

# Berendezésorientált integrált áramkörök

ERDÉLYI JÁNOS  
BME Elektronikai  
Technológia Tanszék

## Bevezetés

A mikroelektronika fejlődésével napjainkban lehetőségessé vált több tízezer elem összeépítése egy nagy bonyolultságú (LSI) integrált áramkörben, azaz integrált rendszerek kialakítása. A félvezetőiparban előállításukra nagy — és részben szabad — gyártási kapacitás alakult ki. A készülégyártóknak lehetőségük nyílt berendezéseik egyes alrendszerit (esetleg az egészet) egyetlen, kívánságaik szerint készített áramkörbe integráltatni. A jövőben az ilyen berendezésorientált áramkörök az összes előállított félvezető eszköz egyre nagyobb hányadát fogják kitenni [1], és az elektronikai kormányprogram alapján hazánk is elsősorban ezek gyártására kíván berendezkedni. Ezért elengedhetetlen, hogy a felhasználók megismerkedjenek az általuk nyújtott lehetőségekkel.

## 1. LSI áramkörök alkalmazása [2]

Az integrált áramkörök megjelenése óta eltelt időben ezek bonyolultsági foka, vagyis az egy tokban elhelyezett elemek száma a Moore-törvényt követve évenként megkétszereződött, miközben a teljes áramkör ára, mérete és teljesítményfelvétele gyakorlatilag nem változott, működési sebessége viszont jelentősen növekedett. Ennek oka, hogy a gyártási technológia lehetővé tette az alkotóelemek (tranzisztorok) méreteinek csökkentését és nagyszámú elem egyidejű, párhuzamos előállítását.

Az LSI áramkörök tehát lehetővé teszik ugyanazon funkció megvalósítását kisebb térfogat és felvett teljesítmény, valamint kevesebb számú alkatrész felhasználása mellett. Ez egyúttal azt is jelenti, hogy csökken a nyomtatott huzalozású lemezek, a tápegység, a doboz, az összeszerelés költsége. Sokat javul a megbízhatóság, mivel a korszerű alkatrészekből épített berendezések legbizonytalanabb pontja az alkatrészek összekötése, LSI alkalmazása esetén pedig döntő többségük az IC belsejében van, védettebb környezetben, és a hagyományos forrasztásnál jóval megbízhatóbb eljárással készül.

A sokezer elemből álló, bonyolult áramkörök teljes megtervezése azonban igen sok időt és költséget emészt fel. A fenti előnyök gazdaságos realizálása így két úton lehetséges: nagy sorozatok gyártásával meg

kell osztani az egyes áramkörökre eső tervezési költség-hányadot, vagy pedig módot kell találni a tervezési munka bizonyos leegyszerűsítésére.

## 2. Univerzális LSI építőelemek [3], [4], [5]

A sorozatnagyság növelésének kézenfekvő módja olyan áramkörök gyártása, melyek sok különböző felhasználói igény kielégítésére alkalmasak. Univerzális struktúrájukba a gyártás utolsó fázisában vagy a felhasználás során történő programozással vihetők be az aktuális feladattól függő egyedi paraméterek.

A digitális áramkörök legegyszerűbb típusa a kombinációs hálózat, melynek minden  $y_k$  kimenete csak az  $x$  bemenetek pillanatnyi értékétől függ. A hálózatot leíró logikai függvények mindig egyértelműen megadhatók diszjunkt kanonikus alakban:

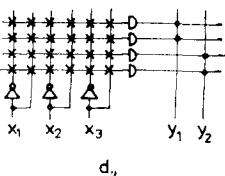
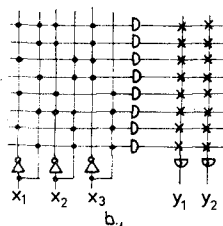
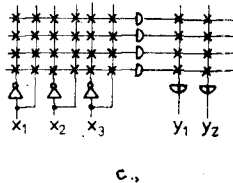
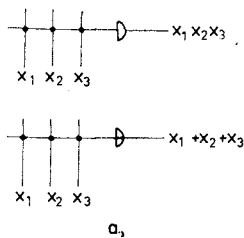
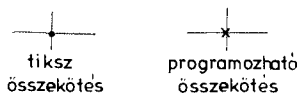
$$y_k = f_k(x_1 \dots x_n) = \sum_{i=0}^{2^n-1} E_i \alpha_i$$

