

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Juraj Wiedermann

Proč počítáme a co počítáme?

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 59 (2014), No. 1, 33--43

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/143737>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2014

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Proč počítáme a co počítáme?

Jiří Wiedermann, Praha

Výpočty se tradičně chápou jako procesy transformující informace a jejich definice se soustřeďují na popis mechanismů, které takové procesy generují. Takový pohled však vede k příliš široké definici výpočtu, která nedovoluje odlišit objekty, které dle převládajícího mínění provádějí výpočet, od těch ostatních. V článku představíme nový pohled na výpočty – totiž jako na procesy generující znalosti. Z tohoto zorného úhlu výpočty vytvářejí poznatky v rámci různých více či méně úplných a v různé míře formalizovaných znalostních teorií. Nové vidění výpočtů umožňuje chápat dosavadní vývoj počítačů a informačních technologií ve zcela nové perspektivě. Dovoluje extrapolaci vzhledem k budoucnosti počítání, které bude zaměřené na získávání, shromažďování a tvořivé využívání znalostí, a to vše převážně v přirozeném jazyce. Evoluce a efektivita výpočtů bude vnímána prostřednictvím jejich schopností vytvářet nové poznání. Tento přístup má široké konotace v oblasti umělé inteligence, v kognitivních vědách, ve filozofii, epistemologii a metodologii vědy.

1. Úvod

Otázky z nadpisu by se daly upřesnit: ptáme se, proč vlastně používáme počítače? Co vlastně na nich počítáme? Jaký je smysl výpočtů, které provádíme pomocí počítačů? Zde i v dalším nemáme na mysli pouze numerické výpočty („počítání s čísly“), ale jakékoliv výpočty prováděné různými druhy počítačů. Tyto otázky, jakkoliv se zdají být naivní, si položil známý britský informatik a matematik S. Abramsky ve svém příspěvku do knihy, která vyšla u příležitosti oslav stého výročí narození Alana Mathisona Turinga [1]. Samozřejmě, že možných odpovědí je mnoho a každý z nás si najde nějakou odpověď, proč zrovna „on“ anebo „ona“ používá výpočty. V tomto případě však jde o to, přijít s odpovědí, která bude vyplývat z nějaké systematické teorie výpočtů, jako součást hlubšího porozumění tomu, co jsou to vlastně výpočty. Je s podivem, že na takto upřesněné otázky a podmínky, které musí odpověď splňovat, neznáme dobrou odpověď. Souvisí to s tím, že my vlastně z hlediska informatiky, či teorie vyčíslitelnosti, dodnes dost dobře nevíme, co je to výpočet. A to je dost hanba, protože výpočet je klíčovým pojmem zmíněných vědních disciplín. Důvody pro takový neutěšený stav věcí se nakupily během posledních deseti-dvaceti let.

Výpočet totiž již zdaleka není tím, co odjakživa býval. Ještě tak do konce osmdesátých let dvacátého století se otázkou, co je to výpočet, nikdo netrápil. Odpověď byla jasná: výpočet je to, co popisuje všeobecně akceptovaný matematický model počítače, tzv. Turingův stroj [11], [18], anebo jakýkoliv jiný ekvivalentní výpočetní

Prof. RNDr. JIŘÍ WIEDERMANN, DrSc., Ústav informatiky AV ČR, v. v. i., Pod Vodárenskou věží 2, 182 07 Praha 8, e-mail: jiri.wiedermann@cs.cas.cz

model. S příchodem moderních výpočetních technologií a počítačových sítí, společně s novými metodologiemi a s novými poznatky fyziky a biologie, bylo stále jasnější, že výpočet je daleko širší, omnoho běžnější a podstatně komplexnější fenomén než ten, který lze přímočaře modelovat pomocí Turingova stroje. Příklady takových „problematických“ výpočtů jsou analogové výpočty, biologicky motivované výpočty neuronových sítí, DNA výpočty, sebe-sestavovací struktury, davové (swarm) výpočty, amorfní výpočty atd., anebo fyzikou inspirované výpočty, jako jsou kvantové výpočty, relativistické výpočty a či hyperturingovské výpočty. V neposlední řadě jsou zde „technologicky umožněné“ výpočty realizované v Internetu a pomocí mobilních sítí. Kromě předchozích příkladů převážně nenumerických výpočetních zařízení je nutno zohlednit samozřejmě tzv. vědecko-technické výpočty, výpočty matematiků „na papíře“ anebo „v hlavě“ (důkazy, počítání s reálnými čísly, spojité výpočty, konstrukce pomocí kružítka a pravítka atp.). Co je tedy výpočet? Které výpočetní zařízení je „to správné zařízení“, které provádí výpočet? Jak definovat výpočet, jestliže každé zařízení jej realizuje jiným způsobem? Co je společné všem těmto výpočtům?

