

*dr hab. inż. Franciszek Grabowski*<sup>1</sup>

Zakład Systemów i Sieci Komputerowych, Instytut Inżynierii Technicznej  
Państwowa Wyższa Szkoła Techniczno-Ekonomiczna

*dr Justyna Stasienko*<sup>2</sup>

Zakład Systemów Informatycznych, Instytut Inżynierii Technicznej  
Państwowa Wyższa Szkoła Techniczno-Ekonomiczna

## **Termodynamika rozprzestrzeniania się informacji i wiedzy**

### WPROWADZENIE

Termin „społeczeństwo informacyjne” jest w obiegu od ponad pół wieku. Dotychczas zaproponowano kilkadziesiąt definicji, co wskazuje na nijakość tego pojęcia. Wszystkie definicje najtrafniej ocenił E. Bendyk [Bendyk, (<http>): „Co to jest społeczeństwo informacyjne? Ideologiczny twór państwowych biurokratów czy precyzyjna etykieta opisująca stan społeczeństwa wskutek rozwoju zaawansowanych technologii? Ani jedno, ani drugie. Społeczeństwo informacyjne to puste stwierdzenie, które w warstwie ideologicznej się wyczerpało, jego wartość opisowa zaś jest równie mała”.

Dane, informacja, wiedza i mądrość towarzyszą ludzkości od zarania jej istnienia. Redukcjonistyczny punkt widzenia traktuje dane, informacje, wiedzę i mądrość rozłącznie, jako strukturę hierarchiczną niezależnych warstw. Wtedy można przyjąć, że informacja jest zbiorem niezależnych danych, które rozprzestrzeniają się zgodnie z dyfuzją normalną, natomiast wiedza jest superpozycją procesów dyfuzyjnych. Jest to zatem system prosty. Jednakże z holistycznego punktu widzenia dane są zagnieżdżone w informacji, zaś wiedza jest nieekstensywną strukturą danych i informacji. Nierównowagowa i nieekstensywna, przestrzenno-czasowa dynamika struktur danych jest kreowana w procesach poznawczych człowieka, na które wpływa otoczenie, system nerwowy oraz ciało [Kello, 2008]. W zależności

---

<sup>1</sup> Adres korespondencyjny: Państwowa Wyższa Szkoła Techniczno-Ekonomiczna, ul. Czarnieckiego 16, 37-500 Jarosław, e-mail: [fgrab@prz.edu.pl](mailto:fgrab@prz.edu.pl), tel. 16 6244657.

<sup>2</sup> Adres korespondencyjny: Państwowa Wyższa Szkoła Techniczno-Ekonomiczna, ul. Czarnieckiego 16, 37-500 Jarosław, e-mail: [justyna.stasienko@pwste.edu.pl](mailto:justyna.stasienko@pwste.edu.pl), tel. 16 6244657.

od poziomu poznawczego, struktury przestrzenne danych mogą przyjmować formę losowych, równowagowych danych ( $p=1$ ), nierównowagowych, niekompletnych informacji i wiedzy ( $0 < p < 1$ ) aż do absolutnej (kompletnej) wiedzy ( $p=0$ ). Wskutek tego procesy poznawcze, wyrażone w postaci tekstu, dźwięku i obrazu, mają również kontekst czasowy typu  $1/f$ , który jest nierozzerwalnie związany z kontekstem przestrzennym [Alvarez-Lacalle, 2006; Hsu, 1991; Ihlen, 2010; Kello, 2010; Van Orden, 2005; Wagenmakers, 2004]. Dane, informacja, wiedza i mądrość są wzajemnie zagnieżdżone, podlegają konwergencji i stanowią adaptacyjny system złożony [Blumer, 1971; Castells, 2007; Rogers, 1971; Sawyer, 2005]. Dlatego sztucznie wyodrębnienie informacji z systemu złożonego niewiele wnosi, a jedynie sieje zamieszanie.

W kontekście wspomnianych uwarunkowań kluczową kwestią jest zrozumienie mechanizmów dyfuzji informacji i unoszenia wiedzy. Dlatego w artykule podjęto kwestię termodynamiki rozprzestrzeniania się informacji i wiedzy rozpatrywanych zarówno w kategoriach redukcjonistycznych, jak i holistycznych.

