

*Zbigniew Krysiak*Szkoła Główna Handlowa w Warszawie
<https://orcid.org/0000-0002-5894-7075>

Modelowanie rozkładów cen akcji i ETF a szacowanie zmienności aktywów dla elektrowni jądrowych

Streszczenie

Celem badania było ustalenie możliwości wykorzystania zmienności notowań cen na giełdach podmiotów z sektora nuklearnego do zastosowania i modelowania rozkładów NPV w projektach elektrowni jądrowych. Przedstawiono modelowanie rozkładów cen trzech akcji spółek i trzech funduszy ETF działających w USA, Wielkiej Brytanii i Chinach z sektora jądrowego w okresie 2023–2025. Do tego celu wykorzystano podejście Back-Test i zastosowano symulację Monte Carlo, posilując się modelem geometrycznego ruchu Browna. Modelowane rozkłady na kwiecień 2025 zostały porównane z cenami notowanymi na giełdzie dla badanych spółek i funduszy ETF także w kwietniu 2025, co miało na celu określenie jakości modelu. Uzyskano dobrą dokładność modelowania cen akcji dla spółki CNNC z Chin, dwóch ETF z USA oraz jednego ETF z Wielkiej Brytanii. Modelowane ceny dla tych podmiotów były bardzo zbliżone do rzeczywistych cen na rynku. Taki wniosek pozwolił na stwierdzenie, że ceny akcji na giełdzie tych podmiotów replikują zachowanie się zmienności aktywów elektrowni jądrowych. W związku z tym zmienność tych podmiotów może być zastosowana do modelowania rozkładów NPV przy realizacji projektów nuklearnych.

Słowa kluczowe: fundusze ETF, ceny akcji, zmienność cen akcji, symulacja Monte Carlo, Back-Test, modelowanie rozkładów cen akcji, modelowanie rozkładu NPV elektrowni jądrowych, implikowana z cen akcji zmienność dla oceny NPV projektów nuklearnych, elektrownie jądrowe, małe modularne reaktory SMR, reaktory wysokotemperaturowe HTGR

Kody klasyfikacji JEL: E44, F21, G11, G15, G23, G32

1. Wprowadzenie

Rozwój energetyki jądrowej i przemysłu nuklearnego w świecie przyjmuje coraz większą skalę. Od kilku lat obserwuje się istotny wzrost aktywności w zakresie rozwoju badań, konstrukcji i budowy małych reaktorów jądrowych przeznaczonych do produkcji ciepła i energii elektrycznej. Obecnie rozwijany jest model budowy elektrowni jądrowych, który polega na produkcji i montowaniu reaktorów w fabryce, a następnie transporcie ich na miejsce lokalizacji elektrowni. Dotychczas dominowały tzw. duże elektrownie jądrowe o mocy powyżej 500 MW, których budowa odbywała się w docelowym miejscu ich operacyjnej działalności. Obecny postęp w konstrukcji, technice, technologii i budowie małych reaktorów jądrowych (ang. *small modular reactors*, SMR) powoduje szybki rozwój przemysłu nuklearnego, a w związku z tym silnie zwiększa się popyt ze strony rynku, co pociąga za sobą duże możliwości generowania zysków dla producentów i inwestorów.

Istotną zaletą SMR-ów jest fakt, że czas realizacji takich inwestycji jest kilka razy krótszy od inwestycji w duże elektrownie jądrowe. W ostatnich latach uruchomiono na świecie liczne fundusze inwestycyjne służące finansowaniu przedsięwzięć nuklearnych, a ponadto wzrosło zainteresowanie przedsiębiorstw z branży nuklearnej do emitowania akcji na giełdach. Do notowań giełdowych wprowadzono akcje i fundusze ETF (ang. *exchange-traded fund*, ETF) licznych spółek z sektora nuklearnego działających na różnych kontynentach globu ziemskiego.

Zaawansowanie technologiczne w konstrukcji i budowie małych modularnych reaktorów dotyczy w szczególności tzw. wysoko-temperaturowych (ang. *high temperature gas-cooled reactors*, HTGR). Polska, z opracowaną w latach 2018–2023 koncepcją reaktora POLA, należy do czołowej grupy pięciu krajów, obok Japonii, Rosji, USA i Południowej Afryki, które stworzyły taki reaktor HTGR. Dwa tego typu reaktory w Chinach i jeden w Japonii rozpoczęły już działalność operacyjną. Reaktor POLA może być bazą dla reaktorów komercyjnych wykorzystywanych w polskich zakładach przemysłowych [Boettcher i in., 2023, s. 9; Narodowe Centrum Badań Jądrowych, 2024].

Istotną przyczyną przyspieszenia rozwoju przemysłu nuklearnego jest wzrost popytu na reaktory w technologii SMR. Obecnie na świecie działa ok. 450 różnego typu, głównie dużych, elektrowni jądrowych, a prognozy wskazują, że w długiej perspektywie do 2050 roku nastąpi wielki boom popytowy na nowe elektrownie jądrowe. W perspektywie 25 lat na świecie może powstać ok. 1000–2000 nowych elektrowni jądrowych opartych głównie na SMR-ach, w Europie ok. 100–200, zaś w Polsce ok. 10–20 [Ministerstwo Energetyki, 2017]. Można sądzić, że istotny udział w budowie elektrowni jądrowych będą miały technologie typu HTGR. Krzywa wykładnicza postępu innowacyjnego, inżynierskiego, technologicznego i produkcyjnego reaktorów SMR wskazuje na duże prawdopodobieństwo zbudowania w przyszłości dużej liczby nowych elektrowni jądrowych. Biorąc pod uwagę wyczerpujące się możliwości działania operacyjnego starych elektrowni, a w szczególności pierwszej generacji, budowanych po 1950 r., a także rosnącą liczbę podmiotów w świecie zaangażowanych przy produkcji różnych skład-

ników i komponentów do SMR-ów, jak i rosnące zapotrzebowanie na stabilne źródła energii w świecie, przyszłość zastosowań SMR-ów rysuje się bardzo pozytywnie.

