

Paweł Skrzyński\*, Tadeusz Szuba\*

## **Koncepcja i realizacja molekularnego modelu obliczeń w analizie paradygmatu niewidzialnej ręki rynku Adama Smitha**

### **1. Wprowadzenie**

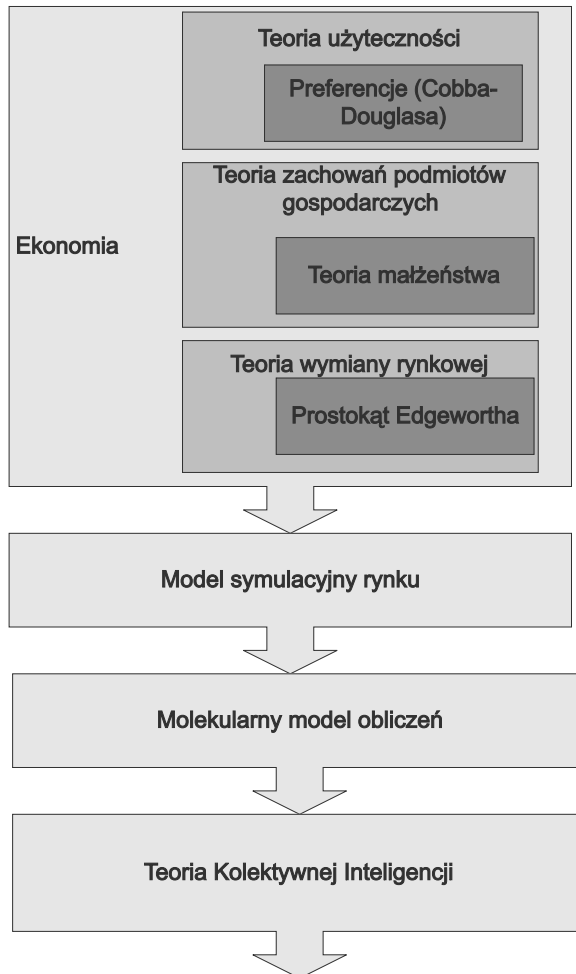
Pomimo że podjęto wiele prób stworzenia różnych symulatorów rynku, np. [1, 3, 12], cele związanych z nimi badań zasadniczo różniły się od podejścia zaprezentowanego w tym artykule. Część badań skupiała się na zaprezentowaniu nowego podejścia do budowy takich systemów, opartych na teoriach ekonomicznych (np. praw popytu i podaży) oraz na metodach zaczerpniętych z informatyki – systemach multi-agentowych wykorzystanych w celu rozwiązania problemu optymalnej alokacji zasobów [1]. Inne podejścia skupiały się na analizie np. procesu niewidzialnej ręki rynku, jako problemu optymalizacyjnego – cen równowagi w aspekcie teorii rynków ewolucyjnych [3]. Zaprojektowano też szereg symulatorów rynkowych na potrzeby gier komputerowych. Najbliższym w stosunku do tego artykułu trendem badań jest tzw. *Agent Based Computational Economy* (ACE) – celem analiz są spontaniczne procesy regulacyjne zachodzące w ekonomii, takie jak nieplanowana koordynacja transakcji rynkowych zwykle utożsamiana z pojęciem niewidzialnej ręki rynku. Podejście to jest jednak mocno „obiektywne” gdyż bazuje przed wszystkim na elementach i pojęciach prawdziwego rynku na bardzo wysokim poziomie, podczas gdy teoria Kolektywnej Inteligencji pozwala wyprowadzić z modelu ekonomicznego abstrakcyjne procesy obliczeniowe. Narzędziem, które powstało w ramach tych badań był system Repast (*REcursive Porous Agent Simulation Toolkit*) – nie jest to narzędzie ograniczone do analizy systemów ekonomicznych, lecz jego zastosowanie obejmuje także analizę systemów, w których pojawia się „struktura socjalna”.

Podczas gdy badacze ACE skupiają się na analizie wymiany rynkowej, celem tego artykułu jest przedstawienie koncepcji molekularnego modelu obliczeń wywodzącego się z teorii Kolektywnej Inteligencji. Wprowadzenie takiego modelu będzie dwustopniowe. W pierwszym kroku zostanie zaprezentowany model rynku oparty na mikroekonomicznej teorii użyteczności. W drugim kroku zostanie pokazany sposób transformacji takiego mo-

---

\* Katedra Automatyki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

delu do modelu molekularnego umożliwiającą analizę procesów ekonomicznych z punktu widzenia kolektywnej inteligencji. Podejście zastosowane przez autorów zobrazowane jest na rysunku 1.



