

FILOZOFIA I NAUKA
Studia filozoficzne i interdyscyplinarne
Tom 8, cz. 1, 2020

Paweł Stacewicz

O ZNACZENIU POJEĆ INFORMATYCZNYCH DLA FILOZOFII NA PRZYKŁADZIE ROZRÓŻNIENIA MIĘDZY CYFROWOŚCIĄ I ANALOGOWOŚCIĄ

<https://doi.org/10.37240/FiN.2020.8.1.10>

STRESZCZENIE

W niniejszej pracy pokazujemy, w jaki sposób formalne pojęcia informatyczne – takie, jak kodowanie, algorytm czy obliczalność – mogą być interpretowane filozoficznie, w tym ontologicznie i epistemologicznie. Interpretacje takie prowadzą do pytań i problemów, których robocze rozwiązania składają się na jakąś formę prefilozoficznego światopoglądu. W pracy kładziemy nacisk na pytania inspirowane informatycznym rozróżnieniem cyfrowości i analogowości, które ma swój matematyczny pierwowzór w matematycznym rozróżnieniu dyskretności i ciągłości. Między innymi są to następujące pytania: 1) czy głęboka struktura fizycznej rzeczywistości ma charakter cyfrowy, czy analogowy, 2) czy ludzki umysł przypomina bardziej informatyczny system cyfrowy czy analogowy, 3) czy odpowiedź na pytanie drugie daje nam owocny poznawczo wgląd w ograniczenia poznawcze umysłu? Za szczególnie istotną podstawę powyższych pytań uznajemy fakt, że moc obliczeniowa (tj. zakres rozwiązywalnych problemów) niektórych typów obliczeń analogowych jest większa od mocy obliczeń cyfrowych.

Słowa kluczowe: informacja, cyfrowość, analogowość, moc obliczeniowa, światopogląd informatyczny.

WSTĘP

W tytule niniejszej pracy występuje odniesienie do dwóch dyscyplin, które na pierwszy rzut oka różnią się od siebie jak ogień i woda. Z jednej strony jest to informatyka – dziedzina współczesna, konkretna, niezwykle silnie wpływająca na rozwój najnowszych technologii; z drugiej zaś, filozofia – wysoce ogólna, refleksyjna, zakorzeniona historycznie, a niekiedy i merytorycznie, w odległej starożytności. W obecnej pracy będę argumentować jednak, że obydwie dyscypliny sporo łączą. W niektórych przynajmniej obszarach – jak chociażby filozofia umysłu czy epistemologia – filozofia z informatyką zbliżają się do siebie, wchodząc w coraz silniejsze interakcje.

Spośród dwóch interesujących nas dyscyplin *informatyka* pozostaje dziedziną lepiej określoną.¹ Chcąc uwypuklić jej główne pojęcia – za które uznajemy informację, algorytm i automat – można stwierdzić krótko, że jest to nauka o *algorytmicznych* metodach przetwarzania odpowiednio kodowanych *informacji* (danych) za pomocą różnego rodzaju *automatów*. W charakterystyce tę dobrze wpisują się tytułowe kategorie *cyfrowości* i *analogowości*. Oznaczają one, po pierwsze, cechy przetwarzanych danych (dyskretnych bądź ciągłych), po drugie zaś, właściwości automatów, które służą do ich algorytmicznego przetwarzania (w sposób dyskretny bądź ciągły). Jak zobaczymy dalej, pojęcia te nie są do siebie sprowadzalne – mimo, że w toku historycznego rozwoju informatyki urządzenia i techniki analogowe zastępowano konsekwentnie cyfrowymi.

Jeśli chodzi o *filozofię*, to ze względu na jej bogatą historię i uniwersalistyczne aspiracje, niezwykle trudno jest określić zwięźle jej specyfikę.² Koncentrując się na warstwie pojęciowej, warto przypomnieć jednak, że filozofia ma ambicje precyzować pojęcia najogólniejsze (jak byt, poznanie, prawda czy czas), by za ich pomocą ujmować istotę kwestii dla człowieka podstawowych (jak np. związek wydawanych sądów z rzeczywistością, w tym: ich prawdziwość bądź fałszywość). W niniejszej pracy bardzo ważnym pojęciem jest *obliczanie* (ang. *computing*). Przy jego użyciu filozofowie usiłują uchwycić istotę tego, co dzieje się wewnątrz komputerów (a niekiedy też: porównywanych do nich umysłów), gdy realizują one takie czy inne algorytmy. W obecnej pracy będzie nas interesować kontrast pomiędzy dwoma rodzajami obliczania: cyfrowym i analogowym.

1. MIĘDZY INFORMATYKĄ A FILOZOFIĄ

1.1. Różnorodność wzajemnych związków

Na relację między informatyką a filozofią można spoglądać z rozmaitych perspektyw, spośród których warto wstępnie przywołać dwie. Po pierwsze, koncentrując się na pracach konkretnych uczonych, można wskazywać pewne ich szczególne dokonania, które wniosły coś do obydwu dziedzin.

Z grona klasyków filozofii na pierwszy plan wybija się tu *Gottfried W. Leibniz*, który prowadząc dociekania *stricte* filozoficzne, przyczynił się do póź-

¹ Dzieje się tak mimo rozmaitych dyskusji metodologicznych, w których zwraca się uwagę na trzy aspekty badań informatycznych: formalny, inżyniersko-techniczny i empiryczny. Gdy uwypukla się pierwszy, informatykę uznaje się za naukę pokrewną matematyce, gdy drugi – za naukę bliską elektronice i telekomunikacji, gdy trzeci – za dyscyplinę po części przyrodniczą, jak fizyka czy biologia. Por. (Murawski 2014; Knuth 1974; Denning 2005). W niniejszym tekście będziemy uwypuklać dwa pierwsze aspekty.

² Przykładowo, we wstępie do *Zagadnień i kierunków filozofii* Kazimierz Ajdukiewicz pisał: „Co to jest filozofia? Pytanie to łatwo postawić, ale wcale niełatwo na nie odpowiedzieć. Wyraz *filozofia* posiada bowiem długą bardzo historię i w różnych okresach co innego wyrazem tym określano” (Ajdukiewicz 2003, 13).

niejszego zaistnienia informatyki. Na szczególną uwagę w tym względzie zasługują sprzężone ze sobą koncepcje *lingua characteristic* oraz *calculus ratiocinator*, które dopełnia preinformatyczna idea rozwiązywania problemów za pomocą zautomatyzowanych obliczeń. W nawiązaniu do kilku wypowiedzi Leibniza (1890) określa się ją niekiedy mianem *calculemus* (po polsku: *obliczajmy*).³ Przybliżając się do informatycznej praktyki, hasło to można rozwinąć następująco: i) opiszmy dany problem za pomocą liczb, ii) wykonajmy na nich niezbędne obliczenia (to może zrobić maszyna), iii) zinterpretujmy uzyskany wynik liczbowy jako rozwiązanie problemu. Nietrudno spostrzec, że według takiego właśnie schematu, choć o wiele bardziej rozbudowanego, realizują swoje zadania dzisiejsze komputery.

Z grona bardziej współczesnych prekursorów informatyki nie sposób pominąć *Alana Turinga* – matematyka i logika, któremu wyjątkowo bliskie były zagadnienia typowo filozoficzne, związane z obliczeniowym modelowaniem, czy wręcz realizowaniem, czynności umysłowych.⁴ Przypomnijmy, że jego poglądy na ten temat wahały się pomiędzy entuzjastyczną wizją komputerowej inteligencji i poważnymi wątpliwościami co do możliwości sztucznej realizacji myślenia za pomocą technik cyfrowych. Wątpliwości te dotyczyły, na przykład, myślenia intuicyjnego czyli przedformalnego, pozwalającego uchwycić sam problem i niezbędne do jego opisu pojęcia (por. Marciszewski 2019).

Przykłady zainteresowań i dokonań konkretnych uczonych ujawniają szerszy i niekoniecznie historyczny już wymiar relacji między informatyką a filozofią. Pozwalają dostrzec specyficzne obszary badań, które sytuują się wyraźnie „pomiędzy”. Należą do nich: obliczeniowe modelowanie umysłu (najsilniej obecne w kognitywistyce), ontologia informacji i systemów obliczeniowych (jako działy filozofii) czy aksjologiczne zagadnienia sztucznej inteligencji (związane siłą rzeczy z realnymi dokonaniem informatyki).⁵ Ów dziedzinowy punkt widzenia ma oczywiście korzenie historyczne; współcześnie jednak zyskuje on silny realny punkt odniesienia w postaci bardzo już zaawansowanych systemów do przetwarzania danych.

