

# BONYOLULTSÁG AZ ELEKTRONIKÁBAN ÉS A NANOELEKTRONIKÁBAN

Gyulai József

az MTA rendes tagja, intézetigazgató,  
MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet – gyulai@mfa.kfki.hu

A fizika tudományának a célja, hogy minden manifesztálódó természeti kölcsönhatást első közelítésben felkutasson, és – megértve annak lényegét – kvantitatív módon leírjon. Ezzel válik – a matematika módszereivel körülbástyázva – valamennyi tudományág nemtőjévé, amint ezt például szépen demonstrálja a kémia XX. századi története, és hasonló történések beindulásának vagyunk tanúi az élettudományokban is. A „minden természeti kölcsönhatás” azt is jelzi, hogy a fizika mindig is a bonyolultság és az egyszerűsítés mezsgyéjén egyensúlyoz. Akár kísérletekre, akár elméleti modellekre gondolunk, a reális megértéshez éppen a *manifesztálódó* kölcsönhatás (azaz a jelenség) letisztítása, a lényeges elemeknek az éppen „mai” szemmel (!) a „lényegtelenről” való elkülönítése jelenti. Egy kutató zsenialitása éppen abban nyilvánul meg, hogy ezt a letisztítást másoknál sikeresebben végzi el. Ez a stratégia vezet el a modellalkotás, a kvantitatív leírás megalkotásához. A megalkotott modellek mentén igyekszik azután a kutatói világ dolgozni, a modelleket megtartani, átmenteni mindaddig, ameddig az új tények egyre több olyan elemet visznek a tudásunkba, amelyek már csak nagyon mesterkéltnél, vagy egyáltalán nem foghatók meg a modellel. Ekkor következnek el – többnyire kitartó harcok árán – a nagy ugrások.

A modellek mára rendkívüli bonyolultságot, azaz a valósághoz nagyon közeli komplexitást is elérhetnek – hála az atomi felbontású analitika, valamint a számítógépes módszerek fejlődésének. Ma már gyakran megkísérelhető a valóságot már alig szimplifikáló matematikai modellek *kvázi* megoldása is. Nem kell az elemi közelítésekig visszamennie sem a fizikusnak, sem a kémikusnak – remélhetőleg rövidesen az élettudományok művelőinek sem. Gondoljunk az *Ürmélybe* látó kozmogónia következtetéseire, vagy az atomi szintű ismeretek szélesedő áramára alapozódó információkezelésre.

A modelleket – személyes értékítéletemben – két kategóriába szoktam sorolni. Az általam nagyra becsültek azok, amelyeknek elemeit a fizika, kémia kvantitatív leírásai, azaz a természettörvényekként nevezett összefüggések adják. Ezek azok a modellek, amelyek jósolni is képesek, és jelzik a továbblépés lehetséges irányait. Sajnos éppen mert nagy kutatási háttérrel feltételeznek, ezek a költségesek. Az ugyanis rendkívül ritka, hogy a jelenségorientált alapkutatók olyan részletességgel vizsgálják meg, írják le a jelenséget, hogy a kvantitatív kép az alkalmazásokhoz szükséges részleteket is tartalmazza: általában szükséges annak további finomítása.

Az olcsó, és emiatt, főleg az iparban jobban terjedő programok a felszínen látható, rokonító, de nem feltétlenül lényegi kapcsolatok analízisével érnek el – el kell ismerni – nagyon látványos eredményeket, de nem adnak instrukciót a továbblépéshez. Valahogy úgy, ahogy a homológia viszonylik az analógiához.

A bonyolultság-modellezés kettőse át-szövi az alkotó műszaki tudományokat is, amelyek az alaptudományok által megértett, leírt jelenségeket mint – mára akár az egyes atomok szintjén – működő szerszámokat használják, hogy azokkal egy előre elképzelt funkciót megvalósító eszközt létrehozzanak.

A jelen cikkben a bonyolultságnak egy, az életünket meghatározó, de valahol az évtizedes jövőben leáldozó szakmájából, a mikroelektronikából és rokon területeiből szeretnék példákat meríteni.

