

NEUMANN JÁNOS

a
számológép
és
az agy

GONDOLAT

Neumann János

A számológép és az agy

A könyv eredeti címe: The computer and the brain
Yale University Press, printed in the United States of America
by the Maple Press Company, York, PA. 1959

Fordította és jegyzetekkel ellátta: Szalai Sándor

Az utószót írta: Tarján Rezső

TARTALOMJEGYZÉK

[A szerző feleségének előszava](#)

[Bevezetés](#)

A SZÁMOLÓGÉP

[AZ ANALÓG ELJÁRÁS](#)

[A hagyományos alpműveletek](#)

[Szokatlan alpműveletek](#)

[A DIGITÁLIS ELJÁRÁS](#)

[Jelölők, jelölő-kombinációk és megtestesüléseik](#)

[Digitális géptípusok és fő alkatelemeik](#)

[Párhuzamos és soros megoldások](#)

[A szokványos alpműveletek](#)

[LOGIKAI VEZÉRLÉS](#)

[Dugaszolt vezérlés](#)

[Lyukszalagos logikai vezérlés](#)

[Az egyfajta alpművelethez egyetlen szervet hozzárendelő szerkesztési elv](#)

[Külön memóriaszerv szükségessége a fentiek következtében](#)

[Vezérlés "sorrendszabályozási pontok" útján](#)

[Vezérlés memóriában tárolt utasításokkal](#)

[A memóriában tárolt vezérlés működésmódja](#)

[Vegyes vezérlési formák](#)

VEGYES NUMERIKUS ELJÁRÁSOK

Számok vegyes megjelenítése és ennek alapján működő gépek PONTOSSÁG

A magas fokú digitális pontossági követelményének okai

MODERN ANALÓG GÉPEK JELLEMZŐI

MODERN DIGITÁLIS GÉPEK JELLEMZŐI

Az aktív alkatelemek és a sebesség kérdése

A szükséges aktív alkatelemek száma

A memóriaszervek, kapacitások és elérési idők

Aktív szervekből alkotott memóriaregiszterek

A memóriaszervek hierarchiájának elve

Memória-alkatelemek és elérési problémák

Az elérési idő bonyodalmai

A közvetlen címzés elve

AZ AGY

A neuron működésének egyszerűsített leírása

Az idegimpulzus természete

Az ingerlés folyamata

Impulzusok kiváltása impulzusok által. E mechanizmus digitális jellege

Az idegi reagálás időbeli jellegzetességei. Kifáradás és feléledés

A neuron méretei. Összehasonlítás a mesterséges alkatelemekkel

Energiafogyasztás. Összehasonlítás a mesterséges alkatelemekkel

Az összehasonlítások összegezése

INGERLÉSI FELTÉTELEK

A legegyszerűbb elemi logikai feltételek

Bonyolultabb ingerlési feltételek

Az ingerküszöb

Az összegeződési idő

A receptorok ingerlési feltételei

Az idegrendszeri memória kérdése

Az idegrendszeri memóriakapacitás becslésének elvei

A memóriakapacitás becslése a kifejtett elvek alapján

[A memória különböző lehetséges fizikai megtestesülései](#)
[Analógiák a mesterséges számológépekkel](#)
[A memóriának nem kell az elemi aktív szervekhez hasonló alkatelemekből felépülnie](#)
[Digitális és analóg részek az idegrendszerben](#)
[A genetikai mechanizmus szerepe a vázolt összefüggésben](#)
[A programok és szerepük a gépek működésének vezérlésében](#)
[A teljes program fogalma](#)
[A rövid program fogalma](#)
[A rövid program szerepe](#)
[Az idegrendszer logikai szerkezete](#)
[A számszerű eljárások jelentősége](#)
[A számszerű eljárások és a logika kölcsönös viszonya](#)
[Magasrendű pontossági követelmények feltételezésének indokai](#)
[Az idegrendszerben alkalmazott jelrendszer természete nem digitális, hanem statisztikus](#)
[Aritmetikai leromlás. – Az aritmetikai és logikai mélység szerepe](#)
[Az aritmetikai pontosság és a logikai megbízhatóság alternatívája](#)
[A közlési rendszer egyéb hasznosítható statisztikus sajátosságai](#)
[Az agy nem a matematika nyelvét használja](#)
[Utószó \(írta Tarján Rezső\)](#)

A szerző feleségének előszava

A Silliman-előadások az Egyesült Államok tudományos életének egyik legrégebb és legnevezetesebb hagyományát testesítik meg. A Silliman-előadások megtartására szóló meghívás az egész világ tudósai szemében különös kiváltságot és megbecsülést jelent. Az előadót a hagyomány értelmében felkérjük, hogy mintegy két héten át tartó előadássorozatban ismertesse kutatásait, amelyeknek

szövegét azután külön kötetbe foglalva a Yale Egyetem, a Silliman-előadások otthona és központja adja ki.^[1]

Férjemet, John von Neumant 1955 elején kérte fel a Yale Egyetem, hogy az 1956-os tavaszi félévben, valamikor március végén vagy április elején, tartsa meg a Silliman-előadásokat. Johnny mélyen megtisztelve érezte magát, igen hálás volt a meghívásért, bár kénytelen volt azt a feltételt szabni, hogy az előadássorozat nem tarthat tovább egy hétnél. Közölte azt is, hogy az előadásai után átadandó kézirat – “A számológép és az agy” – részletesebben is taglalja majd a témát, amellyel hosszú időn át foglalkozott. Az előadássorozat időtartamának a megrövidítését szükségszerűen kérnie kellett: Eisenhower elnök éppen akkor nevezte ki az Atomenergia Bizottság egyik tagjává.

Ez a munka teljes embert igényelt, s a benne részt vevő tudósok közül senki sem engedhette meg magának, hogy hosszabb időre otthagyja washingtoni dolgozószobáját. Férjem mégis tudta, hogy feltétlenül szakít majd időt az előadások megírására, mert közlésre kerülő munkáit mindig otthon írta, éjszaka vagy hajnalban.

Munkabírása gyakorlatilag határtalan volt, különösen, ha érdekelte az, amit csinált. Márpedig az automatikus szerkezetek rengeteg feltáratlan lehetősége csakugyan nagyon foglalkoztatta; így egészen biztos volt benne, hogy teljes kéziratot tud összeállítani, még ha magát az előadássorozatot kissé meg is kell kurtítani. A Yale Egyetem, amely ebben az időszakban ugyanolyan segítőkésznek és megértőnek mutatkozott, mint később a baj és szomorúság idején, elfogadta ezt a megoldást, és Johnny megkezdte munkáját a bizottságban, azzal a szándékkal, hogy közben folytatja, ha kissé “titokban” is, az automaták elméletével kapcsolatos kutatásait.

1955 tavaszán Princetonból Washingtonba költöztünk, és Johnny szabadságoltatta magát a princetoni Institute for Advanced Studiesnél, amelynek 1933 óta matematikaprofesszora volt.

Johnny 1903-ban, Budapesten, Magyarországon született. Már egészen fiatal korában feltűnő készséget és érdeklődést tanúsított a tudományok iránt. Még gyermek volt, amikor szinte fotografikus emlékezőtehetsége egészen rendkívüli formákban nyilvánult meg. A

középiskola elvégzése után előbb kémiát, majd matematikát tanult a berlini egyetemen, a zürichi műegyetemen és a budapesti egyetemen. 1927-ben a berlini egyetem magántanárává nevezték ki. Valószínűleg az egyik legfiatalabb tudós volt, aki német egyetemen az utóbbi néhány évtizedben ilyen kinevezést kapott. Később a hamburgi egyetemen tanított. 1930-ban pedig első ízben kelt át az Atlanti-óceánon: elfogadta a princetoni egyetem meghívását, hogy vendégként egy éven át előadásokat tartson. 1931-ben tagja lett a princetoni egyetem tantestületének, amikor is véglegesen letelepedett az Egyesült Államokban és az Újvilág polgára lett.

Johnny tudományos érdeklődése a húszas-harmincas években igen széles körű, főleg elméleti jellegű volt. Tanulmányokat írt a kvantumelméletről, a matematikai logikáról, az ergodika elméletéről, a kontinuos geometriáról, az operátor-gyűrűkkel kapcsolatos problémákról és számos más tiszta matematikai tárgyú problémáról. Később, a harmincas évek második felében, érdeklődni kezdett az elméleti hidrodinamika kérdései iránt. Különösen azok a nehézségek izgatták, amelyek a parciális differenciálegyenletek ismert analitikus módszerekkel való megoldása útjában állottak. Minthogy ezt a munkát éppen akkor kezdte meg, amikor az egész világon a közelgő háború fellegei borították el a látóhatárt, Johnny bekapcsolódott a hadikutatásba, s ezért egyre jobban érdekelték a matematika és a fizika alkalmazási területei. A lökéshullámok kölcsönhatása, ez a rendkívül bonyolult hidrodinamikai probléma a hadikutatás egyik fontos érdeklődési területe lett. Mivel pedig egyes problémák megválaszolásához hallatlan mennyiségű számításra volt szükség, ez arra indította Johnnyt, hogy nagy sebességű számológépet alkalmazzon erre a célra. Az ENIAC, amely Philadelphiában épült a hadsereg ballisztikai kutatólaboratóriuma számára, Johnny első közreműködését jelentette azon az óriási lehetőségeket kínáló területen, hogy számos, még megoldatlan kérdést automaták segítségével oldjanak meg. Segített az ENIAC néhány matematikai logikai részletének módosításában, s ettől kezdve egészen utolsó tudatos órájáig változatlanul érdekelték és foglalkoztatták az automaták gyorsan növekvő alkalmazásának még ismeretlen oldalai és lehetőségei.

1943-ban, nem sokkal a Manhattan-terv beindulása után, Johnny egyike lett azoknak a tudósoknak, akik "Nyugatra tűntek", állandóan utazgattak Washington, Los Alamos és még számos más hely között.^[2] Ez volt az az időszak, amikor végleg meggyőződött arról és igyekezett meggyőzni a legkülönbözőbb területeken dolgozó kollégáit is, hogy ha a numerikus számításokat gyorsan működő elektronikus számítóeszközökön végzik, ez lényegesen megkönnyítheti számos nehéz, még megoldatlan tudományos probléma megoldását.

A háború után egy válogatott mérnökökből és matematikusokból álló kicsiny csoport tagjaként kísérleti elektronikus számológépet épített az Institute for Advanced Studiesben. E gép, amely JONIAC néven vált közzismertté, végül az országszerte épült hasonló gépek prototípusává vált. A JONIAC-ban kialakított alapelvek egy részét még ma is alkalmazzák a leggyorsabb és legmodernebb számológépekben. Johnny és munkatársai a gép tervezésekor többek között megpróbálták lemintázni az élő emberi agy néhány ismert működésmódját. Ez vezette férjemet arra, hogy neurológiával kezdjen foglalkozni, az ember neurológiai és pszichiátriai problémáit kutassa. Számos megbeszélésen vett részt e problémával kapcsolatban, s végül előadásokat tartott arról, hogyan lehetne az emberi agy valamilyen leegyszerűsített modelljét az ember alkotta gépekbe hasznosítani. A Silliman-előadásokban ezeket a gondolatokat továbbfejlesztette és kiterjesztette.

Johnny a háború utáni években egyidejűleg különféle tudományos problémákkal foglalkozott. Különösen érdekelte a meteorológia. Úgy látszott, hogy itt a numerikus számítások révén teljesen új kilátások nyílnak. Idejének egy részét arra fordította, hogy segített számításokat végezni a magfizika egyre bővülő problématerületén. Továbbra is szorosan együttműködött az Atomenergia Bizottság laboratóriumaival. 1952-től kezdve ugyanezen bizottság legfőbb tanácsadó testületében működött.

1955. március 15-én mint az Atomenergia Bizottság újonnan kinevezett tagja, hivatali esküt tett, s röviddel utóbb, május elején Washingtonba költöztünk. Három hónappal később, augusztusban, tevékeny és feszült életvitelünk, amelynek fő mozgatója férjem

fáradhatatlan és lenyűgöző szelleme volt, hirtelen megszakadt. Johnny bal vállában súlyos fájdalmak léptek fel. A műtét során csontrákot állapítottak meg. A következő hónapok váltakozó reményben és kétségbeesésben teltek el. Egy ideig abban bízunk, hogy a váll megbetegedése a szörnyű kór egyetlen megnyilvánulása volt, s a tünetek hosszú ideig nem fognak visszatérni, de azután újra jelentkeztek a leírhatatlan fájdalmak és kínok, s halomba döntötték reményeinket. Johnny ez idő alatt lázasan dolgozott. Nappal a hivatalában volt vagy a munkájával kapcsolatos ügyekben utazgatott, éjszaka tudományos cikkeket írt, amelyeket eddig halogatott, mert el akart készülni a bizottság részére végzett határidős munkájával. Most rendszeresen elkezdett dolgozni a Silliman-előadások kéziratán. Annak a nagy része, amit az itt következő oldalak tartalmaznak, a bizonytalanságnak és a várakozásnak ezekben a heteiben íródott. November végén jött a következő roham: a vizsgálat megállapította, hogy a betegség több helyen megtámadta a gerincét és a járásban is súlyos nehézségeket okozott. Ettől kezdve nap mint nap rosszabbodott az állapota, míg végül már csak annyi remény maradt, hogy kezeléssel és gondossággal legalább egy időre meg lehet állítani a végzetes betegség elhatalmasodását.

Johnny 1956 januárjától kezdve már csak tolószékekben tudott közlekedni, de még mindig részt vett megbeszéléseken, tolószéken bejárt a hivatalába, s továbbra is dolgozott az előadássorozat kéziratán. Ereje szemmel láthatólag napról napra fogyott. Egymás után le kellett mondania minden utazást és vállalt előadást – egyedül a Silliman-előadásokkal tett kivételt. Volt némi remény arra, hogy röntgenbesugárzással március végéig legalább annyira rendbe hozhatják beteg gerincét, hogy elutazhasson New Havenbe és eleget tehessen ennek az egy kötelezettségének. Ezért megkerestük a Silliman-előadások rendezőségét, hogy egyre vagy legfeljebb kettőre csökkentse le az előadások számát, hiszen egy teljes héten át tartó erőfeszítés legyengült állapotában veszélyes lehetett volna. Márciusban azonban minden csalóka reményünk szertefoszlott, és többé gondolni sem lehetett arra, hogy Johnny bárhova is el tudna még utazni. A Yale Egyetem most is segítőkész és megértő volt, nem törölte az előadásokat, hanem azt javasolta, hogy ha férjem a

kéziratot rendelkezésre tudja bocsátani, valaki más felolvassa helyette. Johnny minden erőfeszítése ellenére sem tudta határidőre megírni valamennyi tervezett előadását; a tragikus sors úgy hozta, hogy a kézirat befejezetlen maradt.

Április elején befeküdt a Walter Reed kórházba, s ezt a helyet 1957. február 8-án bekövetkezett haláláig már nem hagyta el. A Silliman-előadásokra készült befejezetlen kéziratot magával vitte a kórházba; ott még néhányszor megpróbált dolgozni rajta, de azután végleg felülkerekedett a betegség, s még Johnny kivételes szelleme sem tudta legyőzni testének gyengeségét.

Szeretném kifejezni mély hálámát a Silliman-előadások Bizottságának, a Yale Egyetemnek és a Yale Egyetem kiadójának segítőkézségükért és kedvességükért, amelyet Johnny életének utolsó szomorú éveiben tanúsítottak, s azért, hogy most emléke előtt tisztelve közrebocsátják befejezetlen és töredékes kéziratát a Silliman-előadások kiadványsorozatában.^[3]

Washington, 1957. szeptember

Neumann Klára

Bevezetés

Matematikus vagyok, nem pedig neurológus vagy elmeorvos, ezért némi magyarázatra és igazolásra szorul, amire itt vállalkozom. E munkámban ugyanis az idegrendszer megértéséhez igyekszem közeledni a matematikus szemszögéből. De már ez a megállapítás is mindkét lényeges pontjában azonnali magyarázatot igényel.

Először is csak túlzással állítható, hogy munkámban az idegrendszer megértéséhez igyekszem “közeledni”; munkám ugyanis csak valamelyest rendszerezett spekulációkat tartalmaz arról, hogy miként kellene hozzákezdeni az ilyen megközelítéshez. Magyarán: próbálom felmérni, hogy a matematika útmutatásai nyomán kitűzhető megközelítési irányok közül – abban a ködös távolban, amiben legtöbbjük feldereng szemünk előtt – melyik tűnik biztatónak, vagy éppen ellenkezőleg, kilátástalannak. Erre vonatkozó

sejtéseimet egyik-másik tekintetben ésszerű érvekkel is alá tudom majd támasztani.

Másodsor: az itt tárgyalt összefüggésben a “matematikus szemszögéből” végzett vizsgálódáson a szokásostól eltérő elosztású szemléleti súlypontokat tartalmazó eljárás értendő, amelynél az általános matematikai technikák hangsúlyozása mellett a logikai és statisztikai vonatkozások kerülnek az érdeklődés előterébe. Továbbá, ebben a keretben még a logikát és a statisztikát is elsősorban – bár nem kizárólagosan – az ún. információelmélet alapvető munkaeszközének kell tekinteni. Az információelmélet gyűjtőpontjában jelentős részben a bonyolult logikai és matematikai automaták tervezése, kiértékelése és programozása terén szerzett tapasztalatok fognak állni. Az automaták e típusának legjellemzőbb, de korántsem egyedüli megtestesítői természetesen a nagy elektronikus számológépek.

Egyébként hadd jegyezzem meg, hogy nagyon jó volna, ha az ember az ilyen automaták “elméletéről” is beszélhetne. Sajnos azonban egyelőre nem áll más rendelkezésre, mint az imént említett tapasztalatok kezdetlegesen tagolt és alig-alig képletbe foglalt “tömbje”. Ez minden, amire hivatkozhatom.

Fő célom végső soron e tárgy egészen más oldalának feltárása volna. Azt gyanítom, hogy az idegrendszer mélyrehatóbb matematikai – a fentebb körülírt értelemben “matematikai” – vizsgálata kihatással lesz arra is, ahogyan magának a matematikának e vizsgálódásban közrejátszó oldalait értelmezzük. Sőt talán még a tulajdonképpeni matematikáról és logikáról alkotott képünk is módosulni fog. Később igyekszem majd megmagyarázni, hogy miért hiszem ezt.

A SZÁMOLÓGÉP

Mindenekelőtt szeretném megvitatni a számológépek rendszerezésének és gyakorlati működésének egyes alapelveit. A létező számológépek az analóg és a digitális gépek két nagy osztályába sorolhatók. E felosztás azon alapszik, hogy miként

testesülnek meg a gépekben azok a számok, amelyeken műveleteit végzik.^[4]

AZ ANALÓG ELJÁRÁS

Egy analóg gépben minden számot valamely célszerűen megválasztott fizikai mennyiség ábrázol, amelynek előírászerű egységekben mért értéke egyenlő az illető számmal. Ez a fizikai mennyiség lehet az a szög, amivel bizonyos tárcsa elfordult, de lehet egy áramerősség vagy egy feszültség (feszültségkülönbség) is stb. Ahhoz, hogy a gép alkalmas legyen számítások elvégzésére, vagyis képes legyen megadott számokon előre meghatározott terv szerint műveleteket elvégezni, olyan szervekkel (vagy szerkezeti elemekkel) kell ellátnunk, amik végre tudják hajtani a szóban forgó mennyiségeken a matematika alapműveleteit.

A hagyományos alapműveletek

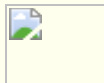
Ezeken az alapműveleteken közönségesen a “négy számtani alapműveletet” értik, nevezetesen: az összeadást (az $x+y$ műveletet), a kivonást ($x-y$), a szorzást (xy) és az osztást (x/y).

Így például nyilván nem nehéz két áramot összeadni vagy kivonni egymásból (párhuzamos vagy ellenirányú egyesítésük révén). A szorzás végrehajtása két árammal már nagyobb nehézségekbe ütközik, de többféle elektromos kapcsolóelem, ill. áramkör ismeretes, amely ezt a műveletet is végre tudja hajtani. Ugyanez áll egy áramnak a másikkal való osztására is. (Az összeadással és a kivonással ellentétben, a szorzásnál és az osztásnál természetesen lényeges, hogy miféle egységben történik az áram mérése.)

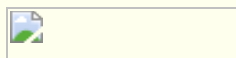
Szokatlan alapműveletek

Némely analóg gép a következő igen figyelemre méltó tulajdonsággal rendelkezik, amelyről a későbbiekben majd még beszélnünk kell. Arról van szó, hogy a gépet alkalomadtán a fent

említett négy számtani művelet helyett más “alap” műveletek közül építik fel. Így a klasszikus differenciál-analizátor, amely a számokat bizonyos tárcsák elfordulási szögével fejezi ki, a következőképpen működik: Az összeadás ($x+y$) és a kivonás ($x-y$) művelete helyett az



műveletpár áll a gépben rendelkezésre, mert egy egyszerű, könnyen beszerezhető szerkezet, ti. a bolygókeres hajtómű vagy más néven “differenciál” (ugyanaz, ami az autók hátsó tengelyénél használatos!) megfelelően végre tudja ezt hajtani. A szorzás (xy) helyett egészen más természetű eljárást alkalmaznak. A differenciál-analizátorban ugyanis minden mennyiség mint az idő függvénye jelenik meg, s a gépben van egy “integrátor”-nak nevezett szerv, amely két ilyen $x(t)$, ill. $y(t)$ alakban felírható mennyiségre elő tudja állítani a



képletnek megfelelő (ún. Stieltjes-féle) integrált.

Ennek az egész eljárásnak háromféle értelme van:

Először: e három művelettel megfelelő összetételben a négy szokásos alapművelet közül három, ti. az összeadás, a kivonás és a szorzás minden további nélkül előállítható.

Másodszor: bizonyos “visszacsatolási” fogásokkal kombinálva a negyedik művelet, az osztás is megvalósítható. A visszacsatolási elv tárgyalására nem kívánok itt kitérni, mindössze annyit jegyzek meg, hogy noha a visszacsatolás implicit összefüggések megoldására szolgáló eszköznek látszik, valójában rendkívül elegáns és rövidre zárt iteráció, azaz fokozatos közelítési eljárás.

Harmadszor – s ebben rejlik a differenciál-analizátor ilyen jellegű felépítésének igazi magyarázata! – ezek a különleges alapműveletek (ti. a fél összeg vagy fél különbség képzése és az integrálás) a problémák nagy osztályainak sokkal gazdaságosabb megoldását teszik lehetővé, mint ami a négy számtani alapművelettel ($x+y$, $x-y$, xy , x/y) elérhető. Minden számológépet ugyanis “programoznunk”

kell, ha alkalmassá kívánjuk tenni valamely bonyolult matematikai probléma megoldására. Ez annyit jelent, hogy a probléma megoldásának bonyolult műveletét helyettesítenünk kell a gép alpműveleteinek bizonyos kombinációjával. Sok esetben még szövevényesebb a feladat, amennyiben ezt a bonyolult műveletet tetszőleges megkívánt (előírt) pontosságig meg kell közelítenünk ilyen alpműveletek kombinációival. Mármost a problémák egy-egy adott osztályánál az alpműveletek valamelyik csoportja hatékonyabbnak mutatkozhat, azaz egyszerűbb, kevésbé terjedelmes kombinációk alkalmazását teszi lehetővé, mint egy másik csoport, így például közönséges differenciál-egyenletrendszerek esetében a fent említett különleges alpműveletek hatékonyabb megoldási eljárást biztosítanak, mint a már korábban felsorolt számtani alpműveletek ($x+y$, $x-y$, xy , x/y). A differenciál-analizátort eredetileg éppen ilyen típusú feladatok megoldására tervezték. Most rátérek a digitális gépek osztályára.

A DIGITÁLIS ELJÁRÁS

Egy tízes számrendszerű digitális gépben minden szám úgy jelenik meg, mint a közönséges írásban vagy nyomtatásban: tizedesjegyek sorozataként.^[5] E jegyek mindegyikét viszont bizonyos "jelölők"^[6] rendszere képviseli.

Jelölők, jelölő-kombinációk és megtestesüléseik

Ha egy jelölő tízféle alakban jelenhetik meg, akkor önmagában véve is elegendő egy tizedesjegy képviseletére. De ha csak két különböző alakban képes mutatkozni, akkor olyan módon kell alkalmazni, hogy minden tizedesjegynek az ilyen kétértékű jelölők egy csoportja feleljen meg. (Három kétértékű jelölőből álló csoport 8 kombinációt tesz lehetővé, ami még nem is elég. Ezzel szemben négy ilyen jelölőből álló csoport már 16 különböző kombinációt enged meg, ami több mint elegendő. Ily módon tehát tizedesjegyenként legalább négy kétértékű jelölőre van szükség, sőt – mint látni fogjuk –

alkalomadtán okunk lehet még nagyobb csoportok alkalmazására is.)

Tízértékű jelölőre példa egy elektromos áramlökés, amely tíz előre kijelölt vezeték valamelyikén lép fel. Kétértékű jelölő viszont egy olyan áramlökés, amelynek egy előre kijelölt vezetéken való jelenléte vagy hiánya (a jelölő két "értéke") szolgál információközlés céljára. Ugyancsak kétértékű jelölő pl. egy villamos impulzus, amely pozitív vagy negatív polaritással léphet fel. Természetesen sok más hasonlóan érvényes példa is elgondolható.

Meg kell azonban jegyezni, hogy az imént felvázolt tízértékű jelölő nyilvánvalóan tíz kétértékű jelölőből álló csoportot testesít meg, vagyis erősen redundáns (az adott célra több mint elegendő). Ugyanebben a keretben már négy kétértékű jelölőből álló csoporttal is elérhetnők a kívánt eredményt. Tekintsünk egy négyvezetékes rendszert, amelyben a vezetékek bármely kombinációján egyidejű áramlökések jelenhetnek meg. Ez 16 különböző kombinációra nyújt módot, s ebből megállapodásszerűen bármely 10-et kijelölhetünk a 0-tól 9-ig terjedő tíz számjegy megfelelőjéül.

Figyelembe kell még venni, hogy a jelölők rendszerint villamos impulzusok (vagy esetleg a jelzés érvényes időtartamára létrehozott és utána megszüntetett feszültségek, ill. áramok), s ezeknek irányításához megfelelő elektromos reteszelő vagy – mint mondani szokták – "kapu"-áramkörökre van szükség.

Digitális géptípusok és fő alkatelemeik

A fejlődés során eddig rendre elektromágneses jelfogókat, elektroncsöveket, kristálydiódákat, ferromágneses magokat és tranzisztorokat alkalmaztak ilyen célra. Némelyik ilyen alkatelemet másokkal kombinálva használták; egyik-másikat főleg a gép ún. memóriaszerveiben, vagy leginkább csak a memórián kívül fekvő ún. aktív szerveiben alkalmazták. (Lásd alább.) Ily módon a digitális gépek igen sokféle típusa alakult ki.

Párhuzamos és soros megoldások

A tízes számrendszerű gépben minden számot tízértékű jelölők (ill. jelölő csoportok) megfelelő sorozata képvisel. Ez a sorozat kétféleképpen rendezhető el: vagy úgy, hogy a jelölők egyidejűleg, azaz *párhuzamosan* jelennek meg a gép megfelelő számú különböző szerveiben, vagy pedig úgy, hogy időbeli egymásutánban, azaz *sorosan* lépnek fel a gép egy és ugyanazon szervében.^[7] Ha a gépet – mondjuk – tizenkét jegyű, például a tizedespontról “jobbra” és “balra” hat-hat jegyű számok kezelésére kívánják berendezni, akkor valamennyi információs csatornájában, amelyen ilyen számok haladnak át, tizenkét jelölőről (vagy jelölő csoportról) kell gondoskodni.

(E párhuzamos és soros megoldásokat különféle módon és különböző mértékig hajlékonyabbá lehet tenni; sokfajta gépnél élnek is az ilyen lehetőségekkel, így például majdnem minden elektronikus számológép eltolható tizedespontra van berendezve. Erre azonban itt nem óhajtok bővebben kitérni.)

A szokványos alpműveletek

A digitális gépek műveleteit eddig mindig a négy számtani alpművelet alkalmazására alapozták. A használatos jól ismert eljárásokról a következőket kell elmondani.

Először is az összeadásról: Míg az analóg gépekben ez a művelet fizikai folyamatok közvetítésével megy végbe (lásd fentebb), addig a digitális gépek esetében szigorú és logikai természetű szabályok szabályozzák végrehajtását – a számjegyösszegek képzését, az átvitelt (ha a kapott számjegyösszeg nem egyjegyű), valamint e részletműveletek ismétlődését és kombinációját. A számjegyösszeg logikai természete különösen világossá válik, ha a tízes számrendszer helyett a kettes számrendszert használjuk, azaz decimális jegyek helyett bináris jegyekkel számolunk. A bináris összeadási tábla így fest:

$$0+0=00;$$

$$0+1=1+0=01;$$
$$1+1=10.$$

E táblázat a következő két szabály alakjában is megfogalmazható: Az összegjegy 1, ha a két összeadandó jegy különbözik egymástól; egyébként 0. Az átviteli jegy 1, ha mindkét összeadandó jegy 1; egyébként 0.

Mivel azonban a számjegyösszeg képzésénél már egy előzőből fennmaradt átviteli jegy lehet jelen, ténylegesen háromtagú bináris összeadási táblára van szükség a következő alakban:

$$0+0+0=00;$$
$$0+0+1=0+1+0=1+0+0=01;$$
$$0+1+1=1+0+1=1+1+0=10;$$
$$1+1+1=11.$$

Ez pedig így fogalmazható meg: Az összegjegy 1, ha az 1-ek száma az összeadandók között páratlan (1 vagy 3), más esetben 0. Az átviteli jegy 1, ha az összeadandók között (az átviteli jegy beszámításával 2 vagy 3) az 1-ek többségben vannak, más esetben 0.

