MAREK CHLEBUŚ

SZCZEGÓLNA TEORIA WIECZNOŚCI*

Czy komputer jest śmiertelny? A czemu miałby być, skoro nie żyje? Ale czemu miałby nie być, skoro śmiertelny okazuje się cały Wszechświat, którego komputer jest częścią? Czy jednak komputer nie mógłby być jakąś czarną skrzynką, która przetrwa umieranie całego kosmosu? Takie pytanie narzuca pewne warunki na budowę i funkcjonowanie urządzenia.

Na początku wprowadzimy pewne pojęcia fizyki statystycznej, a zwłaszcza entropii, następnie pojęcie informacji, a dalej powiążemy te pojęcia. Następnie przeanalizujemy perspektywę trwałości procesów informacyjnych w kontekście prawa wzrostu entropii i wyciągniemy wnioski na temat trwałości hipotetycznego, acz teoretycznie wykonalnego, komputera.

ENTROPIA

Druga zasada termodynamiki, zwana prawem wzrostu entropii, nadaje kierunek ewolucji układów złożonych nie pobierających energii z otoczenia. Ewolucja ta musi prowadzić w stronę takich stanów makroskopowych, którym odpowiada możliwie największa ilość dopuszczalnych mikrostanów, zwana prawdopodobieństwem statystycznym. Prawdopodobieństwo to, wyrażone w sali logarytmicznej, to właśnie entropia [1].

Zasada wzrostu entropii zainspirowała już w XIX wieku katastroficzne scenariusze śmierci cieplnej Wszechświata, zgodnie z którymi musi on dążyć do stanu jednorodnej chmury o wyrównanej temperaturze [2]. Wszelkie organizmy, urządzenia, planety czy inne struktury muszą nieodwołalnie rozpłynąć się w tej chmurze. Jest to raczej odległa, lecz skrajnie pesymistyczna perspektywa, z którą bezskutecznie zmaga się wielu uczonych i filozofów [3].

Ewentualny projekt długowiecznego komputera musi uwzględniać nieuchronność wzrostu entropii całego świata i wszystkich jego części, w tym również hardware'u.

INFORMACJA

Shannon [4] zdefiniował – dla sygnału mogącego przenosić informację – pojęcie entropii jako miary prawdopodobieństwa wystąpienia danego sygnału. Tak zdefiniowaną entropię Shannon uznał za dobrą miarę ilości przenoszonej informacji. W przypadku, gdy sygnał przyjął jedną z w możliwych równoprawnych wartości, entropia wynosi H=log2w bitów, przy czym bit jest ilością entropii–informacji uzyskiwaną przy stwierdzeniu, że wystąpiła jedna z dwóch równoprawdopodobnych możliwości.

Praca Shannona stała się podstawą teorii informacji, choć naprawdę zajmowała się telekomunikacją, czyli przesyłaniem sygnałów. Na użytek tej dziedziny rozróżnianie między informacją a entropią nie było konieczne, jednak w przypadkach, w których równolegle z informacją rozważany jest termodynamiczny aspekt zjawisk, podejście takie staje się niewystarczające.

Rozważmy pamięć maszyny Touringa, czyli jednowymiarową pamięć komputera, której komórki mogą przyjmować wartości 1 lub 0 albo mieć stan nieustalony. Stan nieustalony to dowolny stan taki, w którym w wyniku pomiaru nie otrzymamy ani 1, ani 0. Praktycznie należy przyjąć, że komórka pamięci może pozostawać *a priori* w jednym z *w* stanów, z których jeden odpowiada zapisanej 1, drugi 0, a pozostałe nic nie znaczą. Oczywiście można przyjąć w=3, czyli niezapisanej komórce odpowiada jeden z trzech równoprawnych *a priori* stanów, ale pamięć taka jest niepraktyczna, jako że trudno odróżnić komórkę niezapisaną od zapisanej [5].

Pojedyncza zapisana komórka, o stanie wewnętrznym zredukowanym przez proces zapisu do jednego mikrostanu, wnosi do entropii zerowy wkład, tzn. $\delta S = k \cdot \ln 1 = 0$; komórka bez zapisu wnosi wkład równy $\delta S = k \cdot \ln w$ [6]. Skasowanie zapisu w jednej komórce, zmniejszające zapisaną informację o jeden bit, zwiększa zatem entropię pamięci o $k \cdot \ln w$ [7].

