

VÝPOČETNÍ MEZE KOGNITIVNÍCH A INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

Jiří Wiedermann¹

Ústav informatiky AV ČR

Pod vodárenskou věží 2, 182 07 Praha 8

Česká republika

jiri.wiedermann@cs.cas.cz

*„Everything that’s worth understanding about a complex system,
can be understood in terms of how it processes information.“*

Lloyd’s Hypothesis [13]

Abstrakt. V příspěvku budeme hledat výpočetní meze kognitivních a inteligentních systémů, a to jak biologických, tak i umělých a hybridních, které jsou kombinací obou předchozích druhů. Společnou platformu poskytne komputacionalismus, tj. víra, že kognitivní resp. inteligentní procesy jsou v konečném důsledku výpočetními procesy. Ukážeme, že v principu mohou existovat kognitivní systémy, a dokonce i v praxi existují „zárodky“ takových systémů, které předčí svou výpočetní silou výpočetní sílu Turingových strojů. Tyto výsledky naznačují, že tzv. Church–Turingovu tezi, hovořící o centrálním postavení Turingových strojů ve světě výpočtů a algoritmů, je třeba vidět v souvislosti s fyzikálními principy, které kognitivní systém při své činnosti využívá, a se způsobem, kterým systém komunikuje s okolím.

1. ÚVOD

Pod pojmem kognice se obvykle myslí procesy, pomocí kterých živé organismy získávají, zpracovávají, ukládají a využívají informace z okolí. Tyto činnosti zahrnují zejména percepci (tj. vnímání), učení, pamatování a rozhodování [17]. Vzhledem k této definici můžeme považovat inteligenci za součást kognice, která se příliš nezabývá percepcí a spíše se soustřeďuje na kvalitu kognitivních procesů. Oba dva pojmy se však vztahují ke zpracování informací. Přesvědčení, že lidská resp. biologická kognice či inteligence je druh výpočtů, hlásá tzv. *komputacionalistický směr* v umělé inteligenci (viz. např. [3]). Dle zastánců tohoto směru je výpočetní modelování kognitivních schopností živých organismů alespoň v principu možné a tímto způsobem lze dosáhnout ne-li věrného modelování všech mentálních činností (včetně myšlení a vědomí), tak přinejmenším jejich věrné aproximace a také podání jejich vysvětlení. V dalším nás bude zajímat efektivita výpočetních modelů, použitelných při modelování kognice živých organismů. Tuto efektivitu budeme „měřit“ standardními postupy teorie výpočetní složitosti – tj. budeme ji srovnávat s výpočetní efektivitou známých modelů v této oblasti. Budeme hledat výpočetní meze těchto modelů – jak efektivně, alespoň v principu – dovedou zpracovat data, a na druhé straně, co již zcela určite nedovedou. Takže tímto způsobem budeme hovořit o kvalitě zpracování, jinými slovy, současně budeme hovořit o výpočetních mezích inteligence. Pro jednoduchost však budeme v dalším používat převážně pojmu kognice, který je ve smyslu předchozí neformální definice určujícím i pro pojem inteligence.

¹ Tato práce vznikla v rámci výzkumného záměru AV0Z10300504 s částečnou podporou grantu 1ET100300419 NPV „Informační společnost“

Komputacionalistická víra dostala koncem minulého století nečekanou podporu ze strany teoretické fyziky a informatiky. V r. 1985 publikoval teoretický fyzik D. Deutsch článek [4], ve kterém dokázal, že libovolný skutečný (disipativní) konečný fyzikální systém lze simulovat pomocí kvantového počítače. Protože kvantový počítač lze simulovat např. Turingovým strojem (i když, jak se zdá, velmi neefektivně), máme zde důkaz pravdivosti komputacionalistického přesvědčení, že např. kompletního člověka lze „věrně“, alespoň v principu, simulovat pomocí klasického počítače. Další výsledek z oblasti teorie složitosti tvrdí, že pomocí kvantového počítače bude tato simulace efektivní [2] (polynomické složitosti vzhledem k velikosti simulovaného systému).

V našem příspěvku půjdeme ještě dále: nebudeme se zajímat o kognitivní schopnosti živých organismů *per se*, ale do našich úvah zahrneme organizmy (např. lidské bytosti) vybavené navíc jakýmkoliv přístroji, které umožní „zesílit“ jejich kognitivní schopnosti, v jakémkoliv směru. Příkladem takového zařízení je např. Hubbleův teleskop, umístěný na družici, obíhající kolem Země. Za součást zařízení budeme považovat i příslušné řídicí a výpočetní střediska na zemi. Je nesporné, že takový systém posílí kognitivní možnosti pozorovatele, který toto zařízení využívá: prostřednictvím systému má pozorovatel přístup k datům, které by vlastními prostředky, bez použití dalších pomůcek, nemohl získat. Pozorovatel může navíc tato data zpracovat způsobem, který by bez použití dalších prostředků také sám nezvládl. Výsledný systém, tj. pozorovatel plus jeho zařízení, určené k pozorování a zpracování takto získané informace, budeme nazývat *kognitivním systémem*. Výsledkem bude nová kvalita kognice, nedosažitelná bez příslušných přístrojů. Budeme velkorysí a nebudeme trvat na tom, aby dané zařízení bylo skutečně sestrojeno a bylo pozorovateli k dispozici při jeho kognitivních experimentech. Spokojíme se pouze s myšlenkovým experimentem, tj. se situací, kdy přepokládaná existence předmětného „kognitivního zesilovače“ nebude ve sporu se známými přírodními zákony. V jeho skutečném sestrojení nám může bránit např. jeho cena, velikost, nedostatek zdrojů energie, atd., ale nikoliv známé fyzikální zákony. Připustíme i modely, sestávající z potenciálně neomezeného (ale vždy konečného) počtu kognitivních subjektů. Takže v myšlenkových experimentech dovolíme např. využití známých vlastností časoprostoru, relativistických i kvantových efektů, vznik nových vesmírů, sestrojení rostoucí kolonie živých organismů, „vypěstování“ lidské společnosti komunikující přes internet, apod. Pokud setrváme na půdě komputacionalizmu, tak na jakémkoliv zařízení takového typu můžeme v konečném důsledku nahlížet jako na systém pro zpracování informací. Při takovém velmi obecném přístupu se vše nakonec zvrtné na otázku, jaké jsou meze „myslitelných“ kognitivních systémů (rozuměj výpočetních systémů), založených na jakýchkoliv principech, které nejsou ve sporu se známými přírodními zákony.

