



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

IBE  *entuzjaści
edukacji*

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Analizy IBE/2/2015

Tomasz Kuszewski
Tomasz Szapiro
Przemysław Szufel

MODELOWANIE WIELOAGENTOWE W BADANIACH DECYZJI EDUKACYJNYCH

Warszawa, styczeń 2015

Autorzy:

prof. SGH dr hab. Tomasz Kuszewski

prof. dr hab. Tomasz Szapiro

dr Przemysław Szufel

Wydawca:

Instytut Badań Edukacyjnych

ul. Górczewska 8

01-180 Warszawa

tel. (22) 241 71 00; www.ibe.edu.pl

© Copyright by: *Instytut Badań Edukacyjnych, Warszawa 2015*

Publikacja powstała w ramach projektu badawczego Uwarunkowania decyzji edukacyjnych realizowanego przez Instytut Badań Edukacyjnych wspólnie ze Szkołą Główną Handlową. Badanie w terenie zostało wykonane przez konsorcjum składające się z Millward Brown oraz PBS spółka z o.o.

Badanie jest prowadzone w ramach projektu systemowego pod nazwą Badanie jakości i efektywności edukacji oraz instytucjonalizacja zaplecza badawczego współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki.

Egzemplarz bezpłatny

Streszczenie

Celem pracy jest przedstawienie metodologii badawczej, która zostanie zastosowana do analizy procesów decyzyjnych w systemie edukacyjnym w ramach projektu „Uwarunkowania decyzji edukacyjnych” (UDE). W pracy przedstawiono charakterystyczne cechy rynku edukacyjnego mające wpływ na wybrane narzędzie analityczne, w szczególności heterogeniczność podmiotów podejmujących decyzje regulacyjne jak również heterogeniczność podmiotów zgłaszających popyt na usługi edukacyjne oraz współzależność decyzji edukacyjnych zarówno w przekroju chronologicznym cyklu życia dla konsumenta jak i współzależność unormowań prawnych dotyczących dostępu do usług edukacyjnych w przekrojach chronologicznym i hierarchicznym stanowienia prawa. Jedyną możliwością badania współzależności w tak złożonym systemie decyzyjnym jest skonstruowanie odpowiedniego modelu, w którym można symulować działanie całego systemu zarówno po stronie podaży jak i popytu na usługi edukacyjne z punktu widzenia wielu heterogenicznych podmiotów. Rozważany jest sposób konstrukcji owego modelu. Z kilku możliwych konwencji modelowania powiązań działania podmiotów mikro- i makroekonomicznych wybrano symulację wieloagentową (ang. *agent based modelling and simulation*, ABMS). Za Colanderem i in. (2008) odrzucono możliwość budowy takiego modelu w konwencji stosowanych modeli równowagi ogólnej (ang. *applied general equilibrium*, AGE) bądź w konwencji obecnie najpopularniejszej, czyli modelu dynamicznej stochastycznej równowagi ogólnej (ang. *dynamic stochastic general equilibrium*, DSGE). Wzięto pod uwagę sugestie dotyczące modelowania makroekonomicznego w gospodarce z heterogenicznymi gospodarstwami domowymi zawarte w artykule Heathcote i in. (2009). W pracy przedstawiono zasady modelowania symulacyjnego z uwzględnieniem symulacji dyskretnej, a następnie przedstawiono cechy symulacji wieloagentowej oraz sposób jej zastosowania do modelowania rynków edukacyjnych.

Summary

The goal of the report is to present a research methodology for decision making process analysis in education systems. The report was created within the project “Determinants of educational decisions” (in Polish: UDE – Uwarunkowania decyzji edukacyjnych). The report presents characteristic features of education market that lead to the selection of quantitative analytical tools. The specific features of the market considered include: heterogeneity of educational regulatory institutions, heterogeneity of individuals creating demand for educational services and educational decision interdependence. The decision interdependence includes a chronological interdependence between subsequent stages of individuals’ life as well as interdependence of educational services legal regulations in chronological and hierarchical aspects of legislation. The only approach that allows analyzing interdependencies in a complex education system is creating and experimenting with a model of the system. The model should support simulation of dynamics of an entire education system including demand and supply for education services being made by heterogeneous agents. Several methods for creation of the model have been considered. The most appropriate method for modeling micro- and macroeconomic dependencies has been chosen, namely agent based modeling and simulation (ABMS). Following Colander et al. (2008) several considered methods have been rejected including applied general equilibrium (AGE) and the most popular nowadays dynamic stochastic general equilibrium (DSGE). On the other hand guidelines regarding macroeconomic modeling with heterogeneous agents by Heathcote et al. (2009) have been considered. In the paper presentation of discrete-event simulation modeling is followed by multi-agent simulation and its applications to economic market modeling.

Spis treści

1. Wprowadzenie	6
2. O rynku edukacyjnym w kontekście modelowania wieloagentowego.....	7
2.1. Rynek edukacyjny.....	7
2.2. Pytania i hipotezy badawcze.....	9
2.3. Założenia symulacji rynków edukacyjnych	10
3. Symulacja wieloagentowa	13
3.1. Podejście symulacyjne w modelowaniu systemów	13
3.2. Symulacja wieloagentowa.....	17
3.3. Wieloagentowa analiza rynków edukacyjnych.....	21
3.4. Kalibracja wieloagentowego modelu system edukacyjnego	24
3.5. Eksperymenty symulacyjne	25
4. Literatura.....	28

1. Wprowadzenie

Celem opracowania jest przedstawienie informacji o proponowanej metodyce badań ilościowych, która zostanie zastosowana w projekcie „Uwarunkowania decyzji edukacyjnych” dla realizacji zadań badawczych zatytułowanych „Wpływ krajowej i lokalnej polityki edukacyjnej na decyzje edukacyjne” oraz „Symulacyjna analiza skutków zmian polityki finansowania w systemie edukacyjnym dla decyzji edukacyjnych gospodarstw domowych”.

W tym opracowaniu przedstawiono podstawowe założenia modelu symulacyjnego, który będzie skonstruowany w oparciu o wyniki badania ankietowego uwarunkowań decyzji edukacyjnych (UDE). Wyniki posłużą do opracowania dyskryminacji zbioru gospodarstw domowych ze względu na cechy społeczno-demograficzne, sposób podejmowania decyzji edukacyjnych i postać tych decyzji oraz do skalibrowania wartości parametrów zdefiniowanych w modelu symulacyjnym. Opis podzielono na trzy części. Najpierw są przypominane charakterystyczne cechy warunkujące złożoność systemu edukacyjnego. Następnie przedstawiono hipotezy badawcze konstytuujące treść podejmowanych zadań badawczych. Ostatecznie zaproponowano symulację wieloagentową jako narzędzie pozwalające uwzględnić złożoność systemu edukacyjnego.

2. O rynku edukacyjnym w kontekście modelowania wieloagentowego

Charakterystyczną cechą badań zachowań systemów społecznych i ekonomicznych jest posługiwanie się modelem. Pojęcie „modelu” jest zazwyczaj używane w wielu znaczeniach. Dokładna treść pojęcia i jego zakres zależy od kontekstu. Ów kontekst z kolei jest budowany w zależności od badanego systemu albo obiektu oraz od dyscypliny naukowej stosującej swoje i właściwe sobie metody i narzędzia do opisu zachowań jednostek i instytucji składających się na wspomniane systemy społeczne bądź ekonomiczne. W ekonomii przyjęto przez model rozumieć uproszczoną reprezentację rzeczywistości. Model jest to struktura, najczęściej formalna, zbudowana dla odwzorowania wybranej części cech i zachowań jakiegoś obiektu, zjawiska lub procesu. Najistotniejszą korzyścią płynącą z modelowania jest możliwość eksperymentowania z modelem a nie z realnym światem. Eksperymenty prowadzone w świecie modelu pozwalają na ocenę skutków decyzji i zachodzących zmian szybciej, taniej i bez szkody. Prowadzenie takich samych eksperymentów w świecie rzeczywistym najczęściej nie jest możliwe, a jeśli już jest podejmowane, to może skutkować nieodwracalnymi skutkami, często nie do przewidzenia, ze względu na immanentną niepewność skutków wszelkich decyzji wynikającą z niedeterministycznych zależności występujących w systemach społecznych i ekonomicznych. Jednym z takich systemów jest rynek edukacyjny.

2.1. Rynek edukacyjny

Analiza skutków zmian polityki finansowania rynku edukacyjnego wymaga stworzenia narzędzia badawczego, które uwzględni charakterystyczne cechy systemu edukacyjnego a następnie umożliwi analizę wpływu polityki edukacyjnej na indywidualne decyzje heterogenicznych gospodarstw domowych. W analizie polityki edukacyjnej należy uwzględnić szereg cech specyficznych dla rynku edukacyjnego:

- heterogeniczność odbiorców usług edukacyjnych (różnicowanie przestrzenne, społeczne, demograficzne, dochodowe, ze względu na zdolności),
- heterogeniczność i hierarchia instytucji stanowiących prawo i zarządzających edukacją (administracja centralna, organy samorządu terytorialnego, fundacje, osoby fizyczne),
- heterogeniczność instytucji edukacyjnych oraz oferowanych przez nie usług (według typów instytucji, rozmieszczenia przestrzennego, jakości oraz rodzaju wykształcenia),
- uwarunkowania decyzji o kształceniu bezpłatnym albo płatnym, w miejscu zamieszkania albo poza miejsce zamieszkania, stacjonarnym albo niestacjonarnym i wpływie różnych czynników na formowanie kapitału ludzkiego,
- zależności międzypokoleniowe (dziedziczenie wykształcenia, finansowanie edukacji dzieci przez rodziców),
- współzależność decyzji edukacyjnych (decyzje podejmowane przez jedne podmioty wpływają na przyszłą sytuację decyzyjną innych podmiotów) oraz sprzężenie zwrotne polityki edukacyjnej (wpływ polityki edukacyjnej na gospodarkę, której rozwój wpływa na sytuację decyzyjną podmiotów).

Liczne opracowania naukowe wskazują, że zróżnicowanie cech podmiotów na rynku ma istotny wpływ na opłacalność ich decyzji. W klasycznym równaniu Mincera (por. Mincer, 1970 oraz 1974), założono, że na wynagrodzenie wpływa liczba lat wykształcenia oraz doświadczenie zawodowe. W analizie polityki edukacyjnej należy jednak uwzględnić indywidualne zróżnicowanie podmiotów jak wykształcenie pobierających oraz jakość oferowanej usługi. Wyniki analiz przeprowadzonych przez Sewell i Shah (1967) wskazują, że status społeczny ma istotny wpływ na osiągnięcia edukacyjne podmiotów. Jednocześnie gospodarstwa domowe charakteryzują się różną wrażliwością na prowadzoną politykę edukacyjną. W szczególności badania empiryczne przeprowadzone przez Kane (1994) oraz Cameron i Heckman (1998) wskazują, że programy finansowania czesnego mają największe znaczenie dla decyzji edukacyjnych osób o niskich i średnich dochodach, a nie są skuteczne dla osób o bardzo niskich dochodach.