**Rys. 1.** Koncepcja badań

W podejściu tym wychodzimy od zbudowania symulatora rynku [9] bazującego na teorii mikroekonomii. Model ten następnie jest przekształcany do modelu molekularnego (obliczeń), który może być analizowany za pomocą teorii kolektywnej inteligencji. Artykuł przedstawia rozszerzenie koncepcji przedstawionej w artykule [9] poprzez silniejsze zakorzenienie modelu symulacyjnego w modelu mikroekonomicznym oraz przedstawia sposób transformacji takiego modelu do modelu molekularnego. Agenci, reprezentowani

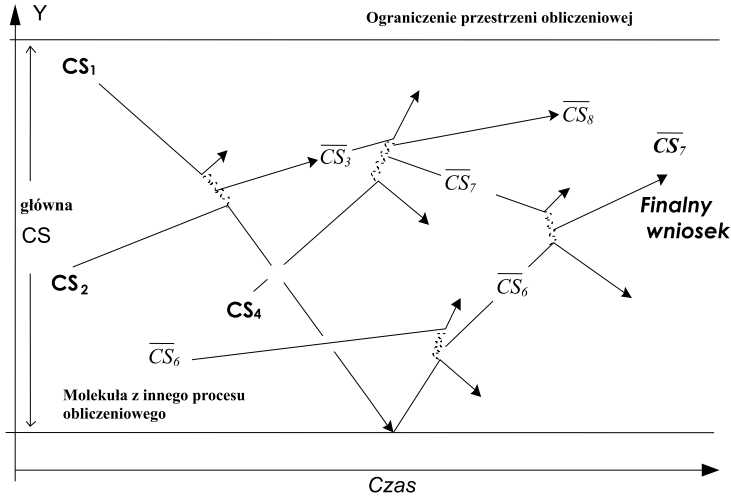
przez molekuly informacyjne (omówione w dalszej części artykułu) zdefiniowani w takim systemie zachowują się w sposób bardziej zorganizowany i są w stanie szybciej zawiązywać struktury socjalne zdolne do rozwiązywania problemów, jeśli są zaprojektowani w oparciu o model kupna-sprzedaży. Agenci kupują pewne zasoby, przetwarzają je, a następnie sprzedają innym agentom, którzy w ten sposób zaspokajają swoje potrzeby. Zatem kluczowym składnikiem modelu jest wymiana, oparta na pieniądzu. Wydaje się, że w badaniach nad zachowaniem systemów multiagentowych [11] nie ma konsensusu, co do tego, w jaki sposób zorganizować kooperację między agentami. Autorzy uważają, że kooperacja, która posługuje się pojęciem pieniądza jest najprostszym i równocześnie naturalnym sposobem wymuszenia stabilnej kooperacji pomiędzy agentami.

### 1.1. Kolektywna Inteligencja i obliczenia molekularne

Podstawą teorii jest model obliczeniowy [6], w którym nastąpiło odejście od uporządkowanego, deterministycznego procesu obliczeń – takiego, jaki jest realizowany w typowym dzisiejszym procesorze cyfrowym, na rzecz molekularnego [5], niedeterministycznego procesu obliczeniowego. Szczególnym przypadkiem takiego modelu obliczeń (jedyne, który do tej pory udało się fizycznie zaimplementować) jest biochemiczny tzw. DNA-komputer Adlemana. Utrata niedeterminizmu w takim modelu obliczeń jest w znakomity sposób skompensowana poprzez ujawniającą się naturalną równoległość obliczeń – czyli komputer taki uzyskuje przewagę w wielowątkowych obliczeniach. Okazuje się, że taki model wymaga rezygnacji z algebr Boole'a jako matematycznej podstawy obliczeń (rachunek 0/1) na rzecz obliczeń w rachunku predykatów 1-rzędu; czyli innymi słowy następuje przeniesienie obliczeń na obszar logiki matematycznej. Ciekawostką jest to, że model taki w sensie strukturalnym dalej jest binarny, w komputerze cyfrowym do kodowania informacji i podczas jej przetwarzania stosujemy tylko dwa symbole 0/1 natomiast w omawianym komputerze stosuje się tylko dwa typy obiektów: *molekuła informacyjna/membrana*; z których to dalej budowana jest struktura obliczeń – implikująca przebieg obliczeń.

W dużym uproszczeniu, w omawianym modelu informacja jest przenoszona przez tzw. molekuly informacyjne transportujące fakty, reguły i cele obliczeń. Molekuly informacyjne przemieszczają się quasi-chotycznie w środowisku skonfigurowanym poprzez membrany. W momencie spotkania (ogólnie rozumianego, które dalej będziemy nazywać rendez-vous), jeśli spotkają się właściwe wyrażenia logiczne, następuje proces wnioskowania i w rezultacie pojawiają się potomne molekuly, transportujące dalej konkluzje z wnioskowania. W takim systemie wnioskującym, proces logiczny odbywa się wielowątkowo, chaotycznie, równoległe, wątki się przeplatają i zazębiają, wnioskowanie odbywa się jednocześnie „w przód”, „wstecz” oraz „od środka”. Okazało się podczas symulacji, że taki model obliczeniowy jest zaskakująco szybki i efektywny [3] – natomiast zasadniczym problemem jest jak go fizycznie zrealizować. Głównym problemem jest więc znalezienie w otaczającym nas świecie zjawisk fizycznych, które da się opanować i użyć do budowy takiego komputera.