Másodszor a kivonásról: Ennek logikai szerkezete nagyon hasonlít az összeadáséhoz, olyannyira, hogy a kivonandó "komplementálásának" egyszerű módszerével vissza is vezethető az összeadásra, s ezt az eljárást kiterjedten alkalmazzák a számítógépi technikában.^[8]

Harmadszor a szorzásról: A művelet logikai jellege itt még szembeötlőbb, mint az összeadásnál, de a szerkezeti megoldás bonyolultabb. A szorzás végrehajtása úgy történik, hogy előbb előállítják a szorzandónak a szorzó egyes jegyeivel alkotott szorzatait (sőt az ilyen részletszorzatokat megfelelő összeadási eljárás útján többnyire már előzetesen képzik a szorzó jegyeinek 0-tól 9-ig terjedő összes lehetséges értékeire), ezek után pedig kellő helyérték-eltolásokkal összeadják ezeket a tételeket. Kettes számrendszerben végezve a műveletet, megint átlátszóbbá és szembeötlőbbé válik logikai jellege. Mivel ebben az esetben más jegy mint 0 és 1 nem fordulhat elő, a szabály egyszerűen az, hogy

ha a szorzó soron következő jegye 0, akkor elhagyjuk a megfelelő részletszorzatot, ha pedig 1, akkor maga a szorzandó a részletszorzat.

Mindez pozitív tényezők szorzataira vonatkozik. Ha mindkét tényező pozitív vagy negatív előjelű is lehet, akkor az ebből adódó négyféle lehetőségre további külön logikai szabályok irányadók.


Negyedszer, az osztásról: Az osztás logikai szerkezete a szorzáséhoz hasonlítható, csak hogy itt különféle ismétlődő, próbálgató jellegű kivonási műveletek is közbeékelődnek, továbbá a hányados jegyeinek képzését illetően különleges logikai szabályok irányadók a felmerülő alternatív helyzetekre, amelyeknek megoldása lépésről lépésre haladó és ismétlődő jellegű eljárást igényel.^[9]

Összefoglalva: mindezek a műveletek gyökeresen különböznek az analóg gépeknél használt fizikai eljárásoktól. Szerkezetükre az erősen ismétlődő jellegű sorozatokba foglalt alternatív lépések jellemzőek, amelyeket szigorú logikai előírások szabályoznak. Különösen a szorzás és az osztás esetében a szabályok logikai természetűe igen szövevényes. (Ezt ugyan elhomályosítja szemünkben az, hogy oly régóta és szinte már ösztönösen járatosak vagyunk az alapl műveleti szabályok alkalmazásában, de ha rákényszerítjük magunkat teljes megfogalmazásukra, akkor mindjárt fény derül arra, hogy milyen nagy mértékben bonyolultak.)

LOGIKAI VEZÉRLÉS

Azon túl, hogy egy számológép egyenként el tudja végezni az összes alapl műveleteket, képesnek kell lennie arra is, hogy olyan sorrendben – még inkább: olyan logikai rendben – hajtsa végre őket, hogy létrehozzák a kitűzött matematikai probléma megoldását, hiszen éppen ez a számítás mindenkori célja. A differenciál-analizátor típusába tartozó hagyományos analóg gépeknél ezt a “műveletkövetkezést” a következőképpen biztosítják:

A gépben már eleve annyi szervnek kell lennie, amennyi elegendő a kívánt számítás folyamán szükségessé váló alapl műveletek elvégzésére. Más szóval annyi “differenciál”-t és “integrátor”-t

állítanak be, ahány $(x \pm y)/2$, ill.  típusú alapművelet (l. fentebb) a végrehajtandó számítási műveletben szerepel. Ezeknek a szerkezeteknek a “bemenő”, ill. “kimenő” tárcsáit (pontosabban: a tárcsák hajtótengelyeit) azután úgy kapcsolják össze egymással, hogy a kapcsolatrendszerük a kívánt számítási eljárás pontos szerkezeti leképezését nyújtsa. Az egységek összekapcsolása a korábbi modelleknél fogaskerék-áttételek, a későbbi modelleknél pedig elektromos együttfutó berendezések (ún. “szelszin”-ek) közbeiktatása révén történt. Megjegyzendő, hogy a gép tetszőleges kapcsolatrendszer beállítását tette lehetővé, sőt éppen ez nyújtott módot arra, hogy a gép kezelője a megoldásra szoruló problémát, illetve a szándékának megfelelő számítási eljárást rávihesse a gépre. A “beállítás” a régebbi (fogaskerekes) gépeknél mechanikai úton, míg az újabb (elektromos kapcsolatú) gépeknél dugaszoló érintkezők alkalmazásával volt keresztülvihető. Mindazonáltal az ilyen típusoknál a beállítás egy-egy probléma megoldásának idejére mindig változatlan maradt.

Dugaszolt vezérlés

A legújabb analóg gépek némelyikénél még egy további fogást vezettek be. E gépek ugyanis elektromosan dugaszolt kapcsolatokkal rendelkeznek, amelyeknél a dugaszoló érintkezők mindenkori állását ténylegesen elektromágneses jelfogók szabályozzák, úgyhogy az érintkezőket záró vagy nyitó mágnesetekercsek megfelelő elektromos gerjesztésével a kapcsolatok tetszőlegesen megváltoztathatók. A tekercsek gerjesztő áramát az ilyen gépeknél lyukszalagos berendezéssel lehet vezérelni, amit a kellő pillanatban magából a számításból eredő elektromos jelzések indíthatnak meg vagy állíthatnak le (akárhányszor ismétlődve is).

Lyukszalagos logikai vezérlés

Magából a számításból eredő jelzéseken azt értjük, hogy a számológép bizonyos numerikus szervei valamilyen előre kijelölt helyzetbe kerülnek – például valamely szám előjele negatívvá válik, vagy egy szám nagyobb, mint egy másik stb. Itt figyelembe kell venni, hogy ha a számokat elektromos feszültségek vagy áramerősségek határozzák meg, akkor előjelüket a megfelelő egyenirányító-berendezésekkel érzékelni lehet; egy tárcsa elfordulása esetén a fellépő jel polaritása mutathatja, hogy balfelé vagy jobbfelé haladt-e át ez a forgó mozgás a megadott nullavonalon; amennyiben egy szám túlnő egy másikon, a korábban pozitív előjelű különbség negatívvá változik – és így tovább. Ilyen alapon az eredeti “rögzített kapcsolatú” műveletbeállítást “logikai” lyukszalagvezérlésnek, közelebbről: “számítási helyzethez fűződő lyukszalagvezérlésnek” lehetett alárendelni.

A digitális gépeknél már kezdettől fogva ettől eltérő vezérlési rendszereket alkalmaztak. Mielőtt azonban rátérnék ezeknek megtárgyalására, még néhány általános megjegyzést kívánok tenni a digitális gépekről és az analóg gépekhez való viszonyukról.

Az egyfajta alpművelethez egyetlen szervet hozzárendelő szerkesztési elv

Mindenekelőtt rá kell mutatnom arra, hogy a digitális gépekben mindig csak egyetlen szerv szolgál az alpműveletek egy-egy fajtájának elvégzésére. Ez ellentétben áll a legtöbb analóg gépnél alkalmazott szerkezeti megoldással, amely az alpműveletek mindegyik fajtája számára elegendő számú szerv beiktatását teszi szükségessé, a kitűzött probléma követelményeitől függően. Megjegyzendő azonban, hogy ez inkább történeti tény, nem pedig a dolgok lényegéből eredő szükségszerűség, mert a fentebb tárgyalt típusú, elektromos kapcsolatú analóg gépek elvileg megépíthetők úgy is, hogy az alpműveletek mindegyik fajtája számára csak egy-egy szerv szolgál s a digitális típusú gépek alább tárgyalandó logikai vezérlési módszereinek bármelyikét alkalmazni lehetne az ilyen analóg gépekre is. (Egyébként az olvasó maga is minden nagyobb nehézség nélkül megállapíthatja, hogy a legújabb analóg gépek

ismét ismertett vezérlésmódja tulajdonképpen átmenetet jelent az effajta megoldások felé.)

Ehhez hozzá kell tenni, hogy bizonyos digitális gépek több-kevesebb eltérést mutatnak ettől az egyfajta alapművelethez egyetlen szervet hozzárendelő szerkesztési elvtől, de ezek az eltérések elég egyszerű átértelmezéssel visszavezethetők az ortodox alaprendszerre. (Számos esetben csak egy duplex vagy multiplex felépítésű géppel van dolgunk, amelynek tagjai között kölcsönös kapcsolat áll fenn.) De ezekbe a részletekbe itt nem kívánok belebocsátkozni.

Külön memóriaszerv szükségessége a fentiek következtében

Az egyfajta alapművelethez egyetlen szervet hozzárendelő szerkesztési elv alkalmazásából azonban szükségszerűen az következik, hogy nagyobb számú szervről kell gondoskodni a különféle közbenső és részletszámítások eredményeként adódó számok tárolására. Minden ilyen szervnek képesnek kell lennie egy szám "tárolására" (s evégett bármely általa netán már korábról tárolt szám eltávolítására), továbbá át is kell tudnia venni a kívánt számot egy másik szervtől, amellyel pillanatnyilag összeköttetésbe lép, s "feltett kérdésre" pontosan "vissza kell mondania", vagy pedig más időpontban "le kell adnia" egy harmadik szervnek, amellyel akkor éppen összeköttetésbe lép. Az így működő szerveket, "memóriaregisztereknek" nevezzük, s ezeknek az összességét hívjuk "memóriának". Egy memória regisztereinek száma teszi ki a memória kapacitását.^[10]

S ezzel rátérhetek a digitális gépek fő vezérlésmódjainak tárgyalására. A legcélszerűbb lesz a két alaptípust leírni, s utána megemlíteni néhány kézenfekvő elvet, amely lehetővé teszi ezeknek kombinálását.

Vezérlés "sorrendszabályozási pontok" útján

A vezérlés első alapvető módja, amely széles körben elterjedt, némileg egyszerűsített és idealizált alakban a következőképpen írható le:

A gép bizonyos számú logikai szabályozó szervet, ún. "sorrendszabályozási pontot" foglal magában, melyek a következő feladatot látják el. (E pontok száma igen tekintélyes lehet; egyes újabb gépek több száz ilyen ponttal működnek.)

A rendszer legegyszerűbb alkalmazásánál mindegyik sorrendszabályozási pont egy általa működtetett alpműveleti szervvel áll kapcsolatban, ezenfelül pedig a szóban forgó művelet bemenő számait szolgáltató memóriaregiszterekkel, s a kimenő szám átvételére szolgáló további memóriaregiszterrel áll összeköttetésben.^[11] Bizonyos előírt idő után (amelynek elegendőnek kell lennie a művelet végrehajtására), vagy pedig az alpműveleti szervtől beérkező "Kész!"-jelet követően (e jelzés céljára természetesen külön összeköttetést kell létesíteni e szervvel, s erre a megoldásra akkor kerül sor, ha a művelet időszükséglete változó és maximális időtartama határozatlan, vagy pedig túl nagy ahhoz, hogy állandó kivárási időként előírható legyen), a sorrendszabályozási pont működésbe hozza a következő ilyen pontot, azaz saját "utódját". Ez saját kapcsolatainak megfelelően hasonló működést fejt ki. Ha semmi mást nem csinálnak, akkor a folyamat ilyen módon egy feltételhez nem kötött, ismétlésmentes számítási eljárás alakját ölti.

Bonyolultabbá válik ez a minta, ha bizonyos sorrendszabályozási pontok, amelyeket "elágazási pontoknak" nevezünk, nem egyetlen "utód"-hoz, hanem kettőhöz kapcsolódnak, s kétféle állapotba – mondjuk: A-ba és B-be – kerülhetnek oly módon, hogy A esetében az egyik "utód", B esetében pedig a másik folytatja tovább az eljárást. Egy így berendezett pont például alaphelyzetben az A állapotban lehet, de ugyanakkor két memóriaregiszterrel állhat olyan kapcsolatban, hogy az ezekben végbemenő események hatására A állapotból B-be vagy megint B-ből A-ba menjen át; ha pl. az első regiszterben negatív előjel mutatkozik, akkor A-ból B-be vált, ha pedig a második regiszterben lép fel a negatív előjel, akkor visszavált B-ből A-ba.

Megjegyzendő, hogy egy memóriaregiszter rendszerint nemcsak egy szám jegyeinek, hanem előjelének (+ vagy –) tárolására is be van rendezve, amihez mindössze egy külön kétértékű jelölőre van szükség. Ebből mármost sokféle lehetőség adódik, így például a két “utód” a számítás két alternatív ágát képviselheti, amelynek megválasztása bizonyos számszerű ismérvektől függhet. (Egy ilyen ismérv az A állapotból B állapotba való átmenetet válthatja ki, míg a B-ből A-ba való visszalépés az eredeti helyzet helyreállítására szolgálhat egy új számítás céljából.) A két alternatív ág egy távolabbi közös “utód”-ban újra egyesülhet is. Ismét más lehetőség nyílik, ha a két ág egyike – mondjuk: az A-nak megfelelő ág – visszavezet az először említett (elágazásos) sorrendszabályozási ponthoz. Ez természetesen az iterációs eljárás, mert a művelet újra meg újra megismétlődik mindaddig, amíg fel nem lép az a számszerű ismérv, mely az A-ból B-be való átmenetet váltja ki. Mindezek a fogások kombinálhatók, egymásba illeszthetők stb.

Figyelemre méltó, hogy ebben az esetben is – ugyanúgy, mint az analóg gépek már ismertett dugaszolós típusú vezérlésénél – az ilyen elektromos kapcsolatok együttesében testesül meg a probléma gépi “beállítása” s ebben fejeződik ki a megoldásra váró probléma, vagyis a gép kezelőjének szándéka. Ez tehát megint csak dugaszolt vezérlést jelent, s – mint már az előbbi példánál is – fennáll ugyan a lehetősége annak, hogy a dugaszok állását az éppen sorra kerülő problémának megfelelően megváltoztassák, de egy-egy probléma megoldásának időtartamára a kapcsolatok – legalábbis a legegyszerűbb ilyen elrendezéseknél – változatlanok maradnak.

Ez az eljárás sokféleképpen finomítható. Például mindegyik sorrendszabályozási ponthoz több szerv kapcsolható, s akkor ezek a pontok többféle műveletet indíthatnak el. A dugaszolt kapcsolatokat – mint az említett analóg gépnél – elektromechanikus jelfogók szabályozhatják, s e jelfogókat a leírt módon lyukszalagos berendezés vezérelheti, amelyet viszont a számítás eseményeiből eredő jelzések hozhatnak mozgásba vagy állíthatnak le. A sok másféle lehetséges változatra itt felesleges kitérnem.

Vezérlés memóriában tárolt utasításokkal

A vezérlés második alapvelő módja, amely manapság már elég nagy mértékben kiszorította az előbbit, a következőképpen írható le (megint csak bizonyos egyszerűsítésekkel):

Az eljárás alapelve formailag valamennyire hasonlít arra, amit a dugaszolt vezérlésnél láttunk. A sorrendszabályozó pontokat azonban itt "utasítások" helyettesítik. A legtöbb szerkezeti megoldásnál ezeket az utasításokat fizikailag olyan számok testesítik meg, mint amilyenekre a gép különben is be van rendezve. Egy tízes számrendszerű gépben az utasítások is tizedesjegy-sorozatok alakjában jelennek meg. (Például mint 12-jegyű számok előjellel vagy anélkül stb. – lásd fentebb. Az ilyen előírt számhosszúságon belül esetleg egynél több utasítás is elhelyezhető, de az efféle részleteket itt nem kell tárgyalnunk.)

Minden egyes utasításnak jeleznie kell azt, hogy mely alpművelet végzendő el, mely memóriaregiszterek tartalma alkossa ennek bemeneteit, s mely memóriaregiszterbe irányuljon a művelet kimenete (eredménye). Ehhez természetesen az összes memóriaregisztereket megfelelő sorszámokkal, azaz – mint mondani szokták – "cím"-mel kell ellátni. Célszerű az alpműveleteket is megszámozni. Ilyen módon azután minden utasítás az általa előírt alpművelet számát és bemeneti, ill. kimeneti memóriaregisztereinek címét tartalmazza a megfelelő tizedesjegy-sorozat alakjában (előre meghatározott sorrendben).

Ennek a rendszernek néhány változata is van, amely azonban nem nagyon lényeges az itt tárgyalt összefüggésben. Például egy utasítás a fentebb leírt módon egynél több művelet vezérlésére szolgálhat: előírhatja, hogy az általa tartalmazott címek bizonyos változtatást szenvedjenek, mielőtt felhasználásra kerülnek, aminek leghasználatosabb – és gyakorlatilag legfontosabb – végrehajtásmódja az, hogy a gép az összes szóban forgó címekhez hozzáadja egy meghatározott memóriaregiszter tartalmát. Ugyancsak lehetséges az is, hogy az ilyen teendők ellátására, külön utasítások szolgálnak, vagy hogy egy utasítás csak bizonyos címek módosítását írja elő stb.

Fontosabb az, hogy minden utasításnak – ugyanúgy, mint a korábbi megoldásnál minden sorrendszabályozási pontnak – meg kell határozni “utód”-ját (elágazásos vagy elágazás nélküli elrendezésben – lásd fentebb). Viszont a fentebbiek szerint az utasítások “fizikailag” többnyire számok alakjában testesülnek meg, s így a legtermészetesebb, ha annak a problémának az időtartamára, amelynek megoldásában szerepet játszanak, memóriaregiszterekben tárolják őket. Ebből többféle módszer adódik a mindenkor soron levő utasítás “utód”-jának meghatározására, így például előírható, hogy az X címen található utasítás “utódja” – ellentétes intézkedés híján – mindig az $X+1$ címen található utasítás legyen. Az ellentétes intézkedést ez esetben egy külön ún. ugrási utasítás alkothatja, amely előírja, hogy az “utód” ezúttal egy bizonyos megadott Y címen található. Be lehet ezt azonban úgy is rendezni, hogy minden egyes utasítás kifejezetten megadja utódjának címét, azaz bizonyos ugrást írjon elő, s ez esetben nem szükségszerű, hogy X után $X+1$ következzen. Az elágazásokat legkényelmesebben az ún. “feltételes” ugrási utasításokkal lehet szabályozni. Egy ilyen utasítás például azt írhatja elő, hogy az “utód” címe X vagy Y legyen aszerint, hogy bizonyos számszerű feltétel teljesül-e vagy sem, például, hogy egy adott Z címen negatív előjelű szám található-e vagy sem. A feltételes ugrási utasításnak az alapművelet számának helyén olyan számot kell tartalmaznia, amely a feltételes ugrás különleges műveletének elvégzésére utasítja a gépet, s természetesen tartalmaznia kell a szokásos tizedesjegy-sorozat alakjában az X , Y , Z címeket is. [\[12\]](#)

A vezérlésnek ez a módja fontos tekintetben különbözik a korábban tárgyalt dugaszolós eljárástól. Annak keretében ugyanis kézzelfogható fizikai objektumok testesítették meg a sorrendszabályozási pontokat, s az ilyen pontok között fennálló dugaszolt kapcsolatok fejezték ki a megoldásra váró problémát. Most viszont az utasítások “eszmei dolgok”, amelyek a gép memóriájában vannak tárolva, s így a memória megfelelő regisztereinek összessége, más szóval a memória bizonyos szegmense fejezi ki a problémát. A vezérlésnek ezt a módját röviden “memóriában tárolt” vezérlésnek is szokták nevezni.

A memóriában tárolt vezérlés működés módja

Mivel ilyen módon az egész vezérlési folyamat összes utasításait számok alakjában a gép memóriája tárolja, sokkal rugalmasabb eljárások vezethetők be, mint bármely más vezérlési eljárásnál, így például a gép a kellő utasításra számokat (vagy utasítást jelentő számokat!) hívhat le memóriájából, feldolgozhatja az így nyert számadatokat (akkor is, ha utasításokat jelentenek!), majd a feldolgozás eredményeit ismét betárolhatja memóriájában (ugyanarra vagy más címre!). Magyarán: a gép megváltoztathatja memóriájának tartalmát, sőt éppen ez az ilyen gépek normális működés módja. Ez egyben lehetővé teszi azt, hogy a gép módosításokat hajtson végre a memóriájában tárolt utasításokon – ugyanazokon az utasításokon, amelyek saját működését szabályozzák! –, s ilyen körülmények között mindenféle szövevényes utasításrendszer vezethető be, amely folyamatosan módosítja önmagát és ezzel az általa vezérelt számítási eljárásokat is. E módszerrel sokkal szövevényesebb lépéssorozatok valósíthatók meg, mint amilyeneket a pusztán iterációs számítási eljárások alkotnak. Bárha talán mindez bonyolultnak és erőltetettnek tűnik, az efféle módszereket széles körben alkalmazzák a modern számítástechnikában, illetve még inkább a gépi számítási eljárások megtervezésében (programozásában), ahol igen fontos gyakorlati szerepre tettek szert.

Természetesen az utasításrendszert, amely a megoldandó problémát – úgy is mondhatjuk: a gép kezelőjének szándékát – jeleníti meg, előre “közölni” kell a géppel, azaz be kell tárolni memóriájába. Ez a betárolás rendszerint lyukszalagos vagy más hasonló berendezés segítségével történik.

Vegyes vezérlési formák

A vezérlés két fentebb tárgyalt módja, a dugaszolt és a memóriában tárolt vezérlés különféle kombinációkban is alkalmazható, amiről érdemes néhány szót szólni.

Vegyünk például egy dugaszolt vezérlésű gépet, s tegyük fel, hogy olyan típusú memóriával látjuk el, mint amilyenel az imént leírt gépek rendelkeznek. Természetesen összes dugaszainak mindenkori állása leírható egy megfelelő hosszúságú számjegysorozat segítségével, amelyet el is raktározhatunk memóriájában. Ez ugyan valószínűleg több szokványos (mondjuk: tizenkét jegyű) szám helyét fogja elfoglalni, de ez csak annyit jelent, hogy több egymást követő – legcélszerűbben szomszédos – regisztert kell fenntartani számára. Ily módon ez a dugaszállás teljes egészében megtalálható lesz bizonyos számú egymást követő címen, amelyek közül az elsőt használhatjuk rövidített címeként (tudva, hogy hány szomszédos címet foglal még le). Természetesen annak sincs akadálya, hogy a memóriában több ilyen számjegysorozatot tároljunk, amely a dugaszok más-más állásának felel meg.

A gépet ezenfelül még teljesen szabályos memóriában tárolt vezérléssel is elláthatjuk, amihez e vezérlésmód már ismertetett utasításrendszerén kívül csak három újabb utasítástípus bevezetésére van szükség. Először egy olyan utasítás kell, amelynek hatására a gép összes fennálló dugaszkapcsolatait egy adott memória címen található számjegysorozatnak megfelelően átállítja. Másodszor egy olyan utasítás kell, amelynek hatására a gép csak egyes meghatározott dugaszkapcsolatait módosítja. (Megjegyezzük, hogy mindkét féle utasítás csak úgy vihető keresztül, ha a gépben elektromosan vezérelhető készülékek, például a fentebb leírt módon irányított elektromágneses jelfogók, vagy pedig elektroncsövekkel, ill. ferromágneses magokkal működő kapcsolóberendezések végzik a dugaszolást.) Harmadszor olyan utasításra van szükség, amely a gép vezérlését a memóriában tárolt üzemmódból a dugaszolt üzemmódba viszi át.

Természetesen arra is szükség van, hogy a dugaszolási elrendezés a memóriában tárolt vezérlési módot (feltehetően egy meghatározott cím útján) utódként vagy elágazásos utasítás esetén mint egyik utódot tudja kijelölni.

VEGYES NUMERIKUS ELJÁRÁSOK

Az eddig elmondottakból kellő képet alkothatunk magunknak arról, hogy mennyire rugalmasak ezek a vezérlésmódok és különféle kombinációik.

Említésre méltó azonban a “vegyes” géptípusok egy további osztálya, amelyben az analóg és a digitális elv együttesen kerül alkalmazásra. Pontosabban: olyan szerkezeti megoldásról van szó, amelynél a gép egyik része analóg, másik része digitális működésű, a két rész pedig közlekedik egymással (numerikus anyag tekintetében) és közös vezérlés alatt áll. Más megoldás esetén a két résznek saját külön vezérlése is lehet, de akkor a két vezérlésnek is közlekednie kell egymással (logikai anyag tekintetében). Az ilyesfajta berendezésekhez természetesen olyan szervekre van szükség, amelyek digitális alakban megadott számokat analóg formájúvá tudnak átalakítani és viszont. Az előbbi lépés folytonos mennyiségek megszerkesztését igényli digitális (számjegyes) kifejezésükből, az utóbbi lépés folytonos mennyiségek megmérését és az eredménynek digitális alakban való kifejezését, Mindkét átalakítás céljára különféle eszközök ismeretesek, többek között gyors működésű elektromos berendezések.^[13]

Számok vegyes megjelenítése és ennek alapján működő gépek

A “vegyes” géptípusok egy másik fontos osztályába az olyan gépek tartoznak, amelyeknél a számítási eljárás (de persze nem a logikai eljárás) minden egyes lépésében analóg és digitális elemek kombinálódnak. Ennek legegyszerűbb példája az, ha minden egyes szám ábrázolása részben analóg, részben digitális módon történik. Le fogok írni egy ilyen megoldást, amelyet bizonyos gépek vagy részegységek megtervezésénél és megszerkesztésénél egyes esetekben már alkalmaztak, bárha eddig még egyetlen nagyobb számológépet sem építettek e működési elv alapján. Távközlési célokra azonban bizonyos típusú feladatoknál használni szokták.

A szóban forgó rendszert “impulzussűrűségi rendszernek” fogom nevezni. Lényege az, hogy minden számot egymást követő elektromos impulzusok (áramlökések) sorozata egyetlen vezetékben jelenít meg, mégpedig oly módon, hogy nem az impulzussorozat hossza, hanem az impulzusok egymásra következésének átlagos időbeli sűrűsége fejezi ki a kívánt számértéket. Ehhez persze meg kell határozni két időközt: t_1 -et és t_2 -t (fontos, hogy t_2 lényegesen nagyobb legyen t_1 -nél!), s az átlagolást a t_1 és t_2 közti időtartamokra kell alkalmazni. Ugyancsak meg kell adni, hogy miféle számegegység feleljen meg ennek a sűrűségnek.^[14] Olykor alkalmasabb, ha nem közvetlenül a számértékeket, hanem azoknak valamilyen célszerűen megválasztott (rögzített) monoton függvényét feleltetik meg a különböző sűrűségeknek, pl. a logaritmust. Így ugyanis az impulzussorozat által reprezentált értékek finomabb feloldását lehet biztosítani azokra az esetekre, amikor ez fontos (ti. a kis számok esetére), s durvább feloldását, amikor ez is elfogadható (mint a nagy számoknál) minden átmenettel a két véglet között.^[15]

Lehet olyan szerveket szerkeszteni, amelyek el tudják végezni a négy alapműveletet az ilyen impulzussűrűségek alakjában megadott számokkal. Ha például a sűrűségek magukat a számokat jelentik, akkor az összeadás a két impulzussorozat egyszerű kombinálásával elvégezhető. A többi művelet már valamivel bonyolultabb, de mindezen célokra teljesen kielégítő, sőt többé-kevésbé elegáns módszerek állnak rendelkezésre. Nem térek itt ki arra, hogyan lehet ilyen módon a szükségeshez képest negatív számokat is megjeleníteni; elég annyi, hogy megfelelő fogásokkal ez is könnyen elintézhető.

Kellő pontosság eléréséhez a fent említett t_1 időközön belül minden sorozatnak számos impulzust kell tartalmaznia. Ha a számítás során valamely számot meg akarunk változtatni, az impulzussorozat sűrűségét kellően módosíthatjuk, feltéve hogy ezt a t_2 időközhez képest lassan hajtjuk végre.

Az ilyen típusú gépeknél a számszerű feltételek érzékelése – például logikai vezérlési célokra (lásd fentebb) – meglehetősen trükkös megoldásokat igényelhet. De azért sokféle eszközünk van, amellyel

ilyen alakban, vagyis impulzusok időbeli sűrűségével megadott számokat megfelelő analóg mennyiségekké alakíthatunk át, amelyek azután a korább ismertetett módon használhatók fel a logikai vezérlésben. (Például úgy rendezhetjük be a dolgot, hogy minden egyes beérkező impulzus bizonyos standard töltést juttasson egy kondenzátorra, amely meghatározott nagyságú ellenálláson keresztül lassan levezetődik. Ilyen körülmények között bármely adott sűrűségű impulzussorozat valamely eléggé állandó feszültségszintre és levezetési áramerősségre fogja beszabályozni a kondenzátort, s mindkét elektromos mennyiség alkalmas számok analóg megjelenítésére.)

A számológépek általános működési és vezérlési elveinek eddigi általános jellemzése után most néhány megjegyzést kívánok tenni a gépek tényleges használatának módjáról és az ebben irányadó elvekről.

PONTOSSÁG

Először az, analóg és a digitális gépek használatát kell összevetnem.

Az analóg gépek alkalmazhatóságának fő korlátozása – minden mástól függetlenül – pontossági megfontolásokból ered. Valójában az a helyzet, hogy az elektromos analóg gépek pontossága ritkán haladja meg az $1:10^3$ határt, s még az olyan mechanikus szerkezetek is, mint a differenciál-analizátor, legjobb esetben $1:10^4$ – 10^5 pontossággal dolgoznak. Digitális gépekkel viszont bármely kívánt pontosság megvalósítható; például a korábban vázolt 12 tizedesjegyű gép magától értetődően $1:10^{12}$ pontosságot biztosítana. (Később tárgyalandó okokból ez a korszerű digitális gépek jellemző pontossági szintje.)

Figyelemre méltó, hogy digitális működés esetén sokkal könnyebben növelhető a gép pontossága, mint analóg működés esetén. Egy differenciál-analizátor pontosságát viszonylag egyszerű $1:10^3$ -ról $1:10^4$ -re emelni, de $1:10^5$ arányt már csak jelenlegi legtokéletesebb technológiánk segítségével érhetünk el, $1:10^6$ pontosságot pedig



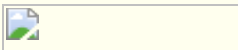
mai eszközeinkkel lehetetlen megvalósítani. Ezzel szemben egy digitális számológép pontosságának $1:10^{12}$ -ről $1:10^{13}$ -ra való növelése csak egy újabb tizedeshely bevezetését igényli az eddigi 12 mellé, s ehhez rendszerint csak $1/12$ -del (8,3%-kal) kell megnövelnünk a működő alkatelemek számát (nem is minden helyen!), s ugyanilyen arányban lassúbbodik meg a gép működése (de szintén nem minden helyen!). Sem az előbbi, sem az utóbbi nem jelent komoly megterhelést. Az impulzussűrűségi rendszer ebben a vonatkozásban az analóg rendszerre emlékeztet, de annál rosszabb: pontossága a dolog természeténél fogva alacsony szintű. Hiszen például már az $1:10^2$ pontosság biztosítása is azt igényli, hogy általában 10^2 impulzust használjunk egy-egy t_1 időközön belül, s pusztán ez a tényező $1/100$ részére csökkenti az elérhető sebességet. Ekkora méretű sebességveszteségek többnyire nehezen viselhetők el, jelentékenyen nagyobb veszteségek pedig rendszerint lehetetlenné tennék a rendszer gyakorlati alkalmazását.

A magas fokú digitális pontossági követelményének okai

Ezen a ponton azonban egy újabb kérdés merül fel: miért van egyáltalán szükség olyan rendkívüli pontosságokra, mint a digitális $1:10^{12}$? Miért nem elegendők a tipikus analóg pontosságok (kb. $1:10^4$), vagy akár a tipikus impulzussűrűségi pontosságok (kb. $1:10^2$)? Az alkalmazott matematika és a mérnöki számítások legtöbb problémájánál az alapadatok pontossága nem haladja meg az $1:10^3$ -t vagy $1:10^4$ -t, sőt gyakran még az $1:10^2$ szintet sem éri el, s a problémák megválaszolásánál sincs ennél nagyobb pontosságra szükség, sőt a válaszok még csak nem is értelmezhetők ezen a határon túl.^[16] A mindennapos vegyészeti, biológiai, közgazdasági praxisban és számos más gyakorlati területen sokszor még kisebb pontossági követelményekkel is megelégszenek. Ennek ellenére a modern nagy sebességű számítástechnika terén azt az egyértelmű tapasztalatot szereztük, hogy még $1:10^5$ és ehhez hasonló pontossági szintek sem elegendők a fontos problémák nagy

részének megoldásához, s hogy az $1:10^{10}$, sőt $1:10^{12}$ pontosságra berendezett digitális számológépek alkalmazása gyakorlatilag teljesen indokolt. Ennek a meglepő jelenségnek érdekes és jellemző okai vannak, amelyek jelenlegi matematikai és numerikus eljárásaink belső szerkezeti felépítésével kapcsolatosak.

Mindezen eljárások jellemző vonása az, hogy ha alkatelemeire bontjuk fel őket, akkor rendkívül hosszadalmasaknak bizonyulnak. Ez áll az összes olyan problémákra, amelyeknél a gyors működésű számológépek használata indokolt, azaz a legalábbis közepesen bonyolult feladatokra. Az alapvető magyarázat az, hogy jelenlegi számítási módszereink minden matematikai függvénynek alpműveletek kombinációira, sőt rendszerint éppen a négy számtani alpműveletig (vagy nagyjából hasonló műveletekig) való lebontását igénylik. Mármost a helyzet az, hogy a legtöbb függvény ilyen módon, csak *megközelíthető*, s ez a megközelítés a legtöbb esetben igen hosszú, esetleg ismétlődő (iteratív) módon definiált alpművelet-sorozatok elvégzését teszi szükségessé. (Lásd fentebb.) Úgy is mondhatnók, hogy a szükséges műveletek "aritmetikai mélysége" rendszerint igen nagy. Ehhez hozzátehetjük, hogy "logikai mélységük" még nagyobb, sőt sokszoros nagyságú, mert ha például a négy számtani alpműveletet a már korábban említett módon az elvégzésükhöz szükséges logikai lépésekig bontjuk le, akkor mindegyikük már önmagában is igen hosszú láncolatot alkot. Itt azonban csak aritmetikai mélységük kérdésével kell foglalkoznom.

Ha nagyszámú aritmetikai művelet láncolatosan követi egymást, akkor az egyes műveletek hibái superponálódnak.^[17] Mivel a hibák eloszlása lényegében (bár nem teljesen) véletlenszerű, tehát N művelet során a hiba nem N -szeresére, hanem kb. -szeresére növekszik. Ez egymagában a végeredmény $1:10^3$ arányú pontosságának biztosítása céljából még nem lenne szükségessé lépésenként $1:10^{12}$ pontosságú műveletvégzést csak  tagból álló műveletsorozat esetén merülne fel, s N értéke még a leggyorsabb modern számológépekkel végzett feladatoknál is ritkán haladja meg a 10^{10} -et. (Valóban:  feltételezésével



.) Ha egy számológép 20 mikroszekundumonként végez egy számtani műveletet és egyetlen problémán 48 óra hosszat dolgozik, akkor ez már igen szélsőséges esetnek tekinthető, s még ilyen körülmények között is N csak kb. 10^{10} -et tesz ki! Viszont figyelembe kell venni egy másik tényező hatását, nevezetesen azt, hogy a számítás során végzett műveletek a korábbi műveletek során bevitt hibákat felnagyíthatják, s ez a hatás már bármilyen nagy számközöket könnyűszerrel áthidal. Az iménti $1:10^3$ és $1:10^{12}$ hibahatárok viszonya 10^9 -nek felel meg, de 425 egymást követő művelet, amely egyenként csak 5–5%-kal növeli a hibát, máris elegendő ahhoz, hogy annak értéke 10^9 -szeresére növekedjék! Nem törekszem itt semmiféle részletes és valóságos hiba becslés kidolgozására, mert hiszen a számítástechnika nem kis részben éppen olyan rendszabályok alkalmazásából áll, amelyeknek célja az itt bemutatott hatás lecsökkentése. Mindenesetre azonban igen széles körű tapasztalatok utalnak arra, hogy amint eléggé bonyolult számítási problémák megoldásáról van szó, teljesen indokoltak a fent említett magas pontossági követelmények.

Mielőtt elhagynám a számológépek közvetlen területét, még néhány dolgot elmondok e gépek működési sebességéről, nagyságáról és más hasonló jellemzőiről.

MODERN ANALÓG GÉPEK JELLEMZŐI

A jelenleg létező legnagyobb analóg gépek alpműveleti szerveinek száma 100-as vagy 200-as nagyságrendű. E szervek jellege természetesen attól függ, hogy miféle analóg folyamatot alkalmaznak a gépben. A közelmúltban leginkább elektromos vagy legalábbis elektromechanikus szerkezeti megoldásokat alkalmaztak. (A mechanikus fokozatot a nagyobb pontosság érdekében iktatták be – lásd fentebb). Bonyolultabb logikai vezérlési feladatok ellátásához – mint minden effajta logikai vezérléshez – még bizonyos jellegzetesen digitális működésű szerveket is be kell építeni, például elektromágneses jelfogókat, vagy akár elektroncsöveket, amelyeket azonban ez esetben nem túl nagy sebességgel működtetnek. Az analóg gépekbe beépített ilyen

digitális működésű alkatelemek száma néhány ezret is elérhet. Kivételes körülmények között az efféle gépek 1 millió dolláros nagyságrendű beruházást is igényelhetnek. [\[18\]](#)

MODERN DIGITÁLIS GÉPEK JELLEMZŐI

A nagy digitális gépek szervezete még bonyolultabb. Ezek “aktív” szervekből és “memória” szerepét betöltő szervekből állnak. Az utóbbiak közé fogom számítani a “bemenő” és “kimenő” szerveket is, bár ez közönségesen nem szokásos.

Az aktív szervek a következők: Az első csoportba tartoznak azok, amelyek az alapvető logikai tevékenységeket végzik, azaz koincidenciákat észlelnek, ingereket kombinálnak és esetleg antikoincidenciákat észlelnek. (Ennél többre nincs is szükség, bár gyakran bonyolultabb logikai műveletekre szolgáló szerveket is alkalmaznak, amelyek e részlettevékenységek bizonyos kombinációit valósítják meg.) A második csoportba az impulzusok regenerálására szolgáló szervek tartoznak, amelyek helyreállítják az impulzusok fokozatosan elhasználódó energiáját, vagy egyszerűen felemelik őket a gép egyik részében uralkodó energiaszintről a gép másik részében uralkodó magasabb energiaszintre (ezt a két tevékenységet közös néven “erősítés”-nek nevezik), más esetben pedig helyreállítják a megkívánt (azaz bizonyos tűrések közt standardizált) impulzusalakzatot és impulzusidőzítést. Az első csoportba tartozó szervek logikai műveleteiből épülnek fel az aritmetikai műveletek is, a mint azt már korábban is láttuk. [\[19\]](#)

Az aktív alkatelemek és a sebesség kérdése

Az aktív szervek feladatait történeti sorrendben eddig elektromágneses jelfogók, elektroncsövek, kristálydiódák, ferromágneses magok és tranzisztorok (lásd fentebb), illetve ezek alkalmazásával készített kis áramkörök látták el. A jelfogókkal körülbelül 10^{-2} másodperc alatt lehetett elvégezni egy elemi logikai műveletet, míg az elektroncsövekkel már 10^{-5} – 10^{-6} másodperces

nagyságrendű (kivételes esetben az utóbbi említett határ felének vagy negyedének megfelelő) műveleti időket is meg lehetett valósítani. A kristálydiódák, ferromágneses magok és tranzisztorok, amelyek közös néven mint a szilárd testek fizikájába tartozó eszközök ismeretesek, a 10^{-6} másodperces szinten (néhány esetben ennek az időértéknek valamilyen kis többszörösén) váltak be, s valószínű, hogy segítségével 10^{-7} másodpercre vagy még kevesebbre sikerül csökkenteni az egy-egy elemi logikai műveletre eső időt. Másfajta eszközök, amelyekre itt nem térek ki, alighanem további tökéletesítésre is módot fognak nyújtani. Azt várom, hogy egy évtizeden belül el fogjuk érni a 10^{-8} – 10^{-9} másodperces szintet. [20]

A szükséges aktív alkatelemek száma

Az aktív alkatelemek száma a nagy modern gépekben típusonként mintegy 3000 és 30 000 között változik. Az alapvető aritmetikai műveleteket (a számtani alapműveleteket, ill. ezeknek korábban ismertetett gépi változatait) rendszerint csak ezen aktív alkatelemek bizonyos alcsoportja (helyesebben: több alcsoport kisebb-nagyobb mértékű összevonásából alkotott csoportja) végzi, s ez alkotja az úgynevezett "aritmetikai szervet" (aritmetikai egységet). Nagy modern gépekben ez a szerv típusonként változóan mintegy 300–2000 aktív szervet foglal magában.

Mint alább látni fogjuk, az aktív szervek bizonyos együtteseit speciális memóriefeladatok ellátására is használják; ilyen célra rendszerint 200–2000 aktív szervet állítanak be.

Végül a tulajdonképpeni memóriaegységekhez is aktív szervekből alkotott segédegységekre van szükség kiszolgálásuk és kezelésük céljából. A nem aktív egységekből felépített leggyorsabb memóriacsoport (az alábbiakban bevezetendő terminológia szerint: a memóriahierarchia második szintje) számára e célból mintegy 300–2000 aktív szervet kell fenntartani. A memória összes részei együttvéve az egész gép aktív szerveinek 50%-át is igénybe vehetik ilyen segédleti szükségleteik fedezésére.

A memóriaszervek, kapacitások és elérési idők

A memóriaszervek több osztályba sorolhatók. Besorolásuk alapjául az ún. elérési idő szolgál. Ezen először is az az idő értendő, amely a gép valamelyik más részében (rendszerint az aktív szervekből alkotott regiszterek egyikében – lásd alább) már jelenlevő szám betárolásához, illetve a memóriaszerelvben esetleg már korábban betárolt szám eltávolításához szükséges. Másodszor pedig elérési időnek számít az az idő, amelyre szükség van ahhoz, hogy a memóriaszerv – feltett “kérdésre” – közöljön (“visszamondjon”) egy betárolt számot, ha a gép valamelyik része (rendszerint az aktív szervekből alkotott regiszterek egyike – lásd alább) annak átvételére alkalmas. Ezt a kétféle elérési időt adott esetben mint a memóriaszerv “bemeneti” és “kimeneti” idejét különböztethetjük meg, de használhatunk ehelyett egyetlen időadatot is, például a nagyobbikat a kétféle elérési idő közül, vagy a kettő átlagát. Egyébként az elérési idő alkalomról alkalomra változhatik vagy azonos is maradhat; ha nem függ a memóriacímtől, akkor “véletlenszerű elérési idő”-ről szoktunk beszélni.^[21] Viszont még a változó elérési időt is jellemezhetjük egyetlen értékkel, például a maximummal vagy az átlaggal; az utóbbi természetesen a megoldásra váró probléma statisztikai jellegétől is függhet. Az egyszerűség kedvéért itt mindenestre egyetlen elérési időt fogunk emlegetni.

Aktív szervekből alkotott memóriaregisztetek

Memóriaszerveket – mint említettük – aktív szervekből is fel lehet építeni. Az ilyen memóriaszervek elérési idői a legrövidebbek, de ezek jelentik egyben a legköltségesebb megoldást. Egy-egy ilyen regiszterhez ugyanis – elérési segédberendezésekkel együtt – legalább négy elektroncsőből (vagy nem sokkal kevesebb tranzisztorból és más a szilárd testek fizikájába tartozó eszközökből) megszerkesztett áramkörre van szükség egyetlen kettes számrendszerbeli számjegy (vagy egy előjel) tárolásához, s egy

közönséges tizedesjegy tárolása eszerint még legalább négyszer ekkora felszerelést igényel (lásd fentebb), így tehát a már többször hivatkozott tizenkét tizedesjegyű és előjellel is ellátott számok rendszeréhez ilyen alapon 196 elektroncsőből álló regiszterekre volna szükség. Viszont az ilyen felépítésű regiszterek elérési ideje mindössze egy-két elemi reakció idejét teszi ki, ami rendkívül gyorsaságot jelent másfajta memóriaszervekhez képest. (Lásd alább.) Továbbá több ilyen regiszter egybeépítésénél bizonyos megtakarítások is eszközölhetők felszerelésükben. Végül pedig effajta regiszterekre mindenképpen szükség van más típusú memóriák “bemenő” és “kimenő” elérési szerveiként, sőt egy-két (néhány megoldásnál három) így működő regiszter az aritmetikai szerv felépítéséhez is nélkülözhetetlen. Mindent összevéve ezek a regiszterek – mérsékelt számban alkalmazva – gazdaságosabbak, semmint első pillantásra hinné az ember, s ezenfelül az említett terjedelemben nem is nélkülözhetők a gép más szerveinek alkatrészeiként. Ezzel szemben úgy látszik, nem alkalmasak az olyan nagy kapacitású memóriák felépítésére, mint amilyenekre majdnem minden nagy számológépben szükség van. (Ez a legutóbbi megjegyzés azonban csak a modern, vagyis már az elektroncsőkorszakban vagy még később megszerkesztett számológépekre vonatkozik. Az elektronikus számológépek ideje előtti jelfogós gépekben jelfogók szolgáltak aktív szervekként, s jelfogóregiszterek alkották a memória fő formáját. Az alábbiakban szintén mindig csak modern gépekre vonatkoznak majd fejtegetéseink.)

A memóriaszervek hierarchiájának elve

Terjedelmes memóriakapacitásokat más típusú memóriákkal lehet csak megvalósítani. S ezen a ponton jut érvényre a memóriaszervek “hierarchiájának” elve, amelynek jelentősége a következő:

Ahhoz, hogy egy gép megfelelően működhessen, vagyis hogy meg tudja oldani kitűzött feladatait, bizonyos N számú és t elérési idejű “szót”^[22] felölelő memóriakapacitásra lehet szüksége. Ugyanakkor azonban műszakilag tetemes nehézségeket okozhat vagy – ahogy

az ilyen nehézségek rendszerint jelentkezni szoktak – igen költségesnek bizonyulhat a gépet olyan memóriával felszerelni, amely N szót t elérési idővel tud rendelkezésre bocsátani. De esetleg nincs is arra szükség, hogy a gép mind az N szót valóban t idő alatt elérhesse; lehetséges, hogy csak sokkal kevesebb, mondjuk N' szónál valóban nélkülözhetetlen az, hogy t idő alatt elérhető legyen, s ha e szóknál biztosítottuk a t elérési időt, akkor az egész N szónyi kapacitásnál már a hosszabb t'' elérési idő is megfelel a célra. E gondolatmenetet továbbfűzve kiderülhet, hogy a leggazdaságosabb, ha a két említett kapacitáson kívül még bizonyos közbenső – N szónál kisebb, de N' szónál nagyobb – memóriakapacitásokat biztosítunk a gép számára, t -nél hosszabb, de t'' -nél rövidebb elérési időekkel. A legáltalánosabb megfogalmazásban ez annyit jelent, hogy a gépet N_1, N_2, \dots, N_{k-1} , szó befogadására alkalmas és t_1, t_2, \dots, t_{k-1} elérési idejű kapacitások sorozatával látjuk el, mégpedig oly módon, hogy az egyre nagyobb követelményeknek megfelelő kapacitásokhoz egyre kisebb követelményeknek megfelelő elérési idők társulnak:

$$N_1 < N_2 < \dots < N_{k-1} < N_k \text{ és } t_1 > t_2 > \dots > t_{k-1} > t_k$$

– azaz N_i szó befogadására van szükség t_i elérési idővel minden $i=1, 2, \dots, k-1, k$ érték mellett. (Ezt az általános képletet a korább mondottakra úgy alkalmazhatjuk, ha feltesszük, hogy $N_1=N', t_1$, továbbá $N_k=N, t_k=t''$.) E megfogalmazás keretében i minden egyes értéke a memóriaszervek hierarchiájának egy-egy szintjét képviseli, s a hierarchiának k számú szintje van.

Memória-alkatelemek és elérési problémák

Egy nagyméretű és nagy sebességű modern számológépnél a memóriahierarchia összes szintjeinek megszámlálásakor legalább három, de esetleg öt szintre is bukkanhatunk.

Az első szint mindig a fentebb leírt típusú (aktív szervekből alkotott) regisztereknek felel meg. Számuk – N_1 – majdnem minden gépfajtánál legalább három, néha azonban lényegesen több; olykor

húsz ilyen regiszter beállítását is javasolták. Elérési idejük – t_1 – a gép elemi kapcsolási idejével azonos (vagy esetleg kétszer annyi).

A hierarchia soron következő második szintjét mindig speciális memóriaszervek segítségével valósíthatják meg. Ezek különböznek a gép más részeiben és a hierarchia első szintjén alkalmazott kapcsolószervektől (aktív szervektől). Manapság rendszerint néhány ezertől néhány tízezer szóig terjedő memóriakapacitásokat használnak ezen a szinten; N_2 értéke tehát néhány ezertől néhány tízezerig terjed, de az utóbbi nagyságrendű kapacitásokkal rendelkező efféle memóriaegységek e sorok írásakor még csak tervrajzokon vannak meg. Az elérési idő, vagyis t_2 , rendszerint öt-tízszer nagyobb, mint az előző szinten.

A további szintek rendszerint fokról fokra mintegy 10-szeres szorzótényezővel növelik az N_i memóriakapacitást. A t_i elérési idők még gyorsabban növekszenek, de ezeket illetően bizonyos korlátozásokat és fenntartásokat is figyelembe kell venni, amikre külön szabályok vonatkoznak. (Lásd alább.)

A leggyorsabb működésű alkatelemek, amelyek speciálisan memóriaszervek céljára szolgálnak (tehát nem aktív szervek a fentebb tárgyalt értelemben) az elektrosztatikus eszközök bizonyos csoportjából és a mágnesmagrendszerek sorából kerülnek ki. Az utóbbiak alkalmazása egyre uralkodóbbá válik, bár a jövőben másfajta (elektrosztatikus, ferroelektromos stb.) technikák is előtérbe kerülhetnek vagy újra eluralkodhatnak.

A hierarchia további szintjein jelenleg többnyire forgó mágneses dobokat és mágnesszalagos berendezéseket alkalmaznak; mágneses tárcsák használata is szóba került, sőt egy-két kísérlet is történt ezeknek alkalmazására. [\[23\]](#)

Az elérési idő bonyodalmai

A három utoljára említett mágneses eszköznél különleges elérési szabályok és korlátozások érvényesülnek: egy mágneses dob- vagy tárcsamemória forgás közben egymás után és ciklikus rendben

bocsátja rendelkezésre különböző részeit a mágnesszalag memóriakapacitása gyakorlatilag korlátlan, de különböző részei csak rögzített lineáris sorrendben válnak hozzáférhetővé, bár a szalag megállításával és fordított irányba való feltekeréssel ez a sorrend megszakítható és megfordítható. Mindezek az eszközök azonban még különféle berendezésekkel is kombinálhatók, amelyek a rögzített memóriasorrendeket a számítógép működésével speciális módon szinkronizálják.

Minden memóriahierarchia legutolsó szintjét szükségképpen a külvilág jelenti, értve ezen a gépen kívüli világot, illetve közelebbről e világnak azt a részét, amellyel a gép közvetlenül érintkezni tud, s amelyet bemeneti és kimeneti szervei jelentenek számára. Ezek rendszerint lyukszalagok vagy lyukkártyák, de a kimenő oldalon természetesen közönséges gépírásban is megjelenhetnek az eredmények. Néha a gép végső ki-, ill. bemenő rendszere a mágnesszalag; ennek mágneses jeleit azután a számítógéptől független berendezéssel fordítják le közvetlenül használható alakba (pl. gépírás, szalaglyukasztás).

Az elérési időket a következő néhány konkrét számadattal is jellemezhetem: a jelenleg alkalmazásban levő ferromágneses magmemóriáknál 5–15 mikroszekundum; elektrosztatikus memóriáknál 8–20 mikroszekundum; mágneses doboknál (percenként 2500–20 000 fordulat esetén) fordulatonként 24–3 milliszekundum, ami alatt 1–2000 szó tárolható be; mágnesszalagoknál másodpercenként 70 000 vonalig terjedő sebességek, ami vonalanként 14 mikroszekundumnak felel meg, s egy szó hossza 5–15 vonalra terjedhet.^[24]

A közvetlen címzés elve

Az összes létező gépek és memóriák “közvetlen címzéssel” működnek, ami annyit jelent, hogy a memóriában tárolt szavak mindegyikének saját számszerű címe van, ami egyértelműen megjelöli őt magát és a memóriában elfoglalt helyét (az összes hierarchikus szintek együttesén belül). Ez a számszerű cím mindenkor kifejezetten meg van adva, amikor a szót a memóriába

beírják vagy onnan leolvassák. Megjegyzendő, hogy olykor nem lehet egyidejűleg hozzáférni a memória minden részéhez. (Lásd fentebb.) Vannak továbbá többszörös memóriák, amelyeknek különböző részeit illetően előírások érvényesülnek elérésük sorrendjének meghatározásánál. Ilyen esetekben a memória elérésének módja attól függ, hogy milyen általános helyzetben van a gép abban a pillanatban, amikor a memória igénybevétele szükségessé válik. Viszont soha semmi kétértelműség nincs a cím és a cím által megjelölt memóriahely tekintetében.

AZ AGY

Az eddigi fejtegetések már megteremtették az alapot arra az összehasonlításra, ami e mű tulajdonképpeni célja. Elég részletes leírást adtam a modern számológépek természetéről és azokról a nagy alternatív elvekről, amelyek szerint munkájuk megszervezhető. Most rátérhetek az összehasonlítás másik felére, az emberi idegrendszer taglalására. Meg fogom vitatni azokat a hasonlatosságokat és eltéréseket, amelyek e kétféle “automata” között fennállnak. A hasonlósági pontok kimutatása jól ismert területre vezet. Vannak azonban eltérési pontok is, mégpedig korántsem csak méret és sebesség tekintetében – ami nyilvánvaló –, hanem bizonyos sokkal mélyebb szinteken: többek között a működési és vezérlési elvek, valamint az általános szervezeti megoldás vonatkozásában. Fő célom néhány ilyen eltérés kifejtése. Ezeket viszont csak úgy értékelhetjük kellőképpen, ha szembehelyezzük és egybevetjük őket a hasonlatosságokkal és a már említett felszínebb eltérésekkel (méret, sebesség stb.). Ezért tárgyalásunk során mindezekre szintén komoly figyelmet kell szentelnünk.

A neuron működésének egyszerűsített leírása

Az idegrendszer vizsgálatánál mindenekelőtt szembetűnik, hogy fő arculatát tekintve digitális jellegű. Ezt a tényt, valamint azokat a szerkezeti és működési adottságokat, amelyeken e tény megállapítása nyugszik, kissé bővebben meg kell vitatnunk.

A rendszer alapeleme az *idegsejt*, a *neuron*, s ennek normális működése abban áll, hogy *idegimpulzusokat* kelt és továbbít.^[25] Egy-egy ilyen impulzus meglehetősen bonyolult folyamat, amelynek sokféle – elektromos, kémiai és mechanikai – oldala van. Mindazonáltal eléggé egyértelműen meghatározott, azaz mindenféle körülmények között nagyjából azonosan zajlik le. Lényegileg egységes, reprodukálható választ jelent igen változatos ingerekre.

Hadd térjek itt ki valamivel részletesebben erre a kérdésre, vagyis az idegimpulzus azon sajátosságaira, amelyek a most tárgyalandó összefüggésben lényegesnek látszanak.

Az idegimpulzus természete

Az idegsejtet egy *sejttest* alkotja, amely közvetlenül vagy közvetve többszöri elágazással egy vagy több nyúlványt, ún. *tengelyfonalat* bocsát ki magából. Az idegimpulzus olyan folyamatos változás, amely állandó, bár esetleg a sejt funkciójától függő sebességgel terjed tova egy tengelyfonal (pontosabban: egy sejt valamennyi tengelyfonala) mentén. Egyik jellemzője kétségkívül az, hogy elektromos zavarként jelentkezik; valóban, leggyakrabban ebben a minőségben írják le. A zavar rendszerint mintegy 50 millivolt nagyságú és körülbelül 1 ezredmásodpercnyi időtartamú elektromos potenciál alakját ölti; ezzel párhuzamosan kémiai változások is végigfutnak a tengelyfonalon, így ott, ahol az impulzuspotenciál áthalad, változások mennek végbe az intracelluláris folyadék ionösszetételében és ezzel együtt a tengelyfonal falának, *membránjának* elektrokémiai tulajdonságaiban (vezetőképességében, áthatolhatóságában). A tengelyfonal végződéseinél a változások kémiai jellege még szembeötlőbb, mert ott az impulzus beérkezésekor sajátos és jellemző anyagok lépnek fel. Végül alighanem mechanikai változások is történnek, mert nagyon valószínű, hogy csak a sejthártya – a fent említett membrán – molekuláinak reorientációja, vagyis a molekuláris alkatelemek viszonylagos helyzetváltoztatása módosíthatja azt, hogy a hártya milyen mértékben áthatolható a különféle ionok számára.

Mindehhez pedig hozzá kell tenni, hogy az összes itt felsorolt változások reverzibilisek. Más szóval: ha az impulzus már tovább haladt, akkor a tengelyfonal mentén az eredeti állapotok minden tekintetben helyreállnak és az összes alkatelemek visszatérnek eredeti helyzetükbe.

Mivel azonban az összes ilyen hatások molekuláris méretekben mozognak – a membrán néhány tizedmikron (10^{-5} cm) vastagságú, ami az itt közrejátszó nagy szerves molekulák esetében molekuláris

nagyságrendet jelent –, figyelembe kell vennünk azt, hogy az elektromos, kémiai és mechanikai változások közt tett fenti megkülönböztetéseink a valóságban korántsem érvényesülnek olyan élesen, mint első elgondolásra hihetnők. Az igazság az, hogy molekuláris nagyságrendben az effajta hatások nem határolhatók el élesen egymástól: az összes kémiai változásokat az intramolekuláris erők megváltozása váltja ki, s ezek az erők szabják meg egyben a molekulák viszonylagos helyzetváltoztatását is, úgyhogy a kiváltás végső soron mechanikai jellegű. Továbbá minden ilyen intramolekuláris mechanikai változás megváltoztatja az érintett molekulák elektromos tulajdonságait, vagyis módosult elektromos tulajdonságok és módosult viszonylagos elektromos potenciálszintek kialakulására vezet. Összefoglalóan tehát azt mondhatjuk, hogy a szabványos (makroszkopikus) méretarányok között az elektromos, kémiai és mechanikai folyamatok élesen elhatárolható alternatívákat képeznek, viszont az ideghártya megközelítőleg molekuláris nagyságrendjében a jelenségek mindezen oldalai többé-kevésbé egybeolvadnak. Ezért nem meglepő, ha az idegimpulzus olyan jelenséget alkot, amely bármelyik ilyen oldalról vizsgálható.

