutions creating monetary policy, governments and politicians, and whose functioning would not require any clearing institutions. The first cryptocurrency that fulfilled most of these postulates was Bitcoin. In a relatively short time, it became very popular among investors and reached a significant capitalisation on financial markets, but soon became an object of speculation rather than a medium of exchange. So far, no common view has been established as to whether Bitcoin is closer to being money, an object of speculation or an investment asset. The question what Bitcoin really is has fundamental importance not only to the entire cryptocurrency project, but also to the economy in general.

The purpose of the study discussed in the article was to compare the statistical properties of cryptocurrency exchange rates (on the example of Bitcoin) with such properties of the exchange rates of fiat currencies, and to assess whether investments on the Bitcoin market can be considered similar to investments on fiat currency markets in terms of some analysed features. Basic statistical characteristics of the relative increments in the exchange rates of Bitcoin and four fiat currencies paired with the US dollar were analysed, as were some selected properties of stochastic processes that could be used to model the dynamics of those increments. In addition, a theoretical analysis of both Bitcoin and some other cryptoassets was carried out, which explained, among other things, why the study compared Bitcoin with currencies and not with investment assets.

The research demonstrated that there are differences between several statistical properties of Bitcoin and those of fiat currencies. In addition to the generally higher unconditional volatility, differences were observed between the trends in exchange rates of Bitcoin and fiat currencies versus the US dollar, the levels of relative increments in the exchange rates, the conditional volatility, and the residual distributions.

Keywords: cryptoasset, Bitcoin, exchange rates, volatility, cryptocurrency, fiat currency

1. Wprowadzenie

Powstanie w 2009 r. kryptowaluty bitcoin (BTC; Nakamoto, 2008), wykorzystującej technologię łańcucha bloków (ang. *blockchain*), rozpoczęło rozwój rynku kryptowalut oraz innych instrumentów działających na tej podstawie technologicznej. Bitcoin i pozostałe kryptowaluty, w przeciwieństwie do walut fiducjarnych[2], nie opierają się

[2] Waluty fiducjarne – takie, których funkcjonowanie opiera się na zaufaniu do emitenta, czyli najczęściej do banku centralnego, a konkretnie do jego polityki pieniężnej, której głównym celem w większości krajów jest utrzymanie stabilności cen wyrażanych w tej walucie (cel inflacyjny). Ponadto ważne jest zaufanie do banków kreujących pieniądz kredytowy oraz do instytucji nadzorujących system bankowy, a przede wszystkim do dawanych przez państwo gwarancji, że dana waluta jest prawnym środkiem płatniczym na jego terytorium. Prawo gwarantuje m.in. to, że przynajmniej w rozliczeniach obywatela z instytucjami państwa ta waluta zawsze będzie akceptowana jako środek zapłaty (np. podatków).

na zaufaniu do banku centralnego, który byłby ich emitentem, lecz wykorzystują rozproszony[3] system bazy danych, zorganizowany na zasadzie sieci równorzędnej typu każdy z każdym (ang. *peer-to-peer*; Shrivastava i in., 2020). Sieć ta pozwala na przechowywanie informacji o transakcjach oraz gwarantuje bezpieczeństwo i niezaprzeczalność dokonywanych płatności. Funkcjonowanie rynku obrotu kryptowalutami jest zbliżone do rynku walutowego, ponieważ notuje się na nim kursy kryptowalut w stosunku do innych kryptowalut, a także do walut fiducjarnych. Niemniej jednak kryptowaluty nie mają oparcia w realnej gospodarce i trudno wskazać ich siłę nabywczą. Ponadto rynek kryptowalut jest stosunkowo młody, dopiero poszukujący mechanizmów rzetelnej wyceny, a przez to potencjalnie mniej stabilny niż rynek walut fiducjarnych.

W niniejszym artykule porównywane są właściwości statystyczne kursów kryptowalut i walut fiducjarnych. Główną motywacją do przeprowadzenia takiej analizy było spostrzeżenie, że zastosowanie kryptowalut zgodnie z pierwotnym i najczęściej deklarowanym celem ich stworzenia – jako alternatywy dla pieniądza banków centralnych – wymagałoby stabilizacji ich wartości, zbyt duża zmienność mogłaby bowiem znacznie utrudnić lub wręcz uniemożliwić takie zastosowanie. Z tego powodu zmienność jest zasadniczym przedmiotem omawianego tu badania; za miarę wartości przyjęto kurs wymiany. Zbadano właściwości statystyczne względnych przyrostów kursów (dla uproszczenia określanych *stopami zwrotu*). Wartości kryptowalut w sensie ich siły nabywczej nie można jeszcze oceniać, ponieważ nie są one powszechnie stosowane jako środek wymiany. Dlatego skoncentrowano się na kursie wymiany względem waluty fiducjarnej, a konkretnie względem dolara amerykańskiego (USD).

Badania dotyczące właściwości notowań kryptowalut były podejmowane wielokrotnie. Na przykład Franke i in. (2019) w rozdziale *Financial Econometrics of Cryptocurrencies* analizowali indeks CRIX (Trimborn i Härdle, 2018) za pomocą metod ekonometrii finansowej. Założyli oni, że kryptowaluty należy traktować jako aktywa inwestycyjne, a nie substytuty walut fiducjarnych, przy czym nie miało to wpływu na wybór metod analizy szeregów czasowych. Badacze nie porównywali właściwości kryptowalut z właściwościami aktywów inwestycyjnych ani walut fiducjarnych. Po wstępnej analizie historycznych odczytów indeksu CRIX szukali modelu szeregu czasowego najlepiej dopasowanego do tych danych. Okazał się nim model ARIMA-tGARCH(1, 1) z resztami losowymi o rozkładzie *t*-Studenta. Ponieważ wyraźnie dominującym składnikiem indeksu CRIX przez większość czasu był bitcoin, który również w ostatnich latach pozostawał jego głównym składnikiem, można

[3] Różnicę między systemem rozproszonym a zdecentralizowanym wyjaśnia np. Baran (1962).

przypuszczać, że właściwości ekonometryczne szeregu czasowego kursu bitcoina są zbliżone do tych, które zostały wykazane w pracy Frankego i in. dla indeksu CRIX.

Badania wykorzystujące podobne metody ekonometrii finansowej prowadzili też Cermak (2017), Chen i in. (2016), Chu i in. (2017) czy Katsiampa (2017). Cermak zbudował modele regresji dla średniej i dla zmienności, w których zmienną objaśnianą była odpowiednio dzienna stopa zwrotu i zmienność dziennej stopy zwrotu dla kursu BTC–USD (USD/BTC), a zmiennymi objaśniającymi były opóźnione o dzień odpowiednie wielkości dotyczące kursów głównych walut do dolara amerykańskiego i podstawowych danych makroekonomicznych z rynków im odpowiadających (Stany Zjednoczone, Unia Europejska – strefa euro, Chiny i Japonia). Istotność parametrów stojących przy zmiennych dotyczących danego kraju bądź obszaru walutowego była następnie interpretowana jako wskaźnik powiązania bitcoina z danym obszarem walutowym i zmiennymi danego typu. Na tej podstawie autor wyciągnął wniosek, że istnieje pewne podobieństwo bitcoina do walut fiducjarnych w Stanach Zjednoczonych, strefie euro i w Chinach, natomiast w Japonii bitcoin zachowuje się bardziej jak aktywa inwestycyjne.

Yermack (2013) zauważył wielokrotnie wyższą zmienność kursu bitcoina do dolara amerykańskiego niż którejkolwiek z głównych walut oraz złota, a także zerową korelację względnych przyrostów kursu bitcoina oraz walut fiducjarnych i złota.

Corbet i in. (2019) podsumowali wyniki badań w zakresie potencjalnej roli kryptowalut jako aktywów inwestycyjnych, m.in. ich właściwości statystycznych (np. przydatności kryptowalut w roli dywersyfikatora portfela, możliwości występowania efektu zarażania rynków itp.). Duże znaczenie dla porównania kryptowalut zarówno z instrumentami rynku kapitałowego, jak i z klasycznymi walutami mają np. badania właściwości rynków kryptowalut dotyczącej skłonności do tworzenia się bąbli spekulacyjnych oraz następowania po nich nagłych i głębokich załamań kursu. Właściwość ta jest niekorzystna z punktu widzenia zastosowania kryptowalut jako aktywów inwestycyjnych i utrudnia ewentualne przyjęcie przez nie funkcji środka wymiany i przechowywania wartości, natomiast może dać okazję do osiągania ponadprzeciętnych zysków przez spekulantów, o ile potrafiliby oni trafnie rozpoznawać początek i koniec bąbla spekulacyjnego.

We wspomnianych wyżej badaniach bitcoin był albo rozpatrywany osobno, albo porównywany do walut bądź aktywów inwestycyjnych pod względem pewnego rodzaju zależności. Badania zależności mają ważne uzasadnienie ekonomiczne, ponieważ wnioski z nich płynące mogą być bardzo istotne np. dla analizy portfelowej i zarządzania ryzykiem. W badaniu omawianym w niniejszym artykule chodzi jednak o to, czy kurs bitcoina ma właściwości zbliżone do kursów walut fiducjarnych, skoro bitcoin został zaprojektowany jako substytut pieniądza. Należy przy tym zauważyć, że podobne ani nawet identyczne właściwości statystyczne nie muszą ozna-

czać zależności[4]. Interesujące jest też pytanie, czy bitcoin upodabnia się z czasem, pod względem wybranych właściwości, do walut fiducjarnych, a więc czy w miarę dojrzewania rynku tej kryptowaluty stabilizuje się ona i upodabnia do walut, których miała być substytutem. Jednak już pobieżna analiza wzrokowa wykresów szeregów czasowych kursów, względnych przyrostów kursów, reszt z modeli zastosowanych w badaniu oraz oszacowań warunkowej wariancji skłania do zaniechania poszukiwań odpowiedzi na to drugie pytanie. Wydaje się, że jest jeszcze za wcześnie, aby na podstawie obecnie dostępnych danych móc zaobserwować tendencję upodobniania się np. zmienności bitcoina do zmienności walut fiducjarnych w czasie. Z uwagi na to w badaniu przedstawionym w niniejszym artykule szukano modeli finansowych szeregów czasowych, które stosunkowo dobrze dopasowywałyby się do danych zgromadzonych dla bitcoina i wybranych walut fiducjarnych, oraz porównywano parametry tych modeli.

Główną badaną charakterystyką jest zmienność, ale trzeba zauważyć, że gdy podmioty podejmujące próby wykorzystania bitcoina jako środka wymiany rezygnują z tego, często uzasadniają swoją decyzję zupełną nieprzewidywalnością kursu tej kryptowaluty. Odczuwana przez użytkownika nieprzewidywalność może zaś polegać nie tylko na wysokiej zmienności. Mogą za nią odpowiadać grube ogony rozkładów stóp zwrotu lub np. dynamika procesu, cechująca się zmienną w czasie warunkową zmiennością, podczas gdy inwestor (użytkownik) spodziewał się zmienności stabilnej w czasie. Może wreszcie wynikać z wpływu czynników o charakterze nagłej zmiany strukturalnej, takiej jak wprowadzenie nowych regulacji prawnych, oficjalne przyjęcie kryptowaluty jako prawnego środka płatniczego albo wycofanie się z takiej decyzji, wejście nowego dużego inwestora lub grupy inwestorów na rynek bądź też wyjście z rynku, nowe zastosowania istniejącej kryptowaluty, pojawienie się konkurencyjnej kryptowaluty itp. Wszystkie te możliwości są omawiane w artykule, ale przedstawione badanie empiryczne dotyczy właściwości szeregów czasowych kursów bitcoina i wybranych walut fiducjarnych wobec dolara amerykańskiego. Celem badania jest porównanie statystycznych właściwości kursu kryptowalut na przykładzie bitcoina i kursów walut fiducjarnych oraz ocena, czy inwestycje na rynku bitcoina i na rynku walutowym można uznać za podobne pod względem analizowanych cech.

2. Bitcoin i inne kryptowaluty

Przed przystąpieniem do badania właściwości statystycznych kursu kryptowalut warto scharakteryzować ich rynek i omówić naturę kryptowalut z punktu widzenia inwestorów. Należy także rozważyć, czy kryptowaluty są bardziej substytutem pie-

[4] Na przykład dwa szumy losowe z przyrostami o takim samym rozkładzie miałyby identyczne właściwości statystyczne, a jednocześnie byłyby od siebie niezależne.

niądza, czy rodzajem aktywów spekulacyjnych lub inwestycyjnych, a także zwrócić uwagę na cechy kryptowalut, dzięki którym można je uznać za nową jakość w gospodarce, oraz na specyfikę kursów kryptowalut.

2.1. Rola kryptowalut jako przedmiotu obrotu na rynkach finansowych

Najważniejszą i najstarszą kryptowalutą jest bitcoin. Z tego powodu został on wybrany jako reprezentant rynku, chociaż kryptowaluty różnią się pod wieloma względami, takimi jak zastosowana technologia, cel powstania, rzeczywiste zastosowanie oraz powiązanie z rynkiem realnych dóbr i usług. Obecnie, mimo że rozwinęło się wiele alternatywnych projektów opartych na technologii łańcucha bloków (np. sieć Ethereum) i pokrewnych technologiach, bitcoin wciąż odpowiada za ponad 40% kapitalizacji całego rynku kryptowalut (Statista, b.r. a).

W omawianym badaniu bitcoin jest porównywany z wybranymi walutami fiducjarnymi. Należy zatem wyjaśnić, dlaczego nie przeprowadzono takiego porównania z aktywami inwestycyjnymi, czy to klasycznymi (akcje i obligacje), czy mogącymi być przedmiotem inwestycji alternatywnych[5].

Yermack (2013) zauważył, że bitcoin ma zmienność o rząd wielkości większą od zmienności szeroko używanych walut fiducjarnych, co nie sprzyja pełnieniu funkcji miernika wartości czy środka przechowywania wartości. Ponadto wykazuje on właściwie zerową korelację z kursami walut fiducjarnych, przez co jest bezużyteczny jako instrument hedgingu[6], a pozycję w bitcoinie zajętą przez inwestora bardzo trudno byłoby zabezpieczać poprzez hedging. Bitcoin nie ma też dostępu do systemu bankowego z gwarancją depozytów; ponadto na razie nie denominuje się w nim kredytów i pożyczek. Zdaje się więc zachowywać raczej jak aktywa o wysokim ryzyku (potencjalnie atrakcyjne dla spekulantów) niż jak waluta.