V teorii vyčíslitelnosti a teorii výpočetní složitosti patří výzkum mezí výpočetní síly výpočetních zařízení k základním otázkám. Termínem „výpočetní síla“ rozumíme množinu výpočetních problémů, které je daná třída zařízení v principu schopna vyřešit. Čím větší (ve smyslu ryzí množinové inkluze) je tato množina, tím větší je výpočetní síla dané třídy zařízení. Standardní tradiční odpověď nabízí tzv. *Church–Turingova teze* [1], [10], [12], [19], kterou pro naše účely můžeme zformulovat např. takto (teze má mnoho podob, my jsme zvolili tu, která zachycuje pojem výpočetní síly):

Church–Turingova teze: výpočetní síla jakékoliv třídy výpočetních zařízení, řídicích se konečným algoritmy, nepřesáhne sílu Turingových strojů

Turingův stroj byl popsán a definován např. v práci [12] ve 4. dílu této série knih. Church—Turingova teze jinými slovy tvrdí, že neexistuje žádné výpočetní zařízení, které by mělo větší výpočetní sílu nežli Turingův stroj. Tuto tezi nelze dokázat, protože nedefinuje přesně, co se myslí pojmem „jakékoliv výpočetní zařízení“ a tudíž nelze ukázat, jak by takové zařízení mohl simulovat (napodobit) Turingův stroj. Pokud ale sestrojíme (či alespoň ukážeme možnost sestrojení) zařízení, které bude schopno řešit problémy, Turingovým strojem neřešitelné, tak tezi vyvrátíme. Problémy, které Turingův stroj z principu nemůže vyřešit, se v teorii vyčíslitelnosti nazývají *nerozhodnutelné problémy*. Pokusů o vyvrácení Church—Turingovy teze bylo mnoho a jejich neúspěšnost vlastně vedla k formulaci teze a k víře v její platnost. Teprve v posledních letech se ukazuje, že teze je poněkud neúplně formulována: chybějí totiž explicitní předpoklady, za kterých teze platí. Tyto předpoklady se musejí týkat fyzikální teorie, v rámci které jsou realizována výpočetní zařízení, o kterých teze mluví [7], a způsobu, kterým systém interaguje s okolím, případně, kterým okolím vplývá na systém [23]. Co se týká první podmínky, v současné době se ukazuje, že, zhruba řečeno, teze platí, pokud uvažujeme současné počítačové technologie, či přesněji, pokud se pohybujeme v rámci světa, který dobře aproximují zákony klasické, newtonovské fyziky a pokud uvažujeme pouze finitní výpočty. Pokud uvažujeme „moderní“ fyziku, včetně kvantové a relativistické, tak se zdá, že teze nemusí platit [7], [9]. Jiný způsob, jak se dostat za rámec teze, je uvažovat obecnější scénář výpočtů, než jsou konečné výpočty realizované Turingovým strojem. To vede k myšlence tzv. interaktivních evolučních systémů, pro které je charakteristický potenciálně nekonečný výpočet, který interaguje s okolím a navíc i hardwarové modifikace systému během jeho výpočtu [23]. Takto lze zachytit chování nejen např. živých organismů či jejich společenství, přes mnoho generací, ale třeba i internetu a podobných vyvíjejících se globálních výpočetních sítí [23].

V této kapitole se soustředíme na přehled možností, které mají kognitivní systémy jistého typu a které jim nabízejí potenciál pro překonání Church—Turingovy teze. Abychom mohli hovořit o odchylkách od klasických turingovských výpočtů (tj. těch, které jsou realizovány Turingovým strojem), resp. od výpočtů v rámci Church—Turingovy teze, nejdříve v části 2. stručně zmíníme výpočetní systémy, kterých výpočetní mechanismy se neliší od výpočetních mechanismů Turingova stroje a které tuto tezi nevyvracejí. Tyto systémy, modelující kognitivní individua, budou však tvořit východisko pro konstrukci složitějších systémů, které již tezi atakují. Dále, ve 3. části popíšeme kognitivní systém, který překonává Turingovy stroje tím způsobem, že z hlediska pozorovatele realizuje nekonečně mnoho výpočetních kroků v konečném čase. Ve 4. části se soustředím na tzv. evoluční interaktivní výpočty, které lze realizovat jak pomocí umělých systémů podobných internetu, tak i pomocí vyvíjejících se společenství živých organismů. V závěru této části vyslovíme tzv. rozšířenou Church—Turingovu tezi která zachycuje nejen potenciál současného způsobu využívání výpočetních technologií ale i zpracování informací v biologických systémech.

Kapitola má přehledový charakter s cílem upozornit zejména komunitu badatelů pracujících v problematice kognice a umělého života na vývoj v oblasti Church—Turingovy teze, který má dopad na pochopení výpočetních možností kognitivních systémů. Z těchto důvodů se kapitola soustřeďuje především na méně formální popis a komentář odpovídajících výsledků; pokud by některého čtenáře hlouběji zajímaly formální definice a důkazy, necht' se obrátí na originální práce, zmiňované v seznamu literatury.

2. JSOU ŽIVÉ ORGANIZMY SPÍŠE KONEČNÝMI AUTOMATY, ANEBO TURINGOVÝMI STROJI?

Základním pojmem, se kterým budeme dále nějakou dobu pracovat, je pojem konfigurace nějakého konečného artefaktu, organismu, či pevně určeného objemu prostoru. Všem těmto kategoriím budeme říkat zařízení. Konfigurace nějakého zařízení je pojem relativní vzhledem k pozorovateli tohoto zařízení. Budeme totiž říkat, že vzhledem k pozorovateli je zařízení ve stejné konfiguraci ve dvou po sobě jdoucích časových okamžicích, pokud se zařízení v těchto dvou okamžicích jeví pozorovateli stejné (pozorovatel může být pro účel rozlišení konfigurací vybaven zvláštním přístrojem). To znamená, že počet konfigurací, které může zařízení nabýt, je daný rozlišovací schopností pozorovatele. Současná kvantová fyzika určuje teoretickou horní mez pro počet (kvantových) konfigurací, které lze rozlišit u zařízení dané hmotnosti a objemu. S. Lloyd ukázal [11], že hmota velikosti 1 kg a objemu 1 litru se může nacházet v nejvýše řádově 10^{31} konfiguracích (kvantových stavech). To je obrovské, ale konečné číslo, které můžeme chápat i jako horní mez paměťové kapacity nejefektivnější myslitelné paměti o daných rozměrech. Takovou kapacitu ovšem dosahuje hmota za extrémních podmínek, snad srovnatelnými s poměry panujícími v epicentru termonukleárního výbuchu, anebo při tzv. velkém třesku. Nicméně, podle předchozích úvah každé konečné zařízení může sloužit jako potenciální paměťové zařízení s kapacitou, danou pozorovatelnými, měřitelnými fyzikálními parametry tohoto zařízení.

Aby nějaké zařízení „počítalo“ podle daného přechodového pravidla (programu), které pro každou konfiguraci a daná vstupní data po každém výpočetním kroku určí následující konfiguraci či konfigurace, vybrané z konečné množiny možných konfigurací v dalším kroku, a případná příslušná výstupní data, musí splňovat tři obecné předpoklady:

- musí existovat možnost vstupu a výstupu dat
- musí být možné nastavit počáteční konfiguraci zařízení
- musí existovat výpočetní dynamika zařízení, která je zachycena v přechodovém pravidlu, tj. zařízení má vlastnost, že „samo od sebe“ způsobuje přechod z jedné konfigurace do druhé (či dalších, v případě paralelního výpočtu) v souladu se svým programem
- výpočetní dynamika se mění v závislosti na vstupních datech.