Na rysunku 2 przedstawiono za pomocą diagramów Feynmana przebieg procesu obliczeniowego (wnioskowania) w takim komputerze.



Rys. 2. Diagramy Feynmana opisujące molekularny proces obliczeniowy

## 1.2. Kolektywna inteligencja i procesy ekonomiczne

Dlaczego taki model obliczeniowy świetnie pasuje do fenomenu kolektywnej inteligencji, a dalej do próby uchwycenia tą drogą paradygmatu niewidzialnej ręki rynku A. Smitha [1, 2]? Otóż wydaje się, iż natura obydwu procesów jest podobna [9]:

- 1) Jednostki w strukturach społecznych współpracują ze sobą w sposób chaotyczny, nieciągły.
- 2) Zachowują się (np. rozpatrując położenie) quasi-chaotycznie ze względu na kłopoty i szanse codziennego życia.
- 3) Ich działania są w większości nieskoordynowane, równoległe, procesy wnioskowania/produkcji są inicjowane, przerywane, wznawiane.
- 4) Procesy współpracy przenikają się i oddziałują na siebie w sposób niekontrolowany przez jednostkę.
- 5) Trudno odseparować rezultaty pokojowych i wrogich „ścieżek” współpracy.
- 6) Często w ramach struktury społecznej istnieją w tym samym czasie sprzeczne ciągi wnioskowań.
- 7) Zasoby i środki są rozproszone w czasie, przestrzeni i pomiędzy indywidua. Ponadto pojawiają się i znikają w sposób niedeterministyczny.
- 8) Jest trudno jednoznacznie zinterpretować elementy procesów kolektywnej inteligencji: np. dane indywiduum może być różnie interpretowane z punktu widzenia różnych przenikających się procesów logicznych.

- 9) Bardzo często obserwujemy zjawisko, ale nie potrafimy nadać mu interpretacji w sposób „wiarygodny”.
- 10) Kolektywna inteligencja jest procesem „chwilowym”, tj. może się „zamanifestować”, a po chwili zaniknąć.

Widać wyraźnie, że oba procesy mają bardzo podobną naturę, co uzasadnia użycie takiego modelu obliczeń do formalizowania kolektywnej inteligencji. Zasadnicza trudność polega jednak na tym, że efektywne liczenie kolektywnej inteligencji wymaga, aby najpierw odwzorować daną strukturę socjalną na odpowiadający jej molekularny model obliczeń – co nie jest łatwe (ani jednoznaczne).

Czego zatem oczekuje się od teorii kolektywnej inteligencji w przypadku analizy procesu niewidzialnej ręki rynku? Otóż celem autorów jest zbudowanie modelu symulacyjnego uproszczonego rynku, a następnie celem jest takie jego dostrojenie, aby spontanicznie zaczęły się pojawiać się ciągi wnioskowań pełniące funkcje samoregulacyjne dla tego rynku. Ciągi te będziemy analizować.

Przypomnijmy, iż w ujęciu współczesnym niewidzialna ręka rynku rozumiana jest jako proces, którego rezultaty osiągane są w sposób zdecentralizowany bez jawnych uzgodnień pomiędzy jego uczestnikami. Pierwszą wyróżniającą cechą tego procesu jest to, iż jest on niezamierzony, a cele do jakich dążą pojedynczy uczestnicy rynku nie są ani zsynchronizowane, ani identyczne z wynikami tego procesu – wynik osiągany jest niejako przy okazji. Dodatkowo proces ten zachodzi, pomimo iż uczestniczący w nim agenci mogą być tego nieświadomi – dlatego proces nazywany jest „niewidzialnym”. Systemem, w którym powszechnie uważa się, iż zachodzi proces niewidzialnej ręki rynku jest wolny rynek. Adam Smith dowodził, iż poprzez fakt, że konsumenci chcą nabywać dobra po możliwie najniższej cenie, z kolei producenci chcą osiągać możliwie największe przychody, co zmusza ich do inwestowania w najbardziej dochodowe gałęzie przemysłu (tj. te, na które jest największy popyt) – w rezultacie przyczynia się to do ogólnego wzrostu ekonomicznego/gospodarczego. Jednym z najbardziej pozytywnych aspektów wolnego rynku jest fakt, iż zmusza on ludzi do pośredniego myślenia o tym, czego inni ludzie potrzebują – bowiem „biznesowa” chęć zaspokojenia tych potrzeb prowadzi do poprawy własnej sytuacji. Na tych prostych przesłankach został oparty nasz model symulacyjny, który jak oczekujemy pozwoli nam zaobserwować proces niewidzialnej ręki rynku.