ahol  $\alpha_i$  az ún. kanonikus faktor, értéke 0 vagy 1;  $E_i$  az  $n$  bemenő változóból képzett  $i$ -edik ÉS-term. Például két változó kizáró-VAGY kapcsolatára:

$$x_1 \oplus x_2 = 0 \cdot \bar{x}_1 \bar{x}_2 + 1 \cdot \bar{x}_1 x_2 + 1 \cdot x_1 \bar{x}_2 + 0 \cdot x_1 x_2$$

A logikai függvény ilyen alakjának realizálására alkalmas egy — célszerűen fix — memória (ROM, PROM, EPROM vagy EAROM). A bemenetek a címvonalak, a szókiválasztó előállítja ezek összes ÉS-termjét. A kiválasztott bitbe a megfelelő  $\alpha_i$  értéket kell beírni. A legtöbb esetben sok ÉS-termre (melyek  $\alpha_i$  faktora zérus) nincsen szükség, ezért a PLA és FPLA áramkörökben (Programmable Logic Array, illetve Field Programmable Logic Array) csak korlátozott számú, de tetszőlegesen megválasztható ÉS-termet állítunk elő. Ennek egyszerűbb változata a HAL (Hard Array Logic, felhasználó által programozható „testvére”: PAL-Programmable Array Logic), melyben az  $\alpha_i$  értékek fixek. A háromféle áramkör logikai vázolata az 1. ábrán látható, az aktuális logikai függvény dönti el, melyiket célszerűbb alkalmazni. Sok bemenő változó esetén mindegyik túrhetetlenül nagygyá válik.

Szekvenciális hálózat úgy állítható elő, hogy egy kombinációs hálózat egyes kimeneteit — a szinkron működés érdekében célszerűen elemi tárolókon keresztül — a bemenetre visszacsatoljuk. Egy létező megvalósítás az FPLS (Field Programmable Logic



H842-1

1. ábra. Programozható kombinációs hálózatok. a) alkalmazott jelölés. b) PROM. c) FPLA. d) PAL

Sequencer), mely nem más, mint egy FPLA, minden kimenetén egy D-tárral.

Már hazánkban is jól ismert és elterjedten alkalmazott a másik fajta univerzális elem, a tárolt programú számítógép vagy Neumann-automata. A mikroprocesszor vagy mikroszámítógép hardware-je megfelelő software segítségével tetszőleges feladatra beprogramozható, a program egyszerűen változtatható. Működése viszont, mely elemi műveletek soros elvégzésén alapul, meglehetősen lassú.

A teljesség kedvéért meg kell említenünk — mint a jövő nagy ígérését — a sejtautomatát [6], mely egymással összekapcsolt, egyforma felépítésű szekvenciális hálózatok halma. Nagymértékben párhuzamos működésével alkalmas lehet az emberi agyműködés utánzására. Csak igen nagy méretekben egyszerű alkalmazása, és jelenleg sem gazdaságos előállítása, sem programozása nem megoldott.

Analog áramkörök között LSI bonyolultságú univerzális elemet nem találunk, terjedőben van azonban az a megoldás, hogy a bemeneten A/D, a kimeneten D/A konverziót végezve, a jelfeldolgozás digitális eszközökkel történik. A tiszta analog áramkörnél ugyan ez sokkal lassúbb és bonyolultabb, de paraméterei stabilak, könnyen változtathatók, és nemlineáris funkciók is egyszerűen beépíthetők.

### 3. Berendezésorientált áramkörök típusai [1], [7]

Az előző pontban felsorolt megoldások közös hibája, hogy struktúrájuk kötött és erősen redundáns. Sok területen gazdaságosan használhatók, de sehol sem nyújtják a műszaki szempontból legjobb és legegyszerűbb megoldást. Ideális esetben az integrált áramkör teljes mértékben a felhasználó igényei szerint készülő (full-custom áramkör), így minden részében az adott feladatra optimalizált. Tervezése és gyártása

a hagyományos ún. katalógus-áramkörökével azonos, alkalmazása tehát nagy sorozat esetén gazdaságos.