Vlastnost, která zaručuje, že zařízení dělá něco „samo od sebe“, neznamena nic jiného, že zařízení má na to mechanismus, který pracuje požadovaným způsobem: zařízení je tak „uděláno“. Přechodové pravidlo zařízení nemusí být známo – stačí, když existuje a je konečně popsitelné v nějakém formalismu. Příkladem zařízení, které počítá ve shora uvedeném smyslu, je samozřejmě klasický, ale i kvantový počítač (přechodové pravidlo je známé), dále třeba mozek (pravidlo neznámé, ale komputacionalisté věří, že existuje – viz. např. [3]), živý organismus, neuronová síť, konečný automat, automat na prodej lístků, atd. Příkladem zařízení, které nepočítá ve shora uvedeném smyslu, je např. kámen, obraz, anebo paměťová karta digitálního fotoaparátu. Všimněme si jedné důležité vlastnosti shora definovaného výpočetního zařízení – totiž skutečnost, že jsme nestanovili, kdy výpočet skončí, ani jeho výsledek. To jsme udělali úmyslně – naše zařízení totiž realizuje potenciálně *nikdy nekončící výpočty*. Jinak řečeno, zařízení transformuje každý potenciálně nekonečný proud vstupních dat (kterým v případě kognice říkáme stimuly) na potenciálně nekonečný proud výstupních dat (tomu odpovídají v případě živých organismů akce, resp. jejich poslušnost -- chování). Přitom je možné a definice to nevylučuje, že některá vstupní data

mohou být reakcí okolí na některá výstupní data, takže se jedná o *interaktivní výpočty*. Samozřejmě, právě popsané zařízení může realizovat i konečné výpočty – jednoduše tak, že uměle omezíme data vstupního proudu např. tak, že od jisté pozice budou tvořena pouze posloupností „prázdných“ symbolů a budeme se zajímat pouze o výpočty, které skončí.

Dále se budeme zabývat pouze klasickými (tj. diskrétními, ale ne-kvantovými) výpočetními zařízeními. Formálně je každé výpočetní zařízení takového typu ekvivalentní tzv. *interaktivnímu konečnému automatu s výstupem*, či tzv. *interaktivnímu konečnému transduktoru* [23].

Definice: Interaktivní konečný transduktor (IKT) je automat, který se skládá z konečného řízení a vstupního a výstupního portu.

- Vstupní port slouží jako zařízení, pomocí kterého automat čte vstupní data, což jsou symboly tzv. vstupní (konečné) abecedy Σ . Na tomto portu se v každém kroku nachází nějaký vstupní symbol (může to být i tzv. prázdný symbol $\epsilon \in \Sigma$, který znamená „žádný vstup“); jakmile automat vstupní symbol přečte, na portu se objeví v dalším kroku další symbol.
- Výstupní port je zařízení, kam automat posílá v každém kroku tzv. výstupní symboly – prvky konečné abecedy Γ .
- Konečné řízení je formálně definováno pomocí konečné množiny stavů Q a pomocí tzv. přechodové relace f . Řízení se v každém okamžiku nachází v jednom z konečného počtu stavů. Přechodová relace je daná předpisem (tabulkou), který přiřazuje každému stavu $q \in Q$ a každému vstupnímu symbolu $a \in \Sigma$ konečnou množinu dvojic, pozůstávajících z nového stavu $r \in Q$ a výstupního symbolu $b \in \Gamma$.

Každý IKT definuje relaci mezi posloupností stimulů a posloupnostmi chování. V deterministickém případě odpovídá každému vstupnímu proudu dat nejvýše jeden výstupní proud; v takovém případě je přechodová relace ekvivalentní s funkcí $f: Q \times \Sigma \rightarrow Q \times \Gamma$ a hovoříme překladu proudu vstupních dat na proud výstupních dat.

IKT se tedy od „běžného“ konečného automatu s výstupem (tzv. Mealyho automatu) liší tím, že jeho vstupní data nejsou předem připravena na pásce a není jich konečný počet; proto i výstupem IKT nemusí být konečný řetězec symbolů.

Některá výpočetní zařízení mohou být obdařena zvláštní schopností (rozuměj: mechanismem) zvětšovat svou paměťovou kapacitu např. tím způsobem, že za tím účelem využívají jiná zařízení, či se s nimi dokonce „spojují“. Tato dodatečná paměťová kapacita jim umožňuje vytvářet a využívat potenciálně neomezené množiny konfigurací. Příkladem takového zařízení je interaktivní Turingův stroj (ITS) [23], který vypadá jako standardní Turingův stroj, ale data čte a vypisuje podobně jako IKT přes vstupní a výstupní porty. ITS tedy můžeme chápat jako IKT, který pro zvýšení své konečné paměťové kapacity využívá kapacitu potenciálně nekonečné paměťové pásky. Tato páska sama o sobě „nedovede počítat“, ale v symbióze s IKT, který je obdařen schopností pohybu podél pásky, a schopností čtení a přepisování symbolů na pásce, vede k výpočetně silnějšímu zařízením než je samotný IKT: ITS „počítá“ všechno, co počítá i IKT, ale počítá i něco navíc. Z hlediska konstrukce je ITS rozšířením standardního, klasického modelu pro případ nekonečných posloupností dat. Právě schopnost zpracovat tyto nekonečné posloupnosti dává ITS právě zmíněnou možnost počítat „něco navíc“. Například, ITS může zpracovávat nekonečnou množinu konečných datových

segmentů. Samozřejmě, že každý takový segment může být zpracován i standardním strojem, ale standardní stroj nemá možnost

„přenést“ nějakou informaci ze zpracování jednoho segmentu do druhého, protože po skončení výpočtu ho nelze „restartovat“ ze stavu, ve kterém výpočet skončil (standardní model Turingova stroje musí zpracování nového vstupu začít z počátečního stavu a s prázdnou páskou). Takže na standardním stroji nemůžeme např. realizovat následující překlad: pokud stroj akceptuje nějaký segment (tj. generuje jedničku), tak další segment v každém případě zamítne (generuje nulu). Více o možnostech interaktivních Turingových strojů viz v práci [21].

Jiným zařízením, které má potenciál pro vytváření neomezeného množství konfigurací ale nevyužívá „externí paměťové médium“, je potenciálně neomezený systém (tj. tak velký systém, jak potřebujeme) spolupracujících konečných automatů (příkladem jsou celulární automaty), který má paměťovou kapacitu tvořenou součtem paměťových kapacit jednotlivých konečných prvků systému. Ještě jiným zařízením je společenství ITS, které modeluje např. existující internet [22].

Věnujme ještě pár slov výběru vhodného modelu pro modelování živého organismu. Pokud nám skutečně jde o modelování za účelem napodobování, tak není chybou, je-li modelující zařízení v nějakém smyslu „silnější“ než zařízení modelované. V takovém případě se nám pouze zjednoduší modelování některých vlastností. Např. pro modelování činnosti bakterie můžeme využít Turingův stroj (tj. ve smyslu Church—Turingovy teze jakékoliv výpočetní zařízení), ale samozřejmě nemůžeme využívat „na doraz“ všechny jeho možnosti (zejména potenciál neomezené paměti). Na druhé straně, chceme-li výpočetní model použít pro odhad skutečné výpočetní síly modelovaného zařízení, výpočetně silnější zařízení zřejmě nelze pro tento účel použít. To znamená, že o výše zmíněné bakterii nelze tvrdit, že má stejnou výpočetní sílu jako Turingův stroj. To se zdá být samozřejmé, ale např. v článcích o umělé inteligenci často můžeme číst, že lidský mozek v principu lze simulovat na Turingově stroji, a tudíž že oba mají stejnou výpočetní sílu, což není pravda. Z těchto úvah vyplývá, že v případě, kdy nám jde právě o zachycení výpočetní síly kognitivních systémů, musíme tedy dávat pozor na to, aby modelující zařízení nemělo některé vlastnosti, které modelované zařízení nemá a ani v principu nemůže kombinací jiných vlastností nahradit. Pokud bychom se vrátili k případu mozku vs. Turingův stroj, tak mozek nemůže nijak kompenzovat libovolně velkou paměťovou kapacitu pásky Turingova stroje (pokud ovšem nepředpokládáme, že mozek může dle potřeby „narůst“).

