

Życie ewoluuje w półchaosie *(IV odcinek Szkicu dedukcyjnej teorii życia)*

Andrzej Gecow
gecow@op.pl

Streszczenie

Hipoteza Kauffmana „życie na granicy chaosu i porządku” jest tu głęboko reinterpretowana, nowe jej ujęcie to: „życie toczy się w półchaosie¹”. Przedstawiona została krytyka interpretacyjna założeń modelu Kauffmana i podstawy oczekiwania, że obiekty żywe powinny mieć cechy systemu chaotycznego, jednak ze znacznie zwiększoną stabilnością, głównie poprzez nagromadzenie regulacyjnych sprzężeń zwrotnych. Poprzez badania symulacyjne wykazano, że można zbudować specyficzny stan systemu z natury parametrów chaotycznego, który jednocześnie w zbliżonym zakresie posiada cechy dojrzałego chaosu i systemu uporządkowanego, gdzie Kauffman umiejscawia życie. Symulacja wykazała, że akceptacja małych zmian wystarcza, by ewolucja nie wyprowadzała z tego obszaru.

Słowa kluczowe: chaos, życie na granicy chaosu, przejście fazowe do chaosu, sieci Kauffmana, propagacja zaburzenia.

1 Wstęp

Powszechnie znana jest hipoteza Kauffmana, że życie toczy się na granicy chaosu i porządku. Wskazanie tej hipotezy było niewątpliwie bardzo istotnym krokiem we właściwym kierunku, stawiającym ważne pytania i odkrywającym wielkie i perspektywiczne pole badań. Wyniki moich badań na tym polu pozwalają zrobić teraz następny krok i głębiej zinterpretować tą hipotezę.

Kauffman (1969, 1971) zaproponował do opisu systemów żywych logiczne sieci dynamiczne zwane także sieciami Kauffmana. Dostrzegli je dopiero fizycy po dekadzie. Funkcjonowanie takich sieci ma charakter nieliniowy i wykazuje własności chaosu deterministycznego, mimo, że są one dyskretne i skończone. Badając takie sieci zbudowane losowo opisane kilkoma ogólnymi parametrami, wykryto (Derrida i Pomeau 1986) przejście fazowe między porządkiem a chaosem – niemal skokową zmianę własności systemu² w aspekcie stabilności. Kauffman (1993) wykazał, że konieczne dla ewolucji życia małe zmiany funkcjonowania są dostępne w przestrzeni tych parametrów systemu jedynie w pobliżu owego przejścia fazowego.

W obrazie Kauffmana sieci uporządkowanej w przestrzeni parametrów (patrz rozdz.2.4) występuje spójny obszar stanów „zamrożonych” (obszar „lodu” lub „stały”), a w nim małe „jeziorka” aktywności, więc zmiana nie może się rozprzestrzenić. W systemach z obszaru chaotycznego („gazowego”) zaburzenie rozprzestrzenia się szybko, a „lód” jest prawie nieobecny. W obszarze przejściowym („ciekłym”), gdzie umieszcza życie, jeziorka są już większe i zaczynają się łączyć, ale nadal spotyka się sporo lodu. Tu zaburzenie rozprzestrzenia się powoli i ma dużą szansę wygasnąć, a jego rozmiary są małe i nie osiągają równowagi Derridy.

W (Gecow 1974, 1975) przedstawiłem model tendencji strukturalnych oparty na mojej sieci, którą nazywam agregatem automatów, tłumaczący źródło bardzo kontrowersyjnej, klasycznej prawidłowości fenomenologicznej – rekapitulacji filogenezy w ontogenezie. W

¹ Nowy termin, który dalej będzie wyjaśniony głównie w rozdz.5.

² Terminy sieć (tu rozpatrywane są sieci dynamiczne) i system używa się zamiennie.

modelu tym i algorytmie „reversed annealed” do jego symulacji przyjąłem na podstawie złożonej i uzasadnionej oceny, że „życie toczy się w chaosie” – jak to dziś można krótko ująć. Wtedy jeszcze nie istniało to pojęcie w zastosowaniu do sieci. Konflikt heurystycznych argumentów z hipotezą Kauffmana stał się istotny, przeprowadziłem więc analizę jego źródeł.

Kauffman użył do swojego modelu kilku parametrów i na nich rozpiął przestrzeń możliwych systemów. Jest w niej przejście fazowe, a najlepszy dla życia obszar tej przestrzeni wynikający z potrzeby małych zmian wynikowych leży w okolicy tego przejścia, głównie po stronie porządku. Tam ewolucja polegająca na małych zmianach permanentnych inicjujących zmiany funkcjonowania powinna mieć największe efekty, więc obserwowane obiekty żywe powinny być systemami z tego obszaru. To jest właśnie hipoteza „życia na granicy chaosu”. Błąd w tym modelu i rozumowaniu w zasadzie nie ma, ale jak każdy model, wiele elementów ma uproszczonych z założenia. Tu wiele rozmaitych parametrów, których model nie zamierza rozpatrywać, zostało potraktowane jako losowe, przez co przestrzeń możliwych systemów zawiera wszelkie warianty, a ma względnie mało wymiarów.

Problem polega na wyborze odpowiednich parametrów do rozważań w modelu, a ewolucja życia wykrywa wszelkie dostępne środki do adaptacji, co istotnie utrudnia ograniczenie się do małej liczby parametrów. Pominięcie wymiarów powoduje brak dostrzegania możliwości jakie dają. W tej sytuacji wniosek, że życie dąży do wskazanego zakresu parametrów (gdy pozostałe są losowe) jest słuszny, ale już: że do tego obszaru dotarło i tam się toczy, słuszny być nie musi, bo te pominięte wymiary mogą nie być losowe i dać „bardziej atrakcyjne oferty”.

Kauffman badał głównie parametr K (liczbę wejść do węzła) ustalając N (liczbę węzłów w sieci), a funkcje i stany węzłów miały być losowe. Badano jednak, co daje brak losowości tych elementów. Stopień nielosowości funkcji logicznych określał parametr P – „*internal homogeneity*”, a na prawdopodobieństwo jednego ze stanów używano p , drugi miał więc $1-p$. Otrzymano pewne proste wnioski, które co prawda przesunęły punkt przejścia fazowego, z czego ewolucja może korzystać, ale nie wydawały się podważać obrazu tego przejścia, ani hipotezy „życie na tej granicy chaosu”.

Są to tylko 3 proste parametry, na które już dobór może wpływać, pozostaje wielki zbiór rozmaitych, bardziej złożonych parametrów i korelacji, które także raczej mają związek ze stabilnością i trudno oczekiwać, że dobór naturalny, który właśnie wybiera bardziej stabilne systemy, pozostawi ich rozkłady nie zmienione względem losowych. Taką właśnie naturę – różnice między rozkładem zadany a zmodyfikowanym przez dobór, mają badane przeze mnie tendencje strukturalne. Tak więc, mimo wskazania wyboru miejsca dla życia na osi K , a także P i p , w wielkim zbiorze pozostałych parametrów systemy żywe nie mają rozkładów losowych w aspekcie stabilności. W tak wielowymiarowej przestrzeni miejsce dla życia jest raczej bardzo złożoną podprzestrzenią, np. dalej zajmować się będziemy krótkim atraktorem³, modularnością i regulacyjnymi sprzężeniami zwrotnymi – ich stopień obecności wśród obiektów żywych jest istotnie wyższy od losowego.

Oprócz braku losowości nie rozważanych wymiarów, moimi głównymi zastrzeżeniami do założeń Kauffmana były:

- Regulacyjne sprzężenia zwrotne, wbrew przeświadczeniu Kauffmana, są uwzględnione jedynie na poziomie losowym, a przecież bywają nawet podstawą definicji życia. Wszyscy widzą, że obiekty żywe mają je na poziomie drastycznie większym od losowego.

³ Atraktor to ciąg kolejnych stanów deterministycznej sieci funkcjonującej powtarzający się cyklicznie. Ponieważ sieć jest skończona, kiedyś jakiś stan musi się powtórzyć, i odtąd będzie powtarzał się cyklicznie.

- Przyjęcie jedynie dwóch wariantów sygnału do badań statystycznych jest zbyt grubym przybliżeniem. Po bardziej adekwatnym dopuszczeniu większej liczby wariantów stan uporządkowany w systemach losowych staje się szczególnie wyjątkowy.

Podjąłem więc prace nad skutecznym wykazaniem poprawności mojego założenia, że życie może i powinno być modelowane systemem o parametrach chaosu, jednocześnie posiadającym znacznie podwyższoną stabilność. Rozpocząłem od prób wykazania, że podstawą stabilności obiektów żywych są regulacyjne, ujemne sprzężenia zwrotne, które nie były odpowiednio uwzględnione w modelu Kauffmana. Ku mojemu zdumieniu okazało się, że są one jedynie pomocne, ale same nie wystarczają. Ten wniosek skierował uwagę na modularność, a dalsze wyniki na skrócenie atraktora tak, by wtórne inicjacje *damage* (zaburzenia funkcjonowania, patrz rozdz.2.3) przez zmianę permanentną miały mniej czasu na zaistnienie. Damage po inicjacji ma szansę wygasnąć w systemie chaotycznym, ale małą. Jeżeli wygaśnie, to ciągle (permanentnie) obecna zmiana funkcji może napotkać ponownie stan wejściowy dający odmienny efekt – to wtórna inicjacja. Jeżeli atraktor jeszcze się nie obrócił, to zachodzi ona w całkiem innych okolicznościach i szansa wygaśnięcia znowu jest mała. Atraktory w małych jeziorkach aktywności mogą być małe.

Wykazuję, że można zbudować system o parametrach chaosu, ale z istotnie podwyższoną stabilnością (półchaotyczny), tworząc go zgodnie z tym obrazem. W (Gecow 2014) wskazałem, że łatwo otrzymać taki specyficzny system, wychodząc z systemu o parametrach chaotycznych i atraktorze punktowym (czyli skrajnie krótkim). Stosując kryterium małej zmiany specyfika ta utrzymuje się dowolnie długo mimo kumulacji zmian. Niniejszy artykuł jest poświęcony kompleksowemu przedstawieniu tych badań modyfikujących zakres i interpretację hipotezy Kauffmana. Wiele z argumentów zostało już przeze mnie opublikowanych (Gecow 2008, 2010, 2011, 2014) ale też najsilniejsze będą tu omówione po raz pierwszy.

Mój obraz jest werbalnie zbliżony do hipotezy Kauffmana: życie toczy się w półchaosie, ale jest to stan systemu nie w pełni losowego⁴ w złożonych parametrach. Dojrzały⁵ chaos i porządek występują tu jednocześnie w porównywalnym stopniu. Taki system, gdy po małej zmianie inicjującej wpadnie jednak w chaos (duża zmiana wynikowa), pozostanie w nim jako w pełni losowy, zgodnie ze swoimi parametrami. Nawiązując do nazwy „obszar ciekły”, ten nowy obszar należałoby nazwać „cieczą przegrzaną”.

Wiadomo, że ewolucja życia wymaga olbrzymiej przestrzeni możliwości, co oferują jedynie systemy złożone. Podaję podstawy interpretacyjne, że obszar uporządkowany nie opisuje poprawnie systemów żywych, więc system złożony opisujący ewoluujący obiekt żywy praktycznie musi być półchaotyczny. Takie ograniczenie jest informacją celową dla celu „istnieć nadal” (tych pojęć dotyczył pierwszy odcinek *Szkicu* (Gecow 2013)), i jest to nieco bardziej pierwotna⁶ informacja celowa od rozmnażania (I.3.6.2)⁷, czego nikt się nie spodziewał, choć hipoteza życie na granicy chaosu wskazała już część tego twierdzenia.

Także mała zmiana (I.3.4.1; III.2.2.4) otrzyma tu nową perspektywę – jest warunkiem utrzymującym specyficzny stan półchaosu, ową pierwotną informacją celową.

⁴ Hipoteza Kauffmana, natomiast, dotyczy systemu w pełni losowego, co wyżej opisałem.

⁵ Przejście fazowe z porządku do chaosu jest szybkie, ale stopniowe. Nie od razu zjawiska wyglądają tak, jak „głębiej” w chaosie. Np. szerokość i położenie piku wielkości damage. Wprowadzony tu termin „dojrzały chaos” wskazuje, że zjawiska wyglądają jak głęboko w chaosie a nie jak w pobliżu wejścia w chaos.

⁶ Wcześniej nie w kolejności historycznej tworzenia się życia, a w kolejności dedukcyjnej cech życia o podobnie wielkim potencjale ewolucyjnym do naszego życia. Taki potencjał oferują tylko systemy złożone. Należy tu podkreślić, co przy szerszym omówieniu zagadnienia także będzie wspomniane, że hipoteza Kauffmana „życie na granicy chaosu” wskazała już znaczną część tego wniosku.

⁷ Jest to stosowane już w poprzednich odcinkach *Szkicu* (Gecow 2014a, 2015) odniesienie do rozdziałów w innym odcinku, tu do I odcinka, rozdz.3.6.2.

Wybór stanu półchaotycznego nie jest już tak „za darmo”, jak to było w ujęciu Kauffmana dla stanu porządku sieci losowych. Kauffmanowskie pojęcie porządku ma dwa aspekty, które pozwala rozróżnić teoria informacji celowej z pierwszego odcinka *Szkicu*. Jest to rozróżnienie informacji ogólnej i informacji celowej. Kauffman wskazuje na porządek – wynik nieliniowego charakteru systemu, jako na część porządku nie wynikającą z mechanizmu darwinowskiego. Ma w tym rację, ale ta część nie jest informacją celową, tylko ogólną. Spontaniczność jej powstania także wymaga ostrożności, np. przy wskazaniu zakresu możliwych wyników procesu.

Pełny opis eksperymentów, wyników i obserwacji (Gecow 2016) zamieszczony jest na Internecie, ale podany tu opis wystarczy do powtórzenia symulacji i weryfikacji wniosków. Uzyskany wynik daje dostateczne podstawy do reinterpretacji hipotezy Kauffmana „życie na granicy chaosu”. Tym samym mój model tendencji strukturalnych (Gecow 1974,1975, 2005,2008,2009b) zyska dostatecznie silne podstawy, gdyż, jak wspomniałem, dotychczasowe oceny w obliczu ogólnie przyjmowanej hipotezy Kauffmana wydawały się nieprzekonujące. Pozwoli to omówić (ale to już w dalszych odcinkach *Szkicu*) podstawowe tendencje strukturalne.

Miejsce publikacji⁸ *Szkicu* jako całości wynika z jego aspektów metodologicznych i szerokości spektrum dyscyplin naukowych, do których należą poruszane zagadnienia. Są tu podstawy teorii informacji i celowości oraz informacji biologicznej, definiowanie życia, dedukcyjne ujęcie mechanizmów ewolucji, a teraz dyskusja chaosu w sieciach złożonych w aspekcie miejsca życia. Większość tych tematów odrzucają pisma specjalistyczne i są publikowane w pismach filozoficznych. Trudno oczekiwać od Czytelników pisma filozoficznego znajomości podstaw we wszystkich tych dziedzinach jednocześnie, jednak miejsce w artykułach jest zbyt cenne, by wyklądać tu podstawy – w temacie sieci złożonych opisałem je po polsku w (Gecow 2009c), co sugeruję potraktować jako wstęp do niniejszego odcinka, a szersze rozwinięcie zagadnień chaosu można znaleźć w (Temczyk 1998, 2002).