Doceniając wagę zarysowanych perspektyw, w dalszej części pracy skoncentruję się na pewnej szczególnej strategii badawczej, czy też interpretacyjnej, która wiedzie *od informatyki do filozofii*. Jej punkt wyjścia stanowi spostrzeżenie, że informatyka jest po części nauką formalną, wobec czego jej

³ Por. (Trzęsicki 2006). Nazwa „*calculemus*” jest przypisana także do założonej przez Witolda Marciszewskiego witryny www.calculemus.org, która obejmuje bardzo wiele materiałów dotyczących oryginalnej koncepcji Leibniza oraz jej współczesnych rozwinięć.

⁴ Zob. np. słynny artykuł *Computing Machinery and Intelligence* (Turing 1950). W tekście tym znajdujemy oryginalne sformułowanie słynnego testu na inteligencję maszyn (nazywanego dziś testem Turinga) oraz inspirującą filozoficznie dyskusję z argumentami podważającymi możliwość zdania tego testu, czy, szerzej, możliwość zaistnienia maszyn myślących.

⁵ Na gruncie polskim wymienione (przykładowo) zagadnienia są dyskutowane od ponad pięciu lat w ramach cyklu konferencji naukowych „Filozofia w informatyce” – cyklu którego autor niniejszej pracy jest organizatorem i aktywnym uczestnikiem. Zob. np.: www.calculemus.org/fi4

niektóre przynajmniej pojęcia (formalne właśnie) można interpretować w różnych dziedzinach problemowych, w tym filozoficznie. Mówiąc dokładniej, można je interpretować w odniesieniu do takich „twardych” zagadnień filozoficznych, jak struktura bytów (ich ewentualna zawartość informacyjna) czy natura myślenia (przede wszystkim jego związek z obliczeniami). W punkcie 1.2 opiszę w sposób poglądowy trzy interpretacje tego typu.

1.2. Od pojęć informatycznych do zagadnień filozoficznych

Pojęciem dla informatyki zupełnie podstawowym, podstawowym z matematycznego punktu widzenia, jest *kodowanie liczbowe*. Oznacza ono czynność reprezentowania wszelkich komputerowo przetwarzanych obiektów, takich jak teksty, obrazy czy dźwięki, za pomocą odpowiednio dobranych liczb i wiążących owe liczby struktur. Przykładowo: gdyby ten tekst miał być wyświetlony na ekranie komputera, musiałby zostać przedstawiony liczbowo, np. za pomocą kodu ASCII, a następnie binarnie, za pomocą sekwencji zer i jedynek (o ile używalibyśmy tradycyjnego komputera cyfrowego). Gdyby natomiast miał zostać sprawdzony pod względem poprawnej pisowni, należałoby uruchomić specjalny program, który składa się z instrukcji, kodowanych ostatecznie za pomocą cyfr binarnych. Uogólniając powyższy przykład, trzeba stwierdzić, że z punktu widzenia matematycznie ujmowanego „wnętrza” maszyny wszystko to, co postrzegamy i przekształcamy za pośrednictwem komputerów, *jest jakąś liczbą*.⁶ Na poziomie informatyki teoretycznej stwierdzeniu temu odpowiada fakt, że wszelkie operacje realnych komputerów (w tym: przetwarzanie tekstów) są opisywane za pomocą pewnego *modelu obliczeń* (Burgin, Dodig-Crnkovic 2013). Ten zaś określa pewną szczególną dziedzinę liczbową, do której należą argumenty i wartości funkcji definiujących dozwolone obliczenia. Podkreślić przy tym trzeba, że różnym dziedzinom liczbowym tychże funkcji odpowiadają różne typy komputerów (np. analogowych i cyfrowych).

Przechodząc od czysto informatycznych zagadnień kodowania danych za pomocą liczb do filozofii, napotykamy szereg ogólnych pytań o *istotę rzeczywistości*. Czy jest ona matematyczna, a w szczególności *liczbowa*, jak np. sądzili w starożytności Pitagorejczycy? Mówiąc zaś bardziej epistemologicznie: czy wszelkie aspekty rzeczywistości, w szczególności natury, dają się opisać w kategoriach liczbowych? Współczesne zastosowania informatyki, w tym szerokie możliwości obliczeniowego kreowania rzeczywistości wirtualnej, dostarczają silnego argumentu pragmatycznego na rzecz odpowiedzi pozytywnej. Polega on na tym, że znaną nam liczbowo-obliczeniową naturę informatycznych artefaktów przypisuje się całej rzeczywistości, coraz sku-

⁶ Sformułowanie to nawiązuje do znanego hasła starożytnych Pitagorejczyków, że „wszystko jest liczbą”, które współcześnie – o tym dalej, w głównym tekście – zyskuje nową informatyczną interpretację.

teczniej symulowanej bądź zastępowanej za pomocą komputerowych technologii (Polak 2017). Ale czy argumenty pragmatyczne, nawiązujące do praktycznych dokonań techniki, mogą wystarczyć? Ponadto, do jakiego typu liczb należy się odwołać: tylko naturalnych (które stanowią matematyczny fundament technik cyfrowych) czy może rzeczywistych (które leżą u podstaw technik analogowych)? Dzięki informatyce tego rodzaju pytania, już *filozoficzne*, zyskują zarówno na aktualności, jak i na precyzji.

Kolejne z pojęć inspirujących filozoficzne dociekania to *algorytm*. W informatyce znamy jego precyzyjną definicję, jako schematu procedury możliwej do wykonania przez uniwersalną maszynę Turinga, znamy nadto różne typy i własności algorytmów (Stacewicz 2016). W świetle tej wiedzy rodzą się ważne pytania o algorytmiczność *czynności umysłowych*. Czy wszystkie one, z intuicją poznawczą włącznie, dadzą się opisać, a może i sztucznie zrealizować, za pomocą specjalnie dobranych algorytmów? Jakich algorytmów? Czy da się je wskazać na niskim poziomie procesów wewnątrzmożgowych, czy też są one charakterystyczne dla wyższego poziomu opisu, dotyczącego świadomych rozumowań na podstawie wyrażalnych językowo pojęć? Pojawiają się także pytania bardziej fundamentalne. Na przykład: czy pojęcie algorytmu pozwala uchwycić arystotelesową koncepcję *formy* jako tego składnika bytu, który odpowiada za jego wewnętrzną organizację i dynamikę?

Z zagadnieniami definicji algorytmu oraz algorytmizowania różnych czynności poznawczych wiąże się informatyczne pojęcie *obliczalności*. W informatyce teoretycznej funkcja obliczalna (w sensie Turinga) to taka funkcja, której wartości dają się obliczyć za pomocą pewnego programu dla uniwersalnej maszyny Turinga, zaś problem obliczalny to taki problem, dla którego istnieje rozwiązujący go program dla wspomnianej maszyny (Turing 1936). Ponieważ zaś wiemy – z mocą dowodu matematycznego – że nie wszystkie precyzyjnie definiowalne problemy są obliczalne, to zachodzi pytanie czy owe granice mechanicznej rozwiązywalności są również *granicami ludzkiego poznania*? A jeśli nie są, to czym charakteryzują się funkcje ludzkiego umysłu (np. intuicja) pozwalające te granice przekraczać? A jeśli takie funkcje istnieją, to – przechodząc z powrotem na pozycje informatyczne – czy mamy do realnej dyspozycji jakieś silniejsze (pozaturingowskie) techniki obliczeń, które pozwoliłyby wspomniane problemy rozwiązywać (Marciszewski 2019)?

1.3. Światopogląd informatyczny

Zarysowane wyżej pytania i prowadzące do nich filozoficzne interpretacje informatycznych pojęć składają się na dużo szerszą koncepcję prefilozoficzną, zwaną *światopoglądem informatycznym*. Koncepcja ta została sformułowana po raz pierwszy w książce *Umysł – Komputer – Świat. O zagadce*

umysłu z informatycznego punktu widzenia, autorstwa Witolda Marciszewskiego i Pawła Stacewicza (2011), a jest rozwijana po dziś dzień, między innymi w postaci wpisów i dyskusji na prowadzonym przez tych autorów blogu akademickim *Cafe Aleph*.

Światopogląd informatyczny można określić dwupoziomowo. Po pierwsze, w warstwie samego oglądu (poprzedzającego pogląd), jest to pewien *informatyczny obraz świata* uzyskiwany poprzez opis różnych zjawisk w kategoriach informatycznych. Na przykład, używając pojęcia algorytmu można postrzegać umysł jako system do algorytmicznego przetwarzania informacji, zaś posługując się o wiele bardziej specjalistycznym pojęciem sztucznej sieci neuronowej, można przyrównywać fragmenty mózgu do różnych sieci tego typu. W postaci najbardziej metodologicznie zaawansowanej wspomniana aparatura pojęciowa prowadzi do *informatycznych modeli*: modeli zjawisk fizycznych, psychicznych, społecznych, ekonomicznych i innych (Stacewicz, Włodarczyk 2011). Wszystkie one składają się na dojrzały metodologicznie, coraz bardziej spójny i całościowy, informatyczny obraz rzeczywistości.

