



HÍRADÁSTECHNIKA

A HÍRADÁSTECHNIKAI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET
FOLYÓIRATA

XL. évfolyam

BUDAPEST

1989

8

HÍRADÁSTECHNIKA

A HÍRADÁSTECHNIKAI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET FOLYÓIRATA

XL. évfolyam, 1989. 8. szám

BHG ORION TERTA MŰSZAKI KÖZLEMÉNYEK

XXXV. évfolyam, 1989. 8. szám

MEV REMIX TKI MŰSZAKI TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

VII. évfolyam, 1989. 8. szám

Felelős szerkesztő:
DR. TÓFALVI GYULA

Szerkeszti a szerkesztőbizottság

A szerkesztőbizottság elnöke:
HORVÁTH IMRE

Szerkesztők:
ANGYAL LÁSZLÓ
MÉREY IMRÉNÉ
SZÖLLŐSI GYÖRGYNÉ

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

HTE
Rovatvezető: Mérey Imréné
Dr. Flesch István
Gál Ferenc
Dr. Prónay Gábor

BHG
Rovatvezető: Angyal László
Tudományos szerkesztő: dr. Frajka Béla,
Bernhardt Richard, dr. Eisler Péter,
Fazekas László, dr. Gosztony Géza,
dr. Kerpán István, Klug Miklós,
Laczkó Endre, Szaics Ákos

MEV
Rovatvezető: Kászonyi László
Tudományos szerkesztő: dr. Kormány Teréz,
Balogh Albert, Csornai László,
Czermann Mihály, Hidas György,
Huszka Zoltán, dr. Ligeti Róbertné,
dr. Mátrai Géza, dr. Motái György,
Schödl Ervin

ORION
Rovatvezető: dr. Somogyi András
Tudományos szerkesztő: dr. Frigyes István,
Denk Attila, Froemel Károly,
Nóvik Lajos, Szász Gerő

REMIX
Rovatvezető: Rippel Géza
Tudományos szerkesztő: dr. Kormány Teréz,
Balanyi Szilveszter, Bodnár László,
Kovács Gyula, Mészáros Sándor,
Molnár László

TKI
Rovatvezető: dr. Baranyi András
Tudományos szerkesztő: dr. Lajtha György,
dr. Henk Tamás, dr. Kása István,
Megyesi Csaba, dr. Sárkány Tamás,
dr. Simonyi Ernő

TERTA
Rovatvezető: Szalay Tibor
Tudományos szerkesztő: dr. Gordos Géza,
Keller János, Márk Zoltán,
Porpáczy Elemér, Schnürmacher Tamás,
Török László, Veress Péter

Szerkesztőségi ügyekben és kéziratok-
kal kapcsolatban felvilágosítást ad:
Szöllősi Györgyné.
Telefon: 495—098

ROVATOK

Egyesületi élet
Rendszertechnika
Kapcsolástechnika
Vezetékes technika
Fénytávközlés
Vezeték nélküli technika
Adástechnika
Vételtechnika
Mikroelektronika
Alkatrésztechnika
Hálózatelemélet
Elektromágneses problémák

ROVATGAZDÁK ROVATTÁRSÁK

HTE	(H)	BEAG	HTV
TKI	(□)	BME	KONTAKTA
BHG	(#)	BRG	KŐPORC
TERTA	(↔)	EMO	KFKI
ORION	(*)	El. Szöv.	M. Posta
MEV	(↑)	FMV	ML
REMIX	(Δ)	GAMMA	MM
		HTSZ	MFKI
		HAGY	TUNGSRAM

TARTALOM

GYÖRFI LÁSZLÓ - VAJDA ISTVÁN: Nem bináris kódok konstrukciója	225
Szemle	232, 239, 249, 253
BEGAIN KHALID: Semi-Markov folyamatok megbízhatósági alkalmazással	233
Az első szilícium-galliumarzenid monolit integrált áramkör (dr. Mojzes Imre)	240
HOSSZÚ GÁBOR: Módszerek a nagybonyolultságú IC-k kihozatalának becslésére a gyártási eljárás szimulációjával	241
KORMÁNY TERÉZ - ERLAKY GYÖRGY: Beszámoló a VLSI áramkörök anyagainak és technológiájának minősítése Nemzetközi Konferenciáról	250
Tartalmi összefoglalások	255

Nem bináris kódok konstrukciója

GYÖRFI LÁSZLÓ

VAJDA ISTVÁN

BME Híradástechnikai Elektronika Intézet

ÖSSZEFOGLALÁS

Ebben a közleményben a nem-bináris Hamming kódok és a Reed-Solomon kódok konstrukcióját mutatjuk be alkalmazási példákkal.

1. Bevezetés

Mint minden igazán értékes és nagyszerű dolog a világon, így a hibajavító kódok elmélete is, előbb vagy utóbb elmondható egyszerűen is. A továbbiakban megmutatjuk, hogy a Reed-Solomon kódok, mint több hibát javító, nem-bináris és optimális kódok konstrukciója elsajátítható minden különösebb matematikai érdeklődés és előképzettség nélkül. Érdekes módon, ha közvetlenül ezeknek a kódoknak a tanulmányozását tűzzük ki célul, akkor elkerülhetjük azokat a területeket (BCH kód, primitív polinom stb.), melyek jellegzetesen elvesztik még egy újdonságokra fogékony mérnök kedvét is.