Silne trendy rosnącego popytu na SMR-y przyczyniają się z jednej strony do coraz to większego zainteresowania finansowaniem i inwestowaniem w tym obszarze, zaś z drugiej strony są dużym wyzwaniem dla jakości procesu oceny efektywności inwestycji w elektrownie i elektrociepłownie jądrowe na bazie SMR-ów. Szczególnym wyzwaniem jest zapewnienie wysokiej dokładności szacowania efektów finansowych, stóp zwrotu, wartości nakładów inwestycyjnych, kosztu produkcji energii i innych ważnych miar efektywności. W tym kontekście ocena i szacowanie ryzyka, a w szczególności właściwy dobór zmienności jako miar ryzyka składników przepływów pieniężnych w projektach elektrowni jądrowych, stają się kluczowe dla dokładności przy szacowaniu rozkładu NPV i jego adekwatności z procesami fundamentalnymi w sektorze nuklearnym.

Analiza zrealizowanych inwestycji dużych elektrowni jądrowych wskazuje na wysokie negatywne odchylenia planowanych od zrealizowanych nakładów, co nie zachęcało inwestorów do lokowania środków finansowych w tej branży. Z tego względu, w większości, duże elektrownie jądrowe były budowane przy pomocy środków z budżetów państw. Budowanie elektrowni jądrowych na bazie SMR-ów umożliwia stosowanie metod szacowania kosztów i wartości inwestycji, które dostarczają większą dokładność, a zatem niższe odchylenia realizowanych od planowanych nakładów.

2. Problem badawczy, cel i hipotezy

Ocena dokładności wartości NPV projektu poprzez określenie jego rozkładu prawdopodobieństwa jest bardzo ważnym celem, na który składa się wyznaczenie rozkładu DCF projektu i rozkładu nakładów inwestycyjnych. Doświadczenia przy budowie dużych elektrowni jądrowych wskazują, że trudniej było uzyskać dużą dokładność planowanych nakładów niż ustalić DCF wynikających z przychodów i kosztów działalności operacyjnej, czyli po przekazaniu elektrowni do eksploatacji. Okres eksploatacji elektrowni jądrowej trwa od 60 do 80 lat, a w niedługiej perspektywie okres ten może się nawet wydłużyć do 100 lat. Wysokie nakłady inwestycyjne mogą być rozłożone w czasie, nawet na 100 lat, a ich wielkość będzie istotna dla efektywności całej inwestycji. Precyzja w określeniu wielkości nakładów będzie nie tylko wpływać na efektywność inwestycji, ale także na ryzyko w procesie aranżacji odpowiednich funduszy do jej finansowania. W przeszłości niska dokładność szacowania zapotrzebowania na finansowanie inwestycji, co miało miejsce w przypadku dużych elektrowni jądrowych, powodowała przedłużanie się okresu realizacji inwestycji, a to z kolei zmniejszało efektywność ekonomiczną całej elektrowni.

Istotnymi składnikami w ocenie efektywności elektrowni jądrowych, a w szczególności opartych na SMR-ach, jest modelowanie cen prądu i ciepła jako czynników istotnych przy ustalaniu przychodów w trakcie działania operacyjnego oraz modelowanie wartości nakładów

na aktywa do momentu przekazania elektrowni do użytku. Oba czynniki razem ostatecznie decydują o wartości elektrowni jądrowej i jej efektywności. Do ustalenia rozkładu wartości takiego projektu potrzebne jest przypisanie zmienności poszczególnym składnikom przepływów pieniężnych, co w przypadku dużych elektrowni jądrowych było bardzo trudne ze względu na brak danych historycznych i ich niepowtarzalne modele techniczne, operacyjne i finansowe, co w efekcie prowadziło do deficytu wzorców zmienności dla składników przepływów pieniężnych w tego typu inwestycjach.

Obserwowany, dopiero od kilku lat, proces wprowadzania do obrotu giełdowego aktywów i funduszy ETF sektora nuklearnego umożliwia wykorzystanie ich zmienności do szacowania rozkładów wartości i nakładów inwestycyjnych w projektach jądrowych. Spółki i fundusze ETF odzwierciedlają bardzo szerokie spektrum działalności wszystkich obszarów sektora nuklearnego, co oznacza, że inwestorzy w elektrownie jądrowe są odbiorcami produktów i usług pochodzących z różnych części tego sektora. Można to zilustrować w ten sposób, że jeśli np. fundusz ETF replikuje portfel spółek realizujących zapotrzebowanie na produkty i usługi przy budowie i działalności operacyjnej elektrowni jądrowej to jest on niejako odzwierciedleniem fundamentalnych procesów biznesowych i mechanizmów popytowo-podażowych w sektorze nuklearnym. Taka sytuacja tworzy silne podstawy do zastosowania zmienności cen akcji i funduszy ETF przy ocenie ryzyka i rozkładu NPV projektów jądrowych.

W ramach przedmiotowego badania dokonana zostanie ocena jakości prognozowania cen akcji i funduszy z sektora nuklearnego w oparciu o szacowanie rozkładów zmienności tych aktywów w procesie symulacji Monte Carlo (SMC) i porównanie uzyskanych rozkładów z ceną akcji lub funduszu ETF w dacie przyjętego horyzontu prognozy. Celem dodatkowym jest także przedstawienie metody Back-Testu do oceny jakości prognozowania cen akcji i funduszy ETF. W procesie realizacji celu postawiono dwie hipotezy:

Pierwsza hipoteza:

Notowane na rynku ceny akcji lub funduszy ETF z sektora nuklearnego znajdują się w bliskiej odległości od wartości oczekiwanej modelowanego rozkładu cen akcji lub funduszy ETF.

Druga hipoteza:

W przypadku wysokiej dokładności modelowania cen akcji lub funduszy ETF z sektora nuklearnego zastosowana zmienność (odchylenie standardowe stóp zwrotu z cen akcji lub funduszy ETF) może być odpowiednim „estymatorem” zmienności dla szacowania rozkładów NPV i efektywności projektów nuklearnych oraz elektrowni jądrowych.

W dalszej kolejności akcje i fundusze ETF z sektora jądrowego będą nazywane nuklearnymi aktywami (NUA). Badanie ograniczono do wybranych NUA notowanych na giełdach w USA, Wielkiej Brytanii i Chinach. Ograniczenie do tych krajów nie redukuje reprezentatywności NUA w sektorze jądrowym na świecie, gdyż te wybrane obejmują swoim zasięgiem

cały szereg różnych firm z wielu krajów i kontynentów działających w branży nuklearnej, a więc nie tylko z USA, Wielkiej Brytanii i Chin. Zakres czasowy obejmuje okres od początku 2023 do kwietnia 2025 roku, gdyż w tym przedziale czasowym obserwuje się dużą liczbę tworzonych koncepcji, konstrukcji, budowy i wprowadzania do działalności operacyjnej komercyjnych SMR-ów przy produkcji energii. W tym okresie obserwuje się także początek giełdowych notowań dla większości badanych NUA.