2 Podstawy i interpretacja hipotezy Kauffmana życie na granicy chaosu

2.1 Sieć Kauffmana i jej parametry

Kauffman (1969,1971) zaproponował sieci logiczne, zwane często sieciami Kauffmana, do wyjaśnienia różnorodności komórek tkanek mimo tego samego genomu. Propozycja ta została zauważona dopiero po dekadzie przez nie biologów. Węzeł takiej sieci realizuje funkcję logiczną sygnałów zero-jedynkowych pojawiających się na jego wejściach. Wartość funkcji jest stanem węzła, który jako sygnał wyjściowy podawany jest na wejścia innych węzłów. Połączenia węzłów, zwane linkami⁹, mają zwrot zgodny z kierunkiem przepływu sygnału. Są to więc sieci skierowane. Kauffman rozpatrywał sieci autonomiczne (nie kontaktujące się z otoczeniem), skończone (o skończonej liczbie węzłów) i deterministyczne (których kolejne stany węzłów są jednoznacznie wyznaczone). Typowy sposób liczenia sieci, w którym stany węzłów z jednej chwili jako sygnały na wejściach są podstawą obliczenia stanów w chwili następnej, nazywa się synchroniczny, tu kolejność obliczania węzłów nie ma znaczenia.

⁸ Ten artykuł jest tu w postaci z marca 2016, jaki posiadał przed poprawkami redakcyjnymi (do których nie doszło), a po pozytywnej recenzji i drobnych poprawkach sugerowanych przez recenzenta. Redakcja poinformowała mnie w maju, w chwili przekazania Tomu 4 FiN do druku o zerwaniu umowy i nie publikowaniu tego i dalszych odcinków *Szkicu*. Wycofałem więc nadmierne skróty wymuszone i zaakceptowane przez redakcję i po szybkim położeniu na viXra poproszę redakcję o umieszczenie linku jeszcze w Tomie 4 FiN. Planuję dalej jeszcze przynajmniej dwa odcinki, które także położę na viXra, a linki do nich wskażę na mojej stronie <https://sites.google.com/site/andrzejgecow/home>.

⁹ Zwanym także – krawędzią, łukiem. Sieć też ma synonim – graf, w którym węzły nazywane są wierzchołkami.

Sieć określona jest przez podanie wszystkich połączeń (struktury), funkcji dla każdego węzła i wszystkich stanów węzłów (stanu sieci).

Ponieważ liczba węzłów i wariantów sygnałów jest skończona, a sieć jest deterministyczna, po pewnym skończonym czasie musi powtórzyć się jakiś stan i od tej chwili cyklicznie będzie się on powtarzał wraz ze wszystkimi kolejnymi stanami sieci. Trajektoria tych stanów w przestrzeni stanów sieci to atraktor. Zadając stan sieci wiemy, że po pewnym czasie osiągnie ona jeden z możliwych atraktorów. Zbiór stanów sieci, z których osiągnięty jest dany atraktor to jego basen atrakcji (przyciągania).

Kauffman interpretował sieć jako genotyp, a różne atraktory jako tkanki – warianty jego funkcjonowania. Jego badania (Kauffman 1993) miały charakter statystyczny, skupiały uwagę na własnościach sieci w zależności od jej parametrów, do których należały przede wszystkim:

N – liczba węzłów sieci;

K – liczba wejść do węzła (w większości badań K było stałe dla wszystkich węzłów sieci);

p – prawdopodobieństwo jednego z dwóch wariantów sygnału. Uzupełnia te parametry

k – liczba wyjść z węzła, zwana jego stopniem. Typ sieci wyznaczony jest przez rozkład k .

Jak widać, zwyczajowo duże K i małe k mają inne znaczenia. Dalej wprowadzony będzie jeszcze parametr

s – liczba równoprawdopodobnych wariantów sygnału. Dla sieci logicznych, gdy $p = 0.5$ to $s = 2$, głównie taki wariant był rozważany, ja postuluję dalej $s \geq 2$.

2.2 Podstawowe typy sieci dynamicznych

Wnioski statystyczne wymagały sieci losowych. Przez długi czas badano sieci typu Erdősa-Rényi (1960) (ja stosuję nazwę „ er ” lub samo „ r ”), których powstanie określała reguła: ustalone N węzłów łączone losowo. Na tą losowość nałożony był zwykle jedynie warunek określonego K . Funkcje i stan sieci losowane były osobno. Takie sieci nazwano RBN (Random Boolean Network). Mają one charakterystyczny „dzwonowaty” rozkład stopni węzłów k , ale do 1999 r nie miały praktycznie konkurencji. Barabási i Albert (1999) pokazali, że w przyrodzie i technice, w tym - w Internecie, zwykle występują sieci o innej formule, nazwane *scale-free* (tu - „ sf ” lub samo „ f ”). Mają one regułę wzrostu, w której nowy węzeł przyłącza się do już obecnych w sieci z prawdopodobieństwem proporcjonalnym do stopnia węzła k . Rozkład $P(k)$ jest tu prostą na wykresie log-log. Rozważa się także sieci o mniej skrajnej formule, gdzie nowy węzeł dołączany jest z równym prawdopodobieństwem do każdego obecnego już w sieci. Taka sieć nosi nazwę *single scale* (tu - „ ss ” lub „ s ”), a dla niej $P(k)$ jest prostą na wykresie logarytmicznym. Sieci sf i ss mają ważną własność – mogą rosnać, czego nie potrafi sieć er .

Wszystkie te trzy sieci (er, sf, ss) pierwotnie nie są skierowane, więc do celów badań sieci Kauffmana musiały być odpowiednio przystosowane¹⁰, zwykle także przez ustalenie K .

W poprzednich publikacjach (Gecow 1974, 1975, 2005, 2009b) użyłem do badania tendencji strukturalnych sieci, którą nazwałem „*agregat automatów*” („ aa ”). W niej dla wszystkich węzłów $k=K$ i są stałe, a funkcja daje wynik k -wymiarowy - każdy sygnał wyjściowy może być inny. Jest to sieć szczególnie skrajna więc przeszedłem na badanie sieci Kauffmana, jednak jej skrajność w pewnych okolicznościach pozostała ciekawa. Dla wskazania, które własności są wynikiem k -wymiarowości wartości funkcji, wprowadziłem sieć „ ak ”, która ma nadal $k=K$, ale wartość funkcji jest jednowymiarowa, jest to więc sieć Kauffmana.

¹⁰ Iguchi (2007) nazwy SFRBN dla sf i Exponential-Fluctuation networks EFRBN dla ss . Natomiast Serra et al. (2004a) proponuje dla klasycznych RBN nazwę CRBN.

W rozdz.4.3 i 5.6 jest także mowa o sieciach *sh* i *si*, są to odpowiednio sieci *sf* i *ss* z losowym odejmowaniem węzłów, wcześniej stosowane w moich badaniach tendencji strukturalnych¹¹. Główną modyfikacją opisanych sieci będzie wprowadzenie w rozdz.3 więcej niż dwóch wariantów sygnału ($s \geq 2$).

2.3 Propagacja zaburzenia, równowaga Derridy, przejście fazowe w sieciach losowych

Podstawowym zjawiskiem badanym w sieciach Kauffmana jest propagacja zaburzenia (*damage*), czyli odporność systemu na małe zaburzenie, inaczej – stabilność systemu. Porównuje się system zaburzony z niezaburzonym w kolejnych chwilach, a są to systemy deterministyczne. Wielkość zaburzenia mierzy się liczbą węzłów, których stany w sieci zaburzonej są inne niż we wzorcowej - jest to parametr *A* (od Avalanche¹²). Używa się także parametru *d* - *damage*¹³, gdzie $d=A/N$, (*N* to całkowita liczba węzłów).

W zależności od parametrów systemu damage może statystycznie rosnać lub maleć z czasem. Derrida i Pomeau (1986) wykazali, że dla RBN gdy $p=0.5$ granicą jest $K=2$. Dla $K>2$ damage rośnie do określonego poziomu równowagi (Derrida, Weisbuch 1986) zwanego **równowagą Derridy** (rys.2.2-4), jest to chaos, a dla $K<2$ damage maleje i zanika tworząc stan uporządkowany. Wyznacza to w przestrzeni parametrów systemu raptowne przejście pomiędzy zasadniczo jakościowo innym zachowaniem się systemu, co zostało uznane za przejście fazowe.

Dla p innego niż $p=0.5$ granica między porządkiem i chaosem jest w innym punkcie na osi *K* (rys.2.1). Dokładne wyznaczenie tej granicy było jednym z głównych zagadnień w badaniu różnych wariantów sieci.

Użycie terminu „chaos” dla skończonych sieci bywa podważane, jednak w zakresie tych sieci dobrze odpowiada on typowemu znaczeniu zdefiniowanemu dla rzeczywistego argumentu funkcji (Schuster, 1984). Ogólnie jest to skrajnie duża czułość na warunki początkowe, powodująca, że wyniki bardzo zbliżonych argumentów są całkiem niepodobne.

2.4 Obszar ciekły, gazowy i stały, życie na granicy chaosu i porządku.

Konkretny komplet parametrów sieci Kauffmana stanowi punkt w przestrzeni parametrów systemu. Oprócz parametrów podstawowych *N*, *K*, *p*, zawiera on stany, funkcje i strukturę. W takiej przestrzeni znajdują się wszelkie systemy, także dalej rozpatrywane półchaotyczne. Dostrzeżenie ich specyfiki wymaga jednak rozpatrywania specyficznych korelacji użytych parametrów na niewyobrażalną liczbę sposobów. Kauffman uprościł z konieczności model zakładając losowość stanów, funkcji i struktury, tracąc tym możliwość wskazania miejsc nielosowych, szczególnie odstających od średnich statystycznych. W swoich badaniach inicjował damage zmianą stanu węzła. Uwalniając dowolność na tej osi otrzymywał konkretny zbiór basenów atrakcji i atraktorów. Rozpatrując zmienność dodawał oś czasu, co pozwoliło wskazać „jeziorka aktywności”.

Własności okolic przejścia fazowego nakreślone przez Kauffmana – obszary stały, ciekły i gazowy omówione są dostatecznie we Wstępie. W obszarze ciekłym, gdzie jeziorka w lodzie są już większe i zaczynają się łączyć, zaburzenie ma dużą szansę wygasnąć, a jego rozmiary nie osiągają równowagi Derridy, bo przeszkadza lód. W tym obszarze Kauffman umieszcza życie, ale podstawy tego nie są tak proste.

¹¹ Nazwy wprowadziłem w (Gecow 2010b), ale takie sieci jako warianty *sf* i *ss* stosowane były już w (Gecow 2008,2009b).

¹² Wprowadzone przez Sierra (2004b)

¹³ Stosowano już ten termin w 1994r. Stanowczo odrzucam sugestię wprowadzania terminu polskiego.

Główną podstawą jest analiza charakteru krajobrazu fitness i możliwości ewolucji adaptacyjnej w takim krajobrazie. W tym celu rozważa prostszy model „NK” (Kauffman 1993) pomijając funkcje węzłów. Mamy tu N genów występujących w kilku wariantach, każdy zależy od K spośród pozostałych. Fitness genomu jest sumą fitness każdego genu z uwzględnieniem fitness genów, od których on zależy. Dla małych K , czyli w obszarze „stałym” i „ciekłym”, krajobraz ten zawiera mało gór – z większości genotypów jest ścieżka poprzez pojedyncze mutacje na ich szczyt, a sąsiedzi (osiągani przez pojedynczą mutację) mają fitness bardzo zbliżone, czyli jest ono silnie *skorelowane*. Dla dużych K jest szczególnie wiele lokalnych optimum fitness, krajobraz jest *nieskorelowany* – mutacja zwykle mocno zmienia fitness, a oczekiwana liczba mutacji adaptacyjnych zmniejsza się znacząco po każdym adaptacyjnym kroku.

Zazwyczaj poruszając się nieznacznie w przestrzeni parametrów systemu uzyskuje się nieznaczne zmiany własności, ale są granice, których przekroczenie powoduje radykalne zmiany, np. znika lub pojawia się jakiś basen atrakcji. Dzielą one przestrzeń parametrów na zwykle spore obszary systemów „*stabilnych strukturalnie*” (Thom 1970 za Kauffman 1993) o określonym zachowaniu dynamicznym. W obrębie takiego obszaru system zwykle powraca do poprzedniego atraktora nawet bez zmiany jego fazy.

Ewolucja adaptacyjna to błądzenie po przestrzeni parametrów w poszukiwaniu „dobrego” zachowania dynamicznego. Systemy strukturalnie stabilne ewoluują w krajobrazie skorelowanym, gdzie zwykle łatwo wspinają się na górkę fitness, a chaotyczne, które nie są stabilne strukturalnie – w nieskorelowanym krajobrazie, gdzie mała zmiana zwykle powoduje przejście przez wiele granic zmieniając radykalnie zachowanie systemu - szansa na sukces takiej zmiany jest znikoma, a dla większych fitness – pomijalna. Kauffman dochodzi tak do wniosku, że ewolucja adaptacyjna jest skuteczniejsza w krajobrazie skorelowanym, więc poszukiwania „dobrego” zachowania dynamicznego doprowadzą do brzegu chaosu i porządku, w okolice $K=2$, gdzie stabilność strukturalna jest największa. To właśnie mówi hipoteza Kauffmana: „*życie na granicy chaosu*”. Ale w tym obrazie nie bierze się pod uwagę, że podobne obszary skorelowane z dobrym zachowaniem dynamicznym mogą znajdować się w innych obszarach przestrzeni parametrów systemu, których model z takimi założeniami wskazać nie może.

Hipoteza Kauffmana podparta jest badaniami realnych mutacji w rzeczywistym genomie *Saccaromices cerevisiae* zawierającym $N = 6312$ genów, gdzie wyłączano po jednym 227 genów (Hughes i współaut. 2000). Obserwowaną tu stabilność interpretuje się (Wagner 2001, Serra i współaut. 2004, 2007, Rämö i współaut. 2006) jako potwierdzenie, że $K=2$ w modelu regulacji genowej opartej na sieci Kauffmana. Nie bierze się jednak pod uwagę, że każdy organizm żywy ma wiele mechanizmów regulacyjnych na wypadek awarii.

Przy zastosowanych założeniach nie można odmówić słuszności wnioskowi, że ewolucja dąży do tego obszaru, można jednak powątpiewać w realne możliwości wyboru w tym zakresie oraz w poprawność interpretacyjną owych założeń – model wydaje się nieadekwatny do stawianych pytań.

Podstawowymi zastrzeżeniami rozwijanymi dalej w tym artykule są:

- Przyjęcie jedynie dwóch wariantów sygnału do badań statystycznych jest zbyt grubym przybliżeniem, istotnie wpływającym na wnioski.
- Systemy żywe (rozmaite nie wyspecyfikowane parametry systemów opisujących obiekty żywe) nie są losowe w aspekcie stabilności, jak to zakłada model, a zauważone regulacyjne sprzężenia zwrotne nie są uwzględnione w nim w odpowiedni sposób. W wyniku charakterystyczna dla życia aktywna homeostaza zostaje obciążona do pasywnych własności parametrów sieci. Ta myśl była punktem wyjścia badań, ale nie potwierdziły one

spodziewanego znaczenia aktywnej homeostazy, a wskazały bardziej adekwatny dla życia specyficzny stan półchaosu systemów w zasadzie chaotycznych.