Na drugim poziomie omawianej koncepcji, przecinającym się już z filozofią, sytuują się poglądy czy też *przekonania* dotyczące świata opisywanego informatycznie. Jest to zatem właściwa *warstwa światopoglądowa*. Przykładowo, jeśli w ramach informatycznego obrazu świata skierujemy uwagę na organizmy żywe i zadamy pytanie o cyfrowość bądź analogowość zachodzących wewnątrz nich procesów informacyjnych, to opowiedzenie się za jedną z tych dwóch możliwości będzie (fragmentarycznym) wyrazem pewnego światopoglądu.⁷ Podobnie, jeśli na pytanie o moc obliczeniową modelowanego informatycznie umysłu odpowiemy, że przewyższa ona moc uniwersalnej maszyny Turinga, to wykroczymy w ten sposób poza opis, ogląd czy model w kierunku światopoglądu.

By rozwinąć powyższe przykłady, warto przywołać oryginalną charakterystykę z bloga *Cafe Aleph*, która stanowi coś w rodzaju szkieletowego wprowadzenia w ideę omawianego typu poglądów. Oto ona:

„Żeby uchwycić naturę światopoglądu informatycznego, zestawmy go z mechanistycznym. Ten drugi pojawił się w myśli europejskiej u progu nowożytności i trzymał się mocno przez parę wieków. Różnicę można, najbardziej z grubsza, ująć tak, że mechanicyzm wyjaśnia świat wyłącznie w kategoriach hardware'u, podczas gdy informatyzm wprowadza software jako drugi czynnik, i to bardziej fundamentalny. Genetyka np. jest mocnym wsparciem dla informatyzmu jako idei, że życie polega na przetwarzaniu informacji. Kosmologiczna teoria ewolucji naprowadza na pomysł, że wszechświat jest komputerem, którego oprogramowaniem są prawa fizyki; nie każdy się podpisze pod tak radykalnym przypuszczeniem, ale dobrze ono ilustruje właściwy informa-

⁷ W tej kwestii warto zapoznać się z arcyciekawą dyskusją specjalistów, pt. *Is Life Analog or Digital?*; zob. https://www.edge.org/conversation/freeman_dyson-is-life-analog-or-digital

tyzmowi trend ku modelowaniu świata w kategoriach przetwarzania informacji, a więc procesu sterowanego przez algorytmy. Gdy idzie o procesy społeczne, obserwujemy, jak np. w ekonomii podejście w kategoriach obliczalności, a więc informatycznych, góruje skutecznością nad podejściem ideologicznym.”⁸

Podsumowując przedstawione charakterystyki, trzeba stwierdzić, że światopogląd informatyczny stanowi pewien *teoretyczny konstrukt*, który zdaniem jego inicjatorów wyraża żywe we współczesnej kulturze tendencje do myślenia o świecie w kategoriach informacyjnych i informatycznych.⁹ Z formalnego” punktu widzenia konstrukt ten jest klasą, której elementy są wyznaczone przez zbiory inspirowanych informatycznie pytań takich jak pytanie o cyfrową bądź analogową naturę fizycznej rzeczywistości (Stacewicz 2019).

Pewnym znaczącym elementem tej klasy jest pewien typ poglądów, które głosi i uzasadnia Witold Marciszewski (2011), określając je nazwą *realistycznego optymizmu poznawczego*. Odwołując się ponownie do bloga Cafe Aleph przytoczmy zwięzły opis tejże koncepcji:

„Stanowisko to wychodzi od wyrażonego i uzasadnionego informatycznie stwierdzenia, że istnieją w świecie problemy o złożoności (czasowej i pamięciowej), która przewyższa aktualne możliwości poznawcze wykorzystującego rozmaite algorytmy umysłu. Są to więc problemy o rozwiązaniach dla umysłu niedostępnych. Mimo to zarówno w pojedynczym umyśle, jak i w ludzkiej kulturze (wytworze wielu umysłów), tkwi pewien dynamizm, który pozwala sukcesywnie nadążać za rosnącą złożonością świata. Wyraża się on między innymi w tym, że umysł potrafi wytwarzać nowe pojęcia, nowe typy algorytmów i nowe teorie (np. logiki wyższego rzędu), dzięki którym problemy dotychczas nierozwiązywalne stają się rozwiązywalne.

Uzasadnienie dla tego rodzaju poglądu – jak widać bardzo optymistycznego – czerpie autor z interpretacji wyników pewnych badań metamatematycznych (dotyczących np. twierdzenia Gödla). Ja mógłbym dorzucić do nich argument informatyczny, związany z istnieniem systemów uczących (a więc dynamicznie zmieniających swój program w interakcji ze środowiskiem). Zauważać trzeba, że obydwie typy argumentów nie mogłyby zaistnieć, gdyby argumentujący nie opisywał świata za pomocą informatycznej aparatury pojęciowej.”¹⁰

⁸ Źródło: http://marciszewski.eu/?page_id=1280, wpis na blogu Cafe Aleph, autorstwa Marciszewskiego, pt. *Światopogląd informatyczny* (dostęp: 2.03.2020). W przywołanym fragmencie występuje termin „informatyzm”, którym autorzy opisywanej koncepcji określają niekiedy sam światopogląd informatyczny, a niekiedy pewną filozofię przyszłości, która mogłaby wyłonić się z tego światopoglądu (w tej sprawie zob. ostatni rozdział niniejszego tekstu).

⁹ Socjologicznie ugruntowanym wyrazem tych tendencji jest koncepcja społeczeństwa informacyjnego. (rozwijana przez amerykańskiego socjologa Daniela Bella, od lat 80-tych XX wieku), a także inne zjawiska społeczne, określane takimi nazwami, jak „era informacji” czy „informacyjny zwrot w kulturze”; por. (Lubacz 1999; Hetmański 2013).

¹⁰ Cytat ten jest fragmentem wpisu do bloga Cafe Aleph, autorstwa Stacewicza, *Światopogląd i światopogląd*; <http://marciszewski.eu/?p=8224>, dostęp: 2.03.2020. Ostatnie zdanie cytatu dostosowano nieznacznie do stylistyki obecnego tekstu.

2. INFORMATYCZNE POJĘCIA CYFROWOŚCI I ANALOGOWOŚCI

W szerokiej koncepcji światopoglądu informatycznego – jako klasy poglądów inspirowanych różnymi typami i modelami obliczeń – szczególną rolę odgrywa rozróżnienie *cyfrowości* i *analogowości*. W warstwie czysto informatycznej przejawia się ono w postaci dystynkcji między cyfrowymi i analogowymi technikami przetwarzania danych, które są realizowane odpowiednio przez komputery cyfrowe (dziś dominujące) oraz analogowe (będące w przewadze do lat 60-tych XX wieku). W warstwie matematycznej jest ono pochodne względem rozróżnienia między obiektami *dyskretnymi* i *ciągłymi*, z których najprostsze i najbardziej fundamentalne pozostają liczby naturalne (tworzące zbiór przeliczalny i niegęsty) oraz liczby rzeczywiste (tworzące zbiór nieprzeliczalny i ciągły).¹¹ Z matematycznego punktu widzenia zatem wyróżnikiem danych cyfrowych jest ich *dyskretność*, zaś cechą charakterystyczną danych analogowych jest ich *ciągłość*.

2.1. Dane i obliczenia cyfrowe

Zdecydowana większość współczesnych technologii informatycznych to *technologie cyfrowe*. Nazwa ta podkreśla fakt, że służą one do przetwarzania danych, które matematycznie rzecz biorąc, są układami specjalnie dobranych cyfr, np. zer i jedynek. Owe cyfry mają wprawdzie swój fizyczny odpowiednik w wewnętrznych stanach urządzeń przetwarzających (w tym: komputerów), lecz z punktu widzenia ich projektantów i/lub użytkowników stanowią one swoisty kod – informatyczną reprezentację „pozamaszynowego” świata. I tak na przykład: użyty do kodowania dźwięku zapis „1011” może oznaczać – zależnie od płaszczyzny odniesienia – zarówno pewien stan fizyczny maszyny, jak i pewną rozpoznawalną przez człowieka cechę odtwarzanego dźwięku (np. wysokość tonu).