Do weryfikacji hipotez wykorzystano następujące metody badawcze: studia literaturowe, analiza statystyczna i prognozowanie ekonometryczne, w tym w szczególności modelowanie rozkładów cen akcji oparte na procesach stochastycznych szeregów czasowych.

3. Przegląd piśmiennictwa

W literaturze przedmiotu poruszane są zagadnienia ekonomiki reaktorów jądrowych [Rothwell, 2016; Weibezahn, 2024], efektywności wykorzystania SMR-ów typu HTR w konwencjonalnych elektrowniach [Bartnik, 2024], oceny efektywności małych reaktorów jądrowych, w tym szacowania NPV projektów inwestycyjnych z wykorzystaniem symulacji Monte Carlo [Steigerwald i in., 2023] oraz metod oceny efektywności projektów inwestycyjnych i kosztów budowy elektrowni jądrowych na bazie SMR-ów [Steigerwald i in., 2023; Krysiak, 2025].

Badanie NPV kilkunastu SMR-ów, a wśród nich reaktorów HTR, wykazało przewagę reaktorów HTR nad pozostałymi typami SMR-ów [Steigerwald, Weibezahn, 2023]. W badaniu tym zastosowano metodę symulacji Monte Carlo do oszacowania rozkładów NPV inwestycji dla kilkunastu reaktorów, w tym także typu HTR [Steigerwald, Weibezahn, 2023]. W celu pomiaru opłacalności komercyjnej dla producenta oszacowano NPV na podstawie obecnie akceptowanych kosztów wytwarzania energii elektrycznej oraz kosztów uśrednionych. Do określenia rozkładów NPV wykorzystano dwa sposoby szacowania zmienności kosztów budowy reaktorów: jeden to teoretyczne podejście wykorzystujące szacowane koszty [Roulstone, 2020; Rothwell, 2016], a drugi dla zmienności kosztów oferowanych przez producentów. Do SMC NPV w podejściu teoretycznym wykorzystano rozkłady dla kosztów inwestycyjnych szacowanych według Roulstone [2020], średniej hurtowej ceny energii elektrycznej, średniego ważonego kosztu kapitału i współczynnika obciążenia mocy reaktora. Ponieważ w podejściu drugim, czyli oferowanych kosztów przez producenta, koszty inwestycyjne są deterministyczne, symulowano więc tylko rozkład średniej hurtowej ceny energii elektrycznej jako zmiennej losowej, średniego ważonego kosztu kapitału i współczynnika obciążenia mocy reaktora. We wszystkich przypadkach założono okres budowy wynoszący trzy lata.

Analiza wyników symulacji NPV metodą SMC w prezentowanym badaniu [Steigerwald, Weibezahn, 2023] wskazuje, że dla prawie wszystkich z badanych reaktorów wartości NPV były ujemne w podejściu teoretycznym i prawie zawsze ujemne przy symulacji dla przypadku producenta [Steigerwald, Weibezahn, 2023]. Wynik NPV dla reaktora z wodą pod ciśnieniem, którym jest amerykański reaktor NuScale, daje nieznacznie dodatnie wartości z medianą

0,3 mln USD/MWe, ale z zakresem między kwartyłowym od –0,3 do 1,2 mln USD/MWe. Tylko reaktor wysokotemperaturowy PBMR-400 z Republiki Południowej Afryki wykazał w pełni dodatnią wartość NPV w przedziale między kwartyłami od 1,5 do 2,9 mln USD/MWe i medianą 2,1 mln USD/MWe. Ta koncepcja wykazała największą różnicę między kosztami szacowanymi a kosztami oferowanymi przez producenta wśród wszystkich typów HTR.

Istotne w przedmiotowym badaniu będzie wykorzystanie już dotychczas istniejących osiągnięć w zakresie oceny efektywności projektów inwestycyjnych [Rogowski, 2004], a także oceny ryzyka w projektach [Rogowski, Michalczewski, 2004; Krysiak, 2015b], jak również modelowania rozkładów NPV projektów inwestycyjnych i wartości aktywów z wykorzystaniem symulacji Monte Carlo [Krysiak, 2015a].

Zagadnienia oceny efektywności i atrakcyjności NUA z sektora jądrowego notowanych na giełdach stanowią deficyt w opracowaniach naukowych. Prawdopodobną przyczyną deficytu opracowań naukowych w tym obszarze jest fakt, że spółki i fundusze ETF rozpoczęły swoje notowania na giełdach niedawno, bo w latach 2022–2024, dlatego niniejsze badanie i jego wyniki oraz wnioski mogą być wkładem w tej dziedzinie.

W dotychczasowych opracowaniach naukowych do szacowania rozkładów NPV elektrowni jądrowych metodą SMC nie wykorzystano zmienności wynikającej z cen NUA notowanych na giełdach z sektora jądrowego, dlatego celem prezentowanego badania jest wypełnienie tej luki. W przypadku pozytywnego zweryfikowania hipotezy badawczej postawionej w przedmiotowym opracowaniu można będzie uzyskać duże przekonanie, że implikowana zmienność z cen akcji i funduszy ETF podmiotów sektora nuklearnego będzie dobrze odzwierciedlać zmienność wartości aktywów zaangażowanych w elektrowniach jądrowych. Taka sytuacja może prowadzić do wniosku, że zachowanie się cen aktywów giełdowych sektora nuklearnego będzie bardzo pomocne nie tylko przy wycenie podmiotów spoza giełdy, ale także uzyska istotne znaczenie dla prognozowania rozkładów NPV planowanych i realizowanych elektrowni jądrowych i innych inwestycji nuklearnych. Wydaje się, że rozwijanie takiego kierunku badań może mieć istotne znaczenie nie tylko teoretyczne, ale także aplikacyjne z perspektywy praktyki.

4. Metodologia badań i charakterystyka badanych danych

Nakłady inwestycyjne w elektrowniach jądrowych można podzielić na różne pozycje kosztowe. Koszt sprzętu stanowi ok. 40% całkowitego kosztu inwestycji i charakteryzuje się dużą zmiennością [Locatelli i in., 2012]. Sprzęt instalowany w energetyce jądrowej pochodzi z przemysłu jądrowego, który obecnie bardzo się rozwinał, czego przykładem są notowania akcji na giełdach licznych spółek, które ten przemysł tworzą.