Oba te podstawowe zastrzeżenia, a następnie badania półchaosu rozwinięte będą w kolejnych trzech rozdziałach. Zanim jednak do tego przejdę, przedstawię intuicyjne podstawy mojego przeświadczenia, że obiekty żywe powinny być opisane siecią o parametrach chaosu – lawina destrukcji (damage) powinna w nich spontanicznie rosnać.

2.5 Podstawy oceny, że obiekty żywe są z natury chaotyczne

Jeżeli zdarzy się rzeczywiście przypadkowa zmiana, w przeciwieństwie do zdarzeń, na które system jest przygotowany, wtedy z dużym prawdopodobieństwem oczekujemy sporej lawiny awarii prowadzącej do zapaści systemu. Zwykle systemy budowane przez człowieka mają na taką okoliczność przewidzianych wiele zabezpieczeń, które w najgorszym razie przynajmniej pozwolą uratować wiele cennych elementów systemu. Trudno więc o w pełni nieprzewidzianą awarię (I.3.4.4). Oczekiwanie sporej zmiany funkcjonowania, to ocena, że system ma parametry chaotyczne według znaczenia, jakie stosuje Kauffman. Stosując pojęcie współczynnika rozmnażania zmiany w wprowadzone w rozdz.3.3 szacujemy, że $w > 1$. Tak też szacował Darwin tłumacząc, że wcześniejsze zmiany rozwojowe dają większe zmiany fenotypu, co częściej jest letalne.

Gdyby był to system uporządkowany, to nawet bez owych zabezpieczeń oczekivalibyśmy, że z dużym prawdopodobieństwem samo wszystko wróci do normy. Kauffman (1993) przytacza wyniki badań stanu uporządkowanego (więc stabilnego strukturalnie), gdzie powrót do tego samego atraktora po małym zaburzeniu (tzw. przez niego „*stabilność homeostatyczna*” atraktorów) zachodzi w około 80 do 90%.

Systemy żywe i wykonane przez człowieka są stabilne, ale w przypadku systemów sztucznych my, jako konstruktorzy wiemy, ile włożyliśmy zabezpieczeń, na jakie okoliczności i zazwyczaj mamy nadzieję, że zabezpieczyliśmy dzieło przed większością niespodzianek. Oceniamy więc zbiór sytuacji nieprzewidzianych jako mało istotny. W przypadku obiektów żywych zabezpieczenia konstruuje dobór naturalny, ale daje się je zauważyć. Panuje powszechna zgoda, że jest tu obserwowane szczególnie duże nagromadzenie regulacyjnych sprzężeń zwrotnych. Stało się to nawet podstawą definicji życia zaproponowanej przez Bernarda Korzeniewskiego (2001, 2005). Sytuacja nieprzewidziana zachodzi, gdy regulator wychodzi poza zakres swojej poprawnej pracy. Samochód ma hamulce, ale gdy przeszkoda zaistnieje bliżej, niż droga hamowania... to ratują nas poduszki pneumatyczne. Proces życia ma też zawsze gotowy ratunek na wypadek nieprzewidzianych sytuacji – rozmnażanie: „ten miał pecha, ale drugiemu nie musi się to przydarzyć”.

Uświadamiając sobie te fakty trudno zgodzić się z postulatem Kauffmana, że stabilność obserwowana w obiektach żywych wynika z ich usytuowania w obszarze systemów uporządkowanych i to systemów powstałych losowo. Problem ujemnych sprzężeń zwrotnych będzie jeszcze dyskutowany w rozdz. 4.1.

Myślę, że przekonałem Czytelnika, ale jeżeli nie, to i tak zmieni On zdanie, kiedy stanie przed koniecznością operacji chirurgicznej i zauważy, że chirurg chyba jest pod wpływem alkoholu... Wtedy nie zawierzy Kauffmanowi, że przecież niezależnie, jak chirurg będzie machać skalpelem operując serce, to i tak w wyniku „stabilności homeostatycznej” spontanicznie oferującej porządek za darmo, operacja powiedzie się z prawdopodobieństwem 80%. (Tu jednak przesadziłem z tym małym zaburzeniem, choć na rys.2.4 zwanym „Derrida plot” widać, że system uporządkowany zmniejsza damage do zera niezależnie od początkowej wielkości...)

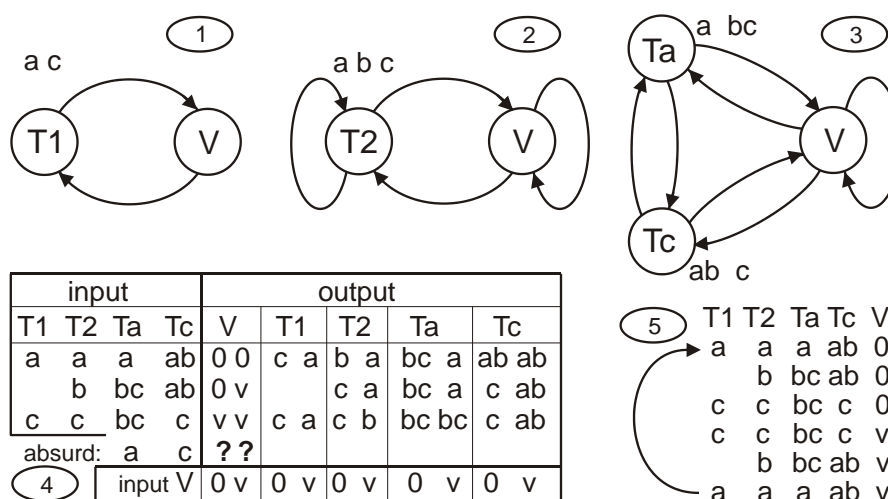
3 Do badań statystycznych nie wystarczą 2 stany sygnału

Powszechnie uważa się, że sieci logiczne mogą opisać każde działanie i w zasadzie jest to prawda, ale badając losowe sieci logiczne Kauffman wyciąga ogólne wnioski statystyczne. Czy jest to uzasadnione? W głównych badaniach zakłada on jednakowe prawdopodobieństwo obu wariantów sygnału. Jako następne przybliżenie tak uproszczonych założeń wprowadza się zróżnicowane prawdopodobieństwo sygnałów logicznych: p i $1-p$. Czy wyczerpuje to najważniejsze drogi kompensowania zbytnich uproszczeń?

W tym rozdziale przekonywać będę, że przynajmniej dodać należy „ $s \geq 2$ ”, czyli większą niż jedynie 2 liczbę jednakowo prawdopodobnych wariantów sygnału, co pozostawia podobny poziom uproszczenia, jak w przypadku użycia p . Wykażę, że jest to podejście nie sprowadzalne do opisu p i będę agitował, że jest od niego bardziej adekwatne w badaniach statystycznych.

Sieci logiczne (Boolowskie) i sieci Kauffmana, to obecnie jeszcze synonimy. Zachowując ich konstrukcję i zwiększając jedynie liczbę wariantów sygnału przestają być logicznymi, ale uważam, że należy pozostawić dla nich nazwę „sieci Kauffmana”. Takie sieci nazwałem w (Gecow 2011) RSN¹⁴, i włączam do nich agregat automatów, który nie jest siecią Kauffmana.

3.1 Przykład lodówki – sieci logiczne nie zawsze są adekwatne



Rys.1. Termostat chłodziarki opisany siecią Kauffmana w pełny i adekwatny sposób (2) oraz sieciami logicznymi (1,3). Opisy logiczne albo nadmiernie upraszczają: (1) nie posiada stanu b , w którym chłodziarka w rzeczywistości przebywa najdłużej; albo wprowadzają nieistniejące ($a + c$) sytuacje (3), które w badaniach statystycznych też wprowadzają fałsz. W adekwatnym opisie (2) temperatura $T2$ ma 3 stany: a – za zimno; b – poprawna; c – za ciepło, ale nie są to stany logiczne. Węzeł V opisuje zasilanie agregatu, jego stan jest logiczny: v – włączony; 0 – wyłączony. Dołączone są tabele funkcji (4) oraz cykle stanów (5). Cykl rozpoczyna stan $T=a$ „za zimno” z wyłączonym zasilaniem $V=0$. Temperatura rośnie, przyjmuje stan b , gdyż w (4) input $T2=a$ (z lewej), $V=0$ (u dołu); output dla $T2:=b$ (z prawej). Lub w formie: $T2(T2=a, V=0)=b$. W następnej chwili temperatura urosła do $T2=c$, ale włączenie następuje dopiero w chwilę później.

Aby wykazać, że ograniczenie się do dwóch logicznych wariantów sygnału wprowadza w opisie zjawisk istotne deformacje, które powinny mieć wpływ na poprawność wniosków statystycznych, rozważmy najprostszy układ regulacyjny, jakim jest termostat chłodziarki. Jak widać na rys.1, opis siecią logiczną jest możliwy, ale nie jest on w pełni adekwatny do badań

¹⁴ Pełna nazwa: ‘Random equally probable Signal variants Network’ jest nieco długa...

statystycznych, gdyż pojawiają się w nim sytuacje niemożliwe lub brak jest jakiegoś ważnego stanu. Nie jest to wyjątek, takich przykładów można znaleźć mnóstwo. Jest to silna przesłanka użycia $s \geq 2$ do badań statystycznych sieci Kauffmana.

Oczywiście, bardziej poprawny byłby opis ze zróżnicowanymi prawdopodobieństwami, ale dla jakościowych badań statystycznych chyba przesadnie dokładny. Przynajmniej należy sprawdzić, czy model uproszczony z jednakowo prawdopodobnymi wariantami sygnałów da coś innego, niż dotychczasowy. Potrzeba zastosowania większej liczby wariantów sygnału była zauważana także przez innych¹⁵, ale nie były to propozycje podobnie ogólne.

3.2 Dwa warianty są często subiektywne (nasz i reszta)

Logika służy zwykle do podejmowania decyzji. W opisie sytuacji zwracamy uwagę na elementy istotne, a nieinteresujące usuwamy uproszczyć. Typową procedurą jest zwrócenie uwagi na jakiś istotny wariant stanu, a pozostałe warianty wkładamy do wspólnego stanu „nieinteresujących”. Tak właśnie można interpretować utworzenie węzłów Ta i Tc na rys.1.3. Nawet, gdy wszystkie te warianty mają podobne prawdopodobieństwa i w skomplikowany sposób uczestniczą w funkcjonowaniu obserwowanego systemu, to w naszym obrazie mamy dwa warianty – interesujący z małym prawdopodobieństwem p i nieinteresujący z dużym $1-p$. Nie przewidujemy funkcjonowania systemu, jedynie śledzimy interesujący stan pewnego sygnału. To wyrabia nam intuicję opisu systemu, ale nie jest ona adekwatna do badań statystycznego zachowania się tego systemu, bo to zachowanie nie zależy od tego, co w nim nas subiektywnie interesuje, a jakie są jego obiektywne wewnętrzne uwarunkowania. Dlatego użycie przybliżenia opartego na p jest znacznie rzadziej adekwatne, niż wskazują na to nasze intuicje wynikłe z przyzwyczajień.

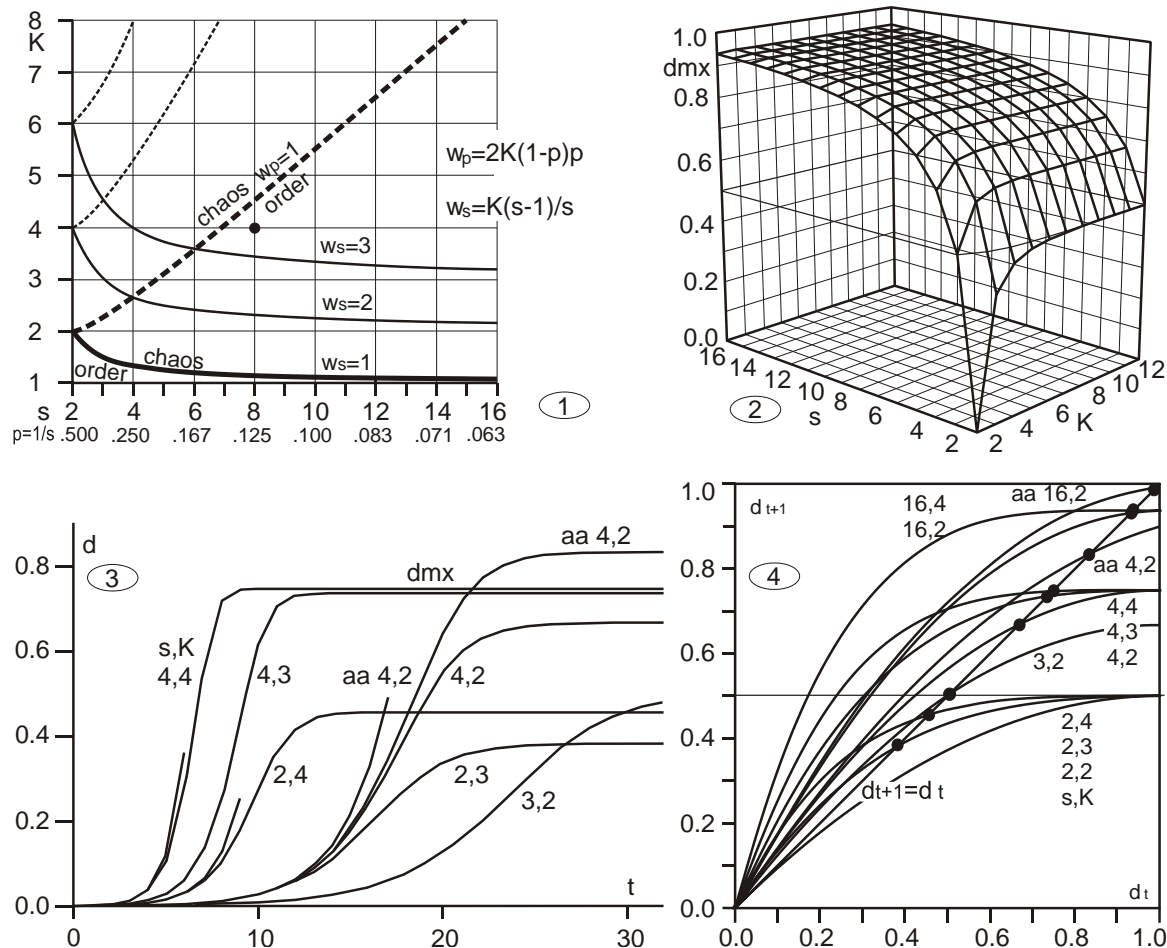
3.3 Współczynnik rozmnażania zmiany w , opisy p i s nie są zamienne.

Do interpretacji propagacji zmiany w sieci szczególnie wygodny jest współczynnik rozmnażania zmiany na jednym węźle, gdy zmianie ulegnie sygnał na jednym z jego wejść: $w = \langle k \rangle (s-1)/s$ (gdzie $\langle k \rangle$ to średnie k). Wprowadziłem go już w (Gecow 1975). Gdy $w > 1$ zmiana rośnie, więc system jest chaotyczny, a gdy $w < 1$ – maleje, co jest cechą systemu uporządkowanego. Dotyczy to początkowego stadium, gdy lawina jest jeszcze mała, dopóki prawdopodobieństwo zmiany na więcej niż jednym wejściu jest jeszcze małe. Wzrost lawiny z czasem t w tym krytycznym okresie zbliżony jest do w^t , co przedstawione jest na rys.2.3. Oczywiście, jest to statystyczna wielkość opisująca sieć, ale wygodnie jest śledzić to na pojedynczym węźle sieci ak , gdzie k jest jednakowe dla wszystkich węzłów sieci. Ponieważ Kauffman i ja badamy sieci o ustalonym K , a $\langle k \rangle = K$ dla sieci autonomicznych, wygodnie jest widzieć ten współczynnik w formie: $w = K(s-1)/s$.