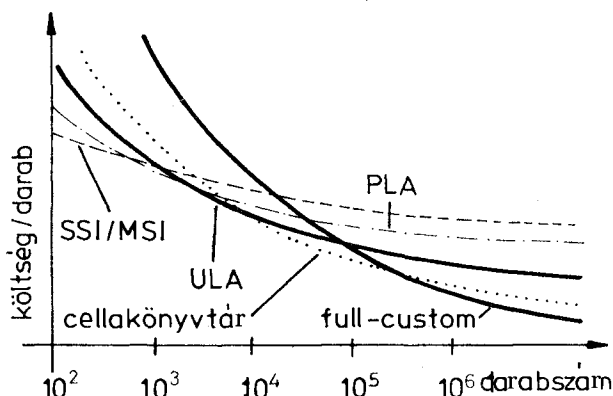
A fél-felhasználói (semi-custom) áramkörök esetében a cél a tervezési idő és költség, valamint a gyártási átfutási idő csökkentése — bizonyos kompromisszumok árán. Mind analog, mind digitális áramkörökben előfordulnak általánosan használt funkcionális egységek (műveleti erősítő, szorzó, PLL, illetve multiplexer, számláló, regiszter stb.). Cella-könyvtáros tervezés esetén (library custom) előre elkészítik ezek maszkterveit univerzálisan felhasználható kialakításban.

További egyszerűsítési lehetőség, ha előre kialakítanak részegységeket a chipen, a felhasználó csak ezek összekötését szabhatja meg, az ezt megvalósító utolsó egy vagy két fémezési réteget kell tehát csak megtervezni, és a gyártás nagy része is előre elvégezhető. Az előregyártott részegységek master-slice áramkörök estén MSI szintű blokkok, gate array esetén logikai kapuk, ULA (Uncommitted Logic Array) és analog array esetén pedig tranzisztorok és ellenállások. Mivel nem eléggé flexibilis, tiszta master-slice elég ritka, gyakori viszont néhány bonyolultabb, dedikált funkcionális egység elhelyezése array típusú áramkörben.

A 2. ábrán látható, hogy egy berendezés előállítása esetén hogyan alakul a sorozatnagyság függvényében az egyes megoldások gazdaságossága. A szám adatok tájékoztató jellegűek, erősen függenek a mindenkori tervezési módszerektől. Az azonban nyilvánvaló, hogy Magyarországon jelenleg elsősorban az array típusú áramkörök alkalmazása indokolt.

### 4. Array típusú áramkörök [8], [9]

Jelenleg a berendezésorientált áramköröknek ez a változata a legelterjedtebb. A velük történő tervezés egyszerű és gyors, megkezdésétől számítva 2–3 hónapon belül a kész áramkör rendelkezésre áll. Alkalmazásuk kb. ezer darabos sorozat esetén már gazdaságos. Igen bő belőlük a választék mind gyártástechnológia, mind bonyolultság terén. Az 1. táblázat összefoglalja az elterjedtebb digitális technológiák fő jellemzőit.



H842-2

2. ábra. Adott funkció megvalósításának relatív költsége különböző áramkörök felhasználása mellett

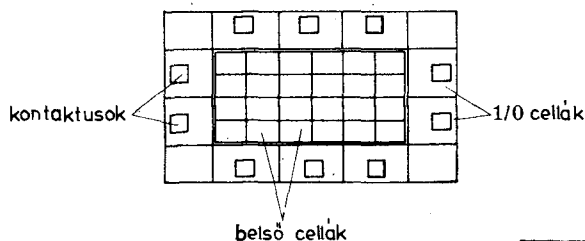
1. táblázat  
Gate array technológiák

Technológia	Kapasztán	Kapukésleltetés (nsec)	Megjegyzés
ECL	2000	1	$P_d = 1-7 \text{ W} !$
LS TTL	2000	1-5	
CML	1500	5-10	
STL és ISL	1000	5-10	
Si-gate CMOS	4000	5-10	$P_d < 0,1 \text{ W}$
I <sup>2</sup> L	2000	10-20	
Fém-gate CMOS	2000	20-30	$P_d < 0,1 \text{ W}$
NMOS	2000	20-30	