Az ingerlés folyamata

Mint már említettem, a teljesen kialakult idegimpulzusok kiváltásuk módjától függetlenül hasonlóak egymáshoz. Mivel jellegük nincs egyértelműen meghatározva (elektromos vagy kémiai oldalról egyaránt definiálható!), tehát kiváltásuk is egyaránt tulajdonítható elektromos vagy kémiai tényezőknek. Az idegrendszeren belül azonban leggyakrabban egy vagy több más idegimpulzus vált ki egy-egy új impulzust. Adott körülmények között ez a kiváltási folyamat – az idegimpulzus *ingerlése* (stimulálása) – sikerrel járhat, vagy sikertelen maradhat. Ha sikertelen marad, akkor előbb egy múltó zavar lép fel, amely azonban néhány másodperc alatt elhal, és a zavar nem terjed tovább a tengelyfonal mentén. Ha viszont sikerrel jár, akkor a zavar igen hamar nagyjából szabványos alakot ölt és így terjed végig a tengelyfonal mentén. Vagyis ebben az esetben a fentebb kifejtett módon egy szabványos idegimpulzus halad tova a

tengelyfonal mentén és megjelenésmódja meglehetősen független attól, hogy részleteiben miféle folyamat volt az, ami kiváltotta.

Az idegimpulzust kiváltó ingerlési folyamat normálisan az idegsejt testén vagy annak közelében zajlik le, míg az idegimpulzus terjedése a mondottak értelmében a tengelyfonal mentén megy végbe.

Impulzusok kiváltása impulzusok által. E mechanizmus digitális jellege

Most visszatérhetek az ingerlési mechanizmus digitális jellegének kérdéséhez. Az idegimpulzusok nyilvánvalóan kétértékű jelölökként foghatók fel a már korábban tárgyalt értelemben: az impulzus hiánya jelenti az egyik értéket (mondjuk: a kettes számrendszerbeli 0 jegyet), jelenléte pedig a másik értéket (mondjuk: a kettes számrendszerbeli 1 jegyet). Hiányát és jelenlétét természetesen egy adott tengelyfonalra (pontosabban: egy adott idegsejt összes tengelyfonalaira) kell vonatkoztatni, s ezenfelül esetleg meghatározott időbeli viszonylatba is kell állítani más eseményekhez. Ilyen feltételek mellett az idegimpulzus bizonyos sajátos logikai funkciójú jelölökként (kettes számrendszerbeli 0 vagy 1 jegy jelölőjeként) értelmezhető.

Azokat az impulzusokat, amelyek egy adott neuron tengelyfonalain megjelennek, rendszerint – a már mondott módon – az idegsejt testére ható más impulzusok ingerlő hatása váltja ki. Ez az ingerlés általában feltételes jellegű, azaz csak az ilyen elsődleges impulzusok bizonyos kombinációi és szinkronizmusai fejtik ki a megfelelő ingerhatást és váltják ki a másodlagos impulzust, míg minden más behatás eredménytelen marad. Ily módon a neuron olyan szervet alkot, amely meghatározott fizikai egységeket, impulzusokat képes felvenni és leadni. Bizonyos kombinációjú és szinkronizmusú impulzusok beérkeztére saját impulzust bocsát ki, míg más esetben nem ad le impulzust. Azok a szabályok, amelyek leírják azt, hogy miféle impulzuscsoportokra reagál, egyben megszabják aktív szervként való működésmódját.

Világos, hogy ez lényegében egy digitális gép megfelelő szervének működési leírása, illetve olyan meghatározás, amely megfelel annak, ahogyan egy digitális szerv szerepét és működését jellemezni kell. Így tehát igazolja azt a kezdeti állítást, hogy az idegrendszer *prima facie* digitális jellegű. Néhány szóval azonban még körül kell határolnom ezt a “prima facie” megállapítást. A fenti leírás ugyanis bizonyos idealizálásokat és egyszerűsítéseket foglal magában, amelyeket a továbbiakban külön meg kell vitatnunk. Ha ezeket is figyelembe vesszük, akkor a digitális jelleg már nem olyan világos és egyértelmű. Mindazonáltal a fentebb kiemelt jellegzetességek azok, amelyek mindenekelőtt szembetűnők. Ezért helyesnek látszik, ha a tárgyalást – úgy, mint itt tettem – az idegrendszer digitális jellegének hangsúlyozásával kezdjük.

Az idegi reagálás időbeli jellegzetességei. Kifáradás és feléledés

Mielőtt azonban a részletekre kitérnénk, némileg tájékozódnunk kell az idegsejt méreteiről, energiaszükségleteiről és működési sebességéről. Az adatok különösen érdekesek, ha az idegsejt legfőbb “mesterséges” versenytársainak, ti. a modern logikai és számológépek aktív szerveinek, az elektroncsőnek és (újabbán) a tranzisztornak megfelelő jellemző adataival egybevetve vizsgáljuk őket.

Fentebb azt mondtam, hogy az idegsejt ingerlése normálisan a sejt testén vagy annak közelében megy végbe. Valójában azonban teljesen normális ingerlési folyamat mehet végbe egy tengelyfonal valamely pontján is. Ez annyit jelent, hogy ha megfelelő elektromos potenciált vagy megfelelő töménységű kémiai ingerkeltő anyagot alkalmazunk egy ilyen ponton, akkor ott zavar keletkezik, amely hamarosan szabványos impulzussá fejlődik, s mint ilyen halad tovább az illető ponttól fel- és lefelé a tengelyfonal mentén. Sőt az ingerlés fentebb leírt “szokásos” módja is többnyire közvetlenül a sejttestből kinyúló rövid ágacsákra hat, s ezekről terjed át a sejttestre, majd a szabályszerű tengelyfonalakra. E rövid

ingerfelvevő ágacskákat, amelyek lényegileg nem is különböznek a szabályszerű tengelyfonalaktól, *dendriteknek* nevezik.

Ha a normális ingerlési folyamatot más idegsejtekből eredő egy vagy több impulzus hajtja végre, akkor ezek az impulzusok a továbbításukra szolgáló egy vagy több tengelyfonal különlegesen kiképzett csatlakozó végződésein, ún. *szinapsziszain* át jutnak el az ingerelt sejthez. (Hogy egy idegimpulzus csak valamely szinapszison át ingerelhet-e egy másik sejtet, vagy pedig egy sejt tengelyvonalán végigfutva közvetlenül is ingerhatást gyakorolhat-e egy másik sejt kivételesen közel húzódó tengely fonalára, ez olyan kérdés, aminek taglalására itt nem kell kitérnünk. A jelek arra mutatnak, hogy az effajta rövidzárlatos ingerlési folyamat is lehetséges.)

A transzszinaptikus (szinapszison át történő) ingerlés néhány tizedred másodpercnyi (10^{-4} sec) időt vesz igénybe. Ennyi idő telik el az ingerlő impulzusnak a szinapszishoz való beérkezése és az általa kiváltott impulzusnak az ingerelt sejt legközelebb eső tengelyfonálpontján való fellépése között. Ez azonban nem a legjellemzőbb módja annak, ahogyan egy neuron reakcióidejét meghatározhatjuk, ha egy logikai gép aktív szerveként kívánjuk működését felfogni. Az ingerelt neuron ugyanis a kiváltott impulzus fellépése után nem azonnal tér vissza eredeti, ingerlés előtti állapotába, mert *fáradt*, azaz nem képes arra, hogy rögtön újabb ingerlő impulzust vegyen fel, és arra szabványosan reagáljon. A gépi ökonómia szempontjából sokkal lényegesebb sebességi adat az, hogy egy szabványos reakcióra vezető inger beérkezése után mekkora időköznek kell eltelnie, amíg egy újabb inger hatására az idegsejt ismét szabványosan reagálni tud. Ez az időköz kb. 1,5 századmásodperc (10^{-2} sec). Ezek szerint a tényleges transzszinaptikus ingerlés csak az 1,5 századmásodpercnyi helyreállási idő egy-két százalékát veszi igénybe, míg a maradék arra kell, hogy a neuron visszatérhessen az ingerlést közvetlenül követő fáradt állapotából a maga normális, ingerlés előtti állapotába. Megjegyzendő, hogy a helyreállásnak ez a folyamata fokozatosan megy végbe. A neuron már bizonyos korábbi időpontban is (kb. 0,5 századmásodperc múltán) tud ugyan reagálni, de akkor még nem szabályszerűen. Ez úgy értendő, hogy ugyan szabványos impulzust

produkál, de csak ha a kiváltó inger lényegesen erősebb a szabványos viszonyok között szükséges ingernél. Ennek a ténynek meglehetősen messzeható jelentősége van, amire még vissza fogok térni.

Így tehát a neuron reagálási ideje – definíciójától függően – 10^{-4} és 10^{-2} másodperc között mozog, de a jellemzőbb adat az utóbbi. Ezzel szemben a modern elektroncsövek és tranzisztorok 10^{-6} és 10^{-7} másodperc közti reagálási időekkel alkalmazhatók nagy logikai gépek keretében. (Természetesen itt is beszámítom a teljes helyreállási időt, amely szükséges ahhoz, hogy a szerv visszatérjen ingerlés előtti állapotába.) Mesterségesen előállított alkatelemeink működési jellemzői tehát ebben a tekintetben 10^4 – 10^5 -szeresen felülmúlják a megfelelő természetes alkatelemekét.

Ami a térbeli méreteket illeti, egészen másként fest az összehasonlítás. Az effajta terjedelmi adatok kiértékelésére többféle szempont kínálkozik, s a legjobb lesz, ha sorra vesszük ezeket.

A neuron méretei. Összehasonlítás a mesterséges alkatelemekkel

A neuron lineáris méretei esetről esetre erősen változnak, mert egyes idegsejtek sokadmagukkal szorosan összefüggő halmazokba tömörülnek, úgyhogy csak igen rövid tengelyfonalakkal rendelkeznek, míg mások a test egészen távoli részei közt közvetítenek idegimpulzusokat, s ezért nyúlványaik hossza megközelítheti az egész emberi test hosszúságát. Egyértelmű és jellemző összehasonlító adatokra ilyen körülmények között például úgy juthatunk, ha az idegsejt logikailag aktív részének méreteit vetjük össze egy elektroncső vagy tranzisztor hasonló részének méreteivel. Az idegsejt esetében itt a sejthártyát kell figyelembe vennünk, amelynek vastagsága – mint mondtuk – néhányszor 10^{-5} cm. Az elektroncső esetében a rácscatód távolság számít, amely 10^{-1} cm-től néhányszor 10^{-2} cm-ig változik; a tranzisztor esetében a két ún. túelektróda (a nem ohmikus emitter- és kollektorelektróda) távolságának háromszorosát vehetjük alapul, ha ezen alkatelemek

közvetlen, aktív környezetének méreteit tekintjük mérvadónak, s így módon nem egészen 10^{-2} cm-es adatra jutunk. Lineáris méretek tekintetében tehát a természetes alkatelemek vezetnek a mesterségesen előállítottakkal szemben mintegy 10^3 nagyságrendű szorzótényezővel.

Térfogat tekintetében is összehasonlítást tehetünk. A központi idegrendszer nagyságrendileg 1 liter, azaz 10^3 cm³ teret foglal el az agyban. A benne foglalt neuronok számát 10^{10} -re vagy valamivel többre teszik. Eszerint egy neuronra mintegy 10^{-7} cm³ esnek.[\[26\]](#)

Az a sűrűség, amellyel elektroncsövek és tranzisztorok működésképesen beépíthetők, szintén felbecsülhető, ha nem is egészen egyértelműen. Ez a beépítési sűrűség minden jel szerint műszaki és élettani tekintetben egyaránt megbízhatóbb alapot nyújt a beépítési sűrűség kvantitatív megítélésére, mint hogyha csak az egyes alkatelemek térfogatára alapoznánk az összehasonlítást. A mai technika mellett néhány ezer elektroncsőből álló berendezések mindenesetre néhányszor 10 köbláb (kb. 36 liter) helyet foglalnak el; tranzisztorokkal már egy vagy egynéhány köbláb terjedelemben is felépíthető egy hasonló berendezés. Ha ezt az utóbbi adatot fogadjuk el legjobb mai műszaki teljesítményként, akkor körülbelül 10^5 köbcéntiméter térfogatot kapunk néhányszor 10^3 aktív szervre. Eszerint aktív szervenként $10-10^2$ köbcéntiméter térfogattal kell számolnunk. Térfogati igény tekintetében tehát a természetes alkatelemek mint 10^8-10^9 -szeres szorzótényezővel vezetnek a mesterségesen előállítottakkal szemben. A lineáris méretbecslésekkel való egybevetés céljából legjobb, ha a lineáris mérettényezőt a térfogati mérettényező köbgyökével állítjuk párhuzamba. A fent említett 10^8-10^9 köbgyöke 0,5–1-szer 10^3 . Ez jól megegyezik azzal az ugyancsak 10^3 nagyságrendű adattal, amit az imént közvetlenül nyertünk.

Energiafogyasztás. Összehasonlítás a mesterséges alkatelemekkel

Végül összehasonlítást tehetünk energiafogyasztás tekintetében is. Egy aktív logikai szerv természeténél fogva tulajdonképpen semmiféle munkát nem végez: annak az impulzusnak, amit inger hatására produkál, csak az ingerlő impulzusok energiájának bizonyos arányú töredékével kell rendelkeznie, de semmiféle lényegi és szükségszerű kapcsolat ezen energiák nagysága között nincsen, így tehát a folyamatban szereplő energiamennyiség majdnem teljes egészében disszipálódik (szétszóródik), azaz hővé alakul át anélkül, hogy jelentős mechanikai munkát végezne. A fogyasztott energia az adott esetben ténylegesen szétszórt energiát jelent, s az ilyen szervek energiafogyasztása helyett ugyanolyan joggal energiaszóródásukról is beszélhetünk.

Az ember központi idegrendszerében (agyában) végbemenő energiaszóródás 10 watt nagyságrendű. Mivel pedig a közreműködő neuronok számának nagyságrendje – mint már mondtuk – 10^{10} , tehát egy neuronra 10^{-9} watt szóródás esik. Egy elektroncső tipikus energia szóródása 5–10 watt között mozog, egy tranzisztoré pedig esetleg csak 10^{-1} wattot tesz ki. Energiaszóródás tekintetében tehát a természetes alkatelemek 10^8 – 10^9 szorzótényezővel vezetnek a mesterségesen előállítottakkal szemben; ugyanezt a szorzótényezőt kaptuk az imént a térfogatszükségletek összehasonlításánál is.

Az összehasonlítások összegezése

Mindent összevéve úgy látszik, hogy térbeli méretek tekintetében a releváns összehasonlítási tényező körülbelül 10^8 – 10^9 a természetes alkatelemek javára. Ezt kapjuk a lineáris összehasonlítás eredményének köbéből, valamint a térfogatok és energiaszóródások összehasonlításából is. Ezzel szemben sebesség tekintetében mintegy 10^4 – 10^5 nagyságú tényezővel számolhatunk a mesterségesen előállított alkatelemek javára.

E kvantitatív meghatározásomra bizonyos következtetéseket építhetünk fel. Persze gondolnunk kell arra, hogy fejtegetéseink még mindig nagyon a dolgok felszínén mozognak, úgyhogy mindazok a következtetések, amelyek ezen a szinten adódnak, későbbi

mélyebbre hatoló megismeréseink fényében erős felülvizsgálatra szorulhatnak. Mindazonáltal érdemes már most is néhány következtetést levonni.

Először: A természetes alkatelemek kb. a 10^4 szorzótényezőnek megfelelő előnyben vannak a mesterséges alkatelemekkel szemben az azonos összterjedelmű aktív szervek által azonos idő alatt elvégezhető akciók tekintetében. (A terjedelmet akár térfogattal, akár energiaszóródással definiálhatjuk.) Ezt a 10^4 tényezőt a fentebb kimutatott 10^8 – 10^9 és 10^4 – 10^5 tényezők hányadosaként kapjuk.^[27]

Másodszor: Ezek az adatok arra mutatnak, hogy természetes alkatelemekből felépített berendezések esetében nagyobb számú, bár lassúbb szerv alkalmazása részesíthető előnyben, míg mesterséges alkatelemekből felépített berendezések esetében előnyösebb, ha kevesebb, de gyorsabb szervet alkalmaznak, így tehát azt várhatjuk, hogy egy hatékonyan megszervezett természetes automata (mint az emberi idegrendszer) minél több logikai (vagy információs) adat egyidejű felvételére és feldolgozására lesz berendezve, míg egy hatékonyan megszervezett nagy mesterséges automata (például egy nagy modern számítógép) inkább egymás után látja majd el a teendőit – egyszerre csak egy dologgal vagy legalábbis nem olyan sok dologgal foglalkozik. Röviden: a nagy és hatékony természetes automaták valószínűleg nagy fokban *párhuzamos* működésűek, míg a nagy és hatékony mesterséges automaták inkább soros működésre rendezhetők be. (Lásd ehhez egyes korábbi megjegyzéseinket a párhuzamos és soros működésről.)

Harmadszor: Rá kell mutatni arra, hogy a párhuzamos és a soros működés nem helyettesítheti korlátlanul egymást, amint erre szükség volna ahhoz, hogy fentebbi első megállapításunk teljes mértékben érvényes legyen. E megállapításunk során ugyanis ahhoz az egyszerű módszerhez folyamodtunk, hogy a természetes automaták méretbeli előnyének tényezőjét elosztottuk sebességi hátrányuk tényezőjével, s így állítottunk elő egyetlen jósági (hatékonysági) mutatószámot. Az igazság azonban az, hogy nem minden soros elrendezés alakítható át minden további nélkül párhuzamossá, mert bizonyos műveleteket csak bizonyos más

műveletek után lehet elvégezni, nem pedig velük egyidejűleg (ti. ha fel kell használniuk azok eredményeit). Ilyen körülmények között a soros műveletvégzésről a párhuzamos műveletvégzésre való áttérés lehetetlennek bizonyulhat, vagy esetleg csak az egész logikai felépítés módosítása és az eljárás szervezetének megváltoztatása árán válhatik lehetségessé. Másfelől viszont egy párhuzamos eljárás sorosítása is új követelményeket támaszthat az automatával szemben. Közelebbről nézve az a helyzet, hogy ilyenkor majdnem mindig új memóriaszükségletek keletkeznek, mert a sorrendben előbb elvégzett műveletek eredményeit tárolni kell mindaddig, amíg az utánuk következő műveletek is lezajlanak. Ezért várható, hogy egy természetes automata logikai felépítése és szerkezete nagyon különbözni fog egy mesterséges automataétól, továbbá az utóbbi memóriaszükségletei rendszerint nagyobbaknak bizonyulnak.

Mindezekkel a szempontokkal a további tárgyalás során még újra találkozunk.

INGERLÉSI FELTÉTELEK

A legegyszerűbb elemi logikai feltételek

Most rátérhetek azoknak az idealizálásoknak és egyszerűsítéseknek a megbeszélésére, amelyek az idegműködésről adott korábbi leírásunkban foglaltattak. Már rámutattam ezeknek létezésére, valamint arra, hogy számításba vételük egyáltalán nem egyszerű dolog.

Említettem, hogy a neuron normális kimenő teljesítménye egy szabványos idegimpulzus. Ez különféle ingerekkel váltható ki, így többek között kiválthatja egy vagy több impulzus beérkezése más neuronok felől. Más lehetséges ingerek a külvilág olyan jelenségei, amelyekre az adott neuron különösen érzékeny (fény, hang, nyomás, hőmérséklet), továbbá a szervezetben végbemenő fizikai és kémiai változások, amelyek a neuron elhelyezkedési pontján zajlanak le. Itt mindenekelőtt az ingerlés első formáját kívánom tárgyalni – azt, amelyet más idegimpulzusok végeznek.

Már korábbról tudjuk, hogy ez a mechanizmus – az idegimpulzusok kiváltása más idegimpulzusok megfelelő kombinációi által – összehasonlíthatóvá teszi a neuront a tipikus digitális működésű alapvető aktív szervekkel. Közelebbről: ha egy neuronhoz két másik neuron tengelyfonalai kapcsolódnak (szinapszisaik útján), s ha a neuron minimális ingerlési követelményeinek *két* impulzus *egyidejű* beérkezése felel meg (vagyis ennyire van szükség ahhoz, hogy a neuron egy saját impulzus kibocsátásával reagáljon), akkor ez az idegsejt valójában ún. “és”-szervként működik, a konjunkció logikai műveletét hajtja végre (amit a köznyelvben “és”-sel szoktunk kifejezni), mert csak akkor reagál, ha mindkét ingerlője egyidejűleg aktív. Ha viszont a minimális ingerlési követelményeket *egy* impulzus (*legalább* egy impulzus) beérkezése teljesíteni tudja, akkor ez az idegsejt “vagy”-szervként működik, a diszjunkció logikai műveletét hajtja végre (amit a köznyelvben “vagy”-gyal szoktunk kifejezni), mert bármelyik ingerlőjének aktivitására reagál.^[28]

Az “és” és a “vagy” a logikai alpműveletei: a “nem”-mel (a tagadás logikai műveletével) együtt a logikai alpműveletek teljes csoportját alkotják – minden más logikai művelet, bármilyen bonyolult vagy összetett, előállítható ezen alpműveletek megfelelő kombinációjával.^[29] Nem térek itt ki arra, hogy a neuronok hogyan utánozhatják a “nem” műveletét is, illetve milyen fogásokkal küszöbölhető ki e művelet alkalmazása. A mondottakból mindenesetre kitűnik az, amit már korábban is kiemeltem: ti. hogy a neuronok ebből a szemszögből alapvető logikai szerveknek, azaz egyben alapvető digitális működésű szerveknek mutatkoznak.

Bonyolultabb ingerlési feltételek

Az azonban változatlanul a valóság leegyszerűsítését és idealizálását jelenti. A neuronok ugyanis általában nem ilyen egyszerű szervezési megoldással épülnek be az idegrendszerbe. Igaz, némely idegsejt csak egy, két vagy egynéhány könnyen számba vehető más idegsejt szinapszisaát viseli testén. Sokkal gyakoribb azonban az, hogy igen sok neuron tengelyfonalával van ilyen szinapszisos érintkezése. Sőt úgy látszik, hogy olykor egyetlen

neuron több tengelyfonala szinapszisokat alkot egymáson, így tehát az ingerlők száma igen nagy lehet, s a hatékony ingerkombinációk esetleg sokkal bonyolultabb meghatározást igényelnek a fentebb vázolt “és”- és “vagy”-sémáknál. Ha egy neuron sok szinapszist visel testén, akkor legegyszerűbb magatartási szabálya az lehet, hogy csak bizonyos minimális számú egyidejű idegimpulzusra (vagy ennél többre) reagál. De van némi valószínűsége annak, hogy a dolgok még bonyolultabban is alakulhatnak. Könnyen lehetséges, hogy bizonyos idegimpulzus-kombinációk egy adott neuronra nem egyszerűen impulzusaik számánál fogva hatnak, hanem hatásuk azon szinapszisok térbeli elrendezésén is múlik, amelyeken az impulzusok beérkeznek. Olyan helyzetekkel kerülhetünk szembe, amelyekben egyetlen idegsejthez akár a szinapszisok százai tapadnak s az ezeken beérkező ingerlő impulzusokkombinációk hatékonyságát – ti. azt, hogy saját impulzussal való reagálásra készítetik-e a szóban forgó neuront – nemcsak az impulzusok száma határozza meg, hanem az is, hogy ezek a sejt milyen speciális tájait (testének vagy dendritrendszerének milyen részeit) érik, milyen térbeli viszonyban állnak egymáshoz ezek az érintett tájak, vagy milyen másfajta, még bonyolultabb kvantitatív és geometriai viszonyok állnak fenn, amelyek mind közrejátszhatnak a hatékony ingerlés feltételeinek meghatározásában.

Az ingerküszöb

Ha az ingerlés hatékonyságának feltétele az iménti értelemben legegyszerűbbnek mondható, vagyis ha bizonyos minimális számú ingerlő impulzus egyidejű jelenlétére van szükség, akkor ezt a minimális szükségletet az illető neuron *ingerküszöbének* nevezik. Elég szokásos, hogy egy-egy adott neuron ingerlési feltételeit ezen ismérv, tehát a küszöbérték alapján határozzák meg. Figyelembe kell venni azonban azt, hogy korántsem bizonyos az ingerlési feltételek ilyen egyszerű jellege, mert sokkal bonyolultabb feltételeken is múlhat az ingerlés hatásossága, mint pusztán egy ilyen küszöbérték (ti. bizonyos minimális számú egyidejű ingerhatás) elérésén. Ez a fentiekből nyilvánvaló.

Az összegeződési idő

Mindezekről eltekintve a neuron még másfajta bonyolult sajátságokkal is rendelkezhetik, amelyek nem meríthetők ki pusztán a szabványos idegimpulzusokkal kapcsolatos ingerlési és reagálási viszonyok ismertetése révén.

Utalnunk kell arra, hogy ahol a fentiekben “egyidejűségről” esett szó, ott ez nem jelentette és nem is jelenthette az idegimpulzusok tényleg pontosan egy időben való beérkezését. Minden esetben bizonyos véges hosszúságú “tűrési idővel”, szaknyelven: *összegeződési (szummációs) idővel* kell számolnunk, s az ezen belül beérkező impulzusok úgy hatnak, mintha pontosan egyidejűleg futottak volna be. Valójában esetleg még bonyolultabb viszonyok is adódhatnak, mert az összegeződési idő határai alighanem szintén csak élettelenül vonhatók meg. Valamivel hosszabb idő eltelte után is megtörténhetnek, hogy az előzőleg beérkezett impulzus részben és fokozatosan csökkenő mértékben, de azért mégiscsak összegeződik az utána következővel. Az összegeződési időnél nagyobb időközben beérkező impulzusok sorozatai – bizonyos határok között – hosszúságuk révén olyan hatást fejthetnek ki, amire az egyedi impulzus nem képes. A kifáradás és helyreállítás jelenségeinek különféle kombinációi olyan abnormális helyzetbe hozhatnak egy neuront, amelyben reagálási jellemzői mások, mint szabványos feltételek mellett. Az összes itt említett tényállásokról bizonyos (többé-kevésbé hiányos) megfigyelési adatok is rendelkezésre állnak, s minden jel arra mutat, hogy egy-egy neuron – legalábbis a megfelelő különleges viszonyok között – sokkal bonyolultabb mechanizmusként működhet, mint amit az ingerlési, ill. reagálási folyamatnak az elemi logikai műveletek egyszerű összetételeihez igazodó dogmatikus leírásával jellemezni lehet.

A receptorok ingerlési feltételei

Arról, hogy miként megy végbe a neuronok ingerlése, ha *más* tényezők, vagyis *nem* neuronok kimenő teljesítményei

(idegimpulzusok) fejtik ki az ingerhatást, nincs szükségünk hosszú fejtegetésekre. Legalábbis az itt tárgyalt összefüggésben néhány megjegyzés is elegendő. Mint már mondtuk, az effajta tényezők olyan külvilági (ti. a szervezet külső felületét érintő) jelenségek, amelyekre a szóban forgó neuron specifikusan érzékeny (fény, hang, nyomás, hőmérséklet), vagy pedig olyan fizikai és kémiai változások, amelyek a neuronnak a szervezetben elfoglalt helyén játszódnak le.

Azokat a neuronokat, amelyeknek szervezeti feladatuk az első típusú (külvilági) ingerekre való reagálás, *receptoroknak* (érzékelőknek) szokták nevezni. Helyesebb azonban, ha receptornak nevezünk minden olyan neuront, amelynek szervezeti feladata nem a más idegsejtekből beérkező idegimpulzusokra való reagálás), s ez esetben az első típusú ingerek felvevőit a *külső*, a második típusú ingerek felvevőit pedig a *belső* receptorok közé soroljuk.^[30]

Mindezekkel kapcsolatban ismét felmerül az ingerlési feltételek kérdése, amelyek meghatározzák, hogy milyen esetben vált ki az ingerlés egy idegimpulzust.

A legegyszerűbb feltételeket megint az ingerküszöb fogalmával írhatjuk le, pontosan úgy, mint az imént, amikor a neuron idegimpulzusok által való ingerléséről volt szó. Ez annyit jelent, hogy a legegyszerűbb esetben az ingerlés akkor vezet eredményre, ha a hatóerő legalább bizonyos minimális intenzitással lép fel, azaz például egy külső receptorra a megvilágítás vagy az adott rezgésszámhatárok közé eső hangenergia bizonyos minimuma fejt ki hatást. Egy belső receptornál valamilyen vegyi anyag töménységének vagy egy releváns fizikai paraméter értékének megváltozása gyakorolhat hasonló hatást, ha a változás eléri a kívánt minimumot.

Itt is külön rá kell mutatni arra, hogy a küszöbszerű ingerlési feltételek korántsem az egyedül lehetségesek. Például az optikai jelenségeket illetően az a helyzet, hogy számos neuron inkább a megvilágítás *változására* (egyes esetekben a sötétebb, más esetekben a fényesebb megvilágításra) reagál, nem pedig a megvilágítás bizonyos adott szintjére. Lehetséges azonban az, hogy

az effajta reagálás nem egyes neuronok, hanem bonyolultabb felépítésű neuronrendszerek sajátosságaiból ered. A kérdésre nem szándékozom részletesebben kitérni. Elég annyi, hogy a rendelkezésre álló adatok szerint a küszöbszerű ingerlési feltételek a receptorok esetében sem kizárólagosan érvényesülnek, hanem az idegrendszer másfajta feltételeket is alkalmaz. Ismételten utalva az iménti tipikus példára: tudott dolog, hogy a látóideg bizonyos rostjai nem valamilyen meghatározott minimális megvilágítási szintre reagálnak, hanem csak a szint megváltozására, azaz egyes rostokat a növekvő, másokat a csökkenő megvilágítás készleteti reagálásra, így tehát a szint emelkedése vagy süllyedése, a szintváltozás nagysága és nem a szint magassága szolgál az idegimpulzus kiváltásának feltételéül.