## 2. Koncepcja modelu symulacyjnego

Przedstawiona poniżej skrótkowo koncepcja jest rozszerzeniem koncepcji przedstawionej w artykule [9]. Sam model symulacyjny rynku oparty jest na przesłankach podanych w poprzednim rozdziale: w skład rynku wchodzi agenci, którzy wymieniają pomiędzy sobą dobra, które są przedmiotem obrotu na rynku. Ponieważ jest to model, liczba dóbr będących obrotem na rynku została ograniczona do kilku. Możliwe jest zbudowanie z dóbr prostej hierarchii: istnieją dobra pozyskiwane przez agentów bezpośrednio ze środowiska oraz do-

bra, które są wytwarzane z innych dóbr (dobra wyższego rzędu). Istotą koncepcji jest to, iż agenci nabywają dobra w celu zaspokojenia swoich potrzeb. Zgodnie z teorią użyteczności [10] każde dobro posiada dla danego agenta pewną użyteczność. To w jaki sposób koszyk dóbr wpływa na wielkość użyteczności charakteryzują preferencje agenta. Ponieważ w mikroekonomii przyjmuje się, że preferencje Cobba–Douglasa dobrze oddają ludzkie preferencje [11], model przyjmuje występowanie takich właśnie preferencji (mówią one między innymi to, iż wraz z konsumpcją kolejnych jednostek dobra maleje ich użyteczność).

W skład modelu symulacyjnego rynku wchodzi następujące elementy:

- **Środowisko:** umożliwia egzystencję agentów dostarczając zasobów niezbędnych do ich przetrwania w postaci zasobów dóbr, które mogą być przez agenta pobierane.
- **Agent:** uczestnik rynku działający w środowisku przeprowadzający transakcje z innymi agentami. Wyróżnić można następujące rodzaje agentów (więcej informacji o agentach znajdzie się w rozdz. 3):
  - agent podstawowy – reprezentuje konsumenta i wytwórcę dóbr;
  - agent finansowy – reprezentuje „bank” – pozwala zwykłym agentom na branie kredytów i zakładanie lokat;
  - agent reprezentujący Państwo – symuluje działanie Państwa, jego główne zadania to zbieranie podatków i subsydiowanie agentów.
- **Dobra:** przedmiot obrotu na rynku, transakcje zawierane pomiędzy agentami dotyczą dóbr. Dobra są wytwarzane lub pobierane ze środowiska przez agentów a następnie sprzedawane innym agentom. Dobra są również konsumowane przez agentów, co ma wpływ na parametr związany z użytecznością.
- **Pieniądz:** jest odzwierciedleniem wartości dobra. Agent kupując dobro, płaci za nie pieniędzem.
- **Czas:** istotne jest zamodelowanie upływu czasu w modelu – czas jest kwantowany w postaci tur.

W związku z tym, że szczegółowa koncepcja modelu została przedstawiona w [9] w tym miejscu zaprezentujemy jedynie modyfikacje modelu, które zostały wprowadzone od tamtego czasu. W atrybutach agenta zaszła zmiana polegająca na wprowadzeniu uogólnionego pojęcia energii, które została nazwana użytecznością – w związku z tym zrezygnowano z pojęcia zadowolenia. Tym samym konsumpcja dobra przez agenta ma wpływ jedynie na jeden parametr będący użytecznością. Wszelkie akcje agenta podporządkowane są maksymalizacji tego parametru w trakcie jego życia.

### 3. Transformacja modelu ekonomicznego do modelu molekularnego

Warstwa molekularna reprezentuje „mentalne” procesy obliczeniowe kolektywnej inteligencji agentów, które powoduje wystąpienie niewidzialnej ręki. Wprowadzając tę warstwę można się posłużyć analogią ciała (warstwa 1, reprezentowana przez model ekono-