Andrew Bailey, prezes Bank of England, ostrzegał na konferencji prasowej w czerwcu 2021 r.[7], że kryptowaluty takie jak bitcoin nie są pieniądzem i nie mają zabezpieczenia w postaci gwarancji państwa. Zwracał też uwagę, że bitcoin ma zerową wartość fundamentalną (wewnętrzną – ang. *intrinsic value*). Podobnie twierdził Warren Buffett na gruncie rozważań, czy miałoby sens użycie bitcoina lub podobnych kryptowalut jako aktywów inwestycyjnych. Buffett wielokrotnie podkreślał, że bitcoin nie ma żadnej wartości fundamentalnej (Friedman, 2021); wyrażał też opinię, że zakup bitcoina nie jest inwestycją. Proponował, aby rozróżnienia między inwesty-

[5] Metale szlachetne, surowce przemysłowe niebędące metalami szlachetnymi, nieruchomości, inwestycje w kapitał prywatny, inwestycje w przedsiębiorstwa zagrożone upadłością i w restrukturyzacji, jednostki uczestnictwa i certyfikaty inwestycyjne funduszy inwestycyjnych wysokiego ryzyka, w tym funduszy hedgingowych, dzieła sztuki, dobra kolekcjonerskie niebędące dziełami sztuki itp.

[6] Hedging jest tu rozumiany jako zabezpieczenie przed ryzykiem rynkowym na zasadzie przyjmowania pozycji, których zmiany wartości są skorelowane ujemnie ze zmianami wartości pozycji zabezpieczanej.

[7] *City UK Annual Conference* (Bank of England, 2021).

cją a spekulacją dokonywać nie na podstawie kryterium horyzontu inwestycyjnego i ryzyka, lecz ze względu na podejście stron transakcji do wartości fundamentalnej przedmiotu transakcji (tj. czy zwracają na nią uwagę, czy też jest im ona obojętna). Jego zdaniem odpowiednim kryterium jest to, czy przedmiot inwestycji „coś produkuje" (Montag, 2018), czy też inwestor jedynie żywi nadzieję, że ktoś odkupi go od niego drożej, bo sam będzie miał nadzieję na znalezienie kolejnego nabywcy gotowego zapłacić jeszcze więcej. W tym drugim przypadku jest to spekulacja, nawet gdy zakładany horyzont inwestycyjny jest długi. Byłoby to spekulacją również wtedy, gdyby zmienność czy ryzyko mierzone w inny sposób wcale nie wydawały się szczególnie wysokie.

Te krytyczne głosy można podsumować stwierdzeniem, że kryptowaluty nie są ani pieniądzem, ponieważ nie wspiera ich żaden bank centralny (żadne państwo ani organizacja państw nie gwarantuje możliwości i legalności użycia kryptowalut jako środka wymiany, pomiaru i przechowywania wartości), ani aktywami inwestycyjnymi, bo nie mają wartości fundamentalnej.

Pozostaje pytanie, czy o kryptowalucie, niebędącej oficjalną walutą żadnego państwa ani organizacji państw, można mówić jako o pieniądzu. W historii można znaleźć wiele przykładów pełnienia wszystkich lub niemal wszystkich funkcji pieniądza przez pewne trudne do podrobienia dobro, zwłaszcza łatwe do przenoszenia i przechowywania. Gwarancja państwa mogła być okolicznością sprzyjającą traktowaniu go jako pieniądza, ale nie była warunkiem koniecznym. Takim dobrem bywały muszle, ziarna zbóż, koraliki, kamienie szlachetne, metale szlachetne i wiele innych, przy czym tylko część z nich miała jakąś wartość użytkową lub ozdobną (np. Ammous, 2018).

Skoro kryptowaluty niezabezpieczone aktywami, czyli takie jak bitcoin, nie są aktywami inwestycyjnymi, to tym bardziej należy się skupić na innych ich właściwościach. W takim ujęciu główna wartość bitcoina wynika z jego użyteczności jako instrumentu transferu i przechowywania informacji o zawartych transakcjach.

Zarówno cel stworzenia kryptowalut, jak i sama nazwa sugerują porównanie do walut fiducjarnych. Pierwotną rolą kryptowalut miało być ich zastosowanie jako środka wymiany (Nakamoto, 2008), przy uwzględnieniu różnicy w stosunku do walut fiducjarnych, czyli braku gwarancji państwa lub polityczno-gospodarczej wspólnoty państw tworzących unię walutową, jaką mają waluty fiducjarne[8]. Przede wszystkim chodzi o gwarancję: że dana waluta stanowi prawny środek płatniczy na

[8] Jak dotąd żadne państwo należące do liczących się gospodarek światowych nie wprowadziło własnej kryptowaluty, choć taka możliwość jest badana przez banki centralne. Jedynym państwem, które przyjęło bitcoin jako oficjalny środek płatniczy, jest Salwador, ale ponieważ bitcoin obowiązuje tam dopiero od 7 września 2021 r., jest za wcześnie, aby przewidywać, czy to rozwiązanie przyniesie sukces i jak długo ta kryptowaluta pozostanie oficjalną walutą Salwadoru.

określonym obszarze; że regulowane i nadzorowane przez odpowiednie instytucje banki mają prawo przyjmować depozyty, udzielać kredytów, dokonywać rozliczeń oraz utrzymywać rezerwy w tej walucie; że nad stabilnością cen wyrażanych w tej walucie czuwa powołana do tego instytucja; że w rozpatrywanej walucie będzie można zapłacić podatki. Takie umiejscowienie waluty fiducjarnej w systemie prawnym wymusza powiązanie między nią a gospodarką państwa lub organizacji państw, niezależnie od aktualnych nastrojów uczestników rynku. W przypadku kryptowalut tego rodzaju powiązania z mocy prawa nie ma.

2.2. Technologia kryptowalut a ich wartość

Kryptowaluty tworzą nową jakość, przynajmniej jeśli chodzi o przesyłanie i przechowywanie informacji o zawartych transakcjach. Ich sieci są co prawda systemami rozliczeniowymi, ale nowego rodzaju. Połączone w nich zostały następujące cechy:

- sieć rozproszona typu każdy z każdym;
- sieć publiczna (brak właściciela);
- własny wbudowany żeton elektroniczny służący do rozliczania transakcji, w tym do wynagradzania uczestników sieci, którzy udostępniają swoje zasoby (moc obliczeniową i przestrzeń dyskową) na utrzymanie działania sieci;
- rozproszona księga główna[9];
- kryptograficzne zabezpieczenie datowania wpisów do księgi głównej, m.in. uniemożliwiające podwójne wydawanie tych samych żetonów.

Dzięki połączeniu tych elementów sieć nie wymaga zaufanych pośredników ani zaufania między poszczególnymi jej uczestnikami. Może też działać w pełni automatycznie – nie potrzebuje scentralizowanego operatora. Żetony elektroniczne wbudowane w konstrukcję systemu mają szereg potencjalnie użytecznych właściwości. W przypadku wielu kryptowalut to właśnie technologia będąca podstawą ich funkcjonowania jest postrzegana jako główne źródło ich hipotetycznej wartości. Technologia ta umożliwia ich przechowywanie i przesyłanie pomiędzy uczestnikami sieci w sposób trudny do zakłócenia czy zmanipulowania, zapewnia też ich praktyczną niepodrabialność. Pozwala, aby w konstrukcję danej kryptowaluty został wpisany

[9] Rozproszona księga główna nazywana jest także *rejestrem rozproszonym*, a ten termin odnosi się do technologii rozproszonej bazy danych, której rejestry są replikowane, współdzielone i zsynchronizowane w ramach konsensusu różnych rozproszonych geograficznie osób, firm lub instytucji (Piech, 2016). Należy dodać, że często używa się zamiennie pojęć *rejestr rozproszony* i *łańcuch bloków*, choć nie są one tożsame. *Rejestr rozproszony* jest pojęciem ogólniejszym, a *łańcuch bloków* to taki rodzaj rozproszonej bazy danych, w której rekordy można dodawać tylko sekwencyjnie jeden za drugim, czyli jest to lista rekordów. Rekordy są grupowane w bloki, których nie można usuwać ani zmieniać. Dodatkowo lista jest zabezpieczona kryptograficznie, dzięki czemu wszelkie zmiany w jej historii są niemożliwe lub bardzo utrudnione. Taka technologia nadaje się szczególnie dobrze do rejestrowania zdarzeń, które nie mogą być dublowane (np. rejestrowanie transakcji, tak aby te same środki nie zostały dwa razy wydane, rejestrowanie głosów w różnego rodzaju głosowaniach, zarządzanie magazynami, śledzenie przesyłek i środków transportu itp.).

algorytm jej podaży, niemożliwy do zmiany arbitralną decyzją pojedynczego uczestnika rynku (bez względu na to, czy jest to uczestnik indywidualny, instytucjonalny bądź państwo lub organizacja państw). Cechy te nie gwarantują, że dana kryptowaluta będzie miała powiązanie z rynkiem dóbr i usług ani że będzie zabezpieczona aktywami lub że jej wartość będzie przez kogokolwiek gwarantowana, ale zapewniają kryptowalucie potencjał środka wymiany o funkcjonalności zbliżonej do pieniądza. A wartość wewnętrzna, rozumiana jako Buffettowska zdolność do „produkowania czegoś", nie wydaje się konieczna do takiego stosowania kryptowalut.

Istnieją też żetony elektroniczne oparte na tej samej lub podobnej technologii, ale zabezpieczone realnymi aktywami (np. elektroniczne akcje emitowane w technologii łańcucha bloków lub elektroniczne żetony zabezpieczone depozytami złota, jak np. PAX coin czy theter gold), powiązane z cenami towarów lub innymi wskaźnikami (np. opcje ZrCoin) lub zabezpieczone depozytami w walutach fiducjarnych (*stable coins*, np. theter USD). Ponadto sieć, w której funkcjonuje dany żeton, może nie być publiczna, lecz należeć w całości do jednego przedsiębiorstwa lub instytucji finansowej, a wtedy wartość podmiotu znajduje w jakimś stopniu odzwierciedlenie w wartości żetonu (np. ripple). Zdarza się więc, że wartość fundamentalna żetonu wynika z wartości operatora – właściciela sieci.

W przypadku kryptowalut niezabezpieczonych, takich jak bitcoin, nie ma wbudowanego mechanizmu, który na poziomie samej ich konstrukcji wiązałby je z gospodarką. Na przykład sieć bitcoina nie pobiera informacji z serwisów scentralizowanych giełd, izb rozliczeniowych, rynku międzybankowego, serwisów informacyjnych, instytucji finansowych, przedsiębiorstw ani instytucji państwa. Brak takiego kanału wymiany informacji gospodarczej sprawia, że w konstrukcji bitcoina nic nie wymusza powiązania jego wartości z wartością jakichkolwiek aktywów, ale to nie wydaje się dyskwalifikować bitcoina jako środka wymiany wartości. Wspomniane wcześniej muszle czy koraliki także nie były powiązane z dobrami czy usługami o wyższej rzeczywistej wartości użytkowej niż one same. O wiele bardziej problematyczna wydaje się duża zmienność kursu bitcoina w stosunku do walut fiducjarnych. Obecnie podawanie cen towarów lub usług w bitcoinach byłoby bardzo kłopotliwe zarówno dla oferującego, jak i dla potencjalnych nabywców.

System rozliczeniowy, którym jest typowy projekt kryptowalutowy, może mieć różne zastosowania i dzięki temu własną wartość użytkową, a wartość wynikająca z użyteczności systemu może stanowić podstawę wartości wbudowanego weń żetonu. Koncepcja systemu rozliczeniowego opartego na technologii łańcucha bloków lub pokrewnej jest jednak łatwa do skopiowania. Dowolny podmiot może stworzyć własny projekt kryptowalutowy z własnym żetonem. Wówczas różnica między starym a nowym projektem będzie tylko taka, że stary ma już sieć użytkowników, w tym użytkowników lojalnych, a nowy musi ją sobie dopiero zbudować. Jakość

i użyteczność samych rozwiązań informatycznych leżących u podstaw obu systemów nie miałyby wpływu na ewentualną różnicę ich wartości; decydować o niej mogłyby liczba użytkowników, ich lojalność, rozpoznawalność żetonu i jego ogólny odbiór społeczny. System rozliczeniowy bez użytkowników chcących dokonywać transakcji przy jego użyciu nie miałby żadnego znaczenia gospodarczego, natomiast system z milionami użytkowników mógłby odgrywać istotną rolę w gospodarce. Wtedy żeton miałby pokrycie w wartości dóbr i usług, które można byłoby za niego kupić. A więc już nie wartość samego rozwiązania informatycznego (projektu kryptowalutowego) byłaby fundamentem wartości żetonu, lecz odwrotnie: wartość żetonu, odzwierciedlająca wartość tego, na co go można wymienić w realnej gospodarce, stanowiłaby fundament wartości projektu kryptowalutowego.

Można pokusić się o przypuszczenie, że istnieją dwa główne składniki wartości kryptowaluty. Pierwszym jest wartość systemu rozliczeniowego opartego na pewnym innowacyjnym rozwiązaniu informatycznym, a drugim – wartość dóbr i usług, dla których żeton wbudowany w ten system rozliczeniowy stanowi środek wymiany i miernik wartości. Idąc dalej tym tokiem rozumowania, w cyklu życia kryptowaluty rozwijającej się w kierunku zgodnym z pierwotnym celem jej powstania (czyli stającej się pieniądzem) na początku oczekiwalibyśmy dominującej roli pierwszego składnika jej wartości. Będzie on jednak obarczony dużym ryzykiem ze względu na łatwość skopiowania projektu z całą jego funkcjonalnością i udostępnienia pod inną nazwą. W miarę upowszechniania się danego żetonu w rozliczeniach można oczekiwać wzrostu udziału drugiego składnika wartości, aż stanie się on jedynym istotnym składnikiem. Dzisiaj jeszcze nie da się sprawdzić empirycznie prawdziwości tych przypuszczeń, zwłaszcza co do drugiej fazy rozwoju, ponieważ nie weszła w nią jeszcze żadna kryptowaluta.

