

Krzysztof Cichy

Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu

SYMULACYJNY MODEL POSTĘPU TECHNICZNEGO Z DYFUZJĄ TECHNOLOGII¹

Streszczenie: W pracy przedstawiono sformułowanie oraz własności symulacyjnego modelu postępu technicznego z dyfuzją technologii. Postęp techniczny wynika z własnej działalności badawczo-rozwojowej agentów oraz z imitacji wynalazków innych agentów (dyfuzja technologii). Dynamiką modelu rządzi jeden parametr zwany prawdopodobieństwem imitacji. Analizujemy dwie skrajne i jedną pośrednią jego wartość i pokazujemy, że przy 50% prawdopodobieństwie imitacji osiągnane tempo postępu technicznego jest najwyższe.

Słowa kluczowe: postęp techniczny, dyfuzja technologii, symulacje Monte Carlo.

Wprowadzenie

Jedno z najważniejszych pytań, na które próbuje odpowiedzieć ekonomia, dotyczy przyczyn i źródeł wzrostu gospodarczego. Nie znamy w pełni satysfakcjonującej odpowiedzi na to pytanie. We współczesnej literaturze poświęconej wzrostowi dominuje jednak pogląd, że podstawowego źródła wzrostu gospodarczego należy upatrywać w wiedzy. Modelując wzrost gospodarczy za pomocą modeli matematycznych, wiedzę wprowadza się najczęściej w dwojaki sposób – jako technologię produkcji lub jako kapitał ludzki [Cichy 2008 i 2009]. Podstawowa różnica między tymi pojęciami jest następująca. Kapitał ludzki jest cechą poszczególnych jednostek – agentów gospodarczych, którzy w wyniku podejmowania świadomej działalności inwestycyjnej (nauka w szkole lub w pracy – tzw. *learning by doing*) podnoszą swoje zasoby tego kapitału. Jeżeli określony agent cały swój czas poświęca na pracę w danym przedsiębiorstwie, to jego zasób wie-

¹ Praca powstała przy wsparciu finansowym Fundacji na rzecz Nauki Polskiej.

dzy (kapitału ludzkiego) nie może już być wykorzystany w innym przedsiębiorstwie. Kapitał ludzki jest więc ekskluzywny – dany zasób tego kapitału może być wykorzystywany jednocześnie tylko przez jedną firmę. Określona technologia produkcji może być wykorzystywana przez dowolną liczbę przedsiębiorstw – nie jest bowiem związana z określonym agentem gospodarczym, lecz ma raczej postać informacji o efektywnym wykorzystaniu pozostałych czynników produkcji, takich jak kapitał fizyczny, praca lub ziemia. Proces rozwoju technologii, czyli wzrostu jej efektywności nazywamy postępowem technicznym.

W artykule tym skoncentrujemy się właśnie na roli postępu technicznego we wzroście gospodarczym. Zasadniczo można wyróżnić dwa sposoby podnoszenia poziomu technologii przez przedsiębiorstwa. Po pierwsze, wzrost ten może następować w wyniku prowadzenia własnej działalności badawczo-rozwojowej. Przedsiębiorstwo (lub instytucja badawcza) ponosi wydatki badawczo-rozwojowe, które zwiększają jego szanse na dokonanie wynalazku, przez który rozumiemy określoną wiedzę umożliwiającą efektywniejsze niż dotychczas wykorzystanie czynników produkcji. Po drugie, wzrost poziomu technologii przedsiębiorstwa może nastąpić w wyniku wykorzystania wynalazków dokonywanych przez innych – aby wykorzystać pewną technologię nie jest konieczne jej wynalezienie, a jedynie przepływ informacji pomiędzy przedsiębiorstwem-wynalazcą a zainteresowaną firmą. Umożliwia to fakt, że technologia nie jest ekskluzywna – wykorzystanie jej przez jedno przedsiębiorstwo nie wyklucza zastosowania tej samej technologii w innej firmie. Zazwyczaj jednak wynalazki chronione są patentami, co oznacza, że zainteresowane ich wykorzystaniem przedsiębiorstwo musi zapłacić wynalazcy określoną opłatę patentową. Opisany mechanizm przepływu informacji o wynalazkach będziemy nazywać dyfuzją technologii.

Rozważany w tym artykule model uwzględnia oba wspomniane mechanizmy postępu technicznego – w wyniku własnej działalności badawczo-rozwojowej oraz w wyniku dyfuzji technologii. Przedstawiony model należy do nurtu modeli symulacyjnych analizowanych w monografiach [Cichy 2008 i 2009]. Ideą modeli symulacyjnych jest wprowadzenie zróżnicowanych (heterogenicznych) agentów i określonych reguł ich zachowania oraz wzajemnych interakcji. Reguły te będą wyrażone za pomocą prawdopodobieństw zachowania w danej sytuacji. Oznacza to, że w modelu istotny będzie element stochastyczny. Ze względu na obecność liczb losowych będziemy mówić o symulacjach Monte Carlo. Wprowadzenie do tego typu metod zawarte jest w monografii [Landau i Binder 2000].

Metoda badawcza, którą się posłużymy, wpisuje model do grupy ekonofizycznych modeli postępu technicznego. Wśród wcześniejszych modeli tego typu warto wymienić konstrukcje opisane w pracach Lłasa i in. [2003] oraz Ausloosa, Clippe i Pękalskiego [2004]. Modele te zostały zmodyfikowane i przeprowadzono na podstawie badań empirycznych, dotyczących roli postępu technicznego oraz dyfuzji technologii w krajach OECD [Cichy 2008 i 2009].

Podobne modele są również opisane w pracach [Chakrabarti, Chakrabarti i Chatterjee 2006], [Cockshott i in. 2009], [Delli Gatti i in. 2005], [Gallegati, Kirman i Marsili 2004]. Jako wprowadzenie do metod ekonofizycznych można polecić monografię [Mantegna i Stanley 2001]. Wiele modeli symulacyjnych przedstawionych jest w zbiorze [Tsfatsion i Judd 2006].

1. Model

1.1. Założenia modelu

Rozważamy zbiór N agentów – instytucji prowadzących działalność badawczo-rozwojową. Instytucje te dysponują pewnym zasobem środków pieniężnych, które mogą przeznaczyć na podniesienie swojego zasobu użytecznej wiedzy, który będziemy także nazywać poziomem technologii. Mogą tego dokonywać na dwa sposoby:

- poprzez działalność innowacyjną, która zwiększa prawdopodobieństwo dokonania wynalazku – wynalazek zwiększa poziom technologii danego agenta i jest równoważny z otrzymaniem patentu, co umożliwi uzyskanie od innych agentów opłat za wykorzystanie tego wynalazku,
- poprzez imitację rozwiązań technologicznych innych agentów – wykorzystanie wynalazków innych agentów wymaga wniesienia opłaty patentowej i uniemożliwia prowadzenie przez pewien czas własnej działalności badawczej, ze względu na konieczność wprowadzenia imitowanej technologii; zakładamy też, że agenci nie znają wielkości wynalazku innowatora przed podjęciem decyzji o imitacji.

Badania każdego agenta są finansowane z opłat za wykorzystanie wcześniejszych wynalazków oraz z subsydiów badawczych, których wysokość zależy od poziomu technologii agenta. Sukces badawczy każdego agenta będziemy mierzyć jego poziomem technologii oraz wysokością zgromadzonych środków pieniężnych.

Kluczowym elementem modelu jest element stochastyczny. Ponoszenie wydatków badawczych zwiększa prawdopodobieństwo wynalazku, ale nie gwarantuje jego dokonania. Zakładamy, że agenci nie różnią się między sobą, a więc wszelkie różnice pomiędzy agentami mogą wynikać wyłącznie z działania czynników losowych.

1.2. Zmienne i parametry modelu

Zmienne opisujące poszczególnych agentów (indeks dolny jest indeksem agenta, t – czas):

$A_i(t)$ – poziom technologii agenta i -tego w chwili t ,

$I_i(t)$ – wielkość innowacji agenta i -tego w chwili t ,

- $M_i(t)$ – środki pieniężne agenta i -tego w chwili t ,
 $R_i(t)$ – wielkość inwestycji innowacyjnej agenta i -tego w chwili t ,
 $P_i(t)$ – prawdopodobieństwo dokonania przez agenta i -tego innowacji w chwili t ,
 $F_i(t)$ – wysokość opłaty patentowej związanej z imitacją przez agenta i -tego innowacji w chwili t ,
 $E_i(t)$ – wysokość opłat patentowych uzyskanych przez agenta i -tego z innowacji w chwili $t-1$,
 $S_i(t)$ – wysokość dotacji badawczej dla agenta i -tego w chwili t .

Będziemy używać również notacji wektorowej, na przykład:

$$A(t) = [A_1(t), A_2(t), \dots, A_N(t)].$$

Wartości średnie (po zbiorze agentów) poszczególnych zmiennych będziemy oznaczać nawiasami $\langle \rangle$, np. $\langle A(t) \rangle = \sum_j A_j(t) / N$.

Parametry:

- ζ – prawdopodobieństwo imitacji,
 R^{\max} – maksymalna wielkość inwestycji innowacyjnej,
 I^{\max} – maksymalna wielkość wynalazku.

1.3. Przebieg symulacji – początkowe kroki

1. Zakładamy, że w chwili $t = 0$ wszyscy agenci mają taki sam rozkład technologii (wiedzy), unormowany do jedności: $A(0) = [1, 1, \dots, 1]$, a także taki sam zasób środków pieniężnych $M(0) = [1, 1, \dots, 1]$.
2. Każdy agent przeznaczą pewną kwotę $R_i(0)$ na działalność innowacyjną. Kwota ta może wynosić od 0 do R^{\max} i jest wybierana przez każdego agenta losowo (prawdopodobieństwo wybrania każdej kwoty jest równe). Równocześnie każdy agent otrzymuje dotację badawczą w wysokości

$$\frac{R^{\max}}{2} \cdot \frac{A_i(0)}{\langle A(0) \rangle},$$

czyli jej wysokość jest uzależniona od poziomu technologii danego agenta na tle wszystkich innych agentów.