Kolejną kwestią, którą należy uwzględnić w analizie polityki edukacyjnej, jest zróżnicowanie jakości kształcenia i wpływ tej jakości na jego efekty. Speakman i Welch (2006) oraz Hanushek (2006) dokonują przeglądu badań empirycznych i zauważają, że jakość nauczania ma bardzo istotny wpływ na wielkość wynagrodzeń absolwentów. W szczególności badania różnic w poziomie wynagrodzeń pomiędzy białymi a czarnymi mieszkańcami Stanów Zjednoczonych wskazują, że różnice te mogą być aż w połowie wyjaśnione jakością szkoły, do której te osoby uczęszczają. Jakość instytucji dydaktycznych również jest ważnym czynnikiem wpływającym na wynagrodzenie absolwentów. Tym samym jakość kształcenia determinuje stopę zwrotu z edukacji np. por. Rizzuto i Wachtel (1980) oraz por. Nechyba (1990).

Szczególną cechą polskiego rynku edukacyjnego na poziomie wyższym jest znaczny udział kształcenia w trybie niestacjonarnym. Jak podaje GUS (2012), w Polsce studenci niestacjonarni stanowią aż 45% wszystkich studentów. Zgodnie z raportem OECD (2013) Polska ma największy odsetek studentów zaocznych wśród krajów OECD. Osoby te z reguły łączą pracę ze studiowaniem. GUS (2011) podaje, że 69% studentów zaocznych łączy pracę ze studiami, podczas gdy w przypadku studentów dziennych odsetek ten wynosi 5%. Stąd studia zaoczne z reguły prowadzą do mniejszego wzrostu wiedzy niż studia dzienne, ale jednocześnie ich absolwenci wkraczają na rynek pracy posiadając doświadczenie zawodowe, którego nie mają absolwenci studiów dziennych. Analiza polityki edukacyjnej powinna uwzględniać tę specyficzne uwarunkowania polskiego rynku.

Kolejną cechą rynku edukacyjnego jest rola rodziców w decyzjach edukacyjnych dzieci. Po pierwsze, zarobki rodziców (które z kolei są skorelowane z ich wykształceniem) determinują ograniczenie budżetowe gospodarstwa domowego i przez to wpływają na dostępny zbiór decyzji o wyborze studiów. Po drugie, w gospodarstwie domowym decyzje mogą zapadać na podstawie procesów decyzyjnych przebiegających w różny sposób (por. Browning i in., 2011). W rodzinie występuje też przekazywanie wzorców edukacyjnych. Badania empiryczne wskazują na występowanie pozytywnej korelacji pomiędzy wykształceniem dzieci i wykształceniem rodziców, szczególnie wykształceniem matki – np. por. Behrman i Rosenzweig (2002). Podobnie wyniki badań dla Polski, opisane przez Sztanderską (2004), potwierdzają pozytywną korelację pomiędzy decyzją o studiowaniu dzieci a wykształceniem rodziców.

Ostatnią cechą wyróżniającą rynek edukacyjny jest współzależność decyzji na tym rynku. Współzależność jest związana z: konkurencją o zasoby edukacyjne, wpływem decyzji wyborów edukacyjnych na rozwój gospodarczy oraz istniejącymi w modelowanych procesach licznymi sprzężeniami zwrotnymi.

Decyzje jednych podmiotów wpływają na sytuację decyzyjną pozostałych. Po pierwsze, decyzja o studiowaniu podjęta przez jedną osobę wpływa na możliwości studiowania innych (przy założeniu ograniczonej liczby miejsc). Po drugie, szereg publikacji wskazuje na ścisły związek pomiędzy wykształceniem a dobrobytem i wzrostem gospodarczym zarówno na świecie – m.in. por. meta-analiza badań dokonana przez Lange i Topel (2006) oraz w Polsce – Sztanderska i Minkiewicz (2007). Stąd też w analizie polityki edukacyjnej należy rozpatrywać sprzężenie zwrotne w systemie edukacyjnym. Prowadzona polityka edukacyjna będzie miała istotny wpływ na środki budżetowe w przyszłości, również te, które będzie można przeznaczyć na finansowanie edukacji.

Przeprowadzone rozważania wskazują na to, że aby model rynku edukacyjnego umożliwił rzeczywistą ocenę polityki edukacyjnej, powinien mieć szereg cech. W szczególności powinien uwzględniać istnienie w systemie heterogenicznych podmiotów oraz istniejącą współzależność decyzji na tym rynku. Szczegółowe wymagania odnośnie narzędzia dla modelowania rynku edukacyjnego zostaną przedstawione w kolejnych częściach opracowania.

2.2. Pytania i hipotezy badawcze

Symulacyjny model rynku edukacyjnego powinien być skonstruowany w sposób pozwalający odpowiedzieć m.in. na następujące pytania badawcze:

- Kiedy zmiany w strukturze finansowania prowadzą do istotnych zmian wyborów edukacyjnych dokonywanych przez gospodarstwa domowe, tj. jakie są uwarunkowania skuteczności regulacji systemu edukacyjnego?
- Jakie są różnice w następstwach regulacji rynku edukacyjnego w horyzoncie czasowym jednego pokolenia a w następstwach w horyzoncie czasowym wielu pokoleń? Ponieważ decyzje edukacyjne młodych ludzi wpływają na kształt gospodarstw domowych, które zostaną przez nich założone i tym samym skutkiem dzisiejszej polityki edukacyjnej jest również sytuacja decyzyjna gospodarstw domowych w przyszłych pokoleniach.
- Kiedy zmiana regulacji systemu edukacyjnego może się okazać przeciwnie skuteczna? Chodzi np. o sytuację, gdy skutkiem regulacji w systemie edukacyjnym jest zwrot bezrobocia.
- Jakie są różnice w skutkach wprowadzenia doraźnych instrumentów finansowych stymulujących zachowania podmiotów w systemie edukacyjnym? Jaką korzyść odnosi indywidualnie, a jaką społeczeństwo z ustanowienia stypendiów socjalnych w porównaniu z przeznaczeniem tych samych środków na stypendia naukowe?
- Jakie są skutki wprowadzania innego podziału środków na kształcenie pomiędzy szkoły publiczne i niepubliczne oraz innego finansowania czesnego stacjonarnych i niestacjonarnych uczestników procesu kształcenia?

- Jakie mogą być skutki uzależnienia finansowania czesnego od rodzaju szkoły lub kierunku studiów (techniczne, ekonomiczne, pedagogiczne) zamiast np. od formy własności szkoły (publiczna, niepubliczna).
- Jak zróżnicowanie indywidualnych cech podmiotów (gospodarstw domowych – wariacja dochodów, uczelni – zróżnicowanie jakości kształcenia) w systemie edukacyjnym determinuje skuteczność zmian polityki edukacyjnej?

Przedstawione pytania nie pretendują do miana wyczerpującego zestawu pytań, jakie można sformułować podczas badania systemu edukacyjnego. Mają pozwolić zauważyć złożoność procesów podejmowania decyzji na rynku edukacyjnym zarówno po stronie podaży usług edukacyjnych, jak i po stronie popytu na te usługi. Zarówno o podaży, jak i o popycie nie decydują pojedyncze podmioty.

Często w rozważaniach o funkcjonowaniu jednostek w systemach ekonomicznych pojawia się pojęcie *homo oeconomicus* i założenie o doskonale racjonalnym zachowaniu indywidualów. Jak łatwo zauważyć, w jednokryterialnych problemach wyboru istnieje dokładnie jeden sposób na doskonale racjonalne postępowanie. Stąd też w budowanych wcześniej modelach makroekonomicznych całe klasy podmiotów gospodarczych, takich jak gospodarstwa domowe czy przedsiębiorstwa, były zastępowane wygodną w modelowaniu reprezentacją, tzw. reprezentatywnym gospodarstwem domowym albo reprezentatywną firmą. Dzisiaj takie podejście jest słusznie krytykowane. Zauważono, że decyzje są podejmowane w przeważającej liczbie na podstawie analizy całej wiązki kryteriów, a nie jednego kryterium oraz eksperymentalnie udowodniono, że podmioty gospodarujące nie zachowują się w sposób doskonale racjonalny. Te konstatacje wykluczają zastosowanie tradycyjnych narzędzi modelowania makroekonomicznego (por. Farmer i Foley, 2009).

2.3. Założenia symulacji rynków edukacyjnych

Celem niniejszej sekcji jest podsumowanie przytoczonych rozważań na temat cech rynku edukacyjnego oraz określenie cech, jakie musi spełniać modelowe narzędzie analityczne do badania polityki edukacyjnej.

Rozważania wskazują na konieczność uwzględnienia w modelu:

- indywidualnych, heterogenicznych cech konsumentów usług edukacyjnych na wszystkich etapach procesu kształcenia,
- heterogeniczności i hierarchii w procesie podejmowania decyzji o kształcie systemu edukacji,
- różnych form kształcenia przez instytucje edukacyjne o różnym poziomie jakości,
- sytuacji decyzyjnej indywidualnie na poziomie każdego podmiotu, którego zachowanie podlega modelowaniu,
- zależności społecznych, demograficznych, rodzinnych i innych charakteryzujących modelowane systemy zarówno na poziomie mikro, jak i na poziomie makro.