miczny) i duszy u człowieka (warstwa 2, reprezentowana przez model molekularny). Przy przejściu od warstwy 1 do warstwy 2 pomijane jest wszystko z wyjątkiem przepływu informacyjnego oraz przetwarzania. Agenci rynkowi warstwy modelu ekonomicznego zostają bezpośrednio odwzorowani na molekule informacyjne warstwy 2. Każdy agent posiada membranę otaczającą fakty (atrybuty agenta z warstwy modelu ekonomicznego), reguły (reguły działania agenta) oraz wnioskowania, które są przeprowadzane, a które mają wpływ na podejmowane akcje (kupno, sprzedaż, migracja itp.). *Rendez-vous* w warstwie molekularnej odpowiada zawarciu transakcji pomiędzy agentami lub pobraniu dobra ze środowiska. Zauważmy, że w wyniku *rendez-vous*, gdy uda się dopasować odpowiednie fakty powstaje ciąg wnioskowań, które wynikiem jest powstanie nowych molekuł informacyjnych transportujących konkluzje tego wnioskowania. W modelu ekonomicznym w wyniku zajścia transakcji następuje przepływ pieniądza pomiędzy agentami oraz przepływ dóbr. Przyjmując wielkość środków pieniężnych oraz poziom posiadanych dóbr w warstwie ekonomicznej, jako fakty w warstwie molekularnej możemy zauważyć, że zmianie stanu agenta w wyniku zajścia transakcji odpowiada powstanie nowej molekule informacyjnej w warstwie molekularnej. Ruchy agenta w środowisku ekonomicznym determinowane są poszukiwaniem „lepszego rynku”, tzn. przesuwa się on w kierunku, w którym w wyniku wymiany najbardziej poprawił swoją użyteczność. Ruchy takie w warstwie molekularnej traktowane są jako quasi chaotyczne. Jest jeszcze jedna istotna kwestia związana z odwzorowaniem wymiany na *rendez-vous*. Świat ekonomiczny jest w jakimś sensie wirtualny – żeby wymiana miała miejsce wcale agenci nie muszą się znajdować w jednym miejscu fizycznie – interpretacja taka podsuwa sama rzeczywistość – przecież banki żeby pełnić swoje funkcje wcale nie muszą przemieszczać się fizycznie – interesy mogą być robione poprzez kontakt telefoniczny, Internet, wymianę dokumentów za pośrednictwem poczty itp.

## 4. Eksperymenty

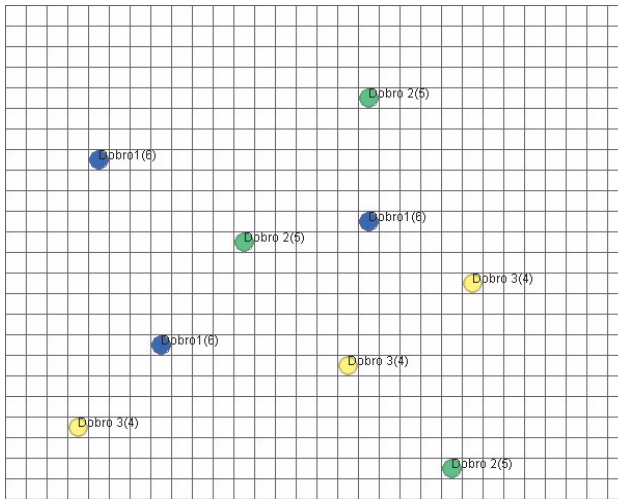
Po implementacji systemu zgodnie z przyjętymi założeniami, opisanymi wcześniej, przeprowadzono szereg eksperymentów mających na celu obserwację związków pomiędzy sferą realną a finansową. Uważa się, że jednym z celów funkcjonowania sfery finansowej jest stymulowanie rozwoju sfery realnej. Symulacje miały na celu zaobserwowanie tego zjawiska, w związku z czym wykonanych zostało po 10 symulacji dla przypadku rynku, w którym nie ma sfery finansowej oraz rynku, oraz w którym istnieje sfera finansowa. Parametry, poprzez które porównywane były te dwie sytuacje, to wskaźniki: PKB, inflacja oraz liczba zawieranych transakcji.

### 4.1. Warunki wykonania eksperymentu

Skonfigurowano środowisko o wymiarach  $30 \times 30$  o następujących parametrach wraz z trzema rodzajami dóbr, które są rozmieszczone tak jak na rysunku 3. Umieszczonych zostało 11 różnych agentów, których podzielono na trzy rodzaje, przypisując im różne wartości

atrybutów początkowych (w symulacji było pięciu agentów typu 1 oraz po trzech typu 2 i trzech rozmieszczonych losowo):

1. Energia – 130, pieniądź – 150, liczba pozyskiwanych jednostek dobra w ciągu tury – 2 (dla każdego dobra), strata energii na turę – 1,8.
2. Energia – 140, pieniądź – 200, liczba pozyskiwanych jednostek dobra w ciągu tury – 1,5, strata energii na turę – 1,3.
3. Energia – 120, pieniądź – 150, liczba pozyskiwanych jednostek dobra w ciągu tury – 1,5, strata energii na turę – 1,5.



**Rys. 3.** liczba oraz sposób rozmieszczenia dóbr w symulacji (zrzut ekranu z aplikacji)

W przypadku symulacji systemu rynkowego ze sferą finansową dodanych zostało sześciu agentów finansowych (rozmieszczonych losowo lecz w każdej symulacji tak samo) podzielonych na dwa typy różniące się regułami zachowania.