Célszerűnek látszik, hogy most néhány szót szóljunk e "bonyodalmak" jelentőségéről az idegrendszer működésmódja és funkciói szempontjából. Természetesen elképzelhető, hogy mindezek a bonyodalmak nem töltenek be semmiféle hasznos funkciót. Érdemesebb azonban mérlegelni azt a lehetőséget, hogy mégiscsak van valami hasznuk, mert ehhez bizonyos megfontolásokat is fűzhetünk.

Elképzelhető például az, hogy az alapjában véve digitálisan megszervezett idegrendszerben a szóban forgó bonyodalmak az analóg vagy "vegyes" típusú működést képviselik. Felvetődött az a gondolat, hogy ilyen mechanizmusok révén rejtettebb jellegű, de igen átfogó elektromos effektusok hathatnak ki az idegrendszer működésére. Meglehet, hogy ily módon bizonyos általánosult elektromos potenciálok valóban fontos szerephez jutnak, s hogy a rendszer egészében reagál bizonyos potenciálméleti problémamegoldásokra, amelyek kevésbé áttekinthetőek és elemiek, mint a normálisan digitális működési ismérvekkel, egyszerű ingerlési feltételekkel stb. jellemzett viszonyok. Mivel pedig az idegrendszer működése elsődlegesen bizonyára digitális működésű, tehát valószínű, hogy az ilyen nem digitális effektusok, ha tényleg léteznek, kölcsönhatásba kerülnek a digitális effektusokkal, azaz inkább "vegyes rendszert" alkotnak, és nem valódi analóg működésmódnak felelnek meg. Ilyen tárgyú spekulációkkal

egyébként számos szerző foglalkozott, s itt elég, ha a szakma általános irodalmára utalok; részletesebb megvitatásukra nem kívánok kitérni.^[31]

Meg kell azonban mondani, hogy minden effajta bonyodalom azt jelenti: egy idegsejtet – eddigi számolási gyakorlatunktól eltérően – nem tekinthetünk egyszerűen *egyetlen* elemi aktív szervnek, mert több ennél, s ezt az idegrendszer alapvető alkatelemeinek számbavételénél mindig szem előtt kell tartanunk, ha jellemző eredményre kívánunk jutni. Nyilvánvaló, hogy már a bonyolultabb ingerlést feltételek is ebben az irányban hatnak. Mert ha az idegsejtet csak a testén levő szinapszisok bizonyos kombinációinak ingerlése aktiválja, míg más kombinációk ingerlése hatástalan, akkor a valóban jellemző eredményt nem az idegsejtek, hanem inkább a szinapszisok megszámlálása adja. Ha pedig még a fent említett “vegyes” jelenségek is bonyolítják a helyzetet, akkor a számbavétel munkája tovább bonyolódik. Már az idegsejtszámlálásnak a szinapszisszámlálással való helyettesítése is tekintélyes mértékben – talán 10-szeresre vagy 100-szorosra növelheti az elemi aktív szervek számát. Ezt és még sok hasonló körülményt is mindig figyelembe kell venni az eddigi módon számolt adatok mérlegelésénél.

Lehet, hogy az összes bonyodalmak, amelyekre rámutattunk, irrelevánsak az idegrendszer működése szempontjából, de az is lehet, hogy részlegesen analóg vagy “vegyes” jellegűvé teszik működését. Figyelembevételük révén mindenesetre megnövekszik az elemi aktív szervek száma, ha megszámlálásukat szignifikáns ismérvek alapján kívánjuk végezni, így nagyon is lehetséges, hogy 10 és 100 közti szorzótényezőt kell alkalmaznunk az idegsejtszámlálással kapott adatokra.

Az idegrendszeri memória kérdése

Az eddigiekben nem történt említés az idegrendszer egy olyan összetevőjéről, amelynek létezése nagyon valószínűnek, szinte bizonyosnak mondható – már csak azért is, mert minden eddigi mesterséges számológép felépítésében életbevágóan fontos

szerepet játszott, úgyhogy alighanem elvileg nélkülözhetetlen, nem pedig csupán járulékos jelentőségű az effajta szerkezetek működése szempontjából. A *memóriáról* beszélek, s most az idegrendszernek ezzel az összetevőjével vagy inkább alegységével kívánok foglalkozni.

Mint a fenti megfogalmazásból kitűnik, tulajdonképpen csak sejtés vagy feltevés az, hogy az idegrendszeren belül egy vagy talán több memóriaberendezés működik, de mindenesetre erre mutatnak és ezt támasztják alá a mesterséges számoló automatákkal szerzett tapasztalatok.^[32] De mindjárt az erre vonatkozó fejtegetéseim elején hangsúlyoznom kell, hogy ma még minden fizikai állítás az idegrendszer ezen alegységének (vagy alegységeinek) természetéről, felépítéséről és elhelyezkedéséről egyaránt hipotetikus. Nem ismeretes, hogy a fizikai mivoltában szemügyre vett idegrendszerben hol székel a memória, az sem ismeretes, hogy külön szervet alkot-e vagy más jól ismert szervek egyes sajátos alkatelemeiből tevődik-e össze stb. Meglehet, hogy bizonyos sajátos idegek hálózata foglalja magában, de akkor ennek a hálózatnak igen terjedelmes rendszert kell alkotnia. Talán valami köze van a memóriának a test genetikai mechanizmusához is.^[33] Természetéről és helyéről ugyanolyan keveset tudunk, mint a görögök, akik úgy vélekedtek, hogy a lélek a rekeszizomban helyezkedik el. Amit tudunk, az mindössze annyi, hogy ennek a memóriának meglehetősen nagy kapacitásúnak kell lennie, s hogy nehéz elképzelni, vajon egy olyan bonyolult automata, mint az emberi idegrendszer, hogyan működhetnék ennek híján.

Az idegrendszeri memóriakapacitás becslésének elvei

Most néhány szót e memória valószínű kapacitásáról. Mesterséges automatáknál, például számológépeknél elég jól bevezetett szabványos módszereink vannak memóriák "kapacitásának" meghatározására, s ésszerűnek látszik, hogy ezeknek alkalmazását az idegrendszerre is kiterjesszük. Egy memória mindig csak az információmennyiség bizonyos maximumát tudja tárolni, s az

információ mindig átszámítható bizonyos számú "bit"-re, kettős számrendszerbeli számjegyre.^[34] Ha például egy memória ezer tízjegyű tizedes szám befogadására képes, akkor $1000 \cdot 8 \cdot 3,32$ bit kapacitást kell tulajdonítanunk neki, mert egy tízes számrendszerbeli számjegy kb. $\log_2 10 = 3,32$ bittel egyenértékű. (Az információ számvitelének ezt a módszerét C. E. *Shannon* és társai klasszikus információelméleti művei alapozták meg.) Egyébként világos, hogy 3 tizedes jegynek körülbelül 10 bittel kell egyenértékűnek lennie, hiszen $2^{10} = 1024$, s $10^3 = 1000$, azaz 2^{10} és 10^3 nagyjából egyenlő. Ilyen alapon számítva egy tizedesjegy mintegy $10/3 = 3,33$ bitnek felel meg. Ezek szerint a fentebb példaként felhozott ezer tízjegyű tizedes számot befogadó memóriakapacitás nagysága $1000 \cdot 8 \cdot 3,32 = 2,66 \cdot 10^4$ (26 600) bit. Hasonló megfontolás alapján a nyomtatott vagy gépelt ábécé egy betűjének információs kapacitása $\log_2 88 = 6,45$ bit. Minden ilyen betű ugyanis $2 \cdot 26 + 35 = 88$ különböző eshetőség közötti döntést jelent, mert az angol ábécének 26 betűje van, de a betűket duplán kell számítanunk (innen a 26 előtt álló 2 szorzótényező), hiszen nagy és kis betűket egyaránt használunk, továbbá 35 a használatos írásjelek, számjegyek és más efféle jelölések száma; a szóközt is magától értetődően az írásjelek közé kell számítanunk.^[35] Ebben az értelemben egy memória, amely 1000 effajta betűt és jelet tud tárolni, 6450 ($6,45 \cdot 10^3$) bit kapacitású. Hasonló gondolatmenet alapján az információ bonyolultabb formáinak megfelelő memóriakapacitásokat is meg lehet határozni; így például szabványos bitegységekben kifejezhetjük azt, hogy egy memória mennyi geometriai alakzatot tárolhat (természetesen valamiféle adott fokú pontossággal és részletességgel), vagy mennyi színárnyalatot fogadhat be (hasonló minősítéssel). Olyan memóriák, amelyek mindezen dolgok kombinációinak befogadására képesek, a fenti elvek szerint kiszámított kapacitások egyszerű összegének megfelelő összkapacitással rendelkeznek.

A memóriakapacitás becslése a kifejtett elvek alapján

Egy korszerű számítógép rendszerint 10^5 – 10^6 bit nagyságrendű memóriakapacitást igényel. A jelek arra mutatnak, hogy az idegrendszer megfelelő működéséhez szükséges memóriakapacitásokat ennél lényegesen nagyobbak kell feltételeznünk, mert az idegrendszer – mint a fentiekből kitűnt – sokkal nagyobb automatát alkot az eddig ismert mesterséges automatáknál (például a számítógépeknél). Hogy ennek a feltételezett idegrendszeri memóriakapacitásnak mennyivel kellene meghaladnia a 10^5 – 10^6 bit nagyságrendet, azt nehéz megmondani. Bizonyos durva tájékoztató becslésekre azonban mégis módunk van.

Úgy látszik, hogy a szabványos receptor másodpercenként mintegy 14 különálló digitális benyomást tud felvenni, ami valószínűleg ugyanannyi bitnek felel meg. Ha az idegsejtek számát 10^{10} -nek vesszük, s feltételezzük, hogy megfelelő viszonyok közt mindegyikük lényegileg belső vagy külső receptorok mintájára működik, akkor eredményként azt kapjuk, hogy az összes bemenet (az idegrendszer idegsejtjeibe belépő digitális benyomások összessége) másodpercenként $14 \cdot 10^{10}$ bit. Vannak adatok, amelyek támogatni látszanak azt a feltevést is, hogy az idegrendszerben nem létezik igazi felejtés, vagyis hogy az egyszer nyert benyomások ugyan kikerülhetnek az idegtevékenység lényeges területéről, ti. a figyelem központjából, de nem törölődhetnek nyomtalanul.^[36] Ezen az alapon felbecsülhetjük a normális emberi életidőre eső digitális benyomások össz mennyiségét. Ha – mondjuk – 60 év, azaz mintegy $2 \cdot 10^9$ másodpercnyi életidővel számolunk, akkor az ennek egészére kiterjedő össz bemenet, illetve a fenti kikötéseknek megfelelően a szükségelt memóriakapacitás terjedelme $14 \cdot 10^{10} \cdot 2 \cdot 10^9 = 2,8 \cdot 10^{20}$ bit. Ez meghaladja, a korszerű számítógépekre jellemzőnek mondott 10^5 – 10^6 bit nagyságrendet, de a többlet nem tűnik aránytalannak ahhoz képest, hogy korábbi megállapításaink szerint az idegrendszer mennyivel több elemi aktív szervvel rendelkezik, mint az említett számítógépek.

A memória különböző lehetséges fizikai megtestesülései

Fennmarad az a kérdés, hogy miként testesül meg fizikailag ez a memória az idegrendszerben. Erre a problémára különböző szerzők igen sokféle megoldást vetettek fel. Felmerült például az az elgondolás, hogy a különféle idegsejtek ingerküszöbei – vagy általánosabb megfogalmazásban: a különféle idegsejtek ingerlési feltételei – időbelileg változóak, s változásuk a szóban forgó sejtek előtörténetétől függ. Lehet, hogy egy idegsejt gyakori igénybevétele leszállítja az ingerküszöbét, vagyis megkönnyíti ingerlésének feltételeit stb. Ha ez így volna, akkor a memória az ingerlési feltételek változékonyságában rejlene. Ez a lehetőség kétségtelenül fennáll, de itteni megvitatására nem vállalkozhatom.

Ugyanennek az elgondolásnak még drasztikusabb keresztülvitelét jelentené az a feltevés, hogy maguk az idegsejtek kapcsolatai, vagyis a vezetőképes tengelyfonalak eloszlásai időbelileg változóak. Ilyen körülmények között elképzelhető volna, hogy ha egy tengelyfonalat hosszú időn át nem használnak, akkor később már nem is használható hatékony módon, míg nagyon gyakori (a normálisnál gyakoribb) igénybevétele olyan kapcsolatot eredményez, amely alacsonyabb ingerküszöböt (könnyebb ingerlési feltételeket) biztosít az adott pályán. Ez ismét azt eredményezné, hogy az idegrendszer bizonyos részei előtörténetük függvényében, időbelileg változnának, s így már önmagukban véve is memóriát alkotnának.

A memória egy másik nyilvánvalóan létező alakját a test genetikai részei alkotják: a kromoszómák és a bennük foglalt gének világosan memóriaelemek, amelyeknek állapota kihat az egész rendszer működésére, sőt bizonyos mértékig meg is határozza azt. Fennáll tehát egy genetikai memóriarendszer létezésének lehetősége is.

Vannak a memóriának még más formái is, amelyeknek egyike-másika hihetőleg szintén szerepet játszhat az itt tárgyalt összefüggésben. Így bizonyos testkörzetek kémiai összetételének egyes vonásai esetleg képesek megörökíteni, magukat egyszeri fellépésük után, s ily módon, memóriaelemek feladatát láthatják el.

Az effajta memóriatípusokat szintén figyelembe kell venni a genetikus memóriarendszer eshetőségeinek mérlegelésénél, mert úgy látszik, hogy a génekben lakozó önmegörökítő (értsd: öröklődő) tulajdonságok a jelek szerint a géneken kívül is lokalizálódhatnak a sejt más részeiben.

Nem szándékszem itt mindezekre a lehetőségekre kitérni; sok más megoldás is ugyanilyen vagy sokszor még nagyobb mértékben hihetőnek tűnik a megfelelő megfontolások során. Itt mindössze arra a megjegyzésre kívánok szorítkozni, hogy még ha nem is lokalizáljuk a memóriát az idegsejtek bizonyos meghatározott csoportjaiba, igen sokféle többé-kevésbé hihető elhelyezési lehetőség kínálkozik fizikai megtestesülése számára, s e lehetőségek közül nem is egyet már fontolóra is vettek az idevágó vizsgálódások során.

Analógiák a mesterséges számológépekkel

Végül még arra is rámutatnék, hogy idegsejtek, amelyek különböző ciklikus módokon ingerlik egymást, szintén memóriák szerepét tölthetik be. Az ilyen memóriák tehát aktív elemekből, ti. idegsejtekből épülnének fel. Számológépi technológiánkban gyakran és fontos célokra alkalmazzuk az ilyen memóriákat, sőt legkorábban éppen ezek kerültek alkalmazásra. Az elektroncsöves számológépekben az ún. billenő áramkörök, vagyis egymást kölcsönösen vezérlő, ill. elreteszelő elektroncsőpárok töltöttek be ilyen szerepet. De a tranzisztortechnológia és gyakorlatilag mindenféle nagy működési sebességekre beállított elektronikus technológia lehetővé teszi s egyben meg is követeli effajta billenő áramkörök jellegével bíró alegységek beállítását, amelyek ugyanolyan módon használhatók memóriaelemekként, mint a korai elektroncsöves számológépek ilyen áramkörei.

A memóriának nem kell az elemi aktív szervekhez hasonló alkatelemekből felépülnie

Meg kell azonban jegyezni, hogy eleve valószínűtlen volna minden olyan feltevés, amely szerint az idegrendszer főleg ebbe a típusba tartozó eszközöket használna memóriaszükségletei fedezésére. Ugyanis az efféle memóriák, amelyeket igen jellemző módon “elemi aktív szervekből összetetteknek” neveznek, minden lényeges vonatkozásban rendkívül költséges megoldást jelentenek. A modern számológépi technika éppen ilyen berendezésekkel kezdte meg munkáját: az első nagy elektroncsöves számológép, az ENIAC elsődleges (leggyorsabb és legközvetlenebbül hozzáférhető) memóriája kizárólag billenő áramkörökkel működött, viszont e gép méretei nagyon nagyok voltak (22 000 elektroncsővel dolgozott), és mai szemmel nézve mégis nagyon csekély, alig néhány tucat tízjegyű decimális számot befogadó elsődleges memóriával rendelkezett. Ez a memóriakapacitás mindössze néhány száz bitnek felel meg – semmi esetre sem éri el a 10^3 bit nagyságrendet. A mai számológépekben a gép nagysága és memóriakapacitása közti helyes arányt – mint láttuk – általában úgy határozzák meg, hogy 10^4 alapvető aktív elemhez 10^5 – 10^6 bit memóriakapacitást rendelnek hozzá. Ezt úgy érik el, hogy teljesen más technológiai megoldásokat alkalmaznak memória céljára, mint a gép elemi aktív szerveinek megalkotásánál, így például egy elektroncsöves vagy tranzistoros számológép memóriája egy elektrosztatikus rendszerben (pl. egy katódsugárcsőben) helyezkedhetik el, vagy pedig ferromágneses magok (ún. ferritgyűrűk) megfelelő elrendezésű csoportjaiban. Nem törekszem azonban itt a memóriák teljes osztályozására, mert vannak olyan fontos technikai megoldások, amelyek nem illeszthetők be egykönnyen az ilyen osztályokba. (Itt az akusztikus késleltetéssel, ferroelektromosan vagy magnetostriktív késleltetéssel működő memóriatípusokra gondolok, de e példák száma még szaporítható.) Arra azonban mindenképpen rá kell mutatnom, hogy a memória egészen másfajta alkatelemekből épülhet fel, mint amilyenek az alapvető aktív szervek megszerkesztésében szerepet játszanak.

A problematikának ezek az oldalai rendkívül fontosnak tűnnek az idegrendszer szerkezeti megértése szempontjából, de itt túlnyomó részben megválaszolatlan kérdésekkel kerülünk szembe. Ugyanis

ismerjük az idegrendszer alapvető aktív szerveit (az idegsejteket), s minden okunk megvan azt hinni, hogy e rendszerhez nagyon nagy kapacitású memória társul. De a legnyomatékosabban hangsúlyozni kell, hogy *nem tudjuk*, milyen típusú fizikai dolgok szolgálnak e memória alapvető alkatelemeiként.

Digitális és analóg részek az idegrendszerben

Miután a fentiekben rámutattunk azokra a döntő fontosságú, mély és mindmáig teljesen nyílt problémákra, amelyek az idegrendszeri memória mibenlétéhez fűződnek, legjobb volna más kérdésekre áttérni. De van még az idegrendszer egészben véve ismeretlen memóriaegységének egy részleges működési vonatkozása, amelyről itt néhány szóban meg kell emlékezni. A kérdés az idegrendszer analóg és digitális (vagy “vegyes”) részéinek viszonyával függ össze, s az alábbiakban erről óhajtánék még kiegészítőleg néhány futólagos megjegyzést tenni, hogy utána rátérhessek a memóriával már nem kapcsolatos kérdések tárgyalására.

Észrevételeim a következők:

Az idegrendszeren áthaladó folyamatok – amint erre már korábban rámutattam – jellegüket ismételten digitálisról analógra és analógról digitálisra változtathatják. Például a folyamat egyik szakaszát – mondjuk bizonyos izom összehúzódását vagy egy meghatározott vegyi anyag kiválasztását – idegimpulzusok irányíthatják, s ezek a mechanizmus digitális részébe tartoznak. Az említett jelenségek maguk (az izomösszehúzódás, az anyagkiválasztás) már az analóg osztályba tartoznak, de kiindulópontul szolgálhatnak egy újabb idegimpulzus-sorozat számára, amelyet e jelenségeknek a megfelelő belső receptorok által való érzékelése vált ki. Amikor tehát ezek az idegimpulzusok kiváltódnak, akkor megint digitális úton vagyunk. S a digitális eljárásról az analógra való átváltás és ennek megfordítottja a mondott módon több ízben ismétlődhetik. Ilyen körülmények között a rendszer idegimpulzusokkal kapcsolatos digitális része és kémiai átalakulásukkal vagy izomösszehúzódásból eredő mechanikai elmozdulásokkal kapcsolatos analóg része

megfelelő váltakozás révén bármely folyamatot vegyes jellegűvé tehet.

S ebben az összefüggésben a genetikai jelenségek egészen különlegesen jellemző szerepet játszanak.

A genetikai mechanizmus szerepe a vázolt összefüggésben

Maguk a gének kézenfekvően az alkatelemek bizonyos digitális rendszerébe tartoznak. Hatásuk azonban abban áll, hogy sajátos vegyi anyagok, ti. meghatározott enzimek képződését váltják ki, amelyek karakterisztikusak az illető génre, s így analóg körbe tartoznak. Ezen a téren tehát az analóg és digitális működésmód váltakozásának egy különleges és körülírt esetével állunk szemben, vagyis ez a folyamat a jelenségeknek abba a tágabb osztályába tartozik, amire fentebb általánosabb formában utaltam.^[37]

A programok és szerepük a gépek működésének vezérlésében

Hadd térjek most át azokra a kérdésekre, amelyek már nem a memória problémáihoz fűződnek. A logikai utasítások bizonyos szervezési elveiről kívánok szólni, amelyek igen jelentős szerepet játszanak minden bonyolult automata működésében.

Mindenekelőtt szeretnék egy fogalmat bevezetni, amelyre ebben az összefüggésben nagy szükségünk lesz. A logikai utasítások olyan rendszerét, amelyet egy automata végre tud hajtani és amely az automatát valamilyen szervezett feladat teljesítésére készíteti, *programnak* nevezik.^[38] Logikai utasításokon pedig olyasmik értendők, mint a megfelelő tengelyfonalakon fellépő idegimpulzusok – azazhogy tetszőleges dolgok, amik valamely digitális logikai rendszert, például éppen az idegrendszert arra készítetik, hogy célszerű és reprodukálható működést fejtsen ki.

A teljes program fogalma

A programokról szólván mindjárt fontossá válik két különböző fajtájuk megkülönböztetése.

Egy program lehet *teljes*. Idegimpulzusokra vonatkoztatva ez annyit jelent, hogy a program szabatosan meghatározza az impulzusok fellépésének időbeli rendjét, valamint azt is, hogy mely tengelyfonalakon lépjenek fel. Ezzel természetesen egyúttal teljesen definiálja az idegrendszer – ill. összehasonlításunk keretében a megfelelő mesterséges automata – viselkedését az adott viszonylatban. A számítógépi gyakorlatban az ilyen teljes programok utasításcsoportok alakját öltik, amelyek minden szükséges részletében megszabják a gép által követendő eljárást. Ha a gépnek valamilyen konkrét problémát kell számítás útján megoldania, akkor ebben az értelemben vett teljes programmal kell vezérelni. A modern számítógépek használata feltételezi azt, hogy használójuk ki tudja alakítani és meg tudja fogalmazni azokat a teljes programokat, amelyek a gép által megoldandó összes konkrét problémákhoz szükségesek.^[39]

A rövid program fogalma

A teljes programokkal szemben létezik a programoknak egy másik fajtája is, amelyet legáltalában a *rövid programok* néven emlegethetünk. Alapgondolatuk a következő:

A. M. *Turing* angol matematikai logikus 1927-ben kimutatta (és a számítógépi technika számos szakértője azóta különféle módokon gyakorlatilag is bebizonyította), hogy olyan programutasításokat is ki lehet dolgozni egy számítógép számára, amelyek arra készítetik, hogy valamely *más* – pontosan meghatározott működésű – számítógép módjára viselkedjék. Az ilyen utasításrendszereket, amelyek révén egy gép *utánozza* egy másik gép viselkedését, rövid programoknak nevezzük. E programok kidolgozásának és alkalmazásának jellegzetes kérdéseire valamivel részletesebben is ki szeretnék térni.

Mint tudjuk, az elektronikus számológépet programok – szimbólumok, mégpedig leggyakrabban binér (kettős számrendszerbeli) szimbólumok egymásutánjai –, azaz tulajdonképpen bitsorozatok vezérik. Minden utasításrendszernek, amely egy adott számológép működését irányítja, világosan meg kell határoznia, hogy miféle bitsorozatok alkotnak utasítást és mi a teendője a gépnek egy-egy ilyen utasítás beérkezésekor.

Egyáltalán nem szükségszerű, hogy két különböző gép számára ugyanazok a bitsorozatok legyenek *értelmesek*, s mindenképpen lehetséges, hogy ugyanaz a bitsorozat egész másfajta hatást gyakorol a két gépre. Ha valamely gépet egy más géphez tartozó utasításcsoporttal látunk el, akkor az így kapott utasítások legalábbis részben *értelmetlenek* lesznek ezen első gép szempontjából, hiszen feltehetőleg olyan bitsorozatokot is fognak tartalmazni, amelyek nem szerepelnek a számára értelmesként kijelöltek között, vagy pedig esetleg ugyan “engedelmeskedni” fog nekik, de hatásukra olyan műveletekbe kezd, amelyek nem illenek bele a problémamegoldási eljárás műveletszervezési tervébe, s nem is viszik előbbre a szándékolt megoldást. Általában tehát a más géphez tartozó utasításcsoport nem készítené az első gépet arra, hogy célszerű viselkedést tanúsítson egy kitűzött és megszervezett feladat – egy konkrét és megoldani kívánt probléma – megoldása érdekében.^[40]

A rövid program szerepe

Ahhoz, hogy egy program a Turing-féle elgondolás szerint valamely gépet egy *más* megadott gépnek megfelelő viselkedésre, vagyis e második gép *utánzására* tudjon készíteni, a következőkről kell gondoskodnia:

Mindenekelőtt tartalmaznia kell a szóban forgó első gép számára érthető és célszerűen követhető megfogalmazásban olyan instrukciókat (programrészletezéseket), amelyek arra indítják ezt a gépet, hogy minden ezután kapott utasítást megvizsgáljon, s eldöntse, vajon szerkezetileg megfelel-e az utánzandó második gép egyik utasítástípusának.

Tartalmaznia kell továbbá az első gép utasításrendszerének megfelelő megfogalmazásban olyan utasításokat, amelyek elegendők ahhoz, hogy ezt az első gépet mindazon akciók végrehajtására készítsék, amiket a második gép végzett volna a fent említett, vagyis neki megfelelő szerkezeti típusú utasításra.^[41]

Turing vizsgálódásának fontos eredménye az, hogy ezen a módon az első gépet *bármely* más gép viselkedésének utánzására lehet készíteni. Az az utasítási struktúra, amelyet az első gép ilyen körülmények között követni kénytelen, teljesen eltérő lehet saját és reá jellemző utasításrendszerétől. Például sokkal komplexebb utasításokra terjedhet ki, s minden egyes ilyen másodlagos utasítás az első géptől sok művelet végrehajtását követelheti meg: bonyolult ismétléses eljárások végrehajtását, tetszőleges fajtájú többszörös akciókat stb. Általában bármi, amit az első gép bármilyen hosszú idő alatt és az összes lehetséges – tetszőleges mértékben bonyolult – utasításrendszerek vezérlése mellett el tudna végezni, ilyen körülmények között úgy végezhető el általa, mintha csak “elemi” akciókról, alapvető primitív, nem összetett utasítások végrehajtásáról volna szó.^[42]

Mellékesen megjegyezve, annak, hogy az efféle másodlagos programokat *rövid programoknak* nevezzük, történeti okai vannak. Ezeket ugyanis a programozási munka segédeszközeiként fejlesztették ki, mert a programozók azt kívánták, hogy rövidebben megfogalmazhassák egy-egy gép programját, semmint ezt annak természetes utasításrendszere megengedné. Ezért a fenti módszer segítségével úgy kezelték a gépet, mintha egy másik gép volna, amely kényelmesebb és teljesebb utasításrendszerrel rendelkeznék, s így egyszerűbb, közvetlenebb, kevésbé körülményes programozást tenne lehetővé.

Az idegrendszer logikai szerkezete

Ezen a ponton alighanem helyes lesz, ha egy újabb kérdéskomplexusra irányítjuk figyelmünket, amely már nem függ össze a memória problémáival, sőt a teljes és rövid programok imént

tárgyalt tematikájával sem. Arról lesz szó, hogy a logika és az aritmetika milyen viszonylagos szerepet tölt be tetszőleges bonyolult automaták és különösen az idegrendszer működésében.

A számszerű eljárások jelentősége

Egyik igen lényeges szempont ebben a vonatkozásban a következő:

Minden mesterséges automata, amely emberi használatra, illetve különösképpen bizonyos bonyolultabb folyamatok irányítására készült, rendszerint egy tisztán logikai és egy aritmetikai részből tevődik össze, vagyis egyik részében semmiféle szerepet nem játszanak a számszerű eljárások, míg másik részében igen nagy jelentőségűek. Ennek a magyarázata abban rejlik, hogy gondolkodási és gondolkifejezési szokásaink nagyon megnehezítik számunkra bármiféle igazán bonyolult helyzeteknek meghatározását anélkül, hogy képletekre és számokra ne támaszkodnánk.

Ha tehát egy automatának ilyen típusú problémák felett kell ellenőrzést gyakorolnia, például az emberi testben uralkodó hőmérséklet- és nyomásértékek állandóságáról vagy az emberi test belső kémiai egyensúlyának fenntartásáról kell gondoskodnia, akkor amennyiben *emberi* tervezőre hárul az automata feladatának megfogalmazása, úgy ez numerikus egyenlőségek vagy egyenlőtlenségek segítségével fogja meghatározni ezt a feladatot.