Ponadto jest konieczna możliwość takiego skonstruowania modelu symulacyjnego, aby w analizie polityki edukacyjnej było możliwe wykorzystanie danych z badania ankietowego przeprowadzanego

w projekcie „Uwarunkowania decyzji edukacyjnych”. Nie jest wykluczone korzystanie z wyników innych badań związanych z edukacją i opublikowanych przez różne instytucje, np. „Wybory ścieżki kształcenia a sytuacja zawodowa Polaków” (2013), „Ścieżki rozwoju edukacyjnego młodzieży – szkoły pogimnazjalne” (2013) czy standardowych opracowań Głównego Urzędu Statystycznego z serii „Oświata i wychowanie” oraz „Szkoły wyższe i ich finanse”

Podjęciem, które jest na tyle elastyczne, że pozwala na uwzględnienie powyższych założeń, jest symulacja wieloagentowa – metoda polegająca na modelowaniu systemu na poziomie mikro jako zbioru niezależnych elementów – agentów. W modelach makroekonomicznych budowanych jako systemy współdziałających indywidualności skali mikro wyróżnia się dwa podejścia. W jednym z nich, chronologicznie wcześniejszym w historii makromodelowania, globalne makrostruktury wynikowe powstają jako proste sumowanie zachowań podmiotów opisanych w skali mikro. W podejściu późniejszym makrostruktury powstają jako złożenie działań podmiotów ze skali mikro. Ich cechy i zachowanie nie mogą być rozpatrywane jako prosta suma elementów składowych. Całość posiada cechy nieistniejące w żadnym elemencie składowym. Te cechy są skutkiem współdziałania, współzależności i heterogeniczności poszczególnych elementów składowych systemu. To drugie podejście do makromodelowania jest typowe dla modeli wieloagentowych. Modele te pozwalają więc uwzględniać zróżnicowanie indywidualności, interakcje między nimi i obserwować pojawiające się efekty sieciowe. W modelu wieloagentowym pojedynczy agenci są autonomiczni, ale powiązani z otoczeniem. Twórca modelu określa ich charakterystyki i wprowadza ich do wirtualnego świata, który działa według określonych wcześniej reguł. W przeprowadzanej symulacji działania makrosystemu ów wirtualny świat może żyć swoim własnym życiem bez żadnej ingerencji ze strony twórcy modelu. Wynika stąd, że w prawidłowo skonstruowanym modelu wieloagentowym ingerencja w działający model nie jest konieczna, ale jest dopuszczalna. W najbardziej ortodoksyjnym podejściu do modelowania wieloagentowego twórca modelu nie zakłada wprost żadnych zależności w skali makroekonomicznej. Mają być one wynikiem działań podejmowanych przez poszczególnych agentów i interakcji między tymi agentami.

Praca z modelem wieloagentowym polega na prowadzeniu eksperymentów i badaniu dynamiki systemu. Analiza modelu wieloagentowego może być prowadzona zarówno w ujęciu mikro, mezo, jak i makro – jest możliwa dowolna agregacja wyników w zależności od hipotez badawczych. Farmer i Foley (2009) podkreślają, że symulacja wieloagentowa jest narzędziem umożliwiającym analizę złożonych systemów ekonomicznych, a w szczególności pozwala na analizę systemów przy zmianie zasad ich funkcjonowania oraz dynamiki powiązań w tych systemach. Trzeba zaznaczyć, że podejście mikrosymulacyjne było stosowane w badaniach edukacyjnych dużo wcześniej niż pojawienie się modeli wieloagentowych (por. O'Donoghue, 1999).

Reasumując, model wieloagentowy pozwoli z jednej strony na jego parametryzację w skali mikro w zakresie indywidualnych decyzji edukacyjnych, a z drugiej na analizę skutków regulacji tego systemu w skali makro. Tym samym model umożliwi poszukiwanie głównych czynników kształtujących proces rozwoju kompetencji w skali makro. Analiza symulacyjna umożliwi elastyczny i sekwencyjny przegląd różnych zestawów takich czynników, co pozwoli na modelowanie m.in. stanu i użytkowania zasobów, zarówno w wymiarze indywidualnym, jak i zagregowanym do skali całej gospodarki,

służących rozwojowi kompetencji członków polskiego społeczeństwa we wszystkich grupach wieku. Podstawą prac badawczych prowadzonych w omawianych zadaniach będą akty legislacyjne stanowiące ustrój edukacyjny na szczeblu centralnym, wybrane regulacje jednostek samorządu terytorialnego stanowiące zasady na określonym terytorium w ramach istniejącego centralnego systemu edukacyjnego oraz wybrane regulacje jednostek edukacyjnych dotyczące opłat, wewnętrzne analizy systemów regulacyjnych różnej skali oraz wyniki innych zespołów badawczych w projekcie.

W szczególności, model umożliwi analizę różnych sposobów prowadzenia polityki edukacyjnej:

- publiczno-prywatne finansowanie edukacji,
- systemy stypendiów socjalno-naukowych,
- badanie wpływu regulacji rynku edukacyjnego na jego dynamikę w ujęciu wielopokoleniowym.

W otoczeniu międzynarodowym można zaobserwować postępujące odchodzenie od pełnego finansowanie czesnego przez państwo w krajach OECD (por. Marcucci i Johnstone, 2007). Temat zmian systemu finansowania edukacji pojawia się również w polskim systemie edukacyjnym – proponowana metodologia pozwoli na wielokryterialną analizę skutków takich regulacji dla różnych podmiotów. Modele wieloagentowe, a właściwie jeden z elementów posługiwania się nimi, czyli analiza wrażliwości wyników na zmiany wartości parametrów modelu, pomogą w zrozumieniu skutków przyjęcia różnych unormowań prawnych.

3. Symulacja wieloagentowa

Celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie założeń oraz scenariusza zastosowania symulacji wieloagentowej do analizy polityki w obrębie rynku edukacyjnego.

W literaturze z zakresu analizy symulacyjnej autorzy stosują podejście systemowe, m.in. por. Law (2007) oraz por. Gilbert i Troitzsch (2005) oraz por. Miller i Page (2009). Na potrzeby analizy polityki edukacyjnej, ze względu na objaśnioną wcześniej złożoność zagadnienia również zostanie zastosowane podejście systemowe. W niniejszym raporcie system jest rozumiany jako zestaw elementów wzajemnie powiązanych w sposób bezpośredni lub pośredni, por. Ackoff (1971). Stąd też w konstrukcji symulacyjnego modelu rynku edukacyjnego będzie stosowane podejście systemowe, gdzie na wymienionym rynku zostaną wyodrębnione niezależne, wzajemnie powiązane obiekty: indywidua gospodarujące – gospodarstwa domowe, jednostki świadczące usługi edukacyjne, firmy oraz hierarchiczny regulator.

Niniejszy rozdział składa się z pięciu części. Najpierw, w podrozdziale 3.1 przedstawiono podejście symulacyjne i jego zastosowanie do modelowania systemów i eksperymentowania z modelami systemów złożonych. Opis ten obejmuje opis procesu modelowania symulacyjnego, a ponadto szczególnie w nim uwzględniono symulację systemów zdarzeń dyskretnych. Następnie, w podrozdziale 3.2 opis podejścia symulacyjnego i symulacji dyskretnych został uszczegółowiony o symulację wieloagentową. Podano m.in. definicję agenta oraz symulacji wieloagentowej. Następnie w podrozdziale 3.3 naszkicowano wstępne założenia konceptualnego modelu systemu edukacyjnego. Część 3.4 poświęcono krótkiemu omówieniu problemów kalibracji złożonego modelu symulacyjnego, a w części ostatniej zarysowano sposób prowadzenia eksperymentów symulacyjnych.

3.1. Podejście symulacyjne w modelowaniu systemów

Celem podrozdziału jest przedstawienie podejścia symulacyjnego do analizy systemów. W kolejnym rozdziale wywód ten zostanie rozszerzony o podejście wieloagentowe i symulację systemów wieloagentowych.

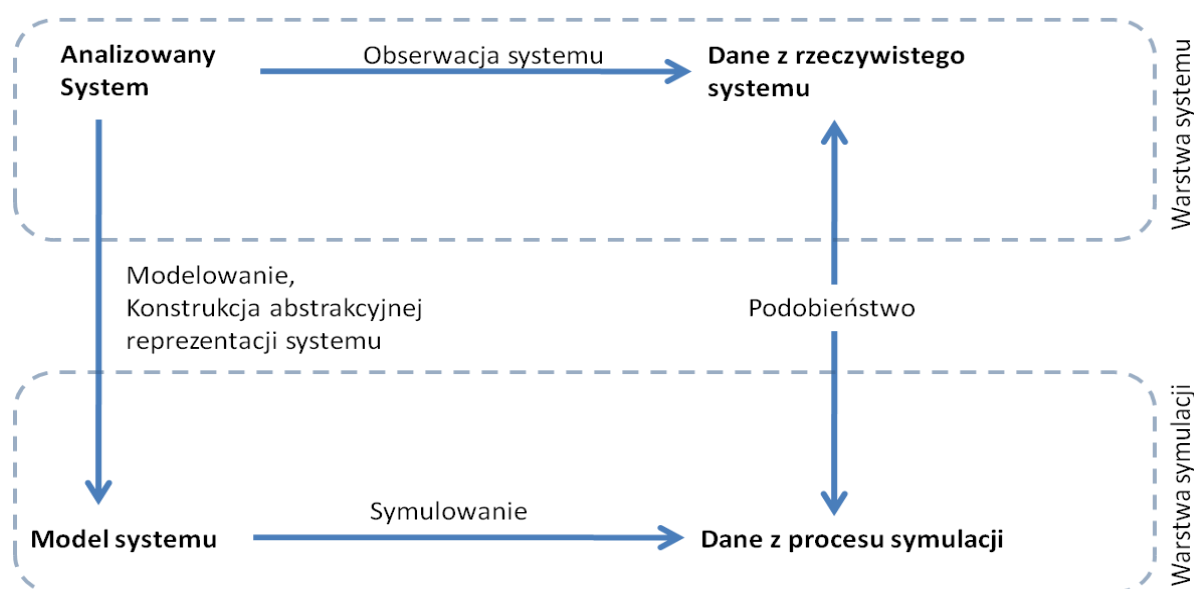
Przedmiotem analizy symulacyjnej jest system rozumiany zgodnie z koncepcją analizy systemowej jako zestaw powiązanych i wyodrębnionych z otoczenia elementów. Tym samym symulacja jest zestawem technik do analizy dynamicznego zachowania modelu systemu, por. Law (2007). Tym samym przyjmujemy, że celem modelowania symulacyjnego jest eksperymentowanie z utworzonym modelem systemu. Model symulacyjny jest takim sposobem opisu badanej rzeczywistości, który pozwala badać numerycznie analizowane wielkości wyjściowe zależnie od wielkości wejściowych.

W analizie rynku edukacyjnego zostanie zastosowane takie podejście, zgodnie z którym badanie symulacyjne nie daje bezpośredniego rozwiązania problemu, lecz pozwala porównywać i oceniać różne scenariusze (por. Krajewski i Ritzman, 2002).

Law (2007) definiuje symulację Monte Carlo jako postępowanie zmierzające do zastosowania liczb losowych do rozwiązywania problemów stochastycznych lub deterministycznych. Metody Monte Carlo obok szeregu zastosowań m.in. w statystyce, inżynierii, finansach są również stosowane w symulacji systemów zdarzeń dyskretnych.