Na tyto nové trendy ve výpočetní technice samozřejmě reagovala v nedávné době vědecká komunita z příslušných vědních oblastí, zejména informatiky, fyziky a filozofie. (Ne)překvapivě, nesjednotila se na společném názoru, co je to výpočet, nýbrž se rozpadla na několik názorových skupin. Např. profesor informatiky D. Frailey zastává radikální názor, že jakýkoliv proces realizuje výpočet [12]. Další informatici, např. P. S. Rosenbloom [14] anebo R. Bajcsy [4], se domnívají, že výpočet je proces transformace informace. Jiní význační badatelé k tomu dodávají další podmínku: proces transformace informace musí být řízen přechodovou funkcí a v podstatě jde o manipulaci symbolů (např. Fortnow [11], Denning [8], Connery [7] anebo filozof Searle [3]). Ještě další – např. A. V. Aho [1] anebo J. Searle [16] – požadují, aby výpočetní proces odpovídal nějakému výpočetnímu modelu. Fyzik Ed Fredkin [13] to shrnul lakonicky: „*Věc se má takto: výpočet je normálně přehršle bitů, která se vyvíjí v čase, a dále zde máme jeho pohon – počítač.*“ Další fyzik, D. Deutsch [10], přitvrzuje ještě více – výpočetní model musí mít fyzikální realizaci. Zdá se, že kolik badatelů, tolik názorů.

Bohužel, žádný ze shora uvedených názorů není bez chyby – nezachycují totiž některé aspekty výpočtů, které se zdají být důležitými. Chápání výpočtů jako procesy vede k příliš širokému okruhu objektů a jevů, které jsou nadány výpočetní schopností – např. kámen anebo počasí. Podobně je tomu tak i v případě nahlížení na výpočty jako na procesy zpracovávající informace. Každou změnu lze totiž chápat jako součást takového procesu, a tudíž jakákoliv změna ve vesmíru by byla součástí nějakého výpočetního procesu. Pokud požadujeme, aby změny byly řízeny přechodovou funkcí (v rámci nějakého formálního modelu výpočtu), tak se dostáváme k definici pomocí jakési ekvivalence, protože výpočet pak je cokoliv, co konají počítače anebo živé organizmy, a naopak, cokoliv, co činí počítače a živé organizmy, je výpočet. Porozumění takové definici výpočtu ovšem vyžaduje vědět, co konají počítače a živé organizmy. Navíc, lpění na formálním požadavku, že výpočty musí odpovídat fyzikálně realizovatelnému procesu, sráží pojem výpočtu na konkrétní fyzikální úroveň, která může být velmi vzdálena od rozumné úrovně abstrakce, na které je výpočet uvažován (např. výpočet nad reálnými čísly).

Je zajímavé, že všechny předchozí pokusy o definici pojmu výpočet mají přece jenom několik věcí společných. První věcí je konsenzus, že výpočet je proces. Druhou věcí

je skutečnost, že všechny definice se soustřeďují na to, JAK je výpočetní proces realizován, tj. na to, JAK funguje příslušný „hardware“. To ovšem neumožňuje dostatečný vhléd do pojmu výpočtu a nutí nás vidět jako výpočet jakoukoliv nesmyslnou operaci s daty. Na druhé straně, veškerá naše zkušenost s výpočty ukazuje přesně opačným směrem: nás vždy především zajímá, CO dělá výpočet, jaký je jeho smysl, jeho cíl, co činí výpočet pro nás návrháře výpočtů, uživatele, pozorovatele. Co dělá výpočet je vyjádřeno v jeho návrhu (a v případě programovatelných systému v návrhu jeho softwaru). Znalost toho, jakým způsobem dělá výpočet to, co dělá, je méně zajímavá, protože opět – veškerá naše zkušenost (i teorie) ukazuje na to, že to, co dělá výpočet, lze implementovat mnoha různými způsoby pomocí rozličného hardwaru. Závěr je, že pro pochopení pojmu výpočtu bychom se měli soustředit nikoliv na to, JAK výpočet probíhá, nýbrž na to, CO výpočet dělá, jaký je jeho smysl a užitek.

Nuže, co je to, co výpočet dělá? Naše odpověď, kterou jsme poskytli v práci [21], je prostá: *výpočet generuje znalosti*. Výpočet generuje znalosti nad znalostní doménou, pro kterou byl systém navržen, pokud byl navržen, anebo v rámci, ve kterém se „sám“ vyvinul, pokud se jedná o evoluční systém.