Z tego ujęcia widać od razu, że $K=2$ dla $w=1$ gdy $s=2$, co wskazuje przejście fazowe między porządkiem i chaosem. $K=1$, jako jedyne $K < 2$ jeszcze sensowne (ale w sieci zredukowanej do łańcucha) wydaje się poza zakresem zainteresowania. W tej sytuacji, $w \leq 1$ występuje jedynie dla $s=2$ i $K=2$, co jest skrajnością. W zasadzie trudno więc oczekiwać, że rzeczywista sieć będzie uporządkowana. Może to się zdarzyć dla sieci logicznej, gdzie $p \neq 0.5$, (rys.2.1) i małych K , co wskazali Derrida i Pomeau (1986) wzorem $2K_c p(1-p) = 1$ poszukującym krytycznego K_c dla sieci logicznych. Wartość $2K p(1-p)$ o podobnej interpretacji do współczynnika w była zauważona i używana przez wielu badaczy XXI w.

¹⁵ Luqule i Sole (1997) wprowadzili sieć RNS, Luqule i Ballesteros (2004) sieć RWN, ale sieci te były dedykowane do konkretnego zagadnienia, ich założenia nie są tak proste i nie są ogólną propozycją jak moje RSN (Gecow 2011).

Zakładając, że jeden z s wariantów sygnału jest „interesujący”, a pozostałe można zamknąć w drugim sygnale logicznym „nieinteresujących”, mamy $p = 1/s$. Wtedy jednak $2Kp(1-p) = 2K(s-1)/s^2$ i zgodność z $w = K(s-1)/s$ występuje jedynie dla $s=2$, co także widać na rys.2.1. Zgodność była by pełna, gdyby 2 przed K zastąpić przez s . Czyli opis s wariantowy nie jest sprowadzalny do logicznego opartego na p .



Rys.2. (1) - Wartość współczynnika rozmnażania zmiany w_s dla s i K (ciągła krzywa) oraz podobna wartość w_p używana dla p i K w sieciach logicznych (przerywana). Granica, gdzie wartości te są równe 1, to przejście fazowe między porządkiem (order) i chaosem. W punkcie $s=2$ $w_p = w_s$. Skala $p=1/s$ pod skalą s odpowiada wartościom s , jednak oba diagramy różnią się zasadniczo, więc opis zjawiska s – wariantowego przez wskazanie wariantu „interesującego” i „nieinteresującej” reszty w drugim stanie logicznym, nie jest dopuszczalny w takich badaniach. Zaznaczony tu punkt $s, K=8,4$ w opisie p jest uporządkowany, a w opisie s – silnie chaotyczny. (2) – **Wartość maksymalnego d (dm_x)** czyli poziomu równowagi Derridy w zależności od s, K . Zaznaczono $dm_x=0.5$, jak widać, tylko dla $s=2$ dm_x jest pod tym poziomem, a przypadek $s, K=2,2$ jest szczególnie wyjątkowy, a zatem ograniczenie badań statystycznych do $s=2$ to ograniczenie do skrajnie wyjątkowego obszaru, jakościowo odmiennego od reszty. (3) – Przebiegi czasowe eksplozji damage w sieciach chaotycznych wyliczone z modelu „*annealed approximation*” Derridy. Podano przy krzywych parametry s, K . Sieć *aa* wyróżniono dopisując *aa*. Trzy krótkie krzywe to przybliżone przewidywania początku eksplozji przez w^t . (4) „*Derrida plot*” uzupełniony dla $s > 2$. Pokazuje on zmianę wartości damage w jednym kroku czasowym wyliczoną na podstawie *annealed approximation*, jak w (3). Poziomą równowagę Derridy to przecięcie krzywych z przekątną $d_{t+1} = d_t$. Do tego punktu zbiega proces z każdego innego położenia na krzywej, po lewej na (3), są to stany nasycenia dm_x . Całe $s, K=2,2$ znajduje się pod przekątną i $dm_x=0$. Na (4) parametr s okazuje się wyraźnie ważniejszy od K , co podobnie widać na (2).

Aldana (2003) na podstawach interpretacyjnych rozważał $s > 2$ i skłaniał się do oczekiwania $K > 2$, ale zakładał słusność hipotezy Kauffmana „życie na granicy chaosu”, więc używając wyrażenia: $K_c(s-1)/s=1$ odrzucił możliwość $s > 2$, gdyż K_c było za małe.

3.4 Poziomy równowagi Derridy dla $s > 2$ są znacząco wyżej

Zależność rozmiaru damage po jednym kroku przedstawia rys.2.4 zwany „*Derrida plot*”. Wyliczenie dla losowych sieci logicznych przedstawili Derrida i Weisbuch (1986) na podstawie uproszczonego modelu zwanego „*annealed approximation*”. Dla $s > 2$ oraz dla sieci *aa* wyliczyłem te krzywe w (Gecow 2011) powtarzając ich rozumowanie. Przecięcie krzywej z przekątną $d_{t+1}=d_t$ wskazuje poziom *dmx* trwałej równowagi Derridy, do której dąży damage z dowolnego miejsca na krzywej o określonych parametrach s, K . Szczególną uwagę wszystkim zwrócił przypadek $s, K = 2, 2$, dla którego krzywa nie ma innego punktu wspólnego z przekątną, niż 0. Znaczy to, że dla takiego systemu damage zanika. Oczywiście interpretacja tego uproszczonego modelu ma swoje granice, ale przypadek $s, K = 2, 2$ to akurat system na granicy przejścia fazowego. Każdy inny system ma równowagę Derridy na znacznie wyższym poziomie (rys.2.2), tym większym, im większe są s i K , szczególnie parametr s . Przypadek $s=2$ okazuje się w całości wyjątkowy – *dmx* nie przekracza tu połowy, gdy dla wszystkich pozostałych s jest wyraźnie powyżej połowy. Jak widać na rys.2.4, K przestaje wpływać na wartość krzywej dla $d_t = 1$, a dla większych s przekątna także zbliża się do tego boku kwadratu, więc *dmx* ma zbliżoną wartość dla różnych K . **Parametr s okazuje się więc w tym przypadku znacznie ważniejszy od K .**

Na rys.2.3 przedstawione są czasowe przebiegi wzrostu damage w sieciach chaotycznych, wyliczone z modelu *annealed approximation*. Ich prawe końce są już w większości na poziomie równowagi Derridy, a to dopiero 30 kroków czasowych. Z lewej strony dodano krótkie początkowe odcinki eksplozji wyliczone z prostego w^t , co pokazuje siłę przewidywania tak prostego parametru, jak współczynnik rozmnażania zmiany.

4 Różne spojrzenia na homeostazę

4.1 Homeostaza a porządek za darmo

Obiekty żywe prezentują duży stopień homeostazy, co zauważają wszyscy. Korzeniewski (2001, 2005) oparł na tym nawet definicję życia. Zazwyczaj rozumie się homeostazę jako wynik działania regulacyjnych, tj. ujemnych sprzężeń zwrotnych. Kauffman¹⁶ nazywa taką szczególną formę „*ultrastabilnością*”, a ogólną postać określa mianem „*stabilność homeostatyczna*” i definiuje ją na podstawie samych skutków jako odporność systemu na zaburzenia. W przypadku losowych systemów złożonych opisanych sieciami Kauffmana taka „*stabilność homeostatyczna*” występuje w zakresie systemów uporządkowanych i wynika nie z aktywnej korekty sytuacji, a z pasywnych własności dynamiki. Ten aspekt dyskutowany był już w rozdz.2.5. Umieszczając życie także w tym obszarze, Kauffman uważa, że stabilność homeostatyczną obiekty żywe mają w dużej części daną za darmo, jako wynik samoorganizacji spotykanej w systemach nieliniowych, takiej np. jak solitony, czy komórki Bénarda¹⁷. Jest zafascynowany odkrytym przez siebie¹⁸ spontanicznym powstawaniem

¹⁶ Na podstawie (Kauffman 1993). Dyskutowane tu zastrzeżenia przedstawiłem już w (Gecow 2010a rozdz. 1.2.2; 2011 rozdz. 1.2.3).

¹⁷ Zarówno solitony, jak i komórki Bénarda szerzej opisuje Tempczyk (2002).

¹⁸ „Odkryliśmy, że w procesie ewolucji życia bardzo złożone układy mogą mieć dynamikę zbieżną zamiast rozbieżnej. Dynamika rozbieżna jest wrażliwa na warunki początkowe. Dynamika zbieżna oznacza, że nawet przy odległych od siebie punktach początkowych stany finalne są zbliżone. Jest to fundamentalna zasada homeostazy, lub odporności na zakłócenia, która stanowi naturalną własność wielu układów złożonych. Nie

porządku w sieciach Kauffmana, co ujął to w haśle „*porządek za darmo*” (Kauffman 1996, Brockman 1996), a wcześniej w książce (Kauffman 1993) jest to podstawowa teza wskazana podtytułem: „Samoorganizacja i selekcja w ewolucji”.

Kauffmanowskie pojęcie porządku stosowane do obiektów żywych ma dwa aspekty, które pozwala rozróżnić teoria informacji celowej z pierwszego odcinka *Szkicu*. Jest to rozróżnienie informacji ogólnej – wyjątkowości wyboru np.: budowy kryształu, od informacji celowej – wyjątkowości wyboru przyczyny do wcześniej wskazanego skutku. Kauffman wskazuje na porządek (samoorganizację) – wynik nieliniowego charakteru systemu, jako na tą część, która nie wynika z mechanizmu darwinowskiego. Ma w tym rację, ale też nie jest informacją celową, która w przypadku obiektów żywych jest kolekcjonowana do celu „istnieć nadal”, czyli do stabilności. To właśnie nagromadzenie tej informacji celowej, zazwyczaj występującej w formie ujemnych sprzężeń zwrotnych, daje główną część stabilności, a jak wynika z rozważań w (I.2.3.3) kolekcjonuje ją właśnie mechanizm darwinowski.

Traktowanie spontanicznego powstania porządku „niecelowego” jako generowanie informacji ogólnej także wymaga ostrożności przy wyborze zbioru dostępnych możliwości, co wiąże się z zakresem możliwych wyników procesu. Jednym z głównych przykładów tego porządku podanych przez Kauffmana jest spontaniczne ograniczenie się systemu uporządkowanego do małej liczby atraktorów, i to krótkich, w porównaniu z liczbą dostępnych stanów. Przestrzeń stanów posiada ogólnie 2^N elementów, natomiast gdy $K=N$ atraktorów jest tylko około N/e , czyli dla $N=200$ tylko 74 atraktorów a dla $N=10\ 000$ tylko 3700. Co prawda, są one długie, średnio $0.5 \cdot 2^{N/2}$. Dla $K=2$, gdzie znajdują się obiekty żywe, to ograniczenie jest istotnie większe, w 1993r uważano, że liczba i długość atraktorów jest tu około $N^{1/2}$, dziś wiadomo, że jest nieco większa, ale nadal bardzo mała. Dlaczego jednak Kauffman porównuje liczbę i długość atraktorów do liczby dostępnych stanów, jeżeli wie, że ma być ich istotnie mniej? Według mnie, wybiera zbiór możliwości subiektywnie.

Jest to ten sam rodzaj porządku, jaki pojawia się w kryształach czy płatkach śniegu. Przecież nie wkładamy do zbioru możliwości, z których wybiera kształt śnieżynka, kwadratu ani elipsy, jednak znalezienie na Marsie stalowego koła zębatego o sześciu zębach, mimo podobieństwa do płatków śniegu, wywołałoby sensację, gdyż wydaje się nam, że nie istnieje spontaniczny proces o takim skutku i należałoby przyjąć celowe wykonanie tego koła zębatego, bo wiemy, do czego mogłoby się przydać. Informacji celowej w kryształach nie ma (chyba, że jest oszlifowany), ale jest informacja i porządek ogólnego typu, które są wynikiem spontanicznego procesu, „za darmo”. Nawet jednak taki proces nie generuje informacji, a jedynie ją przekształca, co widać gdy ciecz jest przechłodzona, bo nie ma informacji, gdzie i jak zacząć krystalizację.

4.2 Systemy żywe nie są losowe w aspekcie stabilności, ujemne sprzężenia zwrotne

W tym podrozdziale skupię się na wykazaniu, że w modelu Kauffmana ujemne sprzężenia zwrotne nie są uwzględnione tak, jak on sam uważa.

Aby utrzymać stan specyficzny, tzn. nie stan typowy lub spontaniczny, potrzebny jest jakiś mechanizm stabilności, który blokuje spontaniczne przejście do bardziej prawdopodobnego stanu „typowego, spontanicznego”. Informacja celowa jest właśnie takim specyficznym stanem, który może zostać zgubiony, więc potrzebuje specjalnych mechanizmów do zabezpieczenia jej dalszego funkcjonowania, a to sprowadza się do utrzymania w zbliżonej

wiedzieliśmy tego do niedawna. Odkryłem to 25 lat temu przyglądając się temu, co obecnie nazywa się modelami Kauffmana – przypadkowym sieciom, ujawniającym to, co nazwałem „porządkiem za darmo”. Jest to istotny cytat z artykułu Kauffmana „Porządek za darmo” ze str. 461 w znanym zbiorze Brockmana (1996) „Trzecia kultura”. Oryginał tego zbioru wyszedł na rok przed książką Kauffmana (1996), w której nieco rozwija ten temat w rozdziale o takim samym tytule.

postaci aktualnego stanu, wraz z jego rozmaitymi parametrami. Takie zadanie wykonują ujemne sprzężenia zwrotne, zwane regulacyjnymi. Są one także informacją celową. W ewolucji obiektów żywych o ich dalsze funkcjonowanie w zbliżonej formie dba darwinowski dobór naturalny poprzez gromadzenie mechanizmów regulacyjnych. Powszechnie obserwowane szczególnie duże nagromadzenie w obiektach żywych ujemnych sprzężeń zwrotnych stało się nawet podstawą definicji życia proponowanej przez [Korzeniewskiego \(2001, 2005\)](#). Obiekty żywe nie są więc losowe w aspekcie stabilności, tzn. ich struktura w powiązaniu z funkcjami i stanami jest specyficzna i funkcjonuje wyjątkowo.

Kauffman zdawał sobie sprawę z konieczności specjalnego potraktowania ujemnych sprzężeń zwrotnych, które wydzielił ze „*stabilności homeostatycznej*” jako „*ultrastabilność*”, i poświęcił temu tematowi sporo miejsca w swojej podstawowej książce ([Kaufman 1993](#)). Oparł się w tym na koncepcji „*essential variable*” (istotnych zmiennych) ([Ashby 1960](#)), czyli najważniejszych parametrów, które są w kontrolowany sposób utrzymywane w wąskich granicach. Wkładając je do modelu stwierdził: „**W zakresie sieci logicznych, utrzymywanie ważnych zmiennych w zakresach odpowiada wprost ustaleniu ich**” (str.211 w [Kauffman 1993](#)). Opis taki dotyczy więc skutków, a nie przyczyn w postaci mechanizmów stabilności. Później szukając systemu z obszarem zamrożonym znajduje go w pobliżu przejścia fazowego. W obszarze uporządkowanym obszary lodu perkoluja pozostawiając w środku małe izolowane jeziora aktywności, co prowadzi do „stabilności homeostatycznej”. Można to uznać za dodatkową przyczynę, ale w jego rozumowaniu zastępuje ona zignorowaną przyczynę podstawową, jest jakby „zastępczą matką po odebraniu praw matce właściwej”.