Az 1980-as évek végéig a kódelmélet alkalmazási területe igen szűk volt, mivel az átvitel megbízhatóságát vagy a csatorna javításával (adóteljesítmény-, sávszélességnövelés stb.) vagy visszacsatolás kiépítésével (ARQ) növelték. Ez utóbbi eredményezte a hibadetekció (CRC) tömeges alkalmazását. Az 1980-as években viszont egyrészt a technológiai lehetőségek jelentősen bővültek, másrészt a tömegszolgáltatásokban jelentkeztek olyan feladatok, ahol nincs visszacsatolás, tehát a hibadetekció önmagában semmit sem ér, hanem hibajavító kódolásra van szükség. A későbbiekben erre gyakorlati példákat is mutatunk.

Ez a közlemény az [1] tanulmány egy részének a kibővítése. Nem tárgyaljuk a hibajavító kódok elméletének olyan fontos területét, mint a ciklikus kódok, bár a bemutatandó kódok ciklikusak. Nem beszélünk továbbá különböző dekódoló eljárásokról, mivel az igazán hatékonyakat nem tudjuk bonyolult algebrai apparátus bevezetése nélkül bemutatni. Ha valakit a téma ezek után mélyebben érdekel, akkor annak ajánljuk a [2]-[10] könyveket.

A [17] és [18] cikkek a hibajavító kódelmélet alkalmazásának és a várható technológiai fejlődést figyelembe vevő alkalmazhatóságának a trendjét elemzik a 80-as és a 90-es évekre vonatkozólag. Különös tekintettel mérlegelik a két legfontosabb irányzatot: a konvolúciós kódokat Viterbi dekódolással illetve a Reed-Solomon kódok hatékony felhasználási területeit.

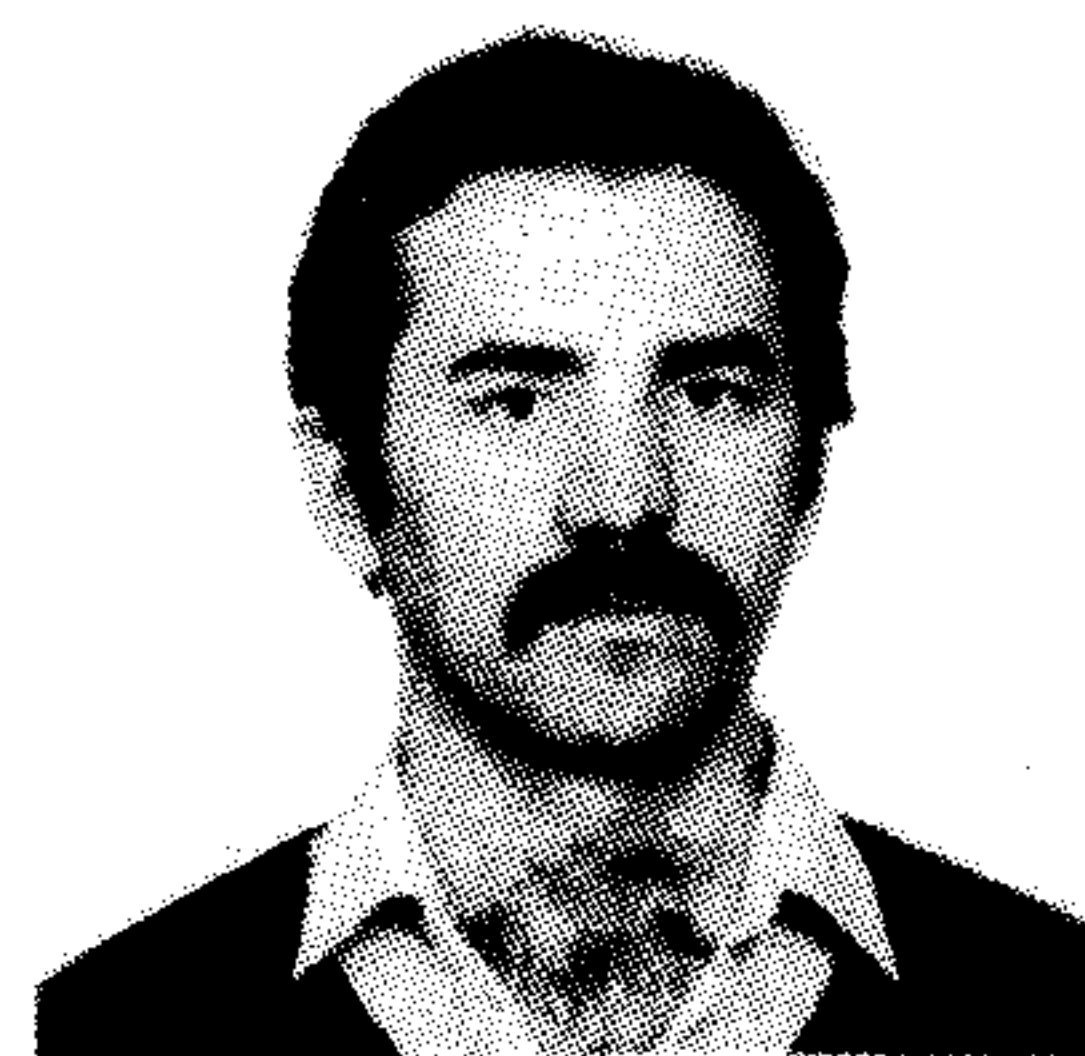
Beérkezett: 1988. IX. 9. (H)



GYÖRFI LÁSZLÓ

1970-ben matematika-fizika szakos tanári oklevelet, 1974-ben egyetemi doktori címet, 1978-ban kandidátusi, 1988-ban tudomány doktora fokozatot szerzett. 1970-től 1975-ig a Távköz-

lési Kutató Intézetben, azóta az MTA Informatikai Tanszéki Kutatócsoportban dolgozik. Fő érdeklődési területe a nemparaméteres becslélmélet és a többszörös hozzáférésű csatornák kódolása.