3. W wyniku prowadzenia działalności innowacyjnej jeden z agentów (którego oznaczymy indeksem α) dokonuje wynalazku. Prawdopodobieństwo dokonania wynalazku jest obliczane jako stosunek wielkości inwestycji innowacyjnej do sumy środków przeznaczonych przez wszystkich agentów na działalność innowacyjną

$$P_i(0) = \frac{R_i(0)}{\sum_j R_j(0)}.$$

4. Wielkość wynalazku jest obliczana jako

$$I_{\alpha}(0) = I^{\text{md}} \cdot \frac{\langle R(0) \rangle}{R^{\text{max}}},$$

gdzie I^{md} jest zmienną losową o rozkładzie jednostajnym na przedziale $(0, I^{\text{max}})$. Wielkość wynalazku zależy więc od inwestycji badawczych agenta-innowatora, ale także od inwestycji pozostałych agentów, którzy również mają wpływ na średnią $\langle R(0) \rangle$. Oznacza to, że występują efekty zewnętrzne działalności badawczo-rozwojowej agentów – działalność ta podnosi nie tylko prawdopodobieństwo dokonania wynalazku przez agenta, ale wpływa również na jego wielkość zarówno gdy dany agent dokonuje wynalazku, jak i gdy wynalazek jest dokonywany przez innego agenta. Wynalazek podnosi wartość technologii agenta-innowatora:

$$A(1) = [1, \dots, 1, 1 + I_{\alpha}(0), 1, \dots, 1].$$

5. Następnie każdy agent podejmuje decyzję, czy w kolejnym okresie prowadzić własną działalność badawczą, czy imitować wynalazek innowatora (którego wielkości nie zna przed podjęciem decyzji) z poprzedniego okresu. Decyzja podejmowana jest losowo z prawdopodobieństwem imitacji równym ζ . Rozważymy różne wartości parametru ζ .
6. Decyzja o imitacji technologii innowatora oznacza, że nie jest prowadzona własna działalność innowacyjna i prawdopodobieństwo wynalazku jest zerowe. Poziom technologii rośnie jednak o jego wielkość $I_{\alpha}(0)$, za co j -ty agent-imitator płaci agentowi-innowatorowi opłatę w wysokości $F_j(1) = R_{\alpha}(0)$, czyli wydatków poniesionych przez innowatora na stworzenie wynalazku.
7. Typowy rozkład poziomów technologii w chwili $t = 2$ ma postać

$$A(2) = [1, 1 + I_{\alpha}(0), 1, 1 + I_{\alpha}(0), 1 + I_{\alpha}(1), 1 + I_{\alpha}(0), 1],$$

gdzie wartość $1 + I_{\alpha}(0)$ opisuje agenta-innowatora z okresu $t = 0$ oraz agentów, którzy zdecydowali się na imitację tego wynalazku. Wartość $1 + I_{\alpha}(1)$ opisuje innowatora z okresu $t = 1$. W szczególnym przypadku może to być ten sam agent, który dokonał innowacji w chwili $t = 0$ – wówczas jego poziom technologii wynosi $1 + I_{\alpha}(0) + I_{\alpha}(1)$. Wartość 1 odpowiada agentom, którzy nie dokonali imitacji i w okresie $t = 1$ ich działalność innowacyjna nie doprowadziła do powstania wynalazku.

8. Odpowiadający powyższemu rozkładowi technologii rozkład zasobów pieniężnych agentów w chwili $t = 2$ ma postać:

$$M(1) = [1 - R_1(0) - R_1(1) + S_1(0) + S_1(1), 1 - R_2(0) - F_2(1) + S_2(0) + S_2(1), \\ 1 - R_3(0) - R_3(1) + S_3(0) + S_3(1), \\ 1 - R_4(0) - R_4(1) + S_4(0) + S_4(1) + E_4(1), \\ 1 - R_5(0) - R_5(1) + S_5(0) + S_5(1), 1 - R_6(0) - F_6(1) + S_6(0) + S_6(1), \\ 1 - R_7(0) - R_7(1) + S_7(0) + S_7(1)],$$

gdzie przychody każdego agenta pochodzą z dotacji badawczych (S) oraz opłat patentowych za własne wynalazki (E), a wydatki związane są z własną działalnością innowacyjną (R) lub z imitacją rozwiązań innych innowatorów (F).

1.4. Algorytm symulacji – dowolna chwila t

Przedstawimy teraz ogólne rekurencyjne wzory, pozwalające obliczyć poziom poszczególnych zmiennych w dowolnej chwili t . Na początku każdego kroku każdy agent wybiera, czy prowadzi w danym okresie badania, czy imituje technologię innowatora z poprzedniego okresu. Wybór dokonywany jest losowo z prawdopodobieństwem ζ . Rozróżnimy trzy przypadki:

- innowatora z poprzedniego okresu (indeks α) – algorytm A,
- agenta, który w bieżącym okresie prowadzi inwestycje badawcze – algorytm B,
- agenta, który w bieżącym okresie imituje technologię innowatora z poprzedniego okresu – algorytm C.

Innowator z poprzedniego okresu – algorytm A

1. Agent przeznacza kwotę $R_i(t)$ (zmienna losowa z rozkładu jednostajnego na przedziale od 0 do R^{\max}) na badania i dostaje subsydyum badawcze w wysokości

$$S_i(t) = \frac{R^{\max}}{2} \cdot \frac{A_i(t)}{\langle A(t) \rangle}$$

oraz opłaty patentowe od imitatorów jego rozwiązania technologicznego z poprzedniego okresu.

Ilość pieniędzy

$$M_\alpha(t) = M_\alpha(t-1) - R_\alpha(t) + S_\alpha(t) + E_\alpha(t), \quad \text{gdzie} \quad E_i(t) = \sum_j F_j(t).$$

2. Agent dokonuje kolejnej innowacji z prawdopodobieństwem

$$P_\alpha(t) = \frac{R_\alpha(t)}{\sum_j R_j(t)}.$$

W wypadku sukcesu badawczego, jego poziom technologii rośnie na koniec okresu: $A_i(t+1) = A_i(t) + I_i(t)$, w przeciwnym wypadku nie zmienia się.

Agent prowadzący inwestycje badawcze w bieżącym okresie – algorytm B

1. Agent przeznaczą kwotę $R_i(t)$ (zmienna losowa z rozkładu jednostajnego na przedziale od 0 do R^{\max}) na badania i dostaje subsydlum badawcze w wysokości

$$S_i(t) = \frac{R^{\max}}{2} \cdot \frac{A_i(t)}{\langle A(t) \rangle}.$$

Ilość pieniędzy

$$M_i(t) = M_i(t-1) - R_i(t) + S_i(t).$$

2. Agent dokonuje kolejnej innowacji z prawdopodobieństwem

$$P_i(t) = \frac{R_i(t)}{\sum_j R_j(t)}.$$

W wypadku sukcesu badawczego jego poziom technologii rośnie na koniec okresu: $A_i(t+1) = A_i(t) + I_i(t)$, w przeciwnym wypadku nie zmienia się.

Agent imitujący technologię innowatora z poprzedniego okresu – algorytm C

1. Imitator przeznaczą kwotę $F_i(t) = R_\alpha(t-1)$ na imitację technologii innowatora z poprzedniego okresu i dostaje subsydlum badawcze w wysokości

$$S_i(t) = \frac{R^{\max}}{2} \cdot \frac{A_i(t)}{\langle A(t) \rangle}.$$

Ilość pieniędzy

$$M_i(t) = M_i(t-1) + S_i(t) - F_i(t).$$

2. Poziom technologii na kolejny okres: $A_i(t+1) = A_i(t) + I_\alpha(t)$.

2. Własności modelu

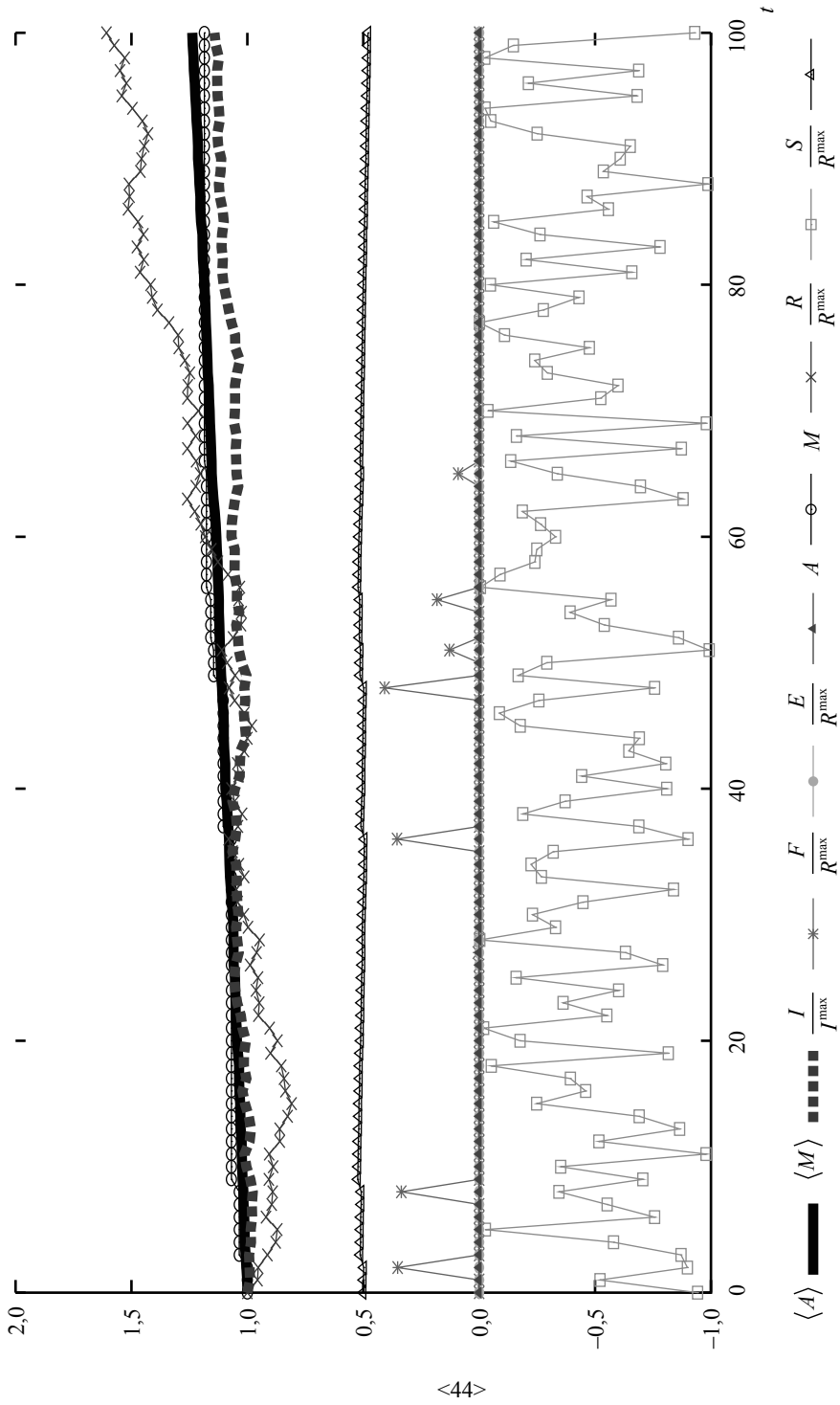
Dynamika rozważanego modelu wyznaczona jest wartością tylko jednego parametru – prawdopodobieństwa imitacji ζ . Pozostałe parametry, R^{\max} oraz I^{\max} , określają jedynie skalę – jednostkę pieniężną w pierwszym przypadku oraz jednostkę technologii w drugim. Zbadamy więc wpływ prawdopodobieństwa imitacji na poszczególne zmienne modelu. Rozważymy trzy przypadki: $\zeta = 0$, $\zeta = 1$ oraz przypadek pośredni $\zeta = 0,5$. Parametry R^{\max} oraz I^{\max} ustalamy na poziomie równym 0,1, natomiast liczba agentów będzie równa $N = 10$.