Pokud je toto řečeno, musíme umět odpovědět na otázku, co je to znalost. To je ovšem ošemetná otázka, která se zkoumá zejména ve filozofii tisíce let. Z hlediska vyčerpávající definice je to ještě hůře uchopitelný pojem než pojem výpočtu. Do jisté míry je to však výhoda, protože to činí tezi, že výpočet je generování znalostí, robustní. Pokusy o její vyvrácení tak mohou vést jak k lepšímu pochopení pojmu výpočtu, tak i pojmu znalosti.

Pro naše další účely bude plně postačující definice převzatá z Wikipedie.

Znalost je obeznamenost s někým anebo s něčím a zahrnuje fakta, informace, chování, zručnost, popisy anebo schopnosti získané zkušeností anebo výchovou. Vztahuje se k praktickému anebo teoretickému porozumění subjektu. Může být implicitní (např. v případě schopností anebo odborné znalosti) anebo explicitní (např. v případě teoretického porozumění subjektu). Může být více anebo méně formální a systematická.

Dle předchozí definice je znalost záležitostí výsostně závislá na pozorovateli (observer-dependent) a takovým je i pojem výpočtu. To je jeden z důležitých rozdílů mezi chápáním výpočtu jako zpracování informací, které na jedné straně činí tento pojem méně závislým na pozorovateli, ale na straně druhé vede k příliš obecnému chápání tohoto pojmu, jak bylo vysvětleno výše.

Pojem „závislosti na pozorovateli“ zavedl americký filozof John Searle [17] a od té doby se stal velmi diskutovaným pojmem. Fyzikální pohled na výpočty se kloní k tomu, že výpočty jsou nezávislé na pozorovateli, protože jsou to vlastnosti fyzikálních procesů, které jsou ze své podstaty nezávislé a (pravděpodobně) všudypřítomné. Pohled na výpočty jako na procesy generující znalost ovšem podporuje opačné stanovisko, které, jak dále uvidíme, má také své opodstatnění.

Předností naší definice výpočtu, totiž že je to jakýkoliv proces generující znalosti, je více. Zaprvé, umožňuje zřetelně oddělit objekty, které počítají (tj. generují znalost) od těch ostatních. Například podle naší definice můžeme kamenu přiřadit schopnost počítat (viz např. [6]) pouze tehdy, bude-li dokazatelně generovat znalost. Zadruhé, nová definice dovoluje klasifikaci výpočtů z hlediska kvality a kvantity znalostí, které produkují. Zatřetí, nezávislost definice na výpočetním mechanismu je vítána, protože pokrývá řadu známých i ještě neznámých výskytů výpočtů. Začtvrté, definice pod-

poruje myšlení o výpočtech na vysoké abstraktní úrovni, která je důležitá při návrhu umělých systémů a pro pochopení činnosti jiných přirozených systémů, které vznikly evolucí. Zapáté, definice řeší některé problémy, které se vztahovaly ke „klasické“ definici výpočtu. Např. v kognitivní vědě se široce diskutuje otázka, co je kognice, když ne výpočet [20]. Pokud vidíme kognici jako schopnost získávat, shromažďovat a využívat znalosti, pak tato definice kognice odpovídá naší definici výpočtu v jeho nejrozvinutější podobě. Konečně, naše definice má velký metodologický a filozofický význam, protože soustřeďuje pozornost na smysl výpočtů, kterým je vytváření znalostí, a tím staví výpočty do centrální pozice nástroje, který je v pozadí veškerého pokroku.

Argumenty, dokumentující a podporující naše chápání výpočtu na příkladech dosavadního vývoje výpočetních technologií, uvedeme ve druhé části tohoto článku. Ve třetí části se zaměříme na vnitřní strukturu výpočtů z hlediska generování znalostí. Čtvrtá část se zabývá problematikou generování nových znalostí. Závěrečná pátá část je shrnutím nejdůležitějších přínosů nového chápání počítání. Článek vznikl na základě původního článku [21] a jeho doplněním dalším materiálem. Jeho předběžná verze byla přednesena na konferenci Kognícia a umělý život XIII [23] ve formě zvané přednášky.

2. Výpočet jako generování znalostí

Cílem této části je podat argumenty podporující následující tezi.

Teze: Výpočet je proces generování znalosti.

Tabulka na další straně uvádí přehled různých výpočetních systémů. U každého z nich definuje odpovídající znalostní doménu a typ vytvářené znalosti.