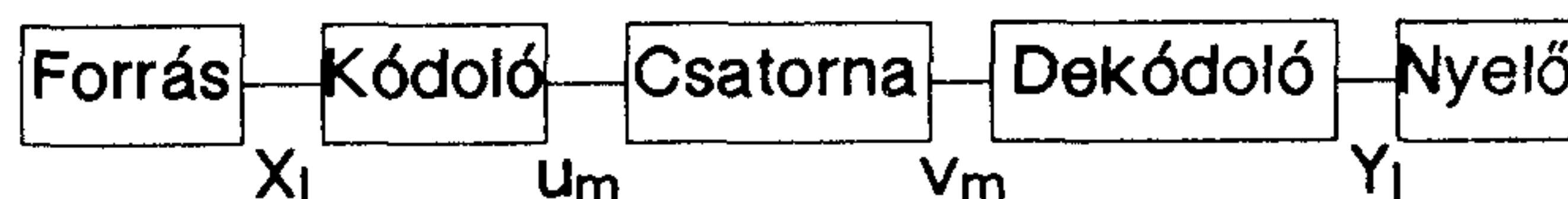
VAJDA ISTVÁN

1976-ban villamosmérnöki oklevelet, 1978-ban egyetemi doktori fokozatot 1984-ben kandidátusi oklevelet szerzett. 1978-tól az MTA Informatikai és Elektro-

nikai Tanszéki Kutatócsoportban dolgozik. Fő érdeklődési területe a hibakorlátozó kódolás, a kódosztáros többszörös hozzáférésű csatornák kódolása valamint az algoritmikus adatvédelem.

2. Kódolási alapfogalmak

A hibajavító kódolás alapvető módszereit a következő egyszerű hírközlési struktúra kapcsán vizsgáljuk



X_i és Y_i sorozat elemei egy F halmazból veszik értékeiket, mely halmazt forrás-ABC-nek nevezük. A kódoló az X_i sorozat egy szegmensét, azaz egy vektort, képez le az u_m sorozat egy szegmensébe, azaz egy vektorba. Az u_m értékelt egy véges G halmazból veszi, melyet kód-ABC-nek vagy csatorna bemeneti ABC-nek fogunk hívni. A csatorna kimenete v_m szintén G -ből veszi az értékeit. Azt mondjuk, hogy az m -edik időpontban a csatorna hibázott, ha $u_m \neq v_m$.

Egy

$$u = (u_1, \dots, u_n)$$

bemeneti és

$$v = (v_1, \dots, v_n)$$

kimeneti sorozat esetén jelölje $d(u, v)$ azon i pozíciók számát, ahol $u_i \neq v_i$.

$d(u, v)$ az u, v sorozatok Hamming távolsága, és azt mondjuk, hogy az u sorozat küldésekor és a sorozat vételekor a hibák száma $t=d(u, v)$. Ezt az esetet nevezzük egyszerű hibázásnak, amikor a hiba helye és értéke egyaránt ismeretlen. $d(u, v)$ valóban távolság, hiszen

$$\begin{aligned} d(u, v) &\geq 0, \\ d(u, v) &= d(v, u) \end{aligned}$$

és igaz a háromszög egyenlőtlenség:

$$d(u, v) \leq d(u, w) + d(w, v).$$

Kód (blokk-kód) alatt a G^n halmaz egy C részhalmazát értjük, azaz C minden eleme egy n hosszú vektor, melynek koordinátái G -beliek. C elemelt kódszavaknak nevezzük. A kódolás egy invertálható függvény, mely k hosszú F -beli sorozatot — üzenetet — képez le egy kódszóba, formalizálva

$$f: F^k \rightarrow C$$

és minden különböző x, x' -re $f(x), f(x')$ is különböző.

Dekódolás alatt két függvény egymásutánját értjük. Az egyik a csatorna kimenetének n hosszú szegmensét képezi le C -be, azaz igyekszik eltalálni a küldött kódszót, a másik pedig az f függvény inverze, tehát

$$g: G^n \rightarrow C, \quad f^{-1}: C \rightarrow F^k$$

Mivel f egyértelműen meghatározza f^{-1} -t, ezért dekódolás alatt a későbbiekben csak a g függvényt értjük. A g dekódoló függvényként az algebrai hibajavító kódok elméletében speciális függvényt választunk, nevezetesen a v vektorhoz megkeressük azt a $c' \in C$ kódszót, mely Hamming távolság szerint hozzá a legközelebb van, vagy ha több ilyen van, akkor az egyiket, tehát teljesül hogy ha $c' = g(v)$, akkor $d(c', v) = \min_{c \in C} d(c, v)$.

A dekódolás feladata ezek után arra a messze nem triviális feladatra szűkül, hogy egy v vett szóhoz hogyan keressük meg a hozzá legközelebbi c' kódszót anélkül, hogy minden $d(c, v)$ -t kiszámítsunk.

A későbbiekben kiderül, hogy a kódoló f függvény leglényegesebb tulajdonsága a C kód paramétere, amit kódtávolságnak nevezünk, és $d_{\min}$ -nel jelölünk:

$$d_{\min} = \min_{c \neq c', c, c' \in C} d(c, c').$$

Hibajelzés a hibakorlátozó kódolás azon feladata, amikor a vevőben csupán detektálni akarjuk a hibázás tényét. Nyilván egy v vett szó esetén akkor tudjuk a hibázást észrevenni, ha v nem kódszó, amire garancia, hogy ha c küldött kódszó esetén

$$d_{\min} > d(v, c)$$

azaz a hibák számára

$$d_{\min} > t,$$

tehát egy $d_{\min}$ kódtávolságú kód minden legfeljebb $d_{\min} - 1$ számú hibát jelezni tud.

