Filozofická fakulta Univerzity Palackého v Olomouci

Katedra obecné lingvistiky

Von Neumannova sonda jako spodní hranice sémiotického systému

bakalářská diplomová práce

Autor: Barbora Jurková

Vedoucí práce: Mgr. Lukáš Zámečník Hadwiger, Ph.D.

Olomouc

2020

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou/magisterskou diplomovou práci „Von Neumannova sonda jako spodní hranice sémiotického systému“ vypracoval/a samostatně a uvedl/a jsem veškerou použitou literaturu a veškeré použité zdroje.

V Olomouci dne 17. 8. 2020 Podpis

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala svému vedoucímu práce Mgr. Lukášovi Zámečníkovi, Ph.D. za veškerou pomoc, odborné vedení a rady, které mi pomohly práci dokončit.

Abstrakt

Název práce: Von Neumannova sonda jako spodní hranice sémiotického systému

Autor práce: Barbora Jurková

Vedoucí práce: Mgr. Lukáš Zámečník Hadwiger, Ph.D.

Počet stran a znaků: 47, 83 812

Počet příloh: 1

Abstrakt: Tato bakalářská práce má za cíl představit von Neumannovu sondu jako koncept sémiotického systému, který je schopen za přesně stanovených podmínek provádět sebereplikaci.

Tato práce je rozdělena do čtyř částí. V té první je představen historický kontext přelomu 19. a 20. století, který je důležitý pro pochopení některých trendů, které v tehdejší době byly v oblasti vědeckého života. Je zde zakomponovaná i část věnující se teorému Kurta Gödela o neúplnosti formálního systému jako je Principia Mathematica. Druhá část je věnována práci Alana Turinga a zejména Turingovu univerzálnímu stroji. Definice těchto dvou konceptů je důležitá pro pochopení problematiky autoreference a jejího rozdílného řešení.

Ve třetí části je představena von Neumannova sonda a zejména problematika sebereplikace. V poslední části jsou tyto jednotlivé koncepty postaveny vedle sebe ve snaze zodpovědět otázku, zda je možné brát von Neumannovu sondu jako spodní hranici sémiotického systému.

Klíčová slova:

Von Neumannova sonda, Gödelův důkaz, Turingův stroj, sémantika

Abstract

Title: Von Neumann Probe as a bottom line of semiotics system

Author: Barbora Jurková

Supervisor: Mgr. Lukáš Zámečník Hadwiger, Ph.D.

Number of pages and characters: 47, 83 812

Number of appendices: 1

Abstract: The aim of this bachelor thesis is to introduce von Neumann Probe as a concept of semiotics system. If the right conditions are met, this system is capable of self-reproducing itself. The thesis is divided into four parts. Through the first part the historical context is given, mainly to understand some of the trends of science in late 19th and early 20th century. This part is also dedicated to Kurt Gödel's Incompleteness theorem which is focused on formal systems similar to the one introduced in Principia Mathematica. In the second part, the work of Alan Turing is analysed and is mostly focused on Turing's Universal Machine. The definitions of these two concepts are important for understanding of the problems of self-reference and its different solutions.

The von Neumann probe itself and the problems of self-reproducing are introduced in the third part of the thesis. In the last part the three different theories are compared in a effort to answer the main problem. If von Neumann Probe can be taken as a bottom line of semiotics system.

Keywords:

Von Neumann Probe, Gödel's proof, Turing Machines, semantics

Obsah

Úvod

Tato práce se snaží najít odpověď na otázku, zda lze brát von Neumannovu sondu jako spodní hranici sémiotického systému. Tuto teorii reprezentoval John von Neumann v padesátých letech minulého století na některých svých přednáškách a zejména v knize *Theory of Self Reproducing Automata.*

Nejprve budou představena stěžejní díla matematiků Kurta Gödela a Alana Turinga, která úzce souvisejí s von Neumannovou koncepcí sebereplikace. Na základě průzkumu těchto jednotlivých matematicko-logických teorií budou předkládány jednotlivé argumenty, které se snaží hypotézu zařazení von Neumannovy sondy jako spodní hranice sémiotického systému z větší části potvrdit.

V případě Kurta Gödela a jeho důkazu se jedná pouze o aplikaci teorému o neúplnosti na danou problematiku a zejména tedy na znakový záznam samotné sebereplikace. Turingův stroj zde slouží jako myšlenkový experiment, s jehož pomocí lze rozhodnout, zda daný string těchto znaků je možné akceptovat či nikoliv. Největší problémem v tomto okamžiku je sebereference, ke které může docházet a kterou je možnost vyřešit aplikováním obou teorií. V okamžiku, kdy je ale string vložen ke zpracování von Neumannově sondě, na stringu je již znakový záznam k samotné sebereplikaci a ta tak tedy problém sebereference řešit nemusí.

Otázka toho, zda je možné takovýto systém považovat za spodní hranici sémiotického systému, ale závisí spíše na tom, jak je taková hranice definována. Klasičtí lingvisté, kteří se sémiotice věnují, spatřují problém zejména ve schopnosti jakéhokoliv mechanického stroje správně interpretovat právě daný znakový systém. Naopak přírodovědci, fyzikové a biologové, jichž se otázka života týká ze nejvíce, zastávají opačný postoj. Von Neumannova sonda pro ně představuje možnost, jak lze pracovat s uměle vytvořeným znakovým zápisem, který do jisté míry připomíná zápis genetického kódu.

V této práci je zastáván názor, že za jistých a přesně vymezených okolností lze von Neumannovu sondu považovat právě za spodní hranici sémiotického systému.

1 Historický kontext

I když problematika, které se bude tato práce věnovat, je záležitost až poněkud pozdější doby, některé její základní body byly vytyčeny už na přelomu 19. a 20. století. V tomto období, nejčastěji historiky označovaném jako *Fin de siècle*, tedy konec století, dochází v rámci lidského společenství k naprosto pozoruhodným změnám. Pozorovány jsou sice v oblastech, které se více dotýkají společenského života či celkové proměny společnosti, jako například umění, ale dochází tu k začleňování také nových technologií do každodenního způsobu života.

S tím, jak dochází k tomuto fenoménu, se ale také vytváří poměrně specifický problém. Posun ve vědeckých a technických oblastech byl velice rozsáhlý, vědci přicházeli se stále novými a novými objevy a také dospěli k přesvědčení, že všechna tajemství a zákonitosti přírody už byla odkryta a nyní může docházet jenom k jejich postupnému zdokonalování. Nicméně věda právě v tomto období prochází poněkud složitější krizí, která je asi nejlépe zjevná na příkladu fyziky. Díky vědcům jako Max Planck a Albert Einstein jsou najednou zpochybněny zákony klasické newtonovské fyziky, což má i dnes poněkud rozsáhlejší dosah, než by se v té době očekávalo.[1]

V tomto bodě nastává obrat celkově ve všech přírodních vědách, ale zejména ve fyzice. Věda, která popisovala svět za pomocí pevně daných zákonitostí a údajně již naplnila své možnosti, je znovu součástí hlavního dění. Díky novým objevům v oblasti kvantové mechaniky se pro svět vytyčují nové hranice. Což je něco, co neotřáslo jenom vědou, ale i lidskou vírou. Navíc zde dochází k poměrně zajímavému bodu. Albert Einstein je jeden z prvních, kdo pokládá otázku, zda popis světa právě za pomoci kvantové mechaniky lze považovat za úplný.[2]

Od tohoto momentu lze sledovat jistý trend, který se táhne napříč vícero vědeckými oblastmi. Jedná se o snahu najít teorii, pod kterou by se sjednotilo veškeré lidské poznání. Fyzika v tomto ohledu může znovu posloužit jako příklad, protože jsou u ní tyto cíle v poslední době popularizovány a za pomocí odborníků, jako Richard Feynman, Stephen

[1] KŘIVSKÝ, Petr – SKŘIVAN, Aleš: *Století odchází: světla a stíny „belle époque“*. 2. upr. vyd. Praha 2004. s. 14-42.
[2] BROOK, John Hedley: *Science and religion: some historical perspectives.* Cambridge 2014. Cambridge history of science. s. 438-474.

Hawking, Michio Kaku či Walter Lewin, přibližovány i širší veřejnosti. Nevyhnuly se však ani ostatním vědeckým oblastem, jako je například metamatematika.

V matematice lze tyto snahy sledovat už trochu déle, právě však v tomto období dochází k velice zajímavé události. V prvním desetiletí minulého století je postupně vydáváno třísvazkové dílo matematiků Bertranda Russella a Alfreda N. Whiteheada *Principia Mathematica*, konkrétně mezi lety 1910 a 1913, jak je uvedeno na přebalu druhého vydání, které je stále vydáváno.[3] Na svoji, ale vlastně i tuto dobu, se jedná o velice pozoruhodné dílo. Logice se do té doby samozřejmě věnovali i jiní filozofové a matematici, ale v rámci *Principií* se autoři pokusili z tohoto odvětví matematiky odstranit nejrůznější paradoxy.[4]

První vydání jsou zmíněna výše, ale v současné době se nejčastěji odkazuje na vydání druhé, které bylo revidováno v roce 1927 a nově obsahovalo i předmluvu. Cílem obou autorů bylo v rámci *Principií* odvodit za pomocí logiky celou matematiku, kdy největší důraz byl kladen na bezespornost celého systému. Sice se jednalo o obdivuhodný počin, ale na místě byly i jisté pochybnosti, kdy ne každý byl s řešeními obsaženými v *Principiích* úplně spokojen.[5] Hlavně pak s tvrzením, že problém bezespornosti je možné redukovat na problém formální logiky, potažmo na otázku bezespornosti základních axiomů logiky.[6]

V tomto okamžiku se do popředí dostává německý matematik a metamatematik David Hilbert, který stojí za myšlenkou Hilbertova programu. Hilbert byl silně inspirován *Principiemi* a metodami, které v nich byly Russelem a Whiteheadem využity, a před tehdejší vědeckou obec předložil velmi zajímavou výzvu. Dokázat to, že systém, který autoři představili v *Principiích*, je nejen bezesporný, ale i úplný. Bezespornosti daný formální systém dosáhne právě tehdy, když v něm nelze dokázat zároveň formuli X i -X. Úplnost formálního systému pak spočívá v tom, že všechna pravdivá tvrzení jsou dokazatelná.

Důležitost *Principií* a Hilbertova programu z dnešního hlediska spočívá spíše v tom, že se jedná o důležité historické mezníky pro další vývoj matematiky a logiky. Hilbert a skupina matematiků, která s ním spolupracovala, se zaobírala důležitou otázkou své doby, ač snaha uplatnit v rámci řešení finitní metodou za každou cenu se dnes již nepovažuje za ten

---

[3] WHITEHEAD, Alfred North – RUSSELL, Bertrand: *Principia Mathematica.* Volume I. Cambridge University Press. 1963.

[4] HOFSTADTER, Douglas R.: *Gödel, Escher, Bach: existenciální gordická balada: metaforická fuga o mysli a strojích v duchu Lewise Carrolla*. Praha 2012. Zip, sv. 27. s. 43-44.

[5] HOFSTADTER, Douglas R.: *ibidem,* s. 44-45.

[6] NAGEL, Ernest – NEWMAN, James Roy – HOFSTADTER, Douglas R. (ed.): *Gödelův důkaz*. Vyd. 1. brož. BRNO 2006. s. 30-35.

nejlepší způsob. Způsob finitního uvažování, jaké Hilbert zastával, byl posléze poněkud slabším protivníkem Gödelova důkazu.[7]

Principie a Hilbertův program hlavně odrážejí celkovou atmosféru, která panovala nejen ve vědě na počátku XX. století. Jak už je ale zmíněno výše, ne každý byl s podobným řešením spokojen. První otřesy přišly již v roce 1930, kdy probíhala vědecká konference v Königsbergu. Tehdy se svým příspěvkem vystoupil mladý Kurt Gödel, ale i když z počátku nebyly zaznamenány nikterak velké odezvy, znamenalo to obrat v dosavadním směru logiky a ve vědě celkově.

2 Objev Kurta Gödela

Jak bylo zmíněno výše, ne každý byl se závěry a řešením, jež byla předkládána v rámci *Principia Mathematica* či Hilbertova programu spokojen. Jedním z těchto lidí byl i Kurt Gödel.

Když v roce 1924 nastupoval na Vídeňskou univerzitu, jeho původní zaměření se ubíralo směrem k fyzice, nicméně pod vlivem univerzitní a vídeňské atmosféry se uchýlil k matematice a logice. Problematice Hilbertova programu se začal věnovat v roce 1930 a už v září téhož roku vystoupil na vědecké konferenci v Königsbergu. Ve stínu dalších představených objevů a teorií se však Gödelův příspěvek nesetkal s velkým ohlasem. Jediný, kdo mu tehdy věnoval poněkud větší pozornost, byl matematik John von Neumann, který s Gödelem posléze nějaký čas zůstával v kontaktu.[8]

Svůj článek *O formálně nerozhodnutelných větách v Principia Mathematica a příbuzných systémech* dokončil již na podzim, publikován byl však až v roce 1931 v německém vědeckém časopise, *Monatshefte für Mathematik und Physik*. I přesto, že se z dnešního pohledu jedná o bod zlomu pro oblast metamatematiky, v tehdejší době byl přijat se stejně malým ohlasem jako Gödelovo vystoupení na konferenci v předešlém roce.

[7] HOFSTADTER, Douglas R.: *ibidem,* s. 252.
[8] KLEENE, Stephen C.: *Kurt Gödel*. In: *Biographical Memoirs: Volume 56.* National Academy Press. Washigton D.C. 1987. s. 145.

