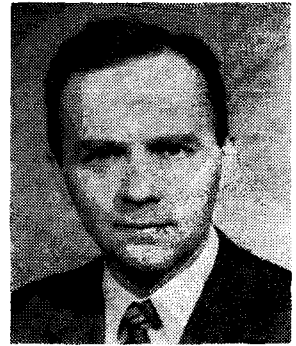


# Korlátok és lehetőségek a rendszerek modellezésében\*

DR. CSURGAY ÁRPÁD  
MTA—SZTAKI



## ÖSSZEFOGLALÁS

A szerző átfogó rendszerben tárgyalja a modellezéssel történő elemzés lehetőségeit és korlátait. Elemzi a rendszerek, részrendszerek összekapcsolásán át történő megoldásának lehetőségét is, és ezen keresztül jut el a számítógépes tervező rendszerek alkalmazásáig. (C)

A dolgozat az elektronikus rendszerek építése során alkalmazott modellekről szól. Jól bevált munkaeszközöinkről, amelyeket szilárdtestfizikai, áramkör- és információelméleti és számítástudományi diszciplínákból származtatunk, a rendszerépítés gyakorlati igényei szerint. A tervezés minden fázisában a domináns jelenséget tükröző modellt alkalmazzuk. Amíg az áramkörök alkatrészeinek száma csak néhány száz, és a rendszer jól particionálható, addig a tervezés bevált modelljeinkkel elvégezhető. Az elektronika fejlődésének egyik fő iránya az alkatrészs szám gyorsuló és feltartóztathatatlanul tűnő növekedése. A komplexitást „mega-”, illetve „giga-tranzisztor”-ban és „kilo-processzorban” mérjük, a modellekben eddig elhanyagolt „mellékhatások” szerepe megnövekedett. Meginog a környezetfüggetlen modell hipotézise.

Az elektronikus rendszerek építését segítő tervezőrendszerek modelljeinek felvillantása után a tervezés során elhanyagolt termodinamikai hatásokra hívjuk fel a figyelmet, amelyek kapcsolatot teremtenek a logikai (funkcionális) és a geometriai (layout) modellek között.

## I.

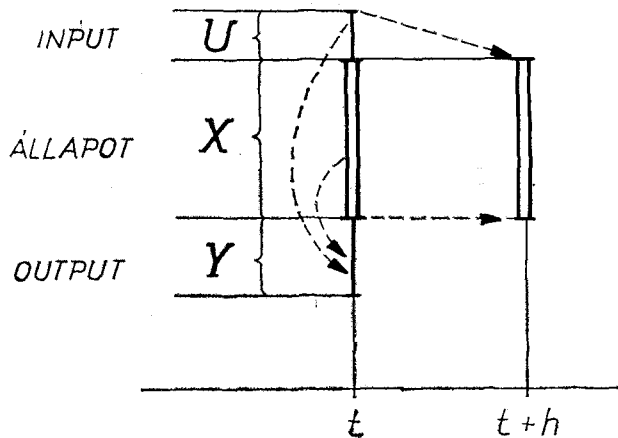
Az elektronikus elven működő rendszerekben a funkciót töltéshordozók — elektronok és lyukak — dinamikája hordozza. E dinamika modellezése során feltesszük, hogy a rendszerből kiragadott áramkör vagy alkatrész környezetétől függetlenül modellezhető. Kivétel nélkül, minden dinamikus modell a rendszer állapotát jellemző  $X$  halmaz  $t$  időpillanatbeli elemének és a környezetet — a rendszertől függetlenül — jellemző  $U$  halmaz  $t$  időpillanatbeli elemé ismeretéből egyrészt előállítja a rendszer összes többi jellemzőjének, így  $Y$ -nak  $t$ -heli elemét, másrészt az  $X$  és  $U$   $t$ -beli eleme meghatározza a rendszer állapotának  $t+h$  időpillanatban felvett, azaz jövőbeli elemét (1. ábra).