Hibajavítás esetén azt kérdezzük, hogy ha t a hibák száma, akkor mi biztosítja, hogy a v vett szóból a c kódszó egyértelműen visszaállítható legyen, azaz minden más c' kódszóra.

$$d(v, c') > d(v, c) \quad (2.1)$$

legyen. Mivel a Hamming távolság valóban távolság, ezért teljesíti a háromszögegyenlőtlenséget, azaz

$$d(v, c') \geq d(c, c') - d(v, c) \quad (2.2)$$

tehát (2.1) úgy biztosítható, hogy

$$d(c, c') - d(v, c) > d(v, c),$$

azaz minden $c' \neq c$ -re

$$d(c, c') > 2d(v, c)$$

vagyis

$$d_{\min}/2 > d(v, c).$$

Összefoglalva: egyszerű hibázás esetén minden legfeljebb $\lfloor (d_{\min} - 1)/2 \rfloor$ számú hiba javítható.

Gyakran fordul elő olyan hibázás, amikor tudjuk, hogy egy pozícióban hiba lehet, vagyis tudjuk, hogy más pozícióban nincs hiba, tehát a hiba helyét ismerjük, csak a hiba értékét nem. Az ilyen hibát törléses hibának nevezzük. Egyszerűen belátható, hogy minden $d_{\min} - 1$ törléses hiba javítható, ugyanis a legrosszabb esetben sem fordulhat elő, hogy két c, c' kódszó ugyanazon, de legfeljebb $d_{\min} - 1$ pozíciójának törlésével ugyanazt a szót kapnánk.

Singleton korlát: Egy M kódszóból álló, n hosszú és $d_{\min}$ kódtávolságú kódra

$$M \leq q^{n - d_{\min} + 1},$$

ahol q a kód-ABC elemszáma. Ezt bizonyítandó legyen k egy természetes szám, melyre

$$q^{k-1} < M \leq q^k.$$

Mivel a $k - 1$ hosszú különböző sorozatok száma q^{k-1} , ezért $q^{k-1} < M$ miatt létezik két kódszó c és c' , melyek az első $k - 1$ koordinátában megegyeznek. Ezekre

$$d(c, c') \leq n - k + 1,$$

következésképp $d_{\min} \leq n - k + 1$, azaz

$$M \leq q^k \leq q^{n - d_{\min} + 1}$$

Azon kódot, melyre a Singleton korlátban = áll MDS (maximum distance separable) kódnak nevezzük. Ha a kódolandó üzenetek k hosszú vektorok, ahol a koordináták q lehetséges értéket vesz-

nek fel, akkor $M = q^k$, tehát a Singleton korlát $d_{\min} \leq n - k + 1$.

3. Bináris lineáris kódok, bináris Hamming kód

A továbbiakban a kódjainkban szereplő kódszavakat alkotó szimbólumok legyenek 0 vagy 1 értékűek, az összeadás és a szorzás pedig a bináris összeadás és a bináris szorzás, vagyis a mod 2 összeadás és szorzás.

Egy bináris C kódot lineárisnak nevezünk, ha $0 \in C$ és a C halmaz lineáris tér, azaz ha minden $c, c' \in C$ -re $c + c' \in C$.

A lineáris kódok jelentőségét az adja, hogy az egyes üzenetekhez tartozó kódszavak viszonylag egyszerűen generálhatók, és ugyancsak egyszerű módszer található a vett kódszavak hibamentességének vizsgálatára, vagyis a hibadetektálásra, és a hibák javítása sem bonyolult. A következőkben e módszereket fogjuk bemutatni.

Jelentsen C továbbra is egy lineáris kódot, a kódszóhossz legyen n . (Ekkor C az n hosszúságú bináris elemeket tartalmazó sorozatok terének egy altere; "kódszó" helyett gyakran "vektor"-t fogunk mondani.)

A valós vektortérben megszokott lineáris függetlenség és bázis fogalmak itt is teljesen hasonlóan értelmezhetők, vagyis a $g_1, g_2, \dots, g_j \in C$ vektorok lineárisan függetlenek, ha $\alpha_i \in \{0, 1\}$ mellett

$$\sum_{i=1}^j \alpha_i g_i = 0$$

csak úgy állhat elő, ha $\alpha_i = 0$ minden $i = 1, 2, \dots, j$ -re. A $g_1, g_2, \dots, g_k \in C$ vektorok a C lineáris tér egy bázisát alkotják, ha lineárisan függetlenek, továbbá igaz az, hogy minden $c \in C$ vektor előállítható

$$c = \sum_{i=1}^k u_i g_i \quad (3.1)$$

alakban, ahol $u_i \in \{0, 1\}$ minden $i = 1, 2, \dots, k$ -ra.

A (3.1) egyenlőség fölírható mátrixalakban:

$$c = uG, \quad (3.2)$$

ahol $u = (u_1, u_2, \dots, u_k)$, G pedig a bázisvektorokból mint sorvektorokból álló mátrix. A (3.2.) egyenlettel tehát egy k dimenziós és egy n -dimenziós vektort rendelünk össze lineáris transzformációval mégpedig kölcsönösen egyértelmű módon. Azt fogjuk mondani, hogy az u üzenethez a c kódszó tartozik.