Załóżmy, że pamięć liczy L komórek, i że komórki te są od siebie niezależne [8]. Entropia stanu nie zapisanego, czyli w pełni spontanicznego jest maksymalną entropią konsystentną z ustalonym makrostanem i wynosi [8] $S_{max.} = k \cdot L \cdot \ln w$. Zapis n bitów zmniejsza entropię o $k \cdot n \cdot \ln w$, skasowanie – odwrotnie – o tyle ją zwiększa. Entropia stanu w pełni zapisanego równa jest zero [9].

Reasumując, entropia (S) układu fizycznego jest wyznaczona przez maksymalną możliwą entropię danego stanu makroskopowego (Smax) oraz informację [10] (I) zakodowaną w tym układzie: $S = S_{max} - k \cdot I$, gdzie $I = n \cdot \ln w$.

Inaczej mówiąc: $S = S_{max} - S_I$, gdzie S_I nazwiemy negaentropią informacyjną, która wynosi: $S_I = k \cdot I$.

Druga zasada termodynamiki, mówiąca, że entropia układu zamkniętego dąży do maksimum, oznacza automatycznie, że izolowana od otoczenia pamięć ma samorzutną skłonność do utraty informacji.

METABOLIZM

Komputer jest układem fizycznym, zbudowanym z materii. Zasada entropii mówi, że bez importu energii komputer będzie podlegał degradacji cieplnej. Import energii jest z kolei ograniczony do skończonych, choć wielkich, zasobów Wszechświata.

Komputer przetwarza informacje i jest w stanie porządkować swój wewnętrzny stan. Zapisana pamięć komputera ma zmniejszoną energię swobodną o przeszło $k \cdot T$ na jeden bit, gdzie k jest stałą Boltzmanna, a T temperaturą bezwzględną. Zapamiętując informację, komputer obniża swoją entropię. Metabolizm komputera wymaga jednak zasilania w energię, z której mała część zamienia się na informację, a znacznie większa jest rozpraszana w termiczne stopnie swobody w procesie chłodzenia [11].

Rozwiązaniem tego problemu jest oparcie komputera na procesach odwracalnych, które nie rozpraszają energii. Muszą one przebiegać na ogół wolniej od podobnych procesów nieodwracalnych, ale za to eliminują wydzielanie ciepła. Projekty podobnych urządzeń, takie jak komputery brownowskie lub gaussowkie, są dobrze opisane w literaturze [12], [13] i zgodnie z zapewnieniami praktyków [14] możliwe do realizacji.

KOSZT BITU

Skoro informacja jest negaentropią, procesy informacyjne mogą prowadzić do spadku entropii. Zapisanie I informacji zmniejsza entropię o $SI = k \cdot I$, a zakodowanie 1 bitu jest równoznaczne ze spadkiem entropii o $k \cdot \ln w$.

Nieodwracalny zapis informacji wymaga najczęściej pewnego wydatku energii E i odpowiednio zwiększa entropię otoczenia o E/T. Aby zapisać bit informacji, trzeba ustalić (zablokować) przynajmniej jeden stan wewnętrzny. Takie zablokowanie wymaga co najmniej takiego nakładu energii, jaka jest różnica poziomów energetycznych (ΔE) pomiędzy stanem zapisanym a niezapisanym. Dalej trzeba nałożyć warunek $\Delta E > k \cdot T$, gdyż $k \cdot T$ stanowi (średnią) energię wewnętrznych drgań cieplnych, czyli inaczej mówiąc – poziom szumu cieplnego. Aby zapis był trwały i czytelny, musi wychodzić ponad ten poziom szumu. Stąd konieczny transfer entropii z otoczenia związany z pobraniem energii na zapis wynosi $\Delta S = \Delta E/T > k$ [6].

Możliwy jest również zapis bez zmiany energii – w równoważnym stanie energetycznym. W tym przypadku ten sam warunek $\Delta E > k \cdot T$ trzeba nałożyć na barierę potencjału ΔE separującą ustalony stan pamięci od stanów sąsiednich. Praca wykonana przy zapisie może być jednak odzyskana bez kasowania pamięci. Zapis jest odwracalny, a zatem – teoretycznie – nie wymaga importu entropii.