Teď již se můžeme zabývat otázkou z nadpisu tohoto oddílu. Podle předchozího, organismu samotnému, viděnému bez kontextu svého okolí, odpovídá v našem modelování IKT (protože modelujeme konečný počet konfigurací). Pokud organismu (např. člověku) dovolíme využívat jeho okolí k rozšíření kapacity jeho (konečné) paměti, jako výpočetní zařízení ho lze modelovat pomocí ITS (přechod na potenciálně neohraničený počet konfigurací). Pokud mu povolíme „spolčování“ s jinými lidmi, dostaneme *společenství* IKT anebo *společenství* ITS, podle toho, jestli každému členu společenství nedovolíme nebo dovolíme využívat okolí jako potenciálně neohraničenou externí paměť. Hrubou analogií společenství IKT by byl např. roj včel, společenství ITS pak lidská společnost vládnoucí písmem. Další variace kognitivního zařízení zvaného „člověk“ dostaneme, jestli např. dovolíme „upgrade“ člověka pomocí evoluce, jestli ho uvažujeme jako operátora internetu, jestli mu dovolíme vyžití relativistického cestování v časoprostoru, obdaříme ho nesmrtelností, atd.

Dále zaměříme naši pozornost na některé ze shora uvedených možností. Protože nás budou zajímat zejména horní meze výpočetních možností takových zařízení, soustředíme se na Turingovy stroje a jejich „silnější“ modifikace.

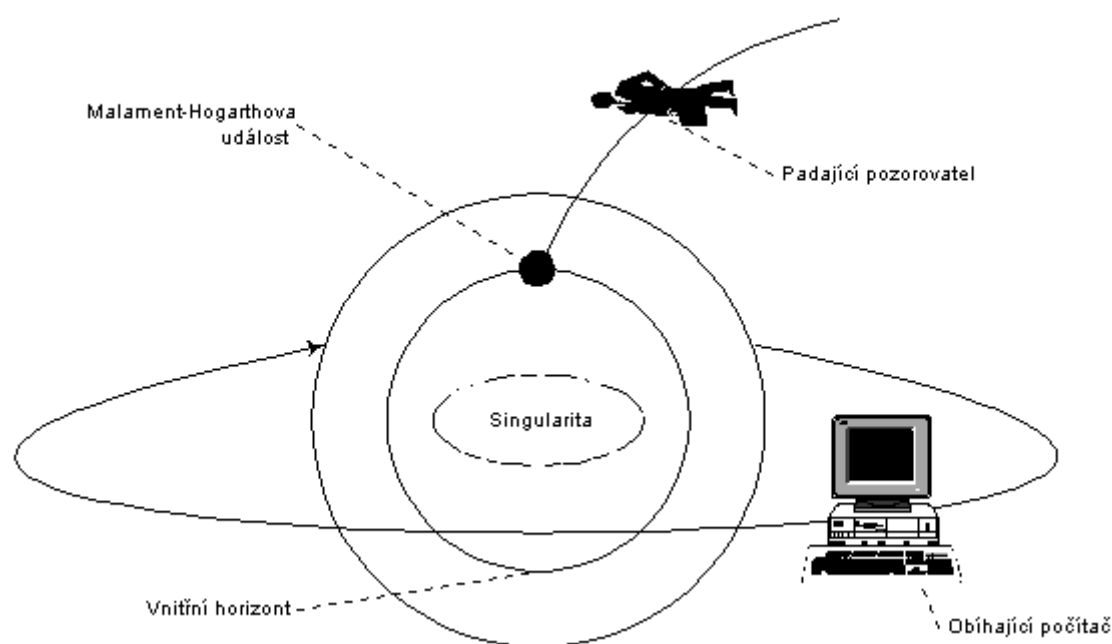
3. RELATIVISTICKÉ KOGNITIVNÍ SYSTÉMY

Relativistické kognitivní systémy jsou zatím reálně neexistující umělé výpočetní systémy, kterých existence však není ve sporu se známými principy relativistické fyziky. Jejich případné sestrojení by zesílilo podstatným způsobem kognitivní schopnosti jejich konstruktérů, protože tato zařízení by např. umožnila řešení nerozhodnutelných problémů. To by kromě jiného znamenalo revoluci v matematice, protože řada užitečných, avšak nerozhodnutelných teorií (např. „generování či dokazování všech matematických pravd“, po čemž toužil Hilbert) by se stala rozhodnutelnými. Existence takových zařízení je přímým důsledkem faktu, že za jistých okolností je v principu fyzikálně možná realizace tzv. *olbřímích úkolů* („supertásků“) v konečném čase; přitom olbřímí úkol je úkol, kterého realizace vyžaduje „za normálních okolností“ (tj. použitím klasických prostředků) vykonat nekonečný počet operací [6]. V případě nekonečných výpočtů je myšlenka realizace odpovídajícího olbřímího úkol ve své podstatě jednoduchá, ale na první pohled vypadá naivně: stačí na Turingově stroji spustit daný výpočet, o kterém chceme zjistit, jestli skutečně neskončí, a nechat ho běžet. Protože na výsledek výpočtu bude nutné čekat nekonečně dlouho, k ukrácení dlouhé chvíle se odebereme do zvláštní „čekárny“, kde se, pouze pro nás, čas nekonečně zpomalí. Turingův stroj je naprogramován tak, aby nám do čekárny vyslal signál v případě, že zastaví. Důležité je, aby se do čekárny takový signál dostal. Nedostaneme-li takový signál, víme, že náš stroj nikdy neskončí. Takový scénář je na první poslech natolik nereálný, že bez dalšího vysvětlení riskujeme pověst vědců a aspirujeme na post pohádkářů. Nuže, zde je vysvětlení z dílny současné relativistické teoretické fyziky černých děr. Předchozí scénář je možné realizovat v tzv. Malament–Hogarthově časoprostoru. Charakteristickou vlastností takového časoprostoru je skutečnost [15], že připouští existenci dvou různých trajektorií, T_1 a T_2 , vycházejících z jednoho bodu, přičemž putování podél T_1 trvá nekonečně dlouho, zatímco pro cestovatele podél T_2 uplyne pouze konečný čas. Takže, když se vrátíme k našemu potenciálně nekonečně dlouho počítajícímu Turingovu stroji, stačí, aby se tento během výpočtu pohyboval po trajektorii T_1 a zmíněná „čekárna“ po trajektorii T_2 . Existence Malament–Hogarthova časoprostoru vyplývá z teorie, ale zatím jeho existence nebyla empiricky ověřena. Kandidáty na takový časoprostor jsou rotující černé díry². Trajektorie T_1 je oběžná dráha (za horizontem událostí) kolem takové díry, trajektorie T_2 je trajektorie padajícího pozorovatele do černé díry. Fyzika černé díry a jejího okolí umožňuje padajícímu pozorovateli přijímat signály vysílané obíhajícím počítačem. Schéma výpočtu je zobrazena na obr. č.1.