A k -dimenziós u vektorokkal 2^k -féle üzenetet fejezhetünk ki, s ezeket kódolhatjuk a C kóddal. C elemei azonban n -dimenziós vektorok, és n nem kisebb k -nál, hiszen k az n -dimenziós vektorok C alterének dimenziószáma. A $k = n$ esetnek nincs most jelentősége, ha k kisebb, mint n , akkor viszont világos, hogy nem minden vektort kell felhasználni kódszónak, vagyis kódunk redundáns lesz, s ezt a redundanciát tudjuk hibajavításra felhasználni.

Az üzenetekhez a kódszavakat a G mátrix segítségével rendeljük hozzá, vagyis a G mátrix jelöli ki az n -dimenziós vektortérnek a kódot jelentő C alterét, a kódot G "generálja". A fenti tulajdonságú G mátrixot a C kód *generátormátrixának* nevezzük.

Vegyük észre, hogy ha nem törődünk azzal, hogy melyik kódszó melyik üzenethez tartozik, csak a kódszavak halmazát tekintjük, akkor G nem egyértelmű, vagyis több mátrix is generálhatja ugyanazt a C kódszóhalmazt. Egy (n, k) paraméterű lineáris kód szisztematikus, ha minden kódszavára igaz, hogy annak utolsó $n-k$ szimbólumát elhagyva éppen a neki megfelelő k hosszúságú üzenetet kapjuk.

A 2. pontban már leszögeztük, hogy dekódolás alatt csak az esetleges hibák javítását értjük, aminek eredményeképp egy kódszót kapunk. Az üzenetvektor visszanyeréséhez még el kell ugyan végezni a kódolás inverz műveletét, ez azonban rendszerint triviális lépés, szisztematikus kód esetén például csak el kell hagyni a kódszó egy részét.

Ilyenkor (tehát szisztematikus kód esetén) a generátormátrix is egyértelmű, mégpedig

$$G = (I_k, B) \quad (3.3)$$

alakú, ahol I_k a k -szor k -as egységmátrix, B pedig k -szor $(n-k)$ méretű mátrix. Az u üzenethez tartozó c kódszó szerkezete tehát:

$$c = (u_1, u_2, \dots, u_k, c_{k+1}, c_{k+2}, \dots, c_n).$$

A c első k koordinátájából álló szegmensét üzenetszegmensnek, az utolsó $n-k$ koordinátájából állót paritászegmensnek nevezzük.

A következőkben olyan észrevételeket fogunk tenni, amelyek elvezetnek az ígért egyszerű hibadetektáláshoz illetve hibajavításhoz.

Ha egy $n-k$ sorból és n oszlopból álló H mátrixra

$$Hc^T = 0$$

akkor és csak akkor, ha $c \in C$, akkor H -t a C kód paritás ellenőrző mátrixának nevezzük. (Röviden paritásmátrixot fogunk mondani.)

H segítségével, tehát meg tudjuk állapítani, hogy egy vett szó valóban a kódszó-e.

3.1. Tétel: Ha G és H ugyanazon C lineáris kód generátormátrixa illetve paritásmátrixa, akkor

$$HG^T = 0.$$

Bizonyítás: Jelölje Q^k a k hosszú bináris sorozatok halmazát. Ekkor minden $u \in Q^k$ -hoz létezik $c \in C$, amire $c = uG$, és $c \in C$ miatt

$$Hc^T = 0,$$

azaz

$$Hc^T = H(uG)^T = HG^T u^T = 0.$$

Az utolsó egyenlőség pedig csak úgy állhat fenn minden $u \in Q^k$ -ra, ha $HG^T = 0$, amint állítottuk.

Nézzük milyen alakú lehet H , ha kódunk szisztematikus. Ekkor tudjuk, hogy

$$G = (I_k, B)$$

alakú, keressük H -t

$$H = (A, I_{n-k})$$

alakban. A feltétel tehát:

$$HG^T = (A, I_{n-k})(I_k, B)^T = A + B^T = 0$$

Azaz

$$A = -B^T$$

kell teljesüljön (Bináris esetben $-B^T = B^T$.)

Egy c vektor súlya a koordinátái között levő nem nulla elemek száma, jelölése $w(c)$. Egy C kód minimális súlyán a

$$w_{\min} = \min_{c \in C, c \neq 0} w(c)$$

számot értjük.

3.2. Tétel: Egy C lineáris kódra

$$d_{\min} = w_{\min}$$

Bizonyítás:

$$d_{\min} = \min_{c \neq c'} d(c, c') = \min_{c \neq c'} w(c - c') = \min_{c \neq 0} w(c) = w_{\min}$$

ahol az utolsó előtti egyenlőség felírásakor a C kód linearitását használtuk ki, ebből következik ugyanis, hogy $c - c'$ is kódszó, továbbá, az is, hogy minden kódszó előáll ilyen különbség alakjában. (Utóbbi ahhoz szükséges, hogy a minimum képzésekor valóban minden $c \in C$ -t figyelembe vehessük.)

A 3.2. Tétel jelentősége abban áll, hogy segítségével a $d_{\min}$ definíció alapján történő kiszámításához szükséges $|C|(|C| - 1)/2$ műveletet a $w_{\min}$ kiszámításához szükséges $|C| - 1$ műveletre redukálhatjuk. ($|C|$ -vel a C elemszámát jelöljük.)

A következőkben azt mutatjuk meg, hogyan használható a H mátrix a dekódoláskor.