V této tabulce je důležité si všimnout několika věcí. Předně, první část tabulky je uspořádána víceméně chronologicky podle pořadí, ve kterém se jednotlivé systémy objevily, resp. byly uvažovány v teorii. Z této části tabulky je dále zřetelný nárůst požadavků na generování znalostí: čím dále v tabulce, tím více znalostí výpočty generují, tím obecnější a méně formální jsou znalostní domény, zachycují stále větší výseky reálného světa, zvyšuje se jejich interaktivita a tím více se vkrádá do komunikace se systémy přirozený jazyk. Z tohoto hlediska jsou klasické systémy uvažované v teorii vypočítatelnosti velmi primitivními a v podstatě degenerovanými systémy pro generování znalostí. Trend ke zvyšování kvality a kvantity produkovaných znalostí je nicméně velmi zřetelný.

Druhá část tabulky zachycuje tzv. *přirozené výpočetní systémy*. To jsou systémy, které nejsou navrhovány lidmi. Vzhledem ke svému schopnostem se přirozeně řadí mezi systémy produkující znalosti, což by podle „klasických“ definic výpočtu nebylo možné, protože neznáme odpovídající výpočetní mechanismy.

V poslední části je naše definice natahována na skřípec. Původně se jednalo o pokus falzifikovat tezi pomocí případů, které jsou obecně pokládány za výpočty, byť poněkud exotické. Jak patrně, teze přežila i tento atak. Tyto případy současně ukazují, proč není dobrý nápad primárně požadovat od výpočtů, aby byly fyzikálně realizovatelné. To je v dobrém souladu s praxí – v geometrii, matematice a teorii vypočítatelnosti jsou tyto procesy bez problému považovány za výpočetní procesy.

Současné výpočetní systémy		
Výpočetní systém	Odpovídající znalostní doména	Typ vytvářené znalosti
Akceptory Rozeznávače	Formální jazyky Formální jazyky	Příslušnost k jazyku Příslušnost/nepříslušnost k jazyku
Translátory Vědecko-technické výpočty	Funkce, relace Matematika	Funkční hodnota Řešení výpočetních úloh
Dokazovače vět Operační systémy	Logika Počítačové komponenty a periferie	Důkazy Správa počítačových aktivit
Databázové a informační systémy	Relace nad strukturovanými konečnými doménami	Odpovědi na formalizované dotazy
Řídicí systémy Vyhledávače	Vybrané oblasti lidské činnosti Relace nad nestrukturovanými potenciálně neohrazenými doménami	Monitorování a řízení Odpovědi na dotazy v přirozeném jazyce
Umělé znalostní systémy	Reálný svět, věda	Hypotézy, nové znalosti, vysvětlení
Přirozené výpočetní systémy		
Organizmy, buňky Mozek, mysl, sociální sítě Vesmír	Životní prostředí Poznaný svět Vesmír, vědy, život, ...	Život, chování, inteligence Znalosti o světě Život
Neturingovské výpočty		
Kružítka a pravítka BSS počítač [5] Orákula Superturingovské výpočty	Euklidovská geometrie Teorie reálných čísel Podmnožina A množiny přirozených čísel Formální jazyky třídy Σ_2	Euklidovské konstrukce Hodnoty reálných funkcí Charakteristická funkce množiny A Příslušnost k jazyku

3. Struktura znalostí

Je jisté, že pokud se soustředíme na to, CO dělají výpočty, místo toho, JAK to dělají, ztratíme možnost zkoumat jemnější detaily tohoto procesu např. tak, jak se to děje v teorii vypočitatelnosti anebo v teorii výpočetní složitosti. Na druhé straně, náš přístup umožní pohled na jiné, doposud přehlížené aspekty výpočtů. Nový přístup totiž umožňuje vhléd do struktury znalostí, které využívají výpočty pro generování nových znalostí. Pro dosažení svých cílů využívá výpočet znalost odpovídající znalostní domény. V dalším budeme předpokládat, že odpovídající znalostní doména je dána ve formě teorie.

V tomto kontextu teorii nebudeme chápat pouze v jejím úzkém smyslu tak, jak je používána zejména v matematice anebo v logice, nýbrž ji budeme chápat jako analytický nástroj pro porozumění, vysvětlení a zodpovězení dotazů, poskytování řešení a predikcí v různých oblastech života, anebo pro generování resp. řízení chování. Teorie má obvykle podobu faktů, tvrzení a principů pro odvozování dalších tvrzení, ale může vypadat i jinak – např. jako sémantická síť, soubor omezení a podmínek platných pro daný výpočet atd. V rámci takové teorie výpočet produkuje znalost ve formě odpovídající uvažované znalostní doméně. Takové znalosti udržované ve formě znalostní báze mohou být součástí uvažované teorie. Teorie dokonce může vycházet z neověřených faktů, a tudíž může být nepravdivá anebo mylná. Příkladem takových teorií jsou různé mýty, produkující „znalost“ ve formě vysvětlení rozličných jevů (např. počasí) pomocí zásahů nadpřirozených bytostí.