Oznaczałoby to, że niektóre procesy informacyjne oparte na odwracalnym wykorzystaniu dołków potencjału mogą się cechować energetycznym kosztem bitu mniejszym od $k \cdot T \cdot \ln w$. Licharew [15] oblicza, że dla pamięci opartej na złączu Josephsona dysypacja energii może być nawet o dwa rzędy wielkości mniejsza od $k \cdot T$. Komputer oparty na takich układach mógłby zmniejszać entropię własnej pamięci w stopniu większym od importu entropii z otoczenia. Mógłby zatem wnosić ujemny wkład do globalnej entropii Wszechświata, co jest bardzo dobrym przesłaniem, zważywszy że wszystkie niebanalne procesy fizyczne, a tym bardziej biologiczne, istotnie zwiększają entropię.

ODWRACALNOŚĆ

Procesy odwracalne nie muszą zwiększać entropii. Jednak – niezależnie od fizycznej organizacji hardware'u – już same operacji logiczne i arytmetyczne zawierają w sobie pewną nieodwracalność. Z dwóch składników można uzyskać sumę, ale niesposób z sumy odzyskać jednoznacznie składniki. Aby pracować odwracalnie, komputer dodający dwie liczby musiałby, oprócz sumy, zachowywać w pamięci co najmniej jeden składnik. Wyniki musiałyby zawierać tyle samo liczb, co dane. Istniejące projekty komputerów odwracalnych istotnie zakładają przechowywanie wszystkich danych, ponieważ każde skasowanie bitu, jako nieodwracalne, zwiększa energię swobodną pamięci, a zatem wywołuje straty cieplne. Wymóg przechowywania danych wejściowych stwarza jednak gigantyczny popyt na pamięć.

Aby zapobiec eksplozji pamięci wymyślono bardzo inteligentne rozwiązanie powrotne: komputer odwracalny wykonuje serię skomplikowanych obliczeń, w trakcie których wszystkie dane i wyniki pośrednie zapisywane są w jego pamięci, a kiedy obliczy ostateczny wynik, wystarczy go zapisać gdziekolwiek na zewnątrz - poza komputerem, a obliczenia komputera po prostu cofnąć. Odwracalność sprowadza się właśnie do tego, że procesy mogą przebiegać w obie strony, a zatem cofnięcie komputera jest możliwe i przywraca jego początkowy stan bez straty energii. Brzmi to trochę magicznie, ale w projekt ten wierzą spore autorytety [16].

TRWAŁOŚĆ

Komputer oparty na odwracalnym metabolizmie, operujący w odwracalny sposób pamięcią opartą na zdegenerowanych poziomach energetycznych może zapamiętywać każdy bit informacji zmniejszając entropię swojej pamięci o wielkość $S = k \cdot \ln w$, gdzie w jest degeneracją stanu komórki pamięci [17]. Zapis pamięci nie musi wymagać importu energii, a dalsze przetwarzanie informacji może być odwracalne i nie zwiększać entropii układu ani otoczenia. Gdyby zatem skutkiem jakichś operacji było tylko zapełnienie pamięci dowolnymi wynikami, mogłaby zmaleć entropia nie tylko komputera, ale również jego dowolnie szerokiego otoczenia. Wygląda to trochę, jak informatyczne *perpetuum mobile*.

Komputer taki mógłby wytwarzać negaentropię, wymieniając ją z otoczeniem na energię, którą dalej zużywałby na własny metabolizm i konieczne naprawy. Kosztem takiego statusu byłaby rosnąca zapamiętana pamięć. Rozwiązanie powrotne dla komputera odwracalnego pozwala jednak w jakimś stopniu ograniczyć ten problem.

Teoretycznie komputer mógłby być trwały i niezależny od dostaw energii [18], chociaż im dłużej miałby trwać, tym większą musiałby mieć pamięć.

PROJEKT

Procesy odwracalne z definicji nie odróżniają przeszłości od przyszłości. Czas wewnętrzny komputera odwracalnego stoi w miejscu lub jest cykliczny. Jego trwanie jest zatem dość monotonne.