Postupem času se však ukázalo, že jeho práce má daleko rozsáhlejší důsledky, než se původně předpokládalo.[9]

Od okamžiku, kdy se práci Kurta Gödela dostala zasloužená pozornost, se jí věnovalo mnoho vědců, a to zejména matematici, fyzici a filozofové. Gödelovi se podařilo na základě *Principií* a svých vět o neúplnosti vyjádřit, že podobné složité matematické systémy omezují samy sebe v tom, co jsou vlastně schopny dokázat.[10]

K tomu, aby byla možnost se Gödelovou neúplností zabývat, je nutné vrátit se o několik kroků zpátky. Ke Gödelově důkazu zde bude přistupováno stejně, jako tomu je ve stejnojmenné publikaci od Nagela a Newmana. Než tedy dojde na samotné věty o neúplnosti, je nutné se zaměřit na něco, co je ve finále pro další postup v této práci důležitější.

2.1 Gödelovo číslování

Za pojmem „Gödelovo číslování“ se v podstatě schovává klíč k tomu, aby se dala správně pochopit celá konstrukce jeho teorémů. Myšlenka, která je za tím vším skrytá, se možná zpětně může zdát poněkud jednoduchá, ale jedná se o velice propracovaný tah v celé argumentaci. Gödel pracoval s formálním systémem *Principií*. Jak už bylo uvedeno předtím, *Principie* byly snahou, jak obsáhnout veškerou aritmetiku na základě logiky. To, co Gödel ukázal jako první, je fakt, že ke každému elementárnímu znaku je možné připsat unikátní Gödelovo číslo.

Elementární znaky uvedené v základním slovníku lze rozdělit na dva druhy: konstanty a proměnné. Počet konstant zcela závisí na interpretovi, Gödel ve svém originálním článku pracuje se sedmi, Nagel a Newman jich používají celkem dvanáct. Ve své podstatě se jedná o symboly používané ve výrokové logice, které jsou však v tomto případě osvobozeny od významu a jejich interpretace závisí na tom, jak se chovají v rámci formálního systému, jako jsou *Principie*.

Jak bylo zmíněno výše, v základním slovníku se nenachází pouze konstanty, ale i proměnné, které se dále rozlišují na: číselné, výrokové a predikátové. Těmto proměnným se

[9] NAGEL, Ernest – NEWMAN, James Roy – HOFSTADTER, Douglas R. (ed.): *ibidem,* s. 3-6.
[10] BARROW, John D.: *Nové teorie všeho: hledání nejhlubšího vysvětlení*. Praha 2008. Zip, sv. 11. s. 65-74.

posléze přiděluje Gödelovo číslo podle následovného postupu – pro každou číselnou proměnou je přiřazeno prvočíslo větší než 12, k výrokové následně druhé mocniny prvočísla většího než 12 a k predikátovým třetí mocnina prvočísla většího než 12.[11]

V okamžiku, kdy je vytvořen takovýto systém pro převádění, jeho využití je poměrně intuitivní. Gödel za pomocí tohoto návodu jednoduše vyjadřuje výroky o aritmetice samotnou aritmetikou a co víc, Gödelovo číslo lze zase rozložit zpět. V tomto okamžiku lze pracovat s tím, že každý formální výraz v rámci systému *Principií* má své jedinečné Gödelovo číslo.

Tímto trikem dokázal Gödel aritmetizaci metamatematiky za pomoci převodu metamatematických výroků na jedinečné číslo, které lze zrcadlit v tom samém kalkulu. Vzniká situace, kdy lze říci, že v rámci formálního systému nastává možnost ke každému tvrzení přiřadit jedinečné Gödelovo číslo. Taková Gödelova čísla jsou generována v okamžiku, kdy jsou na formální systém aplikována aritmetická pravidla[12] a lze tedy o Gödelových číslech a jejich aritmetické relaci hovořit stejně jako o metamatematických výrazech s jejich typografickou relací. Tudíž lze nepřímo zkoumat metamatematické problémy jako určité vlastnosti a relace celých čísel.[13]

2.2 Gödelův důkaz

Díky tomu, co je popsáno výše lze přistoupit k jádru Gödelova objevu a zpochybnění systémů *Principií* a Hilbertova programu. V předešlé kapitole bylo vysvětleno, co se myslí tím, že je systém bezesporný a úplný. Jak je vidět v předchozí části věnující se „gödelizaci“, Gödel ve své podstatě už podstatnou část vyvrátil.

Existují takové systémy, které jsou jak bezesporné, tak i úplné, jedním takovým může být výroková logika[14]. Nicméně Gödel se v rámci své práce zabýval systémy jako je právě *Principie Mathematica*. Celý důkaz spočívá v tom, že aby byl takový formální systém úplný, nesmí být natolik rozsáhlý, aby zahrnoval veškerou aritmetiku, což tedy znamená, že takový formální systém není schopen obsáhnout veškeré symboly a axiomy, které jsou používány v aritmetice. Úplnost sytému by ale také znamenala, že tedy nesmí být bezesporný, a hlavně

[11] Dodatečné příklady je možné najít v příloze č. 1.
[12] HOFSTADTER, Douglas R.: *ibidem,* s. 286.
[13] NAGEL, Ernest – NEWMAN, James Roy – HOFSTADTER, Douglas R. (ed.): *ibidem,* s. 64.
[14] KVASNIČKA, Vladimír – Jiří POSPÍCHAL: *Matematická logika*. Bratislava 2006. s. 19-34.

vyjádřený finitním způsobem, což se vztahuje k právě obsáhnutí celé aritmetiky. V takovém případě by v rámci tohoto formálního systému docházelo k poměrně rozsáhlým paradoxům, jako právě v *Principiích.* [15]

Gödel tedy pracuje se systémy, kde je důležitá struktura aritmetiky, proto se mu podařilo využít vlastnosti čísel, jako je právě prvočíselnost a fakt, že číslo může být vyjádřeno pouze jediným součinem prvočísel.[16] To je ostatně vidět v Gödelově číslování, které je popisováno v předchozí části a v příloze. Gödel pak právě za pomoci takového číslování mohl narušit strukturu celého systému.

Podle jeho důkazu existuje věta G, která sama o sobě tvrdí, že je nedokazatelná. Tento výrok lze vytvořit v tom případě, že je formální systém aritmetiky konzistentní. Pokud tento systém konzistentní je, tak vyplývá to, že G je pravdivé a tím pádem tedy nedokazatelné. Pokud je tedy nedokazatelné, pak je tudíž i pravdivé. Což je ale něco, co si navzájem odporuje. Možnost, jak se takovému sporu vyhnout, spočívá v popření konzistentnosti aritmetiky nebo tedy systému jako takového.[17]

Jak je psáno v předchozí kapitole, aby byl formální systém bezesporný, nelze v něm zároveň dokázat formuli X a -X. Nyní ale nastala situace, kdy G ↔ -G, což je v rozporu s celým systémem a G je tedy v tomto případě nerozhodnutelné a nutně pro něj neexistuje žádný důkaz. V tom okamžiku je ale G pravdivé, protože samo o sobě tvrdí, že je nedokazatelné. Jedná se tedy o tvrzení, které je v tomto systému pravdivé, ale nedokazatelné a také to, že je systém tedy neúplný. Kdyby totiž úplný byl, tak není bezesporný, protože by obsahoval X a -X.

Na této první Gödelově větě je následně vystavěna i druhá. Jak je napsáno výše, pokud je formální systém bezesporný, není úplný, tedy že existuje alespoň jeden výrok, který je pravdivý, ale v tomto formálním systému nedokazatelný.[18]

Jak je tedy vidět, Gödelovi se podařilo vyvrátit nejen to, na čem byl postaven Hilbertův program, ale podařilo se mu pomocí formálního systému *Principií* poukázat na chyby v *Principiích* jako takových.

---

[15] BARROW, John D.: *ibidem,* s. 68.
[16] BARROW, John D.: *ibidem,* s. 68.
[17] GOLDSTEIN, Rebecca: *Neúplnost: důkaz a paradox Kurta Gödela*. Praha 2005. Velké objevy, svazek 3. s. 138.
[18] NAGEL, Ernest – NEWMAN, James Roy – HOFSTADTER, Douglas R. (ed.): *ibidem,* s. 73-85.

2.3 Dopady Gödelova důkazu

Gödelovi se nepodařilo jen vyvrátit systém, do kterého byly vkládány naděje mnohých matematiků, ale jeho neúplnost pronikla i do sfér ostatních vědních oborů, jako je například moderní informatika či umělá inteligence. Kromě toho je ale Gödel jeden z prvních, kdo se vychýlil od snahy najít jednotící teorii.

Jak už bylo zmiňováno, i přes to, že se jedná o velice důležitý zlomový bod, v rámci vědecké konference v Königsbergu zastíněn jinými příspěvky. Ostatně, jeden z prvních, kdo Gödela a jeho příspěvek bral vážněji, byl americký matematik maďarského původu John von Neumann. Ten posléze s Gödelem určitou dobu vedl korespondenci a nadále téma rozvíjel, ale když došlo na publikování výsledků, ustoupil a v roce 1931 spatřil světlo světa Gödelův důkaz tak, jak se rozebírán v předchozí části.[19]

V tomto okamžiku se dostává do širšího povědomí a mezi vědeckou obcí vyvolal jistou kontroverzi a rozruch. Nejenom mezi matematiky a logiky, ale také filozofy. Jedním z těch, kdo proti Gödelovým závěrům měl námitky byl například Wittgenstein. Gödel sice během svých studijních let navštěvoval známý Vídeňský kruh[20], ale debat se účastnil málokdy, spíše zůstával v pozadí a snažil se věnovat pozornost ostatním přednášejícím. Wittgenstein se pak o Gödelově práci vyjádřil jako o pouťovém triku na poli logiky.[21]

2.4 Dopad na Hilbertův program a Entscheidungsproblem

Gödelův důkaz s sebou přinesl určitý pesimismus, protože až do jeho studie byly skoro veškeré naděje vkládány právě do Hilbertova programu, který se mu svým článkem podařilo

[19] GOLDSTEIN, Rebecca: *ibidem,* s. 125-176.
[20] Vídeňský kruh byl poměrně důležitou součástí vídeňského akademického a společenského života. Dnes je jeho práce brána hlavně jako velice významný mezník dějin filozofie. Samotný kruh poskytl zázemí a odrazový můstek pro mnoho učenců tehdejší doby, jako byl například právě Wittgenstein, který během svého života nesouhlasil nejen se závěry Kurta Gödela, ale i s prací Alana Turinga.
[21] GOLDSTEIN, Rebecca: *ibidem,* s. 163-167.

z podstatné části popřít. Kromě toho vyvolal jeho objev celou řadu otázek týkajících se hlavně lidského myšlení a kam až lidské poznání může zajít.[22]

Přestože Hilbertův program byl díky Gödelově práci skoro kompletně vyvrácen, stále tu zůstávaly určité body, které bylo potřeba vyřešit. Jedná se především o Entscheidungs-problem. Podobně jako předtím Hilbert vyzval matematiky, aby dokázali úplnost a bezespornost formálního systému *Principií*, v případě Entscheidungsproblem se jedná o něco trochu odlišného. Hilbert v rámci této části svého programu pokládá otázku, zda existuje takový stroj či spíše algoritmus, který by byl schopen určit, zda je matematické tvrzení v daném formálním jazyce pravdivé či nikoliv.[23]

Tímto problémem se nezávisle na sobě zabývali Alonzo Church a Alan M. Turing. Oba posléze došli ke stejnému závěru a to, že žádný takový algoritmus neexistuje. Church byl poněkud rychlejší než Turing, ale jeho postup je mnohem složitější. Dnes je řešení Entscheidungsproblem, tedy problému rozhodnutelnosti, známo jako Churchova-Turingova teze.[24]

Pro tuto práci je však mnohem podstatnější koncept, se kterým pracoval Alan Turing. Jeho práce možná začala jako snaha o vyřešení problému rozhodnutelnosti, ale ve finále má daleko rozsáhlejší dopad.

3 Turingův stroj

Turingova profilace během studia je poměrně zajímavá. V době, kdy pracoval na své tezi *On Computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem* byl členem *Cambridgské King's College.* Zde sice začínal jako student matematiky, nicméně poměrně brzy ho uchvátila klasická logika se svými jasnými pravidly.[25]

[22] DEVLIN, Keith J.: *Jazyk matematiky: jak zviditelnit neviditelné*. 2. vyd. v českém jazyce. Praha 2011. Aliter, sv. 7. s. 91.
[23] PETZOLD, Charles. *The annotated Turing: a guided tour through Alan Turing's historic paper on computability and the Turing machine*. Indianapolis 2008. s. IX.
[24] HODGES, Andrew: *Alan Turing: Enigma*. Brno 2018. s. 180-184.
[25] HODGES, Andrew: *ibidem*, s. 117-119.

Hrubý náčrt svého článku dokončil Turing na jaře 1936, publikován byl o rok později v časopise *Proceedings of the London Mathematical Society*.[26] I přes to, že to byla jeho první tištěná studie, dokázal na sebe díky ní upoutat pozornost. Bylo to dáno hlavně faktem, že pár měsíců před ním přišel s řešením Entscheidungsproblem Alonzo Church, jak je již zmiňováno výše, a bylo nutností, aby tento fakt Turing zahrnul i do své práce. Zajímavé ale je, do jaké míry se jejich postup při řešení problému rozhodnutelnosti lišil. Turing oproti Churchovi přišel s řešením, které nebylo tolik složité a poměrně elegantní, což na jednu stranu byl trochu problém, protože díky tomu Turingova práce působila poněkud nedůvěryhodně.