Omawiane dwa składniki nie wyczerpują dyskusji o źródłach wartości kryptowalut. Skoro projekty mogą mieć identyczną funkcjonalność pod względem technicznym, a różnić się tylko nazwą, liczbą użytkowników, rozpoznawalnością i odbiorem społecznym, to być może należy uwzględnić również np. rozwiązania z obszaru wyceny marki, z zastrzeżeniem zasadniczej odmienności marki kryptowaluty od marki produktów, usług czy całych przedsiębiorstw. O ile bowiem marka w klasycznym rozumieniu pomaga sprzedawać produkty lub usługi, o tyle marka projektu kryptowalutowego pomaga przyciągać nowych użytkowników. Jeżeli – jak w przypadku bitcoina – jest on projektem rozproszonym, a ponadto opartym na otwartym kodzie, to nie można mówić o jego właścicielu, i to nie tylko w sensie praw majątkowych czy praw do sprawowania zarządu, lecz także w sensie technicznym (twórca nie ma większych możliwości wpływania na projekt niż inni użytkownicy). Skoro zaś nie ma właściciela, to nie jest adekwatne pytanie, jaką korzyść przynosi mu rozpoznawalność marki. Niemniej jednak rozpoznawalność projektu kryptowalutowego może

wpływać na jego adopcję i przez to zwiększać udział drugiego składnika wartości żetonu. A ponieważ jest to składnik teoretycznie nieograniczony (dokładniej – ograniczony wartością całej gospodarki), należy brać pod uwagę czynniki znacząco na niego wpływające, do których należą, jak się wydaje, rozpoznawalność projektu, jego odbiór społeczny i lojalność dotychczasowych użytkowników. Ich analiza nie jest przedmiotem badania prezentowanego w tym artykule, jednak omówienie tych kwestii ma znaczenie dla dyskusji, czym jest bitcoin i inne kryptowaluty i czy mają one wartość fundamentalną, a jeśli tak, to jakie są jej źródła. Sformułowane tu przypuszczenia stanowią argument za uznaniem bitcoina za instrument zbliżony bardziej do walut niż do aktywów inwestycyjnych.

2.3. Ogólne właściwości kursów kryptowalut

Bardzo duży wpływ na zachowanie się kursów kryptowalut ma to, że ich rynek nie jest jeszcze uregulowany ani nadzorowany. Choć projekty jego uregulowania są rozważane, to obecnie nie istnieje pojęcie *przestępstwa giełdowego* na platformach wymiany kryptowalut. Duża jest też rola platform obrotu typu każdy z każdym. Te z założenia mają się wymykać wszelkim regulacjom nakładanym przez państwa i w związku z ich konstrukcją zapewne tak będzie się działo, nawet gdy powstaną odpowiednie przepisy prawa oraz instytucje nadzorcze. W obecnym stanie prawnym i faktycznym rynek kryptowalut jest więc bardzo podatny na manipulacje, np. takie jak manipulacje typu pump-and-dump (Hamrick i in., 2021) czy tworzenie pozornej płynności w ramach procederu wash-trading (Imisiker i Tas, 2018; Pennec i in., 2021).

Niezależnie od wyżej opisanych zjawisk nagłe znaczne zmiany kursu, jakie często się zdarzają, są powodowane transakcjami przeprowadzanymi przez inwestorów, których głównym obszarem działalności są o wiele większe światowe rynki walutowe i kapitałowe. Za niestabilność kursów kryptowalut odpowiada stosunkowo mała kapitalizacja globalnego rynku kryptowalut w porównaniu z pozostałymi rynkami, w połączeniu z rosnącym zainteresowaniem inwestorów instytucjonalnych. Kapitalizacja rynku krypowalut wynosi 2753 mld USD (Statista, b.r. b), co stanowi tylko ułamek kapitału, jaki teoretycznie mógłby jeszcze zostać zainwestowany, więc kursy na nim są podatne na istotne zaburzenia w przypadku pojawienia się wielomiliardowych zleceń od dużych inwestorów.

Omawiając takie właściwości, jak wysoka zmienność, tendencja do powstawania bąbli spekulacyjnych i krachów, a także podatność na manipulacje rynkowe według schematu pump-and-dump, należy wspomnieć o kryptowalutach memowych (żetonach memowych – ang. *meme coins*), czyli o kryptowalutach, które utworzono bądź to dla żartu, bądź jako narzędzie wyłudzenia pieniędzy, a które potem zyskały nad-

spodziewanie dużą popularność wśród inwestorów, a także spekulantów. Niektóre zostały wypromowane przez celebrytów lub influencerów. Nie mają one takiego znaczenia jak bitcoin czy ether, ale na ich przykładzie można pokazać niektóre cechy wspólne dla kursów głównych i pomniejszych kryptowalut. Jest to zwłaszcza skłonność do powstawania bąbli spekulacyjnych, przy czym w przypadku żetonów memowych zjawisko to jest silniejsze niż na rynkach głównych kryptowalut.

Na początku swojego istnienia kryptowaluty memowe mają przeważnie bardzo niską jednostkową wartość rynkową. Czasem rośnie ona według wzorca typowego dla bąbla spekulacyjnego, po którym następuje załamanie i powrót do niskiej wartości. Są jednak i takie kryptowaluty memowe, których wartość zwiększa się od wielu lat. Mają zwykle bardzo wysoką zmienność, ale też długoterminowy trend wzrostowy. Zdarzają się bąble spekulacyjne oraz głębokie załamania, lecz wartość po krachu jest na wyższym poziomie niż na początku bąbla – i ten schemat się powtarza. Najbardziej znanym przykładem kryptowaluty memowej jest dogecoin, stworzony przez programistów Billy'ego Markusa i Jacksona Palmera (którzy od początku lojalnie informowali potencjalnych inwestorów i użytkowników, że nie jest to poważna kryptowaluta, lecz żart; Chohan, 2017). Od powstania w 2013 r. dogecoin osiągnął kapitalizację rzędu 30 mld USD (23 listopada 2021 r.), a najwyższy dotychczas poziom kapitalizacji to ponad 88 mld USD w szczycie 7 maja 2021 r. Cena tej kryptowaluty wzrosła od nieco ponad 0,07 centa na początku obrotu w grudniu 2013 r. do ponad 22 centów 23 listopada 2021 r., czyli o 31 328,57% w ciągu ośmiu lat, co daje przeciętną roczną stopę zwrotu na poziomie ok. 105%. Z kolei roczny wzrost ceny od 23 listopada 2020 r. do 23 listopada 2021 r. nastąpił od wartości 0,003648 USD do 0,2283 USD, czyli o ponad 6158%, a np. miesięczny od 1 kwietnia 2021 r., kiedy 1 dogecoin kosztował 0,06199 USD, do 1 maja 2021 r., gdy jego cena rynkowa wynosiła już 0,393 USD, oznaczał względny przyrost w skali miesiąca o ponad 542%. W skali roku dawałoby to stopę zwrotu ponad 6507% przy kapitalizacji prostej (i aż 492 657 576 428% przy złożonej kapitalizacji miesięcznej, z tym że powtarzanie tej inwestycji przy tak wysokiej stopie zwrotu co miesiąc przez rok jest jednak możliwością czysto hipotetyczną). Trzeba zaznaczyć, że w całym okresie istnienia dogecoina nie zaistniały żadne przesłanki pozwalające przypuszczać, że zaczął on mieć jakąkolwiek wartość fundamentalną. Obecnie notuje się kilka tysięcy projektów uważanych za kryptowaluty memowe (ok. 5000 aktywnych – stan na listopad 2021 r.).

Obserwowanie, w jaki sposób zachowują się ceny żetonów memowych, wolumen obrotów czy kapitalizacja rynku, może pomóc w lepszym zrozumieniu funkcjonowania rynku kryptowalut. Już pobieżna analiza wykresów kursów i wolumenu obrotów dla właściwie każdej z nich pozwala zauważyć oczywiste przykłady bąbli spekulacyjnych i krachów o przebiegu podobnym do tych obserwowanych na rynku

bitcoina, ale o dużo większych względnych zmianach kursu. Można z tego wywieść przypuszczenie, że bitcoin podlega podobnym mechanizmom. Ponieważ jednak kapitalizacja rynku bitcoina jest wyższa[10] niż któregokolwiek z żetonów memowych, co może w naturalny sposób podnosić głębokość rynku (ang. *market depth*) i jego sprężystość (ang. *market resilience*), potrzebne są większe szoki, aby spowodować dużą względną zmianę kursu bitcoina. Więcej na temat tych dwóch oraz innych miar płynności rynku można znaleźć w pracach Bensona i in. (2015), Díaza i Escribano (2020) czy Olbryś i Mursztyna (2016, 2017a, b).

Kryptowaluty memowe są oczywiście przedmiotem spekulacji, a nie inwestycją w sensie, jaki nadaje jej Buffett – to tłumaczy bąble spekulacyjne. Jednak oprócz tego mogą być postrzegane jako dobra kolekcjonerskie albo dobra o wartości sentymentalnej (np. żeton o nazwie będącej nazwiskiem czy pseudonimem lubianego aktora i przez niego promowany), co sprawia, że przewidywanie, jak długo potrwa faza wzrostowa bąbla spekulacyjnego, jest trudne, i co różni żetony memowe od bitcoina. Nawet jeśli istnieją bowiem uczestnicy rynku, dla których bitcoin ma wartość kolekcjonerską, to nie ma podstaw, aby sądzić, że jest to ważny składnik jego wartości rynkowej.

W związku z obserwacją z jednej strony takich zjawisk, jak bąble spekulacyjne i krachy oraz łatwość manipulacji typu pump-and-dump, a z drugiej – długoterminowego trendu wzrostowego kursów i kapitalizacji niektórych kryptowalut, w tym nawet żetonów memowych, nasuwa się dość oczywiste pytanie, czy długoterminowy trend wzrostowy nie jest wstępną fazą bąbla spekulacyjnego, tylko o znacznie większej skali. Ta możliwość wydaje się bardzo realna, zwłaszcza w kontekście wcześniejszych rozważań na temat braku wartości wewnętrznej. To, czy jesteśmy świadkami długoterminowego bąbla spekulacyjnego, czy nie, zależy przede wszystkim od przyszłych zastosowań kryptowalut w gospodarce.

2.4. Wnioski na temat charakteru kryptowalut

Z powyższych rozważań można wyciągnąć wstępny wniosek, że niewłaściwe byłoby stawianie kryptowalut niezabezpieczonych w jednym szeregu z aktywami inwestycyjnymi. Bardziej zasadne wydaje się ich porównywanie do walut fiducjarnych. Jednocześnie jednak należy podkreślić, że podobieństwo kryptowalut do pieniądza wynika na razie nie z faktycznej możliwości takiego ich wykorzystania, lecz z ich konstrukcji. Teoretycznie czyni ona z nich dobry środek wymiany, przynajmniej z tech-

[10] Na przykład, jak wspomniano, największa w historii kapitalizacja rynku dogecoina, którą odnotowano 7 maja 2021 r., to niecałe 89 mld USD, podczas gdy kapitalizacja bitcoina wyniosła tego samego dnia 1,07 bln USD (12 razy więcej) i nie było to historyczne maksimum.

nicznego punktu widzenia. Pozostałe cechy, w tym właściwości statystyczne kursów, są jeszcze nie do końca zbadane.

Kryptowaluty mogą być różnie wykorzystywane przez inwestorów, a kierunek i metoda tego wykorzystania nie muszą być w pełni zgodne z pierwotnym zamysłem twórców kryptowalut. Wartościowe może być zatem badanie podobieństw między tradycyjnymi inwestycjami, zarówno klasycznymi, jak i alternatywnymi, oraz inwestycjami w kryptowaluty.

Jeżeli zaś chodzi o dalsze perspektywy rozwoju rynku kryptowalut, pojawia się pytanie, czy cały długoterminowy trend wzrostowy obserwowany w dotychczasowej jego historii nie jest tylko fragmentem bąbla spekulacyjnego w dłuższej perspektywie. W krótszej skali (miesiące, lata) obserwuje się liczne zmiany kursu noszące cechy bąbli spekulacyjnych i krachów, ale na ogół nakładają się one na długoterminowy trend wzrostowy. Jednak aby ocenić, czy ogólnie rynek dobrze wycenia kryptowaluty w długim okresie, trzeba by znać odpowiedź na pytanie o ich wartość fundamentalną. A jak wspomniano, obecnie dyskusja toczy się wokół tego, czy kryptowaluty niezabezpieczone, takie jak bitcoin, w ogóle mają jakąś wartość fundamentalną.

Przewidywanie wartości rynkowej kryptowalut nie musi zresztą dotyczyć ich obecnej wartości fundamentalnej. Można przyjąć założenie, że kryptowaluty to przede wszystkim rozproszone systemy informatyczne, których wartość będzie zależała od ich przyszłych zastosowań. Jaka więc może być ta wartość? Na obecnym etapie rozwoju kryptowalut jednoznaczna odpowiedź na to pytanie nie jest możliwa, ponieważ wymagałaby uwzględnienia bardzo niepewnych przewidywań odnośnie do co najmniej siedmiu zagadnień:

- czy niektóre kryptowaluty, np. bitcoin lub ether, zostaną powszechnie uznane za środek wymiany i przechowywania wartości;
- czy przepisy prawa będą sprzyjały takiemu ich wykorzystaniu;
- czy wbudowane funkcje (np. umożliwiające tworzenie kontraktów smart i aplikacji rozproszonych) sprawią, że kryptowaluty zaczną być postrzegane jako instrumenty umożliwiające świadczenie przydatnych usług, mające wartość wewnętrzną wynikającą z tej roli;
- czy zostaną rozwinięte nowe użyteczne funkcjonalności w ramach istniejących projektów kryptowalutowych;
- czy powstaną nowe, konkurencyjne projekty kryptowalutowe, które okażą się pod jakimś względem lepsze;
- czy zaistnieją nowe efekty synergii między istniejącymi projektami kryptowalutowymi lub między istniejącymi i nowo powstałymi projektami;
- czy zostaną odkryte nowe zastosowania już istniejących projektów kryptowalutowych.

3. Metoda badania

Badanie składało się z trzech etapów. Na pierwszym dokonano jakościowej analizy ogólnych właściwości kursów kryptowalut, uwzględniającej przegląd literatury na ten temat. Szczególną uwagę poświęcono:

- podobieństwu i różnicom dotyczącym zachowania się kursów kryptowalut i walut fiducjarnych;
- typowym cechom dynamiki kursów kryptowalut, w szczególności długoterminowym trendom oraz zjawiskom, które można interpretować jako bąble spekulacyjne i krachy.

Celem było zidentyfikowanie typowych ogólnych właściwości, w tym dynamicznych, jakie obserwuje się w szeregach czasowych kursów kryptowalut.

Przeprowadzono jakościową analizę danych ilościowych oraz wstępną analizę ilościową. Wykorzystane zbiory danych zawierały notowania kursów i względne przyrosty kursów bitcoina oraz wybranych walut fiducjarnych: euro (EUR), funta szterlinga (GBP), jena japońskiego (JPY) i złotego (PLN) w parze z dolarem amerykańskim. Próby badawcze obejmowały okres od 18 sierpnia 2011 r. do 19 października 2021 r. (nieco ponad 10 lat). Względne przyrosty cen obliczano dla okresów dziennych. Analiza polegała na wzrokowej ocenie kształtowania się kursów i omówieniu podstawowych wykresów. Ponadto obliczono podstawowe statystyki: średnią arytmetyczną, odchylenie standardowe, wartość minimalną, wartość maksymalną, rozstęp, kurtozę i skośność dla całej badanej próby, w podziale na bitcoina i cztery waluty fiducjarne. Ten etap służył zidentyfikowaniu i omówieniu podobieństw i różnic pomiędzy bitcoinem a walutami fiducjarnymi pod względem ogólnych, podstawowych właściwości statystycznych dla całej dziesięcioletniej próby.