Tabulka na následující straně udává přibližný a orientační pohled na strukturu znalostí v různých znalostních doménách. Příklady pokrývají znalostní domény od formálních teorií až po neformální (resp. těžce formalizovatelné) teorie zachycující chování v běžném životě.

Z tabulky je vidět různá úroveň formálnosti, úplnosti a pravdivosti odpovídajících teorií. Pro složitější případy je charakteristická heterogenní znalost. V těchto případech je důležitým prostředníkem mezi teoriemi přirozený jazyk. Pro přirozený jazyk je důležitá nejen jeho syntaxe, ale zejména jeho sémantika, která „přiřazuje“ význam jednotlivým slovům a větám jazyka. Sémantika je opět znalost a jako taková může být také reprezentována teorií. Z tohoto hlediska nabývá každý výpočet, i ten, který generuje znalosti na základě porozumění přirozenému jazyku, homogenní strukturu. Znalosti takového výpočtu mají podobu systému spolupracujících teorií. Tento systém je neuvěřitelně složitý, protože v zásadě pro každé slovo jazyka musí obsahovat teorii správného použití tohoto slova. Taková teorie obecně závisí nejen na slově samotném, ale i na kontextu, ve kterém je slovo použito. V případě vtělených kognitivních systémů kontext neznamená pouze gramatický kontext, ale obecně celkovou percepční situaci. To vše vede ke značné provázanosti příslušných teorií. Obecně lze říci, že o takových teoriích a jejich spolupráci víme velice málo. Zde je však vidět přínos pohledu na výpočty jako na procesy generující znalosti – jakkoliv hluboký a detailní (klasický) pohled na mechanismy realizující výpočty nemůže nijak přispět k osvětlení sémantiky výpočtů.

Právě prezentovaný vhléd do struktury znalostí má ještě jeden principiální význam. Ilustruje, že *výpočty generují novou znalost ze znalosti*, která je v pozadí každého výpočtu. S jistou nadsázkou lze říci, že *výpočet je znalost v akci*.

	Logika a matematika	Přírodní vědy a filozofie	Mysl a humanoidní kognitivní systémy
Oblast zájmu	Abstraktní entity	Empirická data, ideje	Percepce, kognice
Základní prvky znalostí	Axiomy, definice	Pozorování, fakta	Stimuly, multi-modální koncepty, domněnky (beliefs), epizodická paměť
Odvozovací pravidla	Deduktivní systém	Racionální myšlení, logika	Pravidla a asociace formované procesem statistického učení
Finální forma znalostí	Výroky, teorémy, důkazy	Tvrzení, teorémy, hypotézy, vysvětlení, vědecké zákony, predikce	Konceptualizace, chování, komunikace, přirozený jazyk, myšlení, znalost světa formulovaná převážně v přirozeném jazyce a ve formě teorií

4. Struktura výpočtů

Ve shodě s naší tezí, že výpočet je generování znalostí, můžeme předpokládat, že za každým výpočtem existuje, alespoň v principu, teorie (v širokém smyslu diskutovaném v předchozí části), která v praxi nemusí být explicitně či do detailu známá. V rámci této teorie příslušný výpočetní proces generuje pro daný vstup znalost, vyjádřenou opět prostředky této teorie (viz předchozí tabulku). Samozřejmě, aby to platilo, musí existovat důkaz, vysvětlení, že výpočetní proces funguje tak, že v rámci dané teorie pro daný vstup skutečně bude generovat požadovanou znalost.

Nechť C je výpočet, jenž v rámci teorie T generuje pro daný vstup I znalost K prostřednictvím výpočetního procesu P_M , který pro vstup I realizuje výpočetní mechanismus M , a nechť E je důkaz či vysvětlení, že tomu tak skutečně je. Výpočet je pak jednoznačně určen předchozí pěticí $C = (T, I, K, P_M, E)$.

Vysvětlení E , že proces P_M generuje K v rámci teorie T pro daný vstup I závisí na vlastnostech procesu P_M (a tedy zprostředkovaně na M). Ze zkušenosti s klasickými výpočty víme, že stejný problém lze řešit na stejném typu počítače různými způsoby, a také jej lze řešit na různých typech počítačů (deterministicky, nedeterministicky, sekvencně, paralelně atd.), a to platí i obecně, nejen pro klasické výpočty. Takže E závisí na P_M a I , ale také, samozřejmě, na T a K . Nicméně, P_M nemá přístup k T ani K , takže pokud P_M potřebuje znát teorii T anebo její část, musí příslušný poznatek obsahovat ve svých datech. To znamená, že pro K vlastně existují v obecnosti dva různé důkazy. Jeden důkaz je veden prostředky teorie T , a druhý důkaz E musí také brát zřetel na vlastnosti procesu P_M . Vysvětlení či důkaz E činí pojem výpočtu závislým

na pozorovateli, protože je to on – pozorovatel, komu je vysvětlení určeno anebo kdo je formuluje. Důkaz, že K je dokazatelné z I v rámci teorie T , může být mechanizován, avšak vysvětlení E nikoliv, protože principy fungování mechanismu M v obecném případě nejsou součástí teorie T .