Sprawdźmy to założenie wracając do przykładu termostatu chłodziarki – cały opis funkcjonowania rozpatrywany na rys.1 zastąpiony byłby ustalonym parametrem T w stanie b . Drugim logicznym stanem T byłby stan (a lub c), czyli zgodnie z podważaną w rozdz. 3.2 regułą stan „nieinteresujący”. Natomiast **cały mechanizm termostatu wykorzystujący różnicę między a i c , nie istnieje w takim opisie, nie może się popsuć ani wyjść z zakresu poprawnego działania. Należy uznać, że przyjęty przez Kauffmana opis regulacyjnych sprzężeń zwrotnych ogranicza się jedynie do ich skutku, a cały ich złożony mechanizm został z założenia pominięty w badanej statystycznie sieci. A można oczekiwać, że stanowiąc on powinien zasadniczą część tej sieci. Model jest więc zanedbany i przez to nieadekwatny. Ponadto uproszczenia dotyczą właśnie mechanizmów stabilności, które miał badać model, przez co wnioski nie mogą być miarodajne.**

Podobny problem dotyczy przytoczonego w rozdz. 2.4 doświadczenia ([Hughes i współaut. 2000](#)) na żywym organizmie z blokowaniem genów. Tam też w interpretacji pominięto aktywne mechanizmy homeostazy, które posiada każdy żywy organizm.

Zaistniała tu konstrukcja przypomina zabieg marketingowy promujący marny substytut wartościowego produktu: negacja głównych źródeł wartości, wskazanie innych źródeł powierzchownie podobnych własności, i agitacja o wiele niższą ceną. W wyniku marka „Darwin” traci¹⁹ klientów na korzyść producenta bubli.

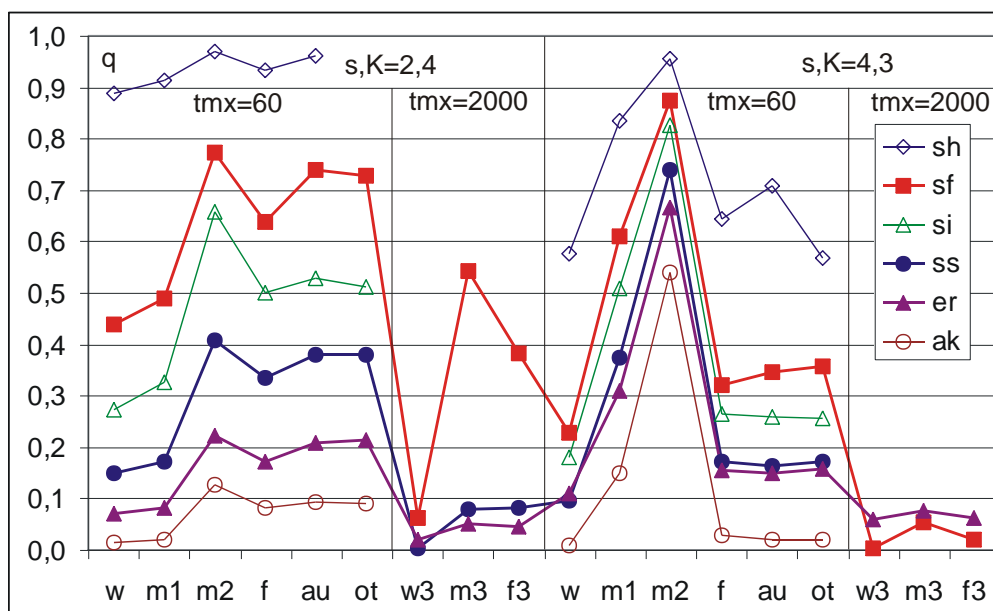
4.3 Ujemne sprzężenia zwrotne, badania symulacyjne met1,2

Przedstawiona krytyka interpretacyjnych podstaw modelu Kauffmana powinna zostać uzupełniona pokazaniem, że w systemach złożonych o parametrach chaotycznych (tzn. z $w > 1$), zbudowanych nie w pełni losowo, można osiągnąć odpowiedni dla ewolucji życia silnie podwyższony poziom stabilności. Przewidywano, że wystarczą do tego ujemne sprzężenia zwrotne w odpowiednim „stężeniu”.

¹⁹ „Wcale nie sądzę, że Darwin się mylił. Dobór naturalny jest główną siłą ewolucji, są jednak składniki ewolucji, których Darwin nie mógł prawidłowo uchwycić”. [Artykuł Kauffmana na str.464 w \(Brockman 1996\)](#)

W symulacji poniżej założono, że struktura losowa zawiera dostatecznie dużo sprzężeń zwrotnych, które da się zmienić na ujemne. Ograniczono się do doboru funkcji, pozostawiając losowe stany początkowe i strukturę połączeń. Po losowym wygenerowaniu sieci o zadanych parametrach N , s, K i *typie*, określającym połączenia, funkcje i stany początkowe, **zapisywano trajektorię tmx kroków**. Następnie kolejno w każdym węźle inicjowano permanentną (dla danego zaburzenia na całe tmx) **zmianę „punktową” funkcji** (tylko dla początkowego stanu wejściowego), kolejno na wszystkie pozostałe możliwe wartości. Jest to komplet $(s-1)N$ inicjacji. Po inicjacji mierzono w punkcie tmx liczbę A węzłów o zmienionym stanie względem wzorca. Małą zmianę wynikową definiuje $A < próg$ (tu $próg=60$). Stabilność zmierzona w komplecie inicjacji to $q = (\text{liczba małych zmian}) / ((s-1)N)$.

Jeżeli węzeł dostał nieużywany dotąd stan wejściowy, to funkcji przypisywano wartość zgodną z wzorcem. Korekty były uwzględniane, a ich stany wejściowe zaliczane do używanych, jedynie gdy dały $A < prog_u$. **Metoda 1 (met1)** nie zmieniająca wzorca okazała się zbyt słaba. W **met2** budowano system rekurencyjnie, po 10 kolejnych kroków t . Po korekcie liczono nową trajektorię już skorygowanym systemem (co dawało więcej nieużywanych stanów wejściowych) i ponawiano procedurę korekty, aż do tmx . Dla $s, K=2,4$ wszystkich stanów wejściowych węzła jest $2^4=16$ a dla $s, K=4,3$ jest ich więcej: $4^3=64$.



Rys.3. Porównanie stopnia porządku q uzyskanego w met1 (m1) i met2 (m2) do systemu losowego (w – od „wild”), efektu samego zwężenia funkcji w met2 (f) i wyników algorytmu reversed-annealed (al.r-a) w wersji autonomicznej (au) i otwartej (ot); dla różnych typów²⁰ sieci stosowanych wcześniej z użyciem al.r-a. Najważniejsze z nich to sf-scale free, ss-single scale, er-Random Erdős-Rényi. Dalej badane są głównie *er* i *sf*, oraz *ss*. Wyniki w, m1, m2, f są dla $tmx=60$, 400 sieci z $N=400$. Wyniki dla 20 sieci po $N=4000$ węzłów są praktycznie identyczne. Dane dla ‘au’ także dla $N=400$, tylko ‘ot’ z $N=4000$, jednak to porównanie z wynikami al.r-a traci na wartości po wyznaczeniu zależności od tmx co obrazują dla $tmx=2000$ wyniki dla losowego (w3), met2 (m3), funkcji po met2 (f3).

Badane były sieci o $N=400$ i 4000 , *typu sh,sf,sh,ss,er,ak* gdzie *sh* i *sh* to *sf* i *ss* z 30% losowym odejmowaniem węzłów, gdyż takie badane były wcześniej w moich pracach

²⁰ Na rysunkach często stosowano tylko drugą literę nazwy typu sieci. Patrz rozdz.2.2. Typy *sh* i *si* to sieci *sf* i *ss* z odejmowaniem losowym. Były one konieczne w badaniach tendencji strukturalnych (Gecow 1974-2011), do których opracowano al.r-a. Założeniem tego algorytmu było $w > 1$, czyli sieć o parametrach chaotycznych, które ma być podparte omawianymi badaniami.

(Gecow 2010a,2010b,2011) algorytmem „*reversed-annealed*” (**al.r-a**). Wyniki i porównania, głównie do stabilności systemu bez modyfikacji (w) i wyników al.r-a przedstawia rys.3.

Modyfikacje losowych funkcji zwięzały je (jest to uboczny, ale konieczny efekt metody), co samo powinno zwiększać stabilność. Na rys.3 dodano więc dla porównania ten efekt - stabilność systemu, gdzie uzyskane podczas korekty met2 funkcje były przypisane innym węzłom (opisane jako f i $f3$). Efekt ten okazał się istotnie mniejszy od met2, ale porównywalny z al.r-a. Oczywiście istnieje możliwość jego intensyfikacji, co także może wykorzystywać ewolucja życia do podniesienia²¹ stabilności.

Wyniki met2 dla $tmx=60$ byłyby zadawalające, gdyby utrzymywały się z przedłużaniem tmx , co jednak ogólnie nie nastąpiło. Jedynie dla sf 2,4 podwyższona stabilność występuje jeszcze znacząco dla $tmx=2000$, ale podobnie utrzymuje się efekt od samego zwięzenia funkcji. Ogólne ujemne sprzężenia zwrotne w systemie losowym wprowadzone metodami met1 i met2 okazały się niewystarczające. Przyjęto jednak kilka upraszczających założeń, a w tym, że wprowadzenie takich wystarczających ujemnych sprzężeń w systemie losowym jest dostatecznie proste. W ewolucji biologicznej, bowiem, zmiany ewolucyjne dotyczą obiektów już obecnych w tym poszukiwanym obszarze podwyższonej stabilności, a nie losowych.

Badania te dały jednak cenne doświadczenie oraz pogłębiony obraz tego, co jest poszukiwane: Regulacyjne sprzężenia zwrotne widzimy jako względnie **krótkie** pętle, możliwie **niezależnie** działające podobnie w rozmaitych okolicznościach. Sugerowało to **modularność i krótkie atraktory w tych modułach** (spadek q wynika z wtórnych inicjacji, które wyczerpują swój repertuar dopiero po pierwszym obrocie atraktora). **Razem z ujemnymi sprzężeniami są to 3 współgrające elementy, których wpływ należało wpierw zbadać osobno.**

5 Mały atraktor, modularność i semimodularność, półchaos

5.1 Modularność z krótkim atraktorem podwyższa stabilność – met3

Ogólnie uważa się, że obiekty żywe posiadają budowę modułarną, jednocześnie można oczekiwać krótszych cykli w modułach. Wyciągając wnioski z mało skutecznych założeń met1 i 2 (dobór funkcji), należało zbudować sieć losową z założenia modułarną w klasycznym sensie zróżnicowanej gęstości połączeń, co jest formą doboru struktury. Jest to następna metoda (**met3**) uzyskania podwyższonej stabilności w zakresie systemów chaotycznych, gdzie $w > 1$.

Pewne obawy interpretacyjne budzi trwałość ewolucyjna tak uzyskanych efektów. Możliwe, że silny związek modułów z realizowanymi przez nie mechanizmami regulacyjnymi pomaga w zabezpieczeniu takiej struktury przez dobór naturalny, ale zadaniem met3 było wykazanie roli samej struktury modułarnej. Następnym krokiem opartym na wnioskach z met1 i 2 będzie zbadanie roli trzeciego elementu - samego skrócenia atraktora. Modularność wydaje się zawierać wszystkie trzy aspekty jednocześnie.

Metodę met3 można naszkicować na przykładzie: buduję 16 modułów, tj. małych sieci (np. każda po $N1=25$ węzłów) określonego typu, i wiążę je formułą tego samego lub innego typu, jako $N2=16$ węzłów wyższego poziomu hierarchii (tu węzeł reprezentuje cały moduł). Pozostałe parametry (funkcje i stany oraz połączenia w ramach tych sieci) pozostawiam

²¹ W podejściu Kauffmana także rozpatruje się parametr P – „internal homogeneity” mierzący stopień losowości funkcji, który ma wpływ na stopień uporządkowania i przesuwa granice chaosu względem wyliczonych na rys.2.1. W met2 z $tmx=60$ dla er 2,4 sięgało ono 0.6446 gdy dla dzikiego zgodnie z oczekiwaniem było 0.5983.

losowe, lub wspomagam dobór struktury poprzez met2 doborem funkcji. Ponownie otrzymuję sieć $N=400$, ale o wyszukanej, modularnej strukturze. Także parametry K na obu poziomach mogą być różne, ale s musi pozostać wspólne.

Początkowa koncepcja zakładała, że damage w module może wygasnąć wspomagane krótkim atraktorem lokalnym, natomiast gdy *eksploduje* (zachowanie chaotyczne), to raczej zainicjuje moduły sąsiednie. Tam może wygasnąć, ale to mało prawdopodobne, bo to inicjowanie będzie w niemal każdym kolejnym kroku. Ten hipotetyczny obraz zakładał więc, że moduły są na tyle duże, że można rozróżnić w nich zachowanie uporządkowane i chaotyczne. Na podstawie innych doświadczeń (Gecow 2010b) szacowano, że NI nie powinno być mniejsze niż 20.

Już najprostsze doświadczenie rozpoznawcze wymagało wielu upraszczających arbitralnych decyzji. Jego wyniki były zniechęcające - w badanym zakresie nie wykryto wyraźnego efektu modularności w podniesieniu stabilności. Sprawdzono więc, jakie powinno być NI , by krótkie atraktory występowały dostatecznie często. Wyniki pokazały że dla szczególnie odpornej sieci er 4,3 zastosowanie met2 daje szansę dla $NI=20$, ale dopiero $NI=16$ jest już obiecujące nawet bez met2. W nowych założeniach interpretacyjnych nie wymagano rozróżnienia wewnątrz modułu między reakcją uporządkowaną i chaotyczną, a skupiono się na możliwości wygaśnięcia lub ograniczenia eksplozji do mniejszej liczby małych modułów.

Główna seria symulacji dla $NI=8$, $N2=50$ dała silnie podwyższoną stabilność, nie zmieniającą się na długim odcinku, nawet do $tmx=20000$. Głównie nie był to brak chaosu na poziomie 1 (węzłów), a ograniczenie go do niewielkiej liczby modułów, czyli brak chaosu na poziomie 2 (wyższym). Bogactwo możliwości oddziaływań międzymodułowych z uwagi na złożoność funkcji modułu jako węzła jest ogromne - ewolucja ma w czym wybierać. **W rozkładzie wielkości damage występują piki: prawy (chaotyczny) i lewy (uporządkowany), ale pomiędzy nimi brak przerwy. Złożenie struktury modularnej (met3) z met2 daje znacznie silniejsze efekty wzrostu stabilności, niż w każdej z tych metod osobno, a te efekty występują tylko gdy atraktor lokalny często bywa mały.**

Należy podkreślić, że osiągnięta stabilność nawet w zakresie $tmx=20000$ dotyczy pojedynczej zmiany ewolucyjnej, a nie ciągu takich zmian tworzących ewolucję, który może ją niszczyć. W met1-3 nie podjęto badań takiej stabilności ewolucyjnej.