Számítógépesített világunk hajtóerejét a digitális integrált áramkörök fejlődése – mint az autópárt is maga mögé utasító óriás iparág – szolgáltatja. Valamikor a hetvenes évek elején, az Intel nagy feljutása idején a cég kereskedelmi igazgatója, Gordon Moore (ejtsd: Mór) piaci felméréseket végzett. Ezek során vette észre, hogy azokban az években a cég – a versenytársakra is kényszerítő hatással – úgy fejlődött, hogy a gyártott áramkörökön évente megkétszereződött a tranzistorok száma. A cég stratégiájának kialakításához azt a javaslatot merite tenni, hogy „ez még néhány évig tartható lesz”. Nem gondolhatta akkor, hogy az iparág mögé felsorakozó kutatás – a *mi* szakmánk – olyan sikeres lesz, hogy ez nem csak pár évig, de pár évtizedig így maradhat, és a megfigyelése valahol tán törvénnyé érik, legalábbis annak fogják aposztrofálni. Mára ugyan az évi kétszeres növekedés némileg, egy egész nyolctizedre (1,8) mérséklődött, de ezzel a tempóval még vagy egy évtizedig számolni lehet. Akkor ugyanis az egyre csökkenő méretű áramkörök valóban elérik azt a

nano-méretet, amelynél már nem jöhet létre a tranzistorhatás, vagy más, fundamentális nehézség lép fel. Az én szakmám számára ez jelenti évtizedek óta a nagy kihívást, amelynek mindeddig meg tudott felelni.

Először az USA szakemberei ültek össze a kilencvenes évek elején, hogy megvizsgálják, tartható-e a Moore-törvény még egy ideig. Megalkották a *Roadmap*-nak elnevezett, azóta kétévenként korszerűsített tanulmányukat. Először a *National Roadmap of Semiconductor Industries*, majd a nemzetközi verziót, amelyet mára szélesebb közreműködéssel állítanak össze. Ezzel divatba hozták a „Roadmap-irodalmat”.

A természettudományos alapműveltséggel rendelkezőknek érdemes felkeresniük a <http://public.itrs.net/> címen a kétévenként korszerűsített tanulmányokat. Az érdeklődés felkeltésére azt említem meg, hogy azokban háromféle színnel jelölik azokat a szakmai követelményeket, amelyek szükségesek ahhoz, hogy a következő generációs áramköröket – ipari termékként – el lehessen készíteni. Fehér színnel jelzik azokat a problémákat, amelyek megoldásához ipari szinten már minden tudás rendelkezésre áll. A zöld a szükséges, tudományosan ugyan ismert, de ipari gyakorlattá még nem vált ismereteket ismerteti. A *red brick walk*-ként emlegetett vörös szín még alapkutatást is igényel, de a szerkesztők véleménye szerint azok elérése nem fikció. Hogy az *ipari szint* a kutatáshoz képest milyen időskálán mozog, azt módomból volt személyesen is megtapasztalni: 1986-ban részt vehettem egy, a Cornell Egyetemen összehívott, az első 100 nm-es tranzistorok előállítását némi szomorúsággal ünneplő diszkusszióban. Az volt ugyanis a gond, hogy működő példány csak elvétve akadt a szilíciumszeleteken. A 100 nm-es tranzistorokból épült áramkörök napjainkban, csak jó tizenöt évvel később válnak iparilag gyártott termékké... Természetesen a gyártásig eljutott technológia

alaposan eltér attól, amit akkor a Cornellen, a National Submicron Facility kutatói alkalmaztak.

Az 1. táblázatban látható a Roadmap két egymás utáni „naprakészített” (1999 és 2001) változata, annak bemutatására, hogy a multidiszciplináris szakma fejlődése a prognózisoknak milyen agresszív alakítását tette eddig lehetővé. A valahol 2015 táján végződő *triptique*-nek valamilyen új technikában kell folytatódnia. Viszont a világ eddigi fejlődési tempóját extrapolálva állítható: ahhoz, hogy tizenhárom év múlva a jelenlegi digitális áramkörök helyett más elvű eszközök jelenjenek meg ipari termékként, az csak akkor lehetséges, ha azokra a változatokra épülnek, amelyeknek a laboratóriumi szinten üzemképes változatai már ma megvannak. Világos és fontos, hogy az alternatív eljárásokat, például a nanotechnológia kínálta lehetőségeket, gyors ütemben kutassa az emberiség, és felkészüljön a paradigmaváltásra. Mert ennek valahol 2015 táján elkerülhetetlenül be kell következnie.

