

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Jiří Kopřiva

Automaty a mozek

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 7 (1962), No. 2, 59--75

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139726>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1962

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



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

AUTOMATY A MOZEK

JIŘÍ KOPŘIVA

S rozvojem a rozšířením samočinných počítačů se stále více diskutuje problém vztahu mezi „umělými mozky“ a nervovou soustavou člověka. Mluví se o postupném nahrazování některých druhů intelektuální činnosti člověka automaty. Dokonce se tu a tam vyskytnou úvahy o hrozbě, která se prý vznáší nad lidstvem, neboť je tu možnost, že člověk bude ovládnut nebo dokonce vyhuben chytrými a lidské kontrole se zcela vymknuvšími automaty. Jsou to názory uveřejňované v sensacektivním západním tisku a souvisí s nevědeckým nazíráním na problémy, s nimiž se dnes potýká kybernetika. Vznik a rozšiřování takového výkladu problémů a možností kybernetiky je podporován vládnoucími kruhy v kapitalistických zemích. Je to totiž vítaná zbraň v ideologickém boji proti materialistickému světovému názoru. Poukazováním na fantastické schopnosti automatů, které mají být sestrojeny v těchto zemích, se má v širokých vrstvách obyvatelstva rozšiřovat a utvrzovat přesvědčení o technickém a vojenském předstihu kapitalistické části světa před socialistickým táborem. Mezi solidními vědci je ovšem tato profanace důležité vědecké disciplíny podrobována kritice. Na potvrzení cituji: *„Za několik posledních let se stalo populárním sportem popisovat funkce mozku srovnáváním s počítačím stroji a funkce počítačích strojů srovnáváním s jednáním člověka. Přitom zdrojem velkého uspokojení je myšlenka, že za rok či za dva budeme s to pojímat mozek jako počítačací stroj a brzy nato budeme schopni sestrojiti mohutný umělý mozek s velikou rychlostí a kapacitou a se zvýšenou spolehlivostí.“* (O. H. SCHMITT, [1]).

Úkolem tohoto článku je ukázat na problémy studia nervové soustavy člověka v souvislosti se snahou o imitaci její činnosti umělými automaty. Nejedná se samozřejmě o původní myšlenky autorovy. Podáme přehled a porovnáme mínění, která byla k dané problematice vyslovena vědci, jejichž výsledky v tomto oboru se všeobecně uznávají.

1. PRINCIP ANALOGIE

Ptejme se nejprve, v čem je podstata možnosti analogického přístupu ke dvěma na první pohled tak rozdílným věcem, jako je nervová soustava člověka a umělý automat, resp. myšlení a činnost stroje. Fyzikální modelace psychických procesů

je velmi stará. Tak např. lidská řeč, která vzniká na samém počátku civilizace, představuje akustickou modelaci dějů v mozkové kůře. Počítání na prstech nebo pomocí kamének je mechanickou obdobou pojmů sčítání a odčítání. Toto „imitování“ pochodu či stavů v lidském mozku fyzikálními procesy je umožněno společnou hmotnou podstatou obou ústrojí zde fungujících. Právě tím, že nejvyšší formy pohybu hmoty, jako je např. myšlení, zahrnují v sobě formy nižší, je dána možnost konstruovat nakonec i složitá kybernetická ústrojí, která dovedou rozhodovat i ve velmi složitých situacích. (Viz předmluvu akad. A. KOLMANA k českému překladu knihy W. ROSS ASHBY, *Kybernetika*, Orbis, Praha 1961.)

První pokusy člověka usnadnit si práci při provádění elementárních aritmetických operací užíváním jednoduchých i složitějších počítačích strojů a později také dosažení možnosti přenechat stroji dokonce určování dalšího postupu při složitém výpočtu souvisí s možností *algoritmizace* jistých druhů intelektuální činnosti. Těmito otázkami se zabývají články [2] a [3] v tomto časopise, a to jednak se zřetelem na řešení úloh na samočinných počítačích, jednak principiálně. Odkazují čtenáře též na knížku [4]. Nám půjde o jiné otázky. Řekněme jen, že lze samočinných počítačů užít pouze pro úlohy, jejichž řešení lze „naprogramovat“, tj. lze sestavit algoritmus pro jejich řešení ve formě programu. Je přitom nepodstatné, že část práce, a to nikoliv nutně menší, při sestavení definitivního programu může vykonat sám počítač. (O principech *automatického programování*, které se těmito problémy zabývá, se může čtenář poučit v každé obsažnější knize o programování; viz např. [5], [6], [7].)

Co je možno říci o charakteru lidského myšlení z tohoto hlediska? Není možné najít nějaký universální algoritmus, který by v sobě zahrnoval všechny pochody, které se vůbec mohou odehrát v lidském mozku? První pokusy v tomto směru jsou starého data. Za časů Aristotelových i u starověkých Číňanů a Indů byla zformulována základní pravidla logiky v rámci pokusu formalizovat lidské myšlení. Nelze tedy nakonec sestavit soupis pravidel, který by jednou provždy vyřešil tento problém? Automat, který by se řídil příslušným algoritmem neboli programem, by byl schopen imitovat lidské myšlení vcelku.

Lidé však nemyslí podle formální logiky. Nevyvozují své soudy cestou formálního odvozování, obvyklého ve formální logice, tj. pomocí postupného nahrazování jedné formule druhou. (Viz [3].) Pro lidské myšlení je charakteristickým znakem jeho *obsahovost*, tj. má svou sémantickou stránku. Už z těchto důvodů nelze mít zato, že lidské myšlení má čistě algoritmický charakter. Existenci automatů, které na základě jistých algoritmů napodobují některé druhy činnosti, která byla do nedávna považována za doménu lidského mozku, nelze proto považovat za důkaz algoritmického charakteru myšlení. (Viz С. Л. Яновская v předmluvě k ruskému překladu knihy [8].)

„Nemůžeme představit, vyjádřit, přeměřit, zobrazit pohyb, aniž bychom přerušili spojitě, zjednodušili, zhrubili, rozdělili, zabili živé. Popis pohybu myslí je vždy zhrubení, umrtvení, a ne pouze myslí, ale i vnímání, a ne pouze pohybu, ale každého pojmu... Zákon zachycuje nehybné, — a proto zákon, každý zákon je úzký, neúplný, přibližný.“

Takto V. I. LENIN postihuje jádro dialektiky. I když se tedy jednání člověka řídí objektivními zákony, nezávislymi na jeho vůli, přece jenom dialektický charakter poznání je příčinou toho, že každý soupis zákonů neboli pravidel postihuje v nejlepším případě jen okamžitý stav vývoje lidského myšlení, které samo je věčně v pohybu.