W przypadku komputerów reprezentowane cyfrowo dane przekształca się za pomocą *programów*, których zapisy (niezależnie od stopnia abstrakcji stosowanego języka programowania) mogą być rozumiane ponownie jako *ciągi cyfr*. Nie tylko zresztą mogą być tak rozumiane, lecz faktycznie, w realnym procesie obliczeniowym, są one zamieniane na fizyczne układy cyfr. Jeśli spojrzeć na tę sprawę czysto technicznie, to odpowiedniej translacji dokonują kompilatory – specjalne programy, pośredniczące między językami wysokiego poziomu a kodem maszynowym. Patrząc na sprawę szerzej, to

¹¹ Warto dodać, że niektórzy filozofowie matematyki traktują rozróżnienie dyskretności i ciągłości jako jedną z kluczowych opozycji, wyznaczającą ramy ewolucji matematycznych pojęć. W tej m.in. sprawie Roman Duda (2012) pisze: „*Inny rodzaj dyscypliny w matematyce narzucają parę biegunów, między którymi twórczość matematyczna się zawiera, takie jak stałość-zmienność, dyskretność-ciągłość, skończoność-nieskończoność. Najbardziej wartościowe pojęcia matematyczne powstają między tymi biegunami, wyrażając niektóre własności każdego z nich*”.

znaczy koncepcyjnie, o konkretnym przekładzie decyduje przyjęta przez twórcę systemu i rozpisana na różne jego poziomy *metoda kodowania*. Na przykład, niezbędna każdemu programiście instrukcja warunkowa może być określona na poziomie wysoce abstrakcyjnego języka Pascal (jako instrukcja typu „if ... then ...”), ale może także zostać przedstawiona w postaci niskopoziomowego kodu, złożonego ze „zrozumiałych” dla maszyny symboli podstawowych (np. zer i jedynek).

Podsumowując zatem: niezależnie od tego, czy chodzi o dane, czy o programy wykonawcze, czy o programy tłumaczące, technologia cyfrowa odwołuje się do obiektów dyskretnych, symbolicznych i ostro od siebie rozróżnialnych. W gruncie rzeczy, z matematycznego punktu widzenia, wolno utożsamiać je z pewnymi skończonymi zapisami liczb *naturalnych* (tj. układów cyfr).

Najszerzej znanym, matematycznym modelem obliczeń cyfrowych jest *uniwersalna maszyna Turinga* (Turing 1936).¹² Daje ona ogólny i abstrakcyjny wgląd w istotę działania realnych komputerów cyfrowych. Ponieważ jest to wgląd abstrakcyjny, pozostaje on niezależny od szczegółów fizycznej konstrukcji realnych automatów a także od specyfiki sterujących nimi programistycznych struktur. O adekwatności modelu stanowi natomiast fakt, że każdy program, dla dowolnie zaawansowanej technicznie maszyny cyfrowej, można przełożyć na odpowiedni zestaw instrukcji dla uniwersalnej maszyny Turinga – odpowiedni w tym sensie, że zapewnia on rozwiązanie tego samego problemu co program oryginalny.

Należy podkreślić, że mimo daleko posuniętej abstrakcji pomysł Turinga pozostaje bardzo bliski informatycznej praktyki: stanowi coś w rodzaju opisu *fizycznej maszyny* kontrolowanej za pomocą instrukcji warunkowych.¹³ W opisie tym występują pojęcia stosowane zwykle do realnych maszyn i zachodzących w ich wnętrzu procesów. Ujmując rzecz operacyjnie, Turingowski model-maszyna przetwarza dane umieszczone na specjalnej taśmie, wykorzystując w tym celu wprowadzany do jego rejestru program. Ów program służy do sterowania ruchami głowicy odczytująco-zapisującej, która zachowuje się w sposób następujący: 1) zależnie od swojego aktualnego stanu i aktualnie wskazywanego symbolu na taśmie, wpisuje w jego miejsce nowy symbol lub zostawia dotychczasowy, 2) zmienia swój bieżący stan lub pozostaje w nim, 3) przesuwa się na taśmie o jedno pole w prawo lub w lewo. Realizacja programu polega zatem na stopniowej, skokowej i dokładnie rozplanowanej zmianie zawartości taśmy. Gdy głowica znajdzie się w wyróżnionym stanie końcowym, maszyna zatrzymuje się, a na taśmie pozostaje se-

¹² W tym samym mniej więcej czasie, tj. w latach 30tych XX wieku, opracowano inne modele równoważne ekstensjonalnie, takie jak rachunek lambda Churcha czy model funkcji częściowo rekurencyjnych (zob. Murawski 2010).

¹³ Według tegoż opisu skonstruowano nawet prototyp odpowiedniego fizycznego urządzenia. Zob. materiał na ten temat w blogu Cafe Aleph; <http://marciszewski.eu/?p=1189#comments> (dostęp 2.03.2020).

kwencja symboli kodujących wynik przetwarzania danych (interpretowany zwykle jako rozwiązanie pewnego problemu).

To co w przywołanym opisie jest z naszego punktu widzenia najważniejsze to fakt, że model Turinga jest wręcz idealnie *dyskretny*. Dotyczy to wszystkich elementów jego struktury. Zawierająca dane taśma dzieli się na odrębne klatki, język zapisu danych i programów składa się ze skończonej liczby rozróżnialnych symboli, liczba stanów głowicy i całej maszyny jest skończona, stany są ostro rozróżnialne, a głowica porusza się po taśmie w sposób skokowy. Model Turinga daje zatem ogólny wgląd w istotę cyfrowości. Polega ona na tym, że zarówno same dane jak i schematy ich przetwarzania mają postać kodu symbolicznego, złożonego z rozróżnialnych, *dyskretnych* elementów.

Przed przejściem do kolejnego rozdziału, dotyczącego już analogowości, warto wyjaśnić pewną kwestię, która mogłaby postawić pod znakiem zapytania sensowność podejmowanej dalej tematyki. Kwestia ta dotyczy słynnej *tezy Churcha-Turinga*. W jednym z wariantów głosi ona, że każda funkcja efektywnie obliczalna jest obliczalna za pomocą uniwersalnej maszyny Turinga – postulując w ten sposób, że wszelkie (skuteczne) obliczenia, w tym analogowe są tak naprawdę obliczeniami cyfrowymi (Mycka, Olszewski 2015).¹⁴ Zaś wszelkie różnice między typami obliczeń, będące podstawą ich istotnej informatycznie typologii, nie są ekstensjonalne, lecz czysto *intensjonalne*. Dotyczą zatem nie klasy rozwiązywalnych problemów (istnieje bowiem jedna wspólna klasa problemów rozwiązywalnych), lecz szybkości ich rozwiązywania, wielkości wymaganych zasobów, szczegółów użytej technologii, „elegancji” matematycznego opisu etc...

W obecnej pracy sąd na temat prawdziwości tezy Churcha-Turinga zawieszamy, traktując ją jako dość dobrze uzasadnioną, nie udowodnioną jednak ostatecznie. Nie przesądzając zatem tego, czy teza jest prawdziwa czy fałszywa, a zatem czy różnica między obliczeniami cyfrowymi i analogowymi jest ekstensjonalna czy intensjonalna, możemy przejść do dokładniejszego omówienia informatycznego pojęcia analogowości.

2.2. Dane i obliczenia analogowe

Zgodnie z wcześniejszymi wyjaśnieniami w obecnej pracy koncentrujemy się na tym rodzaju analogowości, której cechą charakterystyczną jest *ciągłość*.¹⁵ W odniesieniu do przetwarzanych danych znaczy to, że mogą one

¹⁴ Z postulatem takim współgrają często dwa poglądy: a) obiekty dyskretne (cyfrowe) stanowią wystarczająco dobrą aproksymację obiektów ciągłych (analogowych), a patrząc z drugiej strony, b) obiekty analogowe stanowią matematycznie użyteczne idealizacje obiektów dyskretnych. Zgodnie z tym, co jest wyjaśnione dalej w głównym tekście (odnośnie tezy Churcha-Turinga) w obecnej pracy poglądy tego typu zawieszamy – traktując je jako możliwe, ale nie jako jedynie możliwe.

¹⁵ Istnieją także inne sposoby rozumienia analogowości, odwołujące się bardziej do pojęcia analogii niż ciągłości; zob. (Stacewicz 2017).

różnić się od siebie dowolnie mało, która to własność nie przysługuje danym cyfrowym. W ich przypadku bowiem istnieje zawsze pewna minimalna, teoretycznie wyrażalna i fizycznie realizowalna, różnica między dopuszczalnymi wartościami danych. Dla kodów binarnych, na przykład, jest to fundamentalna różnica między 0 i 1.

Obliczeniowe układy analogowe służą zatem do bezpośredniego przetwarzania *danych ciągłych*, bez przeprowadzania ich wstępnej dyskretyzacji. Ich sposób konstrukcji, w tym fizyczna charakterystyka urządzeń wejścia/wyjścia, opiera się na założeniu, że w przyrodzie faktycznie występują wielkości ciągłe, takie jak potencjały elektryczne czy natężenia pól elektromagnetycznych. Wielkości te mają wprawdzie swoje odpowiedniki teoretyczne (na przykład, sygnałom elementarnym odpowiadają liczby rzeczywiste), lecz z praktycznego punktu widzenia istotne jest, aby faktycznie można je było rejestrować, porównywać, przetwarzać i generować.