Turing ale v rámci díla *On Computable Numbers* pracuje s konceptem, který je dnes známý jako Turingův stroj. Právě myšlenka stroje je poměrně důležitá. Matematici a logikové na počátku minulého století požívali slovo *počítač*[27] (v anglickém originálu *computer*) jako název pro normální zaměstnání, které bylo vykonáváno osobou. Daný člověk, počítač, prováděl na papíře nejrůznější matematické operace s tužkou v ruce.

V rámci *On Computable Numbers* je toto slovo používáno spíše v kontextu klasickém pro tehdejší dobu, nicméně několikrát se objevuje i ve spojení s myšlenkou *počítače* jako stroje. Nejjasněji je tato myšlenka řečena hned v úvodu, kdy Turing definuje počitatelná čísla jako taková, která podle něho mohou být v desítkové soustavě zaznamenána strojem. [28]

Turing rozhodně není první, kdo přišel s podobným konceptem. S představou jakýchsi strojů, které by do jisté míry mohly odpovídat dnešním počítačům, je spojován už německý filozof 17. a 18. století, Gottfried Willhelm Leibniz. V rámci historie informatiky se také objevují jména jako Charles Babbage a lady Ada Lovelace.[29] Je dosti možné, že Turing byl s prací těchto tří seznámen a mohla ho do jisté míry ovlivnit už v této chvíli, ale s jistotou to lze říci až u jeho následujících studií, které se věnovaly spíše filozofickému aspektu tohoto problému. Je ale důležité říci, že Turing už se k podobné myšlence, kdy lze člověka nahradit strojem, vrací v rámci svého článku pouze jednou. Metaforu mysli a mechanického stroje

[26] LEAVITT, David: *Muž, který věděl příliš mnoho: Alan Turing a první počítač*. Praha 2007. Aliter, sv. 31. s. 50.

[27] Z historického kontextu by se asi lépe hodilo slovo *počtářka*, jelikož se jednalo o povolání, které převážně zastávaly právě ženy.

[28] TURING, Alan: *On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem*. 1937.

[29] DAVIS, Martin: *The Universal Computer. The road from Leibniz to Turing.* New York 2000. s. 178.

začal rozebírat až později ve svém životě, což se nejvíce ukazuje v jeho článku z roku 1950, kdy se tomuto konceptu věnoval dopodrobna.[30]

I přes to, že Turing používá slovo stroj, nejedná se o stroj ve fyzické podobě. Celé řešení problému rozhodnutelnosti a koncepce Turingova stroje je pouze myšlenkový pokus. Lze si však tento stroj do jisté míry představit a skládá se ze tří částí. Jedná se o kontrolní box, čtecí hlavu a pásku. Kontrolní box se v daném momentě nachází pouze v jednom z konečného množství stavů. Čtecí hlava snímá v daný moment pouze jeden čtverec na pásce a dokáže se po pásce pohybovat. Páska, tak, jak ji popisuje Turing, je vlastně pouze pruh papíru, který je rozdělen na jednotlivé čtverce, do kterých je vždy vepsán pouze jeden znak. Páska zde slouží jako jakýsi druh externí a lineární paměti a do obou směrů je nekonečná. Přesný stav pásky, tedy to, jestli jsou jednotlivá pole úplně prázdná nebo jsou již některá zaplněná, se liší podle toho, o kterém Turingově stroji se hovoří.[31]

Rozdíl mezi ostatními automaty a Turingovým strojem spočívá ve velice podstatných drobnostech. Jedná se o automat, který je nejen schopný na pásku zaznamenat data, dokáže je ale i zpětně přečíst. Co se pohybu čtecí hlavice týče, je důležitým faktem, že se nově dokáže pohybovat oběma směry, tudíž jak doprava, tak doleva. Pohyb stroje je posléze řízen finitním souborem pravidel. Tato pravidla se dají shrnout do jednotlivých bodů, kdy $\boldsymbol{q_i}$ a $\boldsymbol{q_k}$ jsou jednotlivé stavy, $\boldsymbol{a_j}$ jsou jednotlivé symboly abecedy a do $\boldsymbol{X}$ jsou zahrnuty buďto symboly abecedy nebo speciální znaky L a R. Turingův stroj lze tak v daném okamžiku popsat právě touto čtveřicí symbolů.

Fungování Turingova stroje je intuitivní už jenom z jeho popisu. Stroj začíná v pozici $\boldsymbol{q_i}$, ve které čtecí hlava skenuje pásku, která jím prochází a která je v počátečním stavu prázdná, a podle toho se dále řídí. Po načtení daného $\boldsymbol{a_j}$ se stroj dostává do dalšího stavu $\boldsymbol{q_k}$, ve kterém je načítáno $\boldsymbol{X}$ a v tomto okamžiku nastávají dvě možnosti. Pokud je $\boldsymbol{X}$ symbolem abecedy, $\boldsymbol{a_j}$ je nahrazeno daným symbolem. V případě, že $\boldsymbol{X}$ je jedním ze speciálních symbolů L nebo P, $\boldsymbol{a_j}$ zůstává a čtecí hlava se přesune na další pole, buď doleva nebo doprava, záleží na daném symbolu.[32]

Takovéto chování stroje v jednom okamžiku Turing označuje jako *konfiguraci.* Tento postup, který je závislý na dané konfiguraci stroje, se opakuje do té doby, dokud pro daný

[30] Jedná se o esej *Computing Machinery and Intelligence*, kterou Alan Tuirng publikoval v roce 1950.
[31] PARTEE, Barbara Hall – MEULEN, Alice ter – WALL, Robert E.: *Mathematical methods in linguistics*. Dordrecht 1990. Studies in linguistics and philosophy, Vol. 30. s. 507-508.
[32] PARTEE, Barbara Hall – MEULEN, Alice ter – WALL, Robert E.: *ibidem, s.* 509.

stroj existuje napsaný program, který je obsažený v tabulce. Tabulka chování stroje je vlastně posloupnost všech *m-konfigurací*, což jsou jednak stavy stroje, ale také právě čtený symbol. Z této tabulky chování lze posléze odvodit algoritmus, který stroj provádí. V okamžiku, kdy se automat dostane do bodu, kde už pro něj v rámci zaznamenaného programu neexistuje žádný další pokyn, se stroj zastaví. Existují ale i případy, kdy Turingův stroj bude provádět výpočty do nekonečna. Jelikož Turing operuje v binární soustavě, tak na pásce je pracováno s čísli 0 a 1 [33]. Kromě toho lze ještě využít speciální znaky, které označují pole na pásce, se kterými se už pracovat vůbec nebude, nebo naopak budou teprve využity. Takovéto speciální znaky jsou „x“, který označuje prázdné políčko a počáteční znak, který v tomto případě bude reprezentován „@“. Tento speciální znak je používán Turingem pro označení začátku pásky u druhého typu stroje, který pracuje s iracionálními čísly.[34]

Jednoduchý Turingův stroj, který bude tisknout vypočitatelnou posloupnost, je představen v následující tabulce tak, jak uvádí sám Turing ve svém originálním článku.

m-konfigurace	Symbol	Operace	nová m-konfigurace
	Žádný	P0	B
B	0	R, R, P1	B
	1	R, R, P0	B

Tabulka č. 1.

Zdroj: TURING, Alan: *On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem*. 1937. s. 234.

Takto zapsaný Turingův stroj bude fungovat následovně: páska je v počátečním stavu prázdná a čtecí hlava v tomto okamžiku nenačítá žádný symbol. Podle instrukcí do daného políčka vepíše 0 (P0 je v tomto případě převzaté přímo z Turingovy terminologie, P = print) a dostává se do nové *m-konfigurace*, která je v tom případě stále stejná. Čtecí hlava nyní načítá symbol 0 a podle předepsaných instrukcí se posune o dvě políčka doprava a do daného políčka vepíše 1 a stroj se opět dostává do nové *m-konfigurace*. Nadále se dodržuje tabulka a čtecí hlava nyní snímá políčko, ve kterém je vepsaná 1, tudíž se podle instrukcí posune o dvě

[33] LEAVITT, David: *ibidem,* s. 62-63.
[34] TURING, Alan: ibidem, s. 233.

políčka doprava, vepíše do prázdného políčka 0 a znovu se dostává do nové *m-konfigurace.* Takto napsaný stroj bude generovat nekonečnou posloupnost 010101…[35]

Složitější je však další příklad, na kterém Turing demonstruje způsob, jakým funguje takový stroj. Jedná se o automat, jehož výstupem bude opět nekonečná posloupnost, ale tentokrát se jedná o posloupnost 001011011101111… Tabulka pro fungování tohoto stroje je opět převzata přímo z Turingovy práce.

m-konfigurace	Symbol	Operace	nová m-konfigurace
B	-	P@, R, P@, R, P0, R, R, P0, L, L	O
O	1	R, Px, L, L, L	O
O	0	-	Q
Q	0 nebo 1	R, R	Q
Q	Žádný	P1, L	P
P	X	E, R	Q
P	@	R	F
P	Žádný	L, L	P
F	jakýkoliv (0, 1, x nebo @)	R, R	F
F	Žádný	P0, L, L	O

Tabulka č. 2

Zdroj: TURING, Alan: *ibidem*, s. 234.

Jak je vidět z tabulky, tento stroj musí být schopen kromě 0 a 1 také tisknout dva nové speciální znaky a to „x“ a „@“. V případě „x“ se jedná o znak, který dočasně označuje políčko, ke kterému se stroj ještě vrátí. Znak „@“ je pak používán jako označení začátku posloupnosti, není její součástí a nelze se přes něj přesunout doleva.[36] Také je v tabulce vidět, že byla zavedena ještě jedna funkce kromě P, L a R a to E. Symbol E je z anglického „erase“

[35] TURING, Alan: *ibidem*, s. 234.
[36] PETZOLD, Charles: *ibidem,* s. 87-90.

a tudíž to znamená, že při použití této funkce bude z políčka vymazán znak a políčko buď zůstane prázdné, nebo do něj bude vepsán nový symbol.

Tento stroj tedy bude postupovat podle tabulky tak, že v první stavu ***b*** čtecí hlava nenačítá žádný symbol a tiskne počáteční sekvenci, která vypadá následovně: @@00. Stroj pak přechází do další *m-konfigurace* ***b*** a tentokrát načítá symbol 0. Jak je v tabulce vidět, nedochází k žádné operaci a stroj se dostává do konfigurace ***q***. V této konfiguraci se stroj nejprve posouvá o dvě políčka doprava, kde narazí na prázdné políčko. Podle dalších instrukcích setrvává v konfiguraci ***q*** a do prázdného políčka vepíše 1 a následně se posune o jedno políčko zpět, tedy doleva.

Stroj se dostává do stavu ***p***, kdy nenačítá žádný symbol a posouvá se o dvě políčka doleva. Stále zůstává ve stejném stavu ***p***, ve kterém opět načítá prázdné políčko a posouvá se o další dvě políčka doleva. V tomto okamžiku ale načítá znak @ a podle předepsaných instrukcí se přesune o jedno políčko doprava a dostane se do dalšího stavu ***f.*** Instrukce pro stroj ve stavu ***f*** jsou pro jakýkoliv znak stále stejné, to znamená, že při prvním načítání stroj zaznamená 0 a posune se o dvě políčka doprava, kde se znovu setkává s 0 a podle tabulky se opět přesouvá doprava. Po tomto posunu načítá 1 a podle pokynů se posouvá o další dvě políčka doprava, kde nyní načítá prázdné políčko. Do tohoto políčka vytiskne 0, posouvá se o dvě políčka doleva a mění stav.

Stroj se nyní nachází v *m-konfiguraci* ***o***, načítá 1 a podle tabulky se nyní posouvá o jedno políčko doprava, kde tiskne „x“, posouvá se o tři políčka doleva a stále zůstává ve stavu ***o***. V okamžiku, kdy ale načte čtecí hlava v konfiguraci 0, stroj se přepíná do stavu ***p*** a opakuje se stejný postup, jako byl popsán výše.[37]

Rozestupy, které jsou mezi jednotlivými tištěnými symboly, používá Turing schválně, protože se mu zdají být praktické. Políčka rozděluje na *F* a *E*[38], přičemž do políček *F* je vpisována první posloupnost čísel, která většinou zůstává a tvoří potom konečný výsledek a políčka *E* pak slouží jako jakýsi prostor na poznámky a obsah je většinou vymazáván.[39]

[37] TURING, Alan: *ibidem*, s. 235.
[38] TURING, Alan: *ibidem,* s. 235.
[39] LEAVITT, David: *ibidem,* s. 74.

3.1 Zakódování Turingových strojů

Turing si v rámci své studie vytváří zjednodušený zápis pro daný stroj. Nejdříve tuto formu těsnopisu ukazuje na prvním z uvedených strojů. Pro *m-konfiguraci* si zvolil symbol „q“ a přidělil jim jednotlivá čísla, takže následné označení *m-konfigurací* se vyjadřuje za pomoci „q_1“… Symboly jsou následně označovány jako „S“, kdy „S_0“ označuje prázdné políčko, „S_1“ je 0 a „S_2“ se rovná 1. Speciální symboly se pak zakódují podle stejného klíče a „S_3“ je „@“ a „S_4“ je označení pro „x“. Tabulka chování pro daný stroj se tedy změní právě podle tohoto nového klíče.

m-konfigurace	Symbol	Operace	nová m-konfigurace	
g_j	S_j	PS_kL	q_m	N_1
g_j	S_j	PS_kR	q_m	N_2
g_j	S_j	PS_k	q_m	N_3

Tabulka č. 3.