Z „praktického“ pohledu má předchozí scénář několik vad: po prvé, není jasné, jestli je možné udržet nějaký počítač v chodu nekonečně dlouho. Vyžadovalo by to neustálý přísuv energie, protože počítač by spotřebovával stále více paměti (pokud by výpočet neupadl do věčného cyklu – ale to se dá snadno odhalit) a tudíž by musel „růst“. Po druhé, úloha pozorovatele v čekárně je nevděčná. Pokud se smíří s tím, že jeho civilizace mezitím zanikne,

² „Nejslibnější“ černou dírou je superhmotný kompaktní objekt v centru Mléčné dráhy; definitivní odpověď, týkající se existence rotujících černých děr, bude nalezena snad v příštích desetiletích [11].

pořád zůstává možnost, že poslední pozorovatelova myšlenka před jeho smrtí, v okamžiku, kdy pozorovatel dosáhne vnitřní horizont černé díry a nastane tzv. Malement–Hogarthova událost, kdy pozorovatel dokončí „prohlídku“ minulosti Vesmíru, bude platit obíhajícímu Turingovu stroji: „Žádný signál jsem nedostal, tudíž výpočet nekončí! Áááá...“ Po třetí, není jasné, jestli je možné realizovat navazující výpočty typu „nekonečný výpočet v konečném čase“. První možnost – neomezená kapacita paměti, neomezený přísun energie – je reálná v jisté třídě kosmologických modelů uvažovaných extravagantním matematickým fyzikem F. Tiplerem (tzv. *teorie bodu omega*) [5], [18]. Druhá možnost – destrukce pozorovatele na horizontu událostí rotující černé díry – je vyvrácena v práci [7]. Třetí možnost – realizace vícefázového nekonečného výpočtu – by snad byla možná „vypučením“ nového vesmíru z kolabující černé díry, anebo přechodem do něj přes tzv. červí díru [8]. To znamená, že pro každý návazný nekonečný výpočet bychom potřebovali nový vesmír.



Obr. 1 Schéma relativistického výpočtu s využitím černé díry

Opusťme nyní fascinující svět relativistické fyziky a věnujme se otázce výpočetní síly příslušných zařízení. V práci [7] je studován model tzv. relativistického počítače a je ukázáno, že tento počítač může přijímat komplementy všech rekurzivně vyčíslitelných jazyků (což standardním Turingovým strojem není možné), a některé ještě složitější nerozhodnutelné jazyky. Jiná charakteristika výpočetní síly relativistických výpočtů je podána v práci [24], kde je navržen předchozími úvahami inspirovaný model tzv. *relativistického Turingova stroje* (RTS), který je schopen realizovat libovolný konečný počet nekonečných relativistických výpočtů, každý z nich v konečném čase.

Definice: Relativistický Turingův stroj (RTS) je zvláštní druh deterministického mnohopáskového Turingova stroje s oddělenou vstupní páskou. Mezi jeho stavy se nachází zvláštní, tzv. relativistické stavy a také tzv. signální stavy. Signální stavy jsou dvojího druhu: pozitivní a negativní. Jakmile stroj dospěje do relativistického stavu, spustí tím relativistickou fázi výpočtu. Nastartuje se tím zvláštní výpočet, jehož cílem je dodat odpověď na dotaz „pokud bude pokračovat výpočet dále, dospěje v konečném čase do koncového stavu?“ Jestliže ano, tak RTS vstoupí v dalším kroku do pozitivního signálního stavu; v opačném případě do negativního signálního stavu. V obou případech může výpočet pokračovat dále klasicky, počínaje v situaci, ve které byl při vstupu do relativistické fáze. Výpočet může obsahovat konečný počet střídání klasického a relativistického výpočtu.

Všimněme si, že relativistický výpočet po sobě nezanechá žádné stopy, tj. nemění obsah pásky. Jediné svědectví o tom, jestli skončil, vydávají právě signální stavy. Pokud postulujeme, že předchozí model odpovídá fyzikálnímu modelu popsanému výše, tak lze dokázat překvapivý výsledek, dávající do souvislosti nekonečné výpočty s konečnými tzv. neuniformními výpočty. Neuniformní výpočty jsou takové výpočty, kterých „program“ závisí na daném vstupu. To znamená, že množina zařízení, realizujících nějaký neuniformní výpočet pro nekonečně mnoho vstupů, nemá konečný popis. Klasickým příkladem neuniformního výpočetního zařízení je Turingův stroj s orákulem (TSO), zavedený samotným Turingem [20]. Je to Turingův stroj, který je vybaven další tzv. dotazovací páskou, na kterou stroj může napsat slovo (tj. konečnou posloupnost symbolů) w a vstupem do tzv. dotazového stavu může zjistit, jestli slovo w patří nebo nepatří do nějaké předem dané množiny M . Odpověď je indikována vstupem do stroje do speciálního pozitivního nebo negativního signálního stavu. Příslušnost prvku do množiny M může pro klasický Turingův stroj představovat nerozhodnutelný problém, avšak stroj s orákulem M jej „řeší“ v jednom výpočetním kroku. V takovém případě je množina M nekonečná a popis stroje s orákulem M je tedy nekonečný, protože musí obsahovat popis množiny M .

Jiným příkladem neuniformního výpočetního zařízení je množina obvodů. Je zřejmé, že každý obvod může zpracovat pouze vstupy jisté velikosti, takže pro zpracování vstupů rostoucí velikosti potřebujeme i obvody rostoucí velikosti. Tyto obvody mohou být v principu sestaveny „na míru“ svým vstupům, tj. nemusí existovat algoritmus, který vygeneruje potřebný obvod pro vstup dané velikosti. Více o neuniformních výpočtech viz například v práci [1].

Věnujme se opět problematice relativistických výpočtů. Pro ně platí, že nekonečný výpočet realizovaný RTS polynomické prostorové složitosti je ekvivalentní výpočtu tzv. *neuniformního Turingova stroje*, přičemž neuniformita roste polynomicky s rozměrem vstupu a je (relativisticky) vypočitatelná právě pomocí RTS polynomické složitosti [25]. Technicky, neuniformní Turingův stroj je Turingův stroj se speciálním orákulem, které umožní stroji během výpočtu získávat specializovanou, obecně nevypočitatelnou informaci „zvenčí“. Na rozdíl od „běžných“ TSO, zmíněných předtím, které mohou dostat speciální informaci pro každý vstup, neuniformní Turingův stroj může dostat pouze informaci, která je stejná pro všechny vstupy stejné délky; v tomto ohledu se podobá výše uvažovaným obvodům. Neuniformní Turingovy stroje jsou známy i pod názvem *Turingovy stroje s rádce*. Rádce je blíže nespecifikované zařízení, které na požádání dodá stroji onu výše zmíněnou informaci – radu. Formálně se činnost tohoto mechanismu modeluje zavedením speciálního, tzv. dotazovacího stavu, podobně jako u strojů s orákulem; jakmile stroj do takového stavu

vstoupí, na zvláštní pásce se mu „objeví“ příslušná rada [11]. Lze rigorózně matematicky dokázat, že Turingův stroj s rádcem je silnější než klasický Turingův stroj, který rádce nepoužívá. Např. v práci [23] je navržen Turingův stroj používající rady lineární velikosti pro řešení klasicky nerozhodnutelného problému zastavení.

Idea sestrojení takového stroje M je následující. Potřebujeme „vymyslet“ radu, pro každou velikost vstupu jinou, která umožní stroji M zjistit o nějakém jiném stroji T s popisem $\langle T \rangle$, jestli výpočet stroje T se vstupem $\langle T \rangle$ skončí anebo neskončí. Necht' n je délka popisu $\langle T \rangle$ stroje T ; to znamená, že i délka vstupu pro stroj T je n . Strojů s popisem délky n je konečný počet. Vyberme mezi nimi ten stroj, který počítá nejdéle na vstupu, který je shodný s jeho popisem. Nazveme takový stroj S_n a jeho popis $\langle S_n \rangle$. Stroj M bude fungovat takto: na vstupu $\langle T \rangle$ bude simulovat stroj T a současně i stroj S_n jehož popis $\langle S_n \rangle$ bude právě rada pro velikost vstupu n . Jestliže simulace stroje T skončí dříve než simulace stroje S_n , tak se zřejmě T se vstupem $\langle T \rangle$ zastaví. Jinak, pokud simulace S_n skončí jako první, tak se stroj T zřejmě nikdy nezastaví vzhledem k tomu, že S_n je stroj s maximální délkou výpočtu. Velikost rady je zřejmě stejná jako délka popisu stroje T , tj. rada je velikosti n .