Trzeba przyznać, że realne zastosowania technologii analogowych przeżywały swój złoty okres dość dawno temu, bo w latach 50. i 60. XX wieku. Nie znaczy to oczywiście, że nie wnoszą one nic interesującego do ogólnej metodologii informatyki. Analizując ich zastosowania, można wskazać dwa obszary, w których techniki analogowe sprawdzają się w sposób niejako naturalny, zgodny z ich teoretycznymi własnościami. Po pierwsze jest to szeroki obszar zadań, wymagających teoretycznego zaangażowania pojęć *analizy matematycznej*, w tym liczb rzeczywistych, pochodnych, całek i równań różniczkowych. Typowymi urządzeniami do ich realizacji są różnego rodzaju analizatory, układy różniczkujące czy integratory, operujące bezpośrednio na fizycznych reprezentacjach funkcji i liczb (por. Ifrah 2006, 650–655). Wszystkie one są układami dedykowanymi, wykonującymi pewien ściśle określony typ operacji, np. całkowanie. Drugi szeroki obszar zastosowań mieści się w formule *cybernetyki*, obejmuje układy bezpośrednio oddziałujące na swoje otoczenie (bez wcześniejszych obliczeń natury matematycznej). Układy takie reagują w sposób plastyczny na ciągłe zmiany wybranych parametrów otoczenia; niektóre z nich wchodzą z otoczeniem w ujemne sprzężenie zwrotne, dostosowując swój sposób działania do nowych bodźców (Ashby 1961). Warto zauważyć, że dawne koncepcje analogowości odżywają współcześnie w dziedzinie *obliczeń biologicznych*, które polegają na wykorzystywaniu dedykowanych procesów biologicznych (angażujących najprawdopodobniej czynniki ciągłe) do rozwiązywania skomplikowanych problemów matematycznych (Kari, Rozenberg 2008).

Jeśli chodzi o teoretyczne *modele* obliczeń analogowych-ciągłych, to nie istnieje tutaj konstrukcja tak fundamentalna, jak uniwersalna maszyna Turinga. Za pewien jej odpowiednik można uznać *model GPAC* Shannona (1941), w którym są określone podstawowe operacje na danych/funkcjach ciągłych (jak mnożenie funkcji przez stałą czy jej całkowanie), a także ogólna metoda ich łączenia w funkcjonalną całość, zorientowaną na kon-

kretny cel. Ujmując rzecz matematycznie, owa ogólna metoda prowadzi zawsze do zaprojektowania grafu zorientowanego, w którego węzłach umieszcza się elementarne operacje obliczeniowe, zaś w wierzchołkach początkowych i końcowych odpowiednio: dane wejściowe i wyniki obliczeń. Trzeba podkreślić jednak, że ani model GPAC, ani konstrukcje jemu pokrewne¹⁶ nie są uniwersalne w tym sensie, że opisują pewien rodzaj „minimalnej” maszyny, za pomocą której można symulować wszelkie układy analogowe.

Niezależnie od takiego czy innego typu technik analogowych-ciągłych (tak czy inaczej modelowanego) wszystkie one stanowią istotne *rozszerzenie* obliczeń cyfrowych. W odniesieniu do danych znaczy to, że pozwalają one operować na istotnie szerszym – *de facto*: nieskończenie licznym i gęstym – zbiorze danych elementarnych. Na przykład, jeśli weźmiemy pod uwagę taki typ obliczeń, który jest określony matematycznie na przedziale liczb rzeczywistych $[0,1]$, to przedział ów stanowi oczywiste rozszerzenie binarnego zbioru $\{0,1\}$, odpowiadającego danym elementarnym obliczeń cyfrowych czyli bitom. W odniesieniu do dozwolonych przez model operacji rozwinięcie może iść jeszcze dalej: nie tylko w kierunku poszerzenia dziedziny funkcji, ale również w kierunku implementowania operacji z zakresu analizy matematycznej, jak różniczkowanie czy całkowanie.¹⁷

Teoretyczne zabiegi rozszerzania modelu obliczeń cyfrowych mają na celu zwiększenie jego *mocy obliczeniowej*, czyli zakresu możliwych do rozwiązania problemów. W gruncie rzeczy chodzi o to, aby pewne zagadnienia cyfrowo nierozwiązywalne, takie jak problem stopu czy równań diofantycznych (Harel 2000; Shagrir 2004), stały się obliczalne. Okazuje się, że pod tym względem niektóre przynajmniej z obliczeń analogowych-ciągłych są bardzo obiecujące. Dla przykładu: nawet stosunkowo słaby model rzeczywistych funkcji rekurencyjnych (Costa, Graca 2003), zapewnia teoretyczną możliwość rozwiązania dwóch wyżej wymienionych problemów. Posługując się terminologią wprowadzoną w poprzednim rozdziale, moglibyśmy powiedzieć, że w stosunku do modelu cyfrowego jest on silniejszy *ekstensjonalnie*, a nie tylko intensjonalnie (zob. Mycka, Piekarczyk 2004).

Obiecująca teoria nie przesądza, rzecz jasna, o tym, że silniejsze od cyfrowych obliczenia analogowe są *fizycznie realizowalne*. Ponieważ ich realna siła zależy od fizycznych właściwości nośników danych (w typ przypadku

¹⁶ Należą do nich model EAC (Rubel 1993) czy model rekurencyjnych funkcji rzeczywistych (Costa, Graca 2003).

¹⁷ Dopowiedzmy tutaj, że z punktu widzenia szerszych analiz – nie dotyczących tylko zbiorów możliwych danych wejściowych, ale także zbiorów możliwych wyników ich przetwarzania – rozróżnienie między analogowością i cyfrowością nie pokrywa się w rozróżnieniu między skończonością i nieskończonością. W przypadku obydwu typów obliczeń trzeba odwołać się do kategorii nieskończoności, ponieważ w obydwu przypadkach zbiór możliwych wyników jest nieskończony. W przypadku obliczeń cyfrowych/dyskretnych ma on jednak moc *alef zero* (moc zbioru liczb naturalnych), zaś w przypadku obliczeń analogowych/ciągłych ma on moc *continuum* (moc zbioru liczb rzeczywistych). Kwestię tę zasignalizował jeden z recenzentów pracy, za co bardzo dziękuję.

chodzi o cechę ciągłości), to praktyczna kwestia uzyskania tejże mocy staje się bardzo interesująca *filozoficznie*. Czy głęboka struktura bytów materialnych/fizycznych pozwala przekroczyć granice możliwości obliczeń cyfrowych? Czy jest to struktura dyskretna, czy ciągła? A jeśli nawet jest ciągła, to w jaki sposób możemy się o tym upewnić, dysponując przyrządami o skończonej, czyli dyskretnej, dokładności? Oto próbka pytań filozoficznych, których treść rozwinie my w poniżej.

3. ZAGADNIENIA FILOZOFICZNE INSPIROWANE ROZRÓŻNIENIEM CYFROWOŚCI I ANALOGOWOŚCI

3.1. Zagadnienia ontologiczne

Jeśli omawiane wyżej rozróżnienie analogowości i cyfrowości ograniczyć do samej informatyki, to dotyczy ono głębokiej struktury *informatycznych artefaktów*, a mówiąc konkretnej, elementarnych właściwości danych i obliczeń. Warto powtórzyć, że są to właściwości domniemywane teoretycznie i jako takie niekoniecznie muszą być cechami faktycznymi. Dotyczy to zwłaszcza cechy ciągłości, która ma wprawdzie precyzyjny opis teoretyczny, ale z powodu (ewentualnej) dyskretnej natury materii może okazać się praktycznie nierealizowalna.

Już powyższe stwierdzenia wolno uznać za element *ontologicznych* rozważań nad wytworami informatyki. Ich konsekwentne rozwinięcie można by nazwać „ontologią bytów możliwych” – bytów, które są niesprzeczne, matematycznie ufundowane i jako takie mogłyby zaistnieć fizycznie (a nie tylko teoretycznie).¹⁸ Ontologia taka ma przynajmniej dwa ważne zadania: po pierwsze, zidentyfikować warunki praktycznej realizowalności różnego typu informatycznych artefaktów, po drugie zaś, niezależnie od spełnialności tych warunków zbadać *hipotetyczne konsekwencje* posiadania przez artefakt określonych cech, w tym cechy ciągłości. Zadanie drugie trzeba uznać za ważniejsze, a jego realizacja powinna polegać, przynajmniej częściowo, na formalno-dedukcyjnym wyprowadzaniu konsekwencji z matematycznej definicji danego modelu obliczeń. Jedną z tego rodzaju konsekwencji już omawialiśmy; jest nią zakres problemów rozwiązywalnych przy użyciu artefaktów podpadających pod konkretny model obliczeń. Przypomnijmy, że dla niektórych typów obliczeń analogowych-ciągłych jest on *szerszy* niż dla technik cyfrowych (co jest filozoficznie inspirujące, bo prowadzi do różnych hipotez o analogowości umysłu/mózgu; zob. dalej). Spośród innych interesujących konsekwencji warto wymienić: istnienie (względnie: nieistnienie)