Następnie wykorzystano te same zbiory danych. Analizowano właściwości szeregów czasowych względnych przyrostów kursów. Modelowano: poziom względnych przyrostów kursów za pomocą modeli procesów klasy AR(I)MA, warunkową zmienność przy wykorzystaniu modeli GARCH, a także rozkłady reszt przy założeniu asymetrycznych rozkładów GED. Zarówno w przypadku bitcoina, jak i każdej z analizowanych walut fiducjarnych rozpatrywano modele dla różnych kombinacji rzędów opóźnień, a finalnego wyboru modelu dokonywano przy zastosowaniu kryteriów informacyjnych Akaikego (AIC) i Schwarza (BIC). Wnioski dotyczące podobieństwa bitcoina do walut fiducjarnych pod względem rozpatrywanych właściwości sformułowano na podstawie oceny jakościowej, uwzględniającej zarówno przeprowadzoną wcześniej analizę jakościową, jak i wyniki badań ilościowych, a w szczególności porównanie wyestymowanych parametrów.

4. Wyniki

W badaniu pojęto próbę uzyskania odpowiedzi na pytanie, czy – i jeśli tak, to jak bardzo – bitcoin różni się pod względem wybranych właściwości statystycznych od walut fiducjarnych. Jak wspomniano, dużą przeszkodą w stosowaniu bitcoina jako zamiennika pieniądza jest nieprzewidywalność jego wartości nawet w krótkim okresie. Ponieważ może ona wynikać m.in. z dużej zmienności, zmian zmienności w czasie czy też grubych ogonów rozkładu stóp zwrotu, badanie koncentruje się właśnie na tych właściwościach.

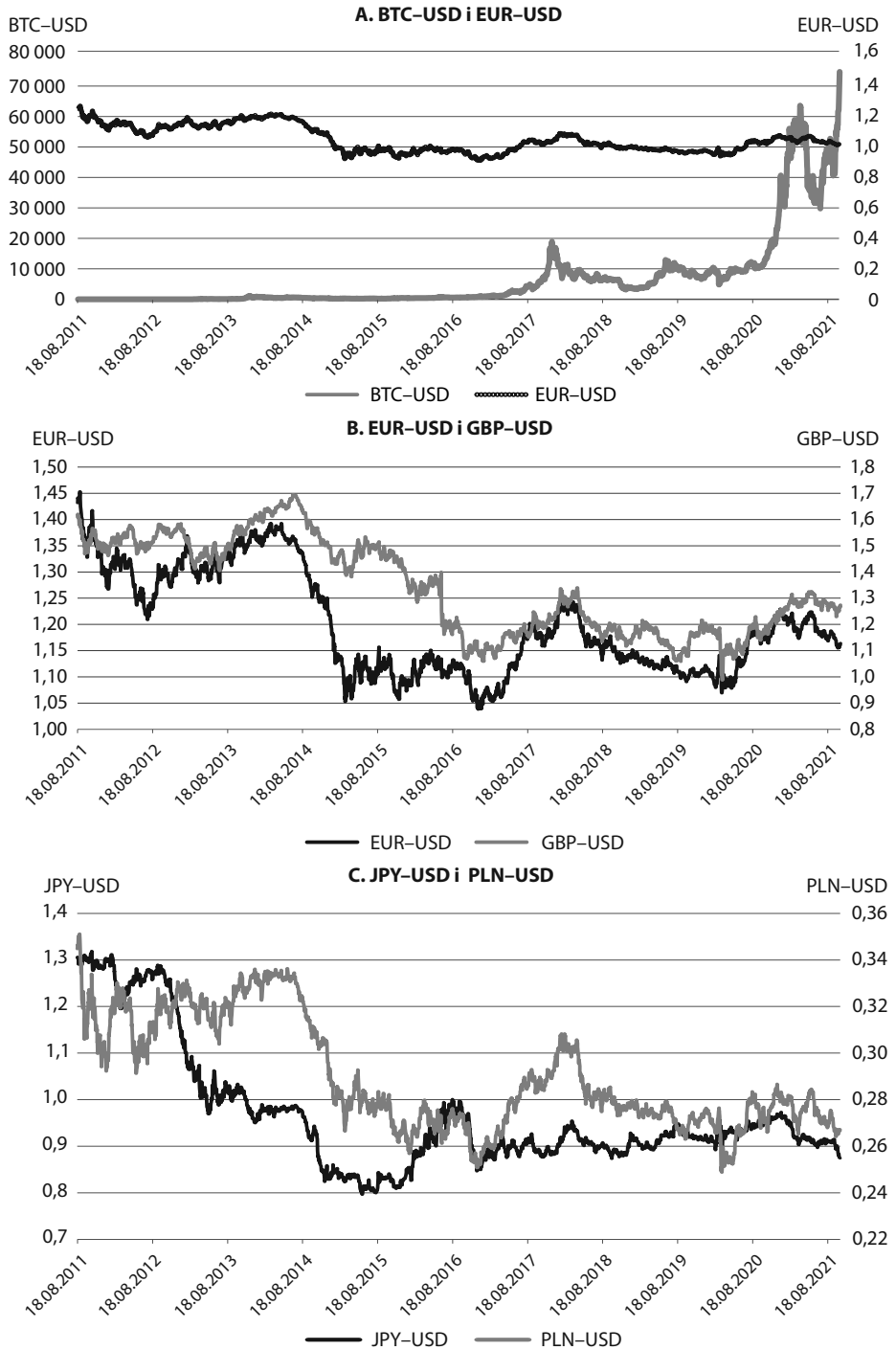
4.1. Kurs bitcoina do dolara amerykańskiego a kursy wybranych walut fiducjarnych

Analiza wykresów kursu BTC–USD (USD/BTC) i kursów wybranych walut fiducjarnych do dolara amerykańskiego (wykr. 1) pozwala dostrzec ich zasadniczą odmienność. Szereg czasowy kursu bitcoina nie przypomina dynamiki kursów walut fiducjarnych. W badanym okresie kurs bitcoina wzrósł od ok. 10,09 USD (8 sierpnia 2011 r.) do ponad 43 tys. USD (8 sierpnia 2021 r.), czyli przeszło 3300 razy (wzrost o 330 669% w skali 10 lat, co daje przeciętną stopę wzrostu ponad 124% rocznie). Należy wziąć pod uwagę to, że pierwszej w historii transakcji przy użyciu bitcoina dokonano w 2010 r. i była to w ogóle pierwsza transakcja przeprowadzona przy użyciu kryptowalut. Bitcoin upowszechnia się i znajduje różne zastosowania. Do jego sieci dołączają kolejni inwestorzy, spekulanci i użytkownicy, co powoduje, że na rynku bitcoina inwestowany jest coraz większy kapitał. Nie zaskakuje więc to, że kurs bitcoina od 2011 r. do dziś nie wykazywał właściwości typowych dla kursów walut, np. efektu powracania do średniej.

Pomijając trend, wynikający być może z wczesnej fazy cyklu życia projektu bitcoina, warto spojrzeć na właściwości dziennych względnych przyrostów kursu.

Dla zmian notowań par walutowych z okresu od 18 sierpnia 2011 r. do 19 października 2021 r. obliczono podstawowe statystyki dotyczące całej próby (tabl. 1). Biorąc pod uwagę trend widoczny w szeregach czasowych cen, należało się spodziewać dodatniej średniej dla bitcoina oraz niskiej, bliskiej 0, średniej względnych przyrostów kursów walut fiducjarnych.

Wykr. 1. Kurs bitcoina i wybranych walut fiducjarnych do dolara amerykańskiego



Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z serwisu Refinitiv.

Tabl. 1. Statystyki opisowe dla dziennych względnych przyrostów kursów bitcoina i walut fiducjarnych do dolara amerykańskiego

Wyszczególnienie	BTC–USD	EUR–USD	GBP–USD	JPY–USD	PLN–USD
Średnia arytmetyczna w p.proc.	0,327	–0,008	–0,007	–0,015	–0,011
Odchylenie standardowe w p.proc.	5,702	0,498	0,563	0,539	0,701
Minimum w %	–66,39	–2,26	–8,31	–3,42	–4,53
Maksimum w %	48,48	2,60	3,22	3,77	3,97
Rozstęp w p.proc.	114,87	4,86	11,54	7,19	8,49
Kurtoza	20,013	2,3025	19,901	5,5654	3,0363
Skośność	–1,0783	0,025106	–1,1263	0,053966	–0,15032

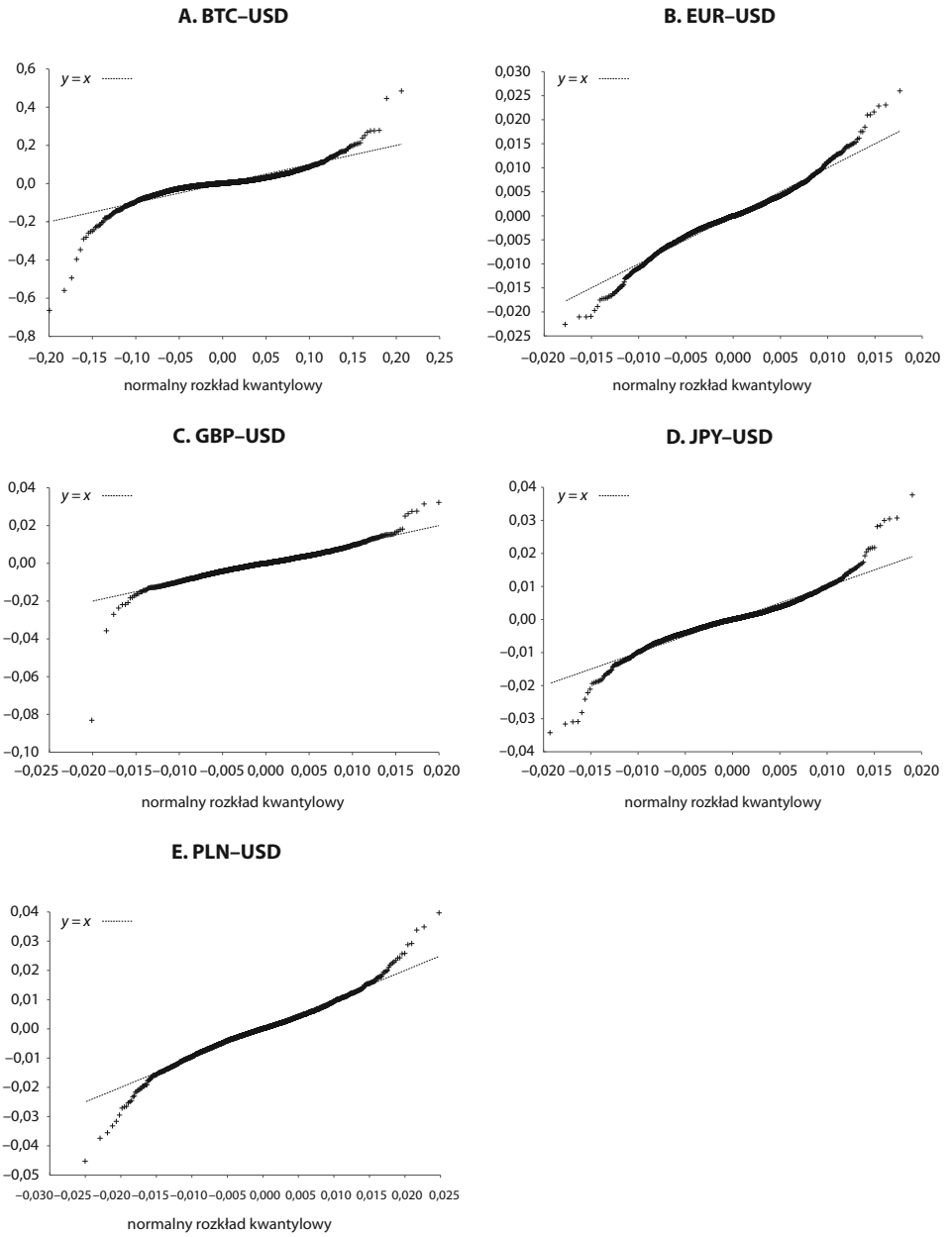
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z serwisu Refinitiv.

Uwagę zwraca odchylenie standardowe dziennych względnych przyrostów kursu bitcoina. Różni się ono od odchyleń standardowych względnych przyrostów notowań walut fiducjarnych o rząd wielkości. Dla pary BTC–USD odchylenie standardowe wynosi 5,7 p.proc., a dla walut fiducjarnych mieści się w przedziale 0,5–0,7 p.proc. Duże różnice można zauważyć również w maksymalnych i minimalnych wielkościach dziennych zmian. W rozpatrywanej próbie rozstęp dla bitcoina jest dziesięciokrotnie wyższy niż drugi z kolei (dla GBP). Obie statystyki świadczą o tym, że bitcoin charakteryzuje się znacznie wyższą zmiennością niż waluty fiducjarne.

Wstępna analiza danych pokazuje, że bezwarunkowe (długoterminowe) rozkłady względnych przyrostów kursów nie są normalne. Potwierdza to wzrokowa analiza wykresów kwantyl-kwantyl (wykr. 2).

Zbadano zgodność bezwarunkowych (długoterminowych) rozkładów względnych przyrostów kursów z rozkładem normalnym. W tym celu zastosowano testy Doornika-Hansena (Doornik i Hansen, 2008), Jarque'a-Bera (Jarque i Bera, 1987), Lillieforsa (Lilliefors, 1969) oraz Shapiro-Wilka (Shapiro i Wilk, 1965). Wszystkie testy przeprowadzone na standardowych poziomach istotności pozwoliły na odrzucenie hipotezy o normalności rozkładu bezwarunkowego (długoterminowego) zarówno dla bitcoina, jak i dla walut fiducjarnych. Nie jest to zaskoczeniem. Właściwość polegająca na tym, że bezwarunkowe (długoterminowe) rozkłady względnych przyrostów kursów walutowych mają grube ogony i charakteryzują się wyższą kurtozą niż rozkład normalny, jest powszechnie znana. Nie oznacza to jednak, że po uwzględnieniu dynamicznych właściwości rozkładów (zwłaszcza zjawiska skupiania zmienności) warunkowe rozkłady nadal są gruboogonowe.