## 4.2. Wyniki

Dla każdego z dwóch przypadków zostało przeprowadzonych 10 symulacji po 35 tur każda. Wyniki zostały zebrane w tabelach 1, 2 i 3.

**Tabela 1**

Średnie wartości atrybutów dla różnych typów agentów (brak sfery finansowej)

	Typ 1	Typ 2	Typ 3
Użyteczność	280	513	257
Pieniądże	122	58	336



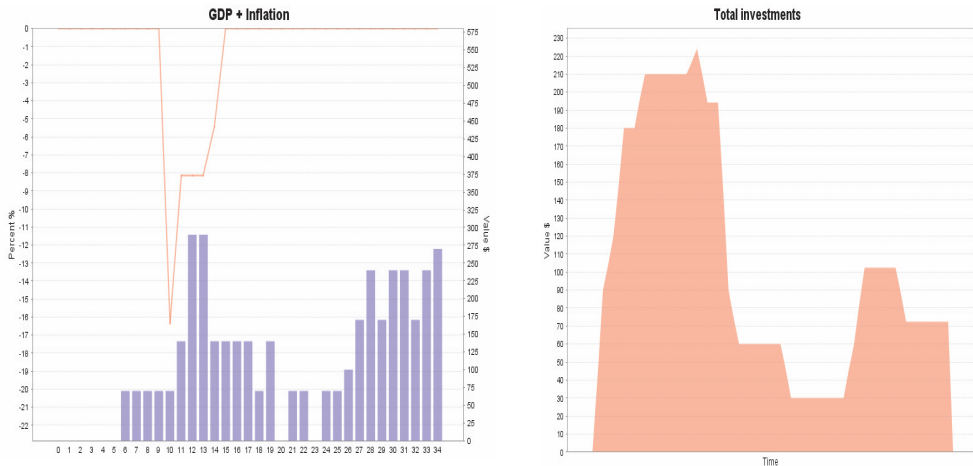
**Tabela 2**  
Średnie wartości atrybutów dla różnych typów agentów  
(rynek ze sferą finansową)

	Typ 1	Typ 2	Typ 3
Użyteczność	216	546	330
Pieniądze	10	-56	217

**Tabela 3**  
Porównanie liczby zawieranych transakcji w systemie bez sfery finansowej  
oraz ze sferą finansową

	Brak sfery finansowej	Sfera finansowa
Liczba transakcji	17	31

Wartość lokat w przypadku braku agentów finansowych była oczywiście zerowa. Natomiast w przypadku pojawienia się sfery finansowej ich wartość w różnych rundach symulacji osiągała maksymalnie wartość 300–400 jednostek.

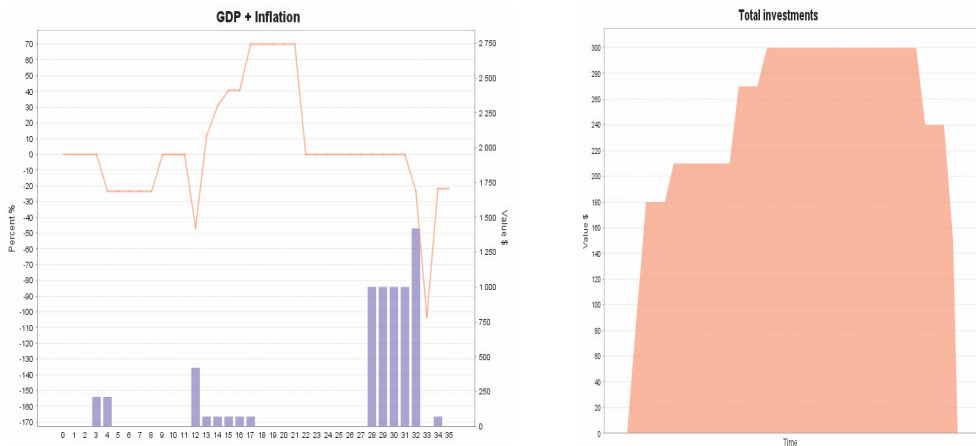


**Rys. 4.** Okno z podglądem wartości inflacji oraz PKB  
– sprzedaż dobra po obniżonej cenie

Podczas przeprowadzonych symulacji zaobserwowano kilka charakterystycznych zjawisk – ze względu na objętość artykułu nie można przedstawić ich wszystkich, zatem w dalszej części omówione zostanie tylko zjawisko stymulacji sfery realnej poprzez sferę finansową. Na rysunku 4 przedstawiono sytuację, w której doszło do nagłego spadku inflacji, gdy jeden agent sprzedaje dane dobro po obniżonej cenie. Skutkuje to natychmiastowym