¹⁸ Na gruncie polskim informatyczne artefakty omawiane są m.in. w (Bondecka-Krzykowska 2016; Gurczyński 2013).

uniwersalnego modelu obliczeń pewnego typu,¹⁹ czy zależność realnej siły obliczeń od właściwości przyrody.²⁰

Informatyczna doniosłość rozróżnienia cyfrowości i analogowości sprawia, że postulowana tu ontologia powinna być co najmniej *dualistyczna*. Znaczy to, że powinna brać w rachubę zarówno artefakty cyfrowe, jak i analogowe. Winna także odwoływać się na równi do pewnych konstrukcji teoretycznych (jak modele obliczeń) i realnych urządzeń technicznych (jak komputer cyfrowy). W szczególności zaś nie powinna odrzucać *a priori* zasadności rozwiązań analogowych. A zatem, nawet jeśli ktoś sądzi, że realne urządzenia analogowe, są mniej dokładne, mniej uniwersalne i bardziej zawodne niż cyfrowe (Ifrah 2006), to nie powinien ignorować faktu, że niektóre ich modele teoretyczne przewidują większą moc obliczeniową niż uniwersalna maszyna Turinga. Być może, pod pewnymi warunkami moc taką da się faktycznie uzyskać. Być może też przyroda, z której pochodzą przecież realne nośniki danych i realne procesy ich przetwarzania, ma charakter analogowy.

Poprzednie zdanie zwraca uwagę na szerszy wymiar inspirowanej informatycznie ontologii niż rozważania dotyczące artefaktów. Ów szerszy wymiar mieści w sobie pytania i hipotezy z zakresu *ontologii przyrody*. Jaka jest w istocie elementarna struktura fizycznej rzeczywistości? Dyskretna czy ciągła? Cyfrowa czy analogowa? Kwestie te są wprawdzie stawiane przez fizykę, w której konkurują ze sobą opisy świata w kategoriach fal (ciągłych) i cząstek (dyskretnych), są także inspirowane przez matematykę, gdzie rozróżnienie obiektów dyskretnych i ciągłych ma bardzo bogatą tradycję (zob. Duda 2012), informatyka jednak ten kierunek myślenia wyraźnie *wzmacnia*. Dodaje do niego także pewien nowy element, a mianowicie możliwość opisu *dynamiki* bytu: jego zmian, działań, oddziaływań, szeroko pojętej interakcji z otoczeniem. Dzieje się tak, ponieważ informatyczne kategorie analogowości i cyfrowości są osadzone w odpowiednich modelach obliczeń, te zaś z definicji opisują procesy, a nie tylko struktury. Uogólniając ten wątek, można nawet stwierdzić – choć wymagałoby to dalszych rozwinięć – że ontologia ufundowana obliczeniowo nawiązuje do *ontologii arystotelesowej*, w której występuje dynamiczne pojęcie formy. Informatycznym odpowiednikiem formy byłby algorytm,²¹ czyli właściwy każdemu bytowi, specyficzny

¹⁹ Przykładowo, dla obliczeń cyfrowych model taki istnieje (jest nim np. uniwersalna maszyna Turinga), wobec czego wszelkie rozważania ontologiczne można odnosić do tegoż modelu; dla obliczeń analogowych natomiast kwestia wydaje się o wiele bardziej problematyczna (zob. Stacewicz 2017).

²⁰ W kontekście rozróżnienia analogowości i cyfrowości trzeba stwierdzić, że dla obliczeń cyfrowych zależność ta jest zupełnie minimalna (wystarczy, by przyroda dawała możliwość stwierdzenia pewnego zjawiska (1) lub jego braku (0)), natomiast dla obliczeń analogowych-ciągłych zależność jest istotna; trzeba założyć występowanie w przyrodzie zjawisk o nieskończenie licznej, ciągłej palecie rejestrowalnych stanów (zob. Stacewicz 2017).

²¹ Przy czym algorytm rozumiemy tu szerzej niż tylko schemat obliczeń możliwych do wykonania przez maszynę cyfrową (a w wersji teoretycznej: przez uniwersalną maszynę Turinga); nie przesadzamy tym samym, czy jest to algorytm dla maszyny cyfrowej czy analogowej.

dla niego, schemat obliczeń warunkujących jego dynamiczne relacje z dostępną mu rzeczywistością (por. Turek 1978).

Mamy zatem dwie dziedziny ugruntowanych informatycznie rozważań ontologicznych: dziedzinę artefaktów oraz dziedzinę obiektów naturalnych. Wychodząc od pierwszej, można stawiać hipotezy dotyczące drugiej, a wychodząc od drugiej, można badać fizykalne uwarunkowania pierwszej. Jeśli zaś skupimy się na rozróżnieniu cyfrowości i analogowości, to na przecięciu obydwu dziedzin rodzi się domysł, że ontologia rzeczywistości kreowanej za pomocą technologii cyfrowych (w tym systemów sztucznej inteligencji) może być uboższa od ontologii przyrody. Domysł ten byłby uzasadniony, gdyby ta ostatnia obejmowała obiekty analogowe-ciągłe. Domysł ten wykracza poza dziedzinę czystej ontologii w kierunku epistemologii i filozofii umysłu.

3.2. Zagadnienia epistemologiczne

Na odpowiednio wysokim poziomie ogólności można stwierdzić, że systemy informatyczne służą do *rozwiązywania problemów*. Każde zadanie realizowane przez system można interpretować jako problem, a program (ogólniej zaś schemat) sterujący działaniem systemu – jako zapis metody jego rozwiązania. Owa metoda rozwiązania stanowi wiedzę w luźnym sensie sensie *pragmatycznym*, tj. wiedzę, która pozwala rozwiązywać określonego typu problemy.

W odniesieniu do tak rozumianej wiedzy punktem wyjścia dalszych uwag uczynimy matematyczny fakt, że zakres problemów rozwiązywalnych za pomocą pewnego typu technik analogowych *jest większy* niż zakres problemów rozwiązywalnych przy użyciu technik cyfrowych – co można zapisać zwięźle jako $|AN| > |CFR|$. Fakt ten dotyczy w szczególności technik podpadających pod model rekurencyjnych funkcji rzeczywistych, dla których dowiedziono, że pozwalają rozwiązać problem stopu maszyn Turinga (Mycka, Piekarczyk 2004). W konsekwencji zatem pozwalają zmierzyć się z dużą liczbą zagadnień, które są do tegoż problemu sprowadzalne.

Wychodząc zatem od informatycznego rozróżnienia analogowości i cyfrowości, uzyskujemy doniosły epistemologicznie rezultat, którym mówi o wyższym *potencjale wiedzytwórczym* obliczeń analogowych niż potencjał obliczeń cyfrowych. Rezultat ten jest oczywiście teoretyczny. Jako taki zaś domaga się dalszej refleksji epistemologicznej nad warunkami realizowalności technik analogowych. Wspominaliśmy o tym w punkcie 2.2. W tym miejscu możemy dopowiedzieć, że istotne warunki realizowalności są dwa. Po pierwsze, w przyrodzie muszą istnieć fizyczne wielkości nieobliczalne, które cechuje nieskończoność aktualna; co znaczy tyle, że ich matematyczne

reprezentacje/zapisy nie dają się uzyskać za pomocą skończonych procedur.²² Po drugie zaś, muszą istnieć fizyczne metody odczytu tych wielkości z nieskończoną dokładnością. Mówiąc zaś inaczej: muszą istnieć metody całościowego, niefragmentarycznego, rejestrowania tych wielkości. Kwestie te omówiłem szerzej w pracy (Stacewicz 2019). Tutaj chciałbym podkreślić jedynie, że realizowalność technik analogowych-ciągłych zależy silnie od istnienia i fizycznej implementowalności metody porównywania ze sobą wielkości nieskończonych aktualnie.

Jakkolwiek istnienie takiej metody może wydawać się czymś w rodzaju istnienia *perpetuum mobile*, to z punktu widzenia informatyki teoretycznej wiadomym jest, że $|AN| > |CFR|$. A zatem informatyka teoretyczna dostarcza istotnej wskazówki co do tego, jakiego typu obliczenia są silniejsze od cyfrowych. Wskazówka wydaje się tym cenniejsza, że spośród wszystkich obliczeń niekonwencjonalnych (pozaturingowskich) to właśnie techniki analogowe pozostają najbliższe inżynierskiej praktyce. To one właśnie – mimo różnych wątpliwości co do ich autentycznie ciągłego charakteru – były i są fizycznie implementowane. Statusu takiego nie mają tymczasem innego rodzaju obliczenia pozaturingowskie, np. infinitystyczne (por. Ord 2006).²³

Pozostając w kręgu rozważań bliskich epistemologii, możemy zastosować powyższą wskazówkę do aktywności poznawczej *ludzkiego umysłu*. Co sprawia, że aktywność ta prowadzi do „silniejszych” rezultatów niż cyfrowe obliczenia komputerów? Do odkryć, wynalazków, wartościowych hipotez, efektywnych poznawczo pojęć..., a kładąc nacisk na informatykę: do teoretycznych choćby rozwiązań problemów nieobliczalnych.