Pokusme se tedy vniknout do problému tak, že si vhodným způsobem vymežíme, definujeme, co rozumíme myšlením. Touto cestou se dal A. TURING v knize [8]. Ukazuje nejprve, že je nemožné odpovědět na otázku, zda může automat myslet, jestliže chceme slovům „automat“ a „myslet“ dát ten smysl, v němž se obvykle užívají v hovorové řeči. Nahrazuje tedy tento problém jiným, který je podle jeho slov s ním těsně spjat, ale je vyjádřen slovy s poměrně přesným smyslem. Zkoumá pak principiální možnost sestrojení a vlastnosti automatu, který by byl schopen s poměrně dobrým výsledkem hrát jistou hru. Automatem přitom rozumí tzv. *Turingův automat*, který je jedním z nejpřirozenějších zpřesnění pojmu algoritmu. (Viz [2] a [4].) Prováděné úvahy pak vyznívají ve prospěch kladné odpovědi na položenou otázku. Autor nepoužívá přitom přímé metody, nýbrž polemizuje s názory, podle nichž kladná odpověď na otázku neexistuje. „*Čtenář pravděpodobně už vycítil, že nemám zvláště přesvědčivé argumenty pozitivního charakteru ve prospěch svého vlastního přístupu k věci. Kdybych měl takové argumenty, netrápil bych se tak, rozbíraje chyby, obsažené v názorech, opačných k mému vlastnímu.*“ Těmito slovy autor odpovídá na námitky, které by mohly vzniknout proti nepřímému způsobu řešení položeného problému. Zbývá jen připojit, že snaha řešit nějaký problém v podstatě vymezením pojmu (např. pojmu „myslet“ u Turinga) vede někdy na velmi pohodlnou cestu. Tímto způsobem se dají např. snadno řešit i třídní problémy, jestliže shrneme kapitalisty i dělníky pod společný název „výrobci“.

Velká a nesporná Turingova zásluha záleží v tom, že jako první velmi přirozeným způsobem upřesnil pojem algoritmu tak, aby se o něm dala vyslovit tvrzení, která jsou matematickými větami. Na základě *upřesnění pojmu algoritmu* mohly být odvozeny hlubké výsledky, týkající se existence *algoritmicky nerozhodnutelných problémů*. A. A. MARKOV dokázal neřešitelnost obecného problému reprezentovatelnosti matic, P. S. NOVIKOV nerozhodnutelnost obecného problému izomorfismu grup ([9]). Tyto a další výsledky sovětských matematiků se opírají o významné zpřesnění pojmu algoritmu, provedené A. A. Markovem. (Blíže o algoritmicky nerozhodnutelných problémech viz ve [3] a [4].) Existence algoritmicky nerozhodnutelných problémů v matematice znovu ukazuje na nemožnost existence univerzálního algoritmu, který by obsáhl celé lidské myšlení.

Považujeme tedy za nemožné najít soubor pravidel, algoritmus či program, který by mohl být podkladem pro imitování práce lidského mozku v dosti širokém smyslu, třeba matematického myšlení. Opřeme se tedy o společnou hmotnou podstatu orgánu myšlení, mozku, a umělého automatu, třeba samočinného počítačícího stroje, abychom našli podklad pro vysvětlení analogie. Neboť i když musíme říci, že umělé organismy (kybernetické stroje) nemyslí, je nesprávné tvrdit, že se nedá najít vůbec žádná ob-

doba jejich činnosti s mozkovou prací. Takové chápání věci by vedlo k vitalismu a předem by vylučovalo možnost nějakého vědeckého výkladu nesporné možnosti imitace některých funkcí nervové soustavy automatem.

Téměř všechny samočinné počítače, které jsou dnes v provozu, operují s čísly vyjádřenými ve dvojkové soustavě. Správnější je ovšem říci, že počítač si zakóduje dvojková čísla pomocí příslušných stavů soustav jistých svých elementů. Charakteristickou vlastností těchto elementů je, že se mohou nacházet ve dvou ostře odlišitelných stavech a tak fyzikálně realizovat dvojkové cifry 0 a 1. Přechod z jednoho stavu do druhého je buďto následek jistého impulsu, nebo následek vymizení tohoto impulsu. U elektronkových počítačů jsou takovými elementy elektronky nebo trigery sestavené z elektronek. V novější době se místo elektronek začíná používat elementů polovodičových, diod nebo tranzistorů. Vlastnost nějakého elementu (jakožto většího celku), že se může nacházet pouze ve dvou ostře odlišitelných stavech, vystihujeme rčením, že se řídí principem „*vše nebo nic*“. Pro zřejmou souvislost tohoto principu s možností elementu kódovat dvojkové cifry, a tedy s možností ústrojí sestaveného z těchto elementů zakódovat dvojková čísla, mluvíme o *číslicovém charakteru* elementu nebo ústrojí. Ukážeme si, proč lze říci, že *činnost nervové soustavy člověka má prima facie číslicový charakter* ([10], [11]).

Základním elementem nervové soustavy je *nervová buňka* neboli *neuron*. Tvoří ji tělo buňky, z něhož vybíhají vodící nervová vlákna neboli *axony*, zakončené *synapsami*. Synapse přiléhají buďto na tělo, nebo na některé druhy axonů (tzv. *dendrity*) jiných neuronů. Nevylučuje se možnost, že synapse přiléhá na část povrchu vlastního neuronu. Normální funkcí neuronu je vytváření a předávání *nervového impulsu* čili *podráždění* nebo *excitace*. Stav podráždění neuronu je výsledkem dosti složitého děje. Uplatní se zde procesy elektrického, chemického i mechanického rázu v těle, v povrchové vrstvě i ve vláknech neuronu. Vzhledem k malým rozměrům orgánů, v nichž dochází k těmto dějům, nedá se stanovit ostrá hranice oddělující chemické děje od mechanických apod. Pro jednoduchost se zpravidla považuje proces excitace za elektrický děj. Jeho přenos na jiné neurony prostřednictvím axonů a synapsí je obdobou přenosu elektrického proudu vedením. Příčinou podráždění většiny neuronů je právě tento přenos impulsů od jednoho excitovaného neuronu ke druhému. Všechny děje, které probíhají v neuronu při jeho podráždění, jsou zvrtné. Po jisté době se totiž neuron vrací automaticky do stavu klidu.

Popis hlavní funkce neuronu byl učiněn za velmi zjednodušujících předpokladů. Naším cílem bylo však přesvědčit se o tom, že neuron je element, který se může nacházet právě v jednom ze dvou ostře odlišitelných stavů, a to buďto ve stavu klidu, nebo ve stavu podráždění. Plně rozvinutý nervový impuls, vzniklý v neuronu, je přes svou složitost *jednoznačnou odpovědí* na stimuly různého druhu. Z toho, co bylo velmi zhruba a zjednodušeně řečeno o základních elementech nervové soustavy, je patrna analogie jejich funkce s funkcí příslušných elementů samočinných počítačů. Podle principu „*vše nebo nic*“ dochází k přechodu z jednoho stavu do druhého nebo k setrvání v jednom ze dvou možných stavů v důsledku jistých přesně vymeze-

ných kombinací impulsů přicházejících z vnějšku. Tuto okolnost vystihujeme slovy, že nervová soustava má na první pohled číslicový charakter.

2. SMÍŠENÝ CHARAKTER ŽIVÉHO ORGANISMU

Při podrobnějším zkoumání pochodů v nervovém systému živého organismu se ukazuje, že věc není zdaleka tak jednoduchá, jak by se mohlo zdát podle toho, co bylo řečeno v předcházející části. V *teorii neuronových sítí* je potřeba už při realizaci elementárních logických funkcí pomoci elementů, které jsou idealizovanými neurony, vzít v úvahu pojem tzv. *excitačního prahu*. Předpokládejme např., že k neuronu přiléhají svými synapsemi dva axony, vedoucí od druhých dvou neuronů. Stačí-li k excitaci tohoto neuronu předání jediného impulsu prostřednictvím axonu, realizuje uvažovaný element logickou disjunkci. Dojde totiž ke vzniku impulsu právě tehdy, projde-li podráždění alespoň jedním z přiléhajících axonů. Zvýšíme-li excitační práh v tom smyslu, že ke vzniku podráždění bude nutný současný příchod dvou impulsů, máme uvažovaným neuronem realizovanou logickou konjunkci. Zkušenost ukazuje, že některé synapse mají naopak účinek tlumící a ne budící. Tím se pojem excitačního prahu ovšem dále zkomplikuje. Podrobněji o tom viz v [10].