Legyen az adott kódszó c , a vett szó v . Az $e = v - c$ vektort hibavektornak nevezzük. Vegyük észre, hogy

$$Hv^T = H(c + e)^T = Hc^T + He^T = He^T$$

vagyis a Hc^T értéke csak a hibavektortól függ, az adott kódszótól nem. Az $s = Hv^T$ mennyiséget szindrómának nevezzük.

A fentiek alapján a dekódolás a következőképpen mehet végbe: a vett v szóból kiszámítjuk az $s = Hv^T = He^T$ szindrómát, ennek alapján megbecsüljük a hibavektort, s ezt v -ből levonva megkapjuk a kódszóra vonatkozó becslésünket.

A dekódolás azon lépését, amikor s -ből megbecsüljük e -t legegyszerűbben az ún. táblázatos dekódolás esetén láthatjuk át. Ez azt jelenti, hogy a dekódernek rendelkezésére áll egy olyan táblázat, melynek elemei hibavektorok, és az azonos szindrómát előidézők (tehát, amikre He^T ugyanaz) rendre ugyanazon sorban helyezkednek el. A sorok első eleme az adott sorban minimális súlyú hibavektorok. A dekóder a szindróma ismeretében kiválasztja az annak megfelelő sort, és úgy dönt, hogy az adott sor első eleme, vagyis a legkisebb súlyú hibavektor fordult elő.

Illusztrációként egy klasszikusnak számító kódot mutatunk be, mely bináris Hamming kód néven ismeretes.

Olyan kódot keresünk, mely egy hibát tud javítani, vagyis ha c -t adjuk, és v -t vesszük, akkor $1 \geq d(c, v)$ esetén biztosan meg tudjuk mondani v ismeretében c -t. Megkívánjuk még kódunktól, hogy lineáris és bináris legyen.

A hibajavítás céljára r bitet kívánunk felhasználni, vagyis az n kódszóhossz és a k üzenethossz különbségét r -nek rögzítjük. Ezen adott r mellett szeretnénk a lehető legnagyobb k -t elérni, hogy minél több üzenetünk lehessen. Legyen a majdani kód paritásmátrixa:

$$H = (a_1^T, a_2^T, \dots, a_n^T)$$

Legfeljebb egy hiba esetén az e hibavektor vagy 0, vagy egységvektor, tehát pontosan egy koordinátája 1-es. Ekkor az s szindróma vagy 0, vagy valamelyik a_i -vel egyenlő. Akkor és csak akkor tudjuk tehát e -t (és így c -t is) egyértelműen megállapítani, ha a_i -k mind különbözők, és egyik sem 0. Mivel H sorainak a száma $n - k = r$, az a_i -k legfeljebb $2^r - 1$ -félék lehetnek, ha egyikük sem 0. Mivel minél nagyobb k -ra, és így a rögzített r révén minél nagyobb $k + r = n$ -re törekszünk, mind a $2^r - 1$ lehetőséget használni fogjuk. Ezzel lényegében megadtuk H -t, hiszen megmondtuk, hogy H az összes lehetséges r hosszúságú nem nulla oszlopvektorból álló mátrix. Ez pedig már definiálja a kódszóhalmazt a

$$Hc^T = 0$$

egyenletrendszer összes megoldásvektorának halmazaként. Az így kapott kódot nevezzük Hamming kódnak, mely tehát k hosszú üzenethez n hosszú kódszót rendel, ahol n és k között fennáll az

$$n = 2^{n-k} - 1 \quad (3.4)$$

összegfüggés. Ilyen tulajdonságú számpárok a következők:

$n =$	3	$k =$	1
	7		4
	15		11
	31		26
	63		57
	127		120

Az egyik legismertebb Hamming-kód a (7,4) paraméterű, ezt mutatja be a következő példa.

Példa: A (7,4) paraméterű Hamming-kód paritásmátrixa

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

A generátormátrixa ebből könnyen kiszámítható a már szerepelt $A = -B^T$ összefüggés alapján

$$G = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

A (7,4)-es Hamming kódot egy páratlan paritásúra kiegészítő paritásbittel kapunk egy (8,4) paraméterű, továbbra is egy hibát javító kódot, amelyet a Teletexben használnak ([11]).

A közvetlen műholdas műsorszórás (DBS) digitalizált hangját is hibajavító kóddal védik. Így a D2-MAC/PACKET szabványa ([12]) szerint az egyik változatban a 14 bites hanghiba felső 11 bitjét egy (16,11) paraméterű kóddal kódolják, ami a (15,11) paraméterű Hamming kód kiegészítése egy páratlan paritásbittel. A másik változatban a 10 bites hangminta felső 6 bitjét kódolják egy (11,6)-es kóddal. Megjegyezzük még, hogy a csomagolt kódolt beszédmintákat egy olyan csomagfejjel látják el, melyet 2 hibát javító (71,57) ill. (94,80) paraméterű BCH kóddal védik, míg a legfontosabb adatokat, az úgynevezett szolgáltatásazonosítást egy három hibát javító (23,12) paraméterű Golay kóddal kódolják. Mind a Golay, mind a BCH kódok tárgyalása újabb algebrai apparátus bevezetését igényelné.

4. Véges test

Hatékony hibajavító kódok konstrukciójához szükséges, hogy a G halmaz struktúrált legyen, mely például úgy lehetséges, hogy műveleteket vezetünk be G -n.