Všimněme si, že výpočet v našem pojetí je definován pouze pro (jeden) daný vstup a vlastně představuje „jeden běh“ zařízení M na tomto vstupu. Takže předchozí důkazy jsou důkazy právě pro jeden vstup. Důkaz korektnosti výpočtu pro daný vstup není totéž jako důkaz korektnosti algoritmu, který platí pro všechny přípustné vstupy.

Již v současné praxi programování je situace taková, že tvůrce programu by si měl být vědom, alespoň v principu, teorie T a požadovaného výsledku K a má k dispozici výpočetní model M , v rámci kterého navrhne výpočetní proces P_M tak, aby generoval požadovanou znalost K . Důkaz, že tomu tak je, by také měl být schopen dodat, protože jinak si nemůže být jistý, že proces P_M skutečně dělá to, co se po něm chce.

U programů specializovaných na generování znalostí může být situace taková, že výpočetní proces P využívá přímo a pouze prostředky teorie T . To je například možné, pokud teorie T je tzv. λ -kalkul a výpočetní proces používá pouze odvozovací pravidla tohoto kalkulu.

Poslední věc, kterou je dobré si uvědomit, je skutečnost, že „klasické“ definice výpočtu zmiňované v úvodu tohoto článku, zhruba odpovídají v naší notaci zápisu $C = (P_M)$, tj. jakémukoliv procesu generovanému zařízením M .

Vyjadřovací a vysvětlovací síla teorie, která je v pozadí každého výpočtu, podmiňují schopnost příslušného výpočtu generovat novou znalost. Jak je však možné, aby výpočet generoval znalosti, které by již nebyly nějakým způsobem obsaženy ve znalostech (rozuměj: ve znalostní bázi) resp. datech, které má výpočet k dispozici?

Odpověď je tato: na základě dotazu či příkazu generovaného interně výpočtem anebo dodaného externě uživatelem může výpočet odhalit nové vztahy mezi poznatky, které má k dispozici ve znalostní bázi, anebo najít takové poznatky, které splňují požadovaný vztah. Pojmem „odhalit“ anebo „objevit“ myslíme doslova učinit něco poprvé zjevným, tj. poskytnout informaci o něčem, co až do té doby nebylo známé.

Pokud tedy mluvíme o tvořivosti ve smyslu generování znalostí, musíme mít pořad na mysli, že znalost může být generována pouze ze znalostí. Tudíž musí existovat dva protichůdné procesy: proces získávání znalostí a proces generování znalostí.

Existuje mnoho způsobů, jak získat znalost: pomocí usuzování a logiky, vědeckou metodou, metodou pokusu a omylu, pomocí algoritmu, zkušenosti, intuicí, od autority, čtením, poslechem, konverzací, pozorováním atd. Účelem *získávání znalostí* není pouze naplnit systém znalostmi, ale především je uspořádat, vpravit – opět pomocí výpočtu – do existujících teorií, které se vztahují k dané znalostní doméně. To znamená, že proces získávání znalostí je současně procesem budování, doplňování anebo aktualizace stávajících teorií. V jistém smyslu je tento proces i procesem generování znalostí uvnitř výpočtu.

Účelem procesu *generování znalostí* – tj. výpočtu – je produkovat znalost v odpovědi na interní anebo externí podněty. Budeme rozlišovat dvě základní metody tvorby znalostí: syntaktické a sémantické dolování znalostí. Obě metody používají specifické inferenční mechanismy, jejichž účelem je objevit skryté souvislosti v datech.

Syntaktické dolování znalostí bere v potaz pouze syntaxi odpovídajících dat a nikoliv jejich význam (sémantiku), a také inferenční mechanismus základní teorie. Tento

proces hledá skryté vzory zejména v rozsáhlých datech kombinací metod umělé inteligence, strojového učení, statistiky a databázových systémů.

Sémantické dolování dat je hlavním nástrojem kreativity. Také hledá skryté souvislosti v datech, avšak nikoliv syntaktické, nýbrž sémantické souvislosti. Obvykle se vychází ze sémantiky základního vzoru a hledá se jiný vzor, často v jiné sémantické oblasti, který má podobnou sémantickou strukturu jako původní vzor a navíc splňuje další sémantická omezení zadaná v dotaze.