Ve skutečnosti nekončí na neuronu dva axony vycházející z jiných neuronů. Mohou jich být stovky, přičemž některé mají tendenci budící, jiné tlumící. Při vzniku impulsu záleží pak jednak na *prostorovém rozložení* příslušných synapsí na povrchu neuronu, jednak na *časovém sledu* přicházejících impulsů. Za „současné“ ve smyslu možného skládání svých účinků se mohou považovat pouze impulsy, které následují po sobě v dostatečně krátké době (tzv. *doba sumace*). Kromě toho má neuron tendenci ke *stabilitě*. Od jeho podráždění musí uplynout určitá doba (*relativní refrakterní perioda* o délce asi $1,5 \cdot 10^{-2}$ sec), nežli je opět schopen reagovat normálním způsobem, tj. vydat impuls za obvyklých podmínek. Ještě před přechodem do úplného stavu klidu, asi po $0,5 \cdot 10^{-2}$ sec (*absolutní refrakterní perioda*), je schopen reagovat, ovšem nestandardním způsobem. Může vydat impuls, ale jako následek silnějšího podráždění. Má tedy během této doby vyšší excitační práh nežli normálně. Ke změně prahu mohou vést i jiné vlivy, např. humorálního charakteru.

Existují neurony, u nichž podráždění není důsledkem předání impulsů od jiných neuronů. Jde o tak zvané *receptory*. Jsou to buďto příslušné nervové buňky ve smyslových orgánech (*vnější receptory*), které reagují na vlivy vnějšího prostředí, nebo to jsou nervové buňky vnitřních orgánů (*vnitřní receptory*). Ty zprostředkují předávání informace o okamžitém stavu těchto orgánů do ústředního nervového systému. Zde také má důležitou úlohu excitační práh. Avšak kritéria prahového typu nejsou jedinými možnými podmínkami pro vznik podráždění. Tak např. některé z receptorů ve zrakovém nervu reagují nikoliv na intenzitu osvětlení, nýbrž na její změnu (přechod ze tmy do světla apod.). Úlohu rovněž vjemu, tj. vlastní hodnoty jeho intenzity, přebírá zde hodnota její derivace.

Uvedené okolnosti ztěžují ovšem podstatným způsobem vytvoření jednoduchého

obrazu nervového systému člověka, popř. jenom vyšších živočichů. Ale ani vlastní proces excitace, probíhající v samotném neuronu, není tak jednoduchý, jak jsme výše předpokládali. Již při malých, „podprahových“ impulsích z vnějšku dochází k jistým změnám uvnitř neuronu a v jeho povrchové vrstvě. Intenzita těchto změn, které jsou, jak víme, elektrického, chemického a mechanického charakteru, roste nejprve lineárně v závislosti na síle přicházejícího impulsu. Potom, ještě stále při podprahových intenzitách podráždění, podřizuje se reakce složitějšímu nelineárnímu vztahu, aniž dochází ke „skoku“ do druhého stavu. Ve skutečnosti je i elektronka v tomto smyslu složitým analogovým mechanismem, který reaguje spojitě (lineárně či nelineárně) na přicházející impulsy. Jeví se tedy oba elementy, neuron i elektronka, orgány typu „vše nebo nic“ pouze za jistých speciálních podmínek. Nejsou tedy orgány výlučně tohoto typu. To však není podstatné. Takový element bychom ve skutečnosti asi nenašli. Možná, že při některých dějích vyšetřovaných v kvantové fyzice bychom se setkali s příklady náhlého přeskočení z jedné formy existence hmoty do druhé. Nám však postačí, když za orgán typu „vše nebo nic“ považujeme orgán, vyhovující dvěma podmínkám. Předně funguje jako mechanismus tohoto typu při splnění jistých podmínek. Za druhé jsou tyto podmínky splněny při normálním využití orgánu. Jinak řečeno, představují normální stav organismu, jehož částí je náš orgán.

Snadno nahlédneme, že jsme vlastně přijali *axiomatické hledisko* pro zkoumání přirozeného či umělého „organismu“. Považujeme elementární orgán za „černou skříňku“, která na určité kombinace impulsů odpovídá určitým standardním způsobem. O to, co se děje přitom uvnitř, se (pro naši potřebu) nemusíme starat. Konstrukce organismů určených k plnění jisté funkce a složených z těchto elementů je pak kombinatorická záležitost. Z tohoto hlediska se nám *teorie automatů* jeví jako část formální logiky. Uvidíme na příslušném místě, že toto hledisko je nedostávající.

Všechny složitosti, se kterými jsme se při snaze o poznání zákonitostí funkcí živého organismu setkali, a samozřejmě mnohé další, si vynucují ve větší či menší míře odklon od nazírání na tento organismus jako na podřízený pouze číslicovému principu. K utvoření dokonalejšího obrazu potřebujeme ještě další principy. Jako první přistupuje *princip analogový*. Počítací stroje a jiné mechanismy, které fungují pouze na základě tohoto principu, jsou všeobecně známy. Jsou to např. logaritmická pravítka, různé integrály, diferenciální analyzátoři. V organismu se však setkáváme se *současným uplatněním obou dosud uvažovaných principů*. Převážná část pochodů v živém organismu probíhá tak, že se zde postupně střídají děje číslicového a analogového charakteru. Např. z centrální nervové soustavy přijde impuls, který způsobí zkrácení svalu. Tento impuls, přicházející po nervové dráze, je číslicového charakteru jakožto děj, jehož se účastní některé nervové buňky vytvářením a předáváním impulsů. Samotné zkrácení svalu je proces analogového charakteru. Tento proces vyvolává opět vznik nervového impulsu, jehož prostřednictvím se dostává do mozku informace o vykonaném pohybu, atd.

Živý organismus je tedy *smíšeného charakteru* v tom smyslu, že se v něm uplatňuje

současně princip číslicový i princip analogový. V samotném nervovém systému převažuje princip číslicový. Zajímá nás nyní, jak soustava, jejíž základní části pracují podle principu „vše nebo nic“, předává informaci o změnách analogového charakteru, tj. o změnách spojitých. Jakým způsobem přenáší např. příslušný nerv do mozku informaci o výši krevního tlaku? Řekli jsme už, že musí uplynout jistá doba mezi dvěma plně rozvinutými impulsy neuronu. Tato doba se může poněkud zkrátit, dojde-li k intenzivnějšímu podráždění. Je-li neuron vystaven soustavnému podráždění, jako je tomu v našem případě, odpovídá periodickým vytvářením a vysíláním impulsů. Jejich frekvence je v jistých hranicích monotonní funkcí příslušné spojitě veličiny. Tak např. při vysokém tlaku odpovídá nerv na podráždění jednou za 8 msec, tj. předá 125 impulsů za vteřinu, kdežto při nižším tlaku reaguje pouze po 14 milisekundách, tj. předá 71 impulsů za vteřinu. Jde tedy o jistou formu *frekvenční modulate*. Práce nervu je v těchto případech založena na využití *sumace* a nikoli na vyjádření veličin v nějaké číselné soustavě (dvojkové nebo jiné).