W celu modelowania rozkładów wartości NUA wybrano geometryczny proces ruchów Browna (ang. *Geometric Brownian Motion*, GBM), co również wcześniej sugerowano w literaturze przedmiotu [Locatelli i in., 2012], ale wówczas nie był dostępny rynek giełdowy dla

aktywów nuklearnych, aby można było implikować z niego zmienność dla szacowania rozkładów NPV projektów jądrowych na podstawie szacowania zmienności cen NUA notowanych na giełdzie, co obecnie wygląda całkowicie inaczej.

Przy pomocy modelu GBM zostanie dokonana prognoza rozkładu cen akcji i funduszy ETF, które traktuje się jako „replikujące” i naśladujące zachowanie się aktywów działających w elektrowniach jądrowych lub produkowanych przez różne firmy dla sektora nuklearnego. Do prognozowanych rozkładów zostaną odniesione ceny aktywów notowanych na giełdzie w celu obliczenia odchylen. W przypadku bliskich odległości cen NUA od wartości oczekiwanych prognozowanych rozkładów można będzie zgłosić postulat, aby w takiej sytuacji zmienność zastosowana w modelu prognozowanych rozkładów była dobrym estymatorem zmienności dla oceny projektów jądrowych i szacowania rozkładów NPV takich projektów.

Atutem modelu GBM do symulacji rozkładów NUA na giełdzie, a także przyszłych rozkładów kosztów aktywów elektrowni jądrowej, jest fakt, że wymaga on tylko dwóch parametrów, tj. ceny początkowej NUA lub, w przypadku elektrowni, kosztu początkowego i zmienności. Wzór (1) przedstawia postać przyjętego procesu stochastycznego bazującego na modelu GBM.

$$dS = rSdt + S\sigma\sqrt{dt}N(0,1) \quad (1)$$

gdzie:

dS = zmiana ceny NUA w bardzo krótkiej jednostce czasu,

r = stopa wolna od ryzyka,

S = cena NUA,

dt = bardzo krótki interwał czasowy,

σ = odchylenie standardowe stóp zwrotu z NUA,

$N(0,1)$ = rozkład standaryzowany normalny stóp zwrotu z cen NUA.

Po scałkowaniu wzoru (1) uzyskuje się wzór (2)

$$S_T = S_0 e^{\left[\left(r - \frac{\sigma^2}{2}\right)T + \sigma\sqrt{T}N(0,1)\right]} \quad (2)$$

gdzie:

T = horyzont modelowania,

S_T = modelowana cena NUA w horyzoncie czasowym T ,

Model we wzorze (2) wykorzystano do oszacowania rozkładu cen NUA w zadanym horyzoncie czasowym T w oparciu o symulację Monte Carlo w tzw. podejściu Back-Testu, to znaczy, że znane ceny kwotowanych na giełdzie NUA porównano z oszacowanym rozkładem z modelu (2) na koniec okresu badania.

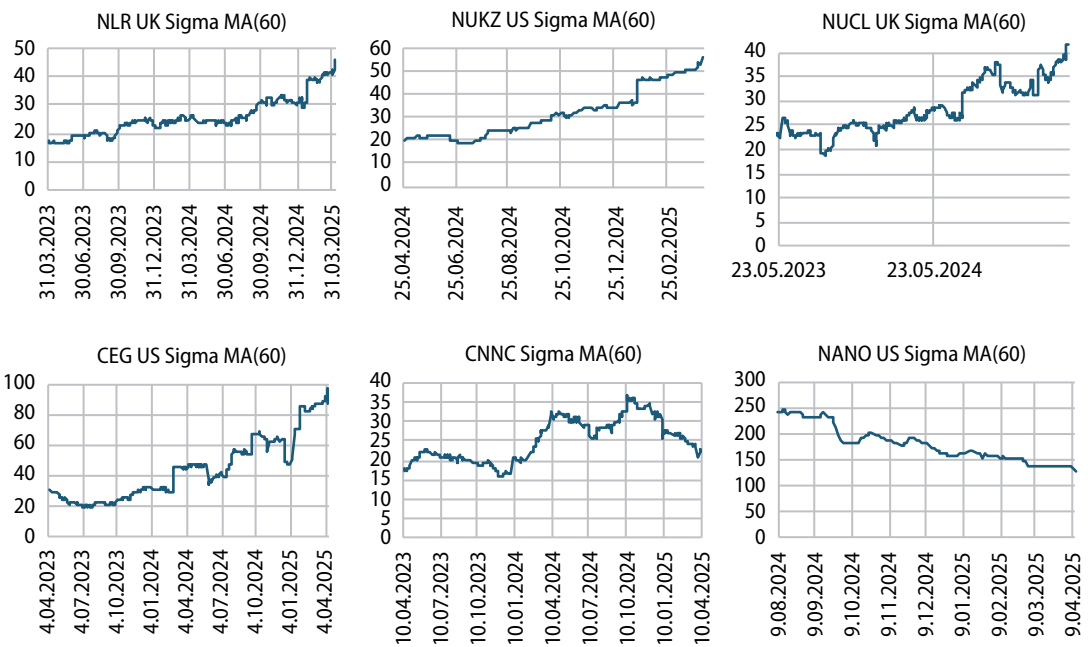
Do badania wykorzystano ceny notowań na giełdach sześciu NUA, które odzwierciedlają istotną część przemysłu nuklearnego w świecie, z czego trzy to fundusze ETF, a trzy to spółki. Podstawowe charakterystyki danych wejściowych do modelu (2) zostały przedstawione w tabeli 1. Okres modelowania obejmował horyzont czasowy od 1,4 roku do 3,3 lat. Zmienność zastosowana w modelowaniu, w zależności od rodzaju NUA, znajduje się w zakresie od 22% do 180%.

Tabela 1. Dane wejściowe i parametry do modelu prognozowania rozkładów cen badanych NUA

Dane wejściowe i parametry do modelu prognozowania rozkładów cen spółek i funduszy ETF						
Spółka/ETF	Data początkowa okresu badań	Data końcowa okresu badań	Horyzont modelowania rozkładów cen NUA w latach [T]	Zmienność stóp zwrotu NUA zastosowana w modelu [σ] (%)	Stopa wolna od ryzyka [r] (%)	Cena początkowa NUA [S_0]
ETF NLR USA	3.01.2023	9.04.2025	3,3	28	4,5	55
ETF NUKZ USA	25.01.2024	9.04.2025	1,8	36	4,5	25
ETF NUCL UK	17.02.2023	10.04.2025	3,1	30	4,5	19
Spółka CEG USA	3.01.2023	11.04.2025	3,3	44	4,5	82
Spółka CNNC China	3.01.2023	10.04.2025	3,3	22	4,5	6
Spółka NANO USA	8.05.2024	11.04.2025	1,4	180	4,5	5

Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonych badań.