Szukając odpowiedzi na powyższe pytania, możemy sformułować dwie hipotezy robocze, na które naprowadza nas teoretyczny fakt, że $|AN| > |CFR|$. Pierwsza z nich jest taka, że mózg – będący biologicznym fundamentem myślenia – działa w sposób *analogowy*, a nie czysto cyfrowy. Uszczegóławiając ją, można domniemywać dalej, że w neuronach są przetwarzane sygnały ciągłe, w połączeniach międzyneuronalnych występują substancje o parametrach ciągłych, różnice między sygnałami na wyjściach neuronów mogą być dowolnie małe.²⁴ Gdyby układy neuronalne wewnątrz mózgu działały w taki właśnie sposób, zapewniałyby umysłowi większe możliwości niż potencjał uniwersalnej maszyny Turinga.

²² Wielkości te odpowiadają liczbom nieobliczalnym w sensie Turinga, które składają się na pewną szczególną klasę niewymiernych liczb rzeczywistych. Są to liczby, których nieskończone i nieregularne rozwinięcia (np. dziesiętne) nie mogą być generowane sukcesywnie, krok po kroku, za pomocą jakichkolwiek programów dla uniwersalnej maszyny Turinga, co np. jest wykonalne w przypadku „łatwiejszej” liczby niewymiernej π (por. (Turing 1936)).

²³ Ciekawym typem obliczeń pozaturingowskich, które mieszczą się w formule obliczeń analogowych-ciągłych, są rekurencyjne sieci neuronowe o wagach rzeczywistych (właśnie wagi tego rodzaju przesądzą o ciągłości obliczeń). Por. (Siegelmann 1998).

²⁴ Na kwestie te zwracał uwagę już Alan Turing. Omawiając argumenty przeciwników tezy, że maszyna może myśleć w sposób równie efektywny jak człowiek, przywiązywał dużą wagę do argumentu z „ciągłości systemu nerwowego” (Turing 1950).

Hipoteza druga, niekoniecznie związana z pierwszą, dotyczy wyższego poziomu działania i opisu zarazem. Dotyczy czynności umysłowych wyższego rzędu. Jak wiadomo, człowiek posługuje się z powodzeniem pojęciem ciągłości oraz obiektami ciągłymi, na przykład, liczbami rzeczywistymi, ciągłymi kształtami geometrycznymi, granicami funkcji, funkcjami różniczkowalnymi... Obiekty te leżą u podstaw teorii, które pozwalają w sposób teoretycznie efektywny (i dla człowieka zrozumiały) rozwiązywać określone problemy. W jakim sensie jednak strategia taka jest „silniejsza” od cyfrowej? Być może w takim, że heurystycznie naprowadza na rozwiązania, które w dalszym planie dają się przedstawić jako programy wykonalne dla maszyny cyfrowej. Wiedząc jak dany problem rozwiązuje się w dziedzinie ciągłej, można dokonać jej dyskretyzacji i przekształcić oryginalną metodę rozwiązania.²⁵ A zatem, nawet jeśli skutek właściwości (dyskretnych) świata fizycznego żadne urządzenia nie są w stanie działać prawdziwie analogowo, to rozwiązania „ciągłe” są użyteczne, ponieważ pokazują, jak powinno wyglądać rozwiązanie „dyskretne”.²⁶ Zauważmy, że strategia taka, polegająca na heurystycznym wykorzystaniu obiektów ciągłych, jest neutralna względem faktycznej natury świata fizycznego.

3.3. W stronę filozofii informatycznej

Istnienie sygnalizowanych wyżej zagadnień, ontologicznych i epistemologicznych, stanowi dowód na to, że ugruntowany informatycznie światopogląd zbliża się stopniowo do *filozofii*. Proces ten wpisuje się w szerszy kontekst relacji między światopoglądem a filozofią, które, ujmując rzecz historycznie, miały zawsze charakter dwustronny, polegający na *wzajemnych oddziaływaniach*. Znaczy to, że z jednej strony, żywiołowo powstające światopoglądy zmieniały się stopniowo w dojrzałe systemy filozoficzne, z drugiej strony zaś, istniejące prądy i szkoły filozoficzne oddziaływały silnie na indywidualne i społeczne światopoglądy. Typowym dla naszego kręgu kulturowego przykładem jest filozofia chrześcijańska. Jej wczesna postać wyłoniła się z ugruntowanego religijnie poglądu na świat około III wieku n.e.. Z czasem jednak, za sprawą takich doktryn jak tomizm, rozwinięta już filozofia chrześcijańska zaczęła formować indywidualne i grupowe światopoglądy (por. Stacewicz 2019).

²⁵ Dobrego przykładu dostarcza tutaj teoria równań różniczkowych. Typowe dla niej metody ciągle, angażujące „ciągłe” pojęcie całki, mają w tej teorii odpowiedniki dyskretne, numeryczne, wykonalne dla maszyn cyfrowych. Owe odpowiedniki nazywa się metodami różnicowymi (a nie różniczkowymi), zaś przekształcone postaci rozwiązywanych równań – równaniami różnicowymi (a nie różniczkowymi).

²⁶ Witold Marciszewski idzie nawet dalej i twierdzi, że strategio analogowa – ufundowana być może w analogowych procesach wewnątrz mózgu – jest głównym czynnikiem ludzkiej twórczości, w konsekwencji zaś postępu w nauce (Marciszewski, Stacewicz 2011, 256–261).

Światopogląd informatyczny, omawiany w niniejszej pracy, spełnia z pewnością drugi z powyższych warunków, to znaczy na jego kształt wpływają nie tylko przełomowe dla naszej kultury przemiany technologiczne (jak zaistnienie komputerów czy Internetu), ale również pewne *nurty filozoficzne*, przede wszystkim zaś filozofia informatyki i informacji. Przykładowo: ta pierwsza uświadamia, czym charakteryzują się różne typy obliczeń (w tym: analogowe i cyfrowe) oraz jakie mają ograniczenia, natomiast druga daje jasny przekaz, że dane przetwarzane przez komputer stanowią pewną formę informacji, formę o tyle interesującą, że jest ona opisana ściśle i posiada mierzalny fizyczny nośnik. Czy jednak światopogląd informatyczny spełnia pierwszy z powyższych warunków, a więc kryje w sobie istotny *filozoficzny potencjał*? Innymi słowy, czy istnieją powody po temu, aby sądzić, że światopogląd ów przeobrazi się stopniowo w pewien uniwersalny, spójny i nowatorski system filozoficzny? Uważamy, że powody takie istnieją, a wybiórcze ich zestawienie możemy potraktować jako skierowane ku przyszłości zakończenie pracy.

Po pierwsze zatem, u podstaw światopoglądu informatycznego leży spójna, ugruntowana naukowo i możliwa do interpretacji w różnych dziedzinach *aparatura pojęciowa*.²⁷ Jej trzon stanowią takie pojęcia, jak kodowanie (w tym: analogowe i cyfrowe), algorytm, system informatyczny, złożoność obliczeniowa czy obliczalność. Ma ona zastosowanie nie tylko w samej filozofii (np. do wyjaśnienia, czym jest ontologiczna forma), ale także w wielu naukach szczegółowych (jak biologia, kognitywistyka czy ekonomia), które niejako pośrednio, poprzez potwierdzenie użyteczności pojęć informatycznych, mogą wzmocniać oparte na nich filozoficzne tezy (por. Stacewicz 2019).

Po drugie, informatyczna aparatura pojęciowa pozwala stawiać pewne interesujące *filozoficzne pytania*, które bez niej nie mogłyby zostać dostrzeżone i wyartykułowane. Należy do nich objaśniane w niniejszej pracy pytanie o głęboką *strukturę rzeczywistości* (czy jest ona cyfrowa, analogowa czy może mieszana?), które w wersji ukierunkowanej dotyczy także umysłu/mózgu. Inne zagadnienie, podnoszone szczególnie mocno przez Marciszewskiego, wyraża się pytaniem o relację między rosnącą złożonością problemów dotyczących świata (ujmowaną w kategoriach obliczeniowych) a złożonością wytwarzanych przez ludzki umysł pojęć, teorii i algorytmów. Szczególnie interesujące jest tu takie uzasadnienie odpowiedzi optymistycznej (umysł jest w stanie nadążyć za rosnącą złożonością problemów), które wskazuje na obliczeniową moc technik *pozaturingowskich*, w tym analogowych-ciągłych (zob. Marciszewski, Stacewicz 2011).