3. SROVNÁNÍ

V samočinném počítači se uchovávají a přenášejí čísla vyjádřená v nějaké číselné soustavě (nejčastěji dvojkové). Příklad uvedený na konci předcházející části nám ukázal, že v živém organismu je přenášení číselných informací zabezpečeno periodickým nebo skoro periodickým vytvářením a předáváním impulsů. Tento způsob je ve své podstatě statistický, tj. hlavní význam nemá poloha jednotlivých cifer, ale statistické charakteristiky jejich výskytu. Umožňuje dosažení větší přesnosti a spolehlivosti i při výskytu poruch během práce. Je-li velké číslo vyjádřeno jako součet jednotek (které jsou zde představovány jednotlivými impulsy), znamená vynechání jednoho impulsu velmi malou nepřesnost. Naproti tomu při vyjádření ve dvojkové soustavě se vynecháním jedné cifry ve vysokém řádu změní toto číslo podstatně. Ovšem ústrojí, které používá prvního, statistického principu, předpokládá dosti velký stupeň složitosti ve smyslu počtu základních elementů. Uvedme několik údajů pro kvantitativní srovnání přirozených a umělých systémů.

Po vnější stránce se liší základní elementy nervového systému od základních elementů umělého „organismu“, např. od elektronek, svými rozměry a celkovým svým počtem. Centrální nervový systém obsahuje řádově 10^{10} neuronů. Je samozřejmé, že ani do určité míry přesný počet nemůže být zatím udán. Jsou však důvody předpokládat, že skutečný exponent se liší od uvedeného na jednu nebo na druhou stranu o méně nežli o jedničku. Počítáme-li, že mozek zaujímá objem řádově litru, tj. 10^3 cm^3 , dostáváme na jeden neuron přibližně 10^{-7} cm^3 . U lineárních rozměrů jednotlivých neuronů je ovšem situace zcela jiná. Některé z nich, které přenášejí impulsy mezi vzdálenými částmi těla, mají axony, jejichž délku lze srovnat s rozměry celého těla.

Počet elektronek nebo polovodičových elementů u dnešních samočinných počítačů je řádově 10^4 . Zhruba řečeno musíme tedy u nervové soustavy počítat asi s milión-

krát větší složitostí, vezmeme-li za základ pro odhad počty základních elementů. Ke stejnému odhadu dospějeme při srovnání velikostí jednotlivých elementů. Zdá se však, že je vhodnější srovnávat rozměry aktivních částí obou. V prvním případě jde o tloušťku membrány nervové buňky, která je několik desítek mikronů. U elektronky jde o prostor mezi mřížkou a katodou, jejichž vzdálenost je asi 1 mm. Tedy srovnání lineárních rozměrů dává poměr $1 : 10^3$ ve prospěch přirozených orgánů. Ukazatelem je také hustota, s níž je možno jistý počet elementů umístit v daném objemu. Pro tranzistory, u nichž je situace jistě příznivější nežli u elektronek, se udává potřeba 10^5 cm^3 na několik tisíc aktivních orgánů. Srovnáme-li to s výše uvedenou potřebou pro nervové buňky, jsou v tomto směru přirozené orgány 10^8 až 10^9 krát úspornější. Třetí odmocnina odpovídá zjištěnému vztahu mezi lineárními rozměry aktivních částí orgánů.

Rozptyl energie v mozku dosahuje v průměru 10 W, což dává 10^{-9} W na neuron. U elektronky má tato veličina hodnotu 5–10 W, u polovodičových triod má řád asi 10^{-1} W. I z tohoto hlediska dostáváme v průměru číslo 10^8 až 10^9 jako koeficient energetické úspornosti ve prospěch přirozených orgánů.

Ke srovnání efektivnosti je nutno vzít v úvahu ještě časové odhady. Ty vyznívají v neprospěch neuronu. Vezmeme $1/200$ sec jako dobu, která musí uplynout mezi dvěma plně rozvinutými nervovými impulsy. Jako maximum rychlosti, se kterou může pracovat elektronka v počítačím stroji, se za současného stavu techniky udává milión reakcí za vteřinu. Ve skutečnosti není elektronka v samočinném počítači využita takto v plné míře. Pro poměr rychlostí její práce a práce neuronu se udává číslo 1000 nebo o něco větší. Při srovnání potřeb prostorových a energetických jsme dostali řádově jednu miliardu ve prospěch neuronu. Vychází tedy tímto přibližným odhadem miliónkrát větší efektivnost přirozených orgánů proti umělým.

Číslo řádu miliónu dostali jsme výše také při srovnání složitosti orgánů přirozených a umělých. Opírali jsme se přitom o počty základních elementů obou soustav. To je obvyklý postup, chceme-li pojem *složitosti* nějak postihnout. Tím však není vyčerpán obsah tohoto pojmu. J. v. NEUMANN v [8] říká: „...faktor složitosti hraje důležitou roli v každém pokusu pokročit vpřed v teorii automatů, a pojem složitosti, bez ohledu na jeho prima facie kvantitativní charakter, může ve skutečnosti vyjadřovat něco kvalitativního — mít principální význam ...; tento pojem a jeho předpokládané vlastnosti nebyly nikdy přesně zformulovány.“

Snadno si uvědomíme, že ve vztahu k našemu problému má složitost jistý degenerační aspekt. Činnost, kterou vyvíjí stroj, jsme na základě zkušenosti nuceni považovat za jednodušší nežli stroj sám. Domníváme se např., že stroj, který by byl zkonstruován jiným strojem, musí být jednodušší nežli jeho „tvůrce“. Něco jiného však pozorujeme u živých organismů, v přírodě. Vývoj od jednoduchých organismů k dokonalejším ukazuje, že živé organismy se umí vypořádat s onou degenerační tendencí. Objevený rozpor nás nutí zabývat se podrobněji pojmem složitosti. Jeho upřesnění by mělo zřejmě veliký význam v teorii automatů. J. v. Neumann dospěl v tomto směru k jistým výsledkům, a to i kvantitativního charakteru. Opírá své úvahy

o pojem „samoreprodukce“, schopnosti automatu vytvořit nový automat s ním shodný. Vychází z pojmu automatu ve smyslu Turingově. Při stručném popisu jeho postupu a výsledku se však obejdeme bez tohoto pojmu.

Počet různých elementárních částí, z nichž lze konstruovat automaty v uvažovaném smyslu, se při rozumném kompromisu o požadavcích, které na tyto části máme, odhaduje asi na tucet. Je principiálně možno zkonstruovat automat, který umístěn do zásobárny obsahující dostatečný počet elementárních částí sestaví z nich nový automat s ním zcela shodný? Kladnou odpověď na položenou otázku dává tato úvaha.

Označme A automat, který je schopen vyrobit jakýkoliv libovolný stroj, dodá-li se mu program výroby. To není nic nemožného. Pod automatem A si můžeme představit plně automatizovanou výrobní linku nebo celý závod, jehož práce je řízena samočinným počítačem. Výrobní postup pro požadovaný stroj je zakódován ve tvaru programu, který se vloží do počítače. Označme tento program P . Přitom je myslitelné, že vyrobený stroj je větší a složitější nežli sám A . Zvětšení rozměrů a složitosti se dosáhne změnou programu P . Předpokládejme v dalším, že automatu A využijeme takto k sestrojení automatů, které budou mít opět schopnost přijmout program P a pracovat podle jeho instrukcí.

Označme B automat, který je schopen zhotovit kopii programu P , je-li mu tento program dodán. Je-li program P např. děrná páska, je B automat na kopírování této pásky. Obecněji si můžeme představit pod B automat, který je schopen vytvořit kopii systému, který je mu dodán.