Rysunek 1. Zmienność dla wszystkich badanych NUA jako 60-dniowa średnia krocząca (%)



Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonych badań.

Na rysunku 1 przedstawiono odchylenia standardowe stóp zwrotu notowanych cen jako 60-dniową średnią kroczącą dla wszystkich badanych NUA w okresie modelowania. Obserwowana zmienność dla wszystkich NLR, NUKZ, NUKL i CEG istotnie rośnie, zaś dla NANO spada, a w przypadku CNCC jest stabilna na poziomie ok. 30%. Wzrost zmienności występuje w szczególności dla funduszy ETF, co wiąże się z dużą aktywnością w sektorze nuklear-

nym. Spółka NANO jako producent i usługodawca bardzo specjalistycznych mikroreaktorów jądrowych odnotowuje spadek zmienności, co można interpretować jako zmniejszenie się jej ryzyka przychodów w związku ze wzrostem zamówień i sprzedaży.

5. Charakterystyka badanych spółek i funduszy ETF

VanEck Uranium and Nuclear ETF (NLR.US) jest notowany na giełdzie w Nowym Jorku (NYSE) od 15 sierpnia 2007, zaś do badań wykorzystano notowania od 3 stycznia 2023 [Notowania NLR US, 2025]. Fundusz stara się jak najdokładniej odtworzyć cenę i wydajność indeksu MVIS® Global Uranium & Nuclear Energy Index (MVNLRTR), którego celem jest śledzenie ogólnej wydajności spółek zajmujących się: a) wydobywaniem uranu lub projektami wydobywania uranu, które mają potencjał, w opinii MarketVector Indexes GmbH („Dostawca indeksu”), aby po opracowaniu takich projektów generować co najmniej 50% przychodów spółki lub stanowić co najmniej 50% aktywów takiej spółki; b) budową, projektowaniem i konserwacją obiektów elektrowni jądrowych i reaktorów jądrowych; c) produkcją energii elektrycznej ze źródeł jądrowych; lub d) dostarczaniem sprzętu, technologii i/lub usług dla przemysłu energetyki jądrowej [VanEck Uranium and Nuclear ETF, 2025].

Range Nuclear Renaissance Index ETF (NUKZ.US) jest notowany na giełdzie w Nowym Jorku (NYSE) dopiero od 25 stycznia 2024 [Notowania NUKZ US, 2025]. ETF NUKZ jest portfelem kopiującym indeks ważony kapitalizacją rynkową akcji spółek z całego świata działających w branży paliwa jądrowego i energii. Fundusz skoncentrowany jest na spółkach zaangażowanych w odradzający się przemysł nuklearny i ma na celu oferowanie inwestorom portfela spółek działających w następujących segmentach: zaawansowane reaktory, przedsiębiorstwa ciepłownicze, budownictwo i usługi dla sektora jądrowego oraz paliwo jądrowe [Range Nuclear Renaissance Index ETF, 2025].

VanEck Uranium and Nuclear Technologies UCITS (*Undertakings for Collective Investment in Transferable Securities*) ETF (NUCL.UK) jest notowany na giełdzie w Londynie (London SE) od 17 lutego 2023 [Notowania NUCL UK, 2025]. Celem inwestycyjnym Funduszu jest odzwierciedlenie ceny i wyników indeksu zapewniającego ekspozycję na spółki zajmujące się wydobywaniem i dystrybucją uranu lub w projektach związanych z budową, projektowaniem i konserwacją obiektów elektrowni jądrowych oraz reaktorów jądrowych, sprzętu i technologii lub usług dla przemysłu energetyki jądrowej, rozwojem i komercjalizacją technologii syntezy jądrowej lub badań nad reaktorami jądrowymi z udziałem płynnej soli, a także na fundusze notowane na giełdzie, które śledzą cenę spot uranu lub inwestują w fizyczny uran [Financial Times, 2025].

Constellation Energy (CEG) jest spółką notowaną na giełdzie w Nowym Jorku (NYSE) dopiero od 20 stycznia 2022 i znajduje się na liście Fortune 200 [Notowania CEG US, 2025]. Jest największym producentem niezawodnej, wolnej od emisji energii w kraju i wiodącym dostawcą energii dla przedsiębiorstw, domów i klientów z sektora publicznego w całym kraju,

w tym $\frac{3}{4}$ firm z listy Fortune 100, przy rocznej produkcji, która jest prawie w 90% wolna od emisji dwutlenku węgla. Posiada największą w USA flotę elektrowni jądrowych mającą moc wytwórczą wystarczającą do zasilania 16 milionów domów, zapewniając około 10% czystej energii w kraju. Spółka inwestuje w innowacyjne technologie, aby napędzać przejście na niezawodną, zrównoważoną i bezpieczną przyszłość energetyczną [Constellation Corporate Headquarters, 2025].

China National Nuclear (CNNC) Power Co Ltd (601985. CN) jest spółką notowaną na giełdzie w Shanghai SE od 10 czerwca 2015, zaś do badania wykorzystano notowania ceny akcji od 3 stycznia 2023 [Notowania CNNC China, 2025]. Jest centralnie zarządzanym przedsiębiorstwem państwowym utworzonym przez Radę Państwa Chin i pełni funkcję kluczowego gracza w krajowym przemyśle naukowo-technicznym w dziedzinie jądrowej. CNNC jest głównym wykonawcą globalnych projektów inżynierii jądrowej w Chinach oraz jest dominującym inwestorem w krajowe elektrownie jądrowe, które są obecnie w eksploatacji lub budowie. CNNC dąży do roli wiodącej firmy w dziedzinie rozwoju naukowo-technicznego w dziedzinie jądrowej na świecie [China National Nuclear Corporation, 2025].