2.1. Zerowe prawdopodobieństwo imitacji

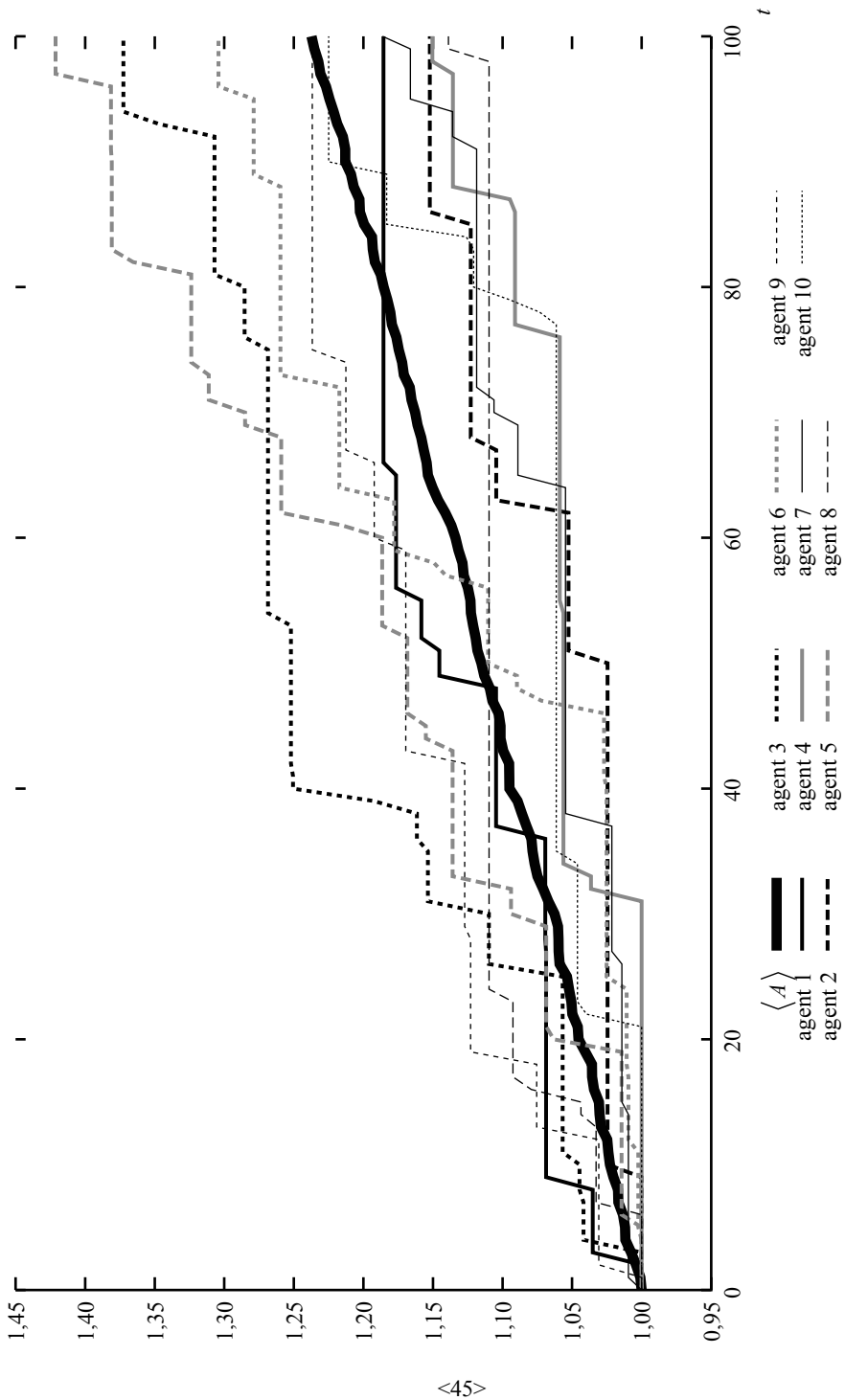
W przypadku zerowego prawdopodobieństwa imitacji wzrost poziomu technologii każdego z agentów odbywa się w wyniku autonomicznych wynalazków. Na rysunku 1 przedstawiono przykładową dynamikę zmiennych opisujących jednego z agentów (oznaczonego indeksem 1). Agent ten ponosi w każdym okresie wydatki badawczo-rozwojowe, co prowadzi w badanym przedziale czasu do 7 wynalazków, objawiających się skokowym wzrostem jego poziomu technologii. W okresach, w których poziom technologii tego agenta jest powyżej średniej, również wartość subsydiów badawczych dla tego agenta jest wyższa od średniej. Skutkuje to wzrostem ilości zgromadzonych środków pieniężnych ponad średnią dla całego zbioru agentów. Podobnie wyglądają wykresy obrazujące dynamikę poszczególnych zmiennych dla pozostałych agentów.

Na rysunku 2 przedstawiono dynamikę poziomu technologii wszystkich 10 agentów. W przypadku bez imitacji technologii innych agentów poziom technologii każdego agenta wzrasta tylko jako wynik własnych wynalazków, a pomiędzy wynalazkami następują okresy stagnacji technologicznej. W skali całego układu prowadzi to do w przybliżeniu liniowego postępu technicznego, co jest konsekwencją założonego rozkładu losowego wielkości wynalazków. Postęp techniczny byłby idealnie liniowy w przypadku dążącej do nieskończoności liczby agentów. W rzeczywistych gospodarkach liczba agentów prowadzących działalność badawczo-rozwojową jest jednak skończona, a więc fluktuacje tempa wzrostu, wynikające z oddziaływania czynników losowych, mogą być istotne.

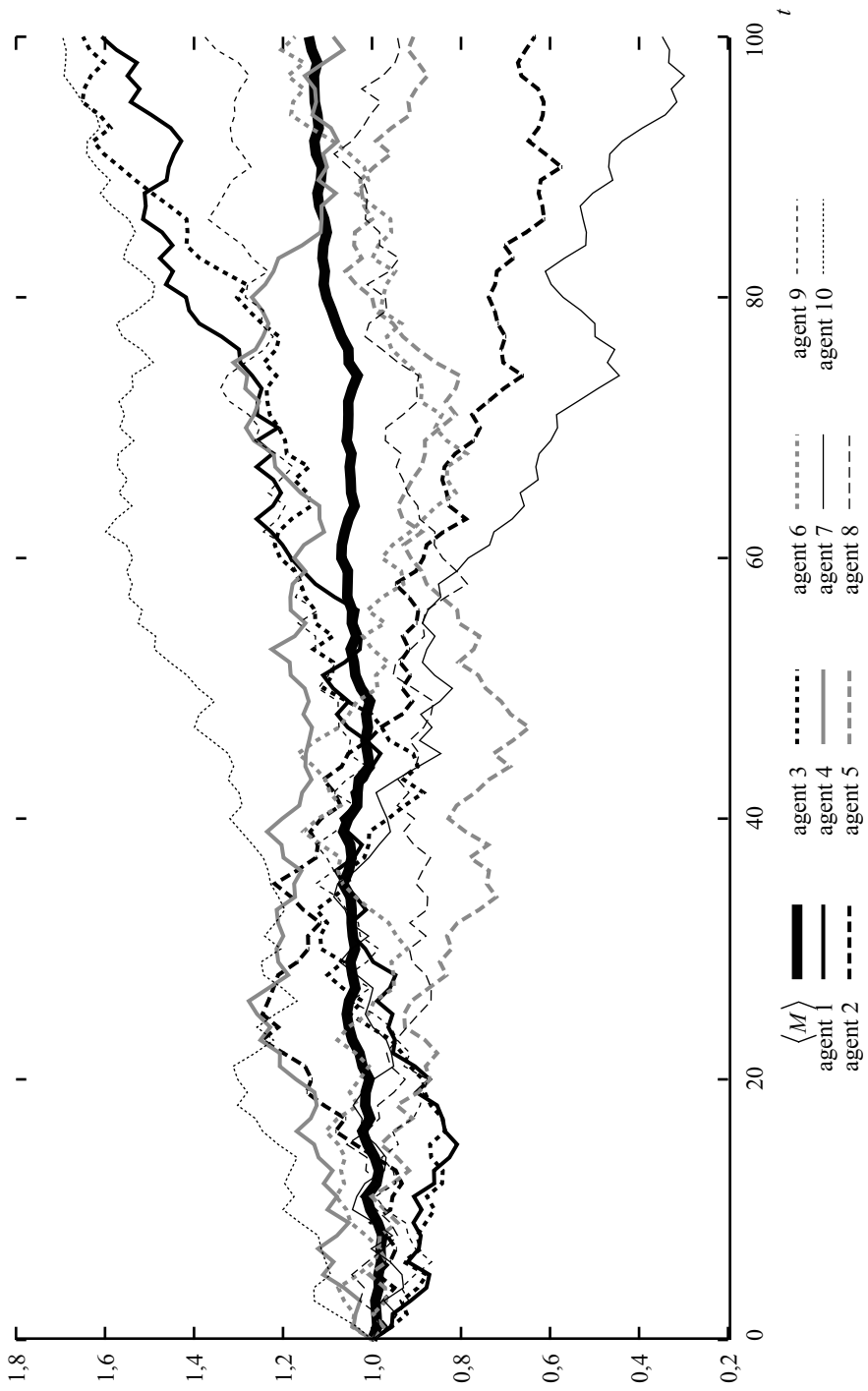
Rysunek 3 obrazuje dynamikę zgromadzonych przez agentów środków pieniężnych. W przypadku bez imitacji jedynymi wydatkami agentów są wydatki badawczo-rozwojowe, a wpływy pochodzą wyłącznie z subsydiów badawczych. W zależności od wielkości tych dwóch przepływów pieniężnych w danym okresie następuje wzrost lub spadek ilości środków pieniężnych danego agenta. Różnice w ilości tych środków po 100 okresach wynikają z działania czynników losowych – w przypadku niektórych agentów relatywnie wysokie nakłady na działalność badawczo-rozwojową dają stosunkowo niski wzrost poziomu technologii, a przez to zmniejszają też wartość subsydiów zależnych od względnego poziomu technologii danego agenta na tle innych agentów.