Gilbert i Troitzsch (2005) zauważają, że w trakcie analizy symulacyjnej dane z modelu symulacyjnego powinny być porównywane z danymi z systemu rzeczywistego (por. ryc. 1). Stąd też dane z badania empirycznego mogą zarówno posłużyć do kalibracji modelu wieloagentowego oraz do późniejszego sprawdzenia poprawności działania tego modelu.

Ryc. 1. Dane z modelu symulacyjnego służą do konstrukcji modelu systemu. Dane te są również porównywane z danymi z rzeczywistego systemu.

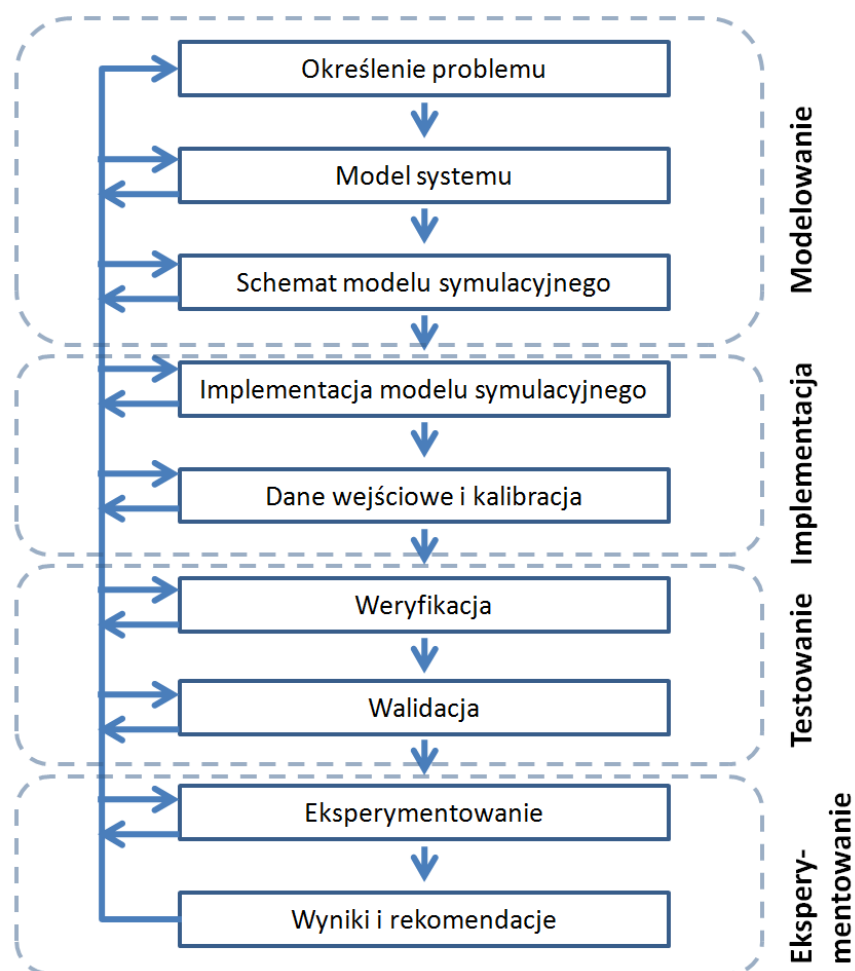


Źródło: Szufel (2012) oprac. własne na podst. Gilbert i Troitzsch (2005)

Punktem wyjścia w realizowanym zadaniu badawczym jest analizowany system. Na tym systemie (oryginale) przeprowadzane są obserwacje zmieniających się jego stanów i stawiane są hipotezy co do zachodzących procesów powodujących zmiany stanów oryginału. Na podstawie posiadanej wiedzy i zebranych o oryginale informacji budowany jest model systemu. W testowych symulacjach wykonywanych na modelu generowane są stany modelu, które są porównywane ze stanami oryginału. Po osiągnięciu akceptowanego poziomu podobieństwa stanów systemu i stanów modelu ten ostatni jest gotowy do przeprowadzania analiz symulacyjnych. Takie analizy symulacyjne wybiegają swoimi założeniami poza kiedykolwiek obserwowane stany systemu. Zajmujący się analizami symulacyjnymi ufają, że jeśli model w sytuacjach testowych zachowywał się podobnie jak oryginał, to i dla innych założonych stanów i reguł zmian stanów zachowa się podobnie jak oryginał. Z tej ufności wynika

możliwość wnioskowania o zmianach systemu (oryginału) na podstawie obserwowania zmian w modelu.

Ryc. 2. Proces analizy symulacyjnej, który zostanie przyjęty w ramach badania UDE.



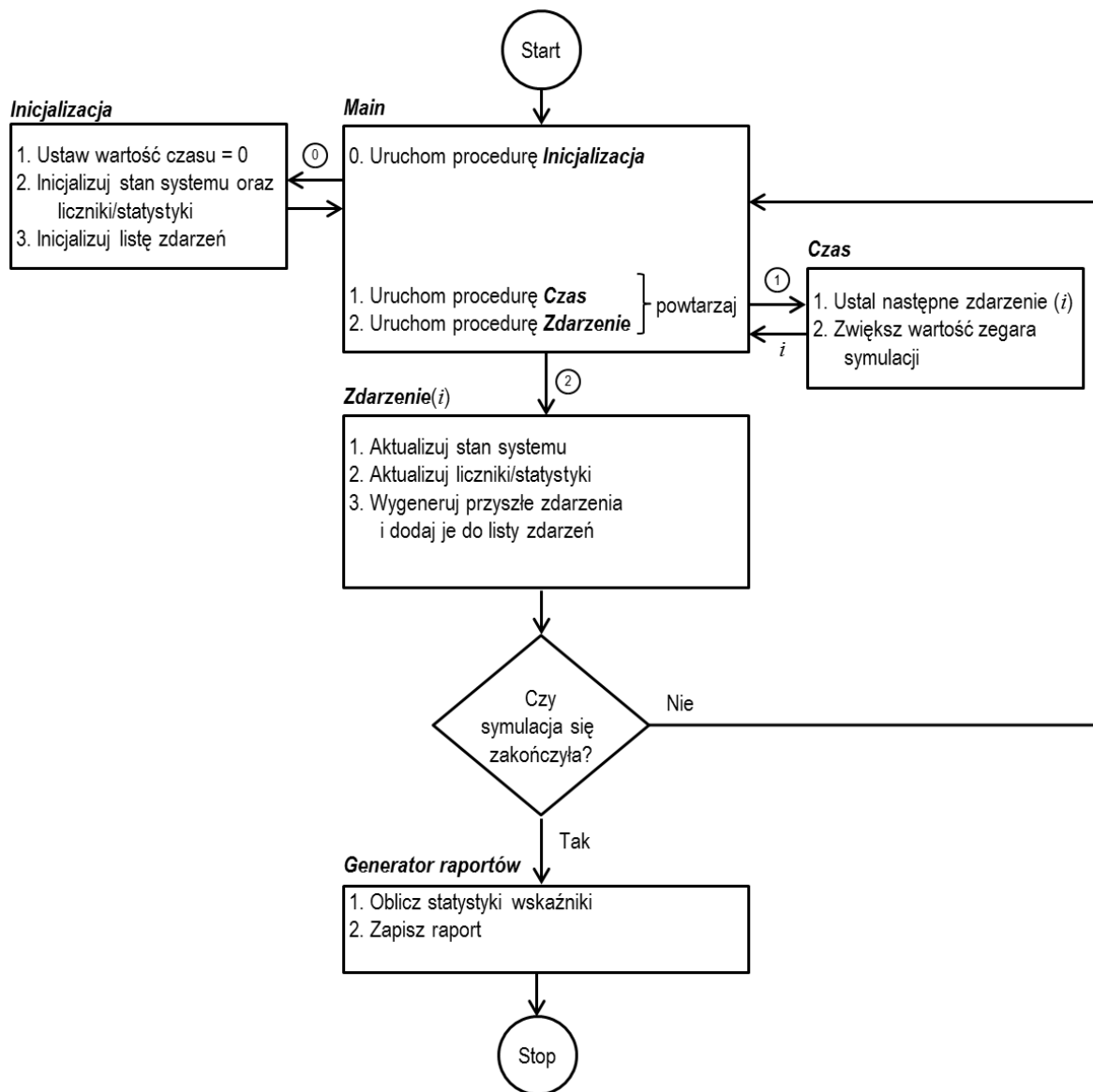
Źródło: Szufel (2012), oprac. własne na podst. Bennett (1995), Schroedera (1993), Gilbert i Troitzsch (2005)

W literaturze analiza modelu symulacyjnego jest usystematyzowana. Opis etapów pracy z modelem symulacyjnym nosi nazwę procesu symulacji. Bennett (1995) dzieli proces symulacji na trzy etapy: konstruowania modelu, testowania oraz etap przeprowadzania obliczeń symulacyjnych. Etap konstrukcji modelu symulacyjnego składa się z jego sformułowania (w tym określenia problemu i hipotez badawczych) oraz implementacji w postaci programu komputerowego. Etap testowania składa się z dwóch faz: fazy weryfikacji polegającej na sprawdzeniu, czy model jest prawidłowo oprogramowany oraz fazy walidacji polegającej na testowaniu zgodności zachowań modelu z jego założeniami. Po skonstruowaniu i przetestowaniu modelu można przystąpić do eksperymentów z modelem. Podobnie proces symulacji jest definiowany przez Schroedera (1993). Uwzględnia on

definicje problemu poprzedzającą tworzenie modelu oraz zaleca tworzenie schematu modelu. Następnie model jest oprogramowany, zbierane są dane służące do jego kalibracji, model jest weryfikowany i są przeprowadzane eksperymenty. Również analogiczne podejście do prezentacji procesu symulacji proponują Gilbert i Troitzsch (2005). Zauważają oni, że metodologia badania symulacyjnego składa się z następujących etapów: 1) określenie zakresu modelowanego systemu, 2) obserwacja modelowanego systemu w celu określenia parametrów początkowych, 3) poczynienie założeń i konstrukcja modelu, 4) weryfikacja modelu (ang. *model verification*) – sprawdzenie, czy model działa zgodnie z założeniami, 5) walidacja modelu (ang. *model validation*) – sprawdzenie, że model zachowuje się podobnie do rzeczywistego systemu, 6) analiza wrażliwości – sprawdzenie wpływu zmian parametrów początkowych na zachowanie modelu. Powyższe podejście zostanie zastosowane przy konstrukcji narzędzia do symulacji w ramach badania uwarunkowań decyzji edukacyjnych.