²⁷ Mamy tu celowe nawiązanie do myśli Ajdukiewicza, który terminu „aparatura pojęciowa” używał dla określenia zestawu znaczeń przysługujących wyrażeniom języka pewnej nauki – znaczeń wyznaczających charakterystyczny dla danej nauki, na pewnym etapie jej rozwoju, obraz świata (por. Ajdukiewicz 2006).

Informatyczna aparatura pojęciowa określa obraz charakterystyczny dla informatyki oraz nauk, w których formalne pojęcia informatyczne tak czy inaczej się interpretuje.

Po trzecie wreszcie, rdzeniem światopoglądu informatycznego jest interdyscyplinarne, a dzięki temu nośne filozoficznie pojęcie *informacji*. Stanowi ono, wraz z pojęciem obliczania, coś w rodzaju pomostu między wąsko wyspecjalizowaną informatyką i szeroką refleksją filozoficzną.²⁸ Najważniejsze jednak, że w zarysowanym tutaj kontekście jest ono tyleż uniwersalne co możliwe do precyzyjnego ujęcia w terminach informatycznych. Wobec tego za jądro informatycznej filozofii przyszłości trzeba uznać założenie, że każdy byt mieści w sobie pewną informacyjną zawartość, którą da się dobrze opisać w kategoriach *obliczeniowych*. W obecnej pracy koncentrowaliśmy uwagę na dwóch takich kategoriach: cyfrowości i analogowości.

BIBLIOGRAFIA

- K. Ajdukiewicz, *Zagadnienia i kierunki filozofii*, Wydawnictwo Antyk – Fundacja Aletheia, Kęty-Warszawa 2003.
- _____, *Obraz świata i aparatura pojęciowa*, w: idem, *Język i poznanie*, t. 1, PWN, Warszawa 2006.
- W. R. Ashby, *Wstęp do cybernetyki*, przeł. B. Osuchowska. A. Gosiewski, PWN, Warszawa 1961.
- I. Bondecka-Krzykowska, *Z zagadnień ontologicznych informatyki*, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań 2016.
- M. Burgin, G. Dodig-Crnkovic, *Typologies of Computation and Computational Models*; arXiv:1312.2447 [cs], 2013.
- J. F. Costa, D. Graça, *Analog Computers and Recursive Functions over the Reals*, *Journal of Complexity*, 19, 2003.
- P. J. Denning, *Is Computer Science Science?*, *Communications of the ACM*, 48, 2005.
- D. Deutsch, *Quantum Theory, the Church-Turing Principle and the Universal Quantum Computer*, *Proc. Roy. Soc. Lond. A* 400, 1985.
- R. Duda, *Uwagi o materii matematycznej i roli pojęć matematycznych*, *Filozofia Nauki*, 79, 2012.
- J. Gurczyński, *Czym jest wirtualność? Matrix jako model rzeczywistości wirtualnej*, Wydawnictwo UMCS, Lublin 2013.
- D. Harel, *Rzecz o istocie informatyki. Algorytmika*, przeł. Z. Weiss, P. Carlson, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
- M. Hetmański, *Epistemologia informacji*, Copernicus Center Press, Kraków 2013.
- M. Hogarth, *Non-Turing Computers and non-Turing Computability*, *PSA*, 1, 2004.
- G. Ifrah, *Historia powszechna cyfr*, t. 2, przeł. K. Marczevska, W.A.B, Warszawa 2006.
- L. Kari, G. Rozenberg G., *The Many Facets of Natural Computing*, *Communications of the ACM*, 51, 2008.
- D. E. Knuth, *Computer Science and Its Relation to Mathematics*, *American Mathematical Monthly*, 81, 1974.
- G.W. Leibniz, *Philosophische Schriften*, t. VII, Weidmann, Berlin 1890.
- J. Lubacz (red), *W drodze do społeczeństwa informacyjnego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- W. Marciszewski, P. Stacewicz, *Umysł – Komputer – Świat. O zagadce umysłu z informatycznego punktu widzenia*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2011.
- W. Marciszewski, P. Stacewicz (red.), *Cafe Aleph. Akademicki blog dyskusyjny*; <http://marciszewski.eu/>

²⁸ Według Marciszewskiego naukowym rozwinięciem tegoż pomostu byłby projekt informatyki ogólnej, dyscypliny zajmującej się wszelkimi systemami przetwarzania informacji, nie tylko komputerowymi, Dyscyplina ta, przekraczając informatykę tradycyjną (czyli *computer science*), byłaby właściwą podstawą informatyzmu jako filozofii przyszłości (por. Marciszewski, Stacewicz 2011).

- W. Marciszewski, *Racjonalistyczny optymizm poznawczy w Gödłowskiej wizji dynamiki wiedzy*, w: Przewodnik po epistemologii, R. Ziemińska (red.), WAM, Kraków 2013.
- _____, *The Progress of Science from a Computational Point of View: The Drive towards Ever Higher Solvability*, Foundations of Computing and Decision Sciences, 44, 2019.
- R. Murawski, *Funkcje rekurencyjne i elementy metamatematyki*, WN UAM, Poznań 2010.
- R. Murawski (red.), *Filozofia informatyki. Antologia*, WN UAM, Poznań 2014.
- J. Mycka, A. Olszewski, *Czy teza Churcha ma jeszcze jakieś znaczenie dla informatyki?*, w: Informatyka a filozofia. Od informatyki i jej zastosowań do światopoglądu informatycznego, P. Stacewicz (red.), Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2015.
- J. Mycka, M. Piekarczyk, *Przegląd zagadnień obliczalności analogowej*, w: Algorytmy, metody i programy naukowe, S. Grzegórski, M. Miłoś, P. Murjas (red.), Polskie Towarzystwo Informatyczne, Lublin 2004.
- T. Ord, *The Many Forms of Hypercomputation*, Applied Mathematics and Computation, 178, 2006.
- P. Polak, *Czy wszystko wykonuje obliczenia? Wybrane filozoficzne implikacje pankomputacjonistycznej interpretacji obliczeń naturalnych*, Studia Metodologiczne, 38, 2017.
- M. B. Pour-El, *Abstract Computability and Its Relations to the General Purpose Analog Computer*, Transactions of the American Mathematical Society, 199, 1974.
- L. Rubel, *The Extended Analog Computer*, Advances in Applied Mathematics, 14, 1993.
- H. T. Siegelmann, *Neural Networks and Analog Computation: Beyond the Turing Limit*, Springer Verlag, Boston 1998.
- C. Shannon, *Mathematical Theory of the Differential Analyzer*, J. Math. Phys. MIT, 20, 1941.
- P. Stacewicz, A. Włodarczyk, *O modelowaniu informatycznym ze szczególnym odniesieniem do badań nad sztuczną inteligencją*, Zagadnienia Naukoznawstwa, 47, 2011.
- _____, *O algorytmach i algorytmicznej dostępności wiedzy*, Studia Metodologiczne, 36, 2016.
- _____, *O różnych sposobach rozumienia analogowości w informatyce*, Semina Scientiarum, 16, 2017.
- _____, *From Computer Science to the Informational Worldview. Philosophical Interpretations of Some Computer Science Concepts*, Foundations of Computing and Decision Sciences, 44, 2019.
- K. Trzęsicki, *Leibnizjańskie inspiracje informatyki*, Filozofia Nauki, 55, 2006.
- K. Turek, *Filozoficzne aspekty pojęcia informacji*, Zagadnienia Filozoficzne w Nauce, I, 1978.
- A. M. Turing, *On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem*, Proc. Lond. Math. Soc., 42, 1936.
- _____, *Computing Machinery and Intelligence*, Mind, 49, 1950.

**ON THE IMPORTANCE OF COMPUTER SCIENCE CONCEPTS
FOR PHILOSOPHY ON THE EXAMPLE OF THE DISTINCTION
BETWEEN DIGITALITY AND ANALOGICITY**

ABSTRACT

In this paper we show how formal computer science concepts—such as encoding, algorithm or computability—can be interpreted philosophically, including ontologically and epistemologically. Such interpretations lead to questions and problems, the working solutions of which constitute some form of pre-philosophical worldview. In this work we focus on questions inspired by the IT distinction between digitality and analogicity, which has its mathematical origin in the mathematical distinction between discreteness and continuity. These include the following questions: 1) Is the deep structure of physical reality digital or analog, 2) does the hu-

man mind resemble a more digital or analog computational system, 3) does the answer to the second question give us a cognitively fruitful insight into the cognitive limitations of the mind? As a particularly important basis for the above questions, we consider the fact that the computational power (i.e., the range of solvable problems) of some types of analog computations is greater than that of digital computations.

Keywords: information, digitality, analogicity, computing power, computational worldview.

O AUTORZE – dr inż., adiunkt, nr ORCID: 0000-0003-25000-4086, Politechnika Warszawska, Wydział Administracji i Nauk Społecznych, adres: plac Politechniki 1, 00-661 Warszawa.

E-mail: p.stacewicz@ans.pw.edu.pl