A rendszert részrendszerek összekapcsolásának tekintjük, ami a modellre tett feltevések szerint azt jelenti, hogy a részrendszerben lejátszódó elektron-

## DR. CSURGAY ÁRPÁD

Villamosmérnök (1959), dr. techn. (1964), a műszaki tudományok doktora (1973). Szűkebb szakterülete az elektronikus áramkörök elmélete és az elektronikus elven működő eszközök és rendszerek tervezésmethodikája. A Távközlési Kutató Intézet, a Polytechnic Institute of New York, majd a Magyar Tudományos Akadémia munkatársaként a hálózatelmélet, az elektromágneses térelmélet és a rendszerelmélet kutatásával és alkalmazásaival foglalkozik.

1973 óta főszerkesztőhelyettese az „International Journal of Circuit Theory and Its Applications” című nemzetközi folyóiratnak. 1983-ig 91 tudományos közleménye jelent meg, 41 idegen nyelven. Munkásságáért 1968-ban a Kiváló Feltaláló arany fokozattal, 1971-ben Puszkás Tivadar Díjjal, ugyancsak 1971-ben az MTA Akadémiai Díjával, 1975-ben Eötvös Loránd Díjjal, 1980-ban pedig a Munka Érdemrend ezüst fokozatával tüntették ki. Jelenleg az MTA SZTAKI tudományos tanácsadója.



$$\sigma_h : X \times U \rightarrow X$$

$$\lambda_h : X \times U \rightarrow Y$$

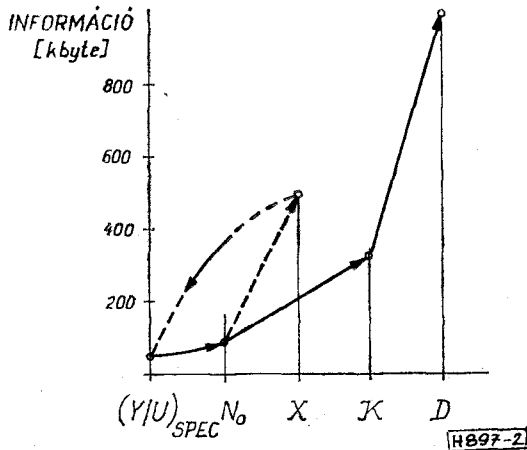
H 897-1

1. ábra

mozgások az összekapcsolástól függetlenül modellezhetők, s a részrendszerek modelljeiből az eredő rendszerben lejátszódó elektronmozgások modellje is összerakható. E hipotézis jogossága attól függ, hogy a

\* Elhangzott a MTA 1983. V. 2-i tudományos ülés-szakán.

TERVEZÉS:  $(Y/U)_{SPEC} \Rightarrow (D_G, D_E)$



2. ábra

modellhierarchia adott szintjén a mellékhatások (például egy logikai hálózatban fellépő termikus mozgás) meddig hanyagolhatók el.

A rendszerépítést segítő számítógépes tervező rendszerek is a fenti hipotézisra épülnek. A rendszert (vagy áramkört) alkatrészeinek felsorolásával ( $C$ ), és az alkatrészek összekapcsolásának leírásával (incidencia) adhatjuk meg, s az  $N_0 = (C, i)$  reprezentálja a struktúrát. Ha az alkatrészek és az összekapcsolás dinamikus modellje a tervezőrendszer adattárában megtalálható, akkor automatikusan felépíthetjük a rendszer modelljét, melynek analízisével meghatározhatjuk a rendszer funkcióját, specifikációját:  $Y/U_{SPEC}$ .

A rendszer építéséhez (gyártásához) szükséges információt a gyártási és ellenőrzési dokumentáció ( $D_G, D_E$ ) tartalmazza, melyet a rendszerleírásból és a konstrukció modelljéből már — a szabványokat tartalmazó adattár segítségével — automatikusan előállíthatunk. Az adattár tartalmazza a részrendszerek modelljét is, így a rendszerleírásból automatikusan felépíthetjük a rendszer dinamikus modelljét, melyből a funkciót visszaszámolhatjuk (2. ábra).