Wykr. 2. Wykresy kwantyl-kwantyl względem rozkładu normalnego dla dziennych względnych przyrostów kursu bitcoina i wybranych walut fiducjarnych do dolara amerykańskiego

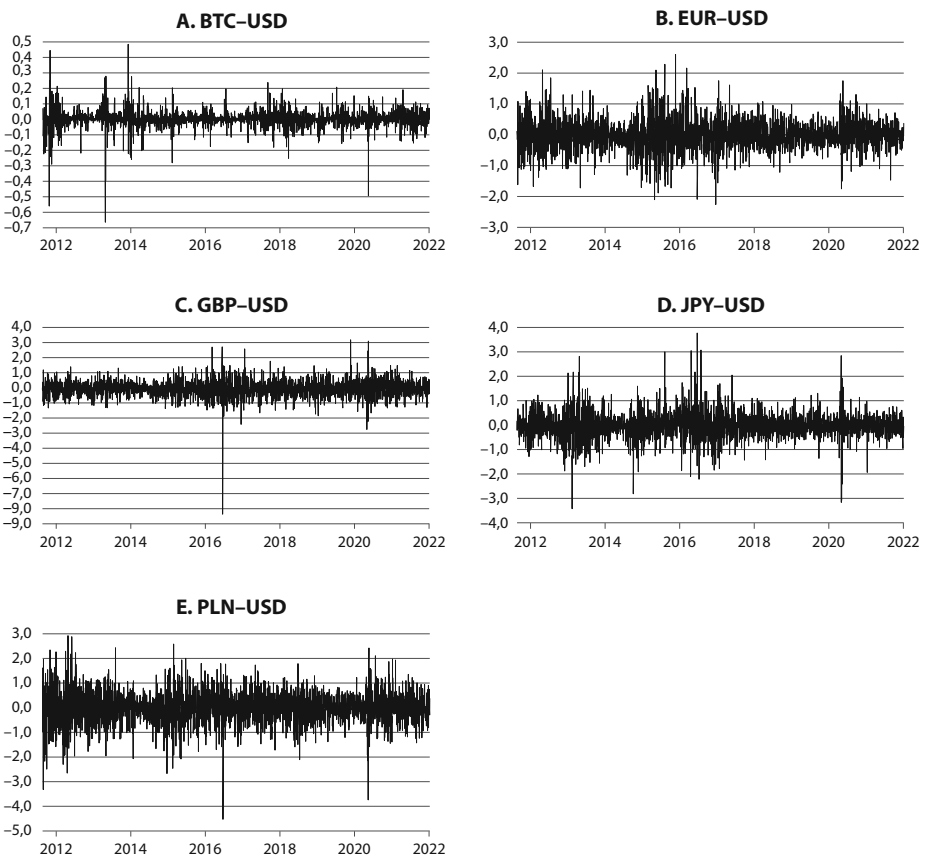


Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z serwisu Refinitiv.

4.2. Modelowanie szeregów czasowych przyrostów dziennych

Szeregi czasowe dziennych względnych przyrostów analizowanych kursów (dziennych stóp zwrotu) przedstawiono na wykr. 3.

Wykr. 3. Szeregi czasowe dziennych względnych przyrostów kursu bitcoina i wybranych walut fiducjarnych do dolara amerykańskiego od 18.08.2011 r. do 19.10.2021 r.



Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z serwisu Refinitiv.

Komentarza wymaga znacznie odstająca obserwacja z 24 czerwca 2016 r. dotycząca funta szterlinga – gwałtowne obniżenie się jego kursu do dolara amerykańskiego (a także do innych głównych walut) w dniu ogłoszenia wyników referendum w sprawie wyjścia Wielkiej Brytanii z Unii Europejskiej. Jest oczywiste, że takie wydarzenie ma charakter jednorazowy. Trzeba jednak zauważyć, że na zmiany kursów walut fiducjarnych (gwarantowanych przez państwa) wpływają czynniki specyficz-

nego ryzyka danego kraju. Przejściowe załamanie kursu funta 24 czerwca 2016 r. jest tego przykładem. A ponieważ ryzyko kraju znajduje odzwierciedlenie w ryzyku kursu walutowego, jest to zdarzenie typowe dla waluty fiducjarnej będącej walutą konkretnego państwa. Zdarzenia tego typu mogą wystąpić na skutek oddziaływania czynników ryzyka politycznego lub prawnego, ryzyka wydarzeń, katastrof naturalnych itp. Mają one co prawda charakter zdarzeń ekstremalnych, ale jednocześnie możliwość ich występowania jest jedną z ważnych właściwości kursów walut, której nie można pominąć w analizie porównawczej.

Ponieważ analizowano obserwacje już zróżnicowane, a ponadto w testach ADF i KPSS odrzucono hipotezę o występowaniu pierwiastka jednostkowego dla względnych przyrostów wszystkich porównywanych kursów walutowych, dalsze badanie skoncentrowano na modelowaniu:

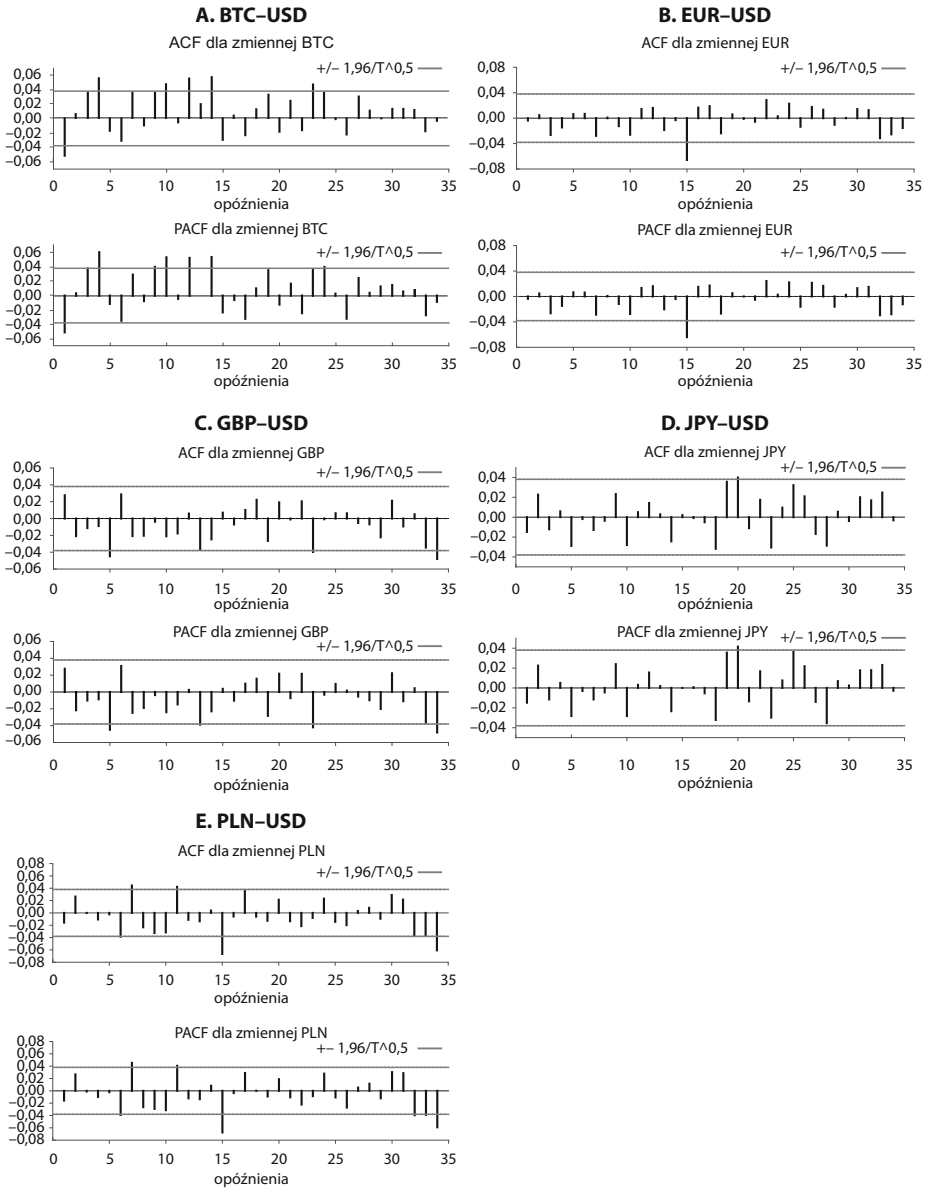
- poziomu względnych przyrostów kursów przy wykorzystaniu modeli klasy ARMA;
- zmienności przy wykorzystaniu modeli GARCH;
- właściwości rozkładów reszt, takich jak grube ogony, podwyższona kurtoza i asymetria, przez zastosowanie niegaussowskich innowacji w modelu GARCH.

Koncepcję porównania oparto na tym etapie na zastosowaniu tych samych lub zagnieżdżonych modeli dla kursów badanych walut, zestawieniu ich parametrów i wyciągnięciu wniosków na podstawie różnic między nimi.

Wyestymowano parametry modeli ARMA(p, q) dla wszystkich porównywanych par walut przy następujących rzędach opóźnień: $p = 0, 1, 2$ oraz $q = 0, 1, 2$ i dokonano wyboru modelu na podstawie AIC i BIC. Następnie dla reszt z wybranych modeli przeprowadzono próbę dopasowania modeli GARCH z innowacjami o asymetrycznych rozkładach GED. Rozpatrywane były modele GARCH(p, q) dla wszystkich par (p, q) przy $p = 0, 1, 2$ i $q = 0, 1, 2$.

Efekty AR oraz MA zaobserwowano tylko w procesie względnych przyrostów kursu bitcoina do dolara amerykańskiego. Tym samym potwierdziło się to, czego można było się spodziewać już po wstępnej wzrokowej analizie korelogramów (wykr. 4), czyli odmiennych właściwości kursów bitcoina i kursów walut fiducjarnych do dolara amerykańskiego pod względem występowania efektów ARMA.

Wykr. 4. Korelogramy względnych przyrostów kursów



Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z serwisu Refinitiv.

Porównanie modeli ARMA dla względnych przyrostów kursu bitcoina do dolara amerykańskiego na podstawie AIC i BIC przedstawiono w tabl. 2.

Tabl. 2. Modele ARMA dla względnych przyrostów kursu BTC–USD na podstawie AIC i BIC

Modele	Skorygowany R^2	AIC	BIC
ARMA(0, 1)	0,002583	−7671,567	−7653,917
ARMA(0, 2)[a]	0,002309	−7669,839	−7646,305
ARMA(1, 0)	0,002620	−7671,665	−7654,015
ARMA(1, 1)[b]	0,002249	−7669,681	−7646,147
ARMA(1, 2)	0,006676	−7680,425	−7651,008
ARMA(2, 0)[c]	0,002258	−7669,704	−7646,170
ARMA(2, 1)	0,006469	−7679,879	−7650,462
ARMA(2, 2)	0,011572	−7686,145	−7650,849

a Nieistotny parametr θ_2 w modelu MA(2). b Istotny tylko wyraz wolny. c Nieistotny parametr φ_2 w modelu AR(2).

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu pakietu GRETL na podstawie danych z serwisu Refinitiv.

Zwiększenie rzędu modelu ARMA do wartości 3 nie przyniosło poprawy dopasowania, co można zaobserwować w danych zawartych w tabl. 3.

Tabl. 3. Modele ARMA wyższych rzędów dla względnych przyrostów kursu BTC–USD na podstawie AIC i BIC

Modele	Skorygowany R^2	AIC	BIC
ARMA(3, 1)[a]	0,006613	−7679,262	−7643,961
ARMA(3, 2)[a]	0,008328	−7682,824	−7641,639
ARMA(1, 3)[b]	0,004651	−7674,059	−7638,758
ARMA(2, 3)[c]	0,006179	−7677,105	−7635,921
ARMA(3, 3)	0,010779	−7677,943	−7630,884

a Nieistotny parametr φ_3 w modelu AR(3). b Nieistotny parametr θ_2 w modelu MA(3). c Nieistotny parametr θ_3 w modelu MA(3).

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu pakietu GRETL na podstawie danych z serwisu Refinitiv.

Co prawda żaden z modeli ujętych w tabl. 2 i 3 nie wyjaśnia dobrze zmienności kursu bitcoina, ale też nie oczekiwano tego na tym etapie badania. Chodziło o wyeliminowanie efektów autoregresyjnych w celu dalszego badania zmienności.

Ostatecznie dla dziennych względnych przyrostów kursu bitcoina do dolara amerykańskiego wybrano model ARMA(2, 2) o parametrach przedstawionych w tabl. 4.

Tabl. 4. Parametry modelu ARMA(2, 2) dla względnych przyrostów kursu BTC–USD

Wyszczególnienie	Stała	AR		MA	
		φ_1	φ_2	θ_1	θ_2
Wartość	0,003996	0,6478	−0,881	−0,6894	0,9177
p-value	0,0041	$4{,}58 \cdot 10^{-210}$	0,0000	$7{,}12 \cdot 10^{-246}$	0,0000

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu pakietu GRETL na podstawie danych z serwisu Refinitiv.

W szeregach czasowych względnych przyrostów kursów walut fiducjarnych nie zaobserwowano efektu ARMA.

Następnie przeprowadzono testy efektu ARCH dla procesów resztowych z modelu ARMA.

W przypadku wszystkich szeregów dziennych przyrostów kursów odrzucono hipotezę zerową o braku efektu ARCH. Przeprowadzono testy efektu ARCH do szóstego rzędu opóźnienia włącznie.

Dalsza analiza polegała na dopasowaniu modeli GARCH do procesów resztowych. Ponieważ w danych dotyczących względnych przyrostów kursów zaobserwowano asymetrię rozkładów bezwarunkowych, zachodziły przesłanki do modelowania asymetrycznych rozkładów warunkowych. Wykorzystano modele GARCH ze składnikami losowymi o asymetrycznych rozkładach GED (s-GED) w parametryzacji wykorzystywanej w pakiecie GRETL (Cottrell i Lucchetti, 2022, rozdz. 3.1).

Podjęto próbę dopasowania modeli GARCH(p, q) dla $p = 1, 2$ i $q = 1, 2$. Dla każdej analizowanej pary walut modele te porównano na podstawie AIC i BIC.

W tabl. 5 przedstawiono wyniki porównania modeli GARCH dla względnych przyrostów kursu bitcoina do dolara amerykańskiego – reszty z modelu ARMA(2, 2).

Tabl. 5. BTC–USD: modele GARCH dla procesu resztowego z modelu ARMA(2, 2) na podstawie AIC i BIC

Modele	AIC	BIC
GARCH(1, 1) (s-GED)	–9434,2520	–9398,9559
GARCH(1, 2) (s-GED)[a]	–8606,8901	–8577,4766
GARCH(2, 1) (s-GED)[a]	–8610,2120	–8580,7985
GARCH(2, 2) (s-GED)[a]	–8609,6759	–8574,3797

a Istotny tylko parametr α_1 i parametry rozkładu reszt.