Spojíme automaty A a B navzájem a s řídicím mechanismem C , který má následující funkci: Je-li automatu A dodán program P , C přivede A k činnosti. Jakmile A skončí práci podle programu P , C dá program P automatu B ke zkopírování. Hotovou kopii vloží do automatu zhotoveného automatem A podle programu P . Potom oddělí vyrobený automat od agregátu $A + B + C$ a dá mu tak „samostatnou existenci.“

Označme D agregát $A + B + C$. Předpokládejme, že program P popisuje sestrojení D . Označme konečně E agregát vzniklý z D vložením programu P do jeho části A . Je zřejmé, že E má schopnost samoreprodukce. Snadno se také zjistí, že v jeho popisu ani práci nejsou žádné logické spory.

Program P má funkci genů při vzniku živého organismu. Analogie zde není ovšem přesná, neboť geny přenášejí jen rámcovou informaci, obecné rysy, na jejichž základě se utvářejí konkrétní vlastnosti nového jedince. Jde tedy o jakési zjednodušené schéma, kterého umí využít organismus vhodným způsobem. Umělé automaty mají ještě hodně daleko do schopnosti využívat takto zjednodušených programů. Přes tyto nedostatky analogie je možno se zamyslet nad tím, co znamenají pro náš automat případné změny, které v něm nastanou během práce. Změny systému E a speciálně programu P mohou vést ke vzniku systémů, které nejsou shodné s původním. Dochází ke vzniku „mutantů“. Jestliže místo programu P uvažujeme program P' , který kromě popisu výroby agregátu $D = A + B + C$ obsahuje ještě popis výroby dalšího

systemu F , dostaneme z E agregát, který produkuje systémy složitější, nežli je sám. Dojde-li k mutaci v rámci F , dostáváme systémy, které mohou být „dokonalejší“ a zachovávají si stále schopnost samoreprodukce, neboli neletální mutanty.

Jsme nyní k otázce upřesnění pojmu složitosti oprávněni říci toto: *Na nižším stupni skrývá tento pojem v sobě degenerační tendenci. Existuje však jistá minimální úroveň, od níž počínaje přestává být tato tendence převažující.* Překonání této úrovně dává možnost konstruovat automaty, které mohou produkovat nové automaty složitější nežli původní.

Do cesty realizace složitých automatů ve smyslu provedené teoretické úvahy se stává vážné překážky. Automaty, které stavíme, jsou co do velikosti a spotřeby energie monstry ve srovnání s živými organismy. Materiály, které jsou k dispozici za současného stavu techniky, nedovolují zhotovit elementy tak malé a umístit je tak blízko sebe, jak by bylo potřeba. Živý organismus má silnou tendenci k regeneraci a zachovává si schopnost vykonávat potřebné funkce i při dosti vážných poškozeních. S ničím takovým se nesetkáváme u systémů, sestavených z elementů, které jsou zhotoveny z kovu, skla, umělých hmot apod. Markantním důsledkem těchto rozdílů mezi umělými a živými organismy je *různý přístup k odstranění následků chyb*, které se při jejich práci vyskytnou.

Metoda sumace, které používá nervová soustava k přenášení číselných údajů, je méně efektivní nežli vyjádření čísel v nějaké soustavě, např. dvojkové. Upozornil jsem však už na začátku této třetí části na to, že podstatně zvyšuje spolehlivost systému, který jí používá. Umělé automaty nemohou zatím dosáhnout složitosti, nutné k tomu, aby při používání sumačního principu bylo možno řešit problémy, které se jim k řešení dávají. Okolnostmi vynucené kódování informací používáním číselné soustavy vede přímo ke známému nedostatku počítačů. *Chyba, která se během výpočtu vyskytne, má ve velkém procentu případů podstatný vliv na další výpočet a může zcela znehodnotit výsledek.* Zatímco organismus pracuje bezpečně dále a odstraní si případné chyby ve svém „volném čase“, snažíme se u samočinných počítačů pomocí různých způsobů kontroly objevit nesprávnost co nejdříve. Tedy zatímco v organismu mají jednotlivé chyby *mizivý význam*, snažíme se u samočinných počítačů *učinít vzniklou chybu co nejzřejmější*. Pak je jí možno odstranit ještě před tím, než se objeví druhá chyba. Rychlý samočinný počítač provede při řešení typické úlohy řádově 10^{12} elementárních operací. Při tomto odhadu se rozkládají ovšem operace, obsažené v operačním kódu počítače, na další elementární úkony. Abychom mohli počítač prohlásit za spolehlivý, musela by pravděpodobnost chyby při každé této elementární operaci být dostatečně malá vzhledem k 10^{-12} . Protože k dosažení takové spolehlivosti elementárních orgánů máme ještě daleko, je průběžná kontrola práce počítače nutná.

Vhodným způsobem zakódovaný přesný a úplný návod má při činnosti automatu podstatnou úlohu. To jsme viděli např. při úvaze o možnosti samoreprodukce automatů. Pro označení tohoto návodu, který můžeme považovat za jednu z forem vyjádření algoritmu řešení příslušné úlohy, užili jsme názvu *program*. To je označení běžné

jak u samočinných počítačů, tak u jiných druhů automatů, např. automatických obráběcích strojů. V činnosti nervového systému můžeme za *instrukce*, tj. za rozkazy k jednotlivým elementárním operacím, pokládat jisté kombinace nervových impulsů, přicházejících po určitých nervových vláknech. Obecně mohou funkci instrukcí převzít jakékoli vlivy, které mají za následek nějakou cílevědomou činnost soustavy.

Zvláštní pozornost zaslouží rozdíl mezi programy pro automaty a programy pro činnost nervové soustavy člověka. Při používání samočinných počítačů jsou dosud nejčastější *úplné programy*. To znamená, že jednak obsahují instrukce pro každý jednotlivý úkon, tj. operaci, obsaženou v operačním kódu počítače, jednak jsou všechny instrukce vyjádřeny v kódu počítači bezprostředně srozumitelném. K tomu, aby člověk vyřešil nějakou úlohu, není zřejmě nutné dodat mu takový návod, v němž by bylo řešení rozčleněno na jednotlivé elementární kroky. Centrální nervová soustava člověka umí rozřešit úlohu na základě zadání, které není sestaveno při bezprostředním užití „operačního kódu“ této soustavy. Formulace úlohy (nebo jejího řešení) obsahuje buďto slovně, nebo pomocí formulí vyjádřené matematické a logické pojmy a vztahy. Přitom jsou důvody se domnívat, že jazyk matematiky ani logiky nejsou bezprostředně v té formě, jak jsou běžně známy, podkladem pro operační kód nervové soustavy. Dá se tedy očekávat, že se zde v příslušné fázi uplatní obdoba toho, co nazýváme *interpretačními programy*.

Turing dokázal r. 1927, že je možné pomocí vhodného programu přinutit daný počítací stroj k tomu, aby pracoval tak, jako by byl nějakým jiným automatem, třeba jiným počítačem. Toto tvrzení se opírá o principiální možnost existence tzv. *univerzálního Turingova automatu*. Po vložení příslušného interpretačního programu je univerzální automat připraven pracovat jako speciální Turingův automat, určený pouze k řešení úlohy jistého typu.

Zůstává dosud neodůvodněno tvrzení, že „jazyk“ matematiky není „jazykem“ mozku. Je velmi těžké si představit formulaci složitější úlohy vůbec bez použití matematických vztahů a pojmů. Pro formulaci některých jejích částí můžeme vystačit naopak pouze s logickými termíny. Musí tedy mít lidský mozek, považovaný v tomto smyslu za druh automatu, svou aritmetickou i logickou část. Vzniká otázka po *úrovni přesnosti aritmetické části*. Vzhledem k tomu, že tento „automat“ řeší bezpečně velmi náročné problémy, jejichž řešení odpovídá velmi dlouhým výpočtům v počítačích, musí u něho být zřejmě zabezpečen vysoký stupeň přesnosti.