Jakimś rozwiązaniem mógłby być tandem łączący komputer odwracalny sprzęgnięty z komputerem nieodwracalnym pracującym jako zegar (np. kasującym równomiernie bit po bicie). Czas wewnętrzny takiego układu, z powodu nieodwracalności, byłby już linearny. W miarę jednak dysypacji energii przez komputer nieodwracalny musiałaby, dla zrównoważenia wzrostu entropii, stale przyrastać zapisana pamięć komputera odwracalnego. Wielkość dostępnej pamięci limitowałaby trwałość całego układu.

Reasumując, procesy informacyjne mogą wytwarzać negaentropię w sposób bardziej ekonomiczny od procesów samoorganizacji, takich jak życie, które wymagają nieustannej dyssypacji energii, a uzyskiwany w nich spadek entropii okupiony jest znacznie większym wzrostem entropii otoczenia.

Realny projekt nieśmiertelnego komputera, osłoniętego w jakimś stopniu przed śmiercią cieplną Wszechświata, pozwala na bardzo długi czas życia. Najżywotniejszy byłby komputer odwracalny, ale jest to rozwiązanie banalne i niesatysfakcjonujące: z uwagi na nieuniknioną statyczność lub cykliczność urządzenie takie nie byłoby w stanie zaobserwować własnego trwania.

Komputer zawierający moduł nieodwracalny może trwać mniej banalnie i niestety krócej, ale wciąż bardzo długo. Dysypacja jednego bitu na sekundę pozwala przeżyć rok karmiąc się niecałymi 4 megabajtami pamięci. Zapas na cały dotychczasowy czas życia Wszechświata, czyli kilkanaście miliardów lat, to ledwo pół miliona dobrych dysków twardych, czyli mniej niż roczna światowa produkcja [19].

DODATEK. Ściśliwość informacji

Ile jest informacji w dowolnej liczbie *n*–cyfrowej? Pewnie *n* razy tyle, co w jednej cyfrze. Dla uproszczenia wywodu przyjmiemy dalej, że cyfra jest zapamiętywana w komputerze jako typowy znak i zajmuje jeden bajt pamięci [20]. Dwie cyfry potrzebują zatem dwóch bajtów pamięci, liczba 0,3 trzech bajtów (bo jeszcze jeden znak wykorzysta przecinek dziesiętny), liczba 0,333 – pięciu i tak dalej. Ale ile bajtów potrzebuje, by być zapamiętana, liczba okresowa 0,(3), czyli 0,33333333... ciągnące się w nieskończoność? Pozornie nieskończenie wiele, ale każdy zauważy, że liczba 0,(3) jest skrajnie redundantna, czego dowodzi równoważny zapis 1/3.

Dzięki pracom Chaitina [21], pozorne nieskończoności można wyeliminować przy pomocy ściśliwości algorytmicznej. Polega ona na tym, że wszelkiej pamięci przypisujemy informację nie taką, jaką fizycznie zawiera, ale minimalną pamięć niezbędną do odtworzenia tej informacji. Pamięć konieczna do zapisania liczby byłaby zatem równa pamięci kodu minimalnego programu, który tę liczbę potrafi obliczyć. Zgodnie z tą koncepcją na zapisanie 1/3 wystarczy dwa lub trzy bajty pamięci plus ileś (niewiele) dodatkowych bajtów na zapisanie kodu programu dzielącego dwie liczby.

Rozwiązanie Chaitina nie jest odporne na fundamentalne ograniczenie fizyczne, związane z zasadą nieoznaczoności. Ponieważ każdy bit pamięci może trwać tylko przez skończony okres czasu, nazwijmy go τ [22], a równocześnie częstotliwość zegara taktującego nie może być większa od pewnej częstotliwości maksymalnej, nazwijmy ją ν [23], to jeśli program obliczający jakąś liczbę potrzebuje N elementarnych kroków dla obliczenia kolejnego bitu rozwinięcia dwójkowego [24], to w ciągu czasu τ, po który pierwszy obliczony bit jest "zapominany", program obliczy zaledwie N/ν bitów. Po upływie kolejnego czasu τ, czyli po czasie $2 \cdot \tau$, w pamięci będzie $2 \cdot N/\nu$ bitów rozwinięcia, ale pierwsze N/ν będzie już niewiarygodne. Odpowiada to nadal posiadaniu N/ν bitów, ale jest to już kolejne, a nie pierwsze N/ν bitów. W ten sposób program przesuwa się jak okienko po rozwinięciu dziesiętnym (lub dwójkowym) liczby, dostarczając tylko N/ν kolejnych bitów.