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu pakietu GRETL na podstawie danych z serwisu Refinitiv.

Ostatecznie dla względnych przyrostów kursu BTC–USD wybrano model ARMA(2, 2)-GARCH(1, 1). Parametry modelu GARCH przedstawiono w tabl. 6.

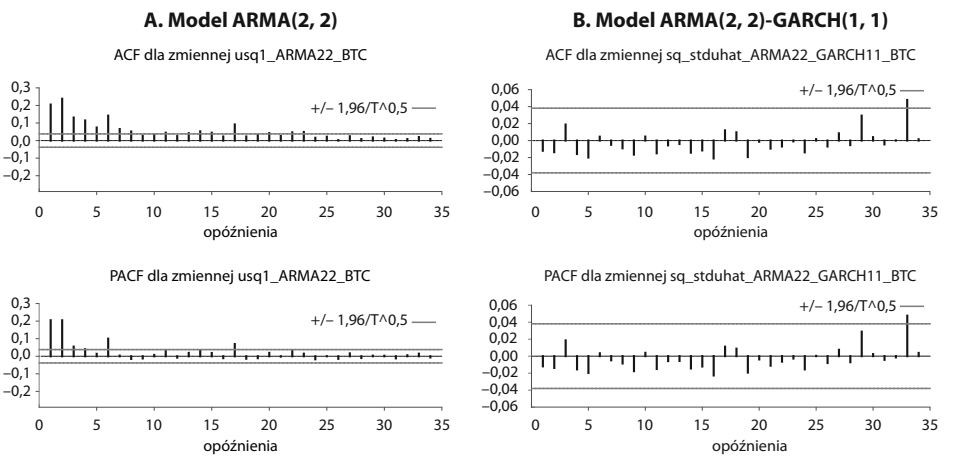
Tabl. 6. BTC–USD: parametry modelu GARCH(1, 1) z innowacjami s-GED dla reszt z modelu ARMA(2, 2)

Wyszczególnienie	GARCH(1, 1)				s-GED	
	stała	ω	α	β	ν	λ
Wartość	–0,00128	$5{,}1 \cdot 10^{-5}$	0,16890	0,83860	0,86066	–0,02053
p-value	0,0000	$1{,}61 \cdot 10^{-105}$	$1{,}09 \cdot 10^{-29}$	0,00000	$5{,}30 \cdot 10^{-107}$	$3{,}17 \cdot 10^{-203}$

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu pakietu GRETL na podstawie danych z serwisu Refinitiv.

Porównanie korelogramów kwadratów standaryzowanych reszt dla względnych przyrostów kursu bitcoina do dolara amerykańskiego po zastosowaniu modelu ARMA(2, 2) oraz modelu ARMA(2, 2)-GARCH(1, 1) zaprezentowano na wykr. 5.

Wykr. 5. Korelogramy kwadratów reszt dla względnych przyrostów kursu bitcoina do dolara amerykańskiego po zastosowaniu wybranych modeli



Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu pakietu GRETL na podstawie danych z serwisu Refinitiv.

Jak widać na wykr. 5, zastosowanie modelu GARCH(1, 1) do reszt z modelu ARMA(2, 2) dla bitcoina pozwoliło na oczyszczenie danych z heteroskedastyczności w sensie zależności typu GARCH.

Dla każdej z par walutowych: EUR–USD, GBP–USD, JPY–USD i PLN–USD również wybrano model GARCH(1, 1) i założono asymetryczny rozkład GED standaryzowanych reszt. Wyboru dokonano na podstawie AIC i BIC. Wyniki zostały przedstawione w tabl. 7.

Wartości stałej dla poziomu względnych przyrostów kursu oraz stałej w modelu warunkowej wariancji (ω) są w przypadku bitcoina istotne, ale niskie, a w przypadku walut fiducjarnych – nieistotne. Zarówno bitcoin, jak i waluty fiducjarne wykazują istotne wartości parametrów modelu GARCH(1, 1). Wszystkie rozkłady reszt wykazują też istotne wartości parametru kształtu wskazujące na grube ogony i leptokurtyczność (parametr ν rozkładu s-GED mniejszy od 2). Natomiast tylko bitcoin wykazuje istotną asymetrię (parametr λ rozkładu s-GED).

Parametr kształtu (ν) zarówno dla bitcoina, jak i dla walut fiducjarnych jest mniejszy od 2, ale tylko w przypadku bitcoina jest on również mniejszy od 1. Grubsze ogony rozkładu reszt dla bitcoina potwierdza także wzrokowa analiza wykresów

kwantyl-kwantyl, na których bitcoin jest zestawiony z walutami fiducjarnymi (wykr. 6).

Tabl. 7. Modele GARCH dla względnych przyrostów kursów walut fiducjarnych na podstawie AIC i BIC

Modele	EUR		GBP	
	AIC	BIC	AIC	BIC
GARCH(1, 1) $_{(s\text{-}GED)}$	–21126,8408	–21091,5401	–20483,7130	–20448,4123
GARCH(1, 2) $_{(s\text{-}GED)}$	–21023,0396	–20993,6223	–20371,8288	–20342,4116
GARCH(2, 1) $_{(s\text{-}GED)}$	–21023,3054	–20993,8882	–20373,1399	–20343,7226
GARCH(2, 2) $_{(s\text{-}GED)}$	–21021,3893	–20986,0887	–20367,6495	–20332,3489

(dok.)

Modele	JPY		PLN	
	AIC	BIC	AIC	BIC
GARCH(1, 1) $_{(s\text{-}GED)}$	–20909,2379	–20873,9372	–19309,1066	–19273,8060
GARCH(1, 2) $_{(s\text{-}GED)}$	–20691,4818	–20662,0646	–19264,2918	–19234,8746
GARCH(2, 1) $_{(s\text{-}GED)}$	–20691,5133	–20662,0960	–19264,1675	–19234,7503
GARCH(2, 2) $_{(s\text{-}GED)}$	–20691,4818	–20662,0646	–19262,0381	–19226,7375

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu pakietu GRETL na podstawie danych z serwisu Refinitiv.

Parametry modeli GARCH(1, 1) i asymetrycznego rozkładu GED składnika losowego dla walut fiducjarnych zawiera tabl. 8. Dla porównania powtórzono wyniki uzyskane dla bitcoina.

Tabl. 8. Parametry modelu GARCH(1, 1) z innowacjami s-GED dla walut fiducjarnych w porównaniu z bitcoinem

Wyszczególnienie	GARCH(1, 1)				s-GED	
	stała	ω	α	β	ν	λ
EUR: wartość ...	$-9{,}25\cdot10^{-5}$	$7{,}29\cdot10^{-8}$	0,03447	0,96248	1,35971	–0,00738
p-value	0,21190	0,11030	$6{,}62\cdot10^{-9***}$	0,00000***	$3{,}92\cdot10^{-130***}$	0,55660
GBP: wartość ...	–0,00013	$4{,}59\cdot10^{-7}$	0,06104	0,92286	1,36383	–0,02962
p-value	0,6720	0,0938	0,0022***	$3{,}68\cdot10^{-276***}$	$1{,}61\cdot10^{-076***}$	0,11010
JPY: wartość ...	–0,00013	$4{,}59\cdot10^{-7}$	0,07105	0,91350	1,20958	–0,02210
p-value	0,1226	0,0174	$1{,}54\cdot10^{-5***}$	0,00000***	$3{,}51\cdot10^{-109***}$	0,58440
PLN: wartość ...	–0,00010	$4{,}93\cdot10^{-7}$	0,06168	0,92826	1,55465	–0,04500
p-value	0,37560	0,01910	$5{,}07\cdot10^{-122***}$	0,00000***	$5{,}07\cdot10^{-122***}$	0,09690
BTC: wartość ...	–0,00128	$5{,}1\cdot10^{-5}$	0,16890	0,83857	0,86066	–0,02053
p-value	0,00000***	$1{,}61\cdot10^{-105***}$	$1{,}09\cdot10^{-29***}$	0,00000***	$5{,}30\cdot10^{-107***}$	$3{,}17\cdot10^{-203***}$

Uwaga. *** – *p*-value < 0,01.

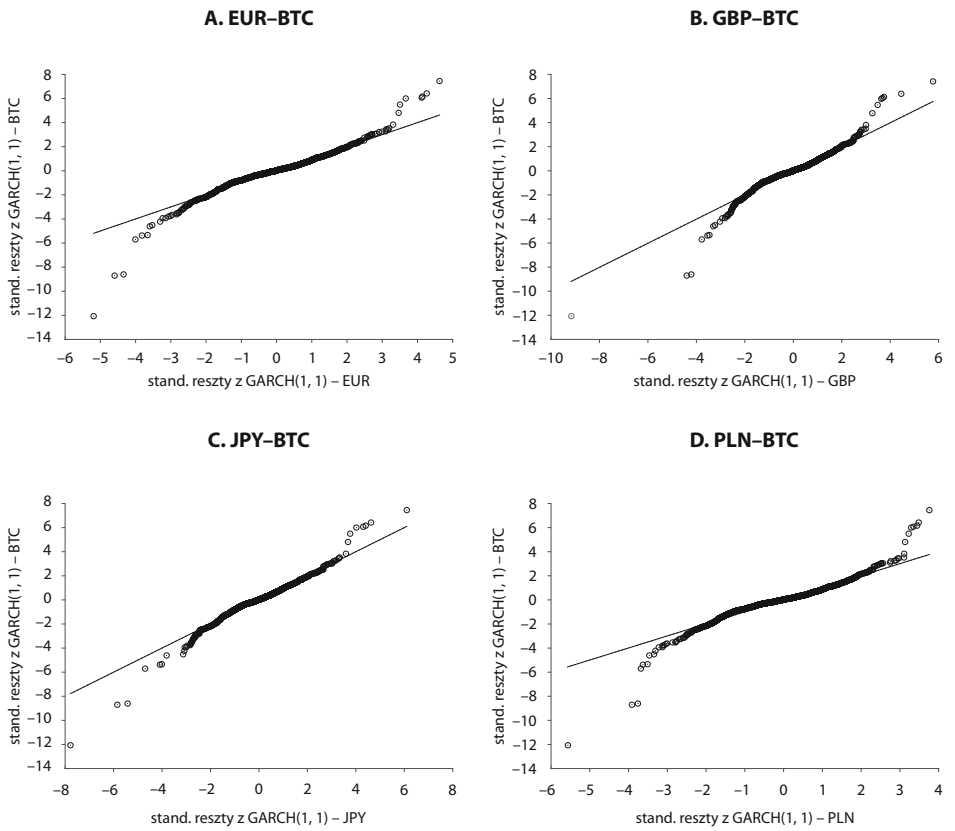
Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu pakietu GRETL na podstawie danych z serwisu Refinitiv.

Należy zauważyć, że w przypadku bitcoina nie jest spełniony warunek istnienia skończonej długoterminowej bezwarunkowej wariancji

$$\alpha + \beta < 1,$$

co może oznaczać, że zastosowany model ARMA(2, 2)-GARCH(1, 1) z resztami o rozkładach s-GED nie uwzględnia jakiejś właściwości, która odróżnia kurs bitcoina od kursów walut fiducjarnych do dolara amerykańskiego.

Wykr. 6. Wykresy kwantyl-kwantyl standaryzowanych reszt z modelu GARCH(1, 1) dla bitcoina i wybranych walut fiducjarnych



Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu pakietu GRETL na podstawie danych z serwisu Refinitiv.

4.3. Wnioski dla zarządzających ryzykiem

Różnice między właściwościami szeregów czasowych bitcoina i walut fiducjarnych należy uwzględniać m.in. przy szacowaniu ryzyka inwestycji. Dla przykładu rozważmy jednodniową inwestycję, której ryzyko jest szacowane z wykorzystaniem miary Value-at-Risk (VaR) przy poziomie tolerancji 1% i 5%. Niech inwestycja ta będzie rozliczana w dolarach amerykańskich. Wzór na wartość zagrożoną dla danego horyzontu inwestycyjnego przy poziomie tolerancji q i wielkości ekspozycji (zainwestowanego kapitału) W_0 jest następujący:

$$VaR = W_0 \cdot (-R_q), \tag{1}$$

gdzie R_q oznacza kwantyl stopy zwrotu odpowiadający prawdopodobieństwu q, które jest poziomem tolerancji VaR.

Dla rozkładu normalnego stosuje się wzór:

$$VaR = W_0 \cdot (c\sigma - \mu), \tag{2}$$

gdzie:
σ – odchylenie standardowe stopy zwrotu,
μ – wartość oczekiwana stopy zwrotu,
c – stała równa zaokrąglonemu do drugiego miejsca po przecinku[11] kwantylowi standardowego rozkładu normalnego przemnożonemu przez –1, czyli np.:
dla q = 5%, c = 1,65,
dla q = 1%, c = 2,33.

Często pomija się średnią dla krótkookresowych prognoz VaR. W przypadku prowadzonych tu rozważań może ona zostać pominięta także dlatego, że analizowane są reszty po wyeliminowaniu średniej. Wzór na VaR przedstawia się wtedy następująco:

$$VaR = W_0 \cdot c\sigma. \tag{3}$$

[11] Zazwyczaj stosuje się tylko zaokrąglenie w górę, ponieważ konsekwencje zawyżenia miary ryzyka są na ogół mniej dotkliwe niż skutki jej niedoszacowania.

Ponieważ przy szacowaniu jednodniowego VaR prognoza na każdy kolejny dzień jest opracowywana od nowa na podstawie przesuwającego się okna danych, wzór ten należałoby zapisać w postaci dynamicznej jako:

$$VaR_t = W_{0_{t-1}} \cdot c\sigma_{t-1}. \tag{4}$$

Z kolei jeżeli zostanie pominięty kapitał zainwestowany na początku, to można mówić o VaR procentowym (procentowej wartości zagrożonej), czyli wartości zagrożonej wyrażonej jako przemnożony przez –1 kwantyl rozkładu stopy zwrotu dla zadanego horyzontu inwestycyjnego. Miarę tę oznacza się niekiedy symbolem $VaR_{(\%)}$:

$$VaR_{(\%)_t} = c\sigma_{t-1}. \tag{5}$$

W praktyce najczęściej stosuje się miarę VaR szacowaną przy założeniu normalności. Jednak jeśli zostaje ona uogólniona na przypadki z rozkładem innym niż normalny, to zwykle stosuje się ten sam wzór, tylko w miejsce stałej *c* podstawia się kwantyl tego samego rzędu odpowiedniego rozkładu standaryzowanego, nie zawsze sprawdzając, czy skalowanie za pomocą przemnażania kwantyla przez odchylenie standardowe rzeczywiście daje kwantyl zastosowanego rozkładu. Takie skalowanie, stosowane nawet wówczas, gdy rozkłady reszt nie są rozkładami mającymi skończony drugi moment, stanowi oczywiście pewne uproszczenie i nie zawsze jest teoretycznie uprawnione. Tutaj skupimy się jednak na innym problemie, który polega na tym, że jeżeli stosuje się model ryzyka z innym niż normalny rozkładem reszt, to nie zawsze można posługiwać się tą samą stałą c we wzorach (3)–(5).