Többen (például a jelen kiadvány egyik szerzője, Csurgay Árpád is) évtizedek óta publikálnak indokolt szakmai gondokra épülő aggályokat – legfrissebben éppen egy Amerikában dolgozó hazánkfi, Laszlo B. Kish (írt nagy figyelmet felkeltő cikket (Kish, 2002). Kish felhívta rá a figyelmet, hogy már a következő generációs áramkörökben, tehát valahol a 100 nm környékén gondok

léphetnek fel az elkerülhetetlen termikus zajok miatt, azaz esély van rá, hogy a Moore-törvény a Roadmap szakmai gárdája által vártnál korábban érvényét veszti. Jómagam nem a kutatások aggályainak jogosságát vonom kétségbe, de az iparág társadalmi-üzleti erejére apellálva azon a véleményen vagyok, hogy a záróra nem jelenti a mai számítástechnika fejlődésének leállítását, a világ elő fogja venni az iparilag érett, a klasszikus félvezető szakmából eredeztetett megoldásokat. Azaz, azt tartom valószínűnek, hogy a mai digitális áramkörökben rejlő tartalékokat fogja a tömegelektronika kihasználni, illetve remélem, hogy a fő gondot okozó, a chipen belüli kommunikációt jelentő, sokemeletes, nehezen hűthető elektromos vezetékeket lehet más elvű megoldással, például optikai adatátvitellel kiváltani.

Számomra Moore „törvénye” annyira szimpatikus, hogy az észlelő tiszteletére folytatnám az érvényességének ellenőrzését azokban az időkben is, amikor már más elvű gépeink lesznek. Akkor is meg lehet adni azt a tranzisztor-számot (ún. helyettesítő áramkör), amellyel a majdani, például spintronikai vagy bioszámítógépünk produkálta eredmény kiszámítható lenne. Szívesen hinném, hogy ilyen módon az *általánosított* Moore-törvény érvényessége továbbra is fennmarad. A törvény érvényvesztése ugyanis a vitális iparág lelassulását jelentené. Hiszen a túlnépesedett emberiség földi léte

Év	2001	2005	2007	2010	2016
Félmodul (nm)	150	100	80	55	-
	130	80	65	45	22
Fedés pontosság	50	35	25	20	15
	46	28	23	18	9
Toxid egyenérték	1.6	1-1.5	1	0.8	0.5
	1.4	1.0	0.8	0.6	0.4

1. táblázat

attól függ, hogy az energiaszükséglet minimalizálása mellett át tud-e állni a zárt folyamatokba kapcsolt komplex termelés-fogyasztási rendszerre,<sup>1</sup> azaz a hulladékmentes társadalmi létre – ennek létrejötte, a kapcsolódó logisztikai feladat ugyanis óriási számítástechnikai kapacitást igényel. De ugyanez igaz arra, hogy a meteorológia kézbentartása hasonló komplexitású kérdés (valahol régen olvastam, hogy utóbbihoz mintegy  $10^{24}$  bit/sec adatforgalom kezelésére lenne szükség).

A bonyolultságot tehát, ha az nem fátumként szakadt ránk, az emberiség eddig kezelni tudta.

Az integrált áramkörök fejlődésében szeretném bemutatni a bonyolultság „generációt”.

A 60-70-es években fejlődött ki az a technológia, amely *bottom up* (Feynman) jellegű, rétegenként építkező módon hozza létre az áramkört. Már a kezdeti időkben létrejöttek azok a technológia szimulációs programok, amelyek kiváltották a költséges, anyag- és energiapazarló kísérletekre szánt kereteket. Ezek a programok mára olyan tökéletességet értek el, hogy már olvastunk olyan áramkörti generációváltásról (16 Mbit DRAM-ról<sup>2</sup> a 64 Mbit-esre való áttéréskor), ahol mindent előre lejátszva a számítógépen, a termelés megindításakor már az első napi termék eladható volt (Nippon Electric Co.). A technológia szimulációja csak egy kérdés. A tranzistorok és egyéb elemek működését is szimulálni kell, hogy a méretek optimális volta is kiderüljön. A harmadik szint az áramkör logikai rendszerének ellenőrzése, szimulációja. Mindhárom szintű szimuláció feladata – az ellenőrzésen túl – a termék megbízható-

ságának ellenőrzésére alkalmas vizsgálat elemeinek, rendszerének definiálása.

A megbízhatóság foka ugyanis ezeken a vizsgálaton derül ki: egyre komplexebb vizsgálat kell a nagy megbízhatóság eléréséhez, ennek költségei viszont nagyon is erős hatással vannak az áramkör árára. A legnagyobb megbízhatóságot a katonai, űrkutatási feladatok követelik meg. Gondoljuk végig, hogy például egy mikroprocesszort milyen módon kell *bevizsgálni*. A *teljes* bevizsgálás azt az abszurdumot jelentené, hogy az eszköz későbbi alkalmazása során felvetődő valamennyi esetet végigszámoltatnánk. De ez sem segítene, hiszen csak remélhetnénk, hogy a kapott eredmény meg is felel az igazságnak (mi is az?). A minőségi ellenőrzés tehát csak közelítheti – a költség- és időtényező-meggondolásoknak megfelelően – a lehetetlen *teljeset*. Magas fokú megbízhatóságot jelent az, hogy a rendszer mintegy  $10^{10}$  művelet esetén téveszt egyet. Redundáns szervezéssel javíthatók ezek a számok. Gondoljunk például egy repülőgép komputerére. Mivel a beavatkozó egységek (például a csűrőlap) mozgatása a tizedmásodperc időskálán mozog, egy, akár GHz frekvenciával működő gép akár milliószor is újraszámolhatja a *gyanú*eredményt. Hogy a *gyanú* reális és gyakori, arra egy példát említenék: a reverzibilis hibák felléptét – angolul ezeket *soft error*-nak nevezik. Ilyen hiba akkor lép fel, ha egy gyors, töltött részecske (például alfa részecske) átrepül egy tranzistoron, és az energiája elektronokat szakít ki a szilíciumkristály atomjaiból. Ezek a nemkívánatos elektronok, sajnos, át tudják fordítani a tranzisztort a logikai 0-ból az 1-be, azaz a tranzistor hibás jelet ad a szomszédainak. *Soft*nak azért nevezik ezt a hibát, mert a tranzistor ezek után újra hibátlanul üzemel, és a következő ciklusban aligha csapódik alfa részecske ugyanoda. Gyakori ez az eset? Sajnos, például az olcsó áramkörök (mint a filléres órákban) tokozását műanyaggal vég-

<sup>1</sup> Az emberi társadalmak fennmaradását talán egyedül biztosító termelési-fogyasztási rendszert Dr. Drozdy Győző barátom, akkor fiatal posztdoktor, ma kiváló hírközlési szakember egy KFKI-beli csoportmegbeszélésünk során fogalmazta meg az 1970-es években.

<sup>2</sup> DRAM: Dynamic Random Access Memory, azaz véletlen hozzáférésű memóriááramkör

zik, amelyekben az alfa-aktív tórium szennyezés szinte elkerülhetetlen. De például az űrhajók áramköreinél a kozmikus sugárzás okoz elég gyakran tévesztéseket. A számítható valószínűséggel (de csak valószínűséggel és sosem bizonyossággal...) elérhető megbízhatóságért a kontrollt tehát minden esetben el kell végezni.

Ez a példa azt mutatja, hogy a bonyolultsággal és a megbízhatósággal kapcsolatos fogalmak, és – tetszik-e vagy sem – az életünk ilyen faktorokon múlik. Az elektronika megnyugtató biztonságot szolgáltatva tudja kezelni a bonyolultságot.

Jómagam attól tartok, hogy a jövőbeli, más elvű (például biológiai) gépeknek, az önjavító képességük ellenére is komolyan bizonyítaniuk kell, hogy ilyen téren is felveszik a versenyt mai gépeinkkel. Mindez akkor igaz, ha a gépeinktől a jövőben is elvárjuk annak az elfogadását, hogy mi maradunk dominánsak, azaz azok irányítói.

---

**Kulcsszavak:** „Moore-törvény”, mikroáramkörü technológiák modellezése, méretcsökkentés, méretcsökkentés 2015 utáni helyzete, komplexitás és megbízhatóság, a „klasszikus” mikroelektronika tartalékai.

---

#### IRODALOM

Kish, Laszlo B. (2002): End of Moore's Law: Thermal (Noise) Death of Integration in Micro and Nano Electronics. *Physics Letters A* 305. 144-149.

Csurgay I. Árpád – Wolfgang, Porod – Lent Craig S. (2000): Signal Processing with Near-Neighbor-Coupled Time-Varying Quantum-Dot Arrays. *IEEE Transactions on Circuits and Systems, Part I*. August 2000. 1212-1223.