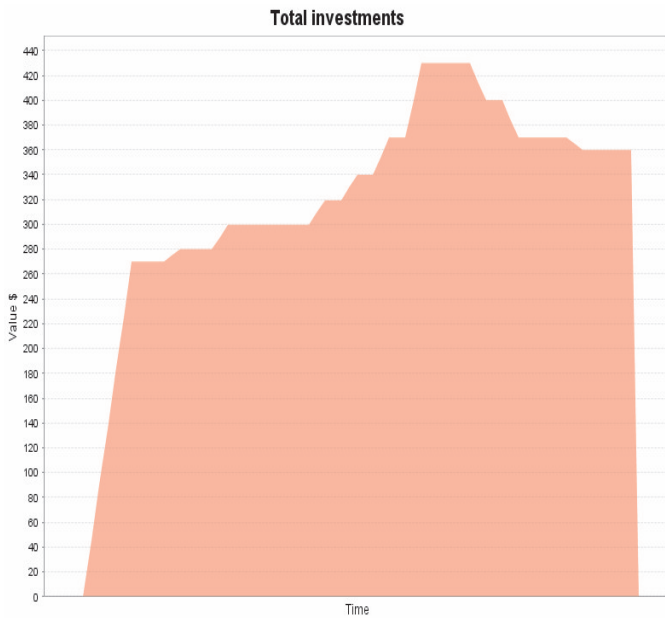
spadkiem inflacji w systemie. Następnie agent spotykając się ze zwiększonym popytem na swoje dobro, automatycznie podwyższa cenę dobra do ceny bazowej, co w rezultacie powoduje spadek siły nabywczej pieniądza i wzrost inflacji do poziomu wyjściowego, który utrzymuje się na stałym poziomie. Wprowadzenie sfery finansowej spowodowało wzrost wartości PKB oraz łącznej sumy inwestycji – w tym przypadku pojawienie się agentów finansowych doprowadziło do wzrostu PKB oraz stymulacji zainwestowanych środków, które w przypadku braku agentów w ogóle nie występowały.

W sytuacji widocznej na rysunku 5 mieliśmy do czynienia z parokrotnymi wzrostami, jak i spadkami inflacji. Spowodowane było to zmianami cen sprzedawanych dóbr, które były reakcją na aktualną sytuację na rynku (zwiększony popyt lub przeciwnie). Można zauważyć, że po każdym z takich wzrostów lub spadków inflacja stabilizowała się na pewnym stałym poziomie, często osiągając poziom równy 0 lub jemu bliski. Jeśli chodzi o wskaźnik PKB oraz wartość inwestycji, to były one wyraźnie wyższe niż w przypadku braku agentów finansowych (PKB w niektórych rundach przekroczyło wartość 1000, inwestycje nawet do poziomu 300).

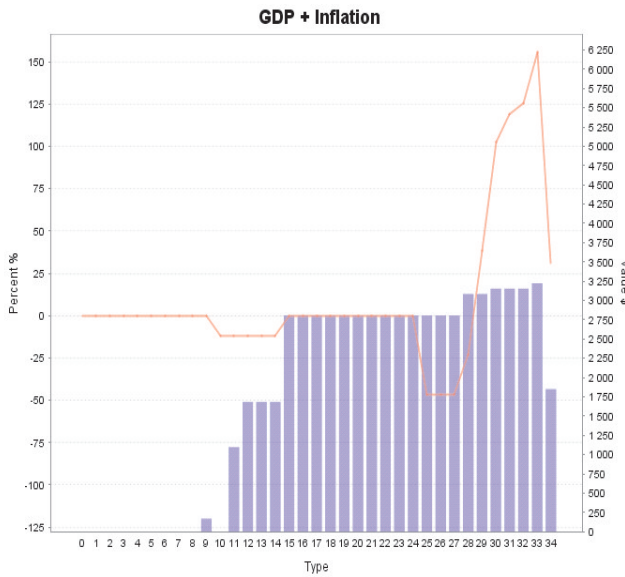


**Rys. 5.** Okno z podglądem wartości inflacji oraz PKB – stymulacja PKB oraz inwestycji poprzez wprowadzenie sfery finansowej

Sytuacja widoczna na rysunkach 6 i 7 charakteryzuje się wystąpieniem na wykresie „impulsu” inflacji tzn. pojedynczego ekstremum powstałego w wyniku gwałtownego spadku lub wzrostu cen oferowanych dóbr. Zazwyczaj jednemu z nich, po dojściu do szczytowego punktu, towarzyszy od razu drugi powodujący stabilizowanie sytuacji na rynku. Na wykresie PKB dostrzegalny jest jego wysoki poziom, przekraczający nawet 3000. Również na wykresie inwestycji ich poziom w niektórych rundach osiąga 400. Efekt ten jest stymulowany poprzez obecność na rynku agentów finansowych.