W przypadku rozkładu innego niż normalny wartość *c* może ulegać zmianom. Co prawda cały czas jest to przemnożony przez –1 kwantyl dla tego samego prawdopodobieństwa i nadal jest to kwantyl rozkładu standaryzowanego, ale rozkład standaryzowany może się zmieniać. Inne parametry, np. odpowiadające za grubość ogonów bądź za asymetrię rozkładu (jeżeli takie istnieją), mogą być szacowane na podstawie najbardziej aktualnej próby.

Pozostałe parametry rozkładu standardowego inne niż opisujące położenie i skalę mogą się zmieniać wraz z przesuwającym się oknem danych, ale przede wszystkim mogą one być inne dla każdej inwestycji. W związku z tym nawet zakładając ich stałość dla danej inwestycji, trzeba je szacować dla każdej inwestycji osobno. Jest to zgodne z wnioskami, jakie można wyciągnąć na podstawie danych z tabl. 8. Kwantyle standardowych reszt dla prawdopodobieństw 5% i 95% oraz 1% i 99% przedsta-

wiono w tabl. 9, przy czym w przypadku nieistotności parametru odpowiadającego za asymetrię rozkładu przyjęto rozkład symetryczny.

Tabl. 9. Kwantyle rozkładów standaryzowanych reszt (rozkład s-GED) dla bitcoina i walut fiducjarnych

Prawdopodobieństwo	BTC	EUR	GBP	JPY	PLN	Standardowy rozkład normalny
95%	1,53745	1,65165	1,65172	1,64677	1,65256	1,64485
5%	–1,74877	–1,65165	–1,65172	–1,64677	–1,65256	–1,64485
99%	2,36242	2,56123	–2,55925	2,63859	2,47550	2,32635
1%	–2,81664	–2,56123	2,55925	–2,63859	–2,47550	–2,32635

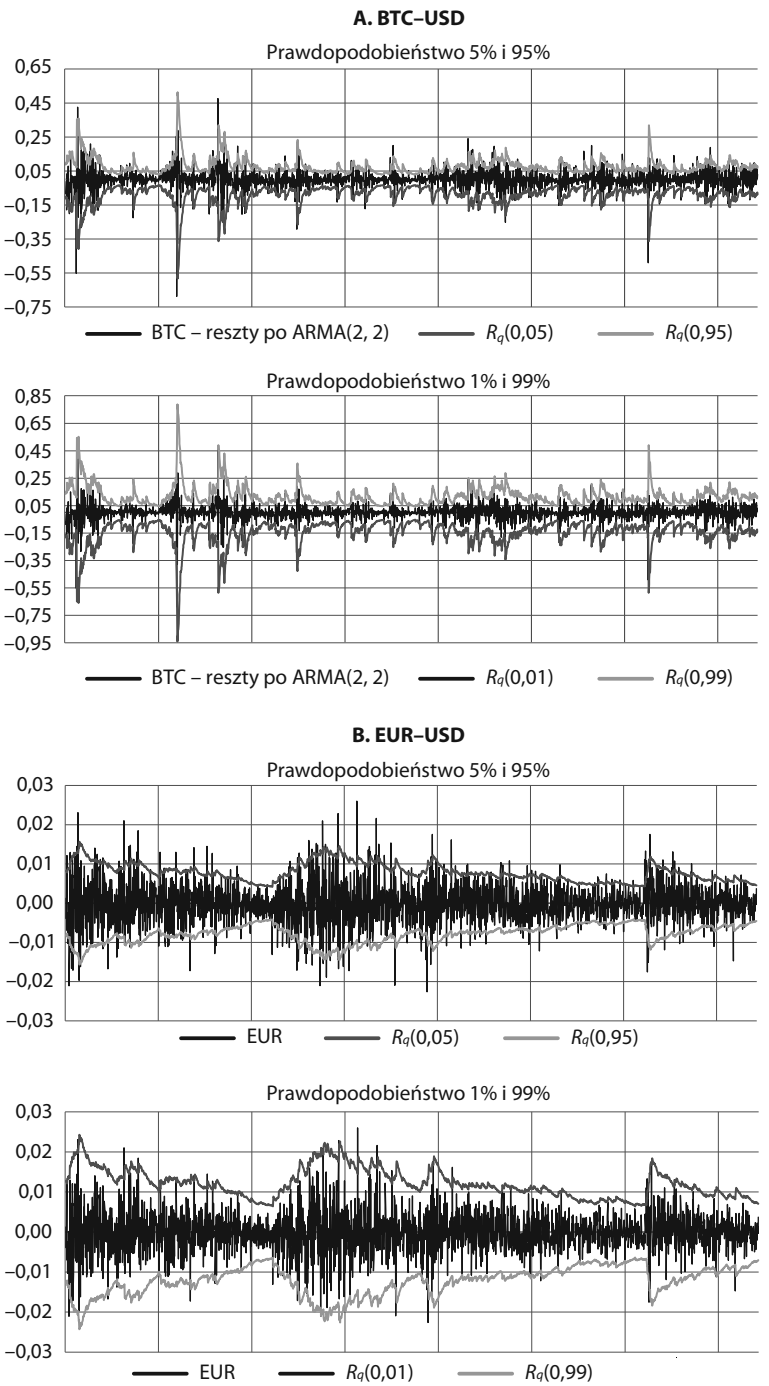
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z serwisu Refinitiv.

Jak należało oczekiwać, w przypadku rozkładów symetrycznych daje się zaobserwować wyraźniejszy efekt grubych ogonów przy poziomie tolerancji VaR 1% (i 99%, gdyby np. chodziło o odwrotną pozycję na rynku) niż przy poziomie 5% (oraz 95%). Wskazują na to różnice między odpowiednimi kwantylami rozkładów standaryzowanych reszt i rozkładu normalnego.

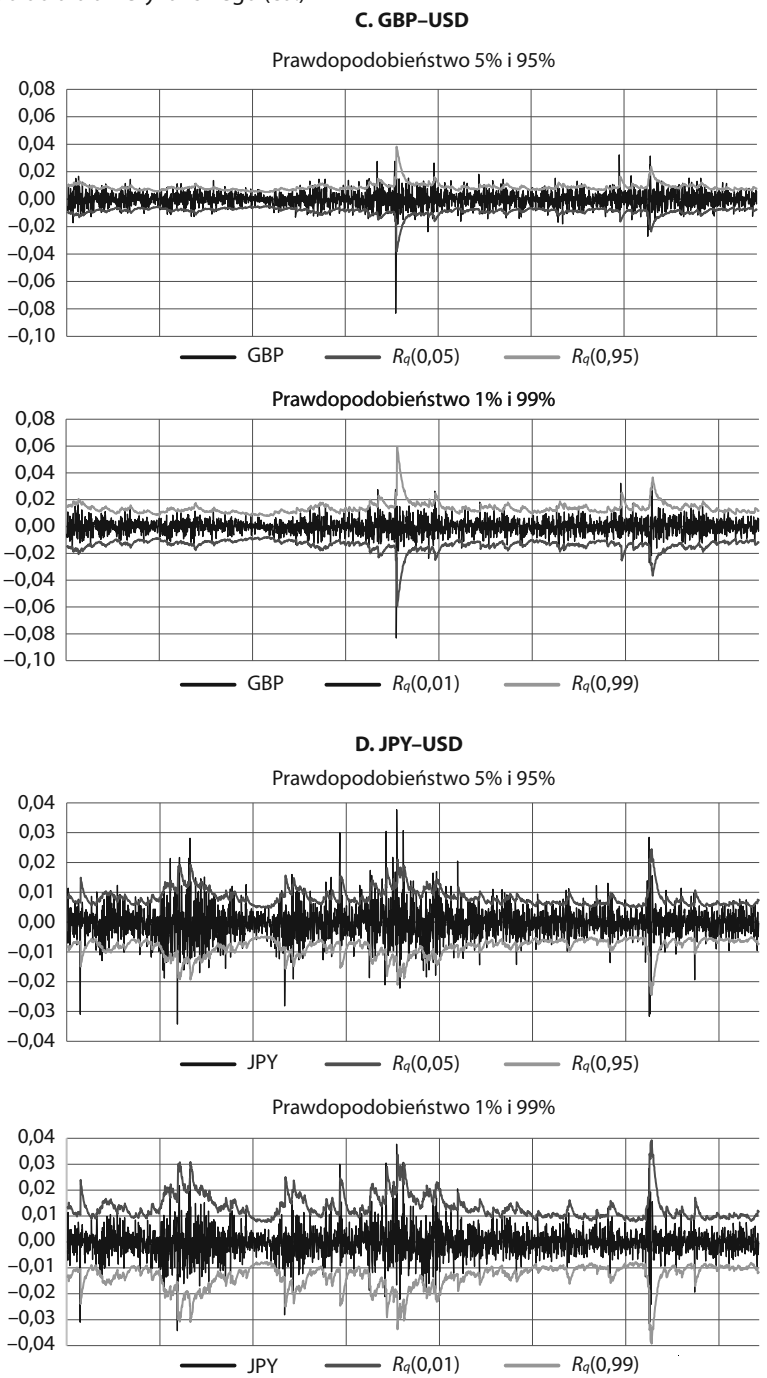
Stosując uproszczone skalowanie $R_{q_t} = -c\sigma_t$, gdzie $\sigma_t = \sqrt{h_t}$, a h_t oznacza warunkową wariancję oszacowaną na podstawie modelu GARCH, można graficznie przedstawić oszacowania kwantyli rozkładu reszt, przy czym reszty to stopy zwrotu oczyszczone z efektów dotyczących ich poziomu, ale przed oczyszczeniem z efektu GARCH. Jest to ilustracja wcześniej omówionych efektów: asymetrii warunkowych rozkładów dla bitcoina i symetrii dla walut fiducjarnych, różnej grubości ogonów, a także zmieniającej się warunkowej zmienności. Szeregi czasowe z nałożonymi kwantylami (opóźnionymi o dzień, jak przy szacowaniu jednodniowych prognoz VaR) są zaprezentowane na wykr. 7.

Kwantyli dla prawdopodobieństw 5% i 1% nie należy traktować jako prognoz $VaR_{(\%)}$, ponieważ próba nie była dzielona na próbę uczącą i testową, a więc wszystkie oszacowania wykonano na podstawie całego dostępnego zbioru danych. Natomiast przedstawienie właściwości rozpatrywanych szeregów czasowych w kontekście potencjalnego wykorzystania w pomiarze ryzyka rynkowego wskazuje na ważny obszar zastosowań. Spostrzeżeniem praktycznym, które go dotyczy, jest konieczność dostosowania stałej *c*, a nie tylko miary zmienności. W przypadku bitcoina należy przyjąć wyższą wartość *c* niż dla walut fiducjarnych.

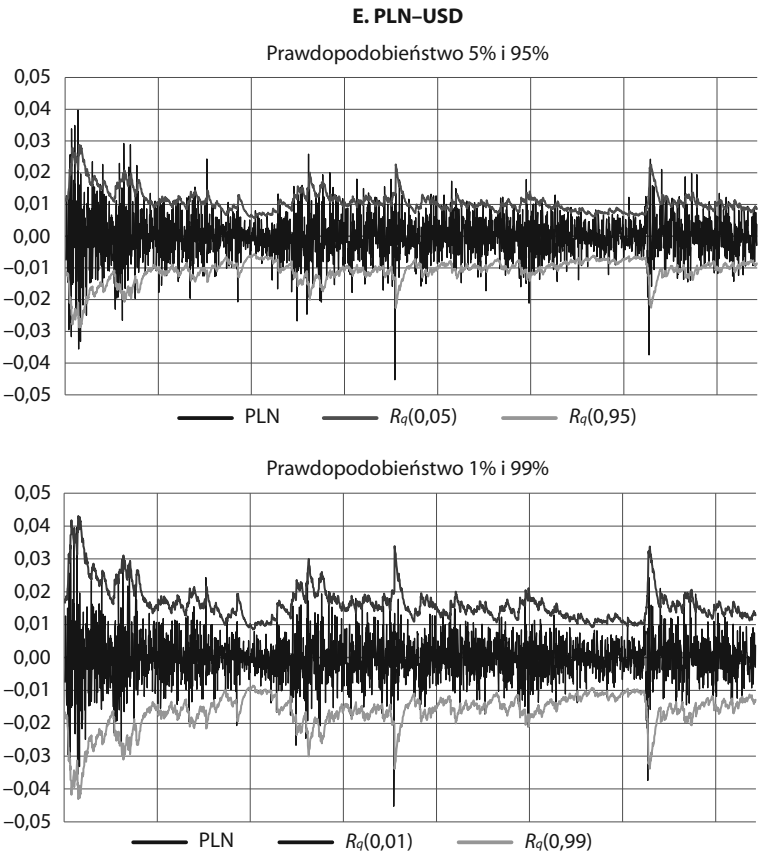
Wykr. 7. Kwantyle odpowiadające prawdopodobieństwu 5% i 95% oraz 1% i 99% dla względnych przyrostów kursu bitcoina i wybranych walut fiducjarnych do dolara amerykańskiego



Wykr. 7. Kwantyle odpowiadające prawdopodobieństwu 5% i 95% oraz 1% i 99% dla względnych przyrostów kursu bitcoina i wybranych walut fiducjarnych do dolara amerykańskiego (cd.)



Wykr. 7. Kwantyle odpowiadające prawdopodobieństwu 5% i 95% oraz 1% i 99% dla względnych przyrostów kursu bitcoina i wybranych walut fiducjarnych do dolara amerykańskiego (dok.)



Uwaga. Daty na osi poziomej wszystkich wykresów (od lewej): 19.08.2011, 31.12.2012, 15.05.2014, 27.09.2015, 8.02.2017, 23.06.2018, 5.11.2019, 19.03.2021.
Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu pakietu R na podstawie danych z serwisu Refinitiv.