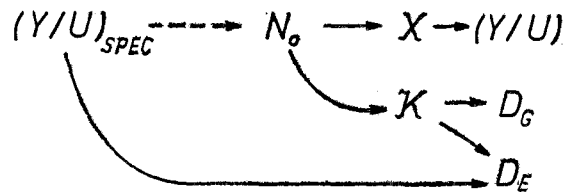
Egy rendszer „tervezése” a gyártási és ellenőrzési dokumentációnak a megadott specifikációból történő előállítását jelenti. Míg a specifikáció leírása néhány száz karaktert igényel, a dokumentáció már néhány százezer, esetleg millió karakterből áll. A tervezés során az információ expanziója játszódik le. A dokumentációban szereplő információ 80–85%-a szabványokból kímásolt adathalmaz. Ezért kézenfekvő a dokumentáció generálásának automatizálása. A rendszerek és áramkörök néhány gyakran előforduló esetében, például a nyomtatott lapon szerelt áramköröknél, sikeresen oldható meg a konstrukciós modellnek az áramkörleírásból történő automatikus előállítása (3. ábra).

A 70-es években világszerte elterjedtek e feladatok megoldását segítő elektronikai tervezőrendszerek, melyek a gyártást és ellenőrzést segítő automatákkal együtt alkotják az elektronikai szerelőipar korszerű technológiáját, a tervező-gyártó-ellenőrző (TGE) rendszereket.

A hazai kutatók időben kapcsolódtak be e rend-

## A TERVEZÉS - ADATFELDOLGOZÁS SZÁMÍTÓGÉPEK A TERVEZÉSBEN.

Példa: AUTER - rendszer



HE97-3

3. ábra

szerek kidolgozását előkészítő nemzetközi kutatómunkába, originális eredményeikkel hozzájárultak a témakör fejlesztéséhez, és az ötödik ötéves tervben összefogva néhány elektronikai vállalatunk előrelátó vezetőivel és fejlesztőivel, az OMF, az MTA és az Ipari Minisztérium támogatásával, három vállalat technológiáját megújító TGE rendszert építettek fel, öt további hazai és két nyugat-európai vállalatnál pedig tervezőrendszer telepítésével hozzájárultak a gyártmányfejlesztés technológiájának korszerűsítéséhez. Az AUTER tervezőrendszer jól illeszkedik a hazai berendezésgyártó ipar jelenlegi, és a közeljövőben kialakítandó termékszerkezetéhez. A hazai kutatási eredmények ipari bevezetésének tapasztalatai ezen a területen megnyugtatóak.

## II.

Távolról sem ilyen megnyugtató a kép, ha négy-öt évvel előre tekintünk. A technológia előreszaladt. Olyan lehetőségeket ígér, melyek kiaknázása az ismert modellekre épülő tervezési módszerekkel lehetetlennek tűnik. A komplexitásból adódó gondok érzékeltetésére tekintsük át az információátvitel és processzálás elektronikus elven működő eszközeinek működési korlátait.

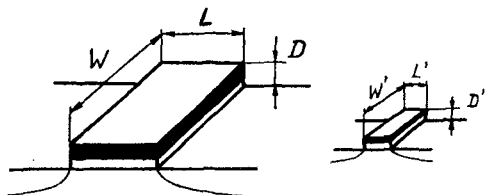
A rendezetlen, termikus egyensúlyban levő anyag információt nem hordoz, a makroállapotot realizáló mikroállapotok száma, így az anyagi rendszer entrópiája maximális. Az információt az anyagba bevitt forma hordozza. A forma térbeli struktúrája és annak időbeli mozgása. Az információ elemi egységét, az 1 bit (binary unit) információt kapcsoló elemmel tárolhatjuk, illetve változtathatjuk. Minden kapcsolat irreverzibilis folyamat, energiadisszipáció kíséri. Az informatikai rendszer legfontosabb jellemzője az egy kapcsolásra eső disszipált energia  $E_{SW}$ .