## TERMODYNAMIKA ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ INFORMACJI I WIEDZY

Pierwszy prezentowany model termodynamiczny rozprzestrzeniania się informacji i wiedzy postrzegany jest jako system prosty o samoorganizacji jednorodnej. Kolejny model rozszerzony został do przypadku rozprzestrzeniania się informacji i wiedzy rozumianych, jako niejednorodny, nieekstensywny samoorganizujący się system złożony.

### ROZPRZESTRZENIANIE SIĘ INFORMACJI I WIEDZY POSTRZEGANYCH JAKO SYSTEM PROSTY

Systemy rzeczywiste mają ograniczone możliwości i dlatego są nieliniowe. Idealizacja forsowana przez redukcjonizm odrzuca wszelkie ograniczenia. Oznacza to, że z przestrzenno-czasowego punktu widzenia, system jest jednorodny, liniowy, zdominowany przez dodatnie sprzężenie zwrotne (DSZ) i postrzegany jako czarna skrzynka. Jego wydajność może być opisana przez równanie Malthusa, rys. 3, charakterystyka 0:

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

gdzie  $r$  jest parametrem determinującym intensywność wzrostu lub spadku wydajności, zaś  $N$  liczbą zadań realizowanych w systemie.

W rzeczywistości ograniczone zasoby systemu wymuszają samoorganizację na poziomie mikroskopowym i w konsekwencji prowadzą do zmian własności

na poziomie makroskopowym. W roku 1838, czyli sto lat przed cybernetykami, na ten fakt zwrócił uwagę P. Verhulst, który równanie (1) uzupełnił o dodatkowy człon. Pokazał, że ograniczone zasoby  $K$  nieuchronnie prowadzą do ujemnego sprzężenia zwrotnego (USZ). W ten sposób wyłoniło się równanie logistyczne, rys. 3, charakterystyka 1:

$$X_V = \frac{dN}{dt} = \underbrace{rN}_{\text{DSZ}} \underbrace{\left(1 - \frac{N}{K}\right)}_{\text{USZ}} = rKu(1-u) \quad (2)$$

Parametr  $u = N/K$  jest współczynnikiem wykorzystania zasobów systemu, gdzie  $0 \leq u \leq 1$ .

Rozwiązując (2) otrzymuje się funkcję logistyczną, która opisuje dyfuzję, rys.1, charakterystyka  $N$ :

$$N(t) = \frac{KN_0}{N_0 + (K - N_0)e^{-rt}} = KN_0 [N_0 + (K - N_0)e^{-rt}]^{-1} \quad (3)$$

$N_0$  jest wartością początkową liczby zadań w systemie.

Równanie (2) umożliwia określenie polaryzacji pętli dominującej sprzężenia zwrotnego w systemie:

$$dX/dN = r - 2N \frac{r}{K} = 0 \quad (4)$$

Biorąc pod uwagę równanie (4) można zauważyć, że polaryzacja dominującej pętli sprzężenia zwrotnego systemu nieliniowego zmienia się wraz z wartością  $N$ :

$$\text{sign}\left(r - 2N \frac{r}{K}\right) = \begin{cases} +, & \text{jeżeli } N < \frac{K}{2} \\ -, & \text{jeżeli } N > \frac{K}{2} \end{cases} \quad (5)$$