NANO Nuclear Energy Inc (NNE.US) jest spółką notowaną na giełdzie NASDAQ od 8 maja 2024 i zaawansowaną technologicznie [Notowania NANO US, 2025]. Zajmuje się energią jądrową zorientowaną komercyjnie, zdywersyfikowaną i zintegrowaną pionowo w pięciu liniach biznesowych: najnowocześniejsze technologie przenośnych i innych mikroreaktorów, produkcji paliwa jądrowego, transportu paliwa jądrowego, zastosowania jądrowe w kosmosie i usługi konsultingowe dla przemysłu jądrowego. NANO Nuclear uważa, że jest pierwszą firmą zajmującą się przenośnymi mikroreaktorami jądrowymi, która jest notowana na giełdzie w USA [Nano Nuclear Energy Inc., 2025].

6. Wyniki badań i ich analiza

W tabeli 2 przedstawiono wyniki badań, które objęły następujące dane z notowań cen NUA i obliczone wartości w wyniku modelowania rozkładów cen NUA w podejściu Back-Test z zastosowaniem symulacji Monte Carlo:

- (A) Średnia ważona prawdopodobieństwem modelowanej ceny NUA na koniec okresu [MC].
- (A) Notowanie ceny NUA na koniec okresu badań [NC].
- (A) Cena NUA ustalona z trendu MA(60) na koniec okresu badań [TC].
- (A) Odchylenie modelowanej ceny NUA od notowanej na giełdzie [$\ln(\text{MC}/\text{NC})$].
- (A) Odchylenie modelowanej ceny NUA od ustalonej z trendu MA(60) [$\ln(\text{MC}/\text{TC})$].
- (A) Percentyl MC w modelowanym rozkładzie na koniec okresu badań.
- (A) Percentyl NC w modelowanym rozkładzie na koniec okresu badań.
- (A) Percentyl TC w modelowanym rozkładzie na koniec okresu badań.

Na podstawie symulacji Monte Carlo oszacowano rozkład cen NUA na koniec okresu badania i obliczono MC jako średnią ważoną prawdopodobieństwem modelowanych cen

NUA na koniec okresu badań. Następnie porównano MC do NC, czyli notowanych cen NUA na koniec okresu, oraz do TC jako cen NUA ustalonych z trendu MA (60) na koniec okresu badań. W dalszej kolejności obliczono odchylenia MC od NC jako $\ln(MC/NC)$ i TC jako $\ln(MC/TC)$ i określono położenie w modelowanym rozkładzie cen NUA jako percentyl tego rozkładu.

Ceny NC i TC dla wszystkich NUA są położone powyżej modelowanych cen MC. Dla wszystkich funduszy ETF i chińskiej spółki CNNC ceny z notowań NC i ustalone z trendu TC znajdują się o jedno odchylenie standardowe powyżej modelowanej ceny MC. W tabeli 2 zostały one oznaczone kolorem zielonym. W przypadku spółki CEG z USA odchylenie ceny NC i ceny TC jest powyżej modelowanej ceny MC o dwa odchylenia standardowe, co oznaczono w tabeli 2 kolorem pomarańczowym. Cena NC i TC dla spółki NANO z USA znajduje się kilka odchyleń standardowych powyżej modelowanej ceny MC, co zaznaczono w tabeli 2 kolorem czerwonym.

Tabela 2. Zestawienie wyników badań spółek i funduszy ETF z sektora nuklearnego

Wyniki badań spółek i funduszy ETF z sektora nuklearnego								
Spółka/ETF	Średnia ważona prawdopodobieństwem modelowanej ceny NUA na koniec okresu badań [MC] (A)	Notowanie ceny NUA na koniec okresu badań [NC] (B)	Cena NUA ustalona z trendu MA (60) na koniec okresu badań [TC] (C)	Odchylenie modelowanej ceny NUA od notowanej na giełdzie [$\ln(MC/NC)$] (D) (%)	Odchylenie modelowanej cen NUA od ustalonej z trendu MA (60) [$\ln(MC/TC)$] (E) (%)	Percentyl MC w modelowanym rozkładzie na koniec okresu badań (F) (%)	Percentyl NC w modelowanym rozkładzie na koniec okresu badań (G) (%)	Percentyl TC w modelowanym rozkładzie na koniec okresu badań (H) (%)
ETF NLR USA	68	73	89	-7	-27	66	64	76
ETF NUKZ USA	29	38	43	-28	-39	61	80	84
ETF NUCL UK	24	25	32	-7	-30	59	67	78
Spółka CEG USA	112	208	265	-62	-86	69	91	94
Spółka CNNC China	7	9	10	-28	-32	58	78	81
Spółka NANO USA	6	23	30	-134	-161	55	100	100

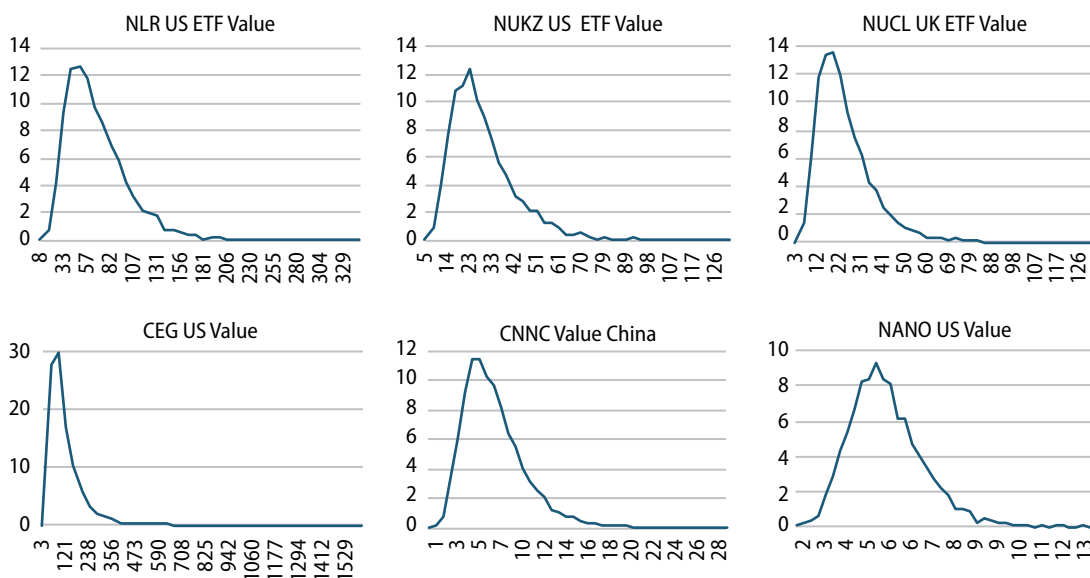
Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonych badań.