5.2 Atraktor punktowy daje poszukiwaną stabilność i długą ewolucję PAS – met4

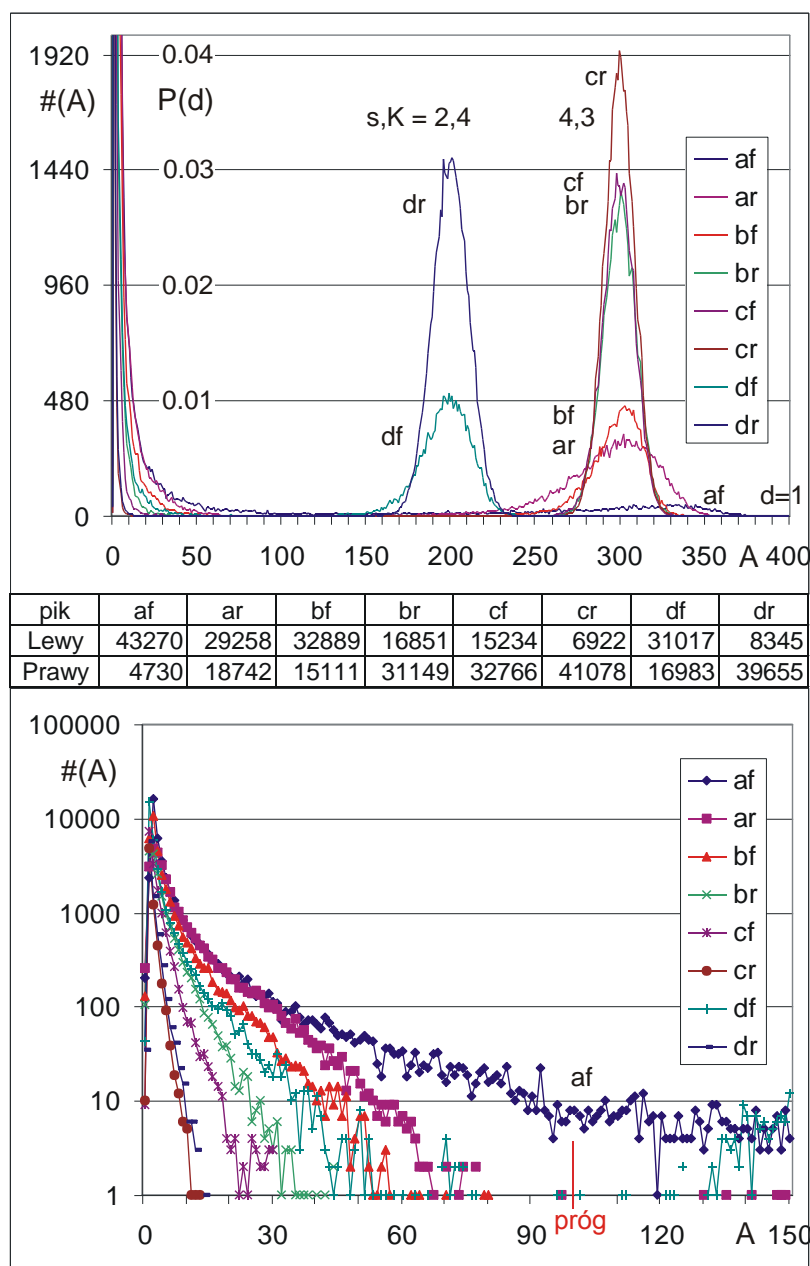
Podjęto więc próbę sprawdzenia, co da radykalne skrócenie atraktora. Model o atraktorze punktowym ma dość dobre podstawy interpretacyjne, więc jego dotyczy **met4**.

Przede wszystkim jest to stan całkowitego zamrożenia systemu, a radykalna przewaga lodu to w opisie Kauffmana podstawowa cecha systemów z fazy stałej i ciekłej - obszaru uporządkowanego w przestrzeni parametrów systemu losowego. Teraz w takiej przestrzeni badany system znajduje się w obszarze chaosu, bo $w>1$, ale rozpatrujemy więcej nielosowych i ewentualnie skorelowanych parametrów opisujących system, w tym stany, funkcje i strukturę, i w takiej szczegółowej i bardzo złożonej przestrzeni znajdujemy²² obszar specyficzny (atraktorów punktowych), podobny we własnościach do obszaru stałego, czyli uporządkowanego.

Poszukiwana stabilność, to szansa akceptacji przez dobór naturalny zmian ewolucyjnych. Mogą one zmieniać funkcjonowanie, ale nie za bardzo. Pomiedzy takimi zmianami ewolucyjnymi obiekt w perspektywie ewolucyjnej, na pewnym makroskopowy poziomie, nie

²² O ile jeszcze obszar atraktorów punktowych można próbować opisać formalnie w takiej przestrzeni, to opis formalny dalej wskazanego obszaru systemów semimodularnych, osiąganego z atraktora punktowego przez ciąg małych zmian, wydaje się zbyt złożony i całkiem nieprzydatny.

ulega zmianom (Gecow 2011). Na niższych poziomach organizacji obserwujemy dość krótkie cykle, dość niezależne co do swoich faz, jak np. oddychanie i rytm serca, cykle dobowe a nawet pokoleniowe. Atraktor punktowy, to model systemu działającego jednakowo w długim przedziale czasu.



Rys.4. Podstawowy wynik met4 – liczba ($\#A$) zliczeń A w $tmx=2000$, odpowiadający rozkładowi $P(d)$ wielkości damage gdy $d=A/400$, $P=0.01$ dla 480 zliczeń, uzyskany w modelach a,b,c,d dla $N=400$ i 48000 inicjacji w każdej symulacji (af – model a, sieć sf). Dla $t=200$ jedynie af i df miały w pikule więcej zliczeń (odpowiednio o 140 i 2), czyli na dalszym odcinku pik lewy praktycznie nie maleje. Rozkład $P(d)$ z dwoma pikami: lewym dla małych damage (przypadki uporządkowane) i prawym zgodnym z równowagą Derridy (chaotyczne) oraz z nieobsadzonym przedziałem pomiędzy nimi (oprócz af dla $N=400$), dokładnie odpowiada sytuacji otrzymanej przez al.r-a. Dla $N=4000$ piki $P(d)$ są węższe i w modelu af też występuje przerwa pomiędzy pikami.

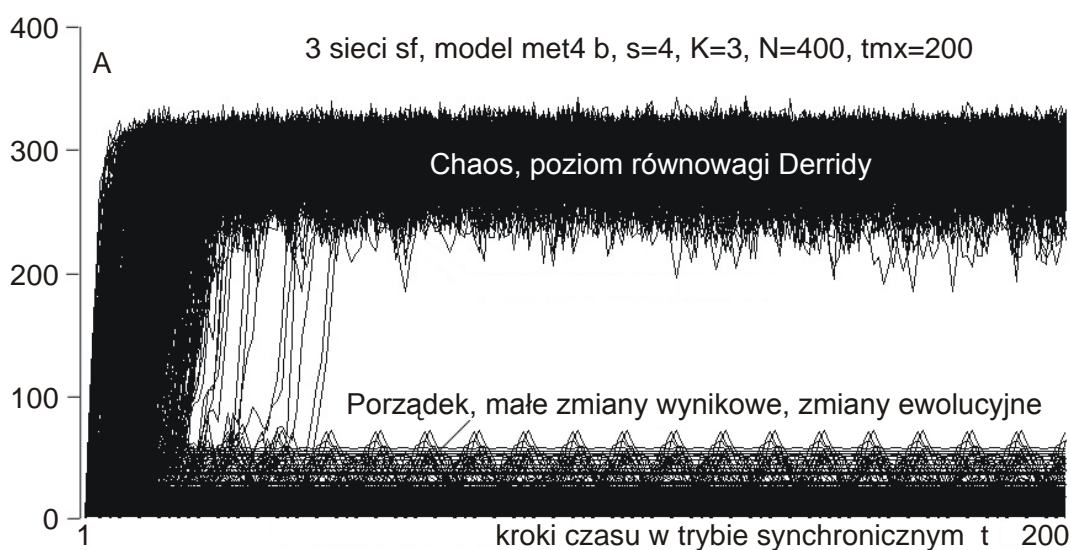
Metody 1 i 2 podwyższenia stabilności tworzyły kontrolowaną modyfikację systemu losowego, jednak założenie, że jest to łatwo osiągalne z systemu losowego, jest niepewne. Teraz więc pozbywamy się tego założenia i startujemy od razu z pozycji specyficznej.

Aby zbudować stan atraktora punktowego (**PAS - Point Attractor System**) dla sieci o losowej strukturze wystarczy po wylosowaniu stanów założyć, że funkcje dają aktualny stan dla aktualnych wejść. Wygodniej jednak stany występujące w PAS nazywać '0' (**PAS0**), wtedy wszystkie funkcje mają $f(0)=0$. Pozostałe stany wejściowe dają dowolne wartości funkcji, a udział '0' można wyrównać.

Początkowo głównym celem met4 było nadal wykazanie roli ujemnych sprzężeń zwrotnych, rozpoczęto więc od modelu 'a' ($s, K=4,3$) z silną regulacją określoną przez skomplikowaną funkcję. Model ten dał bardzo silną stabilność, więc w modelu 'b' ($s, K=4,3$) ograniczono się do minimalnej regulacji, tj. założenia $f(0,0,0)=f(0,0,1)=f(0,1,0)=f(1,0,0)=0$. On też dał silne podwyższenie stabilności, więc sprawdzono modele: 'c' ($s, K=4,3$) i 'd' ($s, K=2,4$) bez regulacji, z samym atraktorem punktowym PAS0. Efekt był zaskakujący – to wystarczyło. Wtedy dopiero doceniono wagę samego krótkiego atraktora i zrozumiano mechanizm poszukiwanej stabilności.

Wykonano symulacje z $N=400$, $próg=100$ i $N=4000$, $próg=300$, każdego z 4 modeli (a,b,c,d) dla sieci typu *er* i *sf* tak, by zawsze liczba inicjacji wynosiła 48000. Wyniki przedstawia rys.4, gdzie typy sieci opisane są tylko drugą literą, a poprzedza je model.

We wszystkich modelach i dla obu typów sieci występują dwa piki w rozkładzie wielkości damage – przypadków uporządkowanych i chaotycznych, przedzielone silnym minimum. Ten obraz, a w nim proporcje pików, nie zmienia się ze wzrostem tmx , co szczególnie przekonująco widać na „krokodylach” (rys.5). Zawartość piku lewego jest porównywalnego rzędu z pikiem prawym, czyli istnieje spora szansa na zmianę małą, tolerowaną przez ewolucję, mimo parametrów struktury dających $w>1$, czyli parametrów chaotycznych.



Rys. 5. Zależność $A(t)$ z inicjacji 3 sieci *sf* 4,3 w modelu b, $N=400$, która dała nazwę „krokodyl” wykresom tego typu. Okazały się one bardzo owocne i wiele mówiące o przebiegu symulacji. Widoczne są ząbki równomiernych oscylacji krótkich pętli, szybko zanikają transfery z dołu do góry (eksplozje chaotyczne) i oba piki wielkości damage osiągają trwałą liczebność. Tak jest dla wszystkich wersji modelu b,c,d i obu typów sieci *sf* i *er*, różnią je szczegóły.

Piki prawe znajdują się na właściwym miejscu wyznaczonym równowagą Derridy. Sieć *sf* jest silniej uporządkowana i w modelu a z silną regulacją pik prawy jest znikomy i rozmyty, a minimum pomiędzy pikami dla $N=400$ w całym zakresie posiada zliczenia. W met4 regulacja dała od początku oczekiwane efekty, ale musiała mieć do tego szczególnie krótki atraktor.

Modele c i d bez regulacji, tylko oparte na tak skrajnie krótkim atraktorze dają samodzielnie także znaczny pik lewy, ale już wyraźnie mniejszy od prawego. Model b z minimalną regulacją daje wyniki pośrednie między a i c,d.

Symulacje z $N=4000$ w porównaniu z $N=400$ dają wyniki podobne, ale piki są tu węższe i przedział minimum nawet dla af ma wyraźną przerwę w zliczeniach. Wzrost N daje więc bardziej wyraziste wyniki, co świadczy, że badane sieci nie są zbyt małe.

Ważnym wynikiem jest **udział PAS w przypadkach uporządkowanych**, który dla $N=400$ i modelu a nie spada poniżej 90%, a w pozostałych waha się pomiędzy 96.7 a 99.96%. **Ponieważ każdy PAS to powrót do okoliczności sprzed zmiany permanentnej, ewolucja może się toczyć dalej nie wychodząc poza PAS, jedynie przeskakując pomiędzy nimi. Jest to wystarczający dowód na istnienie w zakresie parametrów s,K pasujących system losowy w obszarze chaotycznym podobszaru, gdzie ewolucja może się toczyć długo bez wychodzenia z niego.** Jednak ograniczenie się w opisie obiektów żywych jedynie do systemów PAS jest pewną skrajnością interpretacyjną i powstaje natychmiast pytanie, czy dopuszczając pozostałe warianty zdarzeń uporządkowanych także dostaniemy możliwość długiej ewolucji bez konieczności wejścia w obszar jedynie chaotyczny. To zadanie met5.

5.3 Kumulacja zmian małych nie wyprowadza do chaosu, semimodularność – met5

Podstawowym zadaniem met5 jest sprawdzenie, czy kumulacja zmian małych uznawanych za uporządkowane pozwala na długą ewolucję, która **nie wyprowadza ze stanu specyficznego, zapoczątkowanego** skrajnym PAS0. Ponieważ większość zmian małych powracała do PAS, dla zwiększenia siły wyniku wyłączono z kumulowalnych atraktory mniejsze od 4 (w tym PAS), w głównej części procesu mniejsze od 7, a w ostatnim komplecie atraktor nie mógł maleć. Te „złośliwe” reguły nie zbliżyły zauważalnie procesu do chaosu, a obraz ustalił się, więc spróbowano osiągnąć granicę chaosu i określić jej charakter poprzez dobór parametrów procesu. To także nie zbliżyło do chaosu, co **wyказuje siłę warunku małej zmiany. Małą zmianę definiuje w naturalny sposób pusty przedział pomiędzy pikami lewym i prawym rozmiaru damage, w zakresie którego dowolnie można wybrać próg.**

W met5 badano jedynie modele b i c zdefiniowane w met4, czyli $s,K=4,3$, sieci sf i er z minimalną regulacją i bez niej. Główne symulacje wykonywane były dla $N=400$, $tmx=1000$. Podczas wstępnego kompletu inicjacji trochę odsuwano system od PAS0 **kumulacjami (pozostawianymi na stałe małymi zmianami** o atraktorze większym niż 3). Po tym następowało 20 kompletów inicjacji, w których dokładniej obserwowano kumulację zmian. Po każdej „kumulacji” przesuвано początek o 50, co wystarczyło, by zmiany dokonywane były tuż przed wejściem do atraktora lub już na atraktorze. Blokowano inicjacje cofające skumulowane zmiany, co drastycznie zmniejszało pulę zmian kumulowalnych, więc w kompletach 1,7,13,19 i 20 dopuszczano pełną liczbę inicjacji. Odblokowywało to kumulowanie i pozwalało zmierzyć stabilność, a opóźnienie cofania zmiany tworzyło jej istotnie odmienne okoliczności i pozwalało zaliczyć taką kumulację jako coś nowego. Obraz ustalał się w komplecie 7, omawiane dalej wyniki dotyczą tego stanu ustalonego.