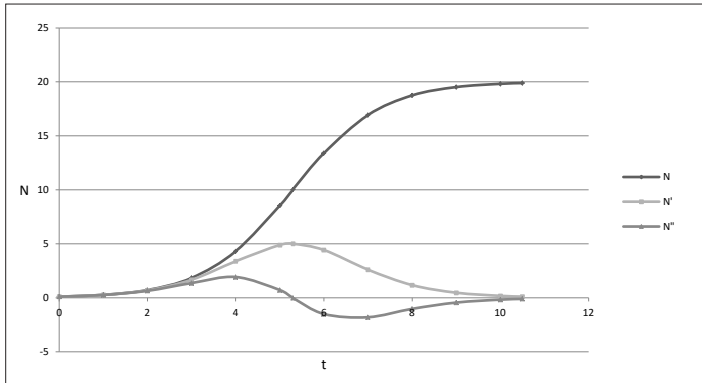
Na podstawie (5) widać, że w tej dwupętlowej strukturze równania logistycznego, gdy  $N$  wzrasta, polaryzacja pętli zmienia się z dodatniej na ujemną. W równaniu logistycznym zmiana dominacji pętli następuje wtedy, kiedy  $N$  osiąga połowę jego maksymalnej wartości. Jest to konsekwencją nieliniowości charakterystyki równania logistycznego. Istnieje bezpośredni związek pomiędzy bifurkacją a dominacją pętli. Bifurkacje są związane z gwałtownym przejściem do określonego, docelowego stanu systemu nieliniowego.

Różniczkując (3) można zauważyć, że bifurkacje zachodzą w punktach równowagi, które są także punktami przełączania pętli dominującej. Wtedy system samoorganizuje się i w punkcie równowagi termodynamicznej osiąga apogeum swoich możliwości, rys.1, charakterystyka  $N'$ :

$$\frac{d}{dt} N(t) = \frac{KN_0(K - N_0)e^{-rt}}{[N_0 + (K - N_0)e^{-rt}]^2} \quad (6)$$

Równanie (6) pokazuje zmianę polaryzacji dominującej pętli sprzężenia zwrotnego w dziedzinie czasu, rys. 1, charakterystyka  $N''$ :

$$\frac{d^2}{dt^2} N(t) = \frac{(KN_0(K - N_0)e^{-rt})[N_0 + (K - N_0)e^{-rt}]^2}{[N_0 + (K - N_0)e^{-rt}]^4} - \frac{2KN_0(K - N_0)e^{-rt}[N_0 + (K - N_0)e^{-rt}][(K - N_0)e^{-rt}]}{[N_0 + (K - N_0)e^{-rt}]^4} \quad (7)$$



**Rys. 1. Funkcja logistyczna, jako model dyfuzji ( $N$ ), proces samoorganizacji systemu ( $N'$ ) i polaryzacja dominującej pętli sprzężenia zwrotnego ( $N''$ )**

Źródło: opracowanie własne.

Równania (3), (6) i (7) korespondują z dyfuzją normalną  $\langle x^2 \rangle \propto t$  opisaną prawem Fokkera-Ficka:

$$\frac{\partial N(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N(x,t)}{\partial x^2} \quad (8)$$

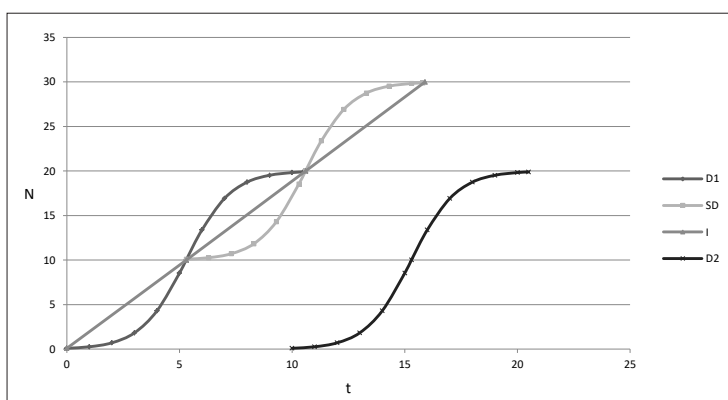
$D$  jest współczynnikiem dyfuzji, zaś  $x$  odległością.

Uwzględniając składową dyfuzyjną (8) i unoszenia (2) możemy przedstawić postać ogólną równania określającego rozprzestrzenianie się informacji i wiedzy w warunkach ekstensywnych:

$$\frac{\partial N(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N(x,t)}{\partial x^2} + rN(x,t) \left( 1 - \frac{N(x,t)}{K} \right) \quad (9)$$

Przyjmując idealistyczny przypadek systemu o strukturze jednorodnej i przedstawiając rozważania w kategoriach analizy asymptotycznej można pokazać jak dyfuzja informacji przechodzi w unoszenie wiedzy.