Egy G halmazt testnek nevezünk, ha értelmezve van tetszőleges két elem között két művelet, melyeket összeadásnak illetve szorzásnak nevezünk, "+" illetve "." szimbólumokkal jelöljük, és rendelkezik a következő tulajdonságokkal:

1. G az összeadásra nézve kommutatív csoport, azaz
 - 1.1. Minden $\alpha, \beta \in G$ esetén $\alpha + \beta \in G$, tehát G az összeadásra nézve zárt.
 - 1.2. Minden $\alpha, \beta, \gamma \in G$ esetén $\alpha + (\beta + \gamma) = (\alpha + \beta) + \gamma$ (asszociativitás)
 - 1.3. Létezik egy 0-val jelölt elem G -nek úgy, hogy minden $\alpha \in G$ -re $0 + \alpha = \alpha + 0 = \alpha$. 0-t nullelemnek nevezzük.
 - 1.4. Minden $\alpha \in G$ -hez létezik $\beta \in G$ úgy, hogy $\alpha + \beta = 0$. β -t az α additív inverzének nevezzük és $-\alpha$ -val jelöljük.

- 1.5. Minden $\alpha, \beta \in G$ -re $\alpha + \beta = \beta + \alpha$ (kommutativitás).
2. $G - \{0\}$ a szorzásra nézve kommutatív csoport, azaz
 - 2.1. Minden $\alpha, \beta \in G - \{0\}$ esetén $\alpha \cdot \beta \in G - \{0\}$
 - 2.2. Minden $\alpha, \beta, \gamma \in G - \{0\}$ esetén $(\alpha \cdot \beta) \cdot \gamma = \alpha \cdot (\beta \cdot \gamma)$.
 - 2.3. Létezik egy 1-gyel jelölt elem $G - \{0\}$ -nek úgy, hogy $1 \cdot \alpha = \alpha \cdot 1 = \alpha$. 1-t egységelemnek nevezzük.
 - 2.4. Minden $\alpha \in G - \{0\}$ esetén létezik $\beta \in G - \{0\}$ úgy, hogy $\alpha \cdot \beta = \beta \cdot \alpha = 1$. β -t az α multiplikatív inverzének nevezzük, és α^{-1} -gyel jelöljük.
 - 2.5. Minden $\alpha, \beta \in G - \{0\}$ -ra $\alpha \cdot \beta = \beta \cdot \alpha$.
3. Minden $\alpha, \beta, \gamma \in G$ -re $\alpha \cdot 0 = 0$, α és $\alpha \cdot (\beta + \gamma) = (\alpha \cdot \beta) + (\alpha \cdot \gamma)$ (disztributivitás).

Egyszerű konvenciókkal egy G testben definiálható a kivonás és az osztás a következő módon:

$\alpha - \beta$ alatt az α -nak és a β additív inverzének összegét értjük azaz $\alpha + (-\beta)$ -t.

α / β alatt az α -nak és a β multiplikatív inverzének a szorzatát értjük, azaz $\alpha \cdot \beta^{-1}$ -t, amennyiben $\beta \neq 0$.

Példák testre

1. Valós számok halmaza a valós összeadással és szorzással.
2. Racionális számok halmaza a valós összeadással és szorzással.
3. Komplex számok halmaza a komplex összeadással és szorzással.
4. $\{0,1\}$ a bináris összeadással és szorzással.

Egy q véges elemszámú G testet véges testnek nevezünk és $GF(q)$ -val jelöljük a *Galois field* rövidítéseként.

Sajnos egy $GF(q)$ esetén q nem lehet bármilyen. Ez azért fontos, mert a kód-ABC a későbbiekben $GF(q)$ lesz. Bizonyítás nélkül közöljük, hogy egy $GF(q)$ esetén $q = p^m$ alakú, ahol p prímszám, tehát q vagy prímszám, vagy prímhatalvány.

Lényeges különbség van a prím és a prímhatalvány méretű véges testek aritmetikája között. A testaxiómák ellenőrzésével egyszerűen belátható, hogy a $G = \{0,1,\dots,p-1\}$ halmaz egy p prímszám esetén véges test a modulo p aritmetikával, azaz

$$a + b = a + b \bmod p$$

$$a \cdot b = a \cdot b \bmod p,$$

ahol $+$ illetve $\cdot$ jelöli a valós összeadást illetve szorzást.

Sajnos $q = p^m$ esetben a modulo q aritmetika nem felel meg. Például $q = 2^8$ esetén 2-nek és 128-nak a modulo 256-tal vett szorzata 0, ami sérti a 2.1. számú testaxiómát. Az érdeklődő olvasó a nem prim méretű test aritmetikájával a [3]-[10] könyvekben ismerkedhet meg.

Egy $\alpha \in GF(q)$ primitív elemének nevezzük, ha a $1, \alpha, \alpha^2, \alpha^3, \dots, \alpha^{q-1}$ mind különbözők. Bizonyítás nélkül közöljük, hogy minden $GF(q)$ -ban létezik primitív elem.

Példa:

$GF(q)$, ha $q=7$.

elem ($\neq 0$)

1

hatványal

1

2	2,4,1
3	3,2,6,4,5,1 (primitív elem)
4	4,2,1
5	5,4,6,2,3,1 (primitív elem)
6	6,1

5. Lineáris kódok, nembináris Hamming kód

Ebben a pontban kódok egy fontos csoportjával ismerkedünk meg, melyek a 3. pontban megismert bináris lineáris kódok kiterjesztései nembináris esetre.

A továbbiakban a kódjainkban szereplő kód-szavakat alkotó szimbólumokat vegyük $GF(q)$ -ből, a lehetséges szimbólumok tehát a $0, 1, 2, \dots, q-1$ számoknak feleltethetők meg.