U dnešních samočinných počítačů není ničím zvláštním přesnost řádu 10^{-10} až 10^{-12} . Při tom způsobu kódování číselných informací, kterého používá nervová soustava (sumační princip), nemůžeme očekávat přesnost větší než 10^{-2} , popř. 10^{-3} . Vzhledem k počtu operací, které je nutno provést při řešení jen poněkud komplikovanější úlohy, nemohla by být u žádného samočinného počítače při takovéto přesnosti zabezpečena spolehlivost práce. Přesto se vyznačuje činnost nervové soustavy vysokou spolehlivostí. Důvod spatřujeme právě ve statistickém principu přenosu informace. Tím, že potlačila přílišný význam přesné polohy (a také výskytu nebo vymizení) jednotlivých impulsů, dosáhla příroda *při snížení aritmetické přesnosti*

velkého zvýšení logické spolehlivosti. Není vyloučeno a je dokonce velmi pravděpodobné, že se přitom využívá ještě jiných způsobů statistického přenosu. Nerv je tvořen velikým počtem nervových vláken, z nichž každé může přenášet posloupnosti impulsů. Určitých statistických vztahů mezi takovými posloupnostmi může být opět využito k přenosu jisté informace. Zcela přirozeně se odtud vyvozuje poznatek, že nervová soustava užívá kódu, který se v podstatě liší od kódu běžně používaného v aritmetice. Není vyloučeno, že se zde setkáváme s nějakou dosud pro nás neobvyklou formou vyjádření matematických a logických zákonů. Interpretací program, o němž byla řeč výše, překládá pak z druhotného jazyka matematiky do prvotního jazyka, skutečně používaného v centrálním nervovém systému.

Na poněkud jiný způsob souvislosti práce mozku s principy automatického programování poukazuje O. H. SCHMITT v [1]. Uvádí možnost existence „biologických ekvivalentů automatických podprogramů.“ Ideje, principy, ideály, předsudky, intuice, návyky apod. vykonávají v příslušném stadiu procesu v mozku obdobnou práci jako standardní podprogramy během výpočtu na samočinném počítači.

Ve svých úvahách považujeme mozek za orgán funkčně a strukturálně analogický automatu složenému z elementů typu „*vše nebo nic*“. Sotva si můžeme představit, že by takovýto složitý orgán fungoval, aniž by měl schopnost nazývanou *paměť*. Tato schopnost mozku reprodukovat a používat při své činnosti data a fakta, která nejsou právě dodávána zvenčí prostřednictvím receptorů, je dávno známa. Pro realizaci paměti, která je jednou z podstatných částí samočinných počítačů od samého počátku jejich existence, se použilo různých fyzikálních principů. Základní důležitost paměťových orgánů u samočinných počítačů, tj. nemožnost sestrotit takovéto automaty bez jejího použití, je také jedním z důvodů k domněnce, že pro centrální nervovou soustavu je paměť stejně důležitá. Avšak o její *realizaci* nebo *umístění* v centrálním nervovém systému nevíme dosud vůbec nic. O některých domněnkách se zmíníme v další části našeho pojednání.

Teorie informace nám umožnila kvantitativní určení *množství informace*, která je uchovávána v nějakém orgánu nebo přenášena kanálem. Sdělení výsledku pokusu obsahuje tím více informace, čím menší pravděpodobnost má jev, který nastal jako výsledek pokusu. Za jednotku pro množství informace byl přijat jeden *bit*, tj. množství informace obsažené ve sdělení o výsledku pokusu, jehož výsledkem mohou být dva jevy se stejnou pravděpodobností 1/2. Jakákoliv informace může být ohodnocena určitým počtem těchto základních jednotek. Tak např. údaj určující jednu desítkovou číslici obsahuje asi $3,33 = \log_2 10$ bitů. Paměť schopná pojmout a zachovat 1000 osmimístných desítkových čísel má kapacitu $1000 \cdot 3,33$ bitů. Na stejném základě může být zhodnocena i kapacita pro jiné druhy paměti určené pro zachování jiných druhů informace, jako je třeba geometrický tvar, barevný odstín apod.

Je zcela přirozený pokus o odhad kapacity paměti centrálního nervového systému a její srovnání s kapacitou paměti současných samočinných počítačů. U běžných počítačů je to 10^5 — 10^6 bitů. Při odhadu pro mozek musíme ovšem vyjít z nějakých předpokladů opřených o zkušenost. J. v. Neumann postupuje asi takto ([1]):

Jsou jisté důvody se domnívat, že se v centrální nervové soustavě člověka uchovává vše, co jednou tato soustava zaznamenala, tj. co přijala prostřednictvím vnějších a vnitřních receptorů nebo co vytvořila během své činnosti. Považujeme pak každý neuron v tomto smyslu za receptor, schopný pojmout za vteřinu asi 14 impulsů, tj. dvojkových cifer neboli bitů. Dostáváme tak $14 \cdot 10^{10}$ bitů za vteřinu. Za 60 let lidského života je to přibližně $14 \cdot 10^{10} \cdot 2 \cdot 10^9 = 2,8 \cdot 10^{20}$ bitů. Jiní autoři snižují tento vysoký odhad na 10^{13} — 10^{15} bitů.

Nevíme dosud, ve které části centrální nervové soustavy je paměť uložena a jak je tato schopnost realizována fyzikálně. Uvedeme některé domněnky ([11], [1]). Nejdříve ke způsobu realizace. Je možné, že častá excitace jistého neuronu může pozměnit jeho excitační práh. Jeho případným trvalým snížením se usnadní stimulace příslušné buňky. Tím by jistý druh paměti záležel ve změně podmínek stimulace. V podstatě stejná úvaha vede k možnosti změny charakteru spojů mezi buňkami. U některých axonů se může častým používáním zvětšit propustnost pro přenášení impulsů, kdežto jiné se dlouhotrvajícím klidem stanou pro další přenos téměř nezpůsobitelné. Tím se jisté části nervového systému změní v průběhu času a tato změna může znamenat realizaci paměti. Při úvaze o samoreprodukci jsme poukázali na schopnost genů uchovávat a přenášet jistý druh informace. Setkáváme se tedy také s možností realizace paměti pomocí chemické struktury některých částí organismu.

Samočinný počítač využívá při své činnosti podstatně tzv. *operační paměti*. To je krátkodobá paměť, fungující po dobu provádění jedné oddělené operace. Uskutečňuje se využitím těch elementárních aktivních orgánů, které provádějí jednotlivé operace, tedy pomocí elektronek nebo polovodičových prvků. To vede k domněnce, že jistý druh krátkodobé paměti, potřebné např. při rychlém počítání z paměti, se uskutečňuje excitací nějaké skupiny neuronů, které se stimulují navzájem pomocí cyklických propojení. Na samočinném počítači IBM-701 byly provedeny pokusy, které potvrzují, že při vhodných propojeních dojde v příslušné kolonii buněk po excitaci několika z nich k rozšíření vzruchu na celou kolonii a potom k jeho vyhasnutí v době, která odpovídá experimentálně zjištěným datům pro funkci krátkodobé paměti. V libovolný okamžik je v mozku velký počet takovýchto excitovaných kolonií současně ještě větší množství kolonií v klidu. Vzniká domněnka, že myšlenková činnost záleží v kaleidoskopickém střídání vzruchů mezi těmito koloniemi.