Zmienność cen NUA dla wszystkich badanych funduszy ETF i spółki CNNC, oszacowana na podstawie notowań giełdowych i zastosowana do modelowania cen tych NUA na koniec okresu, w rezultacie końcowym doprowadziła do dużej zgodności notowanych na giełdzie cen NC z modelowaną ceną MC, co uwidoczniono w tabeli 2. Wyniki badań przedstawione w tabeli 2 pozwalają wnioskować, że zastosowana zmienność przy modelowaniu rozkładów cen dla funduszy ETF i spółki CNNC mogą być zastosowane jako zmienności do szacowania

rozkładów NPV dla projektów elektrowni jądrowych. Zmienność wszystkich ETF i CNNC kształtuje się w przedziale od 22% do 36%.

Na rysunku 2 przedstawiono rozkłady modelowanych cen analizowanych akcji i funduszy ETF na koniec okresu badania. W celu dokonania oceny szerokości rozkładu, czyli współczynnika zmienności, wykonano odpowiednie obliczenia, które zilustrowano w tabeli 3.

Rysunek 2. Rozkłady modelowanych cen badanych akcji i funduszy ETF na koniec okresu



Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonych badań.

Tabela 3. Wartości współczynników zmienności dla badanych NUA

Szacowanie współczynnika zmienności			
Spółka/ETF	Średnia ważona prawdopodobieństwem modelowanej ceny NUA na koniec okresu badań [MC]	Odchylenie standardowe ceny NUA [OSC]	Współczynnik zmienności [WZ = OSC/MC]
ETF NLR USA	68	28,0	0,41
ETF NUKZ USA	29	11,7	0,40
ETF NUCL UK	24	10,6	0,45
Spółka CEG USA	112	122,4	1,09
Spółka CNNC China	7	2,7	0,39
Spółka NANO USA	6	2,5	0,42

Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonych badań.

Z tabeli 3 wynika, że największą zmienność wykazuje rozkład dla spółki CEG, która posiadając istotną część aktywów nuklearnych, posiada także dużą ilość aktywów z sektora energetycznego poza branżą jądrową, co może wpływać na tak jej dużą zmienność. W związku z istotnym poziomem prowadzonej działalności przez spółkę CEG poza sektorem nuklearnym jest ona w mniejszym stopniu obrazem sektora nuklearnego niż ETF. Dla pozostałych funduszy ETF i spółek zmienność jest na podobnym poziomie.

7. Podsumowanie i wnioski

Modelowanie cen dla ETF i CNNC dostarczyło wysoki poziom dokładności mierzonej niskim poziomem odchylen od notowanych cen na giełdzie, co pozytywnie weryfikuje postawioną hipotezę główną. Zmienność dla tych NUA znalazła się w przedziale od 22% do 36%.

Z przeprowadzonych badań wynika, że analizowane zmienności cen funduszy ETF i spółki CNNC z sektora nuklearnego mogą być estymatorem zmienności do zastosowania przy szacowaniu rozkładów NPV elektrowni jądrowych, co pozytywnie weryfikuje hipotezę pomocniczą.

ETF-y prezentują bardzo szeroki zakres różnych rodzajów działalności w zakresie produkcji i usług realizowanych przez firmy na całym świecie z sektora nuklearnego, dlatego pozytywne wnioski z badania niejako potwierdzają ich reprezentatywność fundamentalną, co tym bardziej pozwala sądzić, że zmienność ich cen akcji może być adekwatna do zmienności aktywów przy budowie elektrowni jądrowych.

Modelowanie rozkładu cen spółki CEG wykazało dużą rozbieżność na poziomie dwóch odchylen standardowych od notowań giełdowych przy zmienności cen akcji tej spółki na poziomie 44%, zaś w przypadku spółki NANO, przy zmienności jej cen na poziomie 180%, rozbieżność sięgała kilku odchylen standardowych. W przypadku tych spółek hipoteza główna i pomocnicza weryfikuje się negatywnie.

Prezentowane badania należy potraktować jako inicjację szerszych działań naukowych w tym zakresie, gdyż specyfika energetyki jądrowej powoduje, że należy poszukiwać nowych podejść w zakresie oceny efektywności i ryzyka projektów w sektorze nuklearnym, z nawiązaniem oczywiście do dotychczasowych osiągnięć.

Rozwój od niewielu lat rynku kapitałowego skierowanego na przemysł nuklearny będzie bardzo pomocny w prowadzeniu dalszych badań empirycznych i rozwijania narzędzi w zakresie inżynierii finansowej, zarządzania finansami, projektami inwestycyjnymi i produkcyjnymi w sektorze jądrowym.

Bibliografia

Wydawnictwa zwarte

1. Bartnik, R. (2024). *Elektrownie i elektrociepłownie jądrowe z reaktorami HTGR i SMR. Efektywność energetyczna i ekonomiczna*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
2. Krysiak, Z. (2015a). *Financial Engineering in Project Development*. Warsaw: Warsaw School of Economics.
3. Krysiak, Z. (2015b). *Portfolio Development at Risk*. Warsaw: Warsaw School of Economics.
4. Rogowski, W. (2004). *Rachunek efektywności przedsięwzięć inwestycyjnych*. Kraków: Oficyna Ekonomiczna.
5. Rogowski, W., Michalczewski, A. (2004). *Zarządzanie ryzykiem w przedsięwzięciach inwestycyjnych*. Kraków: Oficyna Ekonomiczna.
6. Rothwell, G. (2016). *Economics of Nuclear Power*. London: Routledge.