Výsledek z práce [25] říká, že stačí (v polynomickeém prostoru) relativisticky vypočitatelná rada polynomickeé velikosti k tomu, abychom nahradili relativistické nekonečné výpočty generované v prostoru polynomickeé velikosti konečnými výpočty. Tato rada je konstruovaná podobně jako v případě předchozího stroje M . Pokud někoho zajímá přesná charakterizace výpočetní síly RTM, tak další výsledek práce [25] ukazuje, že tyto stroje rozeznávají přesně třídu Δ_2 aritmetické hierarchie.

Bude někdy možné dosáhnout hranice kognice dané relativistickými úvahami? Dle již zmíněného Tiplera [18] (a nesčetných autorů sci—fi) je možné očekávat nekonečně dlouhý vývoj inteligence, která se nakonec oprostí od své tělesné existence, bude nesmrtelná a bude existovat ve vesmíru či vesmírech, poslušná pouze zákonům fyziky. V takovém případě naše relativistické úvahy snad budou naplněny, ne-li dokonce překonány novými objevy.

Praktický význam relativistických výpočtu je zatím nulový. Příslušné úvahy však již v současné době mají velký význam např. z hlediska teorie vyčíslitelnosti – kromě jiného ukazují, že při určování hranic vypočitatelnosti je třeba brát do úvahy fyzikální zákony, v rámci kterých je výpočet realizován. Dále ukazují, že Church—Turingova teze byla (či je) poplatná době svého vzniku a předchozí příklad relativistických výpočtů vyvrací její pravdivost. Pokud by se někomu zdálo, že předchozí „vyvrácení“ teze pomocí relativistických výpočtů přece jen poněkud spekulativní, v dalším si ukážeme jiný způsob, jak dosáhnout podobného cíle současnými výpočetními prostředky v současném světě.

4. INTERAKTIVNÍ EVOLUČNÍ KOGNITVNÍ SYSTÉMY

Vraťme se nyní zpět k našim IKT zavedených ve 2. kapitole. Jejich výpočetní síla není nikterak oslnivá – dovedou „pouze“ transformovat potenciálně nekonečnou posloupnost stimulů na výstupní proud různých akcí, které ve svém úhrnu tvoří „chování“ IKT. Všimněme si, že množina různých akcí jednoho IKT je konečná, protože existuje pouze konečný počet různých konfigurací IKT. Nicméně, v obecném případě IKT dokáže vygenerovat nekonečně (dokonce nespočetně) mnoho různých (nekonečných posloupností) chování, v závislosti na vstupních datech, která se mohou vyskytovat v nespočetných

vstupních proudech. „Návod“ pro převod vstupní posloupnosti na výstupní je konečný, daný přechodovou funkcí IKT. Zdálo by se, že po tomto konstatování není co zkoumat.

Položme si však otázku, jestli dovedeme pomocí našeho aparátu zachytit evoluci -- tj., zhruba řečeno, postupnou proměnu nějakého IKT, který počítá nějakou transformaci, na IKT, který počítá jinou transformaci, atd. Zachytit takto chápanou (časově neomezenou, tj. nekonečnou) evoluci lze pomocí nekonečné posloupnosti (navzájem různých) IKT, a mechanismu, který stanoví okamžik „přesměrování“ proudu vstupních dat z jednoho IKT na druhý IKT právě tehdy, když se daný IKT „evolučně“ změní na jiný IKT. Navíc můžeme chtít, aby „nový“ IKT pokračoval ve zpracování vstupních dat ve stejné konfiguraci, ve které jeho předchůdce ukončil svou činnost. To proto, abychom dovedli modelovat „předávání znalostí“ z generace na generaci. To vše vede na pojem evoluční posloupnosti IKT s globálními stavy, která byla po prvé definovaná v práci [23].

Definice: Evoluční posloupnost interaktivních konečných transducerů s globálními stavy je posloupnost IKT tvaru $I_1, I_2, I_3, \dots$, přičemž i -tý transducer má množinu stavů S_i , z níž se vyděluje speciální podmnožina tzv. globálních stavů G_i a platí $G_i \subseteq G_{i+1}$. Předpokládejme, že v čase t je proud vstupních dat nasměrován do transduceru I_j . Pokud poté transducer I_j počítá ve stavech množiny $S_j - G_j$, tak proud dat stále směřuje do něj. Jakmile ale transducer vstoupí do jakéhokoliv globálního stavu $g \in G_j$, proud dat se přesměruje do dalšího automatu I_{j+1} , který začne počítat ve stavu $g \in G_{j+1}$. Pokud někdy později I_{j+1} opět vstoupí do globálního stavu, proud dat se přepne na další automat, atd.

Ptejme se dále, co „počítá“ evoluční posloupnost IKT s globálními stavy. Z definice tohoto zařízení je zřejmé, že to opět bude nějaká transformace proudu vstupních dat na výstupní data. Nyní však je „návod“ pro výpočet této transformace nekonečný, daný posloupností popisů jednotlivých členů posloupnosti! Samozřejmě, může se stát, že existuje konečný algoritmus, který pro daný index vygeneruje příslušný IKT, ale v obecném případě tomu tak nemusí být. Evoluční posloupnost interaktivních konečných transducerů s globálními stavy je tedy dalším případem neuniformního výpočetního zařízení, která byla zmíněna v předchozí části. Pojem neuniformity tady zachycuje rozdíl mezi výpočty jediného IKT, který je popsán konečným předpisem, a výpočty realizovanými posloupností IKS, které jsou popsány nekonečným předpisem. Tato charakteristika nám zatím mnoho neříká, protože v konfrontaci konečna s nekonečnem intuice selhává. Lepší by samozřejmě bylo srovnání s Turingovým strojem, kde již máme představu, co takový stroj dovede spočítat.

V práci [23] autoři dokázali, že výpočetní síla evoluční posloupnosti IKT s globálními stavy je ekvivalentní výpočetní síle interaktivního Turingova stroje s rádce. ITS „bez rádce“ byl popsán ve 2. části; jeho rozšíření o rádce ve stejném duchu jako jsme to dělali v předchozí části je přímočará záležitost. Přitom se velikost rady měří vzhledem k délce již přečteného prefixu potenciálně nekonečného proudu dat, zpracovávaného ITS, v okamžiku vyžádání rady. Poměrně jednoduše lze ukázat, že ITS s rádce je výpočetně silnější než stroj bez rádce (viz např. [22], [23]). Použije se přitom překlad, ve kterém je zakódován problém zastavení. Vstupní proud dat se skládá z nekonečné posloupnosti segmentů a každý segment obsahuje popis nějakého Turingova stroje. Výstupní proud obsahuje na pozici odpovídající danému popisu stroje jedničku (nulu), pokud stroj odpovídající popisu zastaví (nezastaví) na vstupu, který je roven popisu daného stroje. Toto je pro ITS bez rádce nerozhodnutelný problém, ale

pokud stroj vybavíme pro každý popis radou, kterou jsme zkonstruovali pro stroj M v předchozí části, tak tento problém bude řešitelný.

Ekvivalence evoluční posloupnosti IKT s globálními stavy s interaktivním Turingova strojem s rádcem se dokáže takto. ITS dostane ve své radě popis IKT, který právě zpracovává vstup, takže stroj může tento transducer simulovat. Opačně, popis ITS s rádcem je v každém okamžiku konečný a proto mu odpovídá nějaký IKT.