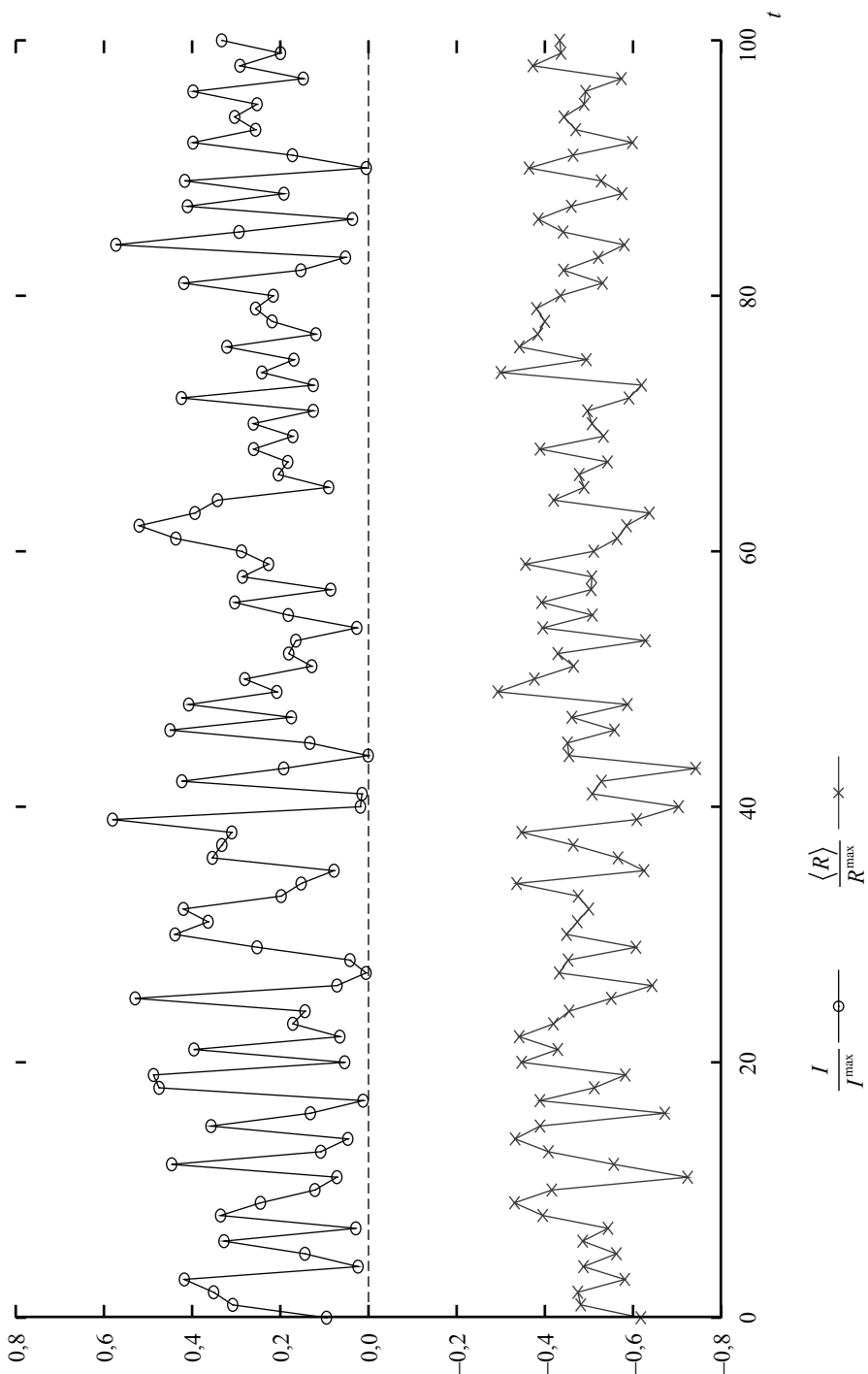
Rys. 1. Dynamika zmiennych związanych z agentem 1. Parametr $\zeta = 0$



Rys. 2. Dynamika technologii. Parametr $\zeta = 0$



Rys. 3. Dynamika ilości pieniędzy. Parametr $\zeta = 0$



Rys. 4. Dynamika wielkości innowacji oraz średnich wydatków badawczo-rozwojowych. Parametr $\zeta = 0$

Z drugiej strony, istnieją agenci, którzy wydają stosunkowo niewiele, a ich wynalazki istotnie zwiększają ich poziom technologii, a przez to również poziom otrzymywanych subsydiów. Na rysunku 4 przedstawiono fluktuacje średniej wielkości inwestycji badawczo-rozwojowych agentów oraz wielkości wynalazku – oscylują one wokół swych wartości średnich równych w przypadku bez imitacji dokładnie 50% maksymalnego poziomu.

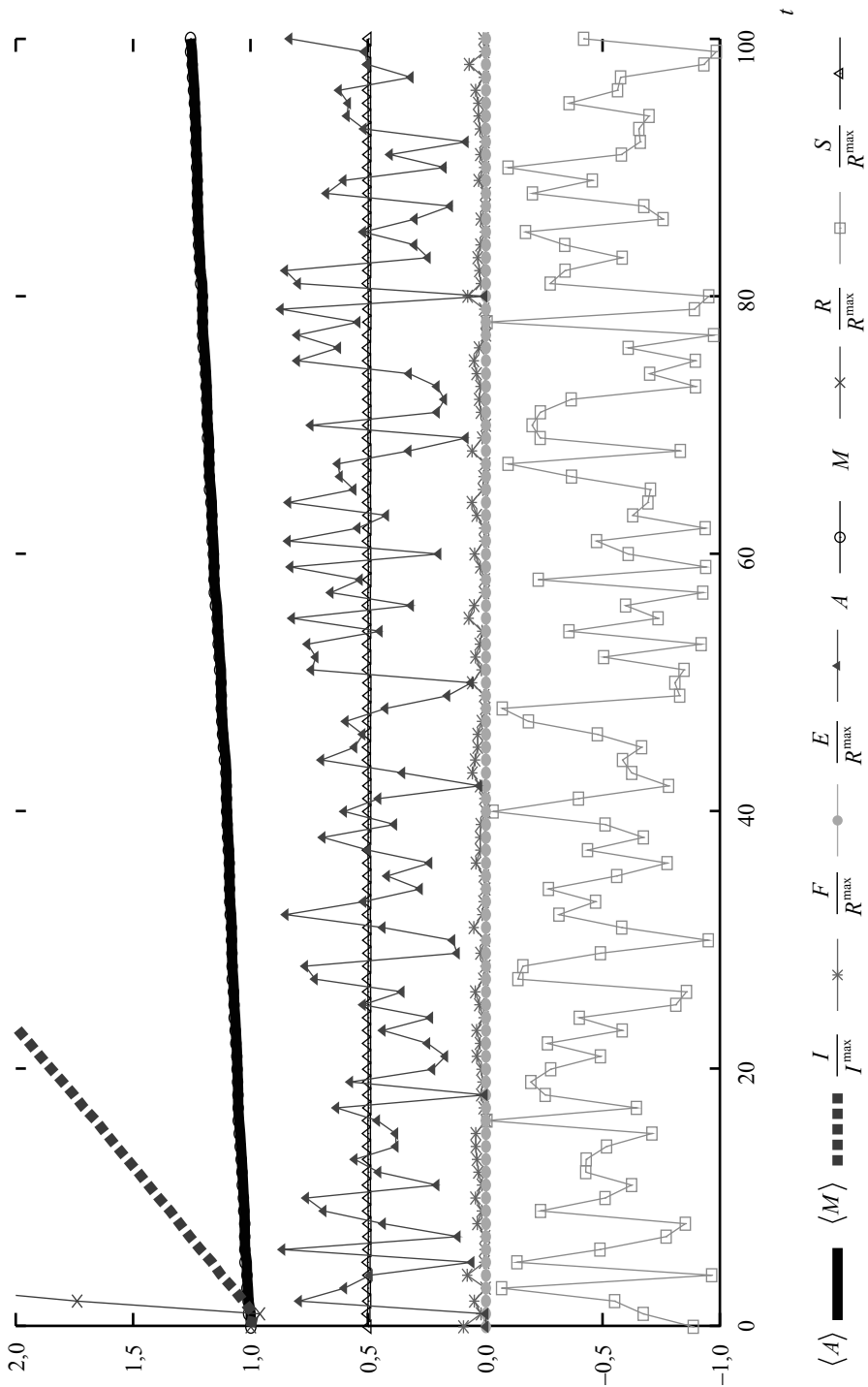
2.2. Prawdopodobieństwo imitacji równe jeden

Drugim skrajnym przypadkiem jest przyjęcie parametru ζ na poziomie 1. Oznacza to, że w pierwszym okresie wszyscy agenci prowadzą działalność badawczą, ale gdy jeden z nich dokonuje wynalazku, wszyscy pozostali agenci imitują ten wynalazek, a więc nie prowadzą własnej działalności badawczej. Oznacza to, że agent-innowator z pierwszego okresu staje się innowatorem również w kolejnym okresie, a także we wszystkich następnych okresach, gdyż żaden agent, poza innowatorem z pierwszego okresu, nie podejmuje działalności badawczo-rozwojowej, lecz imituje każdy wynalazek agenta-innowatora. Mamy więc dwa typy agentów: pojedynczy agent-innowator oraz postali agenci-imitatorzy.