Artykuły naukowe

1. Bartnik, R. (2025). Analizy efektywności energetycznej i ekonomicznej modernizacji elektrowni węglowych na nadkrytyczne parametry pary świeżej za pomocą wysokotemperaturowego reaktora jądrowego HTGR i turboekspandera TE, *Energetyka*, 1(847), s. 31–43.
2. Black, G.A., i in. (2019). Economic Viability of Light Water Small Modular Nuclear Reactors: General Methodology and Vendor Data, *Renewable and Sustainable Energy Review*, 103, s. 248–258.
3. Boettcher, A. i in. (2023). Projekt GOSPOSTRATEG-HTR: Rezultaty Projektu, *Postępy Techniki Jądrowej*, 66(1), s. 9–19.
4. Krysiak, Z. (2025). Uwarunkowania i metody oceny ekonomiczno-finansowo-efektywnościowej wdrażania małych reaktorów modułowych w Polsce, *Postępy Techniki Jądrowej*, 68(1), s. 12–21.
5. Locatelli, G. i in. (2012). Using Real Options to Evaluate the Flexibility in the Deployment of SMR, *Proceedings of ICAPP '12 Chicago, USA, June 24–28, 2012 Paper 12233*.
6. Mikulski, A. (2024). Energetyka Jądrowa na Świecie i w Polsce w latach 2023–2024, *Postępy Techniki Jądrowej*, 67(4), s. 13–18.
7. Roulstone, T. i in. (2020). Expanding Nuclear's Contribution to Climate Change with SMRs., *Nuclear Future*, 2020-11-06.
8. Steigerwald, B., Weibezahn, J. i in. (2023). Uncertainties in Estimating Production Costs of Future Nuclear Technologies: A Model-based Analysis of Small Modular Reactors, *Energy*, 281, 128204.

Materiały internetowe

1. China National Nuclear Corporation (2025). *Profil działalności*, <https://en.cnncc.com.cn/profile.html> (dostęp: 13.04.2025).

2. Constellation Corporate Headquarters (2025). *Constellation Ahead of Schedule for Launch of Crane Clean Energy Center*, <https://www.constellationenergy.com/newsroom/2025/constellation-ahead-of-schedule-for-launch-of-crane-clean-energy-center.html> (dostęp: 13.04.2025).
3. Financial Times (2025). *Cele funduszu VanEck Uranium and Nuclear Technologies UCITS ETF (NUCL.UK)*, <https://markets.ft.com/data/etfs/tearsheet/summary?s=NUCG:LSE:GBP> (dostęp: 13.04.2025).
4. Ministerstwo Energetyki (2017). *Możliwości wdrożenia wysokotemperaturowych reaktorów jądrowych w Polsce*, <https://www.gov.pl/web/klimat/wysokotemperaturowe-reaktory-jadrowe-chlodzone-gazem-htgr> (dostęp: 13.04.2025).
5. Ministerstwo Energetyki (2017). *Możliwości wdrożenia wysokotemperaturowych reaktorów jądrowych w Polsce*, <https://www.gov.pl/web/klimat/wysokotemperaturowe-reaktory-jadrowe-chlodzone-gazem-htgr> (dostęp: 10 stycznia 2025).
6. Nano Nuclear Energy Inc. (2025). *Zakres działalności firmy*, <https://nanonuclearenergy.com/> (dostęp: 12.04.2025).
7. Narodowe Centrum Badań Jądrowych (2024). *Polski badawczy reaktor wysokotemperaturowy „HTGR-POLA” zaprojektowany w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku*, <https://www.ncbj.gov.pl/aktualnosci/polski-badawczy-reaktor-wysokotemperaturowy-htgr-pola-zaprojektowany-w-narodowym> (dostęp: 23 września 2024).
8. Notowania CEG US (2025). *Constellation Energy (CEG)*, <https://stooq.pl/q/d/?s=ceg.us>, (dostęp: 12.04.2025).
9. Notowania CNNC China (2025). *China National Nuclear Power Co Ltd (601985. CN)*, <https://stooq.pl/q/?s=601985.cn> (dostęp: 12.04.2025).
10. Notowania NANO US (2025). *NANO Nuclear Energy Inc (NNE.US)*, <https://stooq.pl/q/?s=nne.us> (dostęp: 12.04.2025).
11. Notowania NLR US (2025). *VanEck Uranium and Nuclear ETF*, <https://stooq.pl/q/?s=nlr.us> (dostęp: 12.04.2025).
12. Notowania NUCL UK (2025). *VanEck Uranium and Nuclear Technologies UCITS ETF*, <https://stooq.pl/q/?s=nucl.uk> (dostęp: 12.04.2025).
13. Notowania NUKZ US (2025). *Range Nuclear Renaissance Index ETF (NUKZ.US)*, <https://stooq.pl/q/?s=nukz.us> (dostęp: 12.04.2025).
14. Range Nuclear Renaissance Index ETF (NUKZ) (2025). *Charakterystyka Funduszu*, <https://www.rangeetfs.com/nukz> (dostęp: 13.04.2025).
15. RANGEETFs (2025). *The Evolving Energy Landscape*, <https://7690601.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/7690601/Range%20ETFs%20eBook-%20The%20Evolving%20Energy%20Landscape.pdf> (dostęp: 14.04.2025).
16. VanEck Uranium and Nuclear ETF (2025). *Charakterystyka funduszu*, <https://www.vaneck.com/us/en/investments/uranium-nuclear-energy-etf-nlr/overview/> (dostęp: 12.04.2025).
17. Weibezahn, J. (2024). *The Economics of Small Modular Reactors*, Copenhagen School of Energy Infrastructure, Department of Economics, Oslo April 24, 2024, <https://naee.no/wp-content/uploads/2024/04/NAEE-seminar-om-kjernekraft-240424-Jens-Weibezahn.pdf>.

Modeling Stock Price Distributions and Estimation of Asset Volatility for Nuclear Power Plants

Abstract

The aim of the study is to determine the possibility of using the volatility of prices quoted on the stock exchanges of entities from the nuclear sector to apply and model NPV distributions in nuclear power plant projects. It presents modeling of the price distributions of shares of three companies and three ETFs operating in US, UK and China from the nuclear sector in the period 2023–2025. For this purpose, the Back-Test approach was used and Monte Carlo simulation was applied using the geometric Brownian motion model. The modelled distributions for April 2025 were compared with the prices quoted on the stock exchange for the studied companies and ETFs also in April 2025, which was to determine the quality of the model. Good accuracy of stock price modeling was obtained for the CNNC company from China, two ETFs from the US and one ETF from the UK. The modeled prices for these entities were very close to the actual prices on the market. This conclusion allowed us to state that the stock prices on the stock exchange of these entities replicate the behaviour of the volatility of nuclear power plant assets. Therefore, the variability of these entities can be used to model NPV distributions in the implementation of nuclear projects.

Keywords: ETF funds, stock prices, stock price volatility, Monte Carlo simulation, Back-Test, modeling, stock price distributions, NPV distribution, nuclear power plants, volatility, NPV of nuclear projects, nuclear power plants, small modular reactors (SMR), high-temperature gas-cooled reactors (HTGR)