Az elektronikus információtechnika az elektronok mozgásformáit hasznosítja a bit tárolására és az átkapcsolásokra. A kapcsolási energia csökkentésének korlátot szab az elektron oszthatatlan töltése, az elektrongáz Fermi—Dirac statisztikát követő leállíthatatlan hőmozgása, és az elektron hullámtermészetéből adódó alagút-effektus. Mennyire közelítjük

meg a korlátokat már ma is, és milyen közel kerülünk a jövőben e korlátokhoz?

Az információtechnika főszereplője a kartonpapír vastagságú, néhányszor tíz négyzetmilliméter felületű szilícium-lapkán kialakított tranzisztor sokaság (néhány százezer, esetleg egy-két millió tranzisztor). E végtelenül egyszerű konstrukciójú tranzisztorból bármely logikai függvény vagy véges automata felépíthető.

### "KICSINYÍTÉS"



$$L' = \frac{1}{k} L \quad W' = \frac{1}{k} W \quad D' = \frac{1}{k} D$$

Feszültségek:  $V' = \frac{1}{k} V$

Szennyezés:  $N' = k N$

Kapacitások:  $C' = \frac{1}{k} C$

Késleltetési idők:  $\tau' = \frac{1}{k} \tau$

Fogyasztás:  $P'_{dissz} = \frac{P_{dissz}}{k^2}$

Kapcsolási energia:  $E'_{sw} = \frac{E_{sw}}{k^3}$

HB97-4

4. ábra

És e tranzisztor arányos kicsinyítése, a logikai funkciót változtatlanul hagyva, felgyorsítja az eszközt; fogyasztását, a kapcsolási energiát — és az eszköz árát — radikálisan csökkenti (4. ábra). A technika történetének szokatlan jelenségével állunk szemben: minél kisebb, annál jobb minőségű és egyidejűleg annál olcsóbb!

Az  $L$  vonalszélesség 1960-ban még 100 mikron körüli volt, 1970-ben 10 mikronos, ma pedig 1–2 mikron nagyságú. Ma már egy négyzetcentiméter felületű lapkán 2 mikronos technológiával mega-tranzisztornyit lehet előállítani. De meddig kicsinyíthetők még a méretek? Ha adott feszültségen működik az eszköz, akkor a kicsinyítésnek határt szab a szilíciumoxid szigetelőréteg vastagsága, mert az elektronok hullámtermészete következtében alagútáram indul a szigetelőrétegben. Ezen a feszültség csökkentésével segíthetnénk. De az elektronok termikus mozgása leállíthatatlan! Csökkentve a logikai jel feszültségét, megnő a termikus mozgásból származó hibák száma. A voltnyi jelfeszültség esetén század mikronnyi szigetelőréteg, illetve az ennek megfelelő tízed mikronnyi vonalszélesség elvi korlátnak tűnik. Érdekes módon ebben a tartományban minimális az  $E_{sw}$  kapcsolási energia is. A mére-

tek további csökkentése ugyanis az elektron töltésének oszthatatlansága következtében a kapcsolási energia növekedéséhez vezetne. A tízed mikronok tartománya optimálisnak tűnik. A méretek az állatok idegsejtjeinek méreteire emlékeztetnek.

Mértékadó előrejelzések szerint a folyamat a 80-as évek végén telítődik; egy kézbe vehető, asztalra állítható készülék komplexitása giga-tranzisztornyit lehet. Az eddig függetlenül kezelt funkcionális, geometriai és termodinamikai modelleket inhe-rens módon összekapcsolja a disszipáció és véges jelterjedési sebesség.