V rámci původní motivace pro zavedení pojmu evoluční posloupnosti IKT s globálním stavem můžeme předchozí výsledky interpretovat i tak, že výpočetní síla evoluce (přesněji: evolučních interaktivních systémů) je větší než výpočetní síla „klasických“ Turingových strojů, uvažovaných sice v interaktivním kontextu, ale bez možnosti evoluce. Tato skutečnost má řadu zajímavých dopadů v teorii umělého života, které byly zkoumány v práci [24]. Např. se ukazuje, že pomocí modelu ITS s rádcem (anebo evoluční posloupnosti IKT s globálními stavy) lze modelovat např. výpočetní sílu rozvíjejících se společenství IKT, tj. kognitivních jedinců, komunikujících prostřednictvím všech známých komunikačních prostředků, jakými je hovořená řeč, dopisy, e-maily, mobilní telefony apod. Také internet, včetně jeho prostřednictvím komunikujících jedinců, spadá do kategorie zařízení, která jsou ekvivalentní, z hlediska jejich výpočetní síly, interaktivnímu Turingovu stroji s rádcem. Protože víme, že Turingův stroj s rádcem je silnější než klasický stroj bez rádce, můžeme předchozí výsledky interpretovat v kognitivní teorii jako důkaz, že kolektivní inteligence vysoce, kvalitativně překračuje inteligenci osamocенého jedince. Mimochodem, zde může být skryto vysvětlení problému, který tak trápil Penrose [16]: jak je možné vysvětlit, že matematikové jsou schopni dokazovat pravdivost některých teorémů přes to, že víme (dle Gödelovy věty či Turingova výsledku [19]), že obecně neexistuje algoritmus, který by zaručeně vedl k cíli, pro důkaz či vyvrácení jakékoliv teoremy. Vysvětlení je, že matematikové najdou „neuniformní“ důkaz, tj. postup, který se hodí pro důkaz dané teoremy a pravděpodobně už pro nic jiného. Otázkou je, jak matematikové takový důkaz najdou, tj. jak získají nevypočitatelnou informaci, která „otevře cestu“ k řešení daného problému. Odpovědí je, že komunita matematiků představuje interaktivní evoluční systém, který si v nepredikovatelné interakci a evoluci (myšlenek) generuje pro své vlastní účely klasickým způsobem nevypočitatelné informace, které jsou podrobeny „evolučnímu tlaku“ v konkurenci s jinými myšlenkami. Ty myšlenky, které přežijí, matematikové použijí jako „tvůrčivý“ doplněk již známých tvrzení a vyzkoušených postupů. Ve vybraných případech mohou vést k řešení nových problémů. Ne nadarmo existují odborné časopisy, prostřednictvím kterých matematikové (ale i jiní vědci) interagují.

Celkově se ukazuje a formálně lze pomocí modelů příslušných zařízení ilustrovat, že interaktivní Turingův stroj s rádcem představuje nové výpočetní paradigma, které modelově vystihuje podstatu současného využívání výpočetní techniky. Toto rozšířené paradigma lze po vzoru [22] formulovat např. takto:

Rozšířená Church—Turingova teze: výpočetní síla jakékoliv třídy interaktivních výpočetních zařízení řízených neuniformními algoritmy nepřesáhne výpočetní sílu interaktivního Turingova stroje s rádcem.

Pro úplnost si zopakujme výpočetní scénář klasického Turingova stroje, tak jak ho implicitně předpokládá klasická Church—Turingova teze: předem daná vstupní data konečného rozsahu,

výpočet, do kterého nelze v jeho průběhu zasahovat (tj. nelze měnit program během výpočtu, ani měnit či přidávat vstupní data), výsledek definován pouze v případě, kdy výpočet skončí. A nyní to porovnejme se scénářem výpočtu dle rozšířené Church—Turingovy teze: data do systému vstupují interaktivně, vystupují průběžně, výpočet může být potenciálně nekonečný, program lze měnit během výpočtu. Intuitivně, interaktivita představuje tu vlastnost výpočtů, která jim dává potenciál nikdy nekončících procesů. Nevypočitatelný či neuniformní prvek, modelovaný pomocí rádce, v „praxi“ představuje např. u internetu jeho nepredikovatelný vývoj, způsobený jeho lokální hardwarovou či softwarovou modifikací jeho uživateli, jeho nepredikovatelný růst přidáváním nových pracovních stanic, a v neposlední řadě nepredikovatelnou charakteristikou doručovacích časů zpráv vyměňovaných prostřednictvím internetu. Podobně lze nahlížet i na vyvíjející se společenství komunikujících kognitivních zařízení. Všechna tato zařízení, která jsou z hlediska jejich výpočetní síly ekvivalentní interaktivnímu Turingovu stroji s rádcem, resp. posloupností IKT s globálními stavy, nazýváme *evolučními interaktivními výpočetními systémy*.

Je dobré si uvědomit, že předchozí formulace teze je skutečně rozšířením klasické teze. Je tomu tak proto, že klasické pojetí algoritmů jako ne--interaktivních a uniformních algoritmů je vlastně speciálním případem evolučních interaktivních algoritmů, podobně jako je klasický Turingův stroj speciálním případem interaktivního Turingova stroje s rádcem. Navíc, rozšířená teze pokrývá i případ relativistických výpočtů. Důvod je ten, že výpočty RTS, definovaného ve 3. části, jsou ekvivalentní výpočtům (ne—interaktivního) Turingova stroje s rádcem (viz také konec 3. části), což je zřejmě speciální případ interaktivního Turingova stroje s rádcem.

Poslední zajímavá otázka, na kterou je dobré dát jasnou odpověď, je tato: pokud tedy tvrdíme, že evoluční interaktivní výpočetní zařízení mají větší výpočetní sílu než klasický interaktivní Turingův stroj, znamená to, že mohou řešit nerozhodnutelné problémy? Odpověď zní, ano, ale pouze za určitých předpokladů, které v praxi nelze splnit: nevypočitatelná informace, která je nutná pro řešení nerozhodnutelných problémů, by se musela do evolučních systémů dostávat z jejich okolí, prostřednictvím interakce či prostřednictvím evoluce. Takže praktická implikace odpovídajících výsledků o výpočetní síle těchto systémů je spíše opačná: tyto výsledky dokazují, že evoluční interaktivní výpočetní systémy nelze modelovat klasickými prostředky. Jsou sice výpočetně silnější než klasické systémy, avšak tuto sílu nelze využít pro řešení zajímavých, námi určených nerozhodnutelných problémů.