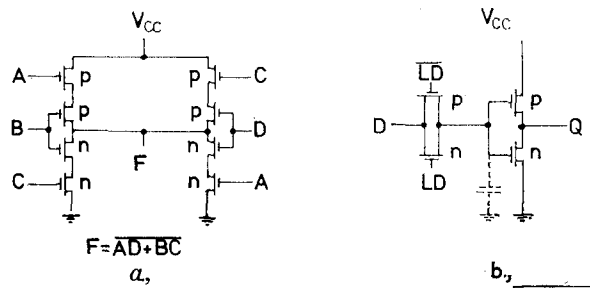
Alapvetően minden digitális array a 3. ábrán látható felépítésű. Az IC kerületén helyezkedik el a néhány száz darab csatlakozási felület, körülöttük az I/O cellák, melyek biztosítják a külső áramkörök meghajtását, bemenetekenél a belső cellák védelmét és mindkét irányban az esetleges logikai szintkonverziót.

A legtöbb áramkör TTL kompatibilis. Az array belsejében az egyforma felépítésű belső cellák szabályos mátrixa helyezkedik el. Ezek mindegyike néhány alkaput vagy a kialakításukhoz szükséges elemeket tartalmaz, valamint az összekötések megkönnyítésére a vezeték keresztjeződését lehetővé tevő bűjtásokat (viákat).

Hogyan történjen az alkalmazott technológia kiválasztása? Egyes esetekben ezt a követelmények egyértelműen meghatározzák (pl. nagy sebesség esetén ECL). Sokszor fennáll azonban választási lehetőség. Olyan típus használata célszerű, mely a lehető leg sokoldalúbban használható, tervezése egyszerű, az alkalmazott technológia a felhasználónak ismerős és korábbi gyakorlatához illeszkedik. Célszerűen ez a technológia korszerű, perspektivikus, de már jól kipróbált és elterjedt legyen, amit a gyártó cégek száma alapján jól meg lehet becsülni. A lehetséges hazai alkalmazásokat felmérve, mivel nincsenek nagy sebességi követelmények, a CMOS áramkörök látszanak a legkedvezőbbnek.



3. ábra. Gate array áramkör belső felépítése



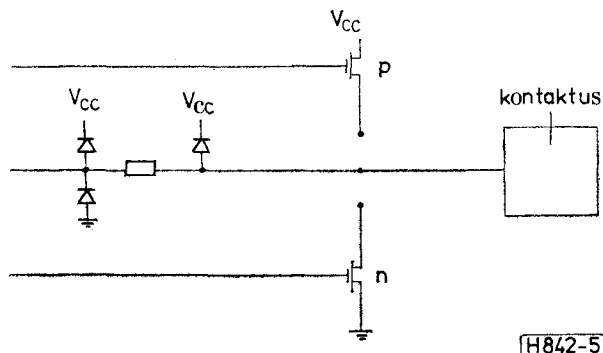
4. ábra. Példák CMOS logikai elemekre. a) komplex ES-VAGY-NEM kapu. b) dinamikus tároló egy bitje