W przyjętym procesie budowy modelu symulacyjnego rynku edukacyjnego można wyróżnić cztery etapy: modelowania, implementacji, testowania oraz eksperymentowania (por. ryc. 2). Etap modelowania obejmuje określenie problemu, stworzenie modelu systemu oraz stworzenie schematu oprogramowania modelu symulacyjnego. Etap implementacji obejmuje stworzenie kodu źródłowego oraz kalibrację modelu na podstawie dostępnych danych. Etap testowania obejmuje sprawdzenie, czy model działa zgodnie z założeniami poczynionymi wcześniej (weryfikacja), oraz sprawdzenie, czy model systemu zachowuje się podobnie do systemu rzeczywistego (walidacja). W końcu etap eksperymentowania obejmuje zebranie wyników i ich analizę. Rycina 2 uwzględnia proces iteracyjno-przyrostowy wytwarzania oprogramowania (por. Larman i Basili, 2003). Wieloagentowa implementacja modelu systemu z reguły jest przeprowadzana małymi krokami, a poprawność działania przed przejściem do kolejnych kroków jest sprawdzana w krokach poprzednich. Zastosowanie procesu iteracyjnego przyrostowego zilustrowanego na ryc. 3 powoduje, że każdy z kroków procesu konstrukcji modelu symulacyjnego przedstawionego na ryc. 2 zakłada możliwość dowolnego cofania się do poprzednich etapów.

Ryc. 3. Proces symulacji dyskretniej. Kolejne zdarzenia są przetwarzane po ukończeniu zdarzeń poprzedzających. W symulacji wieloagentowej zdarzenia dotyczą działań podejmowanych przez agentów w systemie.



Źródło: oprac. własne na podst. Law (2007)

Jak wcześniej wspomniano, analiza polityki prowadzonej w ramach systemu edukacyjnego zostanie w ramach badania UDE przeprowadzona przez symulację wieloagentową, która zostanie scharakteryzowana w następnym podrozdziale.

3.2. Symulacja wieloagentowa

Symulacyjna analiza systemu edukacji i uwarunkowań decyzji edukacyjnych powinna uwzględniać złożoność tego systemu a w szczególności zróżnicowanie indywidualnych cech podmiotów w tym systemie oraz wpływ tego zróżnicowania na podejmowane przez nie decyzje. Ponadto model

symulacyjny powinien uwzględniać relacje międzypokoleniowe na rynku edukacyjnym, takie jak finansowanie edukacji dzieci przez gospodarstwo domowe oraz dziedziczenie wzorców edukacyjnych. W końcu model powinien również uwzględniać wpływ decyzji jednych podmiotów na sytuację decyzyjną innych, przykładowo decyzja uczelni o oferowaniu nowego kierunku studiów o zadanym programie kształcenia i spodziewanej jakości kształcenia ma wpływ na sytuację decyzyjną i wybory edukacyjne potencjalnych studentów.

Metodą analizy, która pozwala na analizę systemów złożonych (ang. *complex systems*, por. Holland, 1992) jest symulacja wieloagentowa. Macal i North (2009) definiują symulację wieloagentową (ang. *agent-based modelling and simulation* – ABMS) jako „...sposób modelowania złożonych systemów składających się z niezależnych agentów...”. W przypadku modelu systemu edukacyjnego agentami mogą być konsumenci usług edukacyjnych wyodrębnieni z innego rodzaju agentów, jakimi są gospodarstwa domowe. Agentami są również podmioty oferujące podaż usług edukacyjnych, czyli instytucje edukacyjne wszelkich możliwych typów i na wszelkich możliwych poziomach. Agentami są również organy administracji samorządowej i administracji centralnej podejmujące decyzje w zakresie regulowania rynku edukacyjnego. Ogólniej biorąc, agentami w modelu mogą być pojedyncze indywidua, ale można również definiować jako agentów podmioty kolektywne. Dozwolone są konstrukcje hierarchiczne, tzn. pojedynczy agent należący do pewnej klasy może składać się z wielu agentów należących do innej klasy. W zależności od potrzeb agentem może być również zasób przyrodniczy albo fizyczny. Najogólniej mówiąc, z technicznego punktu widzenia agent jest wiązką danych i reguł opisujących jego zachowania w różnych sytuacjach. Agenci mogą być autonomiczni albo ze sobą powiązani. Decyzja o rodzajach klas agentów, liczebności klas oraz rodzajach powiązań między elementami systemu należy do konstruktora modelu. Z przytoczonych cech wynika, że modelowanie wieloagentowe jest bardzo elastyczną techniką modelowania i model tworzony w tej konwencji można dopasować do każdego problemu badawczego.

Skonstruowane narzędzie pozwoli badać skutki zmian w polityce edukacyjnej zarówno w ujęciu jednego, jak i wielu pokoleń. Badanie jednopokoleniowe jest rozumiane jako sprawdzenie jak zmiany zasad polityki wpłyną na osoby, których zmiany te dotyczą. Symulacja wieloagentowa pozwala także uwzględnić wielopokoleniowe skutki regulacji systemu edukacyjnego. W szczególności zostanie uwzględniony fakt, że decyzje edukacyjne młodych ludzi wpływają na kształt gospodarstw domowych, które zostaną przez nich utworzone i tym samym wpływają na sytuację decyzyjną gospodarstw domowych w kolejnych pokoleniach.

Symulacja wieloagentowa jest rodzajem symulacji systemów, którego cechą wyróżniającą jest podział modelu na niezależne elementy – agentów. Z przytoczonych wcześniej przykładów wynika, że pojęcie agenta w literaturze nie jest jednoznaczne. Macal i North (2006) dokonują przeglądu literatury i przytaczają następujące definicje agenta: agentem jest niezależnie zachowujący się komponent dowolnego rodzaju (por. Bonabeau, 2002). Niezależność polega na tym, że agenta można wyodrębnić z systemu. Zachowanie się jest tutaj rozumiane jako podejmowanie decyzji przez agenta. Macal i North (2006) zauważają, że druga grupa podejść wymaga, aby zachowania komponentu były adaptacyjne, czyli żeby mógł być uznany za agenta, to agenci powinni uczyć się na podstawie stanów środowiska, a następnie odpowiednio dopasowywać swoje zachowania. Gilbert i Troitzsch (2005)

definiują agenta ogólnie jako program komputerowy lub część programu komputerowego, która może być uznana za działającą samodzielnie oraz która reprezentuje indywidualność, organizację, państwo lub innego aktora społecznego.

Macal i North (2006) zauważają, że agentowi należy przypisać następujący zestaw cech: 1) identyfikowalność, 2) środowisko, 3) podporządkowanie realizacji celu, 4) niezależność, 5) adaptacyjność. Agent jest identyfikowalnym konkretnym bytem (ang. *entity*) z zestawem cech oraz reguł określających jego zachowanie oraz możliwości podejmowania decyzji. Dla agenta można jednoznacznie określić granice jego definicji – można jednoznacznie stwierdzić, czy coś jest częścią agenta, czy też nie jest. Agent jest umieszczony wewnątrz środowiska, w którym prowadzi interakcje z innymi agentami, oraz może reagować na zmiany tego środowiska. Agenci mają zdolność do analizy cech innych agentów i dostosowania do nich swoich decyzji. Decyzje agenta mogą być podporządkowane realizacji wcześniej ustalonych celów – np. maksymalizacji funkcji użyteczności. Wybierając decyzję, agent ocenia poszczególne warianty pod względem stopnia realizacji przez niego jego celów. Agent jest niezależny i sam kieruje swoimi poczynaniami w ramach środowiska, w którym się znajduje. Agent zapamiętuje reakcje środowiska na jego zachowania i dostosowuje do nich swoje przyszłe reguły decyzyjne. Agent może być wyposażony w reguły określające zasady zmian reguł jego postępowania. Stąd z kolei wynika, że w modelowaniu wieloagentowych systemów ekonomicznych można zrezygnować z założenia o doskonałej racjonalności podmiotów gospodarujących na rzecz jakiegokolwiek racjonalności ograniczonej.

Cechą wspólną przedstawionych wyżej definicji agenta jest analogia z definicją elementu systemu w podejściu systemowym. Dalej przez agenta będziemy rozumieć element modelowanego systemu, który może prowadzić interakcje z innymi agentami. Macal i North (2006) definiują agenta jako „*byt prowadzący interakcje ze swoim otoczeniem określony poprzez następujący zestaw cech: atrybuty, reguły zachowania, pamięć, zasoby, złożony proces podejmowania decyzji, umiejętność uczenia się, dostosowywania reguł decyzyjnych do zmieniającego się środowiska*”. Znaczenie słowa byt jest tu tożsame z definicją pojęcia element w analizie systemowej oraz pojęcia obiekt w analizie obiektowej. Dokonując adaptacji definicji podanej przez Macal i North (2006), przyjęto definicję agenta jako element systemu prowadzący interakcje ze swoim otoczeniem określony poprzez wybrane cechy z następującego zestawu: atrybuty, reguły zachowania, pamięć, zasoby, proces podejmowania decyzji, umiejętność uczenia się, dostosowywania reguł decyzyjnych do zmieniającego się otoczenia. W definicji tej poprzez otoczenie elementu systemu rozumiemy inne elementy, w tym innych agentów, oraz otoczenie systemu.

Przez symulację wieloagentową będziemy rozumieć symulację systemu prowadzoną za pomocą komputera, w której w modelu systemu występują agenci. Gilbert i Troitzsch (2005) definiują modelowanie wieloagentowe (ang. *agent-based modeling*) jako metodę numeryczną, która umożliwia badaczowi tworzenie, analizowanie i eksperymentowanie z modelami składającymi się z agentów. Tym samym proces konstrukcji symulacji wieloagentowej i pracy z nią będziemy nazywać *modelowaniem wieloagentowym*.

Axtell (2000) zauważa, że w implementacji informatycznej wieloagentowego modelu systemu agenci są reprezentowani jako obiekty. Obiekt jest tu rozumiany jako abstrakcja programistyczna, łącząca stan z zachowaniem (por. Coad i Yourdon, 1994). Dlatego też dla każdego agenta należy określić zestaw stanów oraz zasady zachowania się. Zarówno stany jak i zachowania się mogą być prywatne lub publiczne. Prywatne stany to stany dostępne tylko danemu agentowi, stany publiczne to stany dostępne dla całego środowiska w tym innych agentów. Podobnie zachowania publiczne dotyczą innych agentów (np. przeprowadzenie transakcji), a zachowania prywatne dotyczą wyłącznie agenta (np. ocena użyteczności jakiegoś zachowania).