Zdroj: TURING, Alan: *ibidem,* s. 240.

V rámci této tabulky Turing ilustruje nový způsob zápisu operace, kterou stroj vykonává v *m-konfiguraci*. Kdyby za pomoci tohoto nového způsobu zápisu měla být vyjádřena operace „posun pásky doleva“, tak, jak je uvedeno v prvním řádku tabulky, bez toho, aby byl na pásku vytištěn jakýkoliv znak, nový zápis by vypadal následovně: P S_0 L. Pokud by tato akce stroje měla být vyjádřena slovy, „stroj vytiskne prázdné políčko a posune se doleva“.[40]

Nyní přichází poměrně důležitý bod. V rámci tohoto zápisu se Turing zbavil funkce P, tedy vytisknout. V poslední sloupci tabulky je uvedeno označení stavu stroj (N_1…). V tomto okamžiku lze každý stav stroje zapsat jako jednoduchý výraz. V případě N_1 by se stav stroje přepsal na $q_iS_jS_kLq_m$. Stejně to bude vypadat i u dalších stavů.

[40] TURING, Alan: *ibidem*, s. 240.

Díky tomu, že je nyní každá *m-konfigurace* zapsána jako výraz, lze použít něco, co Turing označuje jako *„standard description (SD)"* neboli standartní popis. Nyní lze jednotlivé části nového zápisu nahradit. Standartní zápis pro q_i je „D" a „A", kdy „A" nahrazuje index, který označuje číslo *m-konfigurace* a „A" bude opakováno v zápisu tak, aby odpovídalo číslu *m-konfigurace*. Pro S_k je jako náhrada „D" a „C", kdy „C" funguje stejně, jako „A". Nadále Turing uvádí označení pro pohyb, kdy se k L a R přidává N, které označuje to, že se čtecí hlava na pásce nikam neposunula.

K takto vytvořenému standartnímu zápisu posléze přiřazena jednotlivá čísla, kdy „A" odpovídá 1, „C" je 2, „D" jsou 3, „L" se rovná 4, „R" je 5, „N" odpovídá 6 a místo „;" je 7. Tomuto Turing říká *„description number (DN)"* neboli popisné číslo.[41]

Turing se ve své práci opět vrací ke svému prvnímu příkladu a za pomoci S.D. a D. N. se dostává k poměrně dlouhému číslu, které popisuje celý stroj. Ve své podstatě to funguje podobně, jako Gödelovo číslování, které bylo představeno v předchozí kapitole. Každý Turingův stroj má své unikátní číslo, které je možné následně přeformulovat do binárního kódu.

Přesná definice Turingova stroje se liší od toho, jak jej definoval Turing a jak je definován dnes. Turing ve svém originálním konceptu pracuje s pěticí symbolů a s páskou, která má jakousi mezi paměť. V dnešní době se spíše pracuje s tím, jak Turingův stroj redefinoval matematik Emil Post. Místo pětice symbolů se používá čtveřice a páska neobsahuje nadbytečné mezikroky.[42]

Turingův stroj je tedy nejčastěji definován jako čtveřice (K, Σ, s, δ), kde „K" je konečná množina stavů, „Σ" je konečná množina symbolů, „s" je počáteční stav a platí, že s ∈ K a „δ" je funkce, kterou je určuje další pohyb a platí, že i f x S → K x (S U {L, R}).[43]

---

[41] TURING, Alan: *ibidem,* s. 240-241.
[42] DE MOL, Liesbeth: *Turing Machines*. In: *The Stanford Encyclopedia of Philosophy.* [Dostupné z: https://plato.stanford.edu/archives/win2019/entries/turing-machine/ (15.8.2020)]
[43] PARTEE, Barbara Hall – MEULEN, Alice ter – WALL, Robert E.: *ibidem*, s. 510.

3.2 Turingův univerzální stroj

Doposud byla rozebírána ta část Turingovi práce, která představuje základní myšlenku skrývající se za automaty a také to, jakým způsobem fungují a jak je možné zakódovat tabulky chování. Lze tedy vyvodit hned několik věcí. Jednak to, že pro každý algoritmus je tu určitý automat a že pomocí tabulky pro iracionální čísla lze vytvořit jakoukoliv počitatelnou posloupnost.[44]

Jak již bylo poznamenáno, Turingův systém standartního popisu a popisného čísla je podobný systému Gödelova číslování a platí, že zatímco ke každé počitatelné posloupnosti je možné přiřadit alespoň jedno popisné číslo, tak naopak žádnému popisnému číslu zase neodpovídá více než jedna počitatelná posloupnost.[45] Stejně jako u Gödela platilo to, že každý výrok v rámci formálního systému podobnému *Principiím* má svoje unikátní Gödelovo číslo, tak v tomto případě platí to, že každý Turingův stroj má svoje jedinečné popisné číslo a lze tak vytvořit jejich seznam. Zajímavé je ale to, že při přiřazování v těchto procesech dochází k jisté arbitrárnosti mezi přiřazovanými symboly jak už u Gödelova číslování, tak i u Turingova stroje. Sice existuje určitý systém, který se musí při přiřazování dodržovat, ale znaky jako takové nejsou podřízeny nějakým pravidlům. Lze tedy říci, že Gödelův teorém a Turingův stroj, by mohl fungovat nadále stejně jen za využití jiného znakového systému.

Neexistuje však jenom jeden druh Turingova stroje. Ty, které dokáží generovat počitatelnou posloupnost patří mezi stroje *necyklické*. Lze ale samozřejmě navrhnout i stroj *cyklický*, jehož jedno provedení je možné vidět v prvním příkladu Turingova stroje, který by do nekonečna generoval posloupnost 0101010… Existují i takové stroje, které jsou ve své podstatě pracující bez jakékoliv efektivity a jsou takto vytvářeny záměrně za účelem odhalit právě neřešitelné problémy. Tyto stroje zmiňuje Roger Penrose v souvislosti s řešením Hilbertova Entscheidungsproblem.[46]

Turing se v rámci svých úvah dostává k poměrně složité otázce, zda by šlo navrhnout takový univerzální stroj, který by dokázal přečíst a analyzovat, zda jiný Turingův stroj je

[44] TURING, Alan: *ibidem*, s. 241.
[45] TURING, Alan: *ibidem,* s. 241.
[46] PENROSE, Roger: *The emperor's new mind: concerning computers, minds and the laws of physics*. London 1990. s. 58

cyklický či necyklický, tedy jestli se zastaví nebo ne. Tato otázka je dnes známá jako problém zastavení, v originále *halting problem.*[47]

Problém zastavení je v rámci Turingovi práce řešen za pomocí jakéhosi *univerzálního stroje U.* Výše bylo popsáno, jakým způsobem se dá vygenerovat jedinečné popisné číslo každého Turingova stroje, respektive přesněji tabulky jeho chování, které lze převést do binární soustavy. Turingův *univerzální stroj* je schopen přijmout pásku, kde je již vepsán tento T stroj. Univerzální stroj je na základě toho, že má v sobě seznam *m-konfigurací* T stroje a existenci jedinečného popisného čísla pro každý T stroj, schopen odvodit algoritmus, podle kterého se T stroj chová. To znamená, že k tomu, aby U stroj fungoval, je zapotřebí abeceda T strojů, kterou lze vytvořit díky popisným číslům, která by obsahovala i U stroj samotný. Takto vytvořený seznam lze následně vložit do U stroje a ten se tak dokáže chovat jako jakýkoliv T stroj.[48]

V rámci tohoto seznamu jsou samozřejmě všechny typy Turingových strojů, to znamená, že cyklické i necyklické. Tato problematika cyklického a necyklického stroje je Turingem řešena v 8. kapitole *On computable numbers.*

Turing vytváří hypotézu, že existuje určitý stroj *D* (decision), který, jak vypovídá jeho označení, má za pomoci popisného čísla rozhodnout o tom, zda jiný stroj, podle Turingova označení *M* je cyklický či nikoliv. Výstup takového stroje by vypadal tak, že pokud je stroj necyklický, D stroj ho označí jako „s“ (satisfactory) a pokud je cyklický tak „u“ (unsatisfactory).[49] Nyní ale vyvstává otázka, zda takový stroj vůbec existuje.

Turing nejdříve k argumentaci, proč takový stroj neexistuje, používá Cantorovu diagonální metodu. Nejdříve stroj D nechá rozhodnout, zda daný stroj M bude označen jako „u“ nebo „s“. Díky tomuto lze vytvořit seznam všech M strojů, které byly označeny jako „s“, který by sice byl nekonečný, nicméně lze jej právě použít pro Cantorovu metodu. Pokud se tato metoda aplikuje, dojde k rozporu. Diagonální metoda je algoritmus, pro který lze vytvořit M a je to tedy počitatelná posloupnost. Nově vytvořená posloupnost se však v seznamu nesmí objevit, protože se na jednotlivých místech vždy liší o jedno číslo.[50]

---

[47] PETZOLD, Charles: *ibidem,* s. 179.
[48] TURING, Alan: *ibidem*, s. 241-246.
[49] TURING, Alan: *ibidem,* s. 247.
[50] LEAVITT, David: *ibidem,* s. 81-82.

Nově navrhuje spojit U stroj a D stroj do jednoho a vytvořit tak *H stroj*. Tento nový stroj nejprve kontroluje popisné číslo stroje M tak, že nejdříve pracuje D stroj, který rozhodne, zda M přiřadí „s“ či „u“. Pokud je M označeno jako „s“ a znamená to, že je to necyklický stroj. V tomto okamžiku začíná pracovat U, do kterého je vložen standartní popis M. Posléze dochází k výpočtu počitatelné posloupnosti, která se zastaví až na příkaz H.

V rámci příkladu, jak takovýto H stroj funguje, ukazuje Turing, že H prochází každé jednotlivé popisné číslo postupně, generuje a také určuje, jak dlouhá má být daná počitatelná posloupnost. Stroj H je tedy Turingův stroj a jak Turing píše, na základě D se jedná o necyklický stroj, který má k dispozici kompletní seznam všech popisných čísel všech strojů. To ale znamená, že pokud je H Turingovým strojem, má také své vlastní popisné číslo, což znamená, že dříve či později dojde na to, že H bude muset rozhodnout, zda je on sám necyklický či naopak.

Turing používá k označení popisného čísla stroje H písmeno „K“. Jak už bylo napsáno, H je podle Turingovy definice necyklické, to znamená, že nemůže být označen jako „u“, zároveň ale také dodává, že nemůže být označen jako „s“. Stroj H se totiž v tomto okamžiku dostává do cykličnosti. V okamžiku, kdy totiž D začne zpracovávat popisné číslo H, dojde k závěru, že je „s“ a v tuto chvíli předává informace U. Stroj U v tomto případě kopíruje všechny akce stroje H, což znamená, že je popisné číslo znovu předáno D ke zpracování, opět je vyhodnoceno jako „s“, proto je předáno U, kde opět dochází ke kopírování všech akcí stroje. H stroj se zacyklil, nicméně jak už bylo řečeno, H je necyklický.[51] Protože ve formálním systému nemůže existovat X a -X, stroj H neexistuje. Což ve své podstatě přímo odpovídá právě Gödelově důkazu, který byl popisován v předchozí části.

Další část Turingovy práce je krokem k tomu, aby dokončil řešení problému rozhodnutelnosti. Začíná tím, že lze ukázat, že neexistuje žádný stroj *E*, který by, po vložení standartního popisu M, byl schopný říci, zda daný stroj M někdy vytiskne určitý symbol, specificky přímo 0.[52] Opět začíná předpokladem, že takový stroj existuje. V tom případě je do stroje E vloženo popisné číslo M a E určí, zda tento stroj někdy vytiskne nebo nevytiskne 0.

Turing zde používá k demonstraci stroj M, který vytiskne tuto posloupnost:

[51] TURING, Alan: *ibidem,* s. 247.
[52] TURING, Alan: *ibidem*, s. 248.