Biorąc pod uwagę funkcję logistyczną, która opisuje dyfuzję normalną, można określić warunki matematyczne i przedstawić graficznie idealne przypadki procesu dyfuzji innowacji oraz unoszenia innowacji. Przy braku globalnego sprzężenia zwrotnego, czyli braku pamięci, jeżeli kolejne wstrzyknięcia innowacyjności następują w momentach  $t+nT$ , rys. 2, gdzie  $T$  jest czasem trwania pojedynczego procesu dyfuzji, zaś  $n=1, 2, 3, \dots$ , wtedy mamy do czynienia z idealnym przypadkiem dyfuzji innowacji. Z utylitarne punktu widzenia jest to przypadek pesymistyczny, gdyż oznacza stagnację poznawczą. Zmiana paradygmatu z dyfuzji innowacji do unoszenia innowacji może nastąpić przy zmianie trybu komutacji, co prowadzi do systemu z pamięcią. Optymistyczny przypadek unoszenia innowacji zapewnia idealna komutacja realizowana w punktach o współrzędnych  $t+nT$  oraz  $N+nK$ , gdzie  $n=1/2, 1, 2/3, \dots$ . Z punktu widzenia analizy asymptotycznej jest to przypadek optymistyczny, ale nierealistyczny. Pomiedzy przypadkiem optymistycznym a pesymistycznym można wskazać nieskończenie wiele kombinacji, które są bardziej zbliżone do rzeczywistości, co jest pokazane w następnej sekcji.



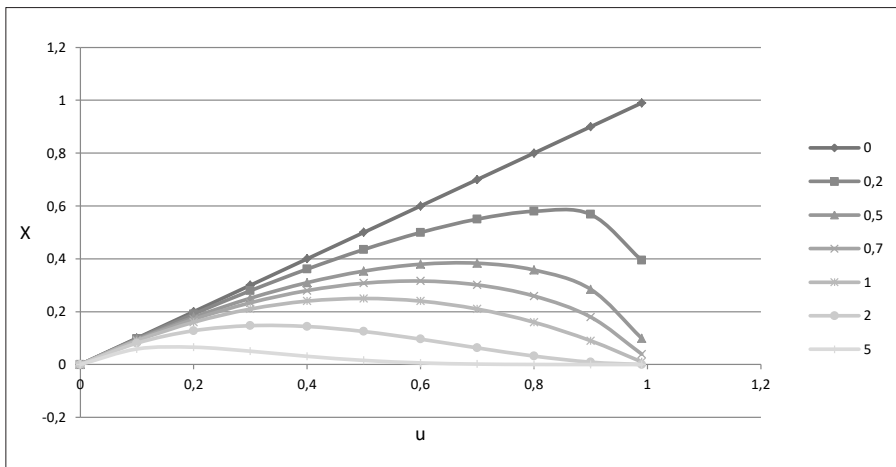
**Rys. 2. Termodynamika dyfuzji informacji i przepływu wiedzy w systemie prostym. Pierwsze (D1) i drugie (D2) dyfuzyjne wstrzyknięcie informacji. Superpozycja informacji D1 i SD, co daje idealny przypadek wiedzy I**

Źródło: opracowanie własne.

ROZPRZESTRZENIANIE SIĘ INFORMACJI I WIEDZY POSTRZEGANYCH  
JAKO SYSTEM ZŁOŻONY

Punktem wyjścia przypadków opisanych w poprzedniej sekcji było równanie logistyczne Verhulsta. Jest to przypadek szczególny. Odnosi się ono jedynie do jednorodnych procesów samoorganizacji, które lokują się w obszarze pod-ekstensywności termodynamicznej. W związku z tym, równanie logistyczne określa jedynie pojedynczą charakterystykę  $X(u)$  przy  $r$  oraz  $K$ , jako parametry, rys. 3, charakterystyka 1. Tymczasem w ogólnym przypadku w systemie wyłaniają się zachowania zarówno o charakterze pod-ekstensywnym, jak i super-ekstensywnym, które są związane niejednorodnością samoorganizacji procesów. W ogólnym przypadku parametry systemu są zmienne i zależne od uwarunkowań zewnętrznych i wewnętrznych. Zatem system jest wrażliwy na warunki początkowe związane bezpośrednio ze sprzężeniem zwrotnym dowolnego rzędu. W ogólnym przypadku system może podążać nieskończenie wieloma ścieżkami samoorganizacji, co uwzględnia parametr  $-\infty < \varphi < +\infty$  w równaniu logistycznym dowolnego rzędu [13, 14]:

$$X = \frac{dN}{dt} = rN \left( 1 - \frac{N}{K} \right)^\varphi = rKu(1-u)^\varphi \quad (10)$$



**Rys. 3. Rodzina charakterystyk równania logistycznego dowolnego rzędu**

Źródło: opracowanie własne.

Wrażliwość systemu złożonego na warunki początkowe nieuchronnie prowadzi do termodynamiki nieekstensywnej i entropii Tsallisa [15]:

$$S_q = k \frac{1 - \sum_{i=1}^W p_i^q}{q-1} \quad \left( S_1 = S_{BG}; \sum_{i=1}^W p_i = 1; q \in \mathfrak{R} \right) \quad (11)$$

gdzie  $W$  jest całkowitą liczbą konfiguracji,  $\{p_i\}$  jest prawdopodobieństwem,  $k$  jest stałą zaś BG jest entropią Boltzmann-Gibbsa. Zgodnie z paradygmatem Tsallisa, jeżeli system składa się z dwóch podsystemów A i B, wtedy entropia systemu może być określona jako:

$$S_q(A+B) = S_q(A) + S_q(B) + (1-q)S_q(A)S_q(B) \quad (12)$$

W równaniu (12), człon  $(1-q)S_q(A)S_q(B)$  wskazuje na nieekstensywność systemu i jest zależny od wrażliwości na warunki początkowe [16]:

$$\xi(t) \equiv \lim_{\Delta x(0) \rightarrow 0} \frac{\Delta x(t)}{\Delta x(0)} = \left[ 1 + (1-q)\lambda_q t \right]^{\frac{1}{1-q}} \quad (q \in \mathfrak{R}) \quad (13)$$

gdzie  $\lambda_q$  jest uogólnionym wykładnikiem Lapunowa. Równania (12) i (13) określają relacje pomiędzy informacją i wiedzą w systemie nieekstensywnym.

W przypadku nieekstensywnym mamy do czynienia z dyfuzją anomalną,  $0 < \gamma < 2$ :

$$\frac{\partial N(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^\gamma N(x,t)}{\partial x^\gamma} \quad (14)$$

Uwzględniając składową dyfuzji i unoszenia równanie opisujące rozprzestrzenianie się wiedzy można przedstawić w postaci:

$$\frac{\partial N(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^\gamma N(x,t)}{\partial x^\gamma} + rN(x,t) \left( 1 - \frac{N(x,t)}{K} \right)^\rho \quad (15)$$

W rzeczywistych, niejednorodnych systemach funkcja logistyczna dowolnego rzędu  $N(t)$  plasuje się pomiędzy przypadkami opisywanymi w poprzedniej sekcji.

## WNIOSKI

W artykule przedstawiono model rozprzestrzeniania się informacji i wiedzy. W pierwszej kolejności pokazano przypadek, kiedy informacja i wiedza są komponentami redukcjonistycznego systemu prostego. Wtedy rozprzestrzenianie informacji podlega dyfuzji normalnej, zaś laminarne rozprzestrzenianie się wiedzy jest

superpozycją procesów dyfuzyjnych. Wzięto również pod uwagę przypadek holi-  
styczny, gdzie informacja i wiedza stanowią interaktywne komponenty adaptacyj-  
nego systemu złożonego. Wtedy termodynamika rozprzestrzeniania się informacji  
i wiedzy staje się nieekstensywna, zaś przepływy mają charakter turbulentny.