Symulacja pozwoliła zaobserwować wiele zjawisk, ważniejsze opisane są w raporcie (Gecow 2016). Rozpoznany został podstawowy mechanizm, który nazwałem „**semimodularnością**”, odpowiedzialny za specyfikę uzyskanej stabilności, jego obraz jest bardzo zbliżony do obszaru ciekłego opisanego przez Kauffmana jako jeziora aktywności w lodzie. Praktycznie funkcjonują one jak moduły z krótkimi atraktorami, jednak ich odrębność wymuszona ścianami lodu nie wynika z gęstości połączeń, a z układu stanów i funkcji, dlatego – „**semimoduły**”. Takie jeziora zwykle zmieniają się nieznacznie po kolejnych skumulowanych zmianach, bywa, że zamarzają lub nagle znów pojawiają się w podobnej

postaci. Stwierdzenie obecności cykli (i wyznaczenie ich okresów) wśród węzłów sieci w przebytej trajektorii jest proste i jednoznaczne. **Zbiór węzłów o tym samym okresie przyjmuje się za jeden semimoduł lokalny.** Natomiast identyfikacja tych samych semimodułów po kilku zmianach w sieci nie jest już tak prosta i pewna. Takie utożsamienie tworzy **semimoduły globalne.** Zazwyczaj semimodułów lokalnych jest mało, rzadko ponad 3, średnio między 1.5 a 2. Zawierają one średnio od 3.3 (**cr** – model **c**, sieć typu **er**), cf: 7.5, br: 6.6 do 13 węzłów dla bf. Rozkłady wielkości semimodułów lokalnych maleją wykładniczo, **cr** praktycznie sięga 15 a cf 45, ale udział 25 też jest już znikomy. W met7 na tej podstawie ograniczono wielkość generowanych semimodułów. Średnią liczbę semimodułów globalnych w ramach jednego pełnego kompletu inicjacji szacuje się na 2 do 3. Natomiast lód, który początkowo w stanie PAS0 stanowił całość, zajmuje znaczną część, przy $N=400$, dla bf jest to średnio ponad 375, dla br i cf – 388, a dla cr aż 394. Zmiany zwykle dotyczą dwóch do trzech węzłów, rzadziej więcej (rys.4 i 6). Często są to zmiany stanu zamrożonego na inny też zamrożony.

Pozostawienie w sieci jednej zmiany dużej powoduje, że specyfika znika, a system przyjmuje cechy zwykłego, w pełni losowego systemu chaotycznego. Dlatego obszar ten bardziej kojarzy się z **cieczą przegrzaną**, gotową do przejścia w gaz przy dostatecznym zaburzeniu. Po eksplozji do chaosu nigdy nie pojawiał się atraktor (w zakresie **tmx**), a praktycznie wszystkie węzły przynajmniej na chwilę miały stan odmienny od wzorcowego.

Podstawową różnicą z obszarem wskazanym przez Kauffmaną są tu chaotyczne parametry systemu ($w>1$) i **obecność obu faz jednocześnie: uporządkowanej i dojrzałej chaotycznej (poziom równowagi Derridy w miejscu przewidzianym przez annealed approximation).**

Główne symulacje po 100 sieci zakończyły się skumulowaniem w formułach bf,br,cf,cr odpowiednio: 408693, 236527, 328056, 171677 zmian. Rozkłady wielkości damage zmierzone w kompletach inicjacji 7,13,19,20 (czyli na dużym, końcowym odcinku procesu kumulacji) są praktycznie identyczne między sobą oraz z przedstawionym dla met4 na rys.4.

5.4 Wyjście z krótkiego atraktora także wystarcza do uzyskania półchaosu – met6

Sukces met4 i met5 kazał sprawdzić, czy startując z mniej radykalnego początku, tj. z atraktora małego, ale nie punktowego, otrzyma się podobnie podwyższoną stabilność. W zasadzie jest to pewne dla tak małych atraktorów (<10), że zakres czasowy eksplozji do chaosu jest większy od dwóch długości atraktora. Należy więc użyć atraktora nieco większego.

Aby uzyskać mały atraktor zastosowano metodę zbliżoną do met1 i 2: od określonej chwili czasu **tax** korzystano z aktualnych stanów wejściowych dotąd nieużywanych, dla których zmieniano punktowo funkcję tak, by dała wynik z chwili wcześniejszej o **tax**. Ideą było stopniowe zbliżanie w trakcie drugiego obrotu cyklu o długości **tax+1** do powtórzenia cyklu poprzedniego.

Podobnie jak w badaniach met5, stosowano sieci **sf** i **er** o $N=400$ węzłów, **tmx=1000**, $s=4$ i $K=3$. Metoda dawała skutecznie żądane atraktory dla małych **tax**. Przyjęto do badań atraktory o długości **tax+1=21** nie kolidujące z przesunięciem o 50 po kumulacji. Są one dłuższe, niż podstawowy zakres czasu eksplozji do chaosu więc uzyskana stabilność nie jest trywialnym zakończeniem topnienia piku lewego przez wejście w już zbadany odcinek trajektorii. Taki mechanizm skierował uwagę na małe atraktory, ale był on już zrozumiały i met6 było sprawdzeniem, czy poza jego zakresem jest już chaos. Zaskoczeniem było stwierdzenie, że jednak i w tym przedziale, który daje metoda oparta na **tax**, jest podwyższona stabilność i jest ona utrzymywana gdy kumulowane są jedynie małe zmiany.

Otrzymany w met6 pik lewy mimo pokaźnego udziału frakcji uporządkowanej jest wyraźnie jakościowo inny (rys.6) od uzyskanego w met4 i 5. Przypadki uporządkowane praktycznie ograniczają się do pełnego wygaśnięcia, czyli braku zmiany wynikowej. W met4 i 5 udział większej zmiany był zauważalny, co dawało interpretacyjnie małe zmiany ewolucyjne, ale nie znikome jak w met6.

W met6 semimodularności całkowicie brak. Prawie zawsze pojawiał się tylko jeden okres ≈ 21 , który dotyczył wszystkich 400 węzłów. Nie istniał więc klastery lodu, podstawowy dla semimodularności. Wydaje się, że znaleziony w met6 stan i jego mechanizm należy dodać do puli narzędzi, z jakich może korzystać ewolucja. Jest to jednak narzędzie mało skuteczne i na pewno nie tak podstawowe, jak stan semimodularności opisany w met5.

5.5 Kontrolowane utworzenie systemu semimodularnego – met7

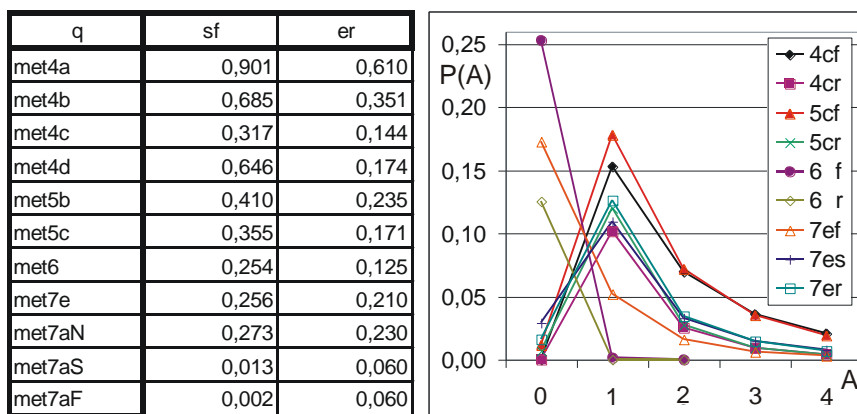
W met4 i 5 wykazano obecność semimodularności, poznano jej działanie i efekty, ale nie ma dowodu, że to obraz zupełny. Takim dowodem byłoby kontrolowane zbudowanie tego stanu, jako jedyne odstępstwo od stanu losowego, i potwierdzenie, że taki twór także utrzymuje stabilność. To właśnie jest zadaniem **met7**. Większe panowanie nad szczegółami struktury pozwala także na pogłębienie i sprawdzenie obrazu mechanizmu, w którym małe atraktory semimodułów (lokalne) szybko wprowadzają trajektorię w już przetestowany zakres i blokują tym dalsze eksplozje, ale ich złożenie w globalny atraktor całego systemu może dawać dużą długość atraktora globalnego.

Oczekiwanie, że losowe semimoduły o chaotycznych parametrach $s, K=4,3$, złożone z kilkudziesięciu węzłów będą dawać zwykle małe atraktory wydawało się mało podstawne, co też potwierdziło doświadczenie met3. Dla $s=2$ i $K=3$ Kauffman przewiduje średnią długość atraktora rzędu 2^{32} dla $N=25$, a dla $s=4$ powinny one być znacznie dłuższe. Od razu więc założono konieczność wymuszania krótkich atraktorów co zrealizowano dla semimodułów metodą opartą o *tax*, jak w met6, dopiero późniejsze sprawdzenie bez wymuszania wykazało błędność takiego założenia. Badania z wymuszeniem dały jednak nieco „lepsze” wyniki.

Po wygenerowaniu struktury i stanów węzłów, analizując połączenia węzłów tworzony jest zbiór semimodułów i każdy węzeł zostaje przypisany do jakiegoś semimodułu lub do rozdzielającego je lodu. Węzeł tworzy nowy semimoduł, gdy żaden jego link nie łączy z węzłem z istniejącego już semimodułu. Przypisywany jest do semimodułu gdy ma połączenia tylko z jego węzłami. Gdy połączony jest z węzłami z kilku semimodułów, lub gdy wyczerpał się limit semimodułów (=10) albo wielkości semimodułu (=25 węzłów), to wchodzi w skład lodu.

Dalej obliczana jest trajektoria dobierając funkcje. Dla aktualnego stanu wejściowego, jeżeli nie był on dotąd użyty, węzły lodu dostają wartość funkcji równą 0, a węzły należące do semimodułów – wstępnie wartość losową, lecz gdy jest ona taka sama jak stan tego węzła krok wcześniej, to jest zmieniana o 1, by zmniejszyć szanse atraktora punktowego. Gdy więcej niż 3 z 10 semimodułów jest nieaktywnych (są lodem), podejmowane jest do 9 iteracji korygujących. Polegają one głównie na zmianie stanów początkowych dla węzłów z lodu i semimodułów bez wykrytego atraktora, oraz ponownej definicji ich funkcji.

Początek trajektorii, w którym inicjowane były punktowe zmiany permanentne, przesuwany był do najpóźniejszego początku atraktora lokalnego, tak by wszystkie semimoduły były już w atraktorach.



Rys.6. Podsumowanie wyników metod 4-7. Tabela udziału reakcji uporządkowanych (q). $1-q$ to udział reakcji chaotycznych. Różnica widoczna jest na rys.5 i 4. Dla sieci *er*, z powodu obecności $k=0$ (brak wyjść z węzła) zawsze pozostaje udział przynajmniej $q=0.06$ jak w sieciach chaotycznych met7aS i F. Względem sieci w pełni chaotycznej met7aF, dla której $q=0.002$, w badanych sieciach z półchaosem q dla sieci *sf* jest znacznie podwyższone, powyżej ćwierci ($q>0.25$). Jedyne dla met6 pik lewy $P(A)$ praktycznie nie zawiera $A>0$, w pozostałych przypadkach, czyli w stanie semimodularności, ewolucja może się toczyć z wyraźnymi zmianami funkcjonowania (porównaj z rys.4).

Traktowanie podwyższonej stabilności jako skutku wymuszenia semimodularnej struktury wymaga także wykazania, że to nie statystyczne własności nielosowo dobranych funkcji są odpowiedzialne za podwyższenie stabilności. W tym celu wykonano kilka dodatkowych eksperymentów na każdej sieci: zbadano stabilność po zaakceptowaniu jednej zmiany dającej eksplozję do chaosu (X), po losowym przypisaniu stanów początkowych (S), po przesunięciu funkcji na inne węzły ale bez zmiany stanów początkowych (T) i po w pełni losowym wygenerowaniu funkcji (F), zawsze bez zmiany pozostawała struktura. Oprócz F, statystyczne własności funkcji pozostawały takie jak w eksperymencie (N) z semimodularnością. Wszystkie 4 kontrolne eksperymenty (X,S,T,F) przedstawiają obraz klasycznie chaotyczny, co jednoznacznie obarcza odpowiedzialnością za podwyższony stopień porządku w N kontrolowanie wprowadzony stan semimodularności.

Wstępne badania algorytmu tworzenia semimodularności, jeszcze bez kumulacji (met7a), zawierające eksperymenty X,S,T,F miały parametry $N=800$, $tmx=2000$ i 300 sieci. W ich ramach potwierdzono też obraz małych atraktorów w semimodułach odpowiedzialnych za stabilność przy względnie dużych atraktorach całej sieci. W badaniu ewolucji poprzez kumulację zmian (met7e), stosowano jak w met5 $N=400$, $tmx=1000$ i 400 sieci.

Kształt piku lewego (rys.6) dla celów ewolucji biologicznej musi dozwalać wyraźne, choć małe zmiany funkcjonowania, czyli nie zawierać praktycznie jedynie $A=0$ i nie kończyć się na najwyżej dwóch zmienionych węzłach, jak w met6 i eksperymentach X,S,T,F. Ogólnie obraz okazał się znacznie bardziej złożony i bogaty niż się spodziewano i proste wyjaśnienia mają rangę jedynie bardzo zgrubnego przybliżenia.

5.6 Powrót do dodawania i odejmowania węzłów jako inicjacji – met8

Jak wspomniałem już we wstępie, poszukiwania miejsca dla życia w zakresie systemów o $w>1$, czyli o parametrach chaotycznych, było próbą wykazania poprawności mojego modelu z lat 70-tych i użytego tam uproszczonego algorytmu „reversed annealed”. W symulacjach tego modelu sieć rosła „od zera” pod kontrolą małej zmiany, poprzez losowe dodawanie węzłów, a także z losowym odejmowaniem węzłów. W ostatnich pracach z użyciem tego algorytmu stosowane były sieci typu *sh*, *sf*, *si*, *ss*, *er*, *ak* i *aa* (omówione w rozdz.2.2), w tym jedynie *er* nie mogła rosnąć. Co prawda, sieci te były otwarte, miały wejścia ze środowiska i oceniane

wyjścia, ale problem można wstępnie rozpatrywać w zakresie sieci autonomicznych, w którym pojawił się konflikt z hipotezą Kauffmana i do tego ogranicza się niniejszy artykuł. Pozostało więc sprawdzenie, że specyfika semimodularności lub szerzej – półchaosu utrzymuje się, gdy zmianami inicjującymi są dodawanie i odejmowanie węzłów. W tym celu wykonano badania **met8**.

W met8 badano sieci rosnące *sh,sf,si,ss,ak* gdzie *sh* i *si* to odpowiednio *sf* i *ss* z 20% odejmowaniem węzłów. Wpierw hodowano losową sieć zgodnie z typem do $N=50$ bez funkcji i stanów, i bez warunków. Następnie ustanawiano PAS generując losowe stany i określając funkcje z jednym warunkiem – dla aktualnego stanu wejść węzłów funkcja ma mieć wartość aktualnego stanu tego węzła. Tym razem użycie PAS0 byłoby błędem²³.

Po tym następował dalszy wzrost, ale już kontrolowany warunkiem małej zmiany, z jednoczesnym pomiarem prawdopodobieństw akceptacji wylosowanej zmiany. Proces podzielono na 10 odcinków osiągających kolejne 50 węzłów więcej, tak, że kończył się on na $N=550$. Nowe węzły miały funkcje w pełni losowe.