ABA01AAB001AB…[53]

Tato posloupnost znamená, že E vyhodnotil, že ano, M někdy vytiskne 0. Následně lze předpokládat, že stroj M_1 vytiskne stejnou sekvenci, ale zde Turing navrhuje jistou modifikaci. M_1 sice vytiskne stejnou posloupnost, jako M, nicméně první symbol 0, nahradí jiným symbolem Õ. Takže nová posloupnost bude vypadat následovně:

ABAÕ1AAB001AB.[54]

Tímto způsobem se dá pokračovat i pro další stroje M_3, M_4… Nyní je nutné vrátit se trochu zpět ke stroji H, který, jak Turing ujišťuje, postupně generuje standartní popisy strojů M. Lze vytvoři nový stroj *HE*. V tomto případě bude postup takový, že stroj H nejdříve zaznamená standartní popis M, který následně stroj E vyhodnotí. V případě, že by M nikdy nevytisklo 0 nebo vytiskne konečný počet 0, bude označeno novým symbolem :0:. Pokud dojde k opaku a stroj M vytiskne nekonečný počet 0, není důvod, aby ho HE označilo tímto symbolem.[55]

Nyní dochází k podobnému postupu jako u předchozího důkazu. Do stroje E je vloženo popisné číslo HE a je tedy nyní na E, aby bylo vyhodnoceno, zda HE někdy vytiskne či nevytiskne konečný počet 0. V tomto okamžiku opět nastává trochu problém. Protože v okamžiku, kdy HE vytiskne 0, M musí vytisknout buď konečný počet 0, nebo v případě, že HE nevytiskne 0, tak naopak M musí tisknout nekonečný počet 0. Podobně by se dalo postupovat u 1. Je to návod k tomu, jak rozpoznat, zda je M cyklické. Jenže už předtím bylo řečeno, že žádný takový postup neexistuje. Tím pádem ani stroj E neexistuje. [56]

Na základě tohoto Turing vytváří speciální jazyk Un (M)[57], který je používán tak, že nejdříve jsou vyjádřeny části M jako logické výroky, které lze posléze kódovat jako logické formule. Tyto formule popisující jednotlivé aspekty M lze spojit do formule Un (M). Pokud je

[53] TURING, Alan: *ibidem*, s. 248.
[54] TURING, Alan: *ibidem*, s. 248.
[55] TURING, Alan: *ibidem*, s. 248.
[56] TURING, Alan: *ibidem,* s. 248.
[57] TURING, Alan: *ibidem,* s. 259.

nějaká obecná metoda, která dokáže určit, zda je Un (M) dokazatelné, pak také existuje metoda, která dokáže určit, zda M někdy vytiskne 0. Turing to dokazuje na postupu, kdy z Un (M) vytvoří výrok, který lze vyložit tak, že v dané kompletní konfiguraci M se na pásce objeví S.[58]

Tímto Turing dokázal neřešitelnost Entscheidungsproblem, tedy problému rozhodnutelnosti. Protože jestli neexistuje stroj E, který by dokázal určit, zda určitý stroj M někdy vytiskne nebo nevytiskne 0, neexistuje ani stroj, potažmo algoritmus, který by dokázal, zda nějaký matematický výrok je pravdivý či nikoliv.

Jedná se o přímou návaznost ke Gödelově teorému. Kurt Gödel udělal to, že v rámci výrokové logiky a potažmo sémantiky, změnil slova na jednotlivá čísla, tudíž pracuje s jednotlivými znaky. Oproti tomu Turing už z těchto znaků, které si lze vyložit jako jistý druh abecedy, skládá tabulky s instrukcemi pro jednotlivé stroje, které posléze mění na jednotlivá popisná čísla automatů.[59]

3.3 Dopady popsání Turingova stroje

Turing v rámci své práce *On computable numbers* nepředstavil jen řešení problému rozhodnutelnosti, ale také přichází s myšlenkou analytického stroje podobnému dnešnímu počítači. I když nebyl první, jak už bylo zmiňováno, jeho návrh se dá pokládat za první krok v oblasti moderní informatiky.

Co je ale zajímavější, v tomto článku se objevuje myšlenka, která posléze Turinga provázela celým jeho životem. Když dokazuje, že jeho analytický stroj dokáže vykonávat stejné matematické operace jako tehdejší počítač v lidské podobě, nejenže se zde objevuje slovo počítač vztažené ke stroji samotnému, ale lze zde pozorovat náznak úvahy nad tím, jak propojit inteligenci a stroj.[60]

[58] TURING, Alan: *ibidem*, s. 259.
[59] HODGES, Andrew: *ibidem,* s. 448.
[60] TURING, Alan: *ibidem*, s. 252

Je pravda, že otázkou umělé inteligence se Turing zaobírá hlavně až ke konci svého života. Do jeho osudu, jako do mnohých ostatních, zasáhla druhá světová válka, kdy se Turing vyznamenal v Bletchey Park a zachránil tisíce životů.[61]

Pro tuto chvíli je ale důležitý Turingův stroj, který byl představen. Jednak je to stejně důležitý mezník, jako Gödelův důkaz, který byl prezentován v předchozí části, ale také je důležitý pro následující kapitolu. Gödel a Turing na počátku 20. století převrátili svět matematiky a logiky a na jejich odkazech tak mohli stavět další.

3.4 Historický kontext obou objevů

Práce jak Gödela tak Turinga byla průlomová nejen pro logiku a matematiku, ale i ostatní vědní obory. Dopad Turingovy práce je poněkud více znám i širší veřejnosti. Bylo zmíněno, že v rámci svého článku *On computable numbers*, jehož koncept byl rozebrán v předchozí části, představil myšlenku analytického stroje, který je schopen provádět stejné výpočty jako tehdejší lidská počítačka, mnohdy ale lépe a rychleji.

Samozřejmě, že Turing nebyl první, kdo přišel s představou takového stroje. Historie této myšlenky byla již ve zkratce popsána. Alan Turing tak byl jeden z těch, kdo položil základy moderním počítačům. Další, kdo stál po jeho poněkud pomyslném boku, byl americký matematik maďarského původu John von Neumann.

Jméno tohoto vědce se v rámci této práce již několikrát objevilo, vždy ale pouze okrajově. Von Neumann se účastnil vědecké konference v Köningsbergu a vyslechl si příspěvek Kurta Gödela. Jako jeden z mála mu věnoval poněkud větší pozornost, dokonce určitou dobu pracoval na řešení stejného problému. Poté, co Kurt Gödel publikoval svůj článek *O formálně nerozhodnutelných větách v Principia Mathematica a příbuzných systémech* se však, dle vlastních slov, otázkám týkající se logiky již nevěnoval.[62]

Na kolik se jeho osud propletl s Alanem Turingem, je poněkud komplikovanější otázka. Turing navštěvoval von Neumannovy přednášky a doporučující dopis od von Neumanna, kpomohl Turingovi získat stipendium na americkém Princetonu. John von

[61] HODGES, Andrew: *ibidem,* s. 242-343.
[62] NEUMANN, John von: *The theory of self-reproducing automata*. Illionois. 1996. s. 1-28.

Neumann tak musel být s prací Alana Turinga seznámen, i když je otázkou jak moc podrobně.[63]

Do práce obou mužů zasáhla druhá světová válka, i když už v této době se von Neumann začíná věnovat myšlence univerzálního analytického stroje. Jakýsi souboj mezi ním a Turingem, respektive mezi Velkou Británií a USA, o to, kdo první takovýto funkční stroj sestrojí, se rozhořel až po válce.

V obou případech lze vidět vzájemnou inspiraci. Dá se tak říci, že Alan Turing je otcem myšlenky moderního počítače, nicméně je to právě práce Johna von Neumanna, která stojí za architekturou tohoto moderního stroje, který je dnes běžně používán. Oba ale také přicházejí ještě s dalšími koncepty, které jsou sice v mnohém odlišné, ale do jisté míry se zaobírají stejnou myšlenkou.

Jedna z nejznámějších prací Alana Turinga je *Computing Machinery and Intelligence*, ve které nejen představuje dnes známý Turingův test, ale také ideu umělé inteligence. Tuto myšlenku je možné zachytit už v článku *On computable numbers*, i když není rozváděna do detailů a jedná se spíše o naznačování dalšího možného vývoje. Pokládá tímto palčivou otázku, zda je stroj schopen myslet. John von Neumann na konci svého života začal pracovat na konceptu sebereplikujícího se stroje a vyvstala tak nová otázka. Zda je možné stroj považovat za něco živého.

Tato myšlenka živého stroje se objevuje napříč historií už od samého počátku, zejména v oblasti mytologie. Fascinace člověka možností vytvořit něco umělého a zároveň podobného sobě samému lze sledovat ve snaze vytvořit nejrůznější automata, zejména pak spíše v oblasti zábavného průmyslu. Nicméně Turingův a von Neumannův zájem byl poněkud užší. Jejich snahy nespočívaly v postavění dokonalé kopie člověka, ale zaměřili se na to, co považovali za stěžejní pro možný a umělý život.

Alan Turing se více zaměřuje na možnost uměle vytvořeného mozku, a tudíž i vědomí. U von Neumanna je celkový koncept o dost komplikovanější, protože podstatnou část jeho návrhu tvoří návrh centrální nervové soustavy a paměti, ale i přes to se věnuje spíše otázce života. K umělému vědomí tak přidává tělo, které při jistém zapojení fantazie lze ze své podstaty považovat za životné i přes to, že se jedná o stroj. Vše se však odvíjí od definice života a životnosti. Von Neumannova sonda je schopna vykonávat všechny důležité funkce

[63] HODGES, Andrew: *ibidem,* s. 206.

jako živá bytost, jen tedy s tím rozdílem, že kód, který její chování ovlivňuje, je vytvořen uměle a za přesným účelem, na rozdíl od toho u živého, který má za sebou dlouhý, složitý a pravděpodobně nikdy nekončící vývoj.

Dnes je tato otázka poněkud komplikovanější díky novému chápání lidského života a zejména právě mozku. V době Alana Turinga a Johna von Neumanna se pro popsání lidského mozku dost často používaly právě tehdy rozvíjející se počítače a s nimi spojené vědecké obory. Nicméně v poslední době se čím dál tím více od metafory mozku jako počítače spíše upouští, zejména díky rozvoji neurovědy a stále detailnějšího popisu fungování tohoto orgánu.[64]

4 Von Neumannova sonda

S myšlenkou jakéhosi sebereplikačního stroje von Neumann přichází ke konci svého života, nebo alespoň v té době pracuje s jeho ucelenou představou. Problém je, že kniha *The theory of self-reproducing automata* je sice z velké části tvořena přednáškami a poznámkami von Neumanna, nicméně on samotný knihu nedokončil a v současné době jsou její podstatnou částí doplňující a vysvětlující komentáře matematika a von Neumannova kolegy Arthura Waltera Burkse. Společně pracovali na projektu ENIAC a EDVAC. Samotná teorie sebereplikačního stroje tak ze strany von Neumanna zůstala nedokončena.

V současné době se koncept takovéto sebereplikující sondy užívá zejména jako jedno z možných řešení při objevování doposud neznámého vesmíru, ale největším problémem je, že dosud není možné sestrojit stroj, který by se, byť jen vzdáleně, takovéto sondě podobal. Komplikací už jsou samostatné součástky stroje a pro celek neexistuje dostatek materiálu. Pro tuto práci však není důležitá sebereplikační sonda, spíše však sebereplikace jako taková, jako něco fyzického, ale hlavně myšlenková podstata této problematiky.

Inspirací von Neumannovi nebyly jen nové objevy na poli logiky, matematiky či jeho vlastní práce na analytických strojích. Jeho kolega Walters Burks, ale i sám von Neumann, několikrát využívají pro kontrast s takovouto technologií živého organismy a přírodu. Je až zarážející, nakolik byl von Neumann schopný popsat jakousi neuronovou síť či dělení buněk,

[64] KAKU, Michio: *Budoucnost mysli: fascinující průvodce světem technologií, které umožňují realizovat sny tvůrců sci-fi*. Brno 2015. s. 229-230.

zejména vzhledem k tomu, že v tehdejší době nebyly tyto oblasti vědy dostatečně prozkoumány.[65] Kromě toho však zejména v předmluvě Waltere Burkse, ale i několikrát během zbytku knihy, dochází k tomu, že automat je srovnáván se živým organismem. Nejen, co se způsobu *chování* týče, ale právě v možnosti vytvořit další stroj, který je podobný či rovnou úplně shodný s předlohou, podobně jako je tomu právě u organismů. Pokud by se tato metafora stroje jako něčeho živého dala skutečně realizovat, dalo by se později hovořit o *neuzavřené evoluci.*[66]

4.1 Architektura sondy

Pokud se o sebereplikujícím stroji hovoří dnes, většinou se objevuje tendence brát jej jako celek. Právě z toho důvodu, že sestrojit von Neumannovu sondu je dnes stále nereálné, nemá většinou ani smysl se do detailu zaobírat jednotlivými orgány, které von Neumann popisuje ve své práci. Jedná se o velmi technické části knihy a v tuto chvíli nejsou podstatné všechny detaily pro jednotlivé součástky, respektive orgány, které von Neumann vytvořil.

V případě von Neumannovy sebereplikační sondy se trochu rozmazávají hranice mezi reálným strojem, který by eventuálně šel sestrojit, a myšlenkovým pokusem, ne nepodobným Turingovu stroji. Sám von Neumann navrhl několik možných modelů takovéhoto automatu, nicméně kvůli předčasnému skonu je nejlépe zpracována verze, kdy jsou v rámci jedné buňky využiti finitní automaty, respektive lze využít i necyklické Turingovy stroje. Originální počet, se kterým pracoval von Neumann, bylo 29 takovýchto konečných automatů na jednu buňku sondy. Takto vytvořené buňky pak tvoří jádro dalších orgánů sondy.[67]

Jednotlivé základní orgány, které pro sondu von Neumann navrhuje, nejsou pro tuto práci důležité z technického hlediska, jak už bylo několikrát zmíněno, ale spíše z toho důvodu, jak von Neumann popisuje jejich fungování a vzájemnou interakci. John von Neumann totiž i přes to, že zpočátku především pracuje s buněčným modelem s konečnými automaty, se v rámci finálního designu spíše přiklání více k systému, který navrhoval pro

---

[65] PATTEE, Howard H.: *The Physics and Metaphysics of Biosemiotics*. In: Journal of Biosemiotics, 1, s. 281-301. 2005.
[66] PATTEE, Howard H.: *ibidem.*
(Otevřenou evoluci samozřejmě popisuje již von Neumann ve své knize, nicméně Patte ji ve svém článku rozebírá do detailů.)
[67] NEUMANN, John von: *ibidem,* s. 94.