A számszerű eljárások és a logika kölcsönös viszonya^[43]

Másfelől azonban lehetnek ennek a feladatnak olyan részei is, amelyek számszerű összefüggésekre való utalás nélkül, azaz tisztán logikai kifejezésekkel is megfogalmazhatók.

Így például a fiziológiai reagálás vagy nem reagálás bizonyos kvalitatív elvei számszerűsítés nélkül is kifejthetnek pusztán olyan kvalitatív meghatározások alakjában, amelyek előírják, hogy bizonyos események milyen körülmények találkozása esetén

menjenek végbe és milyen más kombinációk mellett nem kívánatosak.

Magasrendű pontossági követelmények feltételezésének indokai

Mindezekből kiderül, hogy az idegrendszernek – ha automataként fogjuk fel – okvetlenül bizonyos aritmetikai és logikai részekkel kell rendelkeznie, s hogy aritmetikai szükségletei ugyanolyan fontosak, mint logikai szükségletei. Ez annyit jelent, hogy megint csak a szokott értelemben vett számológéppel van dolgunk, s így helyénvaló hogy a számológépek elméletében bevezetett fogalmakat alkalmazzuk fejtegetéseink során.

Ha pedig ez így van, akkor azonnal felmerül a következő kérdés: amennyiben az idegrendszert számológépnek tekintjük, miféle pontosságot kell elvárnunk aritmetikai részének működésétől?

Ez a kérdés különösen nagy súlyúnak tűnik, mert a számológépekkel szerzett összes tapasztalataink arra mutatnak, hogy ha egy effajta gépnek annyira bonyolult aritmetikai feladatokkal kell megbirkóznia, mint amilyen az idegrendszer kétségkívül szembetalálkozik működése során, akkor igen magasrendű pontosságot biztosító szerkezeti megoldásokról kell gondoskodnunk számára. Ennek az a magyarázata, hogy ilyen körülmények között valószínűleg igen hosszú számításokat kell végeznie, amiknek folyamán a hibák nemcsak összegeződnek, hanem a korábban elkövetett hibákat a számítás későbbi szakaszai fel is nagyítják. Ezért lényegesen nagyobb pontosságra van szükség, mint amit a megoldandó feladat fizikai természete önmagában véve megkövetelne.

Ezek szerint azt várhatnók, hogy az idegrendszernek *van* aritmetikai része, s hogy ez számológépként felfogva *tekintélyes pontossággal* működik. Az ismert mesterséges számológépeknél és az itt szerepet játszó bonyolultsági feltételek mellett 10–12 tizedesjegynyi pontosságot sem mondhatnánk túlzottnak.

Ezt a következtetést érdemes volt levonnunk, noha – vagy még inkább: *mert* abszolút valószínűtlen, hogy megfelel a valóságnak.

Az idegrendszerben alkalmazott jelrendszer természete nem digitális, hanem statisztikus

Mint már rámutattunk, vannak bizonyos ismereteink arról, hogy az idegrendszerben miként megy végbe a számszerű adatok átvitele. Ezeknek továbbítása rendszerint periodikus vagy majdnem periodikus jellegű impulzussorozatok alakjában történik. Egy receptor *intenzív* ingerlése azt eredményezi, hogy minden alkalommal hamarosan reagál, amint túljutott a feltétlen refraktér szakasz határán. *Gyengébb* ingerlés periodikus vagy majdnem periodikus reagálásra készítheti a receptort, de már valamivel alacsonyabb frekvenciával, mert most nemcsak a feltétlen refraktér állapot határán, hanem bizonyos viszonylagosan refraktér szakaszon is túl kell jutnia, mielőtt újból reagálhat. Ezek szerint a kvantitatív ingerlési intenzitásokat periodikus vagy majdnem periodikus impulzussorozatok adják vissza, amelyeknek frekvenciája mindig az ingerlés intenzitásának monoton függvénye.^[44] Ez tehát bizonyos fajtájú frekvenciamodulált jelzési rendszer, amelyben az intenzitások frekvenciák alakjában fejeződnek ki. A megfelelő folyamatot a látóideg bizonyos rostjain és a fontos nyomásérzeteket továbbító idegeken egyaránt megfigyelték.

Megjegyzendő, hogy a szóban forgó impulzusfrekvencia nem közvetlenül egyenlő az ingerlés bizonyos adott intenzitásával, hanem az ingerlési intenzitás monoton függvénye, azaz lehetőséget nyújt mindenféle lépték bevezetésére, s a működési pontosság olyan egységekben való kifejezésére, amelyeknek nagysága igen célszerű és kedvező módon magától a mindenkori léptéktől függ.

Utalni kell arra is, hogy a szóban forgó frekvenciák rendszerint másodpercenként 50–200 impulzus között mozognak.

Világos, hogy ilyen feltételek mellett a fent említett 10–12 tizedesjegynyi pontosságok szóba sem kerülhetnek. Az idegrendszer olyan számológép, amely igen alacsony pontossági

szinten működve is kellőképpen el tudja látni rendkívül bonyolult feladatát. A fentiek szerint csak 2–3 tizedesnyi pontosság lehetséges. Ezt a tényt újra meg újra hangsúlyozni kell, mert semmiféle ismert számológép nem működhet megbízhatóan és értelmes eredményekkel ilyen alacsony pontossági szinten.

De még egy szempontra kell itt felhívunk a figyelmet. A fentiekben leírt rendszer nemcsak alacsonyrendű pontosságra, hanem igen magasrendű megbízhatóságra is vezet. Mert nyilvánvaló, hogy ha egy digitális jelrendszerben egyetlen impulzus kimarad, akkor ebből az értelem teljes eltorzulása, vagyis teljes értelmetlenség adódik. De épp ilyen nyilvánvaló az is, hogy ha a fentebb leírt típusú működés során egy vagy több impulzus veszendőbe megy (illetve szükségtelenül hibásan közbeiktatódik), akkor a releváns frekvencia, vagyis a közlemény értelme még mindig csak lényegtelen mértékben torzul el.

S most egy olyan kérdés merül fel, amely döntően válaszra szorul: Miféle lényegbevágó következtetések vonhatók le az idegrendszer által megtestesített számológép aritmetikai és logikai szerkezetére ezekből a látszatra némileg ellentmondó megfigyelésekből?

Aritmetikai leromlás. – Az aritmetikai és logikai mélység szerepe

A válasz mindenki számára világos, aki valaha vizsgálat tárgyává tette az eredmények pontosságának leromlását hosszú számítási eljárások során. A pontosság csökkenése – amint erre már korábban rámutattunk – részben a hibák *kumulációjának*, de még inkább a számítás korábbi szakaszában elkövetett hibák *amplifikációjának* (a későbbi számítási műveletek során történő felnagyításnak) tulajdonítható. A pontatlanságot tehát főként az egymás után végrehajtandó aritmetikai műveletek tekintélyes száma, másként kifejezve: az eljárás nagy *aritmetikai mélysége* okozza.

Az a körülmény, hogy sok műveletet kell végrehajtani egymás után, magától értetődően nemcsak az eljárás aritmetikai, hanem *logikai* szerkezetére is jellemző. Ezért nem helytelen, ha azt mondjuk, hogy

a pontosság leromlásának ezek a jelenségei a szóban forgó műveleti eljárások nagy *logikai mélységének* tulajdoníthatók.

Az aritmetikai pontosság és a logikai megbízhatóság alternatívája

Rá kell mutatni arra is, hogy az idegrendszerben alkalmazásra kerülő közlési rendszer, amelyet a fentiekben leírtunk, lényegileg *statisztikus* jellegű. Ez annyit jelent, hogy nem az egyes jelölők vagy számjegyek pontos elhelyezkedése, hanem statisztikus előfordulása, vagyis a periodikus vagy majdnem periodikus impulzussorozatok frekvenciája a döntő.^[45]

Úgy látszik, hogy az idegrendszer radikálisan más jelölésmódot alkalmaz, mint amit a közönséges aritmetikában, illetve az egész matematikában megszoktunk: szabatos jelölőrendszerek helyett, amelyekben belül minden egyes jelölő helyzete – jelenléte vagy hiánya – döntően meghatározza a közlemény jelentését, itt olyan jelölésmóddal kerülünk szembe, amelynél a közlemény jelentését *statisztikus* sajátosságai közvetítik. Megmutattuk, hogy ez alacsonyabb szintű aritmetikai pontosságra, de magasabb szintű logikai megbízhatóságra vezet – az aritmetikai leromlásért a logika megjavulását kaptuk cserébe.

A közlési rendszer egyéb hasznosítható statisztikus sajátosságai

Ebben az összefüggésben kézenfekvő még egy további kérdés felvetése: A fentiek szerint az idegrendszerben bizonyos periodikus vagy majdnem periodikus impulzussorozatok frekvenciái hordozzák a *közleményt*, vagyis az *információt*. Ezek nyilvánvalóan a közlemény statisztikus sajátosságai. De vannak-e még másféle statisztikai sajátosságok is, amelyek hírvivőként hozzájárulhatnak az információk átviteléhez?

Eddig csak a közlemények másodpercenkénti impulzusszámokban kifejezett frekvenciáját vettük figyelembe az információátvitel szempontjából, s feltételeztük, hogy periodikus vagy majdnem periodikus impulzussorozatok teszik ki a közleményt.

Kézenfekvő azonban, hogy a (statisztikus jellegű) közlés másféle sajátosságai szintén felhasználhatók volnának. Hiszen a frekvencia, amiről beszéltünk, *egyetlen* impulzussorozat tulajdonsága, míg az idegrendszer működésében számottevő szerepet betöltő idegek mindegyike nagyszámú idegrostból áll, s egy-egy rost nagyszámú impulzussorozatot tud közvetíteni. Ezért nagyon is hihető, hogy az ilyen impulzussorozatok bizonyos *egymás közti* statisztikus viszonyai is információk átvitelére szolgálhatnak. Eléggé természetes, ha ebben az összefüggésben különféle korrelációs együtthatókra és más hasonlókra gondolunk.^[46]

Az agy nem a matematika nyelvét használja

E gondolatmenet folytatása szükségképpen elvezet bennünket a *nyelv* kérdéseire. Mint már hangsúlyoztuk, az idegrendszer működése kétféle közléstípuson alapszik: egyfelől olyanokon, amelyek nem foglalnak magukban aritmetikai formalizmusokat, másfelől olyanokon, amelyek igen. Az előbbi típusba tartoznak az utasításközlések (logikai közlések). Az utóbbiba pedig a számközlések (aritmetikai közlések). Az előbbieket szorosabb értelemben vett nyelvként jellemezhetjük, míg az utóbbiakat matematikának tekinthetjük.

Szembe kell néznünk azzal, hogy a nyelv messzemenően történelmi esetlegességet alkot. Az alapvető emberi nyelvek különböző formái hagyományyszerűen jutottak el hozzánk, de már e hagyományos formák sokfélesége is bizonyítja, hogy semmiféle feltétlenség vagy szükségszerűség nem testesül meg bennük. S mint ahogy a görög vagy a szanszkrit nyelv létezése történelmi tény, nem pedig feltétlen logikai szükségszerűség, ugyanúgy józanul feltételezhetjük, hogy a logika és a matematika is történelmi eredetű és esetleges kifejezési formák. Lehetnek a logikának és a matematikának lényegesen eltérő változatai is – mindkettő más alakban is létezhetik, mint amit

megszoktunk! A központi idegrendszer és az általa átvitt üzenetrendszer természete pozitíven arra mutat, hogy valóban ez a helyzet. Ma már elegendő támpontjaink vannak annak felismerésére, hogy bármiféle közlési nyelvet használ is a központi idegrendszer, ezt mindenesetre kisebb logikai és aritmetikai mélység jellemzi, mint amihez normálisan hozzászoktunk. Kézenfekvő példa erre az emberi szem recehártyájának működése, amely számottevő mértékben átszervezi a szem által észlelt vizuális képet. Ez az átszervezés magán a recehártyán történik, pontosabban a látóideg belépésének helyén, mégpedig mindössze három egymást követő szinapszis közbejöttével, azaz összesen három egymáshoz csatlakozó logikai lépésben. Az idegrendszer aritmetikájában alkalmazott közlésátviteli-rendszer statisztikus jellege és kismérvű szabatosága mellett is kielégítő működése szintén azt tanúsítja, hogy a pontossági szint leromlása e rendszer keretein belül nem haladhat nagyon messzire. Itt tehát nyilván másfajta logikai struktúrák játszanak közre, mint amilyenekkel a logikában és a matematikában közönségesen találkozunk. E struktúrákat – mint mondtuk – kisebb logikai és aritmetikai mélység jellemzi, mint amit hasonló körülmények között elvárnánk, így tehát a központi idegrendszerben szereplő logikának és matematikának nyelvi szempontból lényegesen más szerkezetűnek kell lennie, mint a közönséges tapasztalatunk körébe eső nyelveknek.

Arra is rá kell mutatni, hogy ez az idegrendszeri nyelv nem is csekély valószínűséggel inkább a korábban leírt értelemben vett rövid program, mint hosszú program. Meglehet, hogy amikor matematikai fejtegetésekkel foglalkozunk, akkor egy olyan *másodlagos* nyelvről tárgyalunk, amely ráépül a központi idegrendszer által tényleg használt *elsődleges* nyelvre, így tehát a mi matematikánk külső formái nem feltétlenül relevánsak annak mérlegelésénél, hogy milyen matematikai vagy logikai nyelvet használ *valójában* a központi idegrendszer. A megbízhatósággal a logikai és aritmetikai mélységgel kapcsolatos fentebbi ténymegállapítások mindenesetre amellet szólnak, hogy bármiféle nyelvrendszerrel van is itt dolgunk, ez okvetlenül jelentős mértékben eltér attól, amit tudatosan és explicit módon *matematikának* szoktunk tekinteni.

Utószó

(írta Tarján Rezső)

NEUMANN JÁNOS

1903–1957

I.

Az első világháború befejezését követő, súlyos társadalmi és gazdasági ellentmondásokkal terhes időszak egyik sajátos vonása, amelynek részletes elemzésével a magyar tudománytörténet még adósunk, az, hogy olyan tudományos generáció (főként matematikusok és fizikusok) fejlődött ki, akiknek neve ma a legjobb értelemben a tudomány világszínvonalát jelzik. A legtehetségesebbek a Horthy-korszak "kultúrpolitikája" következtében külföldön kerestek és többnyire találtak is alkotási lehetőséget. Ezek közül is talán a legnagyobb, hihetetlenül sokoldalú tehetség volt Neumann János, akinek posztumusz, befejezetlen voltában is messzire előremutató, gondolatébresztő könyvét most a magyar olvasó kezébe adjuk.

Neumann János 1903. december 28-án született Budapesten. Édesapja, Neumann Miksa, jómódú bankár volt. A diák matematikai tehetségére tanára, Rácz László már a gimnáziumban felfigyelt, és egy iskolatársa visszaemlékezése szerint meggyőzte az apát arról, hogy a gyermek rendkívüli tehetsége miatt nem volna értelme, ha a matematikát a szokásos úton tanulná, így a fiatal diák matematikatanítását Kürschák József műegyetemi tanár irányítása mellett Fekete Mihály vette át, aki a jeruzsálemi egyetem matematikatanáraként hunyt el. 1921-ben, amikor érettségizett, már hivatásos matematikusnak számított: első dolgozata (Fekete Mihállyal közösen) még középiskolás korában jelent meg.

Az érettségi után a budapesti tudományegyetemen matematikát, ezzel egyidejűleg a zürichi Eidgenössische Technische Hochschulén, majd Berlinben kémiát tanult. 1926-ban Fejér Lipótnál Budapesten doktorált, ezzel egyidejűleg a zürichi műegyetemen vegyészmérnöki diplomát is szerzett. Zürichi tartózkodása idején került érintkezésbe Hermann Weillel és Pólya Györggyel, akik ebben az időben a zürichi egyetemen tanárai voltak. A kortársi

visszaemlékezések szerint, amikor Weil rövid időre elutazott, Neumann János tartotta meg helyette előadásait.

1927-től 1929-ig a berlini egyetem, majd 1929-ben a hamburgi egyetem magántanára, 1931-ben pedig az Egyesült Államokban, a Princeton Egyetem vendégelőadója volt. 1931-ben ugyanennek az egyetemnek a rendes tanára, majd 1933-tól kezdve a világhírű tanári kar legfiatalabb tagjaként a princetoni Institute for Advanced Studies rendes tanára lett. Rendkívül sok irányú elfoglaltsága ellenére haláláig az intézet tagja maradt. 1954 októberében az Egyesült Államok elnöke az Atomenergia Bizottság tagjává nevezte ki. A végül is halálát okozó súlyos betegség első jeleit 1955-ben állapították meg. A betegsége fokozatosan elhatalmasodott, míg végül is 1957. február 8-án Washingtonban, a Walter Reed kórházban 53 éves korában meghalt.

S. Ulam, az ismert matematikus, 1935 óta Neumann jó barátja a róla szóló megemlékezésben írja: "Barátai két karakterisztikus helyzet egyikében emlékeznek rá: vagy amint a tábla előtt áll, vagy amint otthon egy problémáról vitatkozik. Gesztusai, a mosolygása, szemének csillogása valahogy mindig visszatükrözték a gondolatot, ami a fejében forgott, vagy a vitatott probléma természetét. Középtermetű volt, fiatal korában eléggé szikár, később fokozatosan elhízott; kis, állandóan változó, de sohasem túl gyors lépésekkel szeretett sétálni. Valahányszor egy problémában valamely logikai vagy matematikai paradoxont vett észre, egy mosoly villant át az arcán. Az absztrakcióra való hajlamosságától függetlenül rendkívül értékelte a világi természetű komédiákat és a humort is."

Érdeklődése rendkívül sokrétű és szerteágazó volt. A tisztán matematikai vagy természettudományos problémák mellett rendkívül alapos ismerője volt a történelemnek és az irodalomnak is. Pályája kezdetén főként matematikai logikával és az axiomatikus halmazelmélettel foglalkozott. A harmincas évek közepétől kezdve érdeklődését a hidrodinamikai turbulencia problémája keltette fel, aminek a fontosságát a nem sokkal később kezdődött második világháború nagymértékben növelte. A robbanásoknál keletkező lökéshullámokban lejátszódó jelenségeket olyan rendkívül bonyolult matematikai összefüggések (nem lineáris parciális

differentiálegyenletek) írják le, amelyek a hagyományos analitikus eszközökkel teljességgel tárgyalhatatlanok, sőt a jelenlegi módszerekkel még a probléma kvalitatív áttekintése is majdhogynem lehetetlen. Az egyetlen gyakorlatilag is járható utat, amelynek segítségével a problémák természete tanulmányozható, a tényleges numerikus számítások jelentik.

Így kezdett foglalkozni az elektronikus számológépek nyújtotta új lehetőségekkel. A numerikus számítások elmélete vezette át az automaták elméleti problémáihoz, majd az automaták és a központi idegrendszer logikai struktúrájának a kapcsolatához. Életének utolsó tizenkét évében tudományos munkájának jelentős része valamilyen módon mindig a körül a kérdés körül forgott, amelyről utolsó, a magyar olvasó részére most átnyújtott, közérthető – az ő színvonalán mérve közérthető! – formában megírt könyve is szól: a modern digitális számológépek, valamint az agyvelő logikai struktúrájának egymással rokon problémájáról. Utolsó művének és egyben a problémának a jelentőségét is akkor tudjuk legjobban értékelni, ha röviden áttekintjük azt az utat, ahogy Neumann János ehhez az opusához eljutott.

II.

Az első, valóban elektronikus kivitelű számológép az ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Calculator) volt. Építését 1943-ban kezdték meg, de csak 1946-ban fejeződött be. 1956-ban – noha kifogástalanul működött – elavult volta miatt lebontották. Mai fogalmak szerint a gép viszonylag lassú volt: 1946-ban azonban szinte hihetetlenül gyors gépnek számított.

A jelenlegi számológépektől eltérően a gépnek még nem volt memóriaegysége, legalábbis nem a szó mai értelmében. Tárolási célokra elektroncsöves billenőkörökből felépített 20 darab, egyenként tíz decimális jegyre terjedő számláló lánc szolgált. Minthogy a gépnek nem volt memóriaegysége, a mai értelemben programozni sem lehetett; az elvégzendő műveleteket a lyukkártyarendszerű tabelláló gépekhez hasonló hüvelymezőn dugaszolni kellett. A háborús viszonyok között a költségek nem számítottak; ez és az 1946-os műszaki színvonal teszi érthetővé,

hogy a berendezés több mint 70 négyzetméter alapterületet foglalt el, körülbelül 18 000 elektroncsövet és 1500 jelfogót tartalmazott, fogyasztása pedig 150 kW volt. Az ENIAC jelentősége abban állt, hogy a technika történetében először használtak numerikus aritmetikai műveletek elvégzésére tisztán elektronikus áramköröket, ami a korábbi jelfogós számológépekhez képest a működési sebességet egy csapásra több nagyságrenddel megnövelte.

Az ENIAC sikere arra indította a vezető katonai köröket (az ENIAC elsősorban lőtáblák kiszámítására szolgált), hogy megbízást adjanak azoknak az elvi problémáknak a tanulmányozására, amelyek a numerikus számítások elektronikus eszközökkel való elvégzésénél felmerülnek. A vizsgálatokat Neumann János és Hermann H. Goldstine végezték el; eredményeik 1947-ben, illetve 1948-ban bizalmas jelentés formájában kerültek zártkörű publikációra. A történelmi érdekesség kedvéért érdemes a legelső jelentésben megfogalmazott és a konstrukciós elvekre vonatkozó követelményeket röviden összefoglalni:

- Szükség van egy párhuzamos működésű *memóriaegységre*. A memóriaegységnek mind számokat, mind pedig utasításokat (ez utóbbiakat kulcsszámmal kifejezett formában) tárolni kell tudnia.
- Szükség van egy *vezérlőegységre*, amely különbséget tud tenni számok és utasítások között; az utasításokat interpretálni tudja, és emberi beavatkozás nélkül különböző utasítások végrehajtását tudja vezérelni.
- Szükség van egy párhuzamos működésű *aritmetikai egységre*, amely bináris rendszerű összeadásra, kivonásra, szorzásra és osztásra alkalmas. A memóriakapacitással való takarékoskodás érdekében fix binér pontot kell használni, és a léptékmegválasztás terhére a matematikusra kell róni.
- Szükség van egy olyan *kimenő-bemenő egységre*, amely át tudja hidalni a gép gyors memóriaegysége és a lassú emberi memória közötti sebességkülönbséget.

Ebben a négy pontban lényegében bennfoglaltatnak mindazok a követelmények, amelyek a mai elektronikus digitális számológépekre

jellemzők. Lényegében ezek szabják meg azóta is az elektronikus számológépekkel kapcsolatos műszaki tudományos kutatómunka irányát. A jelentésben lefektetett elvek alapján készült el a princetoni egyetem EDVAC (Electronic Discrete Variable Calculator) elnevezésű számológépe, amely az első mai értelemben vett elektronikus digitális számológépnek tekinthető, de a követelményeket egészükben csak 1960-ra sikerült megoldani.

Az ENIAC-kal szerzett tapasztalatok megmutatták: az elektronikus számológépek működési sebességét csak akkor lehet jól kihasználni, ha a gép működését (ellentétben a szokásos asztali számológépekkel) nem állítjuk le minden egyes művelet elvégzése után, hanem a gép működését teljes mértékben automatizáljuk. Ehhez két dolog szükséges: előre pontosan meg kell határozni azt, hogy a gép egyes műveleteket milyen sorrendben hajtson végre, illetve az egyes aritmetikai műveletek között milyen egyéb, szervező jellegű műveleteket végezzen el. Ennek viszont az az előfeltétele, hogy a gépet olyan tároló berendezéssel (memóriaegységgel) lássuk el, amely a számítások elvégzése alatt nemcsak a számítások kezdő adatait, közbenső és végső eredményeit tudja tárolni, hanem egyszersmind azokat az *utasításokat* is, amelyeket végre kell hajtani és amelyeket e célból kulcsszámokká kell kifejezni, így a gép az előre tárolt utasításokhoz ugyanolyan gyorsan fér hozzá, mint magukhoz a számokhoz.

Neumann János volt az első, aki ezt a szükségességet világosan felismerte, sőt az annak idején rendelkezésre álló kevés tapasztalat ellenére még a szükséges memóriakapacitást is helyesen tudta felbecsülni.

Alapvető jelentősége volt a kettes számrendszer alkalmazásának, mégpedig kétféle szempontból is. Az ENIAC, mint említettük, még a tízes számrendszerben működött. Minthogy a felhasznált elektronikus áramkörök lényegében kétállapotú elemek, a tíz decimális számjegy ábrázolásához helyértékenként négy billenőkörből képzett számlálóláncre van szükség. Négy kétállapotú elemnek azonban $2^4=16$ lehetséges állapota van; a tíz decimális számjegy ábrázolása tehát a lehetséges állapotok kerekén egyharmadát kihasználatlanul hagyja. A kettes számrendszerre való

áttérés azt jelenti, hogy az aritmetikai egységben az elektroncsövek, illetve tranzisztorok számát kerekben egyharmaddal csökkenteni lehet.

Az ENIAC-nál a számolás menetét (a programot) még a lyukkártya rendszerű gépekhez hasonlóan kapcsolótáblákon dugaszolni kellett, ami az egyik problémáról a másikra való áttérést rendkívül megnehezítette. A szükséges dugaszolások elvégzése és az ellenőrzés rendkívül hosszú időt vett igénybe, sok technikai hibalehetőséget rejtett magában és emberi tévedésekre is alkalmat adott. Neumann fogalmazta meg világosan elsőnek azt a követelményt, hogy a műveleti utasításokat kulcsszámokkal kifejezett formában a memóriaegységben tárolni kell. A műveleti utasításnak két fő részből kell állnia: részben az aritmetikai, illetve organizációs jellegű tulajdonképpeni utasítást, részben pedig azoknak az adatoknak a memóriapozícióját (címét) kell tartalmaznia, ahonnan a gépnek a számokat, illetve utasításokat elő kell venni. Ezáltal a kulcsszámokkal kifejezett formájú utasításokon a gép ugyanúgy végre tud hajtani aritmetikai műveleteket, mintha számok volnának, vagyis a gép előre meghatározott módon meg tudja változtatni a saját programját. Ez a "titka" a számológépek mai sokrétű, meglepő, sőt sokszor meghökkentő alkalmazásainak.

Neumann az elektronikus számológépek tervezése terén is fontos újítást vezetett be. Korábban a tervezésnél csak a legfontosabb nagy egységek (mint például aritmetikai egység, programvezérlő egység stb.) jelölésére használták a funkcionális vázlatokat, ami az áttekinthetőséget erősen megnehezítette. Neumann olyan új szimbolikát vezetett be, amely alkalmas arra, hogy a konkrét műszaki megoldástól függetlenül a számológép logikai struktúráját teljes részletességgel ábrázolja. Ezzel azonban lehetővé vált, hogy a tervezési munkát két egymástól független részre bontsák: először a Neumann által bevezetett és azóta is csak lényegtelenül változtatott szimbolika segítségével a szükséges mélységig a gépnek a logikai struktúráját tervezik meg. Ezt a munkát általában matematikusok végzik. Az így elkészült logikai struktúra kerül át azután a szorosabban vett műszaki tervezésbe, ahol a logikai szimbólumokat alkalmas módon instrumentálják. Ennek a szimbolikának a

bevezetése az elektronikus számológépek fejlesztésében ugyanolyan jelentőségű, mint annak idején a matematikai szimbólumok bevezetése volt a matematikai fejlődésre, vagy a tisztán logikai szimbólumok a matematikai logika fejlődésére. Műszaki szempontból ez a szimbolika adta az ötletet a ma már általánossá vált modulrendszer kialakításához is.

III.

A digitális számológépek gyakorlati alkalmazása egy sor érdekes, elvi természetű kérdést vetett fel. Ezek közül a legfontosabb az, hogy *milyen feladatokat lehet egyáltalán az elektronikus számológépekkel megoldani*. Neumann 1948. szeptember 20-án a kaliforniai Pasadenában, a Hixon Symposiumon tartott nagyszabású, ma már klasszikusnak számítható előadásában teljes alapossággal nyúlt a kérdéshez. Eredményei a kibernetika egyik legfontosabb elméleti ágának, az automaták absztrakt elméletének alapját vetették meg. A kérdésre, hogy milyen műveleteket lehet az elektronikus számológépekkel és általában a digitális elven működő automatákkal végrehajtani, Neumann a McCulloch–Pitts tétel felhasználásával azt a választ adja, hogy “Minden, amit kimerítően és egyértelműen le lehet írni, minden, amit szavakba lehet foglalni, megfelelő véges neurális hálózattal ipso facto realizálható is.”