5. ZÁVĚR

V předchozích dvou částech jsme naznačili dva způsoby, jak se dostat za hranici vypočitatelnosti dané silou standardního Turingova stroje: buď pomocí relativistické fyziky, anebo změnou výpočetní scénáře na scénář evolučních interaktivních výpočtů. Oba dva způsoby mění pravidla hry, implicitně uvažované Turingem a obsažené v klasické Church—Turingově tezi. V prvním případě využíváme na doraz relativistické vlastnosti časoprostoru, které v běžném životě nehrají roli. Ve druhém případě vlastně uvažujeme nekonečně velké výpočetní zařízení, resp. přesněji, výpočetní zařízení s potenciálně nekonečně velkým programem. Vtip je ale v tom, že v každém okamžiku je toto zařízení konečné, ale jeho budoucí evoluci nelze „vypočítat“. V prvním případě dostaneme relativistické výpočetní zařízení, které nám umožní řešit konkrétní nerozhodnutelné problémy. Ve druhém případě, evoluční výpočetní systémy řešení konkrétních, námi definovaných nerozhodnutelných

problémů neumožňují, protože okolí s nimi správným způsobem „nespolupracuje“, nedodává jim potřebné rady. Jinými slovy to znamená, že relativistické výpočetní systémy představují konstruktivní řešení některých doposud neřešitelných problémů, kdežto interaktivní evoluční představují nekonstruktivní řešení: víme, že interaktivní evoluční systémy, řešící některé nerozhodnutelné problémy existují, ale je nedovedeme sestojit. Na druhé straně, posledně zmíněné systémy dovedou řešit jeden problém, o kterém (zatím) nedovedeme dokázat, že je nerozhodnutelný, protože ho nedovedeme formalizovat: je to problém vzniku a evoluce života. Zde naopak je prostředí velmi podstatné, usměrňuje vývoj výpočetního systému tak, aby zaplnil danou „niku“. Naše výsledky naznačují, že bez interakce s prostředím nelze vývoj živých organismů (a tedy ani kognici v plném rozsahu) simulovat pomocí běžných počítačů. Takže závěr je docela zajímavý. Na jedné straně, v případě relativistických výpočtů dovedeme, alespoň v principu, řešit formální nerozhodnutelné problémy dle naší libovůle, ale nedovedeme řešit problém vzniku a vývoje života (v pozemském smyslu), protože (kromě jiného) nedovedeme nasimulovat věrně interakci s okolím. Na straně druhé, tento problém řeší evoluční interaktivní výpočty, které se svému okolí přizpůsobují „automaticky“ (pokud jsou správně naprogramovány). V reálném světě se „správné naprogramování“ děje prostřednictvím přirozeného výběru darwinovským způsobem. V teorii se tento princip využívá v oblasti genetických algoritmů. Nicméně na základě předchozího lze konstatovat, že problém mezí kognitivních výpočtů je dán možnostmi výpočetních systémů v hranicích platných fyzikálních teorií a v rámci uvažovaného výpočetního scénáře. Jinými slovy, co lze a co nelze vypočítat není výlučně matematický problém, jak se domnívali matematikové v průběhu 20. století, ale je to i, a především, problém fyzikální [5]. Co zůstává, je problém sestrojení konkrétních umělých kognitivních systémů, které by využívaly principy evolučních interaktivních algoritmů. Možné kroky v tomto směru, využívající principy evoluční sebe reprodukce a sebe-sestavování, jsou naznačeny v práci [26].

LITERATURA

- [1] J. L. Balcázar, J. Diáz, and J. Gábarró: Structural complexity, Vol. I, 2nd Edition, Springer-Verlag, Berlin, 1995.
- [2] E. Bernstein, U. Vazirani: Quantum Complexity Theory. Proc. of the 25-th Annual Symposium on the Theory of Computing, ACM, New York, 1993, s. 11--20
- [3] D. J. Chalmers: A Computational Foundations for the Study of Cognition. Minds and machines, Vol. 4, No. 4, 1994
- [4] D. Deutsch: Quantum Theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer. Proc. of the Royal Society of London A 400, s. 97—117, 1985
- [5] D. Deutsch: Fabrics of Reality. Penguin Books, 1997, 390 s.
- [6] J. Earman, J. Norton: Infinite Pains: The Trouble with Supertasks. In P. Benacerraf: The Philosopher and His Critics, ed. S. Stick, New York, Blackwell, 1994
- [7] G. Etesi, I. Németi: Non-Turing computations via Malament--Hogarth space-times, Int. J. Theor. Phys. 41, 2002, s. 341-370, viz také <http://xxx.lanl.gov/ps/gr-qc/0104023>
- [8] B. Greene: Elegantní vesmír. Mladá fronta, 1999, 398 s.
- [9] J. Hogarth: Non-Turing computers and non-Turing computability, Proceedings of the 1994 Bienial Meeting of the Philosophy of Science Association PSA 1994, Vol. One, s. 125-138, 1994

- [10] J. Hopcroft, R. Motwani, and J.D. Ullman: Introduction to automata theory, languages and computation, 2nd Edition, Addison-Wesley, Reading, MA, 2000.
- [11] R.M. Karp, R.J. Lipton: Some connections between non-uniform and uniform complexity classes, in Proc. 12th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing (STOC'80), 1980, s. 302-309.
- [12] I. Kramosil: Pravděpodobnostní algoritmy. In: Umělá inteligence (4), V. Mařík, O. Štěpánková, J. Lažanský a kol., Academia, 2003, 475s.
- [13] S. Lloyd: How Fast, How Small, and How Powerful: Moor's Law and the Ultimate Laptop. In: Rebooting Civilization, http://www.edge.org/3rd_culture/rebooting/rebooting.html , 2001
- [14] F. Melia: The heart of the Milky Way, American Scientist, s. 346-353, July-August 2000
- [15] J.D. Norton: What Can We Learn about Ontology of Space and Time from the Theory of Relativity? <http://philsci-archive.pitt.edu/documents/disk0/00/00/02/25/index.html>, Sept. 2000
- [16] R. Penrose: Shadows of the Mind (A Search for the Missing Science of Consciousness). Oxford University Press, Oxford, 1994, 457 p.
- [17] S. Shettleworth: Cognition, Evolution, and Behavior, Oxford University Press, 1998
- [18] F. Tipler: The Physics of Immortality, Doubleday, 1995
- [19] A. M. Turing: On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem, Proc. London Math. Soc., 42-2 (1936) 230-265; A correction, ibid., 43 (1937) 544-546.
- [20] A. M. Turing: Systems of logic based on ordinals, Proc. London Math. Soc. Series 2, 45 (1939), s. 161-228.
- [21] J. van Leeuwen, J. Wiedermann: Theory of Interaction. Kapitola v knize: Goldin, D., Smolka, S., and Wegner, P., Eds.: Interactive Computing: A New Paradigm. Springer, 2006, 487 s.
- [22] J. van Leeuwen, J. Wiedermann: The Turing machine paradigm in contemporary computing, B. Enquist and W. Schmidt (Eds), Mathematics Unlimited - 2001 and Beyond, Springer-Verlag, 2001, s. 1139-1155
- [23] J. van Leeuwen, J. Wiedermann: Beyond the Turing limit: evolving interactive systems. L. Pacholski, P. Ruzicka (Eds.), SOFSEM'01: Theory and Practice of Informatics, 28th Conference on Current Trends in Theory and Practice of Informatics, Lecture Notes in Computer Science Vol. 2234, Springer-Verlag, Berlin, 2001, s. 90-109
- [24] J. Wiedermann, J. van Leeuwen: The Emergent Computational Potential of Evolving Artificial Living Systems. Ai Communications, IOS Press, Vol. 15, No. 4, 2002, s. 205-216
- [25] J. Wiedermann, J. van Leeuwen: Relativistic Computers and Non-Uniform Complexity Theory Unconventional Models of Computation (UMC'2002), LNCS Vol. 2509, Berlin, Springer 2002, s. 287-299
- [26] J. Wiedermann: Globular Universe and Autopoietic Automata: A Framework for Artificial Life. M. S. Capcarrère, A. A. Freitas, P. J. Bentley, C. G. Johnson, J. Timmis (Eds.): Advances in Artificial Life, 8th European Conference, ECAL 2005, Canterbury, UK, September 5-9, 2005, Proceedings. Lecture Notes in Computer Science Vol. 3630 Springer 2005, s. 21-30