Úkol sémantického dolování je často zadán v přirozeném jazyce. To znamená, že hledané prvky a vztahy, které mají splňovat, jsou popsány v lingvistických termínech. To neobvykle komplikuje úlohu, protože význam lingvistických termínů musí být známý. Výpočet musí „rozumět“ přirozenému jazyku. Jak jsme zmínili v předchozí části, význam každého prvku přirozeného jazyka je popsán odpovídající teorií. To znamená, že sémantické dolování vlastně vyžaduje odhalení podobností mezi různými teoriemi.

Nalezení v jistém smyslu „paralelní“ teorie k dané teorii v jiné oblasti znalostí zásadně přispívá k lepšímu pochopení každé ze zúčastněných teorií. Navíc umožňuje očekávat, že vztahy, které platí v jedné teorii, budou platit i mezi odpovídajícími prvky teorie druhé. To jsou důležité předpoklady pro vhled do daných teorií a jejich vysvětlení a pochopení.

Bohužel, v současné době víme velmi málo o obecných mechanismech odhalování sémantických znalostí. Skoro nic nevíme o odhalování sémantické nekonzistence mezi různými teoriemi, týkajícími se stejné znalostní domény. Odstranění takových nekonzistencí může vést k průlomovým poznatkům [9].

Jednou ze základních metod sémantického dolování, která má za sebou tisíciletou historii (aniž by to bylo považováno za metodu sémantického dolování), jsou *analogie a metafory*.

Jako příklad uveďme následující úkol, jehož cílem je nalezení analogie. Hledáme pojem, který má k pojmu *město* podobný vztah, jako má pojem *řeka* k pojmu *krajina*. Pokud takový pojem najdete (není to *kanalizace* – existuje řešení, které splňuje analogii v důležitějších aspektech, než je odvod vody) a dovedete ho logicky zdůvodnit, tak máte výbornou ilustraci toho, jak „v sobě“ můžete nalézt znalost, o které jste nevěděli, a také o složitosti tohoto procesu.

Problematika sémantického dolování znalostí však již přesahuje záměr tohoto článku. Zájemce odkazujeme např. na práce [15], [19] a [22] a mnoho dalších z oboru dolování znalostí.

Tato část opět ukázala význam chápání výpočtů jako procesů generujících znalosti: přirozeným způsobem upřelo naši pozornost na problematiku kreativity, protože znalosti nelze generovat jinak než kreativně. Vidění výpočtů jako zpracování informace takový potenciál nemá, protože se nezajímá o smysl výpočtů.

5. Závěr

V článku jsme představili nový, alternativní pohled na výpočty, který odhlíží od jejich realizace a naopak se soustřeďuje na to, co je úkolem výpočtů: generování znalostí. Tím jsme získali i odpovědi na otázky z nadpisu této práce: počítáme proto, abychom získali znalost. Znalost je tedy to, co počítáme. Tento pohled na výpočet vychází

z dosavadních trendů v oblasti informačních technologií a má mnohem větší motivační a vysvětlovací potenciál než tradiční chápání výpočtu jako procesu transformace informace. Epistemologický přístup k výpočtům staví do centra pozornosti jejich smysl – *proč vlastně počítáme*. Umožňuje soustředit se na problematiku generování znalostí, která bude ve stále větší míře dominovat nasazení informačních (a robotických) technologií. Výpočet se tak stává univerzálním nástrojem pro rozvoj vědění.

Problematika, uvažovaná v tomto článku, byla dále rozpracována v připravované publikaci [24]. Zde je naše definice výpočtu aplikována na pojem pozorovatele výpočtu. Pozorovatel výpočtu je také modelován jako výpočet, který tudíž musí splňovat stejné požadavky jako pozorovaný výpočet. Tento pohled vede na zajímavé nové poznatky, zdůrazňující ještě více užitečnost chápání výpočtů (a tudíž i znalostí) jako pojmů závislých na pozorovateli. Jako celek naznačuje náš přístup, že klasický pohled na výpočty jako na procesy vlastní fyzice začíná narážet na své limity, dané jeho přílišnou obecností. Zdá se, že přichází doba, kdy je užitečné hledět na výpočty jako na procesy závislé na pozorovateli. Je tomu tak zejména proto, že stále častěji, stále urgentnější a stále ve větší míře jsme konfrontováni s problémy, pro které je tento pohled přirozený a přímo nutný. Zde máme na mysli problémy spadající pod název „všobecná umělá inteligence“ (AGI – Artificial General Intelligence), pro které je charakteristická neformální struktura znalostí s těžce formalizovatelnou teorií. Jak tyto znalosti, tak i tato teorie velmi silně závisí na pozorovateli. Tento nový pohled na výpočty lze vnímat jako nové výpočetní paradigma, které doplňuje klasický pohled na výpočty. Toto paradigma se pro kognitivní výpočty ukazuje stejně užitečným, jako bylo klasické paradigma pro teorii vyčíslitelnosti a teorii složitosti.

Poděkování. Tato publikace byla podpořena projekty RVO 67985807 a GA ČR P202/10/1333.

L i t e r a t u r a

- [1] ABRAMSKY, S.: *Two puzzles about computation*. In: S. Barry Cooper, J. van Leeuwen (eds), Alan Turing: His Work and Impact, Elsevier, 2013, 53–56.
- [2] AHO, A. V.: *Computation and computational thinking*. Magazine Ubiquity, volume 2011, issue January, article no. 1.
- [3] ALMOND, P.: *Machines like us, an interview by Paul Almond with John Searle*. Machines Like Us, March 2009. Dostupné z: <http://machineslikeus.com/interviews/machines-us-interviews-john-searle-0>
- [4] BAJCSY, R.: *Computation and information*. Comput. J. 55 (7) (2012), 825.
- [5] BLUM, L., SHUB, M., SMALE, S.: *On a theory of computation and complexity over the real numbers: NP-completeness, recursive functions and universal machines*. Bull. Amer. Math. Soc. 21 (1) (1989).
- [6] CHALMERS, D. J.: *Does a rock implement every finite-state-automaton?* Synthese 8 (3) (1996), 309–333.
- [7] CONERY, J. S.: *Computation is symbol manipulation*. Comput. J. 55 (7) (2012), 814–816.
- [8] DENNING, P. J.: *What is computation?* (opening statement). Magazine Ubiquity, volume 2010, issue October, article no. 1.

- [9] DEUTSCH, D.: *Creative blocks*. AEON Magazine 02, October 2012.
- [10] DEUTSCH, D.: *What is computation? (How) does nature compute?* In: H. Zenil (ed.), *A Computable Universe: Understanding and Exploring Nature as Computation*, World Scientific Publishing Company, 2012, 551–566.
- [11] FORTNOW, L.: *The enduring legacy of the Turing machine*. *Comput. J.* 55 (7) (2012), 830–831.
- [12] FRAILEY, D. J.: *Computation is process*. Magazine Ubiquity, volume 2010, issue November, article no. 5.
- [13] FREDKIN, E.: *What is computation? (How) does nature compute?* (Transcription of a live panel discussion with participants C. S. Calude, G. J. Chaitin, E. Fredkin, T. J. Leggett, R. de Ruyter, T. Toffoli, S. Wolfram). In: H. Zenil (ed.), *A Computable Universe: Understanding and Exploring Nature as Computation*, World Scientific Publishing Company, 2012, 673–726.
- [14] ROSENBLUM, P. S.: *Computing and computation*. *Comput. J.* 55 (7) (2012), 820–824.
- [15] LAKOFF, G., JOHNSON, M.: *Metaphors we live by*. The University of Chicago Press, Chicago, 1980.
- [16] SEARLE, J.: *Is the brain a digital computer?* *Proceedings and Addresses of the American Philosophical Association* 64 (1990), 21–37.
- [17] SEARLE, J.: *The rediscovery of the mind*. MIT Press, Cambridge, 1992.
- [18] TURING, A. M.: *On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem*. *Proc. London Math. Soc. Series 2* 42 (1936), 230–265.
- [19] TURNEY, P. D.: *Similarity of semantic relations*. *Comput. Linguist.* 32 (3) (2006), 379–416.
- [20] VAN GELDER, T.: *What might cognition be, if not computation?* *J. Philos.* 92 (7) (1995), 345–381.
- [21] WIEDERMANN, J., VAN LEEUWEN, J.: *Rethinking computation*. Proc. 6th AISB Symposium on Computing and Philosophy, The Scandal of Computing: What Is Computation? The University of Exeter, April 2013.
- [22] WIEDERMANN, J.: *The creativity mechanisms in embodied agents: an explanatory model*. In: Proc. 2013 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI 2013), April 2013.
- [23] WIEDERMANN, J.: *Brána vědění otevřena: nový pohled na výpočty*. Sborník konference Kognícia a umelý život XIII, Stará Lesná, 27.–30. 5. 2013, J. Kelemen, J. Rybár, I. Farkaš, M. Takáč (eds.), SUO FPF, Ústav informatiky AV ČR, 2013, 285–292.
- [24] WIEDERMANN, J., VAN LEEUWEN J.: *Computation as knowledge generation, with application to the observer-relativity problem*. Proc. 7th AISB Symposium on Computing and Philosophy: Is Computation Observer-Relative? Goldsmith, University of London, Exeter, April 2014.