Ennek a tételnek fontos következményei vannak. Könnyen belátható ugyanis, hogy a digitális számológépek programja vagy néhány kapcsolóelem megfelelő sorrendben történő működtetése által hajtható végre, vagy külön erre a célra megépített kapcsoló hálózattal. Neumann tételéből következik, hogy mindaz, amit alkalmas és egyértelmű módon szabályokba tudunk foglalni, a (szükség esetén alkalmas végberendezésekkel kiegészített) digitális számológépekre programozható is, tehát *nincsen szükség speciális gépre*. Ebben az értelemben tehát a számológépek univerzálisak. A program ugyanis utasítások sorozata, amelyeket a gépben villamos impulzus kombinációk ábrázolnak. Az impulzus kombinációk értelmezése azonban *önkéntes*, és a gép az értelmezést aszerint hajtja végre, ahogy a tervező megépítette. Már most az impulzus kombinációk tényleges felhasználásánál egy sor olyan korlátozás érvényesül, amely sem logikailag, sem műszakilag nem

szükségszerű és arra vezethető vissza, hogy a jelenlegi gépeket főként számológépekként használják, így az utasítások eddig általában csak az írószerkezettel kapcsolatban vezéreltek mechanikai mozgást, de ugyanúgy felhasználhatók bármely más mechanikai mozgás, például szerszámgépek vezérlésére is. Az sem szükségszerű, hogy az utasítások csak aritmetikai műveleteket jelentsenek: jelenthetnek bármely más, általános értelemben vett szabályt is, mint például grammatikai szabályokat, vagy technológiai utasításokat stb. A legutóbbi idők ilyen területen is egy sor példát hoztak. A fejlődés, amelynek során a digitális számológépeket a gépi fordítástól kezdve, a szerszámgépek vezérlésén át az automatikus rakétairányításig a legkülönbözőbb nem numerikus jellegű feladatok elvégzésére használják fel, Neumann János elvi tételét a gyakorlatban is fényesen igazolta.

A Hixon Symposiumon tartott előadás legnagyobb része a számológépek megbízhatóságával, tehát hibamentes működésének a problémáival foglalkozik. A kérdés középpontjában az emberi agyvelő és az elektronikus számológépek analógiájának akkor felmerült és azóta is napirenden levő összehasonlító elemzése áll. Szemben a látszatra tetszetős, de alapjában véve felületlen okoskodási módszerekkel, Neumann a legszigorúbb igényeket is kielégítő elvi módon nyúl a kérdéshez.

Mindenekelőtt arra hívja fel a figyelmet, hogy az emberi agyvelő és az elektronikus számológép között – az idegsejtek és a számológépek kapcsolóelemeinek működésében megállapítható kétségtelen analógiák mellett – két alapvető különbség van. Az elektronikus számológépek kapcsolóelemeinek a száma nagyságrendileg 10^4 (a legújabb gépeknél is csak 10^5), míg az emberi agyvelőben levő neuronok száma nagyságrendileg 10^{10} körül mozog; a nagyságrendek aránya tehát kereken $1:10^6$. Már most az a körülmény, hogy a jelenlegi technológiai színvonalon az idegsejtekhez hasonló mikrokomponensek nem állíthatók elő, önmagában elvileg még nem zárná ki, hogy ne építhetnénk olyan elektronikus számológépet, amely – legalábbis a felhasznált kapcsolóelemek számát tekintve – jobban megközelíti az emberi agyvelőben levő neuronok számát. A kapcsolóelemek számának a

növelése azonban a fizikai méretekől függetlenül olyan bonyolult, magasan szervezett rendszerhez vezetne, amelyet jelenlegi elméleti eszközeinkkel még csak tárgyalni sem tudunk. *Hiányzik az automaták általános logikai értelemben vett olyan elmélete, amely a jelenleginél lényegesen bonyolultabb automatikus rendszerek tervezésének szükséges előfeltétele, sőt mint Neumann rámutat, még a bonyolultság, illetve szervezettség fogalma, illetve ezek mértékei sincsenek pontosan meghatározva. A megbízhatóság, illetve hibamentesség döntővé válik, ha a szerkezeti elemek száma és ezzel a bonyolultság a jelenlegi szintet lényegesen meghaladja. Minthogy bármiféle, emberek által létrehozott szerkezet elvileg mindenképpen hibázhat, a kérdés, amelyet meg kell oldani, így fogalmazható meg: lehet-e megbízhatatlan szerkezeti elemekből megbízhatóan működő automatákat építeni.*

Neumann ezt a kérdést – elsőnek a technika történetében – már az említett pasadenai előadásában felveti. Mindenekelőtt megállapítja, hogy az egyes szerkezeti elemekben – például az idegsejtekben, illetve elektroncsövekben – fellépő hibákkal szemben a természet és a modern technika homlokegyenest ellenkező “taktikát” követ. A természetes szervezetekben az a tendencia érvényesül, hogy ha egy szerkezeti elem meghibásodik (például egy sejt megsérül), a hiba az egész szervezet működésére a lehető legkisebb káros befolyást gyakorolja: a fellépő hiba következménye az egész rendszer működéséhez képest elhanyagolhatóan kicsi legyen. A műszaki értelemben vett automaták tervezésénél ezzel szemben az úgynevezett “egyetlen hiba elve” érvényesül: minden egyes hiba, ha fellép, szükségszerűen olyan súlyos következményekkel *kell* hogy járjon, ami biztosítékot jelent arra, hogy a kezelőszemélyzet a hibát feltétlenül azonnal észreveszi és elhárítja. Példa erre éppen az elektronikus számológép, amely bizonyos esetekben automatikusan leáll és hibajelzést ad. A kétféle módszer közötti különbséget még csak aláhúzza a természetes organizmusoknak a gyógyulásra való készsége, ami a műszaki értelemben vett automatáknál az önjavító készségnek felelne meg, és amire a jelenlegi automaták természetesen képtelenek, noha folynak ilyen irányú kísérletek.

Az elmondottakból két fontos következtetést kell levonni.

Az automaták helyes működése egy sor – lényegében véve logikai – előfeltételtől függ: az egymás után következő műveletek végrehajtása akkor és csak akkor történhet meg helyesen, ha bizonyos feltételek fennállnak, mások viszont nem. Példa erre a telefonközpont, a számológépek, rendezőpályaudvarok automatikus váltói stb. Ha a jelenlegi automaták bonyolultságát a végrehajtandó feladatoknak megfelelően növelni kell, egyrészt arra van szükség, hogy a “gondolatsorok”, vagyis az egymás után következő (lényegében logikai) műveletek tényleges hosszát figyelembe vegyünk, továbbá – és ezen van a hangsúly – az egyes logikai műveleteket úgy kell kezelni, hogy a kivételeket, pontosabban a hibás működés lehetőségét tetszőlegesen kicsi, de véges valószínűséggel eleve figyelembe vesszük. Mindez szükségszerűen egy olyan új típusú logikához fog vezetni, amely a jelenlegi kétértékű logikánál lényegesen kevésbé merev és szemléletében, tárgyalásmódjában, de matematikai eszközeiben is lényegesen közelebb fog állni a statisztikai mechanikához (analízishez), mint a jelenlegi, lényegében véve kombinatorikus logikai módszerek.

Ezekre a kérdésekre Neumann 1952-ben, életének egyik utolsó (publikált) munkájában, amely jellegzetes módon a *Valószínűségi logika*, (Probabilistic Logics) címet viseli, visszatér. Sajnos, nincs terünk arra, hogy e rendkívül tömören tartott, de gondolatban annál gazdagabb munkát részletesen ismertessük. Az alapgondolatot a következőkben lehet röviden összefoglalni.

Ismeretes, hogy a numerikus számítások biztonságát úgy lehet növelni, ha a számításokat kétszer végzik el; az eredményt akkor fogadják el helyesnek, ha a két eredmény megegyezik. Ezt a módszert a műszaki gyakorlatban is alkalmazzák, oly módon, hogy bizonyos szerkezeti elemeket megdupláznak, azzal a megfontolással, hogy annak a valószínűsége, hogy mindkét szerkezeti elem egyidejűleg hibásodik meg, elegendően kicsi.

A valóságban azonban a helyzet nem ilyen egyszerű. Ha ugyanis például valamilyen vezérlő rendszerben a duplikált szerkezeti elemek valamelyike meghibásodik, a hibás működés általában nem egyszerűen abban áll, hogy adott bemenő jelre egyáltalán nem ad kimenő jelet, hanem abban, hogy *hibás kimenő jelet ad*. Könnyen

belátható, hogy ilyen esetben a duplikálás önmagában még nem segít: ha egy hamis kimenő jelet egy helyes kimenő jellel “keverünk össze” (a logikai diszjunkció értelmében), az eredő kimenő jel még mindig hibás lehet. Az egyes szerkezeti elemeket tehát, amelyek tetszőlegesen kicsi, de véges valószínűséggel hibásan is működhetnek, oly módon kell rendszerbe foglalni, hogy az egész automata tényleges “végeredménye” csak legfeljebb adott, tetszőlegesen kis valószínűséggel legyen hibás.

A probléma láthatóan organizációs jellegű, és első látásra nem látszik megoldhatónak. Tételezzük ugyanis fel, hogy automatánk olyan – véges számú – szerkezeti elemekből tevődik össze, amelyek az egyszerűség kedvéért ugyanazzal a hibavalószínűséggel működnek. Könnyen belátható, hogy a végső eredmény hibája egyrészt a szerkezeti elemek számával, másrészt pedig az elemi működések számával arányosan nő, és végső soron elérheti az $1/2$ értéket. Ekkor az eredmény egyformán lehet helyes, vagy hibás, vagyis teljesen irrelevánssá lesz.

Neumann olyan organizációs elvet ad meg, amelynek segítségével a végső eredmény hibavalószínűsége tetszőlegesen közel hozható egyetlen elem individuális hibavalószínűségéhez. Hogy az áttekinthetőséget egyszerűsítse, konkrét példaként olyan számolóautomatát vizsgál, amely a kettes számrendszerben dolgozik és csupa azonos típusú, univerzális kapcsolóelemből van felépítve. (Logikailag ezek a Scheffer-féle univerzális operátornak felelnek meg.) A módszer két alapelven nyugszik. Az egyik a sokszorozás (multiplexelés), a másik pedig a sztochasztikus permutációk elve.

A multiplexrendszer alapgondolata az, hogy minden egyes szerkezeti elemet nemcsak duplikálunk (mint a számítások ellenőrzésénél), hanem *multiplikálunk*. Ebben az esetben a bemenő és kimenő jelek továbbítása nem egy-egy vezetéken, hanem egy – mondjuk – 100 vezetékből álló kötegen fog történni. Minthogy azonban az individuális kapcsolóelemeknél eleve egy kicsi, de véges hibavalószínűséget engedünk meg, valamely kötegen belül lesznek olyan vezetékek is, amelyek hibás jelet (például zérus helyett 1-et) fognak továbbítani, vagyis a köteg állapota nem lesz egyértelmű.

Neumann ezért egy $q < 1/2$ számot definiál oly módon, hogy a köteg akkor és csak akkor reprezentál zérust, ha az aktív vezetékek száma *legfeljebb* $q\%$, továbbá akkor és csak akkor reprezentál 1-est, ha az aktív vezetékek száma *legalább* $(1-q)\%$. Bármely más esetben hibás működésről van szó. A q szám láthatóan a megbízhatósági tényező.

A következő lépés a sztochasztikus permutáció bevezetése. Tekintsünk egy sok vezetékből álló köteget, amelyben az egyes individuális vezetékek mindegyike más és más korábbi kapcsolóelemből jön. Bontsunk fel minden egyes vezetéket két párhuzamos vezetékre. Az ilyen módon kapott vezetékkötegen hajtsunk végre sztochasztikus permutációt, abban az értelemben, hogy a vezetékekből találomra (például egy véletlen számtáblázatnak megfelelően) párokat választunk ki, és az így kiválasztott párokat egy-egy univerzális kapcsolóelemhez kapcsoljuk. Ilyen módon olyan komplex univerzális kapcsolóelemhez jutunk, amely két bemenőköteggel és egy kimenőköteggel rendelkezik. Neumann bebizonyítja, hogy két ilyen módon multiplexeit és sztochasztikusan permutált komplex univerzális kapcsolóelemet sorba kapcsolva annak a valószínűsége, hogy a második kimenőköteg aktív (tehát legalább $[1-q]$ vezetéke aktív), a multiplikálás mértékének függvényében 0, illetve 1 felé konvergál, aszerint, hogy a bemenő kötegek állapotának mi felel meg. A két sorba kapcsolt elem együttesen tehát úgy funkcionál, mint egy *helyreállító elem*, amely még akkor is, ha a vezeték egy kis részén hibás jelzés van, a *helyes* jelzést adja tovább. Ez pedig azt jelenti, hogy az ilyen elven megkonstruált automata a megbízhatatlan szerkezeti elemek ellenére is megbízhatóan fog működni.

A kvalitatív áttekintés érdekében érdemes az alanti kis táblázatot idézni: ha a megbízhatósági tényező 0,007 és az egyes szerkezeti elemek hibavalószínűsége 0,05, akkor a multiplexelés mértéke a végső hiba valószínűségét a következő mértékben csökkenti:

a kötegben levő vezetékek száma	hibavalószínűség
1 000	$2,7 \cdot 10^{-2}$
5 000	$4,0 \cdot 10^{-6}$

10 000	$1,6 \cdot 10^{-10}$
20 000	$2,8 \cdot 10^{-19}$

Mint a táblázatból látható, akárcsak a százaléknagyságrendű biztonság eléréséhez is legalább ezerszeres multiplikálásra van szükség – igaz, hogy az egyedi hibavalószínűség viszonylag nagy. Neumann a példa kedvéért kiszámítja, hogy egy olyan számológépnél, amely 2500 elektroncsövet tartalmaz, amelyeknek minden 5 mikroszekundumban egyszer kell működniük – ahhoz, hogy két hiba között legalább 8 órát hasznos üzemmel tudjon eltölteni, kereken $1,4 \cdot 10^{11}$ -szeres multiplikálásra volna szükség, vagyis a szükséges elektroncsövek száma nagyságrendileg tízmilliárd volna.

Ha a jelenlegi technológiai szinten ezt az elvet akarnók követni, gyakorlatilag működésképtelen gépmonstrumhoz jutnánk. A Neumann-féle organizációs elv tehát a jelenlegi technológia mellett nem alkalmazható. Jelentősége nem is ebben van, hanem abban a tényben, hogy először próbálta meg valaki a technika történelmében az idegrendszer szervezési elvét következményeiben is logikusan végiggondolni. Neumann maga is rámutat, hogy ezt a szervezési elvet csak a természet engedheti meg magának, amely olyan mikrokomponensekkel tud dolgozni, mint a neuronok. A természet a biztonságos működés, tehát a létfenntartás érdekében a bonyolultságban olyan messzire tud elmenni, amelyre mi részben technológiai, de részben az automaták általános logikai értelemben vett elméletének a hiánya miatt egyelőre elvileg se gondolhatunk. *Az alapvetően új felismerés az, hogy valamely szerkezet működési biztonságát nemcsak technikai eszközökkel, hanem lényegében véve szervezési eszközökkel is növelni lehet.* Munkájával megvetette az automaták absztrakt logikai elméletének az alapjait, és olyan úton tette meg az első lépést, amelyen továbbhaladva új szervezési elvekhez és jobb automatákhoz és végső soron az agyvelő működésének jobb megértéséhez lehet eljutni.

Ez a nagy probléma – mint felesége a megható előszóban írja – utolsó világos pillanatáig foglalkoztatta. A könyv befejezetlen maradt, de a probléma él, s ha egyszer a tudomány meg fogja oldani, azok

között, akik a megoldás alapjait lerakták, ott lesz Neumann János neve is.

Utóirat az utószóhoz

A számológép és az agy Neumann János befejezetlenül maradt utolsó munkája, magyarul 1964-ben jelent meg. Két évvel később, 1966-ban került ki Amerikában a nyomdából az a könyv, amelyben Neumann János hagyatékában talált automata elméleti munkáit dolgozták fel. Mint a hagyatékából kiderült, *A számológép és az agy* című utolsó munkája tulajdonképpen egy öt műből álló sorozat utolsó, félbemaradt műve volt. Ezek a következők:

1. *Az automaták általános és logikai elmélete*. Előadás az 1948 szeptemberében tartott Hickson szimpóziumon, amely nyomtatásban 1951-ben jelent meg. Magyar fordítása *A kibernetika klasszikusai* című műben (Stúdium sorozat, Gondolat kiadó, 1965.) található.
2. *Komplikált automaták elmélete és szervezése*. Öt előadás az Illinois Egyetemen 1949 decemberében. A kézirat csak a szerző halála után jelent meg (Theory of self-reproducing automata by John von Neumann. A kéziratot sajtó alá rendezte és kiegészítette Arthur W. Burks. University of Illinois Press, 1966.)
3. *Valószínűségi logika és megbízható szervezetek szintézise megbízhatatlan elemekből*. A kaliforniai Technológiai Intézetben 1952 januárjában tartott előadások anyaga. ("Automata studies, sajtó alá rendezték C. E. Shannon és J. MacCarthy, Princeton University Press, 1956.)
4. *Az automaták elmélete: konstrukció, reprodukció, homogeneitás*. A kéziratot Neumann 1952 őszén kezdte el és kb. egy évig dolgozott rajta. Publikálásra csak a szerző halála után került sor Burks fentebb idézett munkájában.
5. *A számológép és az agy*. A szerző a könyvet 1955-ben kezdte el és haláláig ezen dolgozott. Az első kiadás 1958-ban, a magyar fordítás első kiadása 1964-ben jelent meg.

A szerző halála után publikált munkák önmagukban is izgalmas olvasmányok. Az öt dolgozat anyagát egymással összevetve világosan felismerhető nemcsak Neumann János gondolkozásmódja, egyéni munkastílusa, hanem elsősorban az, hogy az említett művekben azokat a problémákat dolgozza fel, amelyeket már 1949-ben a Hickson szimpóziumon tartott előadásában megfogalmazott. Ezek röviden összefoglalva a következők:

1. *A számológépek és az agyvelő szisztematikus összehasonlítása.* Ezt a problémakört részletesen az utolsó munkájában fejti ki és oda konkludál, hogy “az agy nem a matematika nyelvét használja”.
2. *A komplikáltság szerepe az automaták szervezésében.* Ezt a problémakört az Illinois Egyetemen tartott öt előadásban dolgozta fel. A komplexitás fogannának az automaták általános elméletében Neumann megfogalmazása szerint, központi jelentősége van. A komplexitás egy bizonyos foka alatt ugyanis az önreprodukálás lehetetlen. (A helyzet hasonló az atomenergia felszabadításához, amely a kritikus tömeg alatt lehetetlen. Valószínű, hogy Neumannt ezekben a gondolatokban a hasadásos atomenergia felszabadításánál szerzett tapasztalatok is befolyásolták, amelyekről, mint az USA elnökének tanácsadója, tudomása volt.)
3. *Megbízhatóság és komplikáltság.* Az élő szervezet komplexitásának egyik fontos következménye, hogy a legkülönbözőbb környezeti feltételek között is rendkívül megbízható módon működik, annak ellenére, hogy a szerkezeti elemek önmagukban rendkívül megbízhatatlanok. Ezt a problémakört teljes matematikai szigorúsággal a kaliforniai Technológiai Intézetben tartott előadásában dolgozta fel. Ezzel a munkájával nemcsak az absztrakt automata elmélet alapját vetette meg, de ez a dolgozat lett a kiindulópontja a műszaki berendezések megbízhatósági elméletének, valamint a logika egy új ágának, az ún. küszöbérték-logikának is, amelynek az a jellemzője, hogy az idegsejtekhez hasonló, ingerküszöbvel

rendelkező kapcsolóelemekből épül fel. Mindkét területnek azóta könyvtárakra menő irodalma van.

4. *Önreprodukáló automaták.* A legnagyobb probléma, amely a komplexitással összefügg az, hogy van-e, és ha igen, milyen összefüggés van az élő szervezet komplexitása és önreprodukáló képessége között. Mint már említettük, ezt a problémát a szerző már a Hickson szimpóziumon tartott előadásában felvetette, és szigorú logikai eszközökkel bebizonyította, hogy elvileg lehetséges olyan automatákat konstruálni, amelyek önmagukat reprodukálják, sőt (a mutáció értelmében) tovább is fejleszthetik.

A bizonyítás gondolatmenete, noha viszonylag egyszerű, nem fér bele egy rövid utóiratba. A "trükk" az, hogy a konstruáló automatának tartalmaznia kell önmaga teljes leírását. Neumann itt nyilván a genetikus információt sejtette meg, amelynek szerkezetét Neumann halála után sikerült csak feltárni. A halála után publikált utolsó munkájában ezt a kérdést részletesen vizsgálja és egy olyan kétdimenziós, absztrakt "sejtekből" álló modellt ad meg, amely elegendő komplexitás esetén képes arra, hogy önmagát reprodukálja.

Nagy vesztesége a tudománynak, hogy ezt a problémát már nem vitte végig, mert a korszerű félvezető technika már képes arra, hogy az integrált áramkörökben olyan szerkezeti elemeket állítson elő, amelyek méretei kezdik megközelíteni az élő szervezet sejt méreteit. Ha a tudomány Neumann problémáját egyszer megoldja, olyan új távlatok nyílhatnak meg az emberiség előtt, amelyek ma csak a tudományos-fantasztikus regényekben találhatók.

-
1. A Connecticut állambeli New Havenben 1701-ben alapított Yale Egyetem az Egyesült Államok tudományos életének egyik legnagyobb múltú centruma. Történetében jelentős szerepet játszott a Silliman család alapítványa, amely lehetővé tette, hogy már a múlt század óta a kor legjelentősebb

természettudósait egy-egy ilyen ünnepélyes keretek között tartott előadásorozatra hívják meg, ahol életművükről vagy egy-egy nagy felfedezésükről számolnak be. A Silliman-előadások eddig megjelent kötetsorozatában a XX. századi természettudomány nagy alkotóinak egész sor ma már klasszikusnak tekintett műve jelent meg. *(A fordító.)*

2. "Manhattan-terv" volt az atombomba elkészítésére vezető nagyarányú tudományos és ipari munkálatok fedőneve, amelyeknek rejtett központjai túlnyomórészt "Nyugaton", vagyis az Egyesült Államok csendes-óceáni partvidéken voltak. *(A fordító.)*
3. Neumann János ezen utolsó munkája általános vélemény szerint korunk tudományának egyik klasszikus, töredékességében és befejezetlenségében is valamiként zárt és egységes remekműként ható dokumentuma. Ebben a tekintetben az antik művészet ránk maradt legszebb alkotásaira emlékeztet: a klasszikus görög torzók is úgy "élnek" számunkra, ahogy megismertük őket – nem okoz hiányérzetet bennünk az, hogy tagjaik "folytatását" nem látjuk magunk előtt, s nincs szükség restaurátori munkára, hogy teljes értékű élményt nyújtsanak számunkra. "A számológép és az agy" magyar fordítása nem törekszik e hatalmas gondolati mű sok helyütt inkább csak stiláris törésvonalait elrejteni. Éppen ellenkezőleg: Neumann szinte önmaga számára emlékeztetőül közbeékelte és olykor a szöveggörnyezettel nyelvtanilag össze sem kapcsolt megjegyzéseinek, zárójel közti utalásainak szöveghű és minden utólagos egyeztetéstől mentes visszaadásával igyekszik betekintést adni a nagy matematikus gondolkodásmódjába, munkamódszerébe – még akkor is, ha ez itt-ott a magyar stílus (mint az eredeti szövegben az angol stílus) rovására is megy. Egyébként a mű első része gyakorlatilag befejezett és teljes alakban maradt ránk, második része is legtöbb helyütt legfeljebb valamivel bővebb kifejtésre és stiláris átsimításra szorult volna. Ahol emiatt az olvasónak megértési nehézségei lehetnének, ott ezeken fordítói lábjegyzetekkel igyekszünk segíteni. Végül persze néhány fontos helyen megszakadnak a gondolatmenet

szálai, s továbbfonni őket csak Neumann János tudta volna. Amennyiben azonban az utóbbi évek kutatási eredményei már látni engedik, hogy hova vezethettek volna ezek a szálak – hiszen az utolsó évtized kibernetikai kutatómunkáinak nem csekély részéhez éppen “A számológép és az agy” szolgáltatta a kiindulópontot –, úgy a lábjegyzetek a lehetőséghez képest erre is utalnak. *(A fordító.)*

4. A mindennapos nyelvhasználatban inkább számokkal – nem pedig: “számokon” – végzett műveletekről szokás beszélni. A számológépek elméletében azonban a számok, illetve a számokat megtestesítő fizikai mennyiségek, gépi alkatrészek stb. mint műveleti tárgyak (munkatárgyak) szerepelnek. A szerző eredeti angol nyelvű megfogalmazásai ehhez a tényálláshoz igazodnak. *(A fordító.)*
5. Tizedesjegyen (angolul: decimal digit) itt és a továbbiakban a tízes számrendszerbeli számok tetszőleges jegyei értendők, tehát nemcsak azok, amelyek tizedespont után állnak. Ezt a szokottnál tágabb értelmű szóhasználatot az indokolja, hogy számítástechnikai szempontból lényegében közömbös, vajon például 514, 51,4 vagy 5,14 az a szám, amivel számolni kell; mindegyik esetben háromjegyű számról van szó, s a különbség csak annyi, mintha – mondjuk – centiméteradatok helyett deciméter- vagy méteradatokkal kellene elvégezni ugyanazt a pontosságú számítást. *(A fordító.)*
6. Jelölőnek, vagy angolból kölcsönvett szóval “marker”-nek neveznek a híradástechnikában minden olyan szerkezetet, ill. fizikai jelenséget, amivel bizonyos elrendezés keretében valamit jelezni lehet. Jelzést alkothat egy jel hiánya vagy kimaradása is. Jelölőként működik például a biztonsági lámpa, amelynek kigyulladására veszélyt jelez, míg sötét maradása azt jelzi, hogy nincs veszély. *(A fordító.)*
7. A szerző sajátos és – mint később kitűnik – könyvének célja általa indokolt szóhasználatára szerint “szerv” lehet bármiféle gépi alkatrész, amely meghatározott funkciót tölt be. Ha öt áramlökésnek párhuzamosan kell megjelennie, akkor ehhez öt

különböző “szerv”-re, például öt vezetékre van szükség; soros elrendezésben természetesen ez az öt áramlökés egy és ugyanazon “szerv”-ben, egyetlen vezetéken is felléphet. (A fordító.)

8. A tízes számrendszerből véve a példát: Egy szám “komplemente” (kiegészítője) az a szám, amely 10 következő nagyobb hatványára egészíti ki. Így például 37 komplemente 63, mert $37+63=100$. Ha mármost – mondjuk – 58-ból kell kivonnunk 37-et, akkor ezt úgy is megtehetjük, hogy 58-hoz hozzáadjuk 37 komplementjét, s az utolsó átviteli jegyet (ami a 100-at jelezné) elhagyjuk. Valóban: $58-37=21$, de éppúgy: $58+63=121$. Komplementek előállítására gépi úton rendkívül egyszerű; alkalmazásuk feleslegessé teszi a kivonás külön műveletként való bevezetését, s megkönnyíti a negatív számokkal való számolást. Ezért a komplementálás igen nagy szerepet játszik a gépi számítástechnikában.
9. Az osztás logikai szerkezetének ez a jellemzése mindjárt világossá válik, ha nem olyan egyszerű, kis számokkal végzett osztási műveletre gondolunk, amelyeknél mindennapos gyakorlatunk révén úgyszólván reflexszerűen meg tudjuk választani a helyes hányadosjegyeket. Ha például a $905\ 711\ 352:1\ 293\ 875$ osztási feladatot kell megoldanunk, akkor alighanem már az első hányadosjegy megválasztásánál gondban leszünk, vajon a 9057113-ban (az osztandó első, osztásra kijelölt szakaszában) 6-szor vagy 7-szer van-e meg az 1293875 osztó. Bármelyiket választjuk a két lehetségesnek tartott hányadosjegy közül, következő teendők az, hogy megszorozzuk vele az osztót. Ennek megtörténte után alternatív helyzet elé kerülünk. Mert ha az így nyert szorzat nagyobb, mint az osztandó kijelölt szakasza, akkor ez a próbálkozásunk csődöt mondott és eggyel kisebb hányadosjeggyel újra el kell végeznünk ugyanezt a szorzást. Ha viszont a szóban forgó szorzat kisebb, mint az osztandó kijelölt szakasza, akkor következő dolgunk az, hogy kivonjuk belőle. A kivonási művelet elvégzése után újabb alternatíva a következő: vagy kisebb a kapott maradék, mint az osztó, s akkor rátérhetünk a következő

hányadosjegy meghatározására, vagy nagyobb a maradék a kívánatosnál, s akkor próbálkozásunk megint csődöt mondott és eggyel nagyobb hányados jeggyel kell megismételünk az egész eddigi eljárást. S ez így megy tovább a hányados összes jegyeinek meghatározásánál, lépésről lépésre előrehaladó és megisméltlődő műveleti program szerint, amelyben ily módon “különleges logikai szabályok irányadók a felmerülő alternatív helyzetekre”, “isméltléses, próbálgató kivonási műveletek is közbeékelődnek” stb. (*A fordító.*)

10. Félreértések elkerülése végett megjegyzendő, hogy a memóriaregiszterek egy-egy *számjegy* tárolására szolgálnak. Az a gépi memória, amely – mondjuk – ezer binér (kettős számrendszerű) számjegy tárolására alkalmas elemszervvel rendelkezik, 1000 regiszteres kapacitásúnak számít mindaddig, amíg binér számokkal történik a számolás. Lényegesen kisebb azonban kapacitása, ha tízes számrendszerű számokat kell tárolnia (vagyis nemcsak 0 és 1 fordulhat elő számjegyként), mert ez esetben csak több elemi szerv egyesítéséből alkotott regiszter tárolhat egy-egy számjegyet. (*A fordító.*)
11. A $2+3=5$ művelet bemenő számai 2 és 3, kimenő száma 5. (*A fordító.*)
12. Ha – mondjuk – a kivonás a 2. számú művelet, s a fenti típusú feltételes ugrás a 7. számú művelet, s a gép (mint az egyszerűség kedvéért feltételezzük) ötjegyű utasításokkal dolgozik, amelyeknek első jegye az elvégzendő művelet számát, utolsó jegye pedig az *ezután* soron következő utasítást tartalmazó, regiszter címét adja. meg, akkor például 23569 és 73569 a következő két különböző utasítást jelentheti:
23569= “Végezz *kivonást* (2) úgy, hogy a 3. számú regiszterben található számból kivonod az 5. regiszterben található számot, s a műveleti eredményt beadod a 6. számú regiszterbe. Utána áttérsz a 9. számú regiszterben található újabb műveleti utasítás végrehajtására.”
73569= “Végezz *feltételes ugrást* (7) úgy, hogy ha a 3. számú

regiszterben található szám negatív, akkor az 5. regiszterben található számot, ha pedig a 3. számú regiszterben található szám nem negatív, akkor a 6. számú regiszterben található számot beadod az e célra kiürített 9. számú regiszterbe. Utána áttérsz a 9. számú regiszterben található újabb műveleti utasítás végrehajtására.”