Sledování analogie mezi počítačícími stroji a nervovou soustavou při hledání možností fyzikální realizace paměti v této soustavě nás nutí si uvědomit jeden závažný fakt. Pouze u prvních, v dnešním smyslu nedokonalých počítačů (ENIAC), se použilo při konstrukci paměti výlučně aktivních elementů (trigerů). Paměťová ústrojí současných počítačů jsou tvořena z elementů podstatně různých od jeho aktivních orgánů. Užívá se magnetických bubnů, feritových jader a jiných principů. Není tedy zřejmě nutné se domnívat, že k fyzikální realizaci paměťové schopnosti užívá centrální nervová soustava svých základních aktivních elementů, tj. nervových buněk. Uvážíme-li, že takové orgány užity jako základní v paměťovém ústrojí jsou neobyčejně „drahé“ v libovolném smyslu tohoto slova, jsme oprávněni se domnívat, že si orga-

nismus za dlouhá léta svého vývoje našel jinou možnost, jak zabezpečit své centrální nervové soustavě schopnost paměti. Zatím však o tom nic bližšího nevíme.

V otázce rozložení paměťových orgánů v nervovém systému se přiklání většina badatelů k tomu, že jsou tyto orgány *prostorově široce rozmístěny* v celém systému. Podle jedněch (D. O. HEBB) se informace uchovává v poměrně nevelkém počtu elementů. Podle jiných (O. H. SCHMITT) se paměť uskutečňuje pomocí velmi malých změn v ohromném počtu buněk. Oba tyto způsoby jsou v souhlasu se zjištěným faktem, že se schopnost paměti do jisté míry zachovává i při dosti značném poškození různých částí soustavy. Pro prostorově široké rozložení paměti svědčí i jisté experimenty, jimiž měla být zjištěna místa změn při procesu zapamatování.

Výsledky jiných pokusů ukazují na to, že je nutné rozeznávat několik druhů paměti. Jeden z nich je charakterizován tím, že se zapamatování zlepšuje po každém opakování. Funguje např. při zapamatování si skupin navzájem nesouvisících slov apod. Jako poločas (čas polorozpadu) se zde uvádí 12 hodin. Další druh paměti funguje obdobně tomu, jak si osvojujeme návyky. Zapamatované se upevňuje, dáme-li jí čas k oddechu. Některým lidem se stává, že jim po určitou dobu neustále v hlavě překáží jakási myšlenka nebo představa. Někteří autoři se domnívají, že zde působí další, třetí druh paměti.

Mohli bychom věnovat pozornost ještě mnoha dalším úvahám tohoto druhu. Nic bychom však tím nezměnili na faktu, že nám dosud není nic známo o tom, jaký je materiální základ paměti v nervovém systému člověka. Někteří vědci tvrdí, že se jim podařilo lokalizovat paměť i co do různých druhů u některých nižších živočichů. Výsledky pokusů čekají však na objektivní zhodnocení. A tak se stává, že v rozho-
vorech mezi odborníky, kteří se zabývají kybernetikou, si při vyslovení slova paměť představuje každý spíše magnetický buben samočinného počítače nežli sice nepopíratelnou, ale ve své podstatě málo probádanou schopnost lidského mozku.

4. BUDOUCÍ MOŽNOSTI

Dosavadní automaty, tj. počítačí stroje a jiné prostředky schopné imitovat některé druhy intelektuální lidské činnosti, je možno v podstatě považovat za *kovovou realizaci elementárních logických a aritmetických operací*. Chceme-li jít dále tímto směrem, narážíme na velké těžkosti. O jedné z nich jsme mluvili výše. Jsou to neuspokojivé vlastnosti používaných materiálů. Ty nedovolují sestavovat příliš komplikované automaty, které by byly dostatečně spolehlivé. Další principiální obtíž je intelektuálního charakteru. Formální logika, která je, jak jsme také výše uvedli, základem současné teorie automatů, je *kombinatorická disciplína*. Jako taková je velmi obtížná, dokonce jednou z nejobtížnějších matematických disciplín vůbec. Nemá totiž téměř možnosti využívat už dlouho do podrobností vybudovaných matematických disciplín, operujících s pojmem spojitosti, např. matematické analýzy. Tyto obtíže se přenášejí samozřejmě na teorii automatů, založenou na elementech typu „vše nebo nic“.

Ve formální logice je důležitá tzv. *abstrakce potenciální uskutečnitelnosti* ([12]).

Podle ní, velmi zhruba a nepřesně řečeno, jsou přípustné procesy libovolně dlouhé, jenom když obsahují konečný počet od sebe ostře odlišitelných kroků. To, co vznikne jako výsledek takového procesu, se považuje za tzv. *konstruktivní objekt*. Automaty však konstruueme k tomu, abychom od nich dostali výsledky nikoliv po jakékoliv konečné době, nýbrž po době jistým způsobem shora omezené. Toto omezení je dáno jednak požadavkem *praktického významu výsledku*, jednak požadavky *přesnosti*. Uvědomili jsme si totiž už výše, jak prodlužování výpočetní doby zvyšuje pravděpodobnost znehodnocení výsledku chybami, které se vyskytnou během výpočtu. Je tedy nutné podrobit i princip potenciální uskutečnitelnosti kritice z hlediska teorie automatů.

Ve formální logice se dá jakákoliv logická operace rozložit na elementární logické operace, tj. konjunkci, disjunkci, negaci apod., přímo spjaté s principem „vše nebo nic“. Avšak tyto elementární operace se neuskutečňují v automatech přesně tak, jak s nimi počítá formální logika. Je zde pravděpodobnost, i když většinou velmi malá, ale přece jenom od nuly různá, že dojde k chybě. To znamená např., že se někdy neuskuteční impuls, který by měl nastat. Vezmeme-li v úvahu to, co bylo již řečeno o chybách a jejich vlivu na činnost automatů, ukazuje se nutnost vytvoření takové teorie automatů, která bude proti formální logice schopna se vyrovnat i s touto okolností. Poukázali jsme na příslušném místě na výhody statistického principu přenosu informace v nějaké soustavě. Statistické úvahy jsou však základem pro teorii informace. Teorie informace zcela přirozeně používá matematické analýzy jako prostředku k odvozování svých výsledků. Mohla by tedy snad teorie automatů, která více využívá teorie informace, překonat dva shora uvedené nedostatky. Nemusila by se vyhýbat využití spojitých procesů na jedné straně a mohla by být teoretickým podkladem pro konstrukci automatů, imitujících některé vyšší druhy činnosti nervové soustavy člověka na druhé straně. Konkrétně mám na mysli třeba schopnost člověka dojít velmi rychle k rámcovému řešení problému v hrubých rysech a teprve postupně řešení upřesňovat nebo nakonec zavrhnout.

Je na místě připomenout, že i v dosavadní teorii automatů jsou známy výsledky značného významu. Jako nejdůležitější se uvádí *hlavní rezultat teorie neuronových sítí*, pocházející od W. S. McCULLOCHA a W. PITTSE. Podle něho *každý proces, který může být vyjádřen přesně a jednoznačně pomocí konečného počtu slov, může být uskutečněně vhodnou konečnou formální neuronovou sítí*, tj. automatem sestaveným z orgánů typu „vše nebo nic“. Tím byl na jedné straně učiněn konec pokusům nalézt nějaké specifické funkce nervové soustavy, které a priori vylučují možnost mechanické realizace. Na druhé straně zůstávají ovšem otevřeny další problémy s tím spjaté. Je to např. otázka hmotné realizace příslušné sítě v rámci uvažovaného systému. Především je to však otázka možnosti popisu některých procesů vcelku konečným počtem slov. Tomuto požadavku je možno vyhovět pro jisté oddělené fáze procesu. Úvahy z první části článku ukazují, že jsou problémy, které se ve svém celku této možnosti vymykají.