### III.

Elektronikus informatikai rendszerek bináris információ tárolásával, mozgatásával és logikai művelet-sorokkal tükrözik a valóságot. Egy informatikai feladat megoldása, az eredményt jelentő információ meghatározása, a rendezetlen információ időbeli és térbeli „rendezését” jelenti. Ha ehhez  $S_L$  számú logikai művelet és  $S_{sp}$  számú adatmozgatás szükséges, akkor az eredményhez vezető entrópia csökkenést az  $S_L + S_{sp}$  — definíciószerűen — logikai, illetve térbeli entrópia összegének tekintjük. Minden elemi művelet disszipációval jár, ezért növeli a rendszer termodinamikai entrópiáját. A kapcsolási energia fogalmából következik, hogy a logikai és térbeli entrópia csökkentése csak a termodinamikai entrópia növelése árán lehetséges. A termodinamikai entrópia megváltozása

$$S_T = \frac{E_{DISSZ}}{kT}, \quad (1)$$

ahol  $S_T$  a termodinamikai entrópia,  $k$  a Boltzmann-állandó,  $T$  pedig az abszolút hőmérséklet.

$$E_{NISSZ} \geq -E_{SW} \Delta S_L - E_{SW} \Delta S_{sp}, \quad (2)$$

azaz

$$\Delta S_T + \frac{E_{SW}}{kT} \Delta S_L + \frac{E_{SW}}{kT} \Delta S_{sp} \geq 0. \quad (3)$$

E reláció kapcsolatot teremt egy adott informatikai feladat megoldásához kiválasztott térbeli struktúra (hardware), és az azon lefuttatott logikai művelet-sor (software) között, és mindkettőjük, valamint a rendszer termodinamikai entrópiája között.

Az egy elemi műveletre eső disszipáció az adott rendszer technológiai színvonalára jellemző. Elosztva vele a disszipált energiát mintegy normalizálunk a technológiára:

$$E_{DISSZ}/E_{SW} = S_L + S_{sp}. \quad (4)$$

E hányados, azaz a logikai és térbeli entrópia összege, minősíti az adott feladathoz választott hardware rendszert, az arra írt algoritmust és kettőjük viszonyát. Egy adott feladatot ellátó informatikai rendszer komplexitását a térbeli és a logikai entrópia összegével mérhetjük, amely közvetlen kapcsolatban van az informatikai feladat megoldásához szükséges energiafogyasztással.

Kezelhető-e és hogyan kezelhető a giga-tranzisztornyit struktúrán életrekelhető elektronikus mozgás-

formák univerzuma? Világszerte keresik a választ. Vámos Tibor igényes feladatkitűzése nyomán egy kis kutatócsoport itthon is csatlakozott a keresők-höz. Receptek még nincsenek. De néhány sejtés már körvonalazódott:

- a kombinatorikus komplexitás robbanása miatt a kitaposott ösvények járhatatlanok;
- többet kellene tudnunk az eddig függetlennek tekintett diszciplínák kategóriái közötti kapcsolatokról;
- a modellosztályok közötti relációk heurisztikus kezelését a morfizmus követelményeinek eleget tevő hierarchikus modellsorozat következetes felépítése kell felváltsa;

— a rögzített elvi konstrukciók osztályozása is sürgető aktuális feladat.

Sokan keresik a választ. Vannak, akik a konstrukciót rögzítő szabályos struktúrákat javasolnak, mások az élő természetből lesnek el ötleteket. Megint mások kísérleteznek és az evolúció végigjárását javasolják: populáció-szelekció, amíg megoldáshoz jutunk. Vannak, akik a direkt szintézisben („top-down design”) látják a megoldás kulcsát, mások a kipróbált építőelemekből építik („bottom up”) rendszereiket, és ebben látják a jövő tervezési módszereinek alapját.

A nagy komplexitású rendszerek tervezésmetodikája még nem alakult ki.