A gépnek mindegy, hogy a számok, amikkel dolgozik, mennyiségeket, címeket vagy bármi egyebet jelentenek. (A fordító.)

13. Vegyes numerikus eljárás mindennapos példáját a logarléchasználásban láthatjuk. Amikor logarléccel számolunk, akkor a szorzásokat és osztásokat analóg módon: a logarléc mozgó részének tologatásával, azaz távolságok összeadásával és kivonásával végezzük. Az eredményként kapott távolságokat mindig úgy hozzuk digitális alakra, hogy a logarléc megfelelő skálájáról *“leolvassuk”* számszerű értéküket. Ez a leolvasás nem más, mint *egy folytonos mennyiség megmérése és digitális alakban való kifejezése*. Ha most már az így kapott értékek összeadására vagy kivonására van szükség, akkor digitálisan számolunk tovább (fejben vagy papíron), s csak újabb szorzás vagy osztás szükségessége esetén térünk vissza a logarléc használatára a megfelelő számoknak a logarléccen való *“beállításával”*, ami viszont *folytonos mennyiségen (ti. távolságon) alapul*. “Közös” a vezérlés akkor, ha ugyanaz az ember végzi a logarléc tologatását, mint aki papíron vagy fejben összead és kivon. De ha ketten dolgoznak együtt oly módon, hogy az egyik logarléccel szoroz és oszt, míg a másik számjegyes összeadásokat és kivonásokat végez, akkor a két személy között *“logikai” közlekedésre is szükség van: közölniük kell egymással, ha elkészültek valamely részletszámítással, amelynek továbbfolytatása már a másakra tartozik.* (A fordító.)
14. Ennek az elvont leírásban kissé bonyolult impulzussűrűségi rendszernek – mint látni fogjuk – igen nagy szerepe van az agy- és idegműködés Neumann-féle elemzésében, s ezért valamivel közelebbről is ismertetnünk kell. Legyen az az időköz, amit egy-

egy számjegy közlésére számunk, $t^1=0,1$ másodperc. S legyen az az időköz, amit egy legfeljebb kilencjegyű szám közlésére számunk, $t^2=1$ másodperc. Megállapodhatunk most már abban, hogy az 1-es számjegyet $1/1000$ másodperces sűrűségű (ezredmásodpercenként leadott) rövid, pontszerű impulzusok jelezzék, a 2-es számjegyet $1/2000$ másodperces sűrűségű hasonló impulzussorozatok stb. Ily módon a 9-es számjegyet a $1/9000$ másodperces, a 0 számjegyet az $1/10\ 000$ másodperces impulzussűrűség jellemezheti. Ha ezek után például az 1963 számot kívánjuk a vezetékben megjeleníteni, akkor úgy járhatunk el, hogy az első tizedmásodpercben 100 impulzust, a második tizedmásodpercben 900 impulzust, a harmadikban 600-at, a negyedikben 300-at adunk le, s a hátralevő hattized másodperces időt üresen hagyjuk.

Tegyük fel, hogy a vezeték másik végén egy vevőkészülék van, amely – ha $1/10$ másodpercnél hosszabb szünet után impulzus éri – automatikusan mérni kezdi, hogy az első tizedmásodpercben milyen sűrűn érkeztek be impulzusok, majd megint a második tizedmásodpercben milyen volt a sűrűségük, s így tovább egy egész másodperc leteltéig. (Az utolsó tizedmásodperc mindig “üres”, hiszen feltevésünk szerint legfeljebb kilencjegyű számokat közlünk.) Ilyen körülmények között a szóban forgó vevőkészülék jeladásunkra hibátlanul észlelni fogja az 1963 számot, hiszen impulzussorozatunk első tizedmásodpercében $1/1000$, második tizedmásodpercében $1/9000$, harmadik tizedmásodpercében $1/6000$, negyedik tizedmásodpercében $1/3000$ másodpercnyi sűrűséggel futnak be az impulzusok.

Sőt: ha útközben néhány küldött impulzus elvész vagy elektromos zavarok révén néhány többletimpulzus lép fel, még mindig hibátlan marad a vétel, hiszen ha – mondjuk – az első tizedmásodpercben 100 impulzus helyett 102 vagy csak 97 fut be, ez még mindig kb. $1/1000$ másodperces impulzussűrűséget, vagyis 1-es számjegyet jelent, mert a következő fokozat – a kettős számjegyet jelentő $1/2000$ másodperces sűrűség (tizedmásodpercenként 200 impulzus!) – igen távoleső érték. Az ilyen jelátvitel – éppen a külső zavarokkal szemben tanúsított

nagy ellenálló-képessége miatt – igen elterjedt a modern híradástechnikában, például mérőműszerek adatainak nagy távolságra való átvitelénél. (A fordító.)

15. A kis számok közti különbségeket a logaritmikus skála (ugyanannyi tizedesjegy alkalmazása mellett) finomabban tagolja, mint a nagy számok közti különbségeket. 2 és 3 logaritmus (0,3010, ill. 0,4771) már első tizedesjegyében különbözik, míg 992 és 993 logaritmus (2,9965, ill. 2,9969) csak utolsó tizedesjegyében – négyjegyű logaritmusként alkalmazása mellett.
16. A gyakorlatban leginkább elterjedt 25 cm hosszúságú logarléceken a szorzás és az osztás hibája 0,1% körül van. Háromnál több értékes számjegyre a műszaki életben viszonylag ritkán van szükség (pl. “3,25 méter”, “5 kiló 17 deka” “=3,14”). Egy 5–6 méteres síndarab hosszának megadásánál például a milliméteres nagyságrendű adat (a negyedik értékes jegy) elég nehezen értelmezhető, mert közönséges vágás és megmunkálás mellett milliméteres nagyságrendű különbség lesz az alsó és felső él hossza között, továbbá már a napközi hőmérséklet-változás is milliméteres távulást vagy összehúzódot okozhat. (A fordító.)
17. Kerekítési hibákról van szó. (A fordító.)
18. A logikai vezérlés feladata – mint tudjuk – a számítás során elvégzendő műveletek sorrendjének, a mindenkor sorra kerülő művelettípusnak a meghatározása. Ez természetesen digitális jellegű feladat, mert akár számokkal, akár betűkkel jelöljük a műveleti lépések sorrendjét, illetve a különféle lehetséges műveleteket, mindenesetre bizonyos szám- vagy betűjegyek, azaz diszkrét, digitális értékek felett kell “döntenie” a vezérlésnek. Az efféle logikai döntések mindig visszavezethetők bizonyos “igen”- és “nem”-válaszok (számszerű ábrázolásban: 1 és 0 válaszok) sorozataira, s ezeket produkálják az elektromechanikus jelfogók azáltal, hogy kapcsolószerkezetük “meghúz” vagy “elenged”. A jelfogókat elektroncsövek is helyettesíthetik, amelyek átengedik vagy megszakítják az

áramot. Az elektroncső azonban csak akkor számít digitális működésű eszköznek, ha ilyen áramátbocsátó, ill. árammegszakító tulajdonságait veszik igénybe, s nem úgy használják – “nagy sebességgel” – mint például a közönséges rádiókészülékben, ahol számtalan közbenső fokozattal erősíti vagy gyengíti a rajta átfolyó áramot. (A fordító.)

19. Koincidencia (“p és q”), kombináció (“p vagy q”) és antikoincidencia (“p és nem q”) típusú logikai műveletek segítségével valamennyi aritmetikai művelet felépíthető. (A fordító.)
20. A szerző várakozása beteljesedett. Azok a “másfajta eszközök”, az ún. paraméteres erősítők, amelyeknek alap gondolata részben éppen tőle eredt, ma már 10^{-9} nagyságrendű logikai műveleti sebességek elérését is lehetővé teszik, bár pillanatnyilag még csak laboratóriumi viszonyok között. (A fordító.)
21. Ha íróasztalunkon betűrendes kartotékban tárolunk bizonyos adatokat, akkor ezek a megfelelő “cím” ismeretében nagyjából azonos idő alatt érhetők el. De ha a kartoték igen nagy és dobozai egy hosszú fal mentén sorakoznak fel, akkor az adatok elérési ideje attól függ, hogy a fal melyik részén (milyen távol) van a keresett doboz. (A fordító.)
22. A “szó” a számológépeknél általában szabványos hosszúságú számjegysorozatot jelent. (A fordító.)
23. Az első szintű ún. gyorsmemóriát elektroncsövekből, tranzisztorokból és más hasonló rendkívül gyors működésű kapcsolóelemekből (“aktív szervekből”) építik fel, például oly módon, hogy bizonyos cső vagy tranzisztor áramot vezető, ill. az áram útját elzáró állapota képviseli a kettes számrendszer 1, ill. 0 jegyét. A második szinten alkalmazott mágnesmagrendszerek közepgyors memória céljára alkalmasak. Ezeknél kis, könnyen átmágnesezhető gyűrűk vagy vékony fémhártyák mágneses sarkainak irányváltozása (az északi és déli sarok felcserélődése) jelenti az 1, ill. 0 állapotot, viszont az átmágnesezés és a mágneses állapot megállapítás

viszonylag lassúbb folyamat, mint ami az első szintű alkatelemeknél végbemegy. A harmadik és további szinteken használatos magnetofonszerűen működő mágneses dobok, szalagok stb. esetében a kívánt cím eléréséhez szükséges mechanikus mozgás érhető módon jelentékenyen megnöveli az elérési időt. Itt ezredmásodpercekkel, sőt esetleg sok ezredmásodperccel kell kifejezni egy-egy elérési idő hosszát, s ez az elektronikus számológépek viszonyai között "lássá" memóriaműködést jelent. (A fordító.)

24. A szerző halála óta eltelt alig több mint fél évtized során ezek az adatok a legkorszerűbb gépeknél már nagyságrendileg eltolódtak. Például az IBM 7030 ("Stretch") számológép mágnesmag-memóriája 96 000 szót (szavanként 16 tizedesjegynyi információt) tárolhat 0,5 mikroszekundumos elérési idővel, de ezenfelül még tárcsamemóriával is rendelkezik 4 millió szó tárolására; mágnesszalagtekercseken akárhány szót tárolhat másodpercenként 62 500 jegy beírásával. A gép kb. 1 millió műveletet végez másodpercenként, úgyhogy műveleti időit már nanoszekundumokban (milliárdod másodpercekben) számolják; két előjellel és különböző műveletellenőrző jelekkel is ellátott 24 jegyű számot a gép például 150 nanoszekundum alatt ad össze, míg 12 jegyű számokkal megfelelően gyorsabban tud dolgozni. Szerkezete több mint 160 000 tranzisztort és több mint 10 millió mágnesmagot tartalmaz. Eredményeit különleges "írógép" segítségével másodpercenként 10 sornyi szám- vagy betűjel leírásával tudja közölni. (A fordító.)
25. A szerző itt és a továbbiakban sokszor szándékosan alkalmaz az idegrendszer leírásában a szokásos élettani terminológiától eltérő *technikai* kifejezéseket. Ezt részben a gépi szerkezetekkel való összehasonlítás, részben a kibernetikai elemzés sajátos szempontjai indokolják. Az idegimpulzus az itteni szóhasználatban *ingerületet*, de – mint látni fogjuk – *elemi* (egyetlen lökésnyi) ingerületet jelent, ami az idegsejtben keletkezik, ill. onnan kilép. Egy közönséges értelemben vett fiziológiai inger által kiváltott ingerület, amely az idegrendszeren

végigfut, nagyszámú idegimpulzus összességének felel meg. (A fordító.)

26. Az emberi agyvelő össztérfogata lényegesen meghaladja az 1 litert; az agykamrák és az idegsejteket nem tartalmazó részek térfogata azonban figyelmen kívül hagyandó az itteni számítás szempontjából. (A fordító.)
27. Vagyis 10^4 nagyságrendű marad a természetes alkatelemek előnye akkor is, ha beszámítjuk, hogy sebességük 10^4 – 10^5 -szer kisebb, mint a mesterségesen előállított alkatelemeké. (A fordító.)
28. Ugyancsak “és”-, ill. “vagy”-szervekkel hajtják végre például a kettes számrendszerben működő elektronikus számológépek a szorzás részműveleteit. Meg kell jegyezni, hogy a köznyelv “és” és “vagy” kötőszava nemcsak a logikai konjunkciónak és diszjunkciónak megfelelő értelemben használatos. Ebben a mondatban: “esik az eső és fúj a szél”– itt az “és” kötőszó valóban konjunkciót fejez ki, mert ez az összetett kijelentés csak akkor igaz, ha mindkét összetevője igaz, ti. ha esik is az eső, fúj is a szél. Viszont ebben a mondatban: “Péter és Pál testvérek” – itt az “és” már egészen másfajta funkciót tölt be, mert ez a mondat nem azt jelenti, hogy Péter testvér és Pál is testvér. A “vagy” szócskát a köznyelvben gyakran használjuk a logikai diszjunkciótól eltérő ún. kizáró értelemben, amikor is nem azt jelenti, hogy két eshetőség közül *legalább* az egyik fennáll, hanem azt, hogy csak az az egyik áll fenn (“vagy ez, vagy pedig az”). (A fordító.)
29. Itt a modern szimbolikus (matematikai) logika által szigorúan meghatározott logikai műveletekről van szó. A logikai műveletekre vonatkozó részletesebb felvilágosításokat illetően a megfelelő modern logikai kézikönyvekre kell utalnunk. (A fordító.)
30. Ilyen értelemben például külső receptorok a szem renehártyájának fényérzékeny idegsejtjei, belső receptorok pedig azok az idegsejtek, amelyek révén, izmaink feszültségét,

mozgásállapotát, általában a testünk belsejében lezajló folyamatokat érzékeljük. *(A fordító.)*

31. A szerző itt azokra az elméletekre céloz, amelyek szerint az agyban bizonyos egységes (nem egyes neuronok részletteljesítményeiből összeadódó) *összhatások* – konkrétan: elektromos erőterek – alakulása szolgálna analóg (modellszerű) effektusként olyan magasrendűen bonyolult pszichikus és különösen gondolkodási teljesítményekre, amiknek létrejöttét, ill. villámgyors lezajlását még sok milliárd idegsejt egyedi reagálásának összegeződésével is nehéz magyarázni, mert így elképzelhetetlenül nagyszámú digitális kombináció “végigjátszására” volna szükség ahhoz, hogy az eredmény – esetleg abszurdan hosszú idő alatt – megszülethessen. Ha nem is az elektromos erőterek akkor még nem létezett fogalmára konkretizálva, de már megtalálható az effajta egységes agyfiziológiai összhatások elgondolása I. M. Szecsenovnak a múlt század derekán írott műveiben; újabban többek között az ún. alaklélektani iskola képviselői (Wolfgang Köhler, Kurt Goldstein, Max Wertheimer), a neurológiában Penfield és tanítványai dolgoztak ki ilyen irányú elgondolásokat. *(A fordító.)*
32. Az olvasót meglepheti, hogy a szerző a számológépekkel, szerzett tapasztalatokra hivatkozva tartja valószínűnek – vagy bizonyosnak – az idegrendszer lokalizált-specifikus memóriájának létezését. Hiszen az a tény, hogy az embernek (és az állatnak) emlékezete, azaz memóriája van, nem vitás, a ennek megállapításához semmiféle számológép-szerkesztési tapasztalat nem szükséges, sőt maga a memória, fogalma is a pszichikus jelenségekkel kapcsolatban alakult ki, csak a legutóbbi időben került át a technikába, ti. éppen a kibernetikai automaták elméletébe. Itt azonban arról van szó, hogy az idegrendszerben van-e valamiféle külön szerv, szerkezeti “alegység”, amely az emlékezési funkciókat ellátja, illetve netán egynél több összetevő vagy esetleg az egész rendszer összműködése biztosítja a memóriaszükséglet fedezését. Ez pedig – mint látni fogjuk – igen komoly tudományos probléma. *(A fordító.)*

33. Egyes új keletű biológiai elméletek a sejtmagban, ill. annak kromoszómáiban elhelyezett memóriaszerűen működő alkatelemeknek tulajdonítják az átöröklést, vagyis azt, hogy a szervezet sejtjei reprodukálni tudják a szülőket, ill. a felmenő ági ősök bizonyos sajátosságait. Ez az ún. “génmemória” úgyszólván a szervezet felépítési tervét tárolná – azokat az “utasításokat”, amelyeket a megtermékenyített ivarsejtből osztódás útján keletkező összes sejteknek követniük kell, hogy a szülőket, ill. ősök fajtajegyeit és örökletes tulajdonságait viselő egyedi szervezet jöjjön létre. *(A fordító.)*
34. A “bit” a “binary digit” (binér vagy kettős számrendszerbeli számjegy) rövidített neve, s az információelméletben az információ mennyiségének mértékegysége, amelyet egyébként korántsem csak számokban kifejezett információkra alkalmaznak. *(A fordító.)*
35. A normális írógépen 44 billentyű van (szóközbillentyű nélkül), s mivel ezek a billentyűk váltóval is használatosak, tehát kétszeresen számítandók, ami éppen 88 jelet ad. Minden jel leírása *elvben* 88 eshetőség közti döntést jelent. *(A fordító.)*
36. A szerző itt arra céloz, hogy igen kiterjedt tapasztalatok szerint álomban, hipnózisban, továbbá újabb kísérletek szerint az agy különböző pontjainak elektromos ingerlésére teljes részletességgel felidéződhetnek igen régi, felidézhetetlennek vélt, illetve “feledésbe ment” élmények vagy benyomások. Olykor ilyenek spontán, azaz minden tudott kiváltó ok nélkül is felmerülnek az emberben. Ezért tételezik fel, hogy a memóriakapacitás az élet során nyert benyomások összességére kiterjedhet, ami persze nem jelenti azt, hogy az emléknymok összessége hozzáférhető volna az akaratlagos visszaemlékezés számára. *(A fordító.)*
37. Ez a néhány mondat joggal tűnhetik homályosnak az olvasó számára, mert a szerző már nem dolgozhatta ki részletesebben itt csak gyorsírásszerűen odavetett elgondolását. Halála óta azonban nyilvánosságra kerültek azoknak a biokémiai és genetikai kutatásoknak az eredményei, amelyeknek első

kezdeteiről tudomása volt, s amelyekhez gondolatai fűződtek. Nevezetesen sikerült feltárni a sejtmagban foglalt nukleinsav-óriásmolekulák szerkezetét, s ki lehetett mutatni, hogy bizonyos vegyi kötések és vegycsoportjaik elhelyezkedése a szó szoros értelmében kódszerű – és ma már részben meg is fejtett – “programutasításokat” tartalmaz az élőlényre fajilag és egyedileg jellemző fehérjék felépítéséhez. Az illető vegyi kötések és vegycsoportok rendje szabályos digitális kombinációk szerint szabja meg, hogy a fehérjét felépítő mintegy húszféle aminosav molekulái milyen választékban és milyen rendben álljanak össze. Ez a digitális apparátus tehát úgyszólván “öntőmintát” alkot a fehérjeszerkezet számára. Az enzimhatásra végbemenő fehérjeképződés azután már analóg folyamatot jelent e minta kitöltése során. Neumann János szeme előtt alighanem az lebegett, hogy ha a digitális és analóg folyamatok váltakozása genetikai téren módot nyújt az élőlény szervezetére jellemző egyedi és fajtajegyek hallatlan sokaságának ilyen rendkívül takarékos – szubmikroszkopikus, ill. molekuláris méretek közti – meg- és átörökítésére, akkor ez az életmechanizmus szerepet játszhatik az életteljesítmények sokkal tágabb osztályának, így többek között az idegrendszeri memória teljesítményeinek megalapozásában is. *(A fordító.)*

38. A kibernetikai terminológiában a “program”-ot régebben “kód”-nak is nevezték, s az angol eredeti szövegben a szerző is ezt a kifejezést használja (“complete code”, “short code” stb.). Mivel azonban a “kód” szó egyben jelrendszert is jelent – sőt a programot kezdetben éppen azért nevezték kódnak, mert bizonyos jelrendszer alakjában vitték be a számológépbe –, félreértések elkerülése végett a ma már közhasznúvá vált “program” kifejezést alkalmazzuk mindenütt, ahol a szerző ebben az értelemben beszél kódokról. *(A fordító.)*
39. Ezt a munkát a gyakorlatban megfelelő matematikai, ill. számítástechnikai felkészültséggel rendelkező szakemberek – “programozók” – végzik el. A helyzetet azonban nagyban egyszerűsíti az, hogy a legkülönbözőbb részletfeladatokra már kész programokat (ún. rutinokat és szubrutinokat) helyeznek el

a gép memóriájában, s valamennyire típusos feladatok megoldásánál csak ezeket kell megfelelő kombinációban “lehívni”. Továbbá vannak bizonyos “önprogramozó” rendszerek, amelyek a legújabb fajtájú gépeknél lehetővé teszik, hogy a gép maga dolgozza ki programjának bizonyos részleteit. A szerző a következőkben a “rövid program” elvének kifejtésével maga is korlátozásnak veti alá a teljes programozás szükségességére vonatkozó itteni megállapítását. (*A fordító.*)

40. A budapesti automata telefonközpont számára például “értelmetlen” minden olyan számsorozat (telefonszám), amely 9-cel kezdődik. Ha felvesszük a kagylót, és először egy kilencest tárcsázunk, akkor a gép be sem várja a folytatást, hanem “foglalt”-at jelez, s ha ezt a jelzést egy újabb szám gyors letárcsázásával megelőzzük, akkor visszaadja az eredeti bűgő hangot, mintha még meg sem kezdtük volna a tárcsázást. Természetesen van olyan központ is, ahol a 9-cel kezdődő számsorozatok “értelmesek”. Továbbá: a 0 tárcsázása (10 gyorsan egymást követő impulzus) a budapesti automata telefonközpontnál, különféle szolgálatok – távírda, pontos idő stb. – vonalcsoportjainak kapcsolását vezeti be, míg sok házi automataközpont számára ennek az impulzus sorozatnak egészen más az “értelme”, ti. az, hogy városi vonalat adjon a hívó állomásnak, és utána már *ne* reagáljon a további számok tárcsázására. (*A fordító.*)
41. E látszólag feleslegesen bonyolult kikötések mindjárt világossá válnak, ha meggondoljuk, hogy miféle viselkedési program alapján utánozhatná egy csak magyarul tudó ember egy csak németül tudó ember viselkedését a neki feltett kérdések megválaszolásában. Ebhez semmi esetre sem volna elegendő az, ha megtanítanók német szóra, azaz utasításba adnók számára a német nyelv szókincsét és grammatikáját azzal, hogy ezentúl kizárólag ezt használja. Mert ha csak ennyit tennénk, akkor e program alapján az illető ezentúl a magyarul feltett kérdésekre is németül válaszolna, s ebben a tekintetben *nem* utánozná híven a csak németül tudó ember viselkedését, hiszen az magyarul feltett kérdésekre nem ad semmiféle választ. A hű

utánzást csak azzal az instrukcióval biztosíthatjuk, hogy az illető vizsgáljon meg minden a jövőben neki feltett kérdést, vajon németül van-e, s csak *akkor* reagáljon rá (természetesen német nyelvű válasszal), ha a kérdést német nyelven tették fel. Ez korántsem szőrszálhasogatás, hanem effajta programozási finomságok végiggondolására gyakorlatilag is állandóan szükség van, amikor elektronikus számológépekkel vagy egyéb kibernetikai automatákkal különféle folyamatokat “modelleznek”, “szimulálnak”, fordítógépi teljesítményekre vagy reflexmechanizmusok végrehajtására programozzák őket stb. (A fordító.)

42. Az egész mai kibernetikai elmélet szempontjából igen nagy jelentőségű ún. Turing-féle elv, amire itt a szerző utal, durván szólva azt jelenti, hogy elvileg automatizálható minden olyan feladat ellátása, amelynek a logaritmusát (véges, bár nem okvetlenül előrelátható számú elemi művelet, ill. műveletciklus előírászerű alkalmazásával eredményre vezető megoldási eljárását) meg tudjuk határozni. Hogy az elvégzendő műveletekről, munkagépek ki- és bekapcsolásáról vagy bármi másról van-e szó, s hogy a feladat tartalmilag milyen jellegű, például számviteli, termelésirányítási vagy szövegfordítási funkciók ellátása képezi-e a feladat tárgyát, az ebben a vonatkozásban közömbös. (A fordító.)
43. Mint e szakasz címe mutatja, a szerző itt ki szándékozott térni a kvantitatív (“aritmetikai”) és kvalitatív (nem mennyiségileg, hanem “logikailag”, azaz minőségi osztályozás útján meghatározott) idegrendszeri működési mozzanatok kölcsönhatásainak tárgyalására. Sajnos, kézírata ezen a helyen töredékes maradt. Meg kell jegyezni, hogy az aritmetika és a logika közti határt a modern matematika és a matematikai logika képviselői korántsem mind ott vonják meg, ahol a szerző, sőt nem kevesen tagadják az éles elhatárolás lehetőségét, s a logikát a matematika részének tekintik, vagy például az elemi halmazelméletet a logika és a matematika közös alapjaként fogják fel. Neumann János azonban az osztályok (ill. halmazok) és elemeik viszonyát alapvetően *logikai* viszonyoknak véli –

axiomatikus halmazelméletében az “elem” fogalmát éppen azzal határozza meg, hogy az valami, ami logikailag *képes* egy osztályba tartozni –, s ennek megfelelően lényegesen tágabban értelmezi a logika körét, mint sokan mások. Rendkívül érdekes lett volna ezen értelmezés vetületét az idegrendszer kvantitatív és kvalitatív működési mozzanatainak Neumann által tervezett egybevetésében megismerni, de erre vonatkozó elgondolásai az itteni rövid utalásokból már nem rekonstruálhatók. *(A fordító.)*

44. Monoton növekedő függvénynek nevezik a matematikában az olyan függvényt, amelynek értéke változójának értéknövekedése esetén mindig növekszik (vagy legalábbis állandó marad), de semmi esetre sem csökken. Ha az erősebb ingerlés sűrűbb impulzussorozatot vált ki, akkor az impulzussorozatok sűrűsége az ingerlés intenzitásának monoton növekedő függvénye. *(A fordító.)*
45. Ezt a talán nem minden olvasó számára könnyen érthető tényállást a következő példával világíthatjuk meg: Egy üdülő lakói megállapodhatnak abban, hogy bizonyos gongütések száma jelzi a fontos eseményeket: egy gongütés – megérkezett a posta; két gongütés – elkészült az ebéd; három gongütés – vihar közeledik és a csónakok tartsanak a part felé stb. Ez olyan jelrendszer, amelyben minden jelölő külön-külön számít, például két gongütés teljesen mást jelent, mint három – az aritmetikai pontosság magasrendű, viszont a logikai megbízhatóság alacsonyrendű, mert ha valakihez egyetlen gongütés hangja nem jut el, akkor teljesen tévesen fogja értelmezni a közleményt. Egészen más az eset, ha nem gongütések számával, hanem kürtjelzések melódiájával történik a jelzés. Ez esetben az egymást követő, de elég hosszan tartó kúrthangok magassága (rezgésszáma, frekvenciája) számít, s ha a kürtös kissé hamisan fújja a jelzést, akkor még mindig nem fogja félreérteni a közlés értelmét – az aritmetikai pontosság csekély, viszont a logikai megbízhatóság igen nagy. Természetesen a jeladás céljától, ill. a jeladó berendezés rendeltetésétől függ, hogy az aritmetikai pontosság vagy a logikai megbízhatóság fokozására kell-e törekedni. *(A fordító.)*

46. Neumann János egyik utolsó tanulmánya azzal a kérdéssel foglalkozott, hogy miként építhetők fel “megbízhatatlan” (könnyen meghibásodó) alkatrészekből megbízható működésű gépek. A kérdést igen aktuálissá tette az, hogy a nagy elektronikus számológépek az aktív alkatelemek (pl. elektroncsövek, tranzisztorok) tízezreit tartalmazzák, s másodpercenként sok százezer műveletet végezhetnek. Ha tehát valamely alkatrész meghibásodásának, itt. működésbeli kiesésének, aminek csak néhány billiomodnyi valószínűsége van – ami technikailag elkerülhetetlen –, akkor hibák léphetnek fel. Neumann kimutatta, hogy az effajta hibák ellen védelmet nyújthat, ha egy-egy műveletet *párhuzamosan* végez el több alkatrészsorozat, amely a művelet végrehajtása után egymás között *összehasonlítja* kapott eredményeit, s ha meghibásodás folytán nem minden vonalon egyeznek meg eredményei, akkor *statisztikus* döntést hoz, a legtöbbször kapott eredményt fogadja el helyesnek, s ezzel számol minden vonalon tovább. Neumann utalt arra is, hogy az ilyen típusú működés szempontjából talán egyenest célszerű az idegrostok viszonylagos igen fogyatékos szigetelése, ami egy-egy idegen belül kimutatható, mert ez elősegítheti a pálya egészének *megbízhatóbb* működését az idegimpulzusok statisztikus korrelációja révén. (A fordító.)