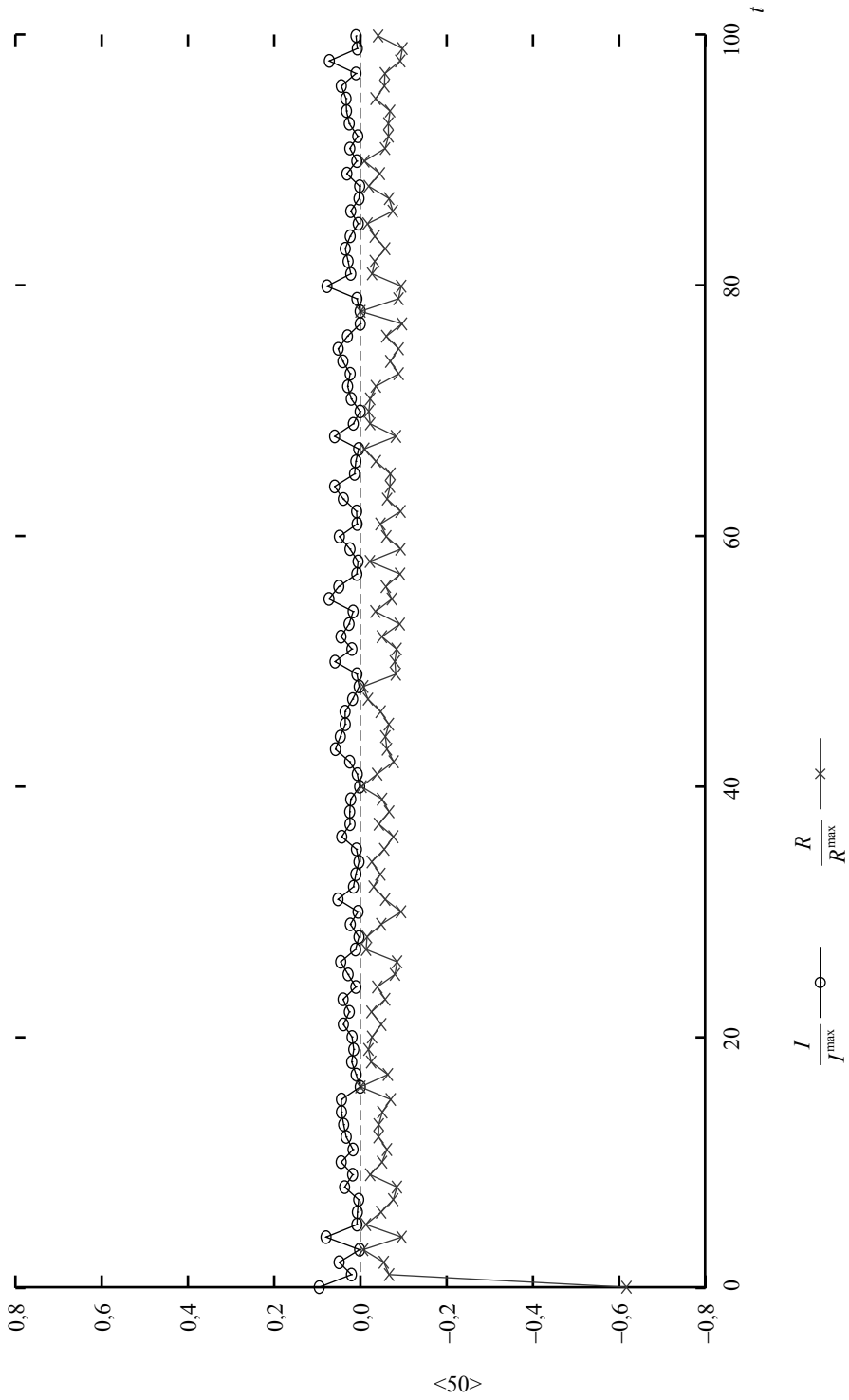
Dynamika zmiennych związanych z agentem-innowatorem przedstawiona jest na rysunku 5. Wydatki badawczo-rozwojowe tego agenta kształtują się na podobnym poziomie do poziomu w przypadku $\zeta = 0$. Różnica pomiędzy przypadkiem $\zeta = 0$ oraz $\zeta = 1$ polega na tym, że w drugim przypadku wynalazki dokonywane są cały czas przez tego samego agenta oraz ich wielkość jest średnio znacznie mniejsza, niż gdy $\zeta = 0$ – nie występują bowiem efekty zewnętrzne związane z działalnością badawczo-rozwojową innych agentów. Ilustruje to dodatkowo rysunek 6.

Rysunek 7 przedstawia średni poziom technologii w układzie oraz poziomy technologii poszczególnych agentów. Ze względu na 100% prawdopodobieństwo imitacji, poziom technologii wszystkich agentów-imitatorów jest równy poziomowi technologii agenta-innowatora z poprzedniego okresu. Średni poziom technologii jest więc w każdym okresie w przybliżeniu równy poziomowi technologii agentów-imitatorów.

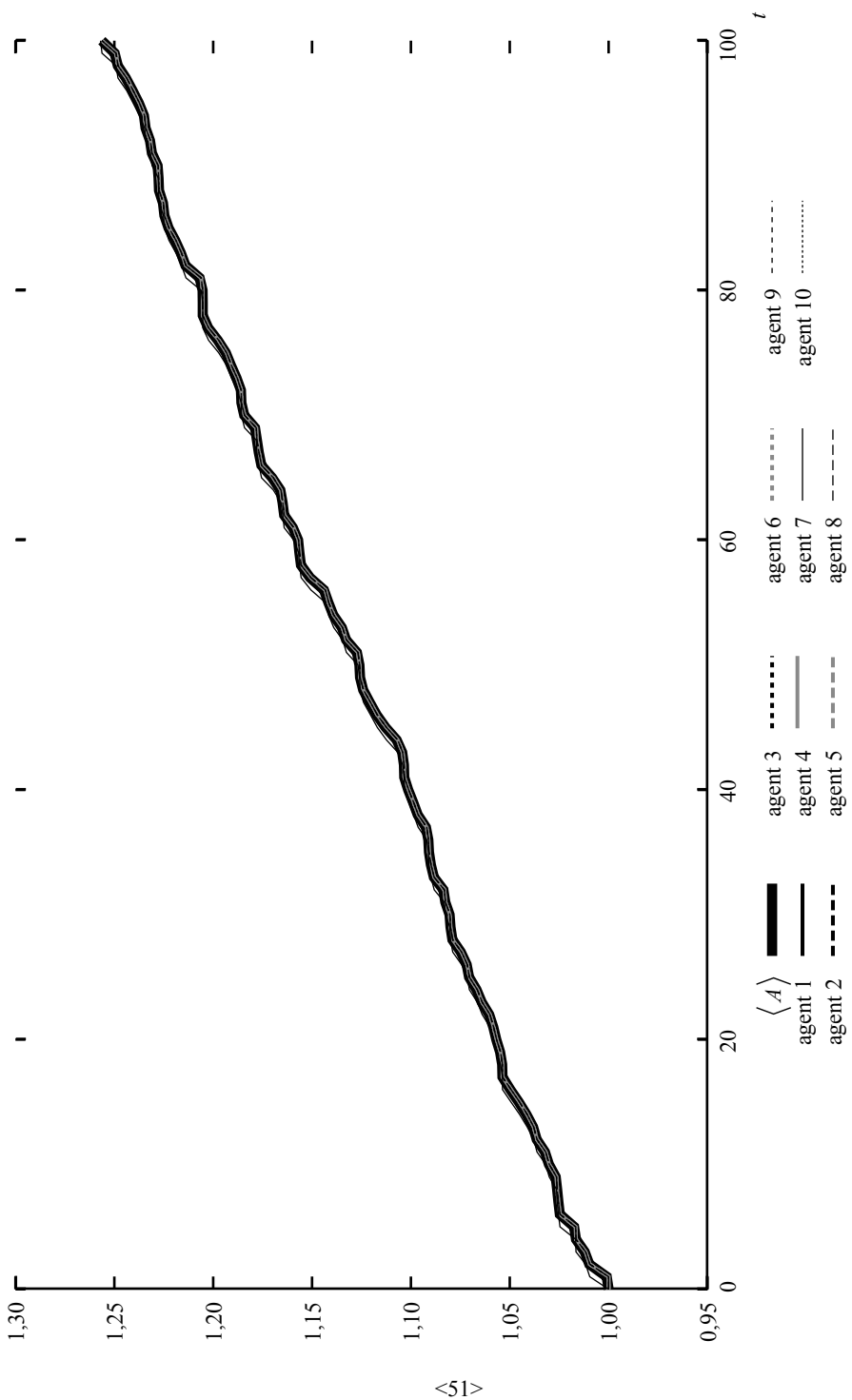
Na rysunku 8 jest przedstawiony zasób środków pieniężnych agentów w poszczególnych okresach, wraz z poziomem średnim. Górna linia oznacza zasób pieniężny agenta-innowatora, środkowa poziom średni, a dolna zasoby agentów-imitatorów. Innowator wydaje środki pieniężne na inwestycje badawczo-rozwojowe, a otrzymuje subsydia badawcze oraz opłaty patentowe od pozostałych agentów. Ze względu na ten fakt jego zasób środków pieniężnych cały czas rośnie, podczas gdy ilość pieniędzy w posiadaniu pozostałych agentów spada systematycznie, gdyż subsydia badawcze nie są w stanie pokryć w całości wydatków na opłaty patentowe. Wynika z tego, że sytuacja, w której tylko jeden agent prowadzi działalność badawczo-rozwojową, nie jest w długim okresie możliwa – po skończonej liczbie okresów pozostali agenci zbankrutują.



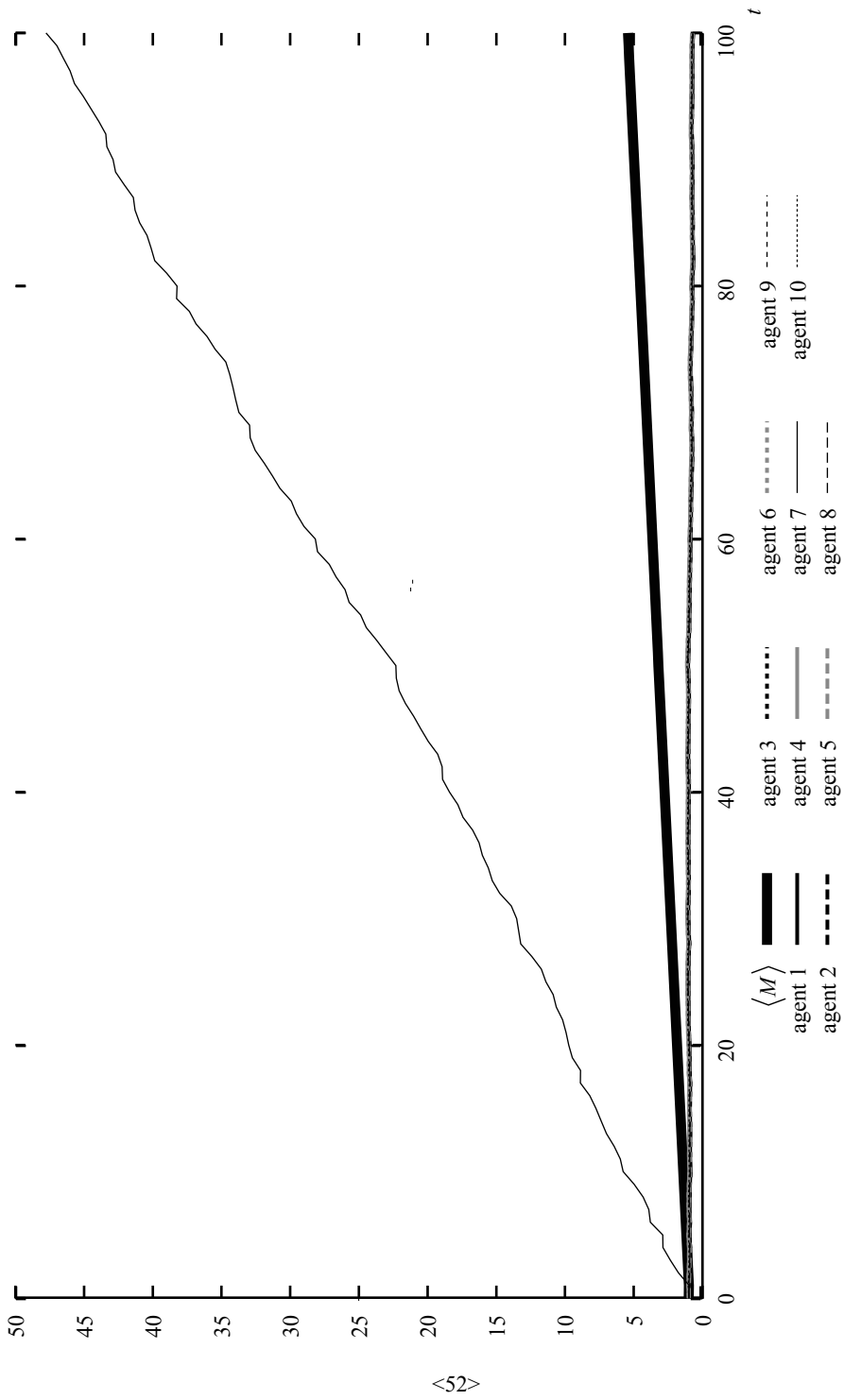
Rys. 5. Dynamika zmiennych związanych z agentem 7. Parametr $\zeta = 1$



Rys. 6. Dynamika wielkości innowacji oraz średnich wydatków badawczo-rozwojowych. Parametr $\zeta = 1$



Rys. 7. Dynamika technologii. Parametr $\zeta = 1$



Rys. 8. Dynamika ilości pieniędzy. Parametr $\zeta = 1$

Z punktu widzenia wzrostu średniego poziomu technologii, przypadki $\zeta = 0$ oraz $\zeta = 1$ są bardzo zbliżone (poziom technologii po 100 okresach jest niemal taki sam w obu przypadkach). Wynika to z tego, że w przypadku bez imitacji średni wzrost poziomu technologii z okresu na okres jest równy 5% maksymalnego wzrostu, tj. średnia wielkość wynalazku jest równa 50%, ale ze względu na brak imitacji przez pozostałych agentów wzrost technologii dotyczy tylko jednego agenta (10% całkowitej liczby agentów). Jeżeli prawdopodobieństwo imitacji wynosi 100%, to średnia wielkość wynalazku spada do 5% (ze względu na brak efektów zewnętrznych działalności innowacyjnej agentów), ale każdy wynalazek podnosi poziom technologii wszystkich agentów.

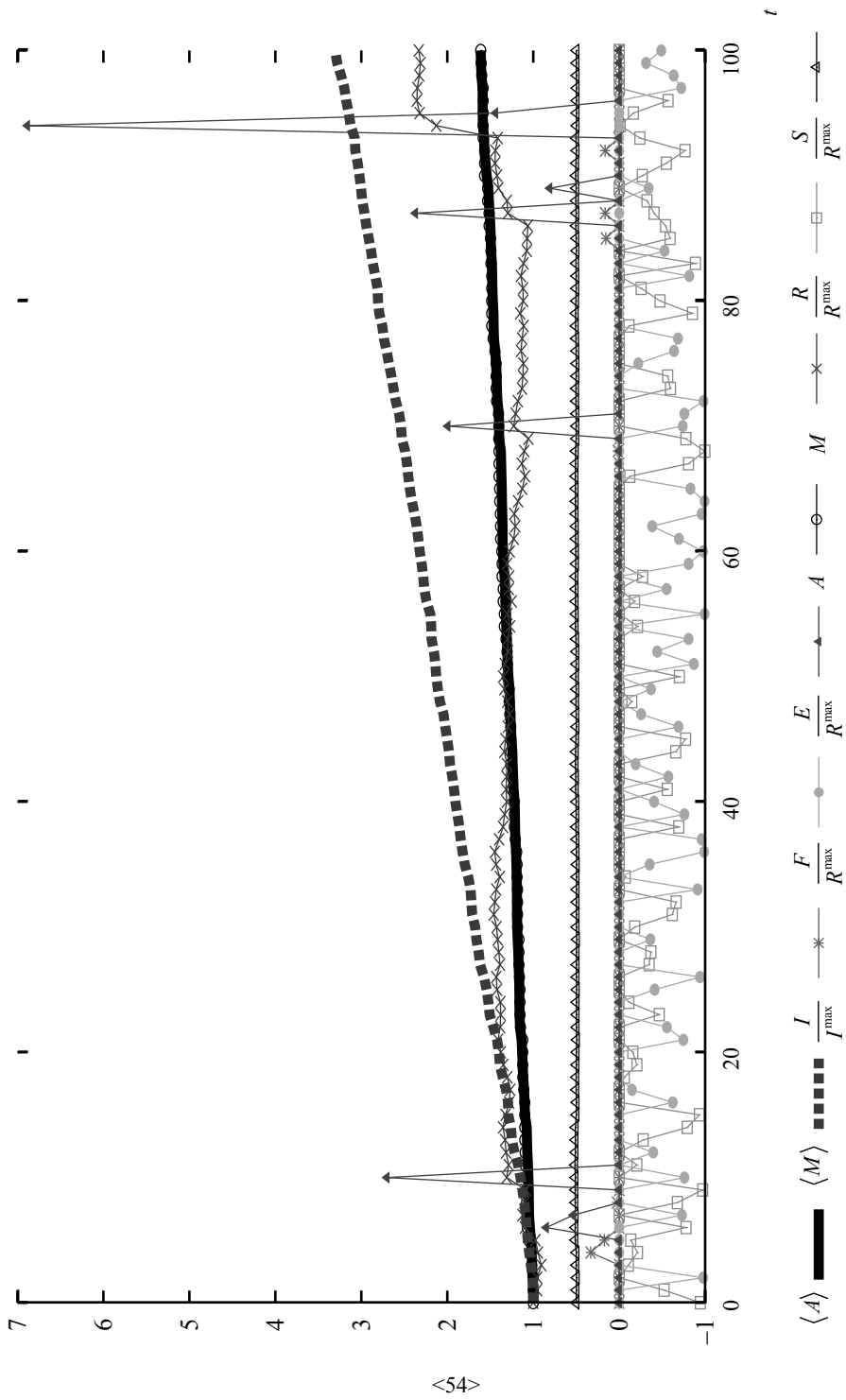
W następnym podpunkcie pokażemy jednak, że w układzie tym jest możliwe osiągnięcie wyższego tempa wzrostu technologii, jeżeli zostanie znaleziona odpowiednia równowaga pomiędzy działalnością innowacyjną oraz imitacyjną. Aby to pokazać, rozważymy przypadek leżący idealnie pomiędzy badanymi przypadkami skrajnymi, czyli $\zeta = 0,5$.

2.3. Prawdopodobieństwo imitacji równe 50%

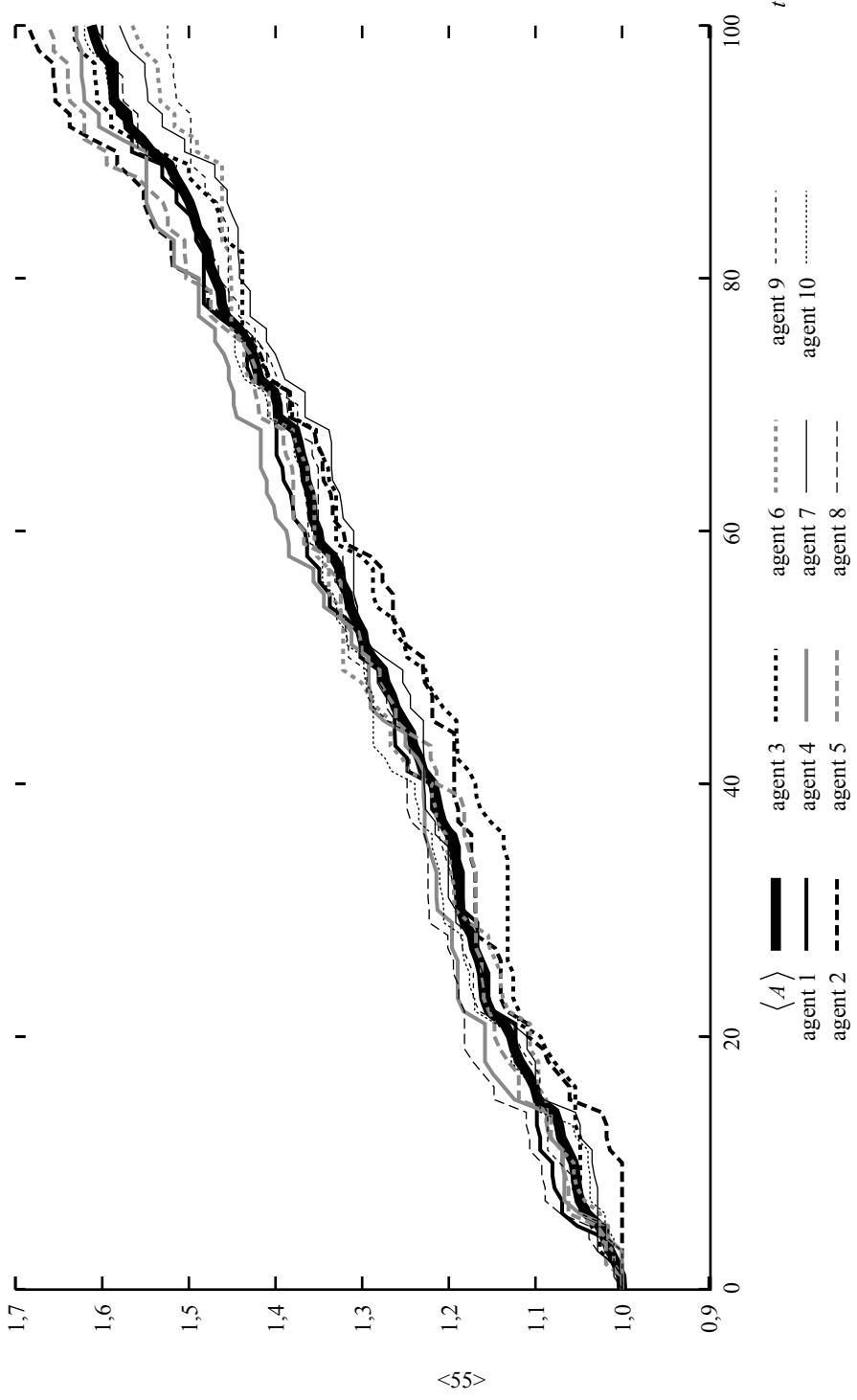
Dynamikę zmiennych odpowiadających pojedynczemu agentowi przedstawiono na rysunku 9. W rozważanym przypadku otrzymujemy najbardziej złożone zachowanie – analizowany agent dokonuje wynalazków i bezpośrednio po ich dokonaniu otrzymuje od innych agentów (lecz nie wszystkich) opłaty patentowe. Sam również imituje wynalazki innych agentów (w połowie przypadków, gdy sam nie dokonuje wynalazku).

Rysunek 10 pokazuje wzrost poziomu technologii poszczególnych agentów, a także wzrost średniego poziomu technologii. W analizowanym przypadku obserwujemy oba typy dynamiki poziomu technologii, które omówiliśmy w przypadkach skrajnych wartości parametru ζ . Występują okresy stagnacji technologii, gdy dany agent prowadzi działalność badawczo-rozwojową (nie imituje wynalazków innych agentów), lecz nie prowadzi ona do wynalazków, a także okresy jej szybkiego wzrostu, gdy agent dokonuje własnych wynalazków lub decyduje się na imitację technologii innych agentów. Z tego względu różnice pomiędzy poszczególnymi agentami nie są tak duże jak w przypadku $\zeta = 0$, gdy ich zachowanie jest zupełnie nieskorelowane. Ponieważ jednak imitacji wynalazków innych agentów dokonuje się z prawdopodobieństwem mniejszym od 100%, wciąż występują różnice w dynamice poszczególnych zmiennych dla różnych agentów, w przeciwieństwie do przypadku $\zeta = 1$, gdy wszyscy agenci-imitatorzy zachowywali się tak samo.

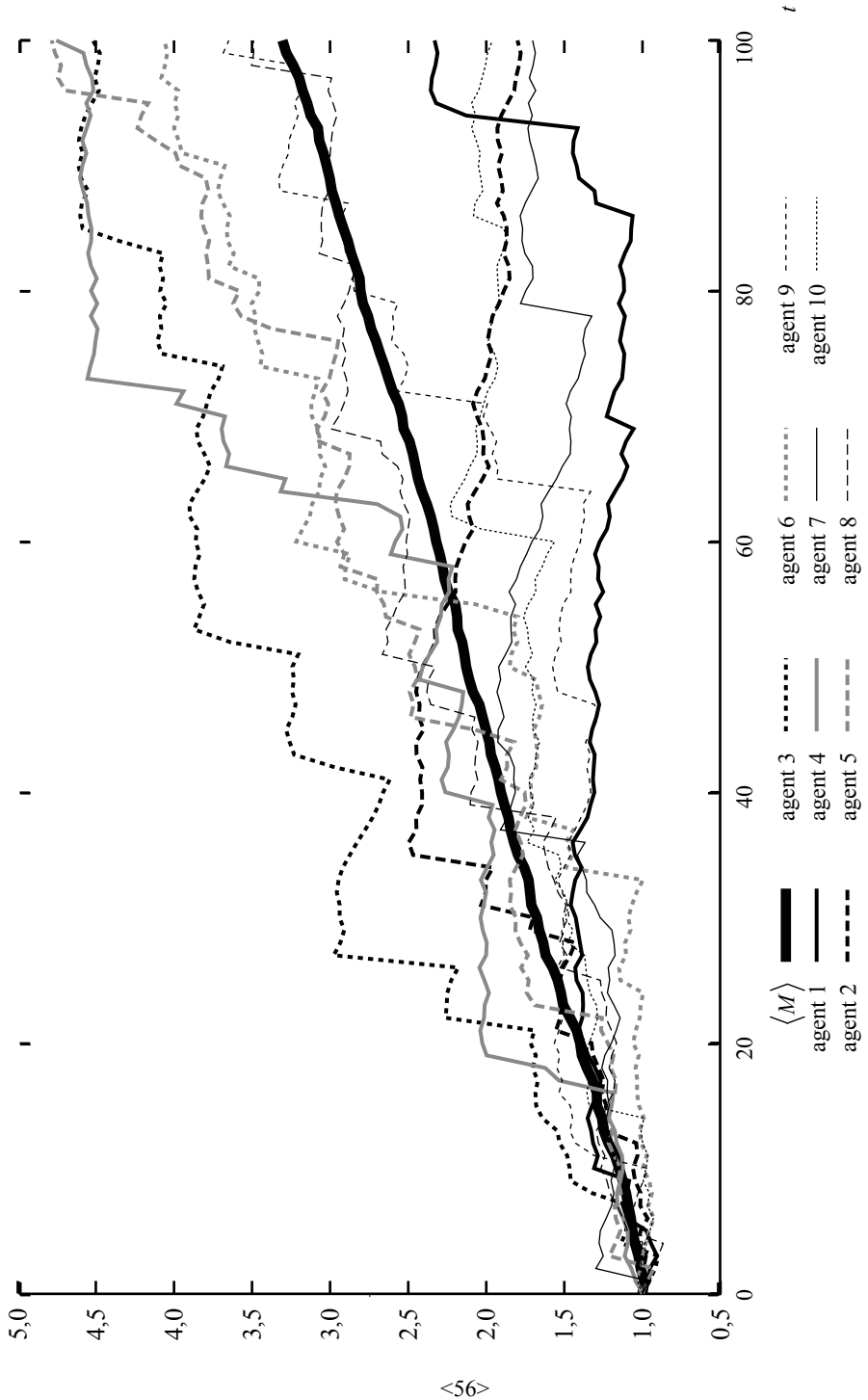
Z punktu widzenia ilości środków pieniężnych (rys. 11) obserwujemy podobne zachowanie jak w przypadku $\zeta = 0$, lecz występują również okresy wyraźnego wzrostu zasobów środków pieniężnych, związane z otrzymywanymi opłatami patentowymi. Konsekwencją tego jest fakt, że każdy agent ma po 100 okresach



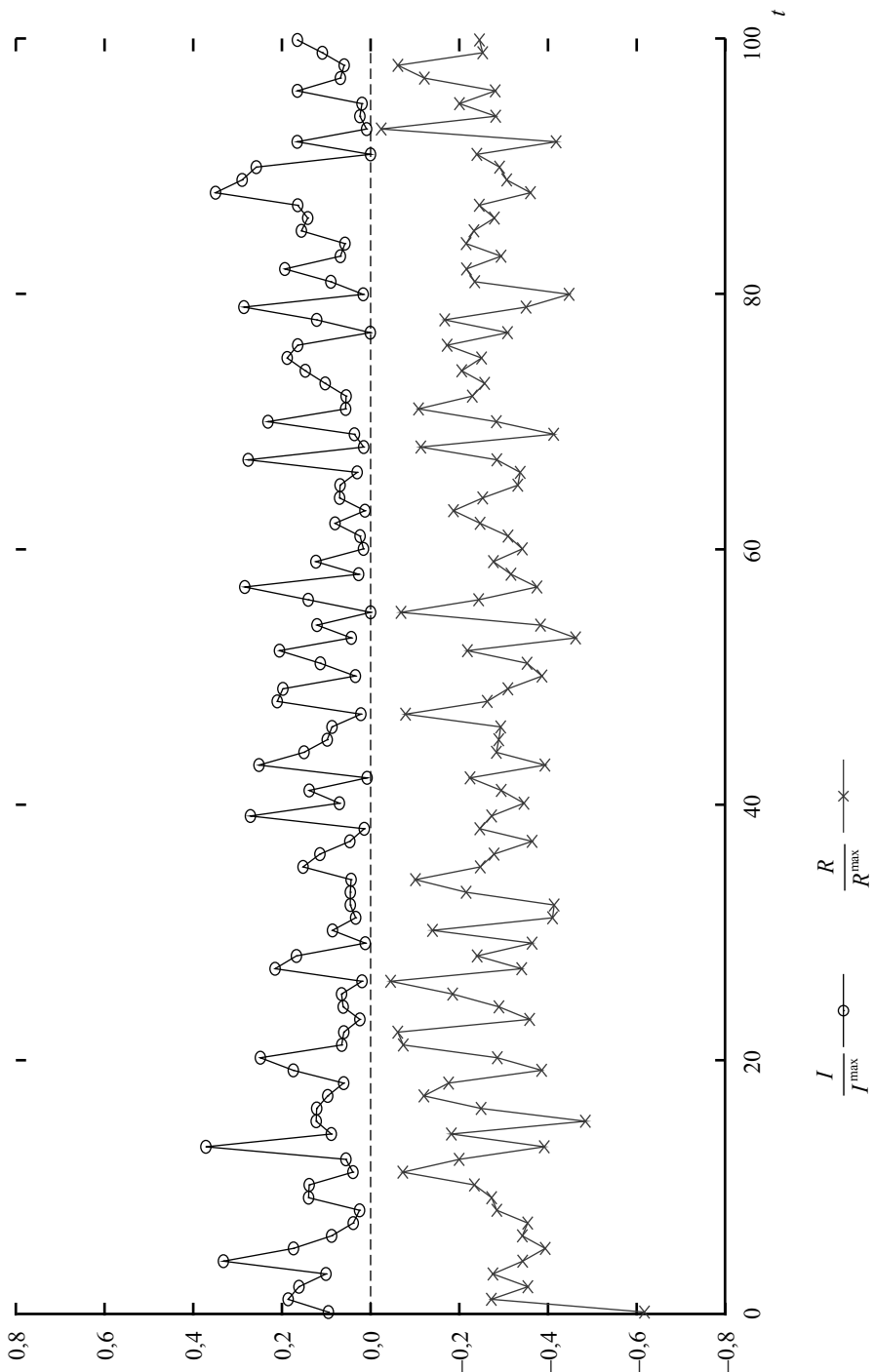
Rys. 9. Dynamika zmiennych związanych z agentem 1. Parametr $\zeta = 0,5$



Rys. 10. Dynamika technologii. Parametr $\zeta = 0,5$



Rys. 11. Dynamika ilości pieniędzy. Parametr $\zeta = 0,5$



Rys. 12. Dynamika wielkości innowacji oraz średnich wydatków badawczo-rozwojowych. Parametr $\zeta = 0,5$

więcej środków pieniężnych niż na początku badanego okresu. Takiego zachowania nie obserwujemy w przypadkach skrajnych – w przypadku $\zeta = 0$ agenci nie otrzymują wpływów za opłaty patentowe i niekorzystne oddziaływanie czynników losowych, może to prowadzić do zmniejszenia ich zasobów pieniężnych. W przypadku $\zeta = 1$ tylko jeden agent (innowator) zwiększa swój zasób środków pieniężnych, a pozostali, którzy tylko imitują jego technologię, nie otrzymują żadnych wpływów z opłat patentowych, a przez to systematycznie zmniejszają swój zasób pieniężny.

Rysunek 12 przedstawia dynamikę innowacji oraz średnich inwestycji badawczo-rozwojowych. Jeżeli $\zeta = 0,5$, to występują efekty zewnętrzne działalności innych agentów, ale są one dwukrotnie mniejsze niż w przypadku $\zeta = 0$. Ze względu na to wielkość innowacji jest około dwukrotnie mniejsza niż przy zerowym prawdopodobieństwie imitacji, korzysta z nich jednak zawsze w przybliżeniu połowa agentów.

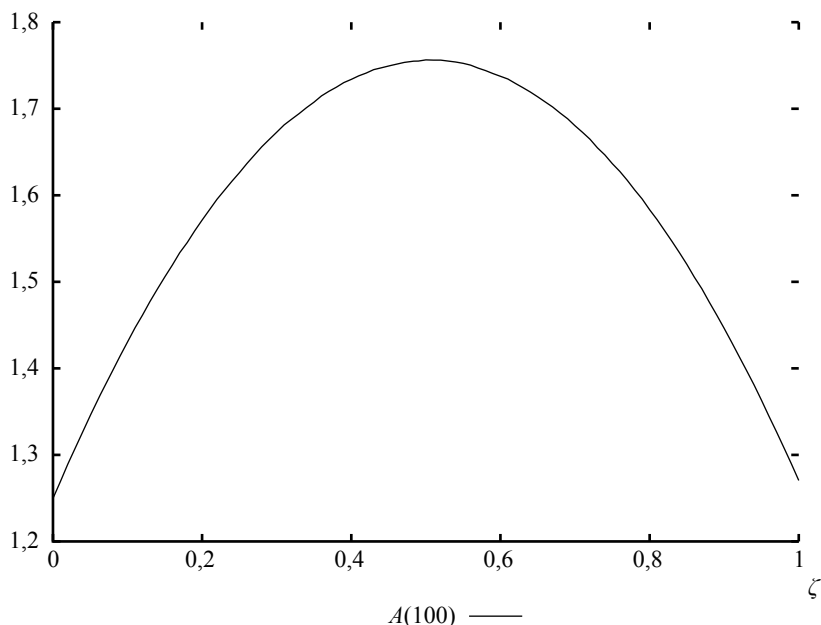
Oznacza to, że po 100 okresach poziom technologii jest zdecydowanie wyższy niż w przypadkach skrajnych. Działalność imitacyjna prowadzi do tego, że nie wszystkie wynalazki muszą być wymyślane przez każdego agenta oddzielnie, ale jednocześnie istotną rolę odgrywa działalność innowacyjna, a w szczególności jej efekty zewnętrzne, które powodują, że wielkość wynalazków jest około pięciokrotnie wyższa niż dla $\zeta = 1$.

Pokazaliśmy, że z punktu widzenia całego układu, wartość $\zeta = 0,5$ prowadzi do wyższego tempa wzrostu poziomu technologii niż przypadki skrajne $\zeta = 0$ lub $\zeta = 1$. Chcemy teraz odpowiedzieć na pytanie, jaka wartość ζ prowadzi do maksymalnego tempa wzrostu, czyli jaka powinna być proporcja pomiędzy działalnością innowacyjną i imitacyjną agentów, aby technologia rosła jak najszybciej.

2.4. Optymalna wartość prawdopodobieństwa imitacji

Aby odpowiedzieć na pytanie o optymalną wartość parametru ζ ze względu na tempo wzrostu poziomu technologii, zostały przeprowadzone symulacje dla 101 różnych wartości tego parametru od 0,00 do 1,00 co 0,01. Aby wyeliminować wpływ fluktuacji statystycznych i wyznaczyć średnią wartość poziomu technologii, każdą symulację powtórzono 10 000 razy.

Wyniki są przedstawione na rysunku 13. Optymalną wartością parametru ζ z punktu widzenia rozważanego kryterium jest 0,5. Przy 50% prawdopodobieństwie imitacji wynalazków jest osiągane maksymalne tempo wzrostu poziomu technologii. Odstępstwa od tej wartości prowadzą do spadku tempa wzrostu. Zmniejszanie wartości parametru ζ powoduje, że rośnie średnia wielkość wynalazku (efekt zewnętrzny bardziej intensywnej działalności badawczo-rozwojowej), ale jednocześnie nie jest w pełni wykorzystywany potencjał wynalazków innych agentów. Przy zwiększaniu prawdopodobieństwa imitacji ponad poziom 50% potencjał ten jest wykorzystywany w większym stopniu, ale maleje efek-



Rysunek 13. Poziom technologii po 100 okresach w zależności od prawdopodobieństwa imitacji ζ

tywność własnej działalności badawczo-rozwojowej, gdyż zmniejsza się efekt wewnętrzny tej działalności.

Z punktu widzenia pojedynczego agenta najkorzystniej więc losowo podejmować decyzję o imitacji, na przykład imitować co drugi wynalazek innych agentów. Zapewnia to najwyższą wartość oczekiwaną wzrostu technologii, a przez to jest też optymalne z finansowego punktu widzenia, gdyż zwiększa wartość oczekiwaną otrzymywanych subsydiów badawczych.

Warto przypomnieć, że założyliśmy, iż agenci nie znają wielkości innowacji przed podjęciem decyzji o imitacji. Uchylenie tego założenia mogłoby w naturalny sposób podwyższyć tempo wzrostu technologii – imitowane byłyby wówczas tylko wynalazki lepsze od przeciętnych. Zasadnicze wnioski z modelu nie zmieniłyby się jednak – mówilibyśmy jedynie nie o prawdopodobieństwie imitacji, lecz o progowej wartości wynalazku, która zapewnia zrównoważenie wpływu efektów imitacji oraz innowacji.

Niemniej jednak optymalna wartość parametru ζ na poziomie 0,5 potwierdza intuicyjne oczekiwania co do istoty procesów innowacyjnych w przedsiębiorstwach. Niewątpliwie mało realistyczne byłoby, gdyby każda firma musiała dokonywać każdego wynalazku samodzielnie i nie mogła korzystać z wynalazków innych firm. Naturalne jest występowanie przepływów technologii pomiędzy

firmami. Z drugiej strony, gdyby każda firma chciała wyłącznie imitować wynalazki innych, wówczas nie byłoby żadnych wynalazków, które można imitować. Wartość $\zeta = 0,5$ można więc uważać za swego rodzaju „złoty środek” pomiędzy skłonnością przedsiębiorstw do tworzenia własnych wynalazków i do imitowania wynalazków innych.

Podsumowanie

W niniejszej pracy zbadaliśmy własności symulacyjnego modelu postępu technicznego. Postęp techniczny w modelu wynika z działalności badawczo-rozwojowej agentów oraz z imitacji wynalazków innych agentów (dyfuzji technologii). Równowaga pomiędzy tymi dwoma typami działalności zapewnia maksymalne możliwe do osiągnięcia tempo wzrostu poziomu technologii. Wynika to z wzajemnych współzależności pomiędzy następującymi efektami. Jeżeli działalność imitacyjna jest na zbyt niskim poziomie, to tempo wzrostu spada, gdyż nie jest wykorzystywany w pełni potencjał wynalazków poszczególnych agentów – w pewnym sensie te same wynalazki są dokonywane niezależnie przez wielu agentów. Jeżeli jednak intensywność imitacji jest zbyt wysoka, to spada wielkość wynalazków, gdyż zależy ona od działalności nie tylko tego agenta, który dokonuje wynalazku, ale także od działalności pozostałych agentów (efekt zewnętrzny działalności badawczo-rozwojowej). Pokazaliśmy, że aby tempo postępu technicznego było maksymalne, imitowany powinien być dokładnie co drugi wynalazek. Taka sytuacja jest również pożądana z punktu widzenia pojedynczych agentów, którzy zapewniają sobie w ten sposób możliwie wysoką wartość subsydiów badawczych i zmniejszają prawdopodobieństwo strat finansowych.

Przedstawiony w tej pracy model należy jednak traktować jako wstępną propozycję modelu symulacyjnego z dwoma typami działalności zmierzającej do podnoszenia poziomu technologii. Nietrywialną cechą modelu jest uzyskanie równowagi pomiędzy tymi dwoma typami działalności – modyfikując model w nieznacznym stopniu, uzyskuje się bowiem sytuację, w której optymalna z punktu widzenia technologii jest jedna ze skrajnych strategii – albo całkowita niezależność agentów (brak imitacji, tj. dyfuzji technologii), albo „pasożytność” na wynalazkach jednego tylko agenta.

Wymienić warto jednak kilka kierunków rozwoju tego typu modeli symulacyjnych. Przede wszystkim należy rozważyć bardziej inteligentne reguły zachowania agentów, w szczególności uwzględnić jawne kryteria optymalizacyjne, na przykład maksymalizacji zysku z działalności badawczej. Ciekawe byłoby też zbadanie bardziej złożonego mechanizmu dokonywania wynalazków, na przykład uzależnienie prawdopodobieństwa dokonania wynalazku od aktualnego poziomu technologii oraz od doświadczenia agenta w tego typu działalności. Formułując

model, założyliśmy, że rozkład wielkości wynalazku oraz wydatków badawczych jest jednostajny. Naturalne byłoby zbadanie innych typów rozkładów statystycznych, w szczególności rozkładu normalnego. Wszystkie te kierunki rozwoju są stosunkowo łatwe do zbadania w ramach podejścia symulacyjnego i będą przedmiotem dalszej analizy w kolejnych pracach.

Bibliografia

- Ausloos, A., Clippe, P., Pękalski, A., 2004, *Model of macroeconomic evolution in stable regionally dependent economic fields*, Physica A 337, 269–287; arXiv.org:cond-mat/0402075.
- Chakrabarti, B., Chakraborti, A., Chatterjee, A. (red.), 2006, *Econophysics and Sociophysics*, Wiley-VCH Verlag.
- Cichy, K., 2008, *Kapitał ludzki i postęp techniczny jako determinanty wzrostu gospodarczego*, Instytut Wiedzy i Innowacji, Warszawa.
- Cichy, K., 2009, *Human capital and technological progress as the determinants of economic growth*, Working Paper No. 60, National Bank of Poland (NBP), Warszawa.
- Cockshott, W., Cottrell, A., Michaelson, G., Wright, I., Yakovenko, V., 2009, *Classical Econophysics*, Routledge Advances in Experimental and Computable Economics.
- Delli Gatti, D., Di Guilmi, C., Gaffeo, E., Giulioni, G., Gallegati, M., Palestrini, A., 2005, *A new approach to business fluctuations: heterogenous interacting agents, scaling laws and financial fragility*, Journal of Economic Behavior and Organization 56, s. 489–512, arXiv.org: cond-mat/0312096.
- Gallegati, M., Kirman, A., Marsili, M. (red.), 2004, *The Complex Dynamics of Economic Interaction*, Springer.
- Landau, D., Binder, K., 2000, *A Guide to Monte Carlo Simulations in Statistical Physics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Llas, M., Gleiser, P., Lopez, J., Diaz-Guilera, A., 2003, *Nonequilibrium phase transition in a model for the propagation of innovations among economic agents*, Physical Review E 68, 66101; arXiv.org:cond-mat/0309544.
- Mantegna, R., Stanley, H., 2001, *Ekonofizyka. Wprowadzenie*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Ramsey, F., 1928, *A mathematical theory of saving*, Journal of Political Economy 38, s. 543–559.
- Solow, R., 1956, *A contribution to the theory of economic growth*, Quarterly Journal of Economics 70, s. 65–94.
- Swan, T., 1956, *Economic growth and capital accumulation*, Economic Record 32, s. 334–361.
- Tesfatsion, L., Judd, K. (red.), 2006, *Handbook of computational economics*. vol. 2: *Agent-based computational economics*, Handbooks in Economics 13, North-Holland.

SIMULATION MODEL OF TECHNOLOGICAL PROGRESS WITH TECHNOLOGY DIFFUSION

Summary: We present the formulation and properties of a simulation model of technological progress with technology diffusion. Technological progress results from agents' own research and development activity and from imitation of other agents' innovations (technology diffusion). The dynamics of the model is governed by one parameter called imitation probability. We analyze two extreme and one intermediate value of this parameter and we show that imitation probability of 50% renders the highest rate of technological progress.