J. v. Neumann uvádí zajímavý důsledek těchto úvah ([8]). Je nemožné vystihnout

pomocí konečného počtu slov princip, na jehož základě usuzuje člověk na analogii jistých objektů ve smyslu dosti široce pojímaného vztahu analogie. Už jenom snaha popsat usuzování, jehož důsledkem je poznání, že jistý obrazec je trojúhelník, se potkává se značnými obtížemi. Musíme si totiž uvědomit, že jsme schopni označit za trojúhelník nejen rovinný obrazec omezený třemi úsečkami, nakreslenými podle pravítka tužkou na papíře. Strany trojúhelníka mohou být do jisté míry křivé, dokonce nemusí být vůbec vyznačeny. Vnitřek trojúhelníka může být třeba vyšrafován apod. Takto bychom mohli svou úvahu prodlužovat. Na základě takovýchto úvah je vyslovena tato domněnka: *Není nakonec popis struktury* (tj. spojů apod.) *té části nervové soustavy, v níž proces usuzování probíhá, nejjednodušším popisem příslušného principu* (třeba principu analogie)? Z toho by ovšem jako důsledek vyplývalo, že by se v budoucnu měla stát formální logika více neurologií nežli naopak.

To je ovšem dosud hypotetická možnost vzájemného ovlivňování a pomoci studia nervové soustavy teorii automatů, popřípadě naopak. Viděli jsme však zcela nesporné příklady plodnosti takové pomoci. Je dobře si uvědomit, že není nutné pro uskutečnění této pomoci hledat někdy i násilné analogie strukturální či funkční nebo jiné. Vždyť samočinný počítač nám může pomoci studovat např. děje v jaderném reaktoru tak, že rychle počítá hodnoty funkcí, charakterizujících děje v tomto reaktoru. Přitom nikoho ani nenapadne hledat nějakou analogii mezi počítačem a reaktorem. Právě tak může být samočinný počítač dobrým pomocníkem při studiu nervové soustavy třeba tím, že je schopen na základě vhodného programu realizovat vytváření podmíněných reflexů nebo jiných dějů v nervové soustavě.

Je důležité si také uvědomit, že imitace třeba jen domnělých pochodů či funkcí centrální soustavy člověka nemusí být jedinou cestou, kterou se bude brát vývoj automatů schopných nahrazovat člověka ve stále větší míře. Vždyť např. pokusy vznést se do vzduchu využívající přímé analogie s letem ptáků skončily nezdarem. Člověk létá dnes nepoměrně rychleji a výše nežli ptáci, aniž při tom potřebuje mávat nějakými křídly.

Literatura

- [1] Симпозиум: проектирование машин, имитирующих поведение человеческого мозга. Кибернетический сборник 1, Издат. иностр. лит., Москва 1960
- [2] Algoritmy a počítači stroje. Pokroky MFA 2 (1957), 285—291, 544—552.
- [3] KAREL ČULÍK: Vyčíslitelnost funkcí. Pokroky MFA 7 (1962) (vyjde v č. 4)
- [4] Б. А. Трахтенброт, Алгоритмы и машинное решение задач (изд. второе), Физматгиз, Москва 1960
- [5] А. И. Китов: *Elektronické číslicové počítače*. SNTL, Praha 1960
- [6] Б. В. Гнеденко, ..., Элементы программирования. Физматгиз, Москва, 1961
- [7] Автоматизация программирования, Физматгиз, Москва 1961
- [8] А. Тьюринг, Может ли машина мыслить? Дж. фон Нейман, Общая и логическая теория автоматов. Физматгиз, Москва, 1960
- [9] O práci P. S. Novikova: O algoritmicke neřešitelnosti problému totožnosti slov v teorii grup. Pokroky MFA 4 (1959), 421

- [10] LADISLAV RIEGER: O teorii neuronových sítí. Aplikace matematiky 3 (1958), 243
 [11] Дж. Нейман, Вычислительная машина и мозг. Кибернетический сборник 1, Изд. иностран. лит., Москва 1960
 [12] D. P. GORSKIJ: Idealizace a abstrakce. Pokroky MFA 5 (1960), 741

O INTEGRÁLNÍ GEOMETRII¹⁾

ZBYNĚK NÁDENÍK, Praha

Integrální geometrie je disciplína, která v sobě slučuje počet pravděpodobnosti, teorii míry, diferenciální geometrii a teorii konvexních těles. Velmi zhruba řečeno — tak jako se diferenciální geometrie zabývá studiem diferenciálních invariantů, jsou předmětem integrální geometrie vztahy mezi invarianty integrálními, třeba v euklidovském prostoru studium integrálů, které jsou invariantní při pohybu.

Integrální geometrie vznikla z geometrických pravděpodobností²⁾. Od pravděpodobností počítaných kombinatoricky, kdy počty případů příznivých a možných jsou konečné, liší se tzv. geometrické pravděpodobnosti nekonečným počtem případů. Velmi známým příkladem je úloha o jehle hraběte BUFFONA z druhé poloviny XVIII. století. V sedmdesátých letech minulého století zavedl M. W. CROFTON míru pro dvouparametrovou množinu přímek v rovině, tj. jisté integrály vzaté přes všechny přímky množiny. Byl první, kdo vedle míry dvouparametrové množiny bodů v rovině (tj. obsahu rovinné plochy těmi body vyplněné) uvažoval i jinou míru. Croftonovy myšlenky, které umožňují bezprostřední řešení Buffonovy úlohy (viz pozn.²⁾ pod čarou), prohloubili v posledních letech minulého století H. POINCARÉ a E. CARTAN, ale jejich plodnost se ukázala v plně šíři až v polovině třicátých let, kdy je oživil W. BLASCHKE, který se svými spolupracovníky a žáky vydal velkou sérii prací s tímž názvem Integralgeometrie.

Pokusíme se ukázat metody a částečně i dosah integrální geometrie na příkladu geometrické interpretace izoperimetrického deficitu. Má-li konvexní uzavřená křivka délku L a omezuje-li oblast o obsahu F , platí tzv. izoperimetrická nerovnost $L^2 - 4\pi F \geq 0$, v níž rovností je charakterizována kružnice. Výraz na levé straně nerovnosti se nazývá izoperimetrický deficit.

Dejme tomu, že v rovině s pravoúhlou soustavou souřadnic x, y se pohybuje

¹⁾ Článek je upravenou autorovou přednáškou na I. československé konferenci o diferenciální geometrii v září 1961 na Richtrových boudách v Krkonoších.

²⁾ Geometrickými pravděpodobnostmi se u nás zabýval profesor teoretické fyziky na brněnské universitě B. HOSTINSKÝ (1885–1951). Vydal r. 1926 ve sbírce Kruh knížku Geometrické pravděpodobnosti a mnohem kratší a elementárnější o nich znovu pojednal v Počtu pravděpodobnosti v Cestě k vědění z r. 1950. Kapitoly II, III a IV první knížky jsou v podstatě úvodem do integrální geometrie. Řešení BUFFONOVY úlohy je v první knížce na str. 38 a ve druhé na str. 81 a 82.