EDVAC. Většina orgánů však zůstává poměrně pasivní a jen příležitostně reagují na některé podněty.[68]

Způsob, jakým von Neumann tvoří základy pro sebereplikační stroj, odpovídá do jisté míry struktuře jednoduchého nervového systému. Von Neumann jako první navrhuje to, jakým způsobem budou fungovat jednotlivé stimuly, které jsou schopny aktivovat potřebné orgány. Rozdíly ve stimulech spočívají v jejich naprogramování a v tom, zda se jedná o jeden vyslaný stimul nebo celou sekvenci.

První orgán, který von Neumann navrhuje, je *pulsor* a následně i *opakující se pulsor.* Způsob chování tohoto orgánu je opět velice podobný tomu, jak v nervové soustavě probíhá reakce na podněty. Ostatní orgány automatu, které von Neumann představuje, už jsou ve své podstatě centra, ve kterých jsou tyto *pulsy* zpracovávány.

Podobně jako pro Turingův stroj, i pro von Neumannovu sondu je však důležitější to, jakým způsobem vlastně pracuje takovýto automat s pamětí, celkovým přenosem a ukládáním informace. U Turingova stroje byla popisována nekonečná páska rozdělená do jednotlivých políček, do kterých byly vynášeny kroky či rovnou výsledky procesu. Von Neumann ve svých návrzích také pracuje s páskou, ale paměť sondy je pochopitelně mnohem komplikovanější.

Jedním se základních rozdílů je to, že v případě Turingova stroje páska, která jím procházela, fungovala sice jako nekonečná, ale zároveň jednoduchá a lineární paměť. Von Neumann na tuto pásku však umisťuje několik smyček, které za pomocí pulsorů a impulsů jimi vydávanými pracují nejen s ukládanými informacemi, ale zároveň vyvolávají reakce, které stimulují orgány a zajišťují tak fungování stroje celkově. Z jednoduché lineární paměti se tak stává mnohem komplikovanější nástroj, s jehož pomocí lze celou sondu kontrolovat.

Navíc, u pásky je nutné rozeznávat to, kdy je brána jako hardware sondy, tedy její pevná část a pouhý stavební díl, a kdy už se jedná o software, který obsahuje daný program, podle kterého se má v určitém okamžiku automat chovat. Tato problematika, které se věnuje například Howard Pattee a Paul Davies, bude více rozebírána v následující části práce.

Další důležitou součástí pro to, aby pracoval nejen automat, ale hlavně právě jeho paměť, jsou funkce, které pro tuto část von Neumann zavádí. Do jisté míry jsou shodné s těmi, které při své práci s páskou a pamětí stroje využíval Turing, nicméně v případě

[68] NEUMANN, John von: *ibidem*, s. 157-158.

Turingova stroje jsou dnes vynechávány. Von Neumann pro pásku, respektive paměť sondy, vytváří *„memory control“*, orgán, který, jak už z názvu vypovídá, má za úkol dohlížet právě na paměť sondy.

V tom, v čem jsou si von Neumannova sonda a Turingův stroj nejvíce podobní, je způsob ukládání informací. Turing pro svoje potřeby využívá funkci *E* a *F* čtverců, která byla popsána v předchozí části. Později většinou nevyužívána v rámci tohoto modelu. Von Neuman sestrojuje funkci *RWE*, *„read – write – erase“*, která slouží ve své podstatě jako mezi paměť.[69]

Důležitost ukládaných informací přitom úplně nehraje roli, protože sebereplikace je v sondě nutně zakódovaná s jasnými pravidly. Nicméně dalo by se uvažovat o tom, že pokud by existovala určitá flexibilita paměti, mohla by ovlivnit schopnost automatu se přizpůsobit nově zadaným podmínkám. Je možné se domnívat, že snad právě toto se von Neumann snažil obsáhnout v poslední části své knihy o sebereplikaci, která bude představena v následující kapitole, v otevřené evoluci.

Jak už ale bylo napsáno, přímo technické aspekty jednotlivých orgánů nejsou v tuto chvíli důležité a pravděpodobně to tak zůstane i v nejbližší budoucnosti, dokud nebude možné tento automat sestavit. Von Neumann sám ty nejdůležitější části své práce převedl na jasně dané axiomy. To, co je podstatné je právě koncept sebereplikace samotné.

4.2 Sebereplikace jako koncept

Von Neumannova sonda zde doposud byla představována po technické stránce spíše jako stroj, jehož možná existence je nezpochybnitelná. Nicméně fyzická stránka automatu, ať už jakkoliv realizovatelná, je jedna věc, tou druhou je pak samotné programování.

Systém sebereplikace je popsán už v první části von Neumannovy knihy[70], která je věnována spíše teoretické části fungování analytických automatů, jakým je i Turingův stroj. To, na co von Neumann ale poukazuje, je spíše způsob fungování paměti, respektive toho, jaké informace jsou takovému automatu dány a jak s nimi následně pracuje. Jak se sám

---

[69] NEUMANN, John von: *ibidem*, s. 157-250.
[70] NEUMANN, John von: *ibidem*. s. 74-89.

vyjadřuje, nezáleží na tom, na jakém médiu jsou informace stroji předávané. Nicméně pro tuto práci bude i nadále vhodné pracovat s páskou tak, jak byla představena v předchozí kapitole.

Právě na základě informací, které jsou do takovéhoto automatu vloženy, a jeho naprogramování, je pak daný automat schopen produkovat určité výsledky. V případě Turingova stroje se jednalo o *jednoduché* rozhodnutí, zda je něco akceptovatelné či nikoliv, ale to je jenom jeden určitý druh automatu. To, co von Neumann navrhuje, je automat schopný produkovat repliku sama sebe.

Jak už tedy bylo zmíněno, zásadní rozdíl se skrývá právě v informaci, nebo možná lépe řečeno, v programu, se kterým automat pracuje a podle něj se i nadále chová. Aby situace nebyla zbytečně komplikovaná, von Neumann navrhuje, aby automat byl do jisté míry považován za axiom, případně axiomy. To, čeho tím von Neumann dosáhne a co později popisuje Howard Pattee, je zbavení se problému při rozlišování *symbolu* a *významu*.[71]

Zavedení právě tohoto axiomu, tedy rozlišování mezi *symbolem* a *významem* je důležitý pro práci s vloženou informací. Von Neumann už předtím rozlišil *symboly* a *významy*, kdy jasně odděluje informaci, která je do daného stroje vložena a tu, která posléze považována za výsledek práce automatu.[72] Pokud by toto bylo převedeno do poněkud techničtějšího jazyka, jak tomu je u Howarda Patteeho, *symboly* jsou jakýmsi softwarem, programy a instrukcemi, kdežto *význam* je hardwarem, který s těmito programy pracuje.[73] Důležité v tomto okamžiku je něco, na co ve své knize *The Demon in the Machine* upozorňuje Paul Davies. Je nutné pásku sice brát jako hardware, tudíž pevnou a mechanickou součást našeho hypotetického automatu, na druhou stranu je ale potřeba rozlišovat to, že v určitém okamžiku za pomoci informací, které jsou na ni uloženy, přechází do roviny softwarové. Páska tedy zastává jak formu nosiče informace, tak přenášené informace samotné.[74] Von Neumann tohoto přechodu docílil za pomoci nadjednotek, které na tyto funkce pásky dávají pozor.

Von Neumann nicméně ve své práci využívá spíše metaforu živého organismu. Problém s axiomatizací takového systému je v tom, kterou část přesně vybrat, aby automat

---

[71] PATTEE, Howard: *ibidem.*
[72] NEUMANN, John von: *ibidem*, s. 75.
[73] PATTEE, Howard: *ibidem.*
[74] DAVIES, Paul: *The Demond in the Machine:* How Hidden Webs of Information Are Finally Solving the Mystery of Life. 2019. s. 75-77.

mohl provádět svou vlastní replikaci. Jak píše von Neumann[75], pokud se vyberou příliš malé části, jako jsou kupříkladu atomy a molekuly, systém bude přehlcen a nebude fungovat. Na druhou stranu, pokud by byly axiomatizovány větší celky, u živého organismu například svalstvo, automat by pak ve své podstatě musel vykonávat buď velmi minimální nebo v podstatě žádnou práci a tudíž by nebylo nutné mu věnovat takovou pozornost.

Tento problém je poměrně těžko řešitelný. Von Neumann se proto opět opírá o fungování živých organismů. Říká, že je důležité pracovat s automatem, který známe, ale že jsou určité aspekty, které nemusí být vysvětlovány a dá se očekávat, že prostě budou k dispozici.[76]

V tomto momentu je na řadě otázka, jak vlastně taková sebereplikace funguje u analytického stroje? Pro živé organismy je tato záležitost naprosto běžná, vytvářet nový život, kopii sebe sama. U analytických automatů, se kterými pracuje von Neumann je to už ale situace poněkud komplikovanější. Problém tedy spočívá v tom, jak takovýto automat naprogramovat, aby sebereplikaci prováděl za těch podmínek, které byly stanoveny dříve. Sebereplikace tudíž nespočívá ani tak na přístroji samotném, jaká na tom, jaká informace, respektive program, je do automatu vložena a jakým způsobem je tato informace zakódována.

Von Neumann při práci s vkládanou informací využívá něčeho, co v rámci této práce bylo rozebíráno již dříve. Jedná se o možnost vložit do automatu deskripci sebe samého. V takovémto popisu je ale pouze postup, jak sestavit daný stroj, a nikoliv jednotlivý popis jeho částí, toho, jak fungují, a jak do sebe navzájem zapadají. V okamžiku, kdy by byl vložen podrobný popis jednotlivých částí a jejich funkcí, je možné, že by došlo k přehlcení automatu, který by se v tom okamžiku začal spíše chovat jako Turingův stroj a je možné, že by došlo k zacyklení, kdy by se rozhodovalo o akceptovatelnosti takového stroje a celého jeho zápisu, včetně sebereplikace. Pro tu by ale v tom okamžiku již nebyl prostor. Pokud je ale vložen čistý zápis toho, jak sestavit další totožný automat, nedochází k žádnému paradoxu či zacyklení.

Podobně jako je tomu u Turingovy práce, i von Neumann pro zápis využívá binárního kódu a linearitu. Sám ale připouští, že je možné využít i jiného jazyka, popřípadě metajazyka,

[75] NEUMANN, John von: *ibidem*, s. 74-77.
[76] NEUMANN, John von: *ibidem,* s. 78-79.

a složitější konstrukci, jenže v tomto případě to není nutné. Celý princip sebereplikace pak spočívá v jedné rovnici.[77]

$$(A + B + C) + \phi\,(A + B + C) = (A + B + C) + \phi\,(A + B + C)$$

Na každé straně rovnice je uveden jeden automat, v závorce posléze jednotlivé funkce. První závorka *„(A + B + C)"* je univerzální konstruktér, ke kterému je připojena deskripce sebe samotného, tedy „*ϕ (A + B + C)"* a za pomocí jednotlivých funkcí je sestrojen nový automat *„(A + B + C + D) + ϕ (A + B + C)"*.

Důvod, proč von Neumann zavádí axiomatizaci a binární kód spočívá v tom, že úplně prvním krokem v celé sebereplikaci je existence automatu *X*, ke kterému je další automat *ϕ(X)* schopen vytvořit popis automatu *X*. Tento popis je následně vložen do funkce *„A"*, která v tento okamžik může sestrojovat automaty *X*. Takto je vlastně ve zkratce popsána funkce Turingova univerzálního stroje. Nicméně toto není podstata sebereplikace. V tomto momentu *„A"* sice sestavuje automaty X, ale je to pouze automat X a neobsahuje svůj vlastní popis *ϕ(X)*.

Další funkce, kterou von Neumann zavádí, je *„B"*. Tato funkce má poměrně jednoduchý úkol. Popis automatu, který je do ní vložen, zpracuje a následně vytvoří dvě kopie dané deskripce.

K tomu, aby ale obě funkce *A* i *B* mohly spolupracovat, je nutné k nim přiřadit ještě další jednotku *„C"*, které bude mít obě funkce na starosti. Jak tedy popisuje von Neumann, v tomto okamžiku to funguje tak, že *B* funkce vytvořila dvě kopie deskripce automatu *X*, tedy *ϕ(X)*. Funkce *A* jednu kopii *ϕ(X)* zpracuje a vytvoří automat *X*. Funkce *C*, která tedy funguje jako kontrolní orgán, následně k vytvořenému automatu *X* přiřadí zbylý popis *ϕ(X)*. Tímto vznikne *X* + *ϕ(X)*.

Pokud *X* bude rozepsáno podle svých funkcí, lze jej přepsat jako *(A + B + C)*, což tedy znamená, že *X* + *ϕ(X)* by bylo přepsáno jako *(A + B + C) + ϕ (A + B + C)*, což posléze

[77] NEUMANN, John von: *ibidem,* s. 85-87.

vytváří svoji kopii $(A + B + C) + \phi\ (A + B + C)$. Proces vytváření této kopie, tedy $X + \phi(X) = X + \phi(X)$, je stejný, jen prováděn ve větším měřítku.

V tomto okamžiku je tedy pracováno s rovnicí, která je uvedena na začátku této části.

$$(A + B + C) + \phi\ (A + B + C) = (A + B + C) + \phi\ (A + B + C).$$

Automat je tedy v tuto chvíli schopný vytvářet na základě vložené informace, která tedy obsahuje popis stroje samotného, své přené kopie. To, čím se nemusí v danou chvíli zaobírat, je otázka akceptovatelnosti takového stroje.

4.3 Otevřená evoluce sondy

Von Neumann ale ve své práci zachází ještě dále. Několikrát to již bylo řečeno, ale inspirací pro některé funkce sondy, se von Neumannovi staly živé organismy, respektive spíše složitější nervové soustavy, které se za pomocí jednotlivých orgánů své sondy snaží uměle zrekonstruovat.

Kromě toho, že pro život je tedy nutná schopnost sám sebe replikovat a předat informaci dále, a je jedno, zda se v tomto případě jedná o DNA či počítačový program, a zajistit její předávání i v budoucích generacích, je poměrně logické, že do tohoto procesu vstoupí i vnější vlivy.

Právě otázka evoluce automatu a potažmo tak celého systému je to, co dráždí mysl nejen současných vědců, ale i laické veřejnosti. Představa, že by se něco uměle vytvořeného mělo vyvíjet samo od sebe, jen za přispění další funkce, je poměrně zarážející.

Von Neumann tohoto docílil rozšířením výše uvedené rovnice, když do ní vložil ještě jednu část, která ovlivňuje celkový proces. Funkci *D* von Neumann zavádí až posléze, po sebereplikaci, jako další krok, protože bez funkce *D* se stále nejedná o sebereplikaci tak, jak je vnímána například biology či jinými vědci. Von Neumann popisuje *D* jako jakýkoliv automat a tím, že je tato funkce přidána do celé rovnice, znamená to, že vedle toho, aby byl vyprodukován automat tak, jak bylo dosud popisováno, je vytvořen ještě jeden další, tentokrát však s jistou mutací, která se odvíjí od jeho prostředí a schopnosti se tomuto prostředí přizpůsobit.[78]

Von Neumann bere *D* jako přirozenou formu mutace, která je do jisté míry nutná pro úspěšné fungování sebereplikační sondy.[79] Problém ale nastává v oblasti logiky, protože při vložený prvku *D* do rovnice sebereplikace nastává nerovnost mezi jednotlivými stranami rovnice, což je něco, s čím není v tuto chvíli možné pracovat. Hlavně v souvislosti s již rozebíranými pracemi Gödela a Turinga, které by v případě von Neumannovy zamýšlené evoluce nešlo aplikovat.

5 Démon logiky

Doposud byly představovány koncepty jednotlivě, bez nějak důsledného navazování a odkazování na to, jak spolu vlastně hlouběji souvisí. Je zřejmé, že ve všech případech je pro práci představovaných mužů důležitý kontext nejen jejich doby, ale zejména vědy a jejího vývoje v daném okamžiku. Nicméně i přes to, že tedy dané teorie byly představovány bez širšího vzájemného kontextu, velice úzce spolu souvisí. V okamžiku, kdy přichází čas se zaobírat sebereplikací nebo schopností nějakého umělého automatu provádět tuto činnost, vyvstává nutnost se zaměřit zejména na tu část, která je všem společná.

To, co jednotlivé práce spojuje, je znakový systém, který je využíván, a do jisté míry i jeho binárnost. Jedná se o rozdíl mezi syntaxí a sémantikou[80] daného znakového zápisu pro sebereferenci a následnou sebereplikaci, přičemž v okamžiku, kdy dojde na řešení von Neumannovy sondy, nastává moment, kdy mezi syntaxí a sémantikou dochází k poměrně složitému procesu. V jedné chvíle musí dojít ke změně, kdy jedno přechází v druhé, respektive hardware, který lze v přeneseném významu vnímat jako syntax, je nutno změnit na software, tedy sémantiku.[81] Nejdříve je však nutné se zaobírat poněkud obecnějším

[78] NEUMANN, John von: *ibidem*, s. 86-87.
[79] NEUMANN, John von: *ibidem,* s. 86-87.
[80] ZÁMEČNÍK, Lukáš Hadwiger – KRBEC, Jaroslav: Describing Life: Towards the Conception of Howard Pattee. In: Linguistic Frontier Volume 2 Issue 1. s. 1-9. 2019.
[81] DAVIES, Paul: *ibidem*, s. 76-77.

problémem, který je zahrnut ve všech třech teoriích, nicméně klíčový je především pro práce Kurta Gödela a Alan Turinga v tom smyslu, i když spíše jako komplikace.

Sebereference je paradox, se kterým je nutné se jistým způsobem vypořádat. V případě Kurta Gödela a jeho důkazu se jedná o rozdíl mezi pravdivostí a dokazatelností, kdy pravdivost je právě předmětem sémantiky a dokazatelnost naopak syntaxe. Pokud tedy máme jistý formální systém, ve kterém existuje znakový systém, ze kterého lze vytvořit slovník, lze posléze pro takovýto znakový systém vytvořit i Gödelovo číslování, které již bylo popsáno. V tomto okamžiku je nutné se zaměřit na sémantickou složku, tedy pravdivost, kdy důkazem je procedura ze samostatného čísla.

V tento okamžik tedy lze říci, že existuje jistý string znakového kódu, který sice obsahuje referenci na sebe sama, ale taky je zaznamenán takovým způsobem, že dále je možné s ním pracovat. Kurt Gödel tak pracuje s jednotlivými znaky.

Pro Turinga je problém v tom, zda je možné takový string, který obsahuje popis sebe sama akceptovat či nikoliv. Respektive v Turingově případě, zda se automat, který by tento string znakového zápisu zpracovával, stal cyklickým či necyklickým. Opět ze sémantickou hlediska je důležitý proces akceptovatelnosti takového stringu. Pokud by byla užita podobná metafora, jako v případě Gödelova důkazu, v případě Turingova univerzálního stroje a akceptovatelnosti se pracuje s celou a ucelenou abecedou znakového systému. O akceptovatelnosti takovéto abecedy je ale rozhodnuto až poté, co je abeceda, respektive tabulka chování automatu, převedena na popisné číslo stroje. S tímto znakovým zápisem obsahující vlastní sebereferenci Turingův stroj již pracovat umí.

Tady je právě paradox sebereference patrný asi nejvíce. Jak bylo popsáno v kapitole, která se výhradně věnovala Turingovým strojům, v případě vložení popisu automatu do dalšího, může dojít k *halting* problému, tedy stroj nikdy nezastaví. Tím pádem pak nebude jasné, zda string daného zápisu byl akceptován či nikoliv.

V obou případech, jak u Gödelova důkazu, tak u Turingova univerzálního automatu, dochází k podobné situaci, která je komplikovaná právě sebereferencí, ta však byla již během práce několikrát řešena.

U von Neumannovy sondy je rozdíl v tom, že zatímco Gödel a Turing pracují pouze se stringy zaznamenaných znakových systémů buďto jako s jednotlivými symboly v případě Gödela, či abecedou v případě Turinga, von Neumann přechází do roviny gramatiky.

Jak již bylo napsáno výše, von Neumann v rámci své sebereplikační sondy již pracoval s tím, že její pevnou součastí jsou Turingovy automaty. To tedy znamená, že v tuto chvíli není důležitá pravdivost či akceptovatelnost, sebereplikační automat již pracuje s vygenerovaným stringem, pro něj jsou důležitá pravidla, která jsou na něm obsažena tak, aby nadále mohl fungovat tak, jak je předpokládáno.[82]

Právě celková komplikovanost teorie, jako je koncept von Neumannovy sondy, může za překřížení funkcí pásky, na které je daný znakový zápis generován. Jak je již popsáno výše, v určitém okamžiku je páska brána jako jakýsi hardware automatu, to znamená, že je jeho pevnou součástí a jedná se o fyzickou záležitost. Nicméně pro tuto práci jsou mnohem důležitější okamžiky, kdy za pomocí ostatních orgánů sondy, přechází páska do funkce software, tedy více sémantického, tedy řešícího význam jednotlivých znaků v rámci daného zápisu.

Na takovéto pásce je uložen zakódovaný znakový zápis, který tedy umožňuje v současné chvíli spíše snít než hovořit, o automatické a strojové sebereplikaci. Aby tu ale nedocházelo k paradoxům způsobeným sebereferencí v rámci tohoto zápisu, je nutné se vzdát představy aktivního zkoumání úplnosti a akceptovatelnosti celého stringu. Pro von Neumannovo pojetí sebereplikace je důležitá ta část, kdy právě dochází k sebereferenci. Proto, aby k sebereplikaci mohlo dojít, je nutná sebereference v zápisu, tedy již existence kódu, který by sebereferenci obsahoval. Jde ale o to, že v případě von Neumannovy sondy už, na rozdíl od Gödelova důkazu či Turingova univerzálního stroje, není potřeba se jí zabývat. Von Neumann tento problém vyřešil jednak axiomatizací některých částí systému, ale hlavně vložení celého zápisu sebereplikace bez nutnosti řešit pravdivost či akceptovatelnost.

Von Neumann se nijak více do detailu nezaobírá pravdivostí či akceptovatelností, ale jsou pro něj naopak důležitá pravidla obsažená ve znakovém zápisu, kterými se má řídit. K sebereplikaci tak dochází na základě toho, že je obsažena v zápisu a k paradoxu nedochází právě proto, že pokyny jsou již vložené a automat jako takový je nemusí stále dokola vytvářet.

Ve své podstatě je zde ale hovořeno pouze o automatu, jehož popis sebereplikace neobsahuje možnost evoluce. V tomto bodě je nutné, aby celý systém fungoval bez ní. Zapojení tohoto finálního kroku, který von Neumann ve své knize představuje, by mohlo dát jistý prostor pro vytvoření jiných paradoxů.

[82] DAVIES, Paul: *ibidem,* s. 70-108.

Jak už ale bylo zmiňováno, všechny tři teorie jsou zejména spojovány jistými podobnostmi právě v pojetí znakového systému a jeho binárnosti, kdy je tedy nutné odlišit jeho syntax od sémantiky. Jak již bylo popsáno, celý postup je poněkud hierarchický. V rámci Gödelova důkazu je díky číslování možné zabývat se jednotlivými znaky systému. V případě univerzálního Turingova stoje pak posléze akceptovatelností celé abecedy takového systému. V obou případech je pak důležitý samotný proces, kterým znakový kód, respektive string s informacemi, prochází. V případě von Neumannovy sondy to důležité není, právě naopak. Automat v rámci sebereplikace neřeší akceptovatelnost, ale zda je v symbolickém zápisu obsažena sebereference.

Dalším důležitým bodem je ale způsob ukládání takovéto informace, který není ani možná tak patrný, když dojde na aritmetizaci celého systému, ale v pozdějších krocích již ano. Jak Turing, tak von Neumann užívají lineární paměti. S tímto konceptem bylo pracováno nejdříve v kapitole věnované univerzálnímu automatu, kdy Turing představuje koncept nekonečně dlouhé pásky, na které jsou zaznamenávány jednotlivé kroky i s případnými mezi kroky. S tímto pracuje ve své podstatě i von Neumann, kdy pro svoji sondu zavádí orgán s funkcí *read – write – erase*. Způsob fungování tohoto systému ukládání informací lze brát jako jednodušší model paměti.

Při řešení problému, zda von Neumannovu sondu je možné považovat za spodní hranici sémiotického systému se lze v současné době opírat o argumentaci, že na základě toho, jakým způsobem je v tomto případě nakládáno právě se znakovým systémem a jeho samotná existence.[83] Nicméně toto někteří lidé, například Umberto Eco[84], odmítají. Problém je právě v interpretaci jednotlivých symbolů. Eco a někteří další sémiotici pochybují, že by něco čistě mechanicky vytvořeného bylo schopné interpretovat symboly stejným způsobem, jako to dokáže právě živý organismus. V tom případě by tedy podmínka nutnosti znakového zápisu nebyla dostatečná.

To, co je velmi podstatná část sémiotiky, je schopnost interpretace[85], kterou lze v tomto případě zahrnout právě do procesu sebereplikace. Aby ale jakákoliv interpretace mohla probíhat, je důležité mít ty správné informace, kterou jsou právě obsažené v dané lineární paměti. Pokud by při pracování s takovouto lineární pamětí byly využity mezi kroky,

[83] ZÁMEČNÍK, Lukáš Hadwiger – KRBEC, Jaroslav: *ibidem*.
[84] Umberto Eco se otázce chápání kódu věnuje v mnoha svých publikacích jako například *Semiotics and the Philosophy of the Language* z roku 1984.
[85] ZÁMEČNÍK, Lukáš Hadwiger – KRBEC, Jaroslav: *ibidem.*

které při své práci na pásce používá Turing, k interpretaci by mohlo docházet už práce v tomto bodě, kdy jsou tedy všechny jednotlivé kroky zaznamenávány, a nejen v rámci ucelené sereplikace automatu.

5.1 Tvůrci své doby

To, co je poněkud pozoruhodné na osudech všech tří mužů, kteří tu byli představeni, je fakt, že i přes to, že se v určitých obdobích svého života vyskytovali na tom samém místě, v životě snad nedošlo k setkání všech tří najednou. Ty drobné útržky, které se vyskytují v biografiích a ostatních publikacích věnujících se jejich životu a práci, kde se vyjadřují k práci zbylých dvou, jsou vesměs nic neříkající o jejich vzájemném vztahu.

Ovlivnění je však vidět právě v jejich práci, zejména tedy u Turinga a von Neumanna. Nezůstalo však pouze u problémů, které byly představeny v této práci, ale zejména v té pozdější, kdy už se zájem Alan Turinga a Johna von Neumanna přesunula do poněkud odlišných sfér, než ve které začínali, přesto je však poměrně obtížné určit rozsah jejich vlivu na sebe navzájem.

Nedá se popřít, že první polovina minulého století byla pro vědu, která dodnes ovlivňuje naši přítomnost a budoucnost, klíčová. To, co začínalo poněkud rozvážně představením Hilbertova programu či vědeckými konferencemi, jako byla ta v Königsbergu, se postupem času a vlivem doby neustále zrychlovalo. To, co je pozoruhodné, je kolik teorií, i když třeba jen lehce poupravených, stále nebylo překonáno a jejich vliv na budoucnost je jen těžko odhadnutelný.

Práce těchto vědců stále silně rezonuje vědeckou obcí, ať už se jedná o oblast humanitních věd či přírodovědných oborů, a stále se jedná o silnou inspiraci pro současné odborníky. Dnes se však neberou v potaz některé originální části práce, ať už se jedná o poupravení jednotlivých teorií na základě nových objevů, či upuštění od některých předpokladů. To se právě týká konceptu mysli a mozku jako počítače.

Sice díky pokroku neurovědy se dnes takto již neuvažuje, zejména kvůli odlišnostem mezi počítačem a mozkem, které se nejvíce týkají právě jejich struktury. Počítač má pevně danou architekturu, koneckonců se dnes využívá právě ta, se kterou přišel John von Neumann.

Mozek je oproti tomu nervová síť, která se neustále mění a nemusí se tak řídit danými pravidly na rozdíl právě od stroje. Nicméně v poslední době je možné sledovat jistý obrat, kdy je snaha vytvořit umělé vědomí stejně, jako právě vznikalo to lidské, což znamená právě od jednotlivých neuronů.[86] Pokud by bylo možné lidské vědomí poznat a popsat do sebemenších detailů nejenom po fyziologické stránce, ale jako celek, bylo by toto poznání možné využít právě při práci s teorií o sebereplikačních strojích. Hlavně v okamžiku, kdy by došlo k takovémuto poznání, bylo by jen otázkou času, kdy by se to dalo zahrnout do jednoduchého kódu a pracovat s ním dále.[87]

Lze tedy říci, že právě tito tři muži byli tvůrci nejen své doby, ale do jisté míry budoucnosti lidského života. Jejich odkaz tak dal prostor odborníkům jako Roger Penrose, Howard Pattee či Marvin Minski k jakési realizaci všech rozebíraných teorií.

[86] KAKU, Michio: *ibidem,* s. 229.
[87]MARKOŠ, Anton a Jozef KELEMEN. *Berušky, andělé a stroje*. Praha 2004. s. 21-38.

Závěr

V rámci této práce byla představena práce tří velice významných myslitelů 20. století. Zbývá však zodpovědět tu nejdůležitější otázku, zda se dá von Neumannova sonda brát jako spodní hranice sémiotického[88] systému.

Odpověď, jako mnohdy i v jiných případech, záleží na úhlu pohledu. Tak, jak byla von Neumannova sonda představena zde a propojena s koncepty práce Gödela a Turinga, dalo by se uvažovat o kladné odpovědi. Pokud bude jako podmínka stačit to, že existuje jistý znakový systém s jistými vlastnostmi, tak, jak bylo uvedeno v práci. Což je názor, který prezentovali Pattee a Kull.[89]

Poněkud problém nastává v okamžiku, kdy dojde na otázku, zda lze takovou sebreplikační sondu sestrojit. Ta totiž poněkud stojí v opozici k té, která se naopak zabývá jejím možným zařazením do sémiotických systémů. Respektive se již při možném sestrojování takovéhoto automatu počítá s tím, že je tato otázka vyřešena. To, že by bylo v budoucnosti možné takové sondy využívat v mnoha ohledech, nejen v dobývání doposud neznámého vesmíru, je vesměs názor většiny fyziků a von Neumannova sebereplikační sonda je zahrnována vědci jako Michio Kaku do civilizace III. typu.[90]

Problém však je, že tyto teorie, kdy je von Neumannova sonda již sestrojena, nepomáhají vyřešit položenou otázku. Howard Pattee a Kalevi Kull ve svém rozhovoru *A biosemiotics conversation: Between physics and semiotics*, narážejí na to, že je nutné držet se v mezích fyzikálních zákonů a že je markantní rozdíl mezi živoucí a neživoucí složkou světa, na co ale dále naráží je to, že pro jakoukoliv sebereplikaci, ať už tu u živých objektů, jako jsou například buňky, nebo právě u von Neumannovy sondy, je důležitá komunikace a paměť.[91]

Pokud je tedy zaveden určitý znakový kód, který je schopen v sobě nést takovou informaci, která zaručí schopnost se replikovat, je pak možné předpokládat existenci jistého

---

88 Tato práce se zabývá také především řešením problému sebereference, který všichni tři za pomocí sémantiky. Nicméně von Neumannova sonda je brána jako spodní bráh a přesouvá se již do sémiotické dimenze.

89 PATTE, Howard – KULL, Kalevi: *A biosemiotics conversation: Between physics and semiotics*. In: Sign Systém Studies. 2009.

90 KAKU, Michio: *Fyzika budoucnosti: jak bude do roku 2100 věda utvářet osud lidstva a náš každodenní život*. Praha 2013. Zip, sv. 32. s. 303-304.

91 DAVIES, Paul: *ibidem,* s. 70-108.

typu paměti. Von Neumann v rámci své teorie pracuje s lineární pamětí, podobně jako předtím právě Alan Turing. Lineární paměť, v tomto případě tedy páska, má tu výhodu, že jednotlivé záznamy v ní jsou poměrně jednoduše dohledatelné a je možné pozorovat i mezikroky, které sonda vykonává.

Jak bylo představeno, sebereplikační automat se skládá z několika orgánů, kde komunikace mezi nimi je absolutně nezbytná pro správné fungování celé sondy. Dá se tedy říct, že právě existencí kódu, paměti a přenosem informace tak, jak jsou tyto jednotlivé části představeny von Neumannem, by odpovídaly kladeným požadavkům k uznání sémiotického systému.

Nicméně existuje samozřejmě i nesouhlas s tímto celkovým konceptem, který převážně vyjadřují lingvisté věnující se sémantice, jako byl Umberto Eco. Je to spíše problém biosémiotiky, která ještě stále není pevně ukotvenou disciplínou s jasně nastavenými hranicemi, a právě to dává prostor k tomu, aby byly vytvářeny dle potřeby. Tato věda se kolísá na pomezí humanitních a přírodovědných oborů a záleží jen na dotyčném vědci, jaká omezení a pravidla si stanoví.

Jak již tedy bylo řečeno, odpověď jako taková tedy nejenže není jednoduchá, ale ani jednoznačná. Střetávají se zde názory klasických lingvistů a přírodovědců, kdy náhled na problematiku je značně zasáhnut právě úhlem pohledu daného vědce a jeho zaměřením.

Literatura a zdroje

1. BARROW, John D.: *Nové teorie všeho: hledání nejhlubšího vysvětlení*. Praha 2008. Zip, sv. 11.
2. BROOK, John Hedley: *Science and religion: some historical perspectives.* Cambridge 2014. Cambridge history of science.
3. DAVIES, Paul: *The Demond in the Machine:* How Hidden Webs of Information Are Finally Solving the Mystery of Life. 2019.
4. DAVIS, Martin: *The Universal Computer. The road from Leibniz to Turing.* New York 2000.
5. DE MOL, Liesbeth: *Turing Machines*. In: *The Stanford Encyclopedia of Philosophy.* [Dostupné z: https://plato.stanford.edu/archives/win2019/entries/turing-machine/ (15.8.2020)]
6. DEVLIN, Keith J.: *Jazyk matematiky: jak zviditelnit neviditelné*. 2. vyd. v českém jazyce. Praha 2011. Aliter, sv. 7.
7. GOLDSTEIN, Rebecca: *Neúplnost: důkaz a paradox Kurta Gödela*. Praha 2005. Velké objevy, svazek 3.
8. HOFSTADTER, Douglas R.: *Gödel, Escher, Bach: existenciální gordická balada: metaforická fuga o mysli a strojích v duchu Lewise Carrolla*. Praha 2012. Zip, sv. 27.
9. KAKU, Michio: *Budoucnost mysli: fascinující průvodce světem technologií, které umožňují realizovat sny tvůrců sci-fi*. Brno 2015.
10. KAKU, Michio: *Fyzika budoucnosti: jak bude do roku 2100 věda utvářet osud lidstva a náš každodenní život*. Praha 2013. Zip, sv. 32.
11. KLEENE, Stephen C.: *Kurt Gödel*. In: *Biographical Memoirs: Volume 56.* National Academy Press. Washigton D.C. 1987.
12. KŘIVSKÝ Petr, SKŘIVAN Aleš: *Století odchází: světla a stíny „belle époque“*. 2. upr. vyd. Praha 2004.
13. KVASNIČKA, Vladimír - Jiří POSPÍCHAL: *Matematická logika*. Bratislava 2006.
14. LEAVITT, David: *Muž, který věděl příliš mnoho: Alan Turing a první počítač*. Praha 2007. Aliter, sv. 31.
15. NAGEL, Ernest – NEWMAN, James Roy – HOFSTADTER, Douglas R. (ed.): *Gödelův důkaz*. Vyd. 1. brož. Brno 2006.
16. NEUMANN, John von: *The theory of self-reproducing automata*. Illionois 1996.

17. PARTEE, Barbara Hall – MEULEN, Alice ter – WALL, Robert E.: *Mathematical methods in linguistics*. Dordrecht 1990. Studies in linguistics and philosophy, Vol. 30.
18. PATTE, Howard – KULL, Kalevi: *A biosemiotics conversation: Between physics and semiotics*. In: Sign Systém Studies. 2009.
19. PATTEE, Howard H: *The Physics and Metaphysics of Biosemiotics*. In: Journal of Biosemiotics, 1, s. 281-301. 2005.
20. PENROSE, Roger: *The emperor's new mind: concerning computers, minds and the laws of physics*. London 1990.
21. PETZOLD, Charles. *The annotated Turing: a guided tour through Alan Turing's historic paper on computability and the Turing machine*. Indianapolis 2008.
22. TURING, Alan: *On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem*. 1937.
23. WHITEHEAD, Alfred North – RUSSELL, Bertrand: *Principia Mathematica.* Volume I. Cambridge University Press. 1963.
24. ZÁMEČNÍK, Lukáš Hadwiger – KRBEC, Jaroslav: *Describing Life: Towards the Conception of Howard Pattee*. In: Linguistic Frontier Volume 2 Issue 1. s. 1-9. 2019.

Seznam příloh

Příloha 1: Gödelovo číslování – postup

Příloha č. 1: Gödelovo číslování – postup

Zjednodušenou verzi Gödelova číslování je možné ukázat na jednoduché aritmetické operaci 2 + 3 = 5. Každá část tohoto příkladu má své číslo, které je jí přiřazeno a vypadá to následovně: 2 → 1, „+“ → 2, 3 → 3, „=“ → 4, 5 → 5. Takto přiřazená čísla jsou pak následně použita jako mocniny pro prvočísla. Další krok tedy vypadá následovně: 2^1 x 3^2 x 5^3 x7^4 x 11^5. Následný výsledek je ohromné číslo 870 037 764 750. Tato ukázka je možná poněkud banální, ale tímto způsobem se dá dále pracovat s celým formálním systémem jako jsou právě *Principie.*

Pro *Principie* vytvořil Gödel slovník, který obsahuje dvě základní části: *konstanty* a *proměnné.* V rámci této práce je pracováno s interpretací Gödelova důkazu tak, jak ji představili Nagel s Newmanem. Ti místo sedmi konstant, které si zvolil Gödel, pracují hned s dvanácti. Jedná se o základní symboly formální logiky a jejich přiřazené Gödelovo číslo a je možné je vidět v následující tabulce.

Konstanty	Gödelovo číslo	Význam
~	1	ne
∨	2	nebo
⊃	3	jestliže… pak
∃	4	existuje nějaké
=	5	rovná se
0	6	nula
S	7	bezprostřední následník čísla
(	8	interpunkční znaménko
)	9	interpunkční znaménko
,	10	interpunkční znaménko
+	11	plus
X	12	krát

Tabulka č. 1

ZDROJ: NAGEL, Ernest – NEWMAN, James Roy – HOFSTADTER, Douglas R. (ed.): *Gödelův důkaz*. Vyd. 1. brož. Brno 2006. s. 101

Další důležitá součást slovníku jsou proměnné, o kterých už je psáno ve stručnosti v textu samotném. Tyto proměnné jsou rozdělené na tři druhy a každý tento druh svým způsobem pracuje s číslem 12.

První z nich jsou *číselné proměnné*, „x“, „y“, „z“ atd., za které lze dosazovat číslice a číselné výrazy. Tyto číselné proměnné se následně spojují s jakýmkoliv prvočíslem větším než 12. Takže při postupu, jaký je uveden výše, by to znamenalo, že „x“ = 13 atd.

Další část slovníku se týká *výrokových proměnných*, za které je možné dosazovat výroky „p“, „q“, „r“ atd. Opět je k nim přiřazováno prvočíslo větší než 12, nyní je však ještě nutné ho umocnit na druhou, takže „p“ = 13^2.

Poslední z těchto proměnných jsou tzv. *predikátové proměnné* „P“, „Q“, „R“, za něž se dosazují predikáty typu „je menší než“. V tomto případě jsou prvočísla větší než 12 umocňována na třetí, tudíž „P“ = 13^3.

Na předchozí straně je uveden příklad Gödelova číslování za pomocí velice primitivní aritmetické operace, nicméně za pomocí celkového slovníku formálního systému je možné vypočítat číslo pro jakékoliv tvrzení, které se v tomto systému nachází. [92]

[92] NAGEL, Ernest – NEWMAN, James Roy – HOFSTADTER, Douglas R. (ed.): *Gödelův důkaz*. Vyd. 1. brož. Brno 2006. s. 100-106.