Axtell (2000) wyróżnia następujące cztery cechy charakterystyczne modelowania wieloagentowego: heterogeniczność podmiotów, możliwość uwzględnienia lokalizacji agentów (fizycznej lub w sieci społecznej), możliwość modelowania ograniczonej racjonalności oraz możliwość pełnej analizy danych z procesu symulacji. Modelowanie heterogeniczności agentów jest bezpośrednio możliwe poprzez stosowanie podejścia obiektowego, które zakłada, że dla każdego obiektu jest określony jego stan. Częścią opisu stanu może być lokalizacja geograficzna agenta oraz referencje do innych agentów – umożliwia to tworzenie sieci społecznych. Racjonalność agenta jest modelowana poprzez tworzenie metod (zachowań) obiektu, stąd może być ona w modelu dowolnie kształtowana. Ponieważ implementacja wieloagentowego modelu symulacyjnego jest programem komputerowym, to istnieje możliwość dowolnego zbierania danych z procesu symulacji. Axtell (2000) podkreśla, że uwzględnienie przedstawionych czterech cech w analizie agentowej jest łatwe i naturalne, natomiast w analizie matematycznej może prowadzić do skomplikowania modelu uniemożliwiającego jego rozwiązanie.

Macal i North (2009) zauważają, że modelowanie systemów, w którym występuje adaptacja (ang. *complex adaptive systems*) charakteryzuje się następującymi trzema cechami: 1) nieliniowością, gdy zasoby są wymieniane pomiędzy agentami w sposób, w sposób w który nie można ich dodawać; 2) zróżnicowaniem agentów, które może postępować z czasem symulacji; 3) agregacją występującą wtedy, gdy grupa agentów jest w pewnych ujęciach postrzegana jako jeden agent (tzn. badanie zachowań ludzi a badanie społeczeństwa). Ponadto w systemach z adaptacją można wyróżnić następujące cztery mechanizmy: 1) przepływ informacji i zasobów pomiędzy agentami odbywający się w taki sposób, że mogą one być przekazywane kolejnym agentom; 2) mechanizm oznaczeń (ang. *tagging*) pozwalający agentom identyfikować wybrane cechy innych agentów; 3) mechanizm ujęcia w modelu zachowań agentów formalnie lub nieformalnie zachowań występujących w świecie rzeczywistym; 4) blokowy mechanizm konstrukcji agentów (ang. *building block mechanism*), w którym agent może pełnić więcej niż jedną rolę w systemie. North i Macal (2009) zwracają uwagę na to, że przedstawione wyżej mechanizmy są współzależne: agregacja powoduje, że wielu agentów może występować jako jeden, budowa agentów z elementów oznacza, że jeden agent może zachowywać się jak zbiór agentów.

Przedstawione cechy symulacji wieloagentowej wskazują na jej szczególną przydatność w modelowaniu systemów edukacyjnych. Podejście wieloagentowe umożliwia uwzględnienie heterogeniczności podmiotów na rynku edukacyjnym, dynamiki systemu edukacyjnego oraz pozwala na dowolne modelowanie procesu decyzyjnego agentów, a w szczególności uwzględnienie

współzależności decyzji w systemie edukacyjnym. Cechy te przesądziły o wyborze symulacji wieloagentowej do modelowania dynamiki systemu edukacyjnego.

Podejście modelowania systemów ekonomicznych jako całości składającej się z wielu agentów, pomiędzy którymi dochodzi do różnego rodzaju transakcji, znajduje potwierdzenie w teorii ekonomii. Literatura ekonomiczna wskazuje, że zachowania jednostek w skali mikro mają wpływ na kształt gospodarki widziany w skali makro (por. Schelling, 1978). Tym samym jest możliwe modelowanie gospodarki w skali mikro – na poziomie agentów, ich zachowań i sieci społecznych, a następnie analiza stanu modelu reprezentującego gospodarkę w skali makro. Holland (1995) zauważa, że klasyczne modele ekonomiczne zakładają pełną racjonalność decydentów, podczas gdy w rzeczywistych systemach gospodarczych podejmowanie w pełni racjonalnych decyzji nie jest możliwe. Racjonalność agentów może być ograniczona przez zakres dostępnych dla nich informacji, koszt pozyskania pełnej informacji i jej analizy czy też ich możliwości przetwarzania danych. Dlatego Holland (1995) wskazuje na podejście wieloagentowe jako metodę uwzględnienia ograniczonej racjonalności w analizie systemów. Tesfatsion (2002) dokonuje obszernego przeglądu zastosowań metod symulacji wieloagentowej do modelowania systemów ekonomicznych oraz zauważa, że obecne zwiększenie dostępności mocy obliczeniowej oraz istnienie narzędzi do symulacji komputerowej pozwala na budowę modeli symulacyjnych w skali mikro. Modelując zachowania agentów w skali mikro, można wyciągać wnioski odnośnie systemu w skali makro.

Ze względu na specyfikę modelowania wieloagentowego modele te są dokumentowane w odmienny sposób niż modele DSGE bądź modele ekonometryczne. Dokumentacja modelu wieloagentowego składa się z następujących elementów (por. Kamiński i Szufel, 2013):

- modelu konceptualnego systemu,
- diagramów języka UML (por. OMG, 2011):
 - diagramów klas – do reprezentacji klas agentów, ich atrybutów, metod oraz powiązań pomiędzy nimi,
 - diagramów czynności – do reprezentacji dynamiki systemu symulacyjnego,
 - diagramów stanów – do reprezentacji procesów decyzyjnych i zachowań pojedynczych agentów,
- pseudokodu,
- kodu źródłowego zaimplementowanego modelu w języku programowania, w którym model ten został zaimplementowany, np. w Javie.

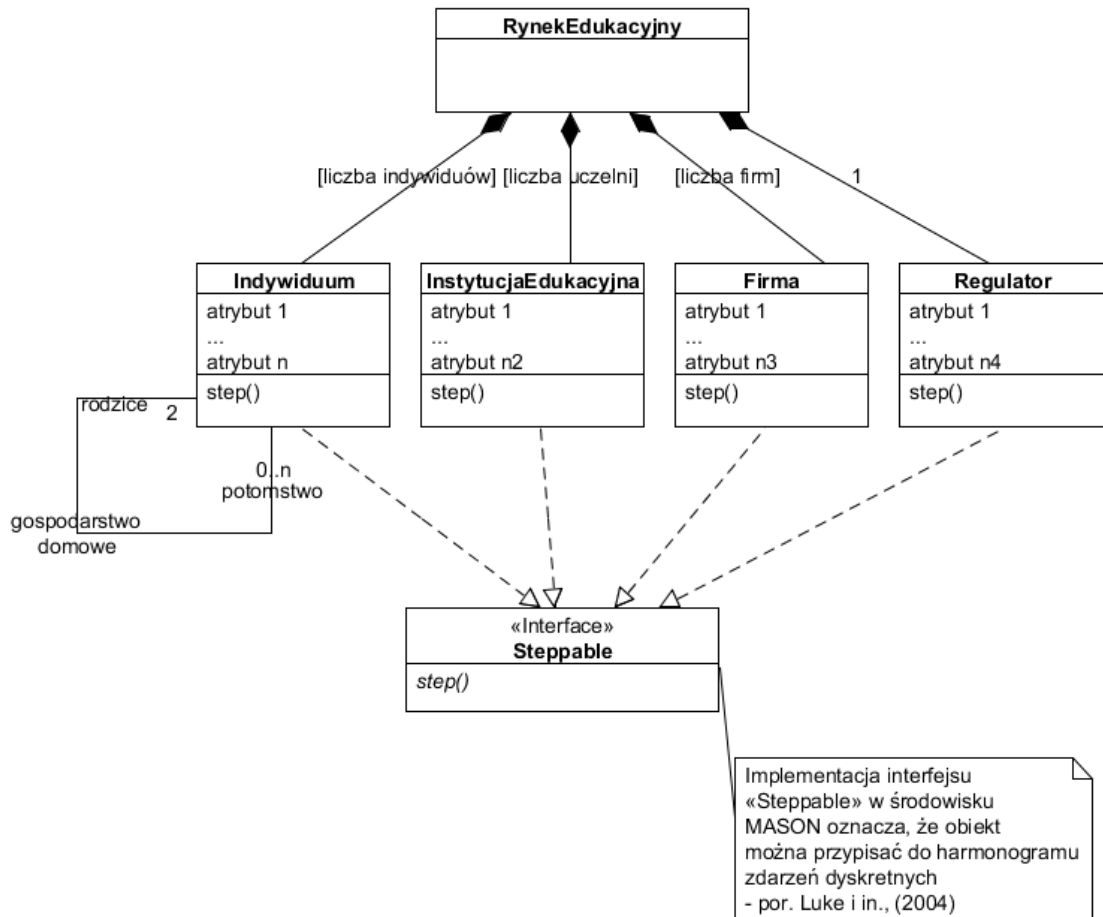
3.3. Wieloagentowa analiza rynków edukacyjnych

Punktem wyjścia analizy polityki regulacyjnej w ujęciu wieloagentowym jest rynek edukacyjny postrzegany w ujęciu systemowym. W badaniu zostanie przyjęte, że system edukacyjny składa się z czterech (lub w wyniku zmian założeń modelu – większej liczby) klas podmiotów: indywidualów (które tworzą gospodarstwa domowe), instytucji świadczących usługi edukacyjne, firm oraz regulatorów. Celem *indywidualów* jest nabycie umiejętności funkcjonowania w systemie społecznym i gospodarczym.

Indywidualnie tworzą gospodarstwa domowe. Indywidualnie mogą podejmować decyzję o rozpoczęciu bądź kontynuowaniu nauki oraz o wyborze poziomu kształcenia i typu instytucji edukacyjnej. Rozważając decyzję o podjęciu nauki, indywidualnie albo dostosowuje się do wymogów obowiązującego prawa albo porównuje potencjalne korzyści z ponoszonymi kosztami oraz uwzględnia ograniczenia budżetowe. Celem *instytucji edukacyjnej* jest realizacja misji edukacyjnej oraz w przypadku instytucji niepublicznych maksymalizacja zysku. Decyzje instytucji edukacyjnych obejmują wszystkie aspekty ich działalności, np. w przypadku szkół wyższych: sposób rekrutacji, tworzenie kierunków studiów, alokacje dostępnych zasobów (kadrowych, finansowych, lokalowych) pomiędzy tymi kierunkami. Celem *firm* jest maksymalizacja zysku oraz utrzymanie pozycji i przetrwanie na rynku, na którym działają. Działania firm na rynku edukacyjnym obejmują decyzje związane z pozyskiwaniem pracowników oraz podnoszeniem ich poziomu kapitału ludzkiego. Celem regulatorów rynku jest rozwój gospodarczy, maksymalizacja dobrobytu społecznego oraz ograniczanie poziomu nierówności społecznych. Decyzje *regulatorów* obejmują wielkość i strukturę finansowania edukacji ze środków publicznych, sposób alokacji tych środków między instytucjami edukacyjnymi oraz strukturę organizacji rynku edukacyjnego (wymogi formalne, minima programowe).

Szkic prezentujący diagram klas dla modelu wieloagentowego został przedstawiony na ryc. 4. Opis informatyczny rzeczywistego rynku edukacyjnego odpowiada opisowi stworzonemu na podstawie podejścia systemowego. Dlatego też w opisie wieloagentowego modelu systemu edukacyjnego można wyróżnić cztery klasy obiektów odpowiadające czterem klasom elementów w systemie edukacyjnym: Indywidua, Instytucja edukacyjna, Firma, Regulator. Dla Indywiduów model uwzględnia relacje międzypokoleniową dzieci-rodzice. Relacje pomiędzy indywiduami a instytucjami edukacyjnymi, firmami oraz regulatorem zostały na tej rycinie pominięte.

Ryc. 4. W modelowaniu wieloagentowym systemu edukacyjnego zostaną uwzględnieni agenci reprezentujący poszczególne klasy podmiotów w systemie edukacyjnym. Klasy w modelu wieloagentowym mogą być przedstawiane w postaci diagramu UML.



Źródło: oprac. własne na podst. Szufel (2012)

Dla poprawnego przeprowadzenia analiz symulacyjnych zachowań dowolnego systemu podstawowe znaczenie mają następujące kwestie:

- zdefiniowanie systemu podlegającego modelowaniu,
- wybór adekwatnego narzędzia analizy – modelu systemu,
- organizacja i pozyskanie zbioru danych wejściowych,
- ustalenie warunków początkowych analizy i kalibrowanie parametrów modelu,
- ustalenie wiązki scenariuszy symulacyjnych i eksperymentowanie z modelem,
- przeprowadzenie obliczeń i analiza wrażliwości wyników modelowania na zmiany parametrów symulacji,
- zasadna interpretacja wyników obliczeń wykonanych z pomocą modelu,
- uogólnienie wyników obliczeń do rekomendacji dla decydentów sterujących systemem (oryginałem).

W przeprowadzonym badaniu systemem oryginalnym (oryginałem) jest system ekonomiczno-społeczny Polski, czyli gospodarka narodowa produkująca bądź oferująca dobra oraz usługi materialne i niematerialne w połączeniu ze zbiorem gospodarstw domowych usytuowanych na terytorium Polski i w połączeniu z przeszłymi i obecnymi decyzjami regulatora systemu. Szczególną uwagę zajmuje w tym systemie sfera materialna i sfera zachowań podmiotów związane z procesem edukacyjnym.

W rozpatrywanym przypadku regulatorem są agendy władzy państwowej i samorządowej, zarówno ustawodawcze jak i wykonawcze. Członkowie gospodarstw domowych świadczą w systemie usługi dostarczania pracy i kapitału, a z drugiej strony są konsumentami dóbr i usług materialnych i niematerialnych pojawiających się w systemie. Usługi edukacyjne są jednymi z oferowanych i konsumowanych usług. Są usługami o tyle szczególnymi, że korzystanie z niektórych z nich jest obowiązkowe (szkolnictwo na poziomach od podstawowego do średniego) oraz że fakt wykorzystania usługi edukacyjnej zmienia charakterystykę podmiotu korzystającego z tej usługi. Konsument usług po przejściu każdego kolejnego etapu obecności w systemie edukacyjnym ma inne umiejętności, kwalifikacje i kompetencje. Wynika stąd, że przeprowadzane analizy muszą być analizami przeprowadzanymi dla skali makroekonomicznej i brać pod uwagę zróżnicowanie modelowanych podmiotów, zarówno świadczących usługi edukacyjne, jak i zróżnicowanie zbioru korzystających z usług edukacyjnych. W analizach tych musi także istnieć możliwość odwzorowania skutków decyzji regulatora zarówno na szczeblu krajowym, jak i lokalnym. Narzędzie modelowe musi również umożliwiać przeprowadzenie analiz dynamicznych dla wielu przedziałów czasowych, ponieważ nieuzasadnione jest przyjęcie założenia, że usługa edukacyjna jest świadczona w przedziale czasu, którego długość można zaniedbać.

3.4. Kalibracja wieloagentowego modelu system edukacyjnego

Dane zebrane w badaniu UDE pozwolą na kalibrację systemu edukacyjnego w ten sposób, że w modelu symulacyjnym zostaną uwzględnione charakterystyczne cechy polskiego rynku edukacyjnego oraz relacje występujące na tym rynku.

Dane zebrane w badaniu ankietowym UDE zostaną uwzględnione w modelu symulacyjnym przy zastosowaniu następujących metod:

- Obok modelowania ekonometrycznego może być przeprowadzana symulacja stochastyczna, która pozwoli na uwzględnienie nieznanego rozkładu składnika losowego; w ten sposób model symulacyjny może uwzględnić niepewność prognoz z modeli ekonometrycznych.
- Klastrowanie respondentów na grupy, a następnie dopasowywanie teoretycznych rozkładów zmiennych losowych w obrębie każdego klastra. Np. podział respondentów ze względu na formę studiów (stacjonarne/niestacjonarne) oraz rodzaj otrzymanego wykształcenia (techniczne/nietechniczne) i następnie dopasowywanie rozkładów wybranych parametrów (np. poziomu wynagrodzeń) do danych empirycznych. Proces dopasowania danych empirycznych do rozkładu teoretycznego zostanie zrealizowany poprzez

wykonanie po kolei szeregu testów statystycznych badających zgodność danych empirycznych z wybranymi rozkładami teoretycznymi (test Kołmogorowa-Smirnowa, Andersona-Darlinga, chi-kwadrat), a następnie wybór rozkładu, dla którego poziom dopasowania jest największy.

- Losowanie wartości bezpośrednio ze zbioru danych w trakcie symulacji.

W modelu symulacyjnym zostanie uwzględniona w razie potrzeby zależność pomiędzy posiadaniem wykształceniem a funkcjonowaniem na rynku pracy, a w szczególności następujące zależności:

- wykształcenie a wiek podjęcia pierwszej pracy,
- wykształcenie a okresy aktywności zawodowej,
- dochody gospodarstwa domowego a wykształcenie jego członków,
- wpływ rodzaju i formy studiów na uzyskiwane zarobki.

W modelu symulacyjnym mogą zostać uwzględnione dowolne relacje związane z tworzeniem związków i gospodarstw domowych oraz relacją pokoleń. W szczególności w modelu zostaną uwzględnione następujące informacje o relacjach pomiędzy podmiotami w systemie edukacyjnym zebrane w ramach badania UDE:

- finansowanie edukacji dzieci z dochodów gospodarstwa domowego (ograniczenie budżetowe gospodarstwa wpływa na wybory edukacyjne dzieci, modelowanie przerywania lub niepodjęcia nauki z powodu niewystarczających dochodów gospodarstwa domowego),
- dziedziczenie wzorców edukacyjnych (korelacja wykształcenia dzieci i rodziców),
- tworzenie związków i gospodarstw domowych – uwzględnienie wpływu czynników edukacyjnych na proces łączenia się w związki, a następnie przekazywanie wzorców wykształcenia potomstwu oraz finansowanie tego wykształcenia.

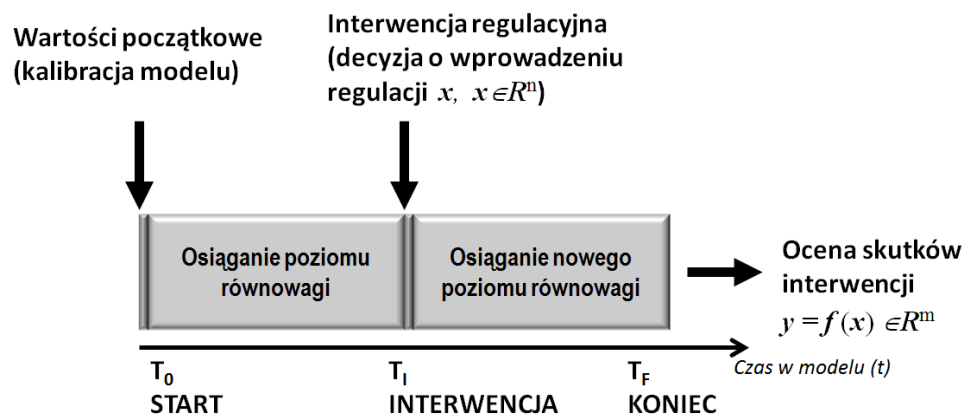
Ponadto w modelu mogą zostać uwzględnione dane demograficzne, a w szczególności prognozy występowania różnych grup wiekowych. Model symulacyjny umożliwia również uwzględnienie trendów zwiększającego się udziału osób podejmujących studia wyższe oraz emigracji.

3.5. Eksperymenty symulacyjne

Analiza przedstawionych w części 4.2 pytań badawczych może odbyć się poprzez przeprowadzenie eksperymentów symulacyjnych (por. Law, 2007). Eksperymentowanie na skalibrowanym modelu symulacyjnym polega na porównywaniu stanu, w jakim znajduje się model systemu edukacyjnego bez zmian polityki finansowania (tj. utrzymania obecnej polityki finansowania edukacji) z różnymi potencjalnymi scenariuszami zmian tej polityki. Model symulacyjny jest modelem stochastycznym, dlatego dla każdego rozważanego sposobu regulacji tego systemu zostaną wykonane wielokrotnie powtarzane symulacje.

Po wielokrotnym powtórzeniu symulacji dla różnych polityk finansowania edukacji będą porównywane skutki wprowadzania modelowanych regulacji. Przykładowe miary skutków polityki finansowania edukacji mogą być następujące: poziom dochodu, poziom zróżnicowania nierówności społecznych, poziom bezrobocia, poziom wydatku na edukację z budżetu państwa.

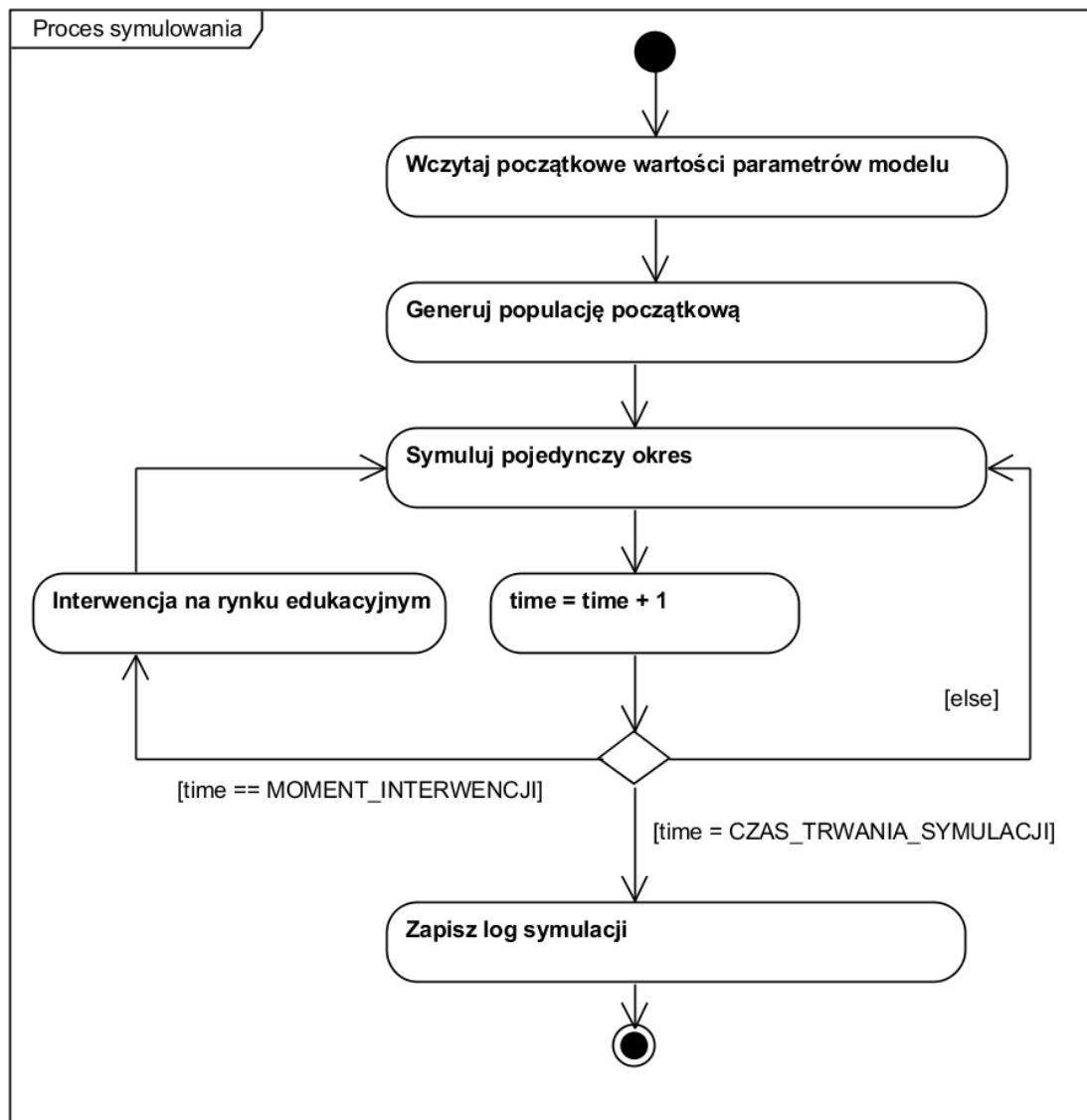
Ryc. 5. Schemat przebiegu pojedynczej symulacji dla pojedynczego eksperymentu. Aby uzyskać oszacowania zadeklarowanych wielkości wynikowych symulacja musi być wielokrotnie powtórzona.



Źródło: Szufel (2012)

Proces symulowania dynamiki w wieloagentowym systemie edukacji wyższej został przedstawiony na ryc. 6. Po inicjalizacji parametrów modelu zostaje wygenerowana początkowa populacja Indywidualiów. Generacja populacji początkowej wiąże się z przypisaniem indywiduom ich indywidualnych cech. Cechy te zostaną wylosowane z rozkładów, których parametry zostaną oszacowane na podstawie danych empirycznych z badania UDE (por. poprzedni podrozdział). Następnie będzie symulowany stan systemu w każdym kolejnym okresie (por. też ryc. 3). W badaniu symulacyjnym mogą być rozważane dowolne interpretowalne merytorycznie scenariusze.

Ryc. 6. Proces symulacji interwencji w (zmiany reżimu) w wieloagentowym modelu systemu edukacyjnego



Źródło: Szufel (2012)

Skutki polityki finansowania wyliczone przy pomocy modelu stochastycznego są zmiennymi losowymi, dlatego ich porównywanie wymaga zastosowania odpowiednich testów statystycznych (np. test Welcha).

4. Literatura

- Ackoff, R. L. (1971). Towards a system of systems concepts, *Management Science* 17(11), 661–671.
- Behrman, J. R., Rosenzweig, M. R. (2002). Does increasing women's schooling raise the schooling of the next generation?, *The American Economic Review* 92(1), 323–334.
- Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 99(Suppl 3), 7280–7287.
- Browning, M., Chiappori, P. A., Weiss, Y. (2011). *Family economics*. Preliminary version, format PDF, czytane w lipcu 2013 r.
- Cameron, S. V., Heckman, J.J. (1998). *Life cycle schooling and dynamic selection bias: Models and evidence for five cohorts*, Technical report, National Bureau of Economic Research.
- Colander, D., Howitt, P., Kirman, A., Leijonhufvud, A., Mehrling, P. (2008). *Beyond DSGE Models: Toward an Empirically Based Macroeconomics*. Middlebury Collage Working Paper Series 0808, Middlebury.
- Farmer, J. D., Foley, D. (2009). The economy needs agent-based modelling, *Nature* 460(7256), 685–686.
- Gilbert, N., Troitzsch, K. G. (2005). *Simulation for the social scientist*, McGraw-Hill International.
- Hanushek, E. A. (2006). School resources, *Handbook of the Economics of Education* 2, 865–908.
- Heathcote, J., Storesletten I G. L. Violante (2009). Quantitative macroeconomics with heterogenous households, *Annual Review of Economics* 1(1), 319-354.
- Holland, J. H. (1995). *Hidden order: How adaptation builds complexity*. Basic Books.
- Kamiński, B. (2012). *Podejście wieloagentowe do modelowania rynków. Metody I zastosowania*. Oficyna Wydawnicza Szkoły Głównej Handlowej w Warszawie.
- Kamiński, B., Koloch, G. (red.) (2014). *Advances in Social Simulation. Proceedings of the 9th Conference of the European Social Simulation Association*. Springer.
- Kamiński B., Szufel, P. (2013) Verification of Models in Agent Based Computational Economics – Lessons from Software Engineering, s. 185-199, w: A. Kobyliński, A. Sobczak, Perspectives in Business Informatics Research, Lecture Notes in Business Information Processing, Springer, vol. 158

- Kane, T. J. (1994). College entry by blacks since 1970: *The role of college costs, family background, and the returns to education*. Technical report.
- Krajewski, L. J., Ritzman, L. P. (2002). *Operations Management – Strategy and Analysis*. Prentice Hall.
- Lange, F., Topel, R. (2006). The social value of education and human capital. *Handbook of the Economics of Education* 1, 459–509.
- Larman, C., Basili, V. R. (2003). Iterative and incremental developments. a brief history. *Computer* 36(6), 47–56.
- Law, A. M. (2007). *Simulation modeling and analysis*. McGraw-Hill Education Boston, MA.
- Macal, C. M., North, M. J. (2006). Tutorial on agent-based modeling and simulation part 2: how to model with agents, in 'Proceedings of the 38th Winter Simulation Conference, Monterey, CA', 73–83.
- Macal, C. M., North, M. J. (2009). Agent-based modeling and simulation, in 'Winter Simulation Conference', Winter Simulation Conference, 86–98.
- Marcucci, P. N., Johnstone, D. B. (2007). Tuition fee policies in a comparative perspective: Theoretical and political rationales. *Journal of Higher Education Policy and Management* 29(1), 25–40.
- Miller, J. H., Page, S. E. (2009). *Complex Adaptive Systems: An Introduction to Computational Models of Social Life: An Introduction to Computational Models of Social Life*. Princeton University Press.
- Mincer, J. (1970). The distribution of labor incomes: a survey with special reference to the human capital approach. *Journal of Economic Literature* 8(1), 1–26.
- Mincer, J. A. (1974). Schooling and earnings, in 'Schooling, experience, and earnings'. Columbia University Press, 41–63.
- Nechyba, T. J. (1990). The southern wage gap, human capital and the quality of education, *Southern Economic Journal*, 308–322.
- O'Donoghue, C. (1999). Estimating the rate of return to education using microsimulation. *The Economic and Social Review*, 30(3), 249-265.
- Education at a Glance 2013: OECD Indicators* (2013). OECD Publishing.
- Omg unified modeling language (omg uml), superstructure, version 2.4.1. (2011). *Object Management Group*.
- Oświata i wychowanie w roku szkolnym 2011/2012. (2012). Wydawnictwo GUS. Warszawa.

Rizzuto, R., Wachtel, P. (1980). Further evidence on the returns to school quality. *Journal of Human Resources* 15, 240–254.

Schelling, T. (1978). *Micromotives and macrobehaviour*. W. W. Norton & Company, New York.

Sewell, W. H., Shah, V. P. (1967). Socioeconomic status, intelligence, and the attainment of higher education. *Sociology of Education* 1–23.

Speakman, R., Welch, F. (2006). Using wages to infer school quality. *Handbook of the Economics of Education* 2, 813–864.

Szkoły wyższe i ich finanse w 2011 r. (2012). Wydawnictwo GUS. Warszawa.

Sztanderska, U. (2004). Determinanty kształcenia wyższego w polsce. W: B. Minkiewicz, T. Szapiro (red.). *Biogramy edukacyjne, Warszawa*.

Sztanderska, U. i Minkiewicz, B. (2007). *Edukacja dla pracy: raport o Rozwoju Społecznym Polska 2007*, UNDP Poland.

Szufel, P. (2012). *O kosztowej efektywności procesów edukacyjnych, rozprawa doktorska*. Szkoła Główna Handlowa, Warszawa.

IFiS PAN (2013). *Ścieżki rozwoju edukacyjnego młodzieży – szkoły pogimnazjalne*. Projekt „Badania dotyczące rozwoju metodologii szacowania wskaźnika edukacyjnej wartości dodanej (EWD)”. Warszawa: Wydawnictwo IFiS PAN.

Tesfatsion, L. (2002). Agent-based computational economics: Growing economies from the bottom up. *Artificial life* 8(1), 55–82.

GUS (2011). *Wejście ludzi młodych na rynek pracy w Polsce w 2009 r.* Warszawa: Wydawnictwo GUS.

GUS (2013). *Wybór ścieżki kształcenia a sytuacja zawodowa Polaków*. Informacje i opracowania statystyczne Głównego Urzędu Statystycznego. Warszawa.