## BIBLIOGRAFIA

- Alvarez-Lacalle E, Dorow B., Eckmann J.P., Moses E., 2006, *Hierarchical structures induce long-range dynamical correlations in written texts*, PNAS, 103, 21, 7956–7961, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0510673103>.
- Bendyk E., 1999, *Ideologia społeczeństwa informacyjnego*, „Computer World”, 33 <http://www.calculemus.org/lect/mes99-00/spin/1bendyk.html> (dostęp: 15.07.2016 r.).
- Blumer H., 1971, *Social Problems as collective behavior*, „Social Problems”, 18, 298–306, <http://dx.doi.org/10.2307/799797>.
- Castells M., 2007, *The rise of the Network society*, John Wiley & Sons, <http://dx.doi.org/10.1002/9781444319514>.
- Hsu K.K., Hsu A., 1991, *Self-similarity of the “1/f noise called music*, „Proc. Natl. Acad. Sci.”, 88, 3507–3509, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.88.8.3507>.
- Ihlen E.A.F., Vereijken B., 2010, *Interaction-dominant dynamics in human cognition: Beyond 1/f<sup>α</sup> fluctuation*, „Psychonomic Bulletin & Review”, J. of Experimental Psychology: General, 139, 3, 436–463, <http://dx.doi.org/10.1037/a0019098>.
- Kello C.T., Anderson G.G., Holden G.G., Anderson G.G., 2008, *The pervasiveness of 1/f scaling in speech reflects the metastable basis of cognition*, „Cognitive Science”, 32, 7, 1217–1231, <http://dx.doi.org/10.1080/03640210801944898>.
- Kello C.T., Brown G.D.A., Cancho R.F., Holden G.G., Linkenkaer Hansen K., Rhodes T., Van Orden G.C., 2010, *Scaling laws in cognitive sciences*, „Trends in Cognitive Sciences”, 14, 223–232, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tics.2010.02.005>.
- Rogers E.M., Shoemaker F.F., 1971, *Communication of Innovations: A Cross-Cultural Approach*, New York, Free Press.
- Sawyer R.K., 2005, *Social emergence: societies as complex systems*, Cambridge University Press, <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511734892>.
- Van Orden G.C., Holden J.G., Turvey M.T., 2005, *Human cognition and 1/f scaling*, J. of Experimental Psychology: General, 134, 1, 117–123, <http://dx.doi.org/10.1037/0096-3445.134.1.117>.
- Wagenmakers E.J., Farrell S., Ratcliff R., 2004, *Estimation and interpretation of 1/f noise in human cognition*, „Psychonomic Bulletin & Review”, 11, 4, 579–615, <http://dx.doi.org/10.3758/BF03196615>.

## Streszczenie

W artykule przedstawiono model termodynamiczny rozprzestrzeniania się informacji i wiedzy. Jako pierwszy pokazano idealistyczny przypadek, gdzie zarówno informacja, jak i wiedza są komponentami prostego, redukcjonistycznego systemu poznawczego. Wtedy rozprzestrzenianie informacji



podlega dyfuzji normalnej zaś rozprzestrzenianie się wiedzy jest superpozycją procesów dyfuzyjnych. Drugi bardziej realistyczny przypadek jest ujęciem holistycznym, gdzie informacja i wiedza są interaktywnymi nieekstensywnymi komponentami systemu poznawczego postrzeganego, jako adaptacyjny system złożony.

*Słowa kluczowe:* społeczeństwo informacyjne, informacja, wiedza, termodynamika, systemy złożone

## **Thermodynamics of spreading information and knowledge**

### *Summary*

The article presents the thermodynamic model of spreading information and knowledge. Firstly, an idealistic case is presented, where both information and knowledge are the components of a simple reductionist cognitive system. Here, the dissemination of information is subjected to normal diffusion, whereas the spread of knowledge is a superposition of diffusion processes. The second, more realistic case, represents a holistic approach, where information and knowledge are interactive non-extensive components of a cognitive system perceived as a complex adaptive system.

*Keywords:* information society, information, knowledge, thermodynamics, complex systems

JEL: C1, C6, Z0