5. Podsumowanie

Celem badania omówionego w artykule było porównanie niektórych właściwości statystycznych kursu bitcoina z właściwościami walut fiducjarnych. Wyjaśniono, dlaczego bitcoin jest porównywany do walut, a nie do aktywów inwestycyjnych. Po wstępnej analizie wykorzystującej statystyki opisowe i podstawowe wykresy dane poddano modelowaniu przy wykorzystaniu modeli procesów ARMA-GARCH. Dla każdego rozpatrywanego szeregu czasowego wybrano model na podstawie kryteriów informacyjnych Akaikego i Schwarza. Na tym etapie można było zaobserwować wyraźne różnice między bitcoinem a walutami fiducjarnymi. O ile bowiem poziom

względnych przyrostów kursów wszystkich badanych walut fiducjarnych nie wykazywał istotnych efektów ARMA, o tyle w przypadku bitcoina najlepsze dopasowanie uzyskano dla modelu ARMA(2, 2).

Dla reszt z modelu ARMA dopasowano modele GARCH. Po zaobserwowaniu asymetrii rozkładów bezwarunkowych do modelowania rozkładów warunkowych wykorzystano asymetryczny rozkład GED. Tę klasę rozkładów wybrano ze względu na ich dużą elastyczność, jeżeli chodzi o możliwość modelowania zarówno grubych ogonów rozkładu, jak i skośności, a także z uwagi na to, że jej szczególnym przypadkiem jest rozkład normalny. Dzięki temu model GARCH z normalnym rozkładem reszt może być traktowany jako model zagnieżdżony wobec bardziej ogólnego modelu z rozkładem s-GED, co z kolei umożliwia porównanie jakości dopasowania dla różnych wariantów restrykcji nałożonych na parametry modelu. W tej fazie badania zarówno w przypadku bitcoina, jak i walut fiducjarnych najlepsze dopasowanie uzyskano dla modelu GARCH(1, 1). Nie oznacza to jednak, że bitcoin nie różni się pod tym względem od walut fiducjarnych. W przypadku wszystkich walut fiducjarnych istotny był parametr kształtu odpowiadający za grube ogony i podwyższoną kurtozę rozkładów reszt, większy od 1, choć mniejszy od 2 (kurtoza wyższa niż w przypadku rozkładu normalnego, ale nadwyżkowa kurtoza poniżej nadwyżkowej kurtozy rozkładu Laplace'a). W przypadku bitcoina parametr kształtu był mniejszy od 1, co świadczy o grubszych ogonach i wyższej kurtozie.

Żadna waluta fiducjarna nie cechowała się istotnymi parametrami odpowiadającymi za asymetrię rozkładu reszt, natomiast w przypadku bitcoina zaobserwowano istotną skośność lewostronną. W samym modelu GARCH dla żadnej z walut fiducjarnych nie odnotowano istotnej stałej ani dla poziomu, ani dla wariancji, podczas gdy dla bitcoina obie stałe były istotne. Ta obserwacja w połączeniu z następną – że parametry stojące odpowiednio przy opóźnionych kwadratach reszt i przy opóźnionych warunkowych wariancjach nie spełniają warunku istnienia skończonej długoterminowej (bezwarunkowej) wariancji, a więc i warunku stacjonarności – pozwala przypuszczać, że model ARMA(2, 2)-GARCH(1, 1) może nie być wystarczający do opisania procesu względnych przyrostów kursu bitcoina. Stanowi to kolejną różnicę między kursem bitcoina a kursami walut fiducjarnych, w przypadku których modele GARCH(1, 1) pozwalały na określenie długoterminowych (bezwarunkowych) wariancji.

Na podstawie przeprowadzonej analizy jakościowej i badań ilościowych można sformułować wnioski dotyczące podobieństwa bitcoina do walut fiducjarnych.

Notowania bitcoina w ciągu ostatnich 10 lat i zmiany kapitalizacji jego rynku pozwalają przypuszczać, że bitcoin znajduje się we wczesnej fazie cyklu życia. Może to tłumaczyć jego bardzo wysoką zmienność oraz wyraźny trend wzrostowy, który

utrzymuje się od ponad 10 lat, choć przy dużej zmienności i z licznymi zaburzeniami przypominającymi bąble spekulacyjne i krachy. Pojawiają się obawy, że wzrost ten może być fazą bąbla spekulacyjnego o znacznie większej skali niż te, które od czasu do czasu go zaburzają. Są one zbieżne z opiniami niektórych czołowych ekspertów, którzy twierdzą, że bitcoin i inne kryptowaluty niezabezpieczone aktywami nie mają żadnej wartości wewnętrznej. Brak wartości wewnętrznej i czysto spekulacyjny charakter mogą być innym wytłumaczeniem wysokiej zmienności. Wskazane cechy istotnie odróżniają bitcoina i podobne kryptowaluty od walut fiducjarnych. Te ostatnie charakteryzują się mniejszą zmiennością, nie wykazują trendu długoterminowego, a ich wartość można odnieść do wartości dóbr i usług dostępnych w gospodarce, w której waluty te są środkiem wymiany. Nawet jeśli uwzględnić fakt, że teoretycznie bitcoin też może być środkiem wymiany (nie musi być w tym celu prawnym środkiem płatniczym) i jako taki może mieć powiązanie z wartością dóbr i usług, to siła tego powiązania będzie naturalnie słabsza, ponieważ żadne państwo (poza pomijalnym wyjątkiem) nie gwarantuje swoim autorytetem takiego charakteru bitcoina. Nie ma instytucji, która miałaby prawny obowiązek przyjąć bitcoina w rozliczeniu. Nie można nim też opłacić podatków. To może być przyczyną braku fundamentalnego zakotwiczenia dla wartości rynkowej bitcoina, co z kolei sprzyja sporadycznym wybuchom jej zmienności.

Zaobserwowane różnice między właściwościami stochastycznymi szeregów czasowych względnych przyrostów kursów bitcoina i walut fiducjarnych nie dają podstaw do przewidywań, jak będą się one kształtować w przyszłości. Na przykład trudno prognozować, czy będą się one zmniejszać w miarę dojrzewania rynku bitcoina.

Bardzo wysoka zmienność, utrzymujący się wyraźny trend wzrostowy kursu, a także brak dającej się zaobserwować konwergencji bitcoina z walutami fiducjarnymi stanowią podstawę do wysunięcia przypuszczenia, że bitcoin jako instrument rynku walutowego (o ile przyjąć, że jest instrumentem tego typu) ciągle znajduje się na bardzo wczesnym etapie rozwoju. Określenie jego docelowego podobieństwa do walut fiducjarnych pod względem badanych tu właściwości nie wydaje się jednak możliwe na podstawie dostępnych w tej chwili danych.

Konkludując, obecnie nie można stwierdzić, czy bitcoin staje się podobny pod względem właściwości statystycznych do walut fiducjarnych. Ze względu na pierwotny cel powstania i swoją konstrukcję techniczną może w przyszłości upodabniać się do klasycznych walut, ale obecnie traktuje się go przede wszystkim jako przedmiot spekulacji. W przyszłości możliwe jest zarówno to, że nie będzie miał wartości, jak i to, że stanie się ważnym elementem światowej gospodarki. To samo dotyczy niektórych innych kryptowalut. Ich przyszłość zależy głównie od rozwoju sytuacji dotyczącej: faktycznego społecznego uznania bądź nieuznania za środek wymiany

i przechowywania wartości; regulacji prawnych; możliwości tworzenia wartości dodanej dzięki wbudowanym funkcjom, nieodłącznym od sieci danej kryptowaluty; rozwoju nowych dodatkowych funkcji; powstawania projektów konkurencyjnych (substytucyjnych); powstawania projektów komplementarnych oraz wynikającego z tego efektu synergii; nowych zastosowań już istniejących projektów kryptowalutowych.

Źródło finansowania badania

Badanie zostało zrealizowane w ramach projektu *Przeprowadzenie prac badawczo-rozwojowych przez EMPIRICA SA w celu opracowania algorytmu zarządzania płynnością instrumentów opartych na technologii blockchain*, współfinansowanego z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego – Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Dolnośląskiego 2014–2020 (EFRR RPO WD 2014–2020).

Bibliografia

Ammous, S. (2018). *The bitcoin standard. The decentralized alternative to central banking*. Wiley.

Bank of England. (2021, 15 czerwca). *Innovation to serve the public interest – speech by Andrew Bailey*. https://www.bankofengland.co.uk/speech/2021/june/andrew-bailey-cityuk-annual-conference.

Baran, P. (1962). *On Distributed Communications Networks*. https://www.rand.org/pubs/papers/P2626.html.

Benson, K., Faff, R., Smith, T. (2015). Injecting liquidity into liquidity research. *Pacific-Basin Finance Journal*, *35B*, 533–540. https://doi.org/10.1016/j.pacfin.2015.10.001.

Cermak, V. (2017, 2 maja). *Can Bitcoin Become a Viable Alternative to Fiat Currencies? An empirical analysis of Bitcoin's volatility based on a GARCH model*. https://doi.org/10.2139/ssrn.2961405.

Chen, S., Chen, C. Y.-H., Härdle, W. K., Lee, T., Ong, B. (2016). *A first econometric analysis of the CRIX family* (SFB 649 Discussion Paper 2016-031). https://doi.org/10.2139/ssrn.2832099.

Chohan, U. W. (2017, 12 lutego). *A History of Dogecoin* (Discussion Paper: Notes on the 21st Century). https://doi.org/10.2139/ssrn.3091219.

Chu, J., Chan, S., Nadarajah, S., Osterrieder, J. (2017). GARCH Modelling of Cryptocurrencies. *Journal of Risk and Financial Management*, *10*(4), 1–16. https://doi.org/10.3390/jrfm10040017.

Corbet, S., Lucey, B., Urquhart, A., Yarovaya, L. (2019). Cryptocurrencies as a financial asset: A systematic analysis. *International Review of Financial Analysis*, *62*, 182–199. https://doi.org/10.1016/j.irfa.2018.09.003.

Cottrell, A., Lucchetti, R. (2022). *Gretl User's Guide*. https://gretl.sourceforge.net/gretl-help/gretl-guide.pdf.

Díaz, A., Escribano, A. (2020). Measuring the multi-faceted dimension of liquidity in financial markets: A literature review. *Research in International Business and Finance*, *51*, 1–16. https://doi.org/10.1016/j.ribaf.2019.101079.

Doornik, J. A., Hansen, H. (2008). An Omnibus Test for Univariate and Multivariate Normality. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, *70*(s1), 927–939. https://doi.org/10.1111/j.1468-0084.2008.00537.x.

Franke, J., Härdle, W. K., Hafner, C. M. (2019). *Statistics of Financial Markets: An Introduction* (5th edition). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-13751-9.

Friedman, Z. (2021, 3 stycznia). *Bitcoin Jumps To $34,000, But Here's Why Warren Buffett Will Never Own It*. https://www.forbes.com/sites/zackfriedman/2021/01/03/bitcoin-hit-34000-but-heres-why-warren-buffett-will-never-own-it/?sh=517076542bba.

Hamrick, J. T., Rouhi, F., Mukherjee, A., Feder, A., Gandal, N., Moore, T., Vasek, M. (2021). An examination of the cryptocurrency pump and dump ecosystem. *Information Processing and Management*, *58*(4), 1–35. https://doi.org/10.1016/j.ipm.2021.102506.

Imisiker, S., Tas, B. K. O. (2018). Wash trades as a stock market manipulation tool. *Journal of Behavioral and Experimental Finance*, *20*, 92–98. https://doi.org/10.1016/j.jbef.2018.08.004.

Jarque, C. M., Bera, A. K. (1987). A Test for Normality of Observations and Regression Residuals. *International Statistical Review*, *55*(2), 163–172. https://doi.org/10.2307/1403192.

Katsiampa, P. (2017). Volatility estimation for Bitcoin: A comparison of GARCH models. *Economics Letters*, *158*, 3–6. https://doi.org/10.1016/j.econlet.2017.06.023.

Lilliefors, H. W. (1969). On the Kolmogorov-Smirnov Test for the Exponential Distribution with Mean Unknown. *Journal of the American Statistical Association*, *64*(325), 387–389. https://doi.org/10.1080/01621459.1969.10500983.

Montag, T. (2018, 1 maja). *Warren Buffett explains one thing people still don't understand about bitcoin*. https://www.cnbc.com/2018/05/01/warren-buffett-bitcoin-isnt-an-investment.html.

Nakamoto, S. (2008, 31 października). *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*. https://nakamotoinstitute.org/bitcoin/.

Olbryś, J., Mursztyn, M. (2016). Głębokość rynku jako jeden z wymiarów płynności Giełdy Papierów Wartościowych w Warszawie SA. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego. Finanse, Rynki Finansowe, Ubezpieczenia*, (1), 101–112. https://doi.org/10.18276/frfu.2016.79-07.

Olbryś, J., Mursztyn, M. (2017a). Dimensions of Market Liquidity: The Case of the Polish Stock Market. W: N. Tsounis, A. Vlachvei (red.), *Advances in Applied Economic Research* (s. 151–166). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48454-9_12.

Olbryś, J., Mursztyn, M. (2017b). Elastyczność rynku jako jeden z wymiarów płynności Giełdy Papierów Wartościowych w Warszawie S.A. *Zarządzanie i Finanse. Journal of Management and Finance*, *15*(3), 21–36. http://wzr.ug.edu.pl/.zif/5_2.pdf.

Pennec, G. L., Fiedler, I., Ante, L. (2021). Wash trading at cryptocurrency exchanges. *Finance Research Letters, 43*. https://doi.org/10.1016/j.frl.2021.101982.

Piech, K. (red.). (2016). *Leksykon pojęć na temat technologii blockchain oraz kryptowalut*. Ministerstwo Cyfryzacji. https://www.gov.pl/documents/31305/0/leksykon_pojec_na_temat_technologii_blockchain_i_kryptowalut.pdf/77392774-1180-79ab-4dd5-089ffab37602.

Shapiro, S. S., Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, *52*(3–4), 591–611. https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591.

Shrivastava, G., Le, D.-N., Sharma, K. (red.). (2020). *Cryptocurrencies and Blockchain Technology Applications*. Wiley-Scrivener Publishing. https://doi.org/10.1002/9781119621201.

Statista. (b.r. a). *Bitcoin market dominance – its market cap relative to the market cap of all other cryptocurrencies in the world – from April 2013 up until November 15, 2022*. Pobrane 25 października 2021 r. z https://www.statista.com/statistics/1269669/bitcoin-dominance-historical-development/.

Statista. (b.r. b). *Overall cryptocurrency market capitalization per week from July 2010 to November 2022*. Pobrane 2 listopada 2021 r. z https://www.statista.com/statistics/730876/cryptocurrency-maket-value/.

Trimborn, S., Härdle, W. K. (2018). CRIX an Index for cryptocurrencies. *Journal of Empirical Finance*, *49*, 107–122. https://doi.org/10.1016/j.jempfin.2018.08.004.

Yermack, D. (2013). *Is Bitcoin a Real Currency? An economic appraisal* (NBER Working Paper No. 19747). https://doi.org/10.3386/w19747.