5. CMOS ULA áramkörök [10, [11]

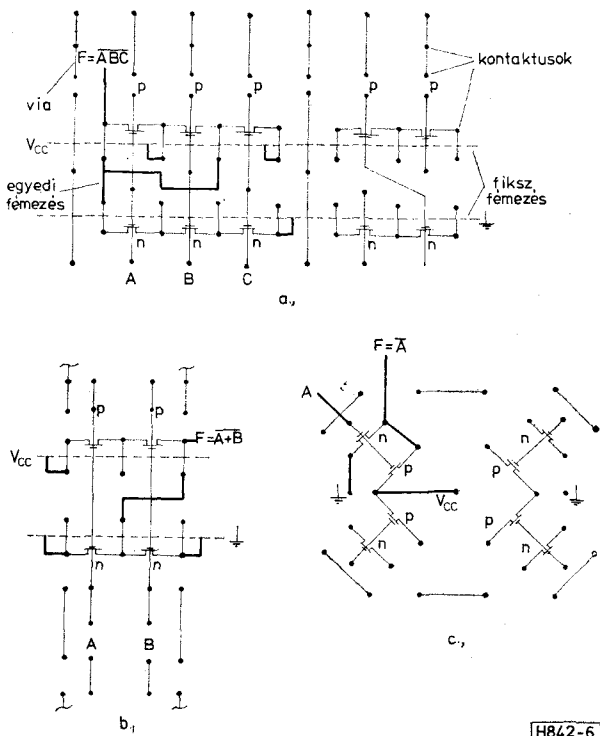
A MOS logikai áramköröknek sok jelentős előnyük van a bipolárisal szemben. NAND és NOR kapu egyaránt jól megvalósítható. A MOS tranzisztorok felépítése szimmetrikus, gyakorlatilag analóg kapcsolóként működnek. Ezáltal lehetőség nyílik komplex kapuk és transzfer kapuk alkalmazására. A bemeneti gate-kapacitás dinamikus tárolóelemként használható. Minderre két példát mutat a 4. ábra. A felsorolt tulajdonságok alapján nagy elemszám-megtakarítás érhető el, és az áramkör layoutja is egyszerűsödik. Ugyanezen a téren az NMOS technológia valamivel még kedvezőbb, a CMOS áramkörök rendkívül alacsony teljesítményfelvétele és az a tény, hogy analóg feladatokra is alkalmazhatók, bőven kompenzálja a hátrányt.

A CMOS ULA áramkörökben az I/O cella általában az 5. ábra szerinti felépítésű. Az ellenállás-dióda komplexum a belső cellákat védi a statikus feltöltés okozta átütés ellen, ha a kivezetést bemenetként (vagy közös I/O vonalként) használjuk. A kimenőfokozatot alkotó nagyáramú (a belsőknél jóval nagyobb méretű) tranzisztorpár megfelelő bekötésével nyitott-draines, ellenütemű, vagy háromállapotú kimenet kialakítható.

A belső cellák elrendezésére a 6. ábrán láthatunk három példát. A legtöbb cég az a) variációt, egy amerikai tervezőmérnök által szabadalmaztatott struktúrát alkalmazza, és sokban hasonlít ehhez a b) jelű változat is. Figyelmet érdemel a c) jelű, alapvetően eltérő, és meglehetősen furcsa elrendezés,



5. ábra. CMOS ULA I/O cellája



6. ábra. CMOS ULA belső cellájának megvalósítása  
a) AMI. b) Plessey. c) Racal

mely a gyártó szerint jelentősen növeli az áramkörök „behuzalozásának” határfokát. Mindhárom cellában bemutatjuk egy-egy logikai kapu kialakítását.

### 6. Tervezési kérdések [12]

A berendezésorientált áramkörök tervezését a specifikáció megadása után általában a gyártóval el lehet végezteni. Azonban, ha a megrendelőnek van lehetősége, célszerű, hogy a terveket házon belül elkészítse, mivel pontosabban tudja, milyen célú és paraméterű áramkörre van szükség, milyen kompromisszumok engedhetők meg. Ha menetközben módosításokra kerül sor, azok gyorsabban és olcsóbban végrehajthatók. Cserébe természetesen a tervezéshez szükséges anyagi és szellemi erőforrásokat biztosítani kell.

Igen nyomós érv az ULA mellett, hogy az áramkörök megtervezése kevés segédeszközt és technológiai ismeretet igényel. A feladat sokban hasonlít a nyomtatott huzalozás tervezéséhez: az elemek csatlakozási pontjai, a kontaktusablakok egy raszterhálón helyezkednek el, és szintén ezen a hálón futó vezetékkel összekötendők. Az áramkört megfelelően particionálva egy néhány száz kaput tartalmazó ULA összehuzalozása mindenféle gépi támogatás nélkül is jó határfokkal elvégezhető.