Oczywiście, znowu wystąpiły rozmaite, nieprzewidziane zjawiska, szczególnie przy odejmowaniu węzłów, ale ogólny obraz ustalonej, silnie podwyższonej stabilności został potwierdzony. Sieci określonych typów zachowywały się w sposób zbliżony do otrzymanego w badaniach algorytmem *reversed annealed*.

Dalsze badania met8 dotyczą już systemów otwartych i będą omówione w następnym odcinku *Szkicu* wraz z tendencjami strukturalnymi.

6 Podsumowanie

Potrzeba dokładniejszej analizy możliwych dla życia obszarów w przestrzeni systemów złożonych wynikała z konfliktu hipotezy Kauffmana o życiu na granicy chaosu z moim modelem tendencji strukturalnych z lat 70-tych, który na podstawie uzasadnionych ocen umieszczał życie w obszarze systemów chaotycznych, jednak z istotnie podwyższoną stabilnością. Hipoteza Kauffmana i badania, które do niej doprowadziły są młodsze od mojego modelu, ale są obecnie szeroko przyjmowane.

W wyniku przedstawionych tu prac nad pogłębieniem podstaw wizji Kauffmana, dokonana została głęboka reinterpretacja tej hipotezy, którą można ująć w nowym jej brzmieniu: życie toczy się w półchaosie, i konflikt z moim modelem znikł. Nie jest to obalenie modelu i wnioskowania Kauffmana, ale potraktowanie ich jako pierwszego przybliżenia teorii, która została teraz rozwinięta o nowe czynniki, ma istotnie szersze i bardziej adekwatne założenia, a z nich wynika obraz znacznie bardziej złożony, ale bliższy rzeczywistości.

Półchaos jest specyficznym stanem systemów o parametrach, które w modelu Kauffmana opartym na systemach losowych dają systemy o zachowaniu w pełni chaotycznym. W takim stanie część małych losowych zmian permanentnych inicjujących zmianę funkcjonowania sieci daje małe wynikowe zmiany funkcjonowania (uporządkowane), a część duże zmiany funkcjonowania (chaotyczne), które osiągają typową dla dojrzałego chaosu równowagę Derridy. Udziały obu tych typów reakcji są podobnego rzędu. Na rozkładzie rozmiaru „damage” – miary wielkości wynikowej zmiany funkcjonowania, obserwuje się dwa piki: lewy - reakcji uporządkowanej (małych zmian wynikowych), i prawy – reakcji chaotycznej. Pomędzy tymi pikami występuje spory przedział, gdzie brak jest zliczeń, w naturalny sposób definiuje on zmianę małą. Pilnowanie akceptacji zmian inicjujących dających małe zmiany wynikowe jest wystarczającym warunkiem długiej ewolucji nie wyprowadzającej z tego specyficznego stanu półchaosu. Wystarczy jednak jedna akceptacja zmiany dużej, by

²³ Np. odejmowanie węzłów nic nie zmienia.

specyfika ta znikła, a system dalej trwale pozostawał w stanie normalnego chaosu. Jest to dobry model zmiany śmiertelnej.

Półchaos można osiągnąć wychodząc z atraktora punktowego, wtedy mechanizm i osiagany tak stan półchaosu można nazwać semimodularnością. Nie jest to modularność, bo połączenia węzłów są równomierne. Obraz tego stanu jest zbliżony do opisywanego przez Kauffmana stanu ciekłego, w którym umieszczał on życie. Stan taki można zbudować w kontrolowany sposób opierając się na jego opisie: małe jeziora aktywności w lodzie. Stan półchaosu można też osiągnąć wychodząc z dostatecznie krótkiego atraktora, ale nie jest wtedy osiagany stan semimodularności, a pik lewy jest znacznie węższy i mniej się nadaje do modelowania ewolucji.

Wychodząc z modularności o dostatecznie małych modułach także dostaje się stan silnie podwyższonej stabilności, ale nie sprawdzono, czy długa ewolucja wymaga więcej warunków. Próba uzyskania półchaosu w wyniku zamiany sprzężeń zwrotnych na ujemne w systemie losowym nie powiodła się. Wydaje się, że tak jak i modularność, regulacyjne sprzężenia zwrotne są silnym czynnikiem wspomagającym, ale w pierw musi być osiągnięty stan półchaosu, w którym główną rolę gra mały atraktor semimodulów, a jak ich brak – całego systemu. Część z tego istotnego wniosku zawierała już hipoteza Kauffmana.

BIBLIOGRAFIA

- M. Aldana, S. Coppersmith, L. P. Kadanoff. *Boolean Dynamics with Random Couplings*. In: Perspectives and Problems in Nonlinear Science. Kaplan, J., J. E. Marsden, K. R. Sreenivasan (Eds.). Applied Mathematical Sciences Series. Berlin: Springer. 2003.
- W. R. Ashby, *Design for a Brain*. 2nd ed. New York: Wiley 1960.
- A.-L. Barabási, R. Albert, H. Jeong, *Mean-field theory for scale-free random networks*. Physica A 272, 1999, s.173–187.
- J. Brockman (red.). *Trzecia kultura*. przeł. zbior., Wydawnictwo CiS, Warszawa 1996. (*The Third Culture: Beyond the Scientific Revolution*. 1995)
- B. Derrida, Y. Pomeau, *Random Networks of Automata: A Simple Annealed Approximation*. Europhys. Lett., 1(2), 1986, s.45–49.
- B. Derrida, G. Weisbuch, *Evolution of Overlaps Between Configurations in Random Boolean Networks*. Journal De Physique 47, 1986, s.1297–1303.
- P. Erdős, A. Rényi, *Random graphs*. Publication of the Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Science, 5, 1960, s.17–61
- A. Gecow, *Szkic dedukcyjnej teorii ewolucji biologicznej*. (III BBB) III Polskie Sympozjum Biocybernetyki, Biomatematyki i Biotechniki. 9-11 maja 1974., PTC, 1975.
- A. Gecow, *A Cybernetic Model of Improving and Its Application to the Evolution and Ontogenesis Description*, w: Fifth International Congress of Biomathematics Paris 1975.
- A. Gecow, *From a "Fossil" Problem of Recapitulation Existence to Computer Simulation and Answer*, w: *Special Issue on Biologically Inspired Computing and Computers in Biology of the Journal Neural Network World* 3/2005, Inst. Computer Sci. Acad. Sci. Czech Rep. 2005, s. 189–201.
- A. Gecow, *Structural Tendencies – Effects of Adaptive Evolution of Complex (Chaotic) Systems*, Int. J. Mod. Phys. C, tom 19, 2008, s. 647–664.
- A. Gecow, *Emergence of Chaos and Complexity During System Growth*, w: *From System Complexity to Emergent Properties*. M. A. Aziz-Alaoui, C. Bertelle (red.), Springer, Understanding Complex Systems Series, 2009 a, s. 115–154.
- A. Gecow, *Emergence of Growth and Structural Tendencies During Adaptive Evolution of System*, w: *From System Complexity to Emergent Properties*. M. A. Aziz-Alaoui, C. Bertelle (red.), Understanding Complex Systems Series, Springer 2009 b, s. 211–241
- A. Gecow, *Algorytmy ewolucyjne i genetyczne, ewolucja sieci złożonych i model regulacji genowej a mechanizm darwinowski*, w: *150 lat darwinowskiej teorii ewolucji*, J. Kozłowski i J. Radwan (red.), Kosmos 58, 2009 c, s. 429–442.
- A. Gecow, *More Than Two Equally Probable Variants of Signal in Kauffman Networks as an Important Overlooked Case, Negative Feedbacks Allow Life in the Chaos*. 2010 a, arXiv:1003.1988v2

- A. Gecow, *Complexity Threshold for Functioning Directed Networks in Damage Size Distribution*. 2010 b, arXiv:1004.3795v1
- A. Gecow, *Emergence of Matured Chaos During Network Growth, Place for Adaptive Evolution and More of Equally Probable Signal Variants as an Alternative to Bias* p. w: *Chaotic Systems*, E. Tlelo-Cuautle (red.), InTech, 2011, s. 280–310. ISBN: 978–953-307–564-8. Dostępne z: www.intechweb.org.
- A. Gecow, *Informacja, formalna celowość i spontaniczność w podstawach definicji życia (I odcinek Szkicu dedukcyjnej teorii życia)*, Filozofia i nauka. Studia filozoficzne i interdyscyplinarne, tom 1, 2013, s. 83–113, także w: filozofia.nauka.ifispan.waw.pl
http://filozofia.nauka.ifispan.waw.pl/wp-content/uploads/2014/09/Gecow_83-113.pdf
- A. Gecow, *Spontaneous order, edge of chaos and artificial life as missing ideas in life understanding*. Dialogue & Universalism, 2014, no. 2/2014, s.63–80.
- A. Gecow, *Informacja dziedziczna i jej kanały (II odcinek Szkicu dedukcyjnej teorii życia)*, Filozofia i Nauka. Studia filozoficzne i interdyscyplinarne, tom 2, 2014a, s. 351–380.
http://filozofia.nauka.ifispan.waw.pl/wp-content/uploads/2014/08/Gecow_351-380.pdf
- A. Gecow, *Droga modelu ewolucji struktury (III odcinek Szkicu dedukcyjnej teorii życia)*, Filozofia i Nauka. Studia filozoficzne i interdyscyplinarne, tom 3, 2015, s. 171–203.
http://filozofia.nauka.ifispan.waw.pl/wp-content/uploads/2015/08/Gecow_171-203.pdf
- A. Gecow, *Raport z badań symulacyjnych, podstawa stwierdzenia, że życie ewoluuje w półchaosie*, 2016.
<http://vixra.org/pdf/1603.0220v1.pdf> (wersja po angielsku <http://vixra.org/pdf/1603.0220v1.pdf>)
- T. R. Hughes et al., *Functional discovery via a compendium of expression profiles*. 2000, Cell 102, s.109–126.
- K.Iguchi, S. Kinoshita, H. Yamada, *Boolean Dynamics of Kauffman Models with a Scale-free Network*. Journal of Theoretical Biology 247, 2007, s.138–151.
- S.A.Kauffman, *Metabolic Stability and Epigenesis in Randomly Constructed Genetic Nets*. Journal of heoretical Biology, 22, 1969. s.437–467.
- S.A.Kauffman, *Gene Regulation Networks: a Theory for Their Global Structure and Behaviour*. Current Topics in Developmental Biology 6, 1971 s.145.
- S.A.Kauffman, *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*, Oxford University Press, New York 1993.
- S.A.Kauffman, *At Home in the Universe* Oxford University Press 1996 USA.
- B.Korzeniewski, *Cybernetic formulation of the definition of life*, J. Theor. Biol. vol. 209, 2001, s. 275–286.
- S.A.Kauffman, *Confrontation of the cybernetic definition of living individual with the real word*, Acta Biotheoretica 53, Springer, 2005, s. 1–28.
- B. Luque, R.V. Sole, *Phase transitions in random networks: Simple analytic determination of critical points*. Phys. Rev. E 55(1), 1997, s.257–260,
- B. Luque, F.J. Ballesteros, *Random walk networks*. Physica A 342, 2004, s.207–213,
- P.Rämö, J. Kesseli, O. Yli-Harja, *Perturbation Avalanches and Criticality in Gene Regulatory Networks*. Journal of Theoretical Biology, 242, 2006, s.164–170.
- H. Schuster, *Deterministic Chaos: An Introduction*. Physik-Verlag, 1984. także *Chaos deterministyczny*, PWN, Warszawa 1993.
- R.Serra, M. Villani, L. Agostini, *On the dynamics of random Boolean networks with scale-free outgoing connections*. Physica A 339, 2004 a, s.665 – 673.
- R.Serra, M.Villani, A.Semeria, *Genetic Network Models and Statistical Properties of Gene Expression Data in Knock-Out Experiments*. Journal of Theoretical Biology, 227, 2004 b, s.149–157.
- R.Serra, M. Villani, A. Graudenzi, S. A. Kauffman, *Why a Simple Model of Genetic Regulatory Networks Describes the Distribution of Avalanches in Gene Expression Data*. Journal of Theoretical Biology, 246, 2007, s.449–460.
- M. Tempczyk, *Teoria chaosu dla odważnych*. PWN Warszawa 2002.
- M. Tempczyk, *Teoria chaosu a filozofia – CiS Warszawa 1998*.
- R.Thom, *Topological models in biology*. w *Towards a Theoretical Biology*, vol.3; Drafts (C.H.Waddington. ed.). Aldine, Chicago 1970.
- A.Wagner, *Estimating Coarse Gene Network Structure from Large-scale Gene Perturbation Data*. Santa Fe Institute Working Paper, 01-09-051, 2001.

Life evolves in half-chaos (Draft of deductive theory of life - part IV)

Abstract

Kauffman hypothesis 'Life on the edge of chaos' is here deeply reinterpreted and takes a new form 'Life evolves in half-chaos'. Criticism of interpretative assumptions of Kauffman model is expressed. Also basis of expectation that living objects should be modelled as chaotic systems with strongly increased stability, mainly by negative feedbacks, are shown. Using simulation is proved, that such systems exist and may be constructed. They simultaneously express with similar degree ordered and chaotic reaction on small perturbation. Using acceptance only small effected changes, evolution do not take out of this state.

Keywords: chaos, life on the edge of chaos, phase transition to chaos, Kauffman networks, damage propagation.

O AUTORZE — dr, Strona: sites.google.com/site/andrzejgecow/home E-mail: gecow@op.pl

Spis treści

Streszczenie	1
1 Wstęp	1
2 Podstawy i interpretacja hipotezy Kauffmana życie na granicy chaosu	4
2.1 Sieć Kauffmana i jej parametry	4
2.2 Podstawowe typy sieci dynamicznych	5
2.3 Propagacja zaburzenia, równowaga Derridy, przejście fazowe w sieciach losowych	6
2.4 Obszar ciekły, gazowy i stały, życie na granicy chaosu i porządku.	6
2.5 Podstawy oceny, że obiekty żywe są z natury chaotyczne	8
3 Do badań statystycznych nie wystarczą 2 stany sygnału	9
3.1 Przykład lodówki – sieci logiczne nie zawsze są adekwatne	9
3.2 Dwa warianty są często subiektywne (nasz i reszta).....	10
3.3 Współczynnik rozmnażania zmiany w , opisy p i s nie są zamienne.	10
3.4 Poziomy równowagi Derridy dla $s > 2$ są znacząco wyżej	12
4 Różne spojrzenia na homeostazę	12
4.1 Homeostaza a porządek za darmo.....	12
4.2 Systemy żywe nie są losowe w aspekcie stabilności, ujemne sprzężenia zwrotne	13
4.3 Ujemne sprzężenia zwrotne, badania symulacyjne met1,2	14
5 Mały atraktor, modularność i semimodularność, półchaos	16
5.1 Modularność z krótkim atraktorem podwyższa stabilność – met3	16
5.2 Atraktor punktowy daje poszukiwaną stabilność i długą ewolucję PAS – met4	17
5.3 Kumulacja zmian małych nie wyprowadza do chaosu, semimodularność – met5	20
5.4 Wyjście z krótkiego atraktora także wystarcza do uzyskania półchaosu – met6.....	21
5.5 Kontrolowane utworzenie systemu semimodularnego – met7	22
5.6 Powrót do dodawania i odejmowania węzłów jako inicjacji – met8	23
6 Podsumowanie	24
BIBLIOGRAFIA	25
Life evolves in half-chaos (Draft of deductive theory of life - part IV)	27
Abstract.....	27
Spis treści	27