1999

[1] Zakładamy niezależność mikrostanów. Nie ogranicza to poprawności dalszych rozważań, gdyż ich przedmiotem będą przede wszystkim układy pamięci, dla których wymóg niezależności (komórek pamięci) jest oczywisty.

[2] Zasada wzrostu entropii dotyczy układów zamkniętych, to znaczy takich, które nie wymieniają energii z otoczeniem. Wszechświat jest z definicji układem zamkniętym, gdyż obejmując wszystkie ciała materialne, nie posiada otoczenia, bo cokolwiek istnieje, to należy do Wszechświata, a zatem nie jest <u>na zewnątrz</u>. Izolowany Wszechświat powinien on również zmierzać do stanów najbardziej prawdopodobnych, czyli z grubsza biorąc jednorodnych, aż w końcu osiągnie fazę chmury pyłowej o wyrównanej temperaturze i gęstości.

[3] Dwudziestowieczne rozważania koncentrują się na układach otwartych w stanach odległych od równowagi. W układach tych może dochodzić do samoorganizacji, wskutek której maleje entropia układu, ale tylko <u>jego</u> entropia, zaś spadek ten okupiony jest zwykle znacznie większym wzrostem entropii w otoczeniu, które musi dostarczać energii niezbędnej do zapoczątkowania i podtrzymania samoorganizacji. Procesy nierównowagowe są kosztownym i tylko lokalnym sposobem zmniejszania entropii.

[4] Shannon C.E.: A Mathematical theory of communication. Bell System Techn. J., vol. 27, No. 3–4, 1948

[5] Tylko co trzeci bit pamięci niezapisanej byłby odczytywany jako faktycznie nie zapisany. Dwie trzecie bitów przyjmowałoby losowo stany, które byłyby odczytywane jako 0 lub 1. Problem ten może rozwiązać inicjacja pamięci, która – jako energochłonna – nie będzie tutaj rozważana.

[6] W zależności od przyjętej statystyki energia przypadająca na jeden stopień swobody waha się od 1/2 do 3/2 kT. Wyprowadzane wartości liczbowe, w których przyjmujemy tę energię jako równą kT, wymagają odpowiedniej korekty, to znaczy pomnożenia przez czynnik wynikający z właściwej statystyki. Dla prostoty wyrażeń w tekście pomijamy ten czynnik. Zasadniczemu Czytelnikowi zalecamy traktowanie oznaczenia k jako stałej Boltzmanna skorygowanej czynnikiem wynikającym ze statystyki, czyli entropii przypadającej na jeden stopień swobody.

[7] W literaturze na ogół podawana jest wartość $k \cdot \ln 2$, która odpowiada przyjętemu w tej pracy modelowi dla w=2, czyli komórce bistabilnej.

[8] Jest to wymóg dość oczywisty: zapisanie (n+1)–ego bitu nie powinno zmieniać stanu bitu n–tego, byłoby to sprzeczne nie tylko z rozważanym z modelem Touringa, ale z oczywistymi względami praktycznymi.

[9] Z dokładnością do stałej równej entropii hardware pamięci.

[10] Wprowadzona miara informacji I jest *de facto* miarą uporządkowania pamięci, gdyż najwyższą wartość przyjmuje dla skrajnie redundantnego stanu pamięci wypełnionej samymi zerami lub jedynkami. Eliminację redundancji i kompresję informacji omawia Dodatek.

[11] W "Krótkiej historii czasu" Hawking oblicza, że uważny czytelnik jego książki, zapamiętując ją, mógłby zmniejszyć entropię swojego mózgu o 2 miliony jednostek, lecz w tym samym czasie metabolizm jego organizmu zwiększa entropię otoczenia aż o 20 bilionów tych samych jednostek – tylko wskutek podtrzymywania temperatury organizmu. Procesy umysłowe nie muszą jednak wymagać aż tak rozrzutnego metabolizmu. Organizm lub urządzenie zmiennocieplne funkcjonuje w stanach bliskich równowadze cieplnej z otoczeniem, jest zatem bardziej wydajne.