Egy C kódot lineárisnak nevezünk, ha a C halmaz lineáris tér $GF(q)$ fölött, azaz ha minden $c, c' \in C$ -re

$$c + c' \in C$$

illetve $\alpha \in GF(q)$ esetén

$$\alpha c \in C.$$

A bináris esethez hasonló módon belátható, hogy tetszőleges C lineáris kódhoz létezik egy k lineárisan független sorból és n oszlopból álló G mátrix melyre

$$c = uG \quad (5.1)$$

ahol a k hosszú u üzenethez a c kódszó tartozik, és G mátrixot a C kód generátormátrixának nevezzük.

A bináris esethez hasonlóan a C lineáris kódhoz létezik egy $n-k$ sorból és n oszlopból álló H mátrix, melyre

$$Hc^T = 0$$

akkor és csak akkor, ha $c \in C$, és H -t a C kód paritás ellenőrző mátrixának nevezzük.

Példaként bemutatjuk a nembináris Hamming kódot $n \leq q+1$ és $k=n-2$ esetén. A bináris Hamming kódhoz hasonlóan egy 1 hibát javító kód konstrukciója a cél, melyet a paritásmátrixával definiálunk a következő módon:

$$H = \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 & \dots & -1 & 1 & 0 \\ -1 & -\alpha & -\alpha^2 & \dots & -\alpha^{n-3} & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

ahol α a $GF(q)$ egy primitív eleme. Ez egy $(n, n-2)$ paraméterű kód paritásmátrixa. Meg kell mutatnunk, hogy ez minden egyedi hibát ki tud javítani. Ennél többet bizonyítunk, amikor megadunk egy egyszerű dekódolási eljárást. Legyen az e hiba-vektor olyan, hogy az i -edik pozíción e , egyébként 0, akkor a szindróma $s = e \cdot a_i$, ahol a_i a paritásmátrix i -edik oszlopa. Ha s második koordinátája 0, akkor a hiba az utolsó előtti pozíción történt, ami a paritásszegmensben van, javítása felesleges. Ugyanígy nem szükséges javítani, ha s első koordinátája 0, mert ekkor a hiba az utolsó helyen történt. Minden egyéb esetben a hiba értékét, e -t az s első koordinátájának -1 -szerese adja, míg a hiba helyét, i -t az $a_i = s/e$ -ből visszakereshetjük.

A 3.1. Tétel alkalmazásával nyerjük a kód generátormátrixát:

$$G = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & \alpha \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 1 & \alpha^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 1 & \alpha^{n-3} \end{pmatrix}$$

6. Véges test feletti polinomok

Az $a(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_mx^m$ $GF(q)$ feletti m -ed fokú polinom, ha

$$a_i \in GF(q), i=0 \dots m, a_m \neq 0$$

$$x \in GF(q)$$

A polinom fokszámát $\deg a(x) = m$ alakban fogjuk jelölni.

$a(x) = b(x)$ ha $a_i = b_i$ minden i -re.

$b \in GF(q)$ gyöke az $a(x)$ polinomnak, ha $a(b) = 0$.

Műveletek polinomok között:

1. *Polinomok összeadása*: $c(x) = a(x) + b(x)$; tagonként történik $GF(q)$ feletti műveletekkel: $c_i = a_i + b_i$

2. *Polinomok szorzása*: $c(x) = a(x)b(x)$; minden tagot minden taggal szorzunk, majd az azonos fokú tagokat csoportosítjuk (az összeadások és szorzások $GF(q)$ feletti):

$$\min\{i, \deg a(x)\}$$

$$c_i = \sum_{j=0}^i a_j \cdot b_{i-j},$$

Példa: Ha $GF(2)$ felett $a(x) = 1+x$ és $b(x) = 1+x+x^3$, akkor $a(x) + b(x) = x^3$ és $a(x)b(x) = 1+x^2+x^3+x^4$.

A valós számtest feletti polinomokhoz hasonlóan igaz az Euklideszi osztás $GF(q)$ feletti polinomokra, következésképp adott $a(x)$ és $d(x) \neq 0$ esetén egyértelműen létezik olyan $q(x), r(x)$, hogy

$$a(x) = q(x)d(x) + r(x) \text{ és } \deg r(x) < \deg d(x).$$

Jelölés: $r(x) = a(x) \bmod d(x)$ és $r(x)$ -t az $a(x)$ $d(x)$ -re vonatkozó maradékának nevezzük.

Azt mondjuk, hogy $d(x)$ osztja $a(x)$ -t, ha $a(x) \bmod d(x) = 0$. Ezt a továbbiakban $d(x) \mid a(x)$ formában fogjuk jelölni.

6.1. *Tétel*: Ha α az $a(x)$ polinom gyöke, akkor az előáll

$$a(x) = b(x)(x - \alpha)$$

alakban.

Bizonyítás Alkalmazzuk az Euklideszi osztást $d(x) = x - \alpha$ esetén, akkor

$$a(x) = b(x)(x - \alpha) + \beta.$$

Mivel α gyök, ezért

$$0 = a(\alpha) = b(\alpha)(\alpha - \alpha) + \beta = \beta.$$

6.2. *Tétel*: Egy k -adfokú polinomnak legfeljebb k gyöke lehet.

Bizonyítás A 6.1. Tétel miatt a $b(x)$ polinom fokszáma eggyel kisebb, mint az $a(x)$ polinom fokszáma, tehát ezt a faktORIZÁCIÓT legfeljebb k -szor lehet megismételni.

7. Reed-Solomon kód

Ebben a pontban a lineáris kódok egyik leggyakrabban használt osztályával a Reed-Solomon kódokkal ismerkedünk meg. Legyