

Dr hab. inż. Franciszek Grabowski

Dr Dorota Dejniał

Instytut Inżynierii Technicznej

PWSZ w Jarosławiu

Ekonomia w kontekście systemów złożonych

WPROWADZENIE

Ogólna teoria systemów, której prekursorem był Bertalanffy [Von Bertalanffy, 1959, s. 134–164], dostarcza doskonałych podstaw do przeprowadzania różnego rodzaju dyskusji i porównań, także w dziedzinie ekonomii. Ze względu na obszerność oraz wielką uniwersalność wpisujących się w tę tematykę zagadnień, w artykule przedstawiono zjawisko samoorganizacji systemu, które jest podstawową cechą systemów złożonych. W teorii ekonomii znajduje ona swoje odzwierciedlenie w metaforze „niewidzialnej ręki” rynku. Oznacza indywidualne dopasowanie realizowanych w systemie zadań (mikroskala) do ograniczonych zasobów systemu (makroskala). Procesy te korespondują z termodynamiką nierównowagową, wrażliwością na warunki początkowe oraz mechanizmami występującymi w sieciach złożonych takimi jak perkolacja, preferencyjne dołączanie, skala dowolna, małe światy i inne. Innymi słowy – można wnosić, że samolubność u Smitha oznacza współcześnie samooptymalizację jakości usług (QoS).

Wszystko to, co rozpościera się w nas i wokół nas można postrzegać, jako systemy naturalne i sztuczne. Spośród systemów naturalnych szczególnie miejsce zajmują ludzie i zwierzęta, które mają charakter złożony, gdyż są wyposażone w inteligencję i posiadają zdolność samoorganizacji optymalizującej ich zachowanie. Systemy sztuczne, wytwarzane przez człowieka takich cech nie posiadają. Co prawda niektóre urządzenia, nazywane na wyrost inteligentnymi, mają wbudowane proste systemy samoregulacji, jednakże póki co stanowi to tylko namiastkę systemów naturalnych. Nawet najdoskonalszy samochód wyposażony w wyszukane systemy wspomaganie nie jest w stanie sam wrócić do domu, a to dla kota jest prozaiczną czynnością. Dlatego z tym większą determinacją człowiek usiłuje zrozumieć istotę systemów naturalnych, by zaadaptować ją w systemach sztucznych. Poczesne miejsce w tym względzie zajmuje sztuczna inteligencja. Jednakże w sztucznym, adaptacyjnym systemie złożonym należy wskazać na dwa integralne podsystemy: strukturę wykonawczą wpisującą się w formułę sieci złożonych i sztuczną inteligencję. Zwornikiem tych dwóch podsystemów jest termodynamika nieekstensywna. Wydaje się, że w porównaniu z osiągnięciami sztucznej inteligencji i termodynamiki nieekstensywnej znajomość zachowań struktury wyko-

nawczej systemów złożonych jest w powijakach. Jest to o tyle istotne, że struktura wykonawcza stanowi zgrab inteligentnych systemów złożonych i bez jej znajomości nie sposób zrozumieć i budować całości w tym inteligentnych systemów agentowych. Nie sposób zarządzać czymś inteligentnie nie wiedząc, czym zarządzamy. Dlatego głównym celem naszych badań jest zrozumienie istoty systemu złożonego, którego samoorganizacja może pójść w złym lub dobrym kierunku [Ashby, 1947, s. 37, 125–128; Ashby, 1962, s. 255–278]. Wszystkim nam chodzi o to, by prowadzić system w kierunku nie tylko dobrej, ale zarazem optymalnej samoorganizacji.

W tym kontekście kluczowym pojęciem jest metafora „niewidzialnej ręki”, której do opisu procesów samoorganizacji systemów użył po raz pierwszy Adam Smith dowodząc, że mechanizm samolubnych (*self-love*) zachowań człowieka (skala mikro) prowadzi do samoorganizacji systemu (skala makro) [Ashby, 1947, s. 37, 125–128; Ashby, 1962, s. 255–278]. Pomimo, że w swoich dziełach Smith użył tego terminu tylko dwa razy, raz w *Theory of Moral Sentiments* [Bak, 1996], drugi raz w *Wealth of Nations* [Zabieglik, 2003] to idea tej metafory przenika wszystkie jego teorie społeczne i moralne. Godne podkreślenia jest to, że, pomimo iż teoria Smitha wyrosła w epoce postnewtonowskiej zdominowanej przez makroskopowy paradygmat redukcjonizmu, czyli systemów prostych to nosi ona prekursorskie, holistyczne znamiona systemów złożonych (*man of system*), które zaczęły fascynować świat nauki dwieście lat później [Albert, Barabási, 2002, s. 47–95; Bourguine, Johnson, 2006, s. 1–71; Braha i in., 2006; Goldin i in., 2006; Milgram, 1967, s. 60–67; Watts, Strogatz, 1998, s. 393, 440–442; Watts, 1999]. Smith zasygnalizował istotne kwestie, specyficzne dla powstałej w połowie XX wieku cybernetyki. Przede wszystkim wskazał, że samoorganizacja zachowań pojedynczych ludzi, czyli indywidualne dopasowanie się do ograniczonych możliwości zewnętrznych systemu prowadzi do samooptrymalizacji globalnej. Patrząc z tego punktu widzenia był również prekursorem termodynamiki nierównowagowej [Tsallis, 1999, s. 1–35, 52].

Dopiero nieomalże dwa wieki później, pionier cybernetyki Ashby, jako pierwszy wskazał na dwa fundamentalne znaczenia pojęcia samoorganizacji systemów [Ashby, 1947, s. 125–128]. Pierwsze, odniósł do kontekstu systemów prostych i procesów emergencji prowadzących do systemów złożonych. M.in. pisze on: *the system that starts with its parts separate (so that the behavior of each is independent of the others' states) and whose parts then act so that they change towards forming connections of some type. Such a system is “self-organizing” in the sense, that it changes from parts separated to part joined* [Ashby, 1962, s. 255–278]. Druga kwestia dotyczy pojęć dobrej i złej samoorganizacji: *changing from a bad organization to good one* [Ashby, 1962, s. 255–278]. *The system would be “self-organizing”, if a change were automatically made to the feedback, changing it from positive to negative; the whole would have changed from a bad organization to a good. Clearly, this type of “self-organization” is of peculiar to us. If we wish it to be a “good” one, we must first provide a criterion for distinguishing between the bad and the good, and then we must ensure, that the appropriate selection is made* [Ashby, 1962, s. 255–278].

Pomiędzy przysłowiowymi przyczółkami postawionymi przez Smitha i Ashbye'go lokują się wielkie odkrycia XIX i XX wieku, które doprowadziły naukę do paradygmatu systemów złożonych [Braha i in., 2006; Goldin i in., 2006; Milgram, 1967, s. 60–67; Von Bertalanffy, 1950, s. 134–164]. Z kolei od połowy 20. wieku, czyli odkryć Ashbye'go do czasów nam współczesnych dokonano olbrzymiego postępu naukowego i technologicznego, który doprowadził do paradygmatu autonomicznych systemów agentowych [Dressler, 2008, s. 3018–3029; Mamei i in., 2006, s. 443–460; Myers, 2003, s. 046116; Newman, 2002, s. 40–45; Roy, 2007, s. 201–217; Vidales i in., 2005, s. 2288–2304], które stanowią sobą swoistego rodzaju aktualną, stosowaną w praktyce, egzemplifikację niewidzialnej ręki w zarządzaniu różnego rodzaju systemami począwszy od e-gospodarki i e-handlu, poprzez logistykę transportu i zarządzanie sieciami teleinformatycznymi, aż do e-opieki zdrowotnej [Jennings, 2001, s. 35–41; Mattila i in., 2007, s. 105–134; Satyanarayanan, 2001, s. 10–17; Saha, Mukherjee, 2003, s. 25–31]. Złożone systemy naturalne takie jak człowiek, zwierzę i roślina z racji tego, że same stanowią sobą inteligentne systemy złożone posiadają immanentną zdolność dopasowania się do określonego środowiska. Natomiast systemy sztuczne, wytworzone przez człowieka, jeżeli mają posiadać zdolność do samoadaptacji muszą mieć wbudowane algorytmy samoorganizujące. Problemem jednak jest, że do tychczas człowiek nie rozumie w pełni systemów złożonych. Pierwsze kroki w zakresie systemów autonomicznych zostały podjęte dopiero kilka lat temu przez IBM, dla których pierwowzorem jest autonomiczny system nerwowy człowieka [Bantz i in., 2003, s. 165–176; Kephart, Chess, 2003, s. 41–50].

Jednakże ani Smith, co jest zrozumiałe ze względu na kontekst czasowo-merytoryczny, ani nauka systemów złożonych nie wyjaśniły jak dotąd w sposób ilościowy, czym są mechanizmy niewidzialnej ręki, czyli procesy samoorganizacji systemów. W prezentowanej pracy podejmujemy próbę zrozumienia i opisu od strony jakościowej i ilościowej, czym jest system złożony i samoorganizacja. Wydaje się, że pojęcie samolubstwa koresponduje ze współczesnym pojęciem jakości usług, która ma charakter dynamiczny i jest związana bezpośrednio z wydajnością oraz czasem obsługi zadań w systemie.

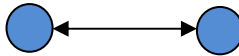
Analiza podjęta w prezentowanej pracy bazuje na tych podstawowych pojęciach i podnosi następujące kwestie: Po pierwsze, w części 2 pokazujemy ewolucję systemów, a tym samym pojęcie rynku, od czasów Newtona do nam współczesnych. Po drugie, w części 3 dowodzimy, że u podstaw samoorganizacji leży sprzężenie zwrotne o złożonym charakterze.

RYNEK A SYSTEM

Przystępując do analizy samoorganizacji rynku w pierwszej kolejności należy się zastanowić, co rozumiemy pod pojęciem rynek, który z kolei jest utoż-

samią z systemem. Na przestrzeni wieków pojęcie systemu ewoluowało, a wraz z nim pojęcie rynku. Zatem, prześledźmy ten proces.

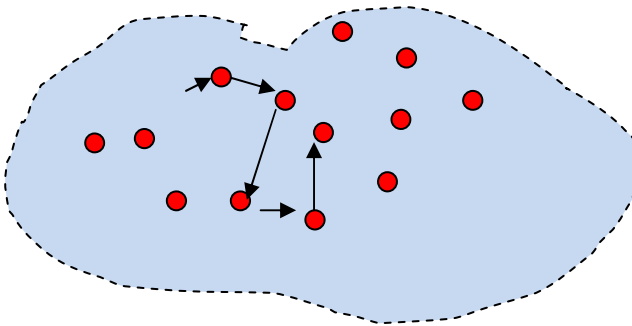
Kartezjusz, Galileusz i Newton (1686) rozpatrywali system, jako strukturę zawierającą co najwyżej dwa punkty materialne o dowolnej masie. Ze współczesnego punktu widzenia jest to przypadek, gdy $(\hbar, 1/c, G) \rightarrow (0, 0, 0)$, gdzie \hbar jest stałą Plancka, c jest prędkością światła w próżni, zaś G jest masą obiektu (rys. 1).



Rysunek 1. System według Newtona

Źródło: opracowanie własne.

Po odkryciu przez Browna (1838) zjawiska błędzenia losowego ($H = 1/2$), gdzie H jest wykładnikiem Hursta, wprowadzeniu pojęcia entropii przez Clausiusa (1865) oraz zaproponowaniu przez Einsteina (1905) modelu matematycznego ruchu Browna [Einstein, 1956, s. 371–381] zaczął przebijać się do świadomości paradygmat jednorodności przestrzenno-czasowej systemów rozproszonych wielo-elementowych (rys. 2).



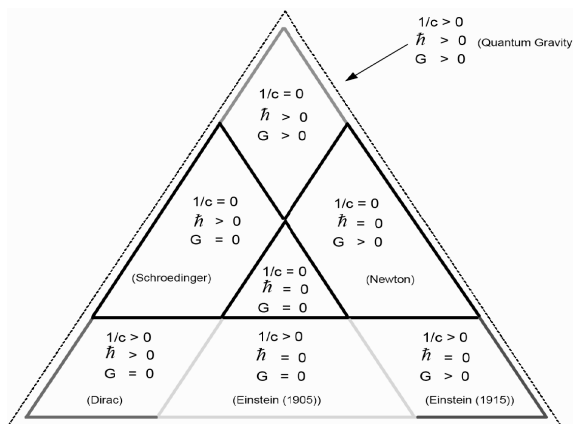
Rysunek 2. System o jednorodności przestrzenno-czasowej

Źródło: opracowanie własne.

Zwieńczeniem tych rozważań było wprowadzenie pojęcia równowagi termodynamicznej systemu posiadające następujące cechy [Gumiński, 1986]:

- w systemie mogą występować tylko stany dozwolone,
- w stanie równowagi termodynamicznej wszystkie dozwolone stany w systemie są równoprawdopodobne,
- liczba stanów w systemie jest skończona,
- entropia ma charakter ekstensywny,
- interakcje pomiędzy stanami w systemie mają charakter krótkoterminowy.

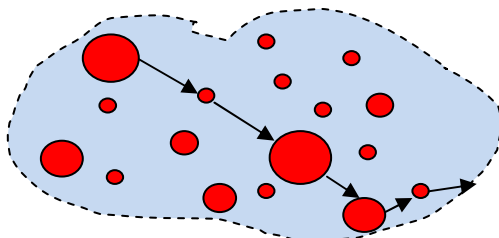
Pomimo upływu czasu paradygmat równowagi termodynamicznej ciągle obowiązuje w nauce i technologii. Tymczasem, już Heraklit zauważył, że równowaga to śmierć. W miarę upływu czasu kontestowano te założenia i zaczęto odchodzić od paradygmatu jednorodności przestrzenno-czasowej, gdyż mechanika kwantowa zakłada, że ($G \rightarrow 0$), teoria względności ($v \rightarrow c$), zaś ogólna teoria względności ($G \rightarrow \infty$) – (rys. 3).



Rysunek 3. System Newtona i jego modyfikacje [Bourgine, Johnson, 2006, s. 1–71]

Źródło: Tsallis, 1999, s. 1–35.

W tym względzie, istotny wkład wniósł L. von Bertalanffy [Von Bertalanffy, 1950, s. 134–164] proponując uogólnioną teorię systemów (1950) oraz Hurst (1951), który uogólnił pojęcie ruchów Browna ($0 \leq H \leq 1$) oraz wprowadził pojęcie procesów o charakterze długoterminowym [Hurst, 1951, s. 770–799]. Mandelbrot określił te procesy mianem ułamkowego ruchu Browna (1968) zaś na cześć Hursta wprowadził pojęcie wykładnika H [Mandelbrot, Van Ness, 1968, s. 422–437]. Odkrycia te doprowadziły do paradygmatu systemów rozproszonych o niejednorodności przestrzenno-czasowej (rys. 4).

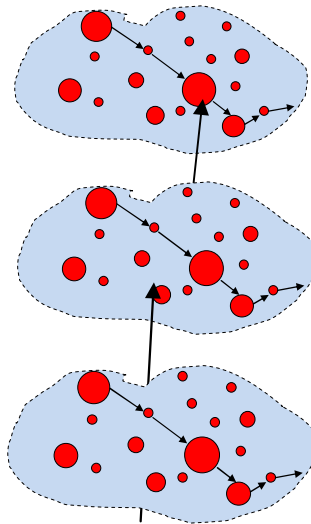


Rysunek 4. System o niejednorodności przestrzenno-czasowej

Źródło: opracowanie własne.

Paradygmat ten został wsparty w znakomity sposób przez Tsallisa [Tsallis, 1988, s. 479; Tsallis, 1999, s. 1–35; Tsallis, 2004, s. 3–34], który rozwinął termodynamikę i statystykę nieekstensywną (1988), Watta (1999) z teorią małych światów oraz pojęcia takie jak skala dowolna i preferencyjne dołączanie [Watts, Strogatz, 1998, 440–442; Watts, 1999]. W tym kontekście wyrósł paradygmat systemów złożonych, zaś systemy równowagowe stały się szczególnym przypadkiem termodynamiki nierównowagowej, a rozkład normalny szczególnym przypadkiem statystyki.

Kolejny, znaczący krok w zrozumieniu systemów złożonych podsuwa autonomiczny system nerwowy [Bochenek, Reicher, 2006] i samopodobieństwo systemów [Mandelbrot, 1982]. Zatem rodzi się następny paradygmat autonomicznych adaptacyjnych systemów złożonych, czyli samopodobny system systemów o strukturze fraktalnej (rys. 5). Tylko w takiej formule mogą odnajdywać się autonomiczne systemy agentowe [Deguchi, 2004; Fiege i in., 2001, s. 63–74; Saha, Mukherjee, 2003, s. 25–31], które stały się codziennością w szeroko pojętej ekonomii (gospodarka, transport, logistyka, e-opieka zdrowotna, etc.) i stanowią współczesną, niewidzialną, a zarazem subtelną komputerową rękę rynku, która czuwa nad utrzymaniem przepływów laminarnych nie dopuszczając do przepływów turbulentnych.



Rysunek 5. System o cechach fraktalnych

Źródło: opracowanie własne.

Jednakże adaptacyjne systemy złożone stawiają obecnie obowiązujący paradygmat projektowania systemów „na głowie”, a w zasadzie „na nogach”. Dlaczego? Otóż powszechnie obowiązujące procedury projektowania systemów wpisują się w redukcjonistyczną formułę „dziel i rządź” i podejście od „góry do dołu”. Kolejne kroki z tym związane to [Braha i in., 2006]:

- specyfikacja funkcjonalna,
- projektowanie,
- testowanie i walidacja,
- produkcja.

Takie podejście traktujące system jako przysłowiową „czarną skrzynkę” i sterowanie z poziomu parametrów zewnętrznych nieuchronnie prowadzi do przesterowania, cykliczności i kryzysów. Tymczasem paradygmat systemów złożonych cechuje się podejściem holistycznym uwzględniającym oprócz ograniczonych możliwości zewnętrznych niejednorodność przestrzenno-czasową struktury wewnętrznej. Wpisuje się to w formułę „od dołu do góry”, przyjmując fundamentalne założenie wrażliwości na warunki początkowe, czyli „lokalne akcje, globalne konsekwencje”, „przewidywanie nieprzewidywalnego”, „wrodzoną niepowtarzalność indywidualnych systemów” oraz „elastyczność poprzez strukturę” itp. [Braha i in., 2006].

WYDAJNOŚĆ SYSTEMU ZŁOŻONEGO A SAMOORGANIZACJA

Mechanizmy samoorganizacji, czy też niewidzialnej ręki mogą mieć miejsce jedynie w systemach o ograniczonych zasobach, czyli o ograniczonej wydajności. W systemie o jednorodnej strukturze przestrzenno-czasowej i nieograniczonych zasobach pojęcia samoorganizacji i dopasowania są puste. Taki model systemu opisuje równanie zaproponowane (1798) przez Malthusa [Malthus, 1986] określające wydajność systemu, X_M :

$$(1) \quad X_M = \frac{dN}{dt} = rN$$

gdzie r jest parametrem wzrostu zaś N liczbą zadań w systemie. Charakterystykę określoną (1) pokazano na rys. 6. Równanie (1) wskazuje, że w konsekwencji nieograniczonych zasobów system prosty jest niewrażliwy na przeciążenia i warunki początkowe. Na bazie (1) można określić również polaryzację pętli sprzężenia zwrotnego [Richardson, 1984, s. 67–88]:

$$(2) \quad \text{sign}\left(\frac{dX_M}{dN}\right) = \text{sign}\left(\frac{d(rN)}{dN}\right) = \text{sign}(r)$$

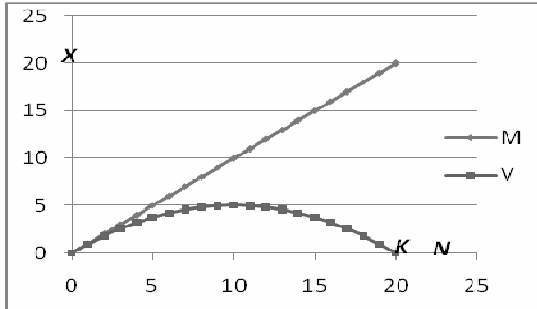
Równanie (2) wskazuje, że konsekwencją nieograniczonych zasobów immanentną cechą równania Malthusa jest występowanie prostego, dodatniego sprzężenia zwrotnego.

Z drugiej strony można zauważyć, że równanie Malthusa jest integralnym członem równania logistycznego zaproponowanego przez Verhulsta (1838). Równanie

logistyczne nakłada na równanie Malthusa warunek ograniczonych zasobów, czyli uwarunkowań zewnętrznych. W takim przypadku, wydajność systemu w funkcji liczby zadań, X_V , jest określona (rys. 6), jako [Verhulst, 1838, s. 113–121]:

$$X_V = \frac{dN}{dt} = rN \left(1 - \frac{N}{K} \right) = X_M \left(1 - \frac{N}{K} \right) \quad (3)$$

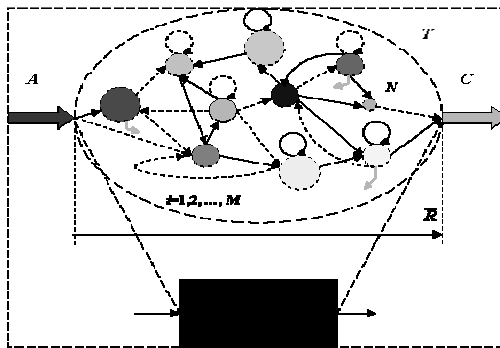
gdzie K określa ograniczone zasoby systemu.



Rysunek 6. Wydajność systemu według Malthusa (M) i Verhulsta (V)

Źródło: opracowanie własne.

Oznacza to, że wydajność systemu zależy wyłącznie od ograniczeń zewnętrznych i nie jest wrażliwa na indywidualne zachowania każdego z zadań w systemie. Zatem każde zadanie w systemie zachowuje się w identyczny sposób. Wynika to z założenia, że w skali mikro struktura przestrzenno-czasowa systemu jest jednorodna, zaś w skali makro system reprezentuje sobą czarną skrzynkę, (rys. 7).



Rysunek 7. Jednorodność struktury wewnętrznej system prostego (czarna skrzynka) i niejednorodność systemu złożonego

Źródło: opracowanie własne.

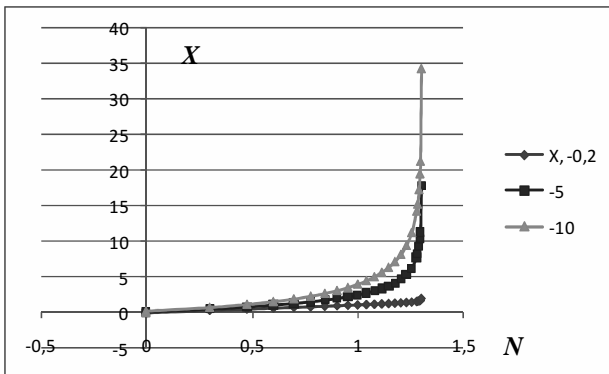
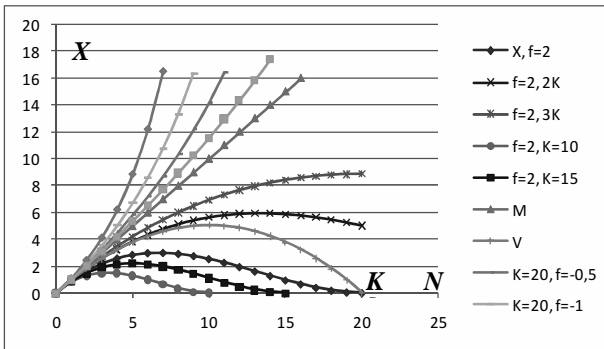
Przechodząc od analizy systemu w skali makroskopowej do opisu w skali mikroskopowej, można zauważyć, że w ogólnym przypadku proces obsługi jakiegokolwiek zadania w systemie może być opisany w następujący sposób. Otóż, weźmy pod uwagę system, który może zawierać dowolną (zmieniającą się w czasie) liczbę elementów, i , z przedziału $0 \leq i < \infty$. Podczas realizacji jakiegokolwiek zadania w systemie, do dowolnego i -tego elementu systemu zadanie może odwoływać się (składać wizytę), V_i , dowolną liczbę razy $0 \leq V_i < \infty$. Ponadto czas obsługi, S_i , jakiegokolwiek procesu przez i -ty element systemu może przyjmować dowolną wartość $0 < S_i < \infty$ (rys. 7). Tymczasem w przypadku równania Malthusa i Verhulsta zakładamy, że $i = \text{const}$, $S_i = \text{const}$, $V_i = \text{const}$.

Przywołana heterogeniczność systemu oznacza zarówno dynamicznie zmieniającą się strukturę przestrzenną, jak i dowolną skalę czasową interakcji pomiędzy elementami systemu. Z drugiej strony ze względu na przyjętą jednorodność przestrzenno-czasową równanie logistyczne określa jedynie jedną ścieżkę pomiędzy punktem $N = 0$ a $N = K$. Tymczasem w ogólnym przypadku zadania w systemie mogą kroczyć nieskończenie wieloma ścieżkami samoorganizacji. W związku z tym w systemie złożonym można wskazać trzy charakterystyczne rodzaje przepływów: laminarny, turbulentny odwracalny (zgodnie z Ashby'e'm – dobry) oraz turbulentny nieodwracalny (katastroficzny lub zły). Równanie Malthusa odnosi się do przepływu laminarnego, zaś równanie logistyczne opisuje jedynie jeden, szczególnie przypadek przepływu turbulentnego odwracalnego. Przypadek ten koresponduje z paradygmatem klasycznej algorytmiki, która zakłada, że wsad (zadanie) ma charakter drobnoziarnisty (struktura nieskorelowana) [Goldin i in., 2006]. Tymczasem badania pokazują, że w rzeczywistości wsad ma skalę dowolną, tzn. posiada strukturę od drobno- poprzez średnio- aż do gruboziarnistej, zaś zasoby są ograniczone w skali lokalnej, podobnie jak w skali globalnej. Prowadzi to do samo-organizacji realizowanych procesów, które nie podążają deterministycznymi ścieżkami narzuconymi przez projektanta systemu, czyli optymistyczną lub pesymistyczną, lecz kroczą nieprzewidywalnymi samoorganizującymi się ścieżkami o charakterze perkolacyjnym [Grabowski, 2006, s. 156–165].

W związku z tym wydaje się, że model systemu złożonego będzie kompletny, jeżeli założymy, że struktura przestrzenno-czasowa systemu posiada dowolną strukturę przestrzenną i skalę czasową o charakterze dynamicznym. Dlatego też w naszym modelu proponujemy ogólną, rozszerzoną formułę równania logistycznego, która oprócz uwarunkowań zewnętrznych (globalnych) uwzględnia również indywidualne, wewnętrzne uwarunkowania realizacji poszczególnych zadań. Proponowane równanie jest uogólnieniem równania logistycznego i uwzględnia całą rodzinę charakterystyk wydajności systemu, X , w funkcji liczby zadań, N (rys. 8):

$$(4) \quad X = rN \left(1 - \frac{N}{K^s}\right)^f = \frac{N \left(1 - \frac{N}{K^s}\right)^f}{R} = X_M (1 - u)^f = X_M G$$

Parametr f opisuje poszczególne trajektorie $X(N)$, które są związane z wrażliwością wewnętrzną systemu. Może on przyjmować wartości z przedziału, $-\infty < f < +\infty$, i określa podatność systemu na dynamiczną deformację przestrzenno-czasową struktury w stosunku do idealnego przypadku opisanego równaniem Malthusa. Z kolei s jest parametrem skalowania (zmniejszania lub zwiększania) ograniczonych zasobów systemu, $0 \leq s < +\infty$, $u = N/K^s$ jest współczynnikiem wykorzystania zasobów systemu, gdzie $0 \leq u \leq 1$, zaś $G = (1-u)^f$ jest współczynnikiem deformacji. Równanie (4) wskazuje, że wydajność systemu złożonego jest iloczynem wydajności systemu prostego, X_M , oraz G . Współczynnik deformacji moduluje strukturę jednorodną systemu prostego wpisując się w formułę mechanizmów specyficznych dla sieci złożonych typu skala dowolna, prawo potęgowe, preferencyjne dołączania, perkolacja i inne.



Rysunek 8. Rodzina charakterystyk uogólnionego równania logistycznego. U dołu pokazano (w powiększonej skali) charakterystyki lokujące się powyżej równania Malthusa

Źródło: opracowanie własne.

Równanie (4) pokazuje, że dla $f = 0$ koresponduje z (1), tymczasem dla $f = 1$ prowadzi do (2). Z drugiej strony równanie Malthusa może być postrzegane, jako swoistego rodzaju linia demarkacyjna, która dzieli charakterystykę wydajności systemu w funkcji liczby zadań (rys. 8), na dwa charakterystyczne obszary (powyżej i poniżej linii) i związane z nimi rodzaje samoorganizacji systemu.

Samoorganizacja system jest funkcją sprzężenia zwrotnego. W naszym przypadku można wskazać na związek pomiędzy współczynnikiem sprzężenia zwrotnego β a parametrami występującymi w równaniu (4), f oraz u [Grabowski]. Wiadomo, że wydajność systemu ze sprzężeniem zwrotnym w dziedzinie amplitudy jest określone jako:

$$(5) \quad X = \frac{X_M}{1 \pm \beta X_M}$$

Porównując (4) i (5) otrzymujemy:

$$(6) \quad \frac{1}{1 \pm \beta X_M} = (1 - u)^{\pm f}$$

Wtedy na bazie (6) współczynnik sprzężenia zwrotnego jest dany zależnością:

$$(7) \quad \beta = \pm \frac{1 - (1 - u)^{\pm f}}{(1 - u)^{\pm f} X_M}$$

Właściwości dynamiczne systemu zależą od uwarunkowań zewnętrznych i wewnętrznych. W związku z tym sprzężenie zwrotne nieuchronnie prowadzi do dynamiki systemu, którą na podstawie (4), możemy określić, jako:

$$(8) \quad \frac{dX}{dN} = r \left[\left(1 - \frac{N}{K^s} \right)^f - \frac{fN}{K^s} \left(1 - \frac{N}{K^s} \right)^{f-1} \right] = r \left[(1 - u)^f \left(1 - \frac{fu}{(1 - u)} \right) \right]$$

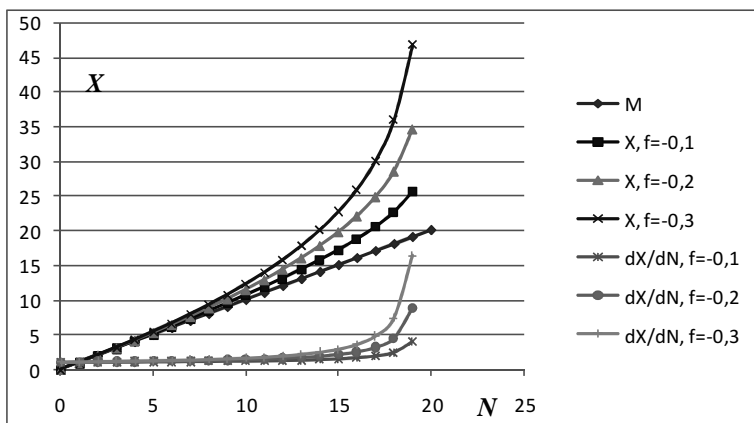
Biorąc pod uwagę (8), właściwości dynamiczne każdego z dwóch wskazanych obszarów pracy systemu (rys. 8), mogą być opisane w sposób następujący.

Pierwszy obszar (rys. 8), dla którego $-\infty < f < 0$ i $0 \leq N \leq K^s$, usytuowany powyżej charakterystyki Malthusa, jest zdominowany przez dodatnie sprzężenie zwrotne. W tym przypadku mamy do czynienia z systemem złożonym, którego dynamika jest określona jako:

$$(9) \quad r < \frac{dX}{dN} < +\infty \quad \text{dla } -\infty < f < 0 \quad \text{i} \quad 0 \leq N \leq K^s$$

Oznacza to, że wraz ze wzrostem obciążenia słabe sprzężenie zwrotne związane z równaniem Malthusa staje się coraz bardziej silne, nierównowaga termodynamiczna wzrasta, wskutek czego katastroficzna, nieodwracalna samoorganizacja (ISO) pogłębia się (rys. 9).

Gdy $dX/dN \rightarrow +\infty$ system rozbiega się i nieuchronnie zmierza ku upadkowi, czyli nieodwracalnej degradacji. Samoorganizacja krytyczna jest formą samoorganizacji, kiedy szybkość zmian struktury wewnętrznej jest tak duża, że system nie jest w stanie dostosować się do nich i przetrwać [Bak, 1988, s. 364–374; Bak i in., 1987, s. 381–384]. Przykładami takich krytycznych przejść od systemu prostego do niekontrolowanego systemu złożonego, poprzez zjawiska małych światów, skali dowolnej, perkolacji i preferencyjnego dołączania są hazardy naturalne typu pożary, osuwiska, lawiny, trzęsienia ziemi, przebicia elektryczne materiałów, zerwania połączeń mechanicznych, przejść, katastrofy budowlane, rewolucje, kryzysy ekonomiczne [Saha, Mukherjee, 2003, s. 25–31; Goldin i in., 2006; Guerin, Kunkle, 2004, s. 131–145; Scheinkmeim, Woodford, 1994, s. 417–421, Sornette, 2002, s. 2522–2529; Steinfeels, 2006] i innego rodzaju katastrofy.



Rysunek 9. Wydajność i dynamika systemów złożonych w przypadku samoorganizacji krytycznej

Źródło: opracowanie własne.

Biorąc pod uwagę (4) możemy określić statyczny, R_c , i dynamiczny, R_d , czas odpowiedzi (obsługi zadania) systemu złożonego dla $-\infty < f < 0$ oraz $0 \leq N \leq K^s$, odpowiednio:

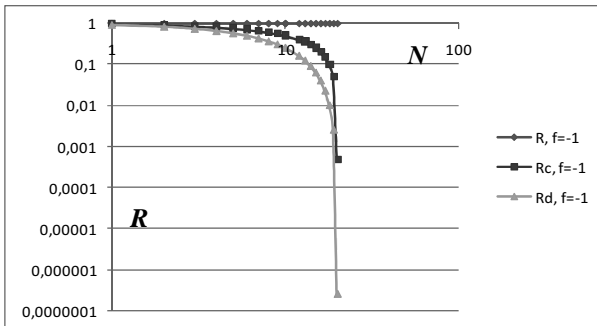
$$R_c = \frac{N}{X} = \frac{N}{rN \left(1 - \frac{N}{K^s}\right)^f} = \frac{R}{\left(1 - \frac{N}{K^s}\right)^f} = \frac{R}{(1-u)^f} \quad (10)$$

$$(11) \quad R_d = \frac{dN}{dX} = \frac{R}{(1-u)^f \left(1 - \frac{fu}{(1-u)}\right)} = \frac{R_c}{1 - \frac{fu}{(1-u)}}$$

Dynamiczny czas odpowiedzi systemu jest szczególnie ważny w przypadku samoorganizacji nieodwracalnej, gdyż kiedy liczba zadań systemu wzrasta i zmierza do $N \rightarrow K^s$, dynamika procesu nasila się, zaś R_d gwałtownie maleje (rys. 10):

$$(12) \quad 0 < R_d < R \quad \text{dla } 0 \leq N \leq K^s$$

Jak widać, rys. 9, olbrzymia, sięgająca wielu rzędów dyspersja R_d , powadzi nieuchronnie do szumów $1/f$, które są ilustracją samoorganizacji systemów i w związku z tym mają w przyrodzie charakter uniwersalny [Bak, 1988, s. 364–374; Bak, 1987, s. 381–384].



Rysunek 10. Statyczny, R_c i dynamiczny, R_d , czas odpowiedzi systemu w przypadku samoorganizacji krytycznej

Źródło: opracowanie własne.

Obszar drugi (rys. 8), ulokowany poniżej linii demarkacyjnej, $0 < f < +\infty$, możemy podzielić na dwie diametralnie różne strefy, lewą i prawą, które odpowiednio można scharakteryzować w następujący sposób:

$$(13) \quad 0 < \frac{dX}{dN} < r \quad \text{dla } 0 < f < +\infty \text{ i } 0 \leq N \leq N_m$$

$$(14) \quad -\infty < \frac{dX}{dN} < 0 \quad \text{dla } 0 < f < +\infty \text{ i } N_m < N \leq K^s$$

N_m określa optymalną liczbę realizowanych zadań, przy której system osiąga maksymalną wydajność, $X = X_m$. Jak widać na podstawie (13) i (14) punkt dopa-

sowania (N_m , X_m) oddziela dwie strefy omawianego obszaru drugiego (rys. 10) i oznacza dopasowanie energetyczne, które można określić na podstawie (4) z następującego warunku:

$$\frac{dX}{dN} = r \left[\left(1 - \frac{N}{K^s} \right)^f - \frac{fN}{K^s} \left(1 - \frac{N}{K^s} \right)^{f-1} \right] = 0 \quad (15)$$

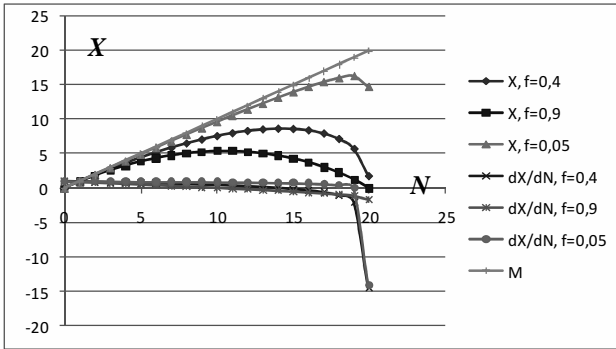
Z tegoż warunku (15) można określić współrzędne N_m oraz X_m :

$$N_m = \frac{K^s}{1+f} \quad (16)$$

$$X_m = r \frac{K^s}{1+f} \left(\frac{f}{1+f} \right)^f = r N_m \left(\frac{f}{1+f} \right)^f \quad (17)$$

Biorąc pod uwagę (16) i (17) można zauważyć, że współrzędne te zależą zarówno od f i K^s , czyli uwarunkowań wewnętrznych (lokalnych) i zewnętrznych (globalnych). Na podstawie (16) oraz (17) widać, że taksonomia wskazująca na dwa skrajne przypadki organizacji systemu – centralistyczny lub decentralistyczny – jest typowym zabiegiem (chwytem) dydaktycznym wpisującym się w dwubiegunowy opis zgodnie z paradygmatem redukcjonistycznym (systemem prostym). W rzeczywistości, jak to pokazują równania (16) i (17), dopasowanie zależy zarówno od uwarunkowań zewnętrznych i wewnętrznych, gdyż każdy rzeczywisty system jest złożony, a nie prosty. Współrzędne (N_m , X_m) wyznaczają punkt dopasowania pomiędzy optymalną liczbą realizowanych zadań i możliwościami systemu w skali lokalnej (indywidualnej specyfiki realizowanych zadań i ograniczonych możliwości poszczególnych elementów systemu) oraz ograniczonych zasobów globalnych. Jak się wydaje, opisany mechanizm dopasowania oznacza przysłowiową niewidzialną rękę, która poprzez egoizm (*self-love*) prowadzi do samoorganizacji i dopasowania w skali lokalnej i w konsekwencji optymalnej samoorganizacji w skali globalnej. Punkt dopasowania system osiąga w stanie równowagi termodynamicznej, zaś samoorganizacja systemu postępuje od dołu (lokalnie) do góry (globalnie), co jest zgodne z paradygmatem termodynamiki nieekstensywnej [Tsallis, 1999, s. 1–35; Tsallis, 2004, s. 3–34].

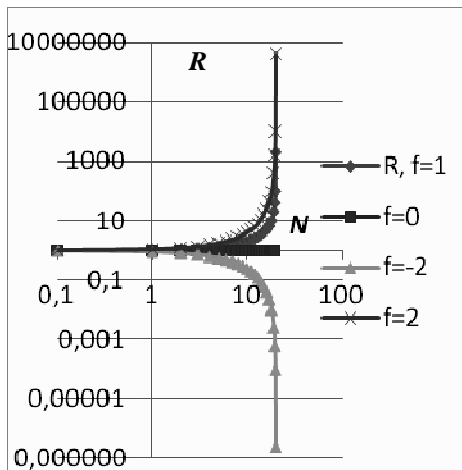
Analizując obszar drugi można zauważyć, że strefa leżąca na lewo od punktu dopasowania (13) (rys. 11), jest związana z niekrytyczną, samoorganizacją systemu złożonego. Tymczasem, strefa na prawo od punktu dopasowania (14) jest związana z degradacją odwracalną, lub odwracalną samoorganizacją systemu. Apogeum dobrej samoorganizacji system osiąga w punkcie dopasowania. W takim przypadku w systemie występują procesy o charakterze krótkoterminowym, czyli szum biały.



Rysunek 11. Samoorganizacja niekrytyczna systemu

Źródło: opracowanie własne.

Biorąc pod uwagę równanie (10) i odnosząc go do obszaru drugiego ($0 < f < +\infty$), można obliczyć $R_c(N)$ i rozszerzyć (rys. 10), o przypadek samoorganizacji niekrytycznej (rys. 11). Jak widać specyfiką samoorganizacji niekrytycznej jest wydłużanie czasu odpowiedzi systemu wraz ze wzrostem N , gdy w przypadku samoorganizacji krytycznej jest skracanie czasu odpowiedzi wraz ze wzrostem N . Na podstawie rys. 12 można ponadto zauważyć, że, podobnie jak w przypadku samoorganizacji krytycznej, bardzo duża dyspersja czasu odpowiedzi systemu, sięgająca kilku rzędów, prowadzi nieuchronnie do szumów nadmiarowych typu $1/f$. Różnice zachowań wynikają z dynamiki pętli sprzężenia zwrotnego.



Rysunek 12. Dyspersja czasu odpowiedzi systemu dla samoorganizacji krytycznej i niekrytycznej

Źródło: opracowanie własne.

Podstawowym pytaniem, na które staramy się udzielić odpowiedzi brzmi: jaki mechanizm prowadzi do samoorganizacji? Otóż, analizując równanie (4) można zauważyć, że w obszarze poniżej linii demarkacyjnej, w odróżnieniu od systemu prostego rywalizują ze sobą dwie pętle sprzężenia zwrotnego [Richardson, 1984, s. 67–88]. Pierwsza pętla wynika z pierwszego członu (4), który jest równaniem Malthusa:

$$X_1 = rN \tag{18}$$

Polaryzacja tej pętli wynika z (18):

$$\text{sign}\left(\frac{dX_1}{dN}\right) = \text{sign}(r) \tag{19}$$

Druga pętla, zdeterminowana jest przez drugi człon (4), nakłada na zachowania procesów realizowanych w systemie rygory wynikające z ograniczeń lokalnych i globalnych i ma postać:

$$X_2 = \left(1 - \frac{N}{K^s}\right)^f \tag{20}$$

Na podstawie (20) polaryzacja drugiej pętli jest określona jako:

$$\text{sign}\left(\frac{dX_2}{dN}\right) = \text{sign}\left(-\frac{f}{K^s}\left(1 - \frac{N}{K^s}\right)^{f-1}\right) \tag{21}$$

Odpowiednio równania (19) i (21) wskazują, że polaryzacja pierwszej pętli jest dodatnia i dotyczy systemu o nieograniczonych zasobach, natomiast drugiej jest ujemna i zależy od uwarunkowań zewnętrznych (N i K^s) oraz wewnętrznych (f). Prowadzi to do zróżnicowanej dynamiki procesów w systemie i pojawienia się, w miejsce jednej charakterystyki równania logistycznego, nieskończenie licznej rodziny charakterystyk wpisującej się w formułę zachowań nieaddytywnych. Biorąc pod uwagę (8), (19) i (21) można określić polaryzację pętli dominującej w systemie:

$$\text{sign}r\left(\left(1 - \frac{N}{K^s}\right)^f - f\frac{N}{K^s}\left(1 - \frac{N}{K^s}\right)^{f-1}\right) = \begin{cases} +, & \text{jeżeli } N < N_m^m \\ -, & \text{jeżeli } N > N_m^m \end{cases} \tag{22}$$

lub w alternatywnej, lecz równoważnej postaci:

$$\text{sign}r\left((1-u)^f - fu(1-u)^{f-1}\right) = \begin{cases} +, & \text{jeżeli } N < N_m^m \\ -, & \text{jeżeli } N > N_m^m \end{cases} \tag{22'}$$

Równanie (22) wskazuje, że w tej dwupętłowej strukturze systemu złożonego, gdy N wzrasta polaryzacja pętli zmienia się z dodatniej na ujemną prowadząc do procesów o charakterze długoterminowym, rys. 15, i w konsekwencji degradacji jakości usług. Ponadto analiza pokazuje bezpośrednią relację pomiędzy dominującą pętlą sprzężenia zwrotnego i bifurkacją ($N > N_m$).

PODSUMOWANIE

Zaprezentowana w artykule problematyka wpisuje się w paradygmat systemów złożonych uznanych już za naukę XXI wieku. Na obecnym etapie rozwoju nauki i technologii, kiedy paradygmat redukcjonizmu wyczerpuje swoją formułę w: medycynie, biologii, chemii, ekonomii, informatyce i innych, a w zasadzie we wszystkich dziedzinach, emergencja paradygmatu systemów złożonych jest nieunikniona. Stawia to nas przed wyzwaniem, których rozwiązanie toruje drogę dalszego rozwoju. Ze względu na to, że immanentną cechą systemów złożonych jest samoorganizacja, która podąża od dołu do góry, zatem pierwszym i zarazem podstawowym krokiem jest znajomość mechanizmów rządzących systemem na poziomie lokalnym, czyli drobnego ziarna, zatem w artykule podjęto kluczowe zagadnienie opisu zjawisk mikroskopowych. Zjawisko samoorganizacji w ekonomii można traktować jako podstawę tworzenia np. wolnego rynku. Znajduje swoje odzwierciedlenie w teorii „niewidzialnej ręki” rynku, zarządzaniu i ze względu na uniwersalność w wielu procesach ekonomicznych. Zaprezentowane podejście pozwala precyzyjnie opisać adaptacyjną maszynę stanów zamiast dotychczas stosowanych w e-aplikacjach algorytmicznych i interaktywnych maszyn stanów.

LITERATURA

- Abe S., Suzuki N., 2003, *Omori's law in the Internet traffic*, Europhys. Lett., 61, 852–855.
- Abe S., Suzuki N., 2004, *Statistical similarities between internet-quakes and earth-quakes*, „Physica” D, 193, 310–314.
- Albert R., Barabási A.L., 2002, *Statistical mechanics of complex networks*, „Reviews of Modern Physics”, 74, 47–95.
- Ashby W.R., 1947, *Principles of the self-organizing dynamic system*, „J. Gen. Psychol.”, 37, 125–128.
- Ashby W.R., 1962, *Principles of the self-organizing system*, in *Principles of Self-Organization: Transactions of the University of Illinois Symposium*, H. Von Foerster and G.W. Zopf, Jr. (eds.), Pergamon Press, London, 255–278.
- Bak P., 1996, *How nature works: The science of self-organized criticality*, Copernicus, New York.

- Bak P., 1988, *Self-organized criticality*, „Physical Review” A, 38, 364–374.
- Bak P., Tang C., Wiesenfeld K., 1987, *Self-Organized Criticality: An Explanation of 1/f Noise*, „Physical Review Letters”, 59, 381–384.
- Bantz D.F., Bisdikian C., Challener D., Karidis J.P., Mastrianni S., Mohindra A., Shea D.G., Vanover M., 2003, *Autonomic Personal Computing*, „IBM Systems Journal”, 42, 165–176.
- Bardram J.E., Baldus H., Favela J., 2007, *Pervasive computing in hospitals*, in *Pervasive Computing in Healthcare*, edited by: Bardram J.E., Mihailidis A., CRC Press, 49–77.
- Bochenek A., Reicher M., 2006, *Anatomia człowieka*, t. 1, PZWL, Warszawa.
- Bourgine P., Johnson J., (Eds.), 2006, *Living Roadmap for Complex Systems Science*, ONCE-CS, Project FP6-IST 29614, 1–71.
- Braha D., Minai A., Bar-Yam Y., 2006, *Complex Engineered Systems. Science Meets Technology*, Springer, New York.
- Deguchi H., 2004, *Economics as an agent-based complex system*, Springer.
- Dressler F., 2008, *A study of self-organization mechanisms in ad hoc and sensor networks*, „Computer Communications”, 31, 3018–3029.
- Einstein A., 1956, *Annalen der Physik*, 19, 371–381 (1905), *English translation in: Investigations on the theory of the Brownian movement*, Dover Publications Inc., New York.
- Fiege L., Muhl G., Wilhelm U. (Eds.), Welcom, 2001, *Markets without markers – A framework for decentralized economic coordination in multi-agent systems*, Springer-Verlag, 63–74.
- Goldin D., Smolka S.A., Wegner P., 2006, *Interactive Computation: New Paradigm*, Springer, New York.
- Grabowski F., 1995, *Difference between the 1/f noise spectral density before and after stress as a measure of the submicron MOS transistors degradation*, „Microelectronics & Reliability”, 35, 511–528.
- Grabowski F., *Extended formula of the logistic equation* (w druku)
- Grabowski F., Strzałka D., 2006, *Dynamic behavior of simple insertion sort algorithm*, „Fundamenta Informaticea”, 72, 156–165.
- Guerin S., Kunkle D., 2004, *Emergence of constraint in self-organizing systems*, „Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences”, 8, 131–145.
- Gumiński K., 1986, *Termodynamika procesów nieodwracalnych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Hurst H.E., 1951, *Long-term storage of reservoirs*, Transactions of the American Society of Civil Engineers, 770–799.
- Jennings N.R., 2001, *An agent-based approach for building complex software systems*, „Communications of the ACM”, 44, 35–41.
- Jergensen S.E., Mejer H., Nielsen S.N., 1988, *Ecosystem as self-organizing critical systems*, „Ecological Modelling”, 111, 261–268.
- Kephart, J. O., Chess, D. M., 2003, *The Vision of Autonomic Computing*, „IEEE Computer”, 36, 41–50.
- Malthus T. R., 1986, *An essay on the principle of population*, Pickering, London, (1st ed. of 1798).

- Mamei M., Menzes R., Tolksdorf R., Zambonelli F., 2006, *Case studies for self-organization in computer science*, „Journal of System Architecture”, 52, 443–460.
- Mandelbrot B., 1982, *The Fractal Geometry of Nature*, W.H. Freeman, New York.
- Mandelbrot B.B., Van Ness J.W., 1968, *Fractional Brownian motions, fractional noises and applications*, SIAM Rev., 10, 422–437.
- Mattila E., Korhonen I., Saranummi N., 2007, *Mobile and personal health and wellness management systems*, in *Pervasive Computing in Healthcare*, edited by: Bardram J.E., Mihailidis A., CRC Press, 105–134.
- Milgram S., 1967, *The small world problem*, „Psychol. Today” 2, 60–67.
- Mills K.L., 2007, *A brief survey of self-organization in wireless sensor networks*, „Wirel. Commun. Mob. Comput.” 7, 823–834.
- Myers C., 2003, *Software systems as complex networks: Structure, function, and evolvability of software collaboration graphs*, „Physical Review” E, 68, 046116.
- Newman M. E. J., 2002, *The structure and function of networks*, „Computer Physics Communications”, 147, 40–45.
- Polyakov A.A., 1993, *Process of self-organization in metal*, Fiziko-Khimicheskaya Mekhanika Materialov, 29, 19–27.
- Prehofer C., Bettstetter C., 2005, *Self-organization in communication networks: Principles and design paradigms*, „IEEE Communication Magazine”, July, 78–85.
- Richardson G. P., 1984, *Loop polarity, loop dominance, and the concept of dominant polarity*, „System Dynamics Review”, 11, 67–88.
- Richerson P.J., Boyd R., *Homage to Malthus, Ricardo, and Boserup*, 1998, *Towards a general theory population, economic growth, environmental deterioration, wealth, and poverty*, „Human Ecology Review”, 4, 85–90.
- Roy P.V., 2007, *Self management and the future of software design*, „Electronic Notes in Theoretical Computer Science”, 182, 201–217.
- Saha D, Mukherjee A., 2003, *Pervasive computing: a paradigm for the 21st century*. „IEEE Computer” 36, 25–31.
- Satyanarayanan M., 2001, *Pervasive computing: vision and challenges*, „IEEE Personal Communications” 8, 10–17.
- Saha D., Mukherjee, 2003, *Pervasive computing: A paradigm for the 21st century*, „Computer”, 3, 25–31.
- Scheinkmeim J.A., Woodford M., 1994, *Self-organized criticality and economic fluctuations*, „Am. Econ. Rev.”, 84, 417–421.
- Smith J., 2008, *Badania nad naturą i przyczynami bogactwa narodów*, t. 1, PWN, Warszawa.
- Sornette D., 2002, *Predictability of catastrophic events: Material rapture, earthquakes, turbulence, financial crashes, and human birth*, PNAS, 19, 2522–2529.
- Steinfeels P., 2006, *Economics: The invisible hand of the market*, „The New York Times”, November 25.
- Strzałka D., Grabowski F., 2008, *Towards possible q-generalizations of the Malthus and Verhulst growth models*, „Physica” A, 387, 2511–2518 (2008)
- Tsallis C., 1988, *Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics*, „Journal Statistical Physics”, 52, 479.

- Tsallis C., 1999, *Nonextensive statistics: Theoretical, experimental and computational evidences and connections*, B. „Journal of Physics”, 29, 1–35.
- Tsallis C., 2004, *What should a statistical mechanics satisfy to reflect nature?*, „Physica” D, 193, 3–34.
- Turcotte D.L., Malamud B.D., Guzzetti F., Reichenbach P., 2002, *Self-organization, the cascade model, and natural hazards*, PNAS, 99, 2530–2537.
- Varshney U., 2003, *Pervasive Healthcare*, „IEEE Computer”, 36, 138–140.
- Verhulst P.F., 1838, *Notice sur la Loi que la Population Suit dans son Accroissement; Correspondence Mathematique et Psyhique* publie par A Quetelet 10, 113–121.
- Vidales P., Baliosian J., Errat J., Mapp G., Stajano, Hopper F., A., 2005, *Autonomic system for mobility support in 4G networks*, „IEEE Journal on Selected Areas in Communication”, 23(12), 2288–2304.
- Von Bertalanffy L., 1950, *An Outline of General System Theory*, „British Journal of the Philosophy of Science”, 1, 134–164.
- Watts D.J., Strogatz S.H., 1998, *Collective dynamics of “small world” networks*, „Nature”, 393, 440–442.
- Watts D.J., 1999, *Small Worlds: The dynamics of networks between order and randomness*, Princeton University Press, Princeton, New York.
- Zabieglik S., 2003, *Adam Smith*, Wiedza Powszechna, Warszawa.

Streszczenie

Praca dotyczy nowego spojrzenia na ekonomię w kontekście systemów złożonych. Ze względu na obszerność oraz wielką uniwersalność wpisujących się w tę tematykę zagadnień, w artykule przedstawiono zjawisko samoorganizacji systemu, które jest podstawową cechą systemów złożonych. W teorii ekonomii znajduje ona swoje odzwierciedlenie w metaforze „niewidzialnej ręki” rynku. Z jednej strony pokazujemy, że u podstaw historycznej metafory niewidzialnej ręki oraz współczesnych autonomicznych systemów wieloagentowych leży ta sama idea samoorganizacji systemu, która oznacza indywidualne dopasowanie realizowanych w systemie zadań (mikroskala) do ograniczonych zasobów systemu (makroskala). Procesy te korespondują z termodynamiką nierównowagową, wrażliwością na warunki początkowe oraz mechanizmami występującymi w sieciach złożonych takimi jak perkolacja, preferencyjne dołączanie, skala dowolna, małe światy i inne.

Economics in the Context of Complex Systems

Summary

This paper refers to a new approach to self-organization on the market. We show that both the historical Invisible Hand metaphor and modern autonomous multi-agent systems are based on the same self-organization idea, which means individual adjustment of multiple tasks performed in a system (microscale) to its limited resources (macroscale). These tasks correspond to non-equilibrium thermodynamics, sensitivity to initial conditions and mechanisms occurring in complex networks like percolations, preferential linking, scale-free networks, small worlds, etc.