[12] Charles H. Bennett, The Thermodynamics of Computation, IJTF Vol. 21 No 12 1982.

[13] Fredkin E., Toffoli T., Conservative logic, IJTF Vol. 21 No 3/4, 1982.

[14] Gerard J. Milburn, Quantum Technology, Allen & Unwin Pty Ltd 1996; wyd. Prószyński i S–ka 1999, "Inżynieria kwantowa", str. 177.

[15] K.K. Likharev, Classical and Quantum Limitations on Energy Consumption in Computation, IJTF, Vol. 21, No 3/4, 1982.

[16] Charles H. Bennett, The Thermodynamics of Computation, IJTF Vol. 21 No 12 1982.

[17] Komórka pamięci bez zapisu może pozostawać w dowolnym z w równoprawnych stanów.

[18] Poza energią niesioną przez sygnały informacyjne z zewnątrz.

[19] Ciekawe, co by o tym powiedzieli producenci dysków udzielający *life time warranty?*

[20] Dla zapamiętania cyfry wystarczy pamięć przyjmująca 10 stanów. Ponieważ już 2^4 daje

2*2*2*2=16, cztery bity to nieco za dużo, a bajt ma bitów jeszcze więcej i pozwala zapisać 2^8, czyli 256 stanów. Przyjęcie w wywodzie kodowania cyfr w (całych) bajtach jest nieco rozrzutne, ale wprowadza co najwyżej 256/10 ≈ 25-krotny błąd w ewentualnych wynikach liczbowych, które i tak nie są podawane.

[21] Gregory J. Chaitin: Information–theoretic computational complexity, IEEE Transactions on Information Theory, IT–20, 10–15, 1974; Goedel's Theorem and Informationm, IJTF Vol. 21 No 12, 1982; The Limits of Mathematics, Springer – Verlag, 1998.

[22] Pamięć w różnych poziomach energetycznych jest "erodowana" przez relaksację, a pamięć w jamach potencjału dla zdegenerowanego stanu o jednej energii – przez tunelowanie.

[23] Jeśli zegar pracuje z częstotliwością ν, a odstęp energetyczny między dwoma stanami komórki pamięci jest ΔE, to w okresie $\Delta t=1/\nu$ stan energetyczny komórki musi być określony z dokładnością ΔE. W przeciwnym wypadku pamięć straci wiarygodność. Zasada nieoznaczoności Heisenberga narzuca warunek $\Delta E \cdot \Delta t \geq h$, gdzie h to stała Plancka. Stąd $\nu \leq \Delta E/h$, czyli dla minimalnie absorbującego energię procesu, w którym $\Delta E=k \cdot T$, zachodzi ograniczenie $\nu \leq k \cdot T/h$.

[24] Dla prostoty wywodu, aby nie mnożyć współczynników, przeszliśmy z cyfr na bity, a z rozwinięcia dziesiętnego na dwójkowe.

* Pisząc tę pracę, nie byłem świadom, że jej zasadniczy wywód powtarza wcześniejsze o 70 lat rozważania Leo Szilarda z jego rozprawy habilitacyjnej „O zmniejszeniu entropii w układzie termodynamicznym pod wpływem istot inteligentnych" (Szilard, L. *On the Decrease of Entropy in a Thermodynamic System by the Intervention of Intelligent Beings*, in *The Collected Works of Leo Szilard: Scientific Papers*, MIT Press, 1972). W szczególności, mój projekt nieśmiertelnego komputera jest bardzo zbliżony do koncepcji Silnika Szilarda, który miał uzyskiwać energię z kasowania informacji. Moja praca pozostaje jednak oryginalna, co najmniej – choć mam nadzieję, że nie tylko – dlatego, że Szilard pisał swoją w epoce przedinformatycznej, i siłą rzeczy nie odnosił jej do komputerów. (*Dopisek z 2015 r.)*

Marek Chlebuś, Szczególna teoria wieczności, The Peculiarity od Man, Vol. 10, Kielce-Warszawa 2009

MCH