Figyelembe kell venni azonban néhány lényeges sajátosságot. A kivezetések száma korlátozott, és a tokozási költségek miatt számukat célszerű minimalizálni egyébként is, még az áramkör kismértékű bonyolításának árán is. Az összekötések sok helyet

foglalnak el, a kapuk 70–90%-a használható ki, és nem biztos, hogy a minimális számú aktív kaput tartalmazó megoldás a legjobb. A terjedési idő a huzalozás elrendezésétől igen erősen függ, a bujtatások átmeneti ellenállása jelentős. A dinamikus paramétereket utólag mindig ellenőrizni kell, a vezeték késleltetését beszámítva. Fel kell készülni, hogy az elemszám növekedésével a kézi tervezés áttekinthetetlenül válik, lassú lesz és sok hibával jár. A számítógépes segédeszközöket elsősorban a dinamikus paraméterek szimulálására és a kézzel tervezett layout kapcsolási rajzzá történő visszafejtésére érdemes bevetni. Maga a gépi tervezés egyelőre igen drága, és elég unintelligens.

### 7. Tesztelés [13]

Az elkészült áramkörök ellenőrzése a gyártó feladata, a felhasználónak kell viszont a tesztet kidolgoznia, amivel az IC jósága egyértelműen és gyorsan eldönthető. Mivel a gyártás minden lépése jóval 100% alatti kihozatalú, a többször is szükséges ellenőrzés és válogatás LSI esetén a teljes költség jelentékeny hányadát felemészti, de még sokkal rosszabbul járunk, ha a hibás elemet egy nagyobb rendszerbe beépítjük, és abban kell később megkeresni.

Már a tervezés során törekedni kell az egyszerű tesztelhetőségre. Ez nem egyszerű feladat a sok belső, hozzáférhetetlen csomópont miatt. Általános szabály, hogy csak szinkron működésű szekvenciális hálózatot szabad tervezni. Egyes esetekben megéri inkább szaporítani a kivezetések számát, hogy néhány kritikus pont ellenőrizhető legyen. Több áramkör külön shift-regisztereket tartalmaz, melyekbe néhány belső ponton levő jel párhuzamosan beírható éstesztelési célra sorosan kiléptethető [14].

### Összefoglalás

A közeljövőben az elektronikában a berendezésorientált áramkörök alkalmazása súlyponti kérdés lesz. Ennek ellenére a potenciális felhasználók tájékozottsága elég alacsony szintű. Az egyik ok, hogy a témakörben nincs hozzáférhető magyar nyelvű összefoglaló munka, az információkat külföldi folyóiratokból kell apránként összeszedni. A hiány pótlására természetesen ez a cikk messze nem elegendő; célja a figyelem felkeltése.

### I R O D A L O M

- [1] Status 1981. A Report on the Integrated Circuit Industry. Integrated Circuit Engineering Corporation, szerk. W. Strauss.
- [2] C. Mead, L. Conway: Introduction to VLSI Systems. Reading, Addison – Wesley, 1980.
- [3] W. Twaddell: Uncommitted IC Logic. EDN 1980. 04. 05. 89–98. oldal.
- [4] Saufert J.: Mikroprogramozás, mikroprocesszorok. Budapest, KG- Informatik, 1979.
- [5] K. Noach: New Developments in Integrated Fuse Logic. Electronic Components and Applications 1982. 02. 111–124. oldal.

- [6] Sejtautomaták. Cikkgyűjtemény, szerk. Takács V. Budapest, Gondolat, 1978.
- [7] *B. Donnelly*: Single Chip Microcomputers and Customised LSI. Electronics Industry 1982. 03. 19–29. oldal.
- [8] *J. Posa*: Gate Arrays. Electronics 1980. 09. 25. 145–158. oldal.
- [9] *R. Lipp*: Understanding Gate Arrays Ensures Wise Chip Selection. EDN 1980. 09. 30. 99–104. oldal.
- [10] Interdesign CMOS Design Manual, 1980.
- [11] Designing with ULA's, Part 1. Electronic Engineering 1982. 03. 53–57. oldal.
- [12] *J. Soukup*: Circuit Layout. Proc. IEEE 1981. 10. 1281–1304. oldal.
- [13] *D. Siewiorek, L. Lai*: Testing of Digital Systems Proc. IEEE 1981. 10. 1321–1333. oldal.
- [14] *F. Tsui*: In-Situ Testability Design – A New Approach for Testing High-Speed LSI/VLSI Logic. Proc. IEEE 1982. 01. 59–64. oldal.