Rys. 6. Okno z podglądem wartości inflacji oraz PKB – impuls inflacyjny stymulowany poprzez wprowadzenie sfery finansowej



Rys. 7. Okno z podglądem wartości inflacji oraz PKB – impuls inflacyjny stymulowany poprzez wprowadzenie sfery finansowej

## 5. Wnioski

Przeprowadzone eksperymenty pokazują, iż w przypadku braku sfery finansowej w systemie agenci rynkowi skupiali się na pobieraniu dóbr z systemu i dalszej ich sprzedaży innym agentom w celu osiągnięcia zysków, tym samym ograniczała się ich konsumpcja, co przekładało się na ogólne mniejsze zadowolenie agentów (mierzone użytecznością). Brak agentów finansowych powodował także mniejszą rywalizację w dostępie do dóbr, a tym samym mniejszy poziom konkurencji. Wprowadzenie do systemu sfery finansowej stymulowało rozwój sfery realnej co doprowadziło do wzrostu zadowolenia agentów rynkowych, gdyż nie musieli się skupiać na sprzedaży dóbr, przez co mogli je konsumować i podnosić poziom zadowolenia. Jednak przekładało się to na obniżenie ich dochodów i zasobów pieniężnych. Obecność nowych agentów na rynku prowadziła także do zwiększenia rywalizacji w dostępie do dóbr, zwiększając tym samym konkurencję. Jeśli chodzi o parametry całego rynku, to obecność agentów finansowych doprowadziła do podwojenia liczby przeprowadzanych transakcji oraz na wartość inwestycji w systemie. Zadziałali oni także stymulująco na wartość PKB, której wartość znacząco wzrosła wraz z ich obecnością na rynku w porównaniu do ich braku, co było widoczne na wykresach zamieszczonych na rysunkach 5, 6 i 7. Oczywiście kwoty zainwestowanych środków finansowych znacznie wzrosła dla symulacji z wprowadzoną sferą finansów. Zatem zauważone zachowania w symulowanym systemie były zgodne z kanonem wiedzy ekonomicznej.

Artykuł miał na celu przedstawienie nowatorskiej koncepcji modelu symulacyjnego rynku opartego na modelu kolektywnej inteligencji. Przeprowadzone wstępne badania potwierdziły przydatność stworzonego modelu symulacyjnego. Kolejne doświadczenia powinny zweryfikować tę hipotezę. Przedstawiona koncepcja pozwala na obserwowanie bieżących zjawisk ekonomicznych a w dalszej kolejności symulowanie przyszłości w oparciu o zadane parametry. Artykuł też pokazuje możliwość analizy zjawisk ekonomicznych na niższym poziomie poprzez wprowadzenie transformacji modelu ekonomicznego do modelu molekularnego. Sama analiza ilościowa modelu molekularnego jest przedmiotem dalszych badań autorów i stwarza obiecujące perspektywy.

## Literatura

- [1] Jorion P., *Adam Smiths Invisible Hand Revisited. An Agent-Based simulation of the New York Stock Exchange*, URL, <http://www.pauljorion.com/index-page-7.html>, 2005.
- [2] Joyce H., *Adam Smith and the invisible hand, Millennium Mathematics Project*. Plus Magazine, 2001.
- [3] Schnabl H., *A Close Eye on the Invisible Hand*. Journal of Evolutionary Economics, nr 6, 1996, 261–280.
- [4] Smith A., *Badania nad natur i przyczynami bogactwa narodów*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 1954.
- [5] Szuba T., *A Molecular Quasi-random Model of Computations Applied to Evaluate Collective Intelligence*. Future Generation Computing Journal, nr 14, 1998, 321–339.
- [6] Szuba T., *Computational Collective Intelligence*. Wiley Series on Parallel and Distributed Computing, 2001.

- 
- [7] Szuba T., *A Formal Definition of the Phenomenon of Collective Intelligence and its IQ Measure*. Future Generation Computing Journal, nr 17, 2001, 489–500.
  - [8] Szuba T., *Was there Collective Intelligence Before Life on Earth? Considerations on the Formal Foundations of Intelligence*. Life and Evolution, The Journal of General Evolution, nr 58, 2002, 61–80.
  - [9] Szuba T., Skrzyński P., *Próba wyjaśnienia paradygmatu „niewidzialnej ręki rynku Adama Smitha” w oparciu o model obliczeniowy kolektywnej*. Automatyka (półrocznik AGH), t 12, 2008, 975–992.
  - [10] Varian H.R., *Mikroekonomia*. PWN, 1995.
  - [11] Weiss G., *Multiagent systems – a modern approach to distributed Artificial Intelligence*. MIT Press, 1999.
  - [12] Ygge F., *Market-Oriented Programming and its Application to Power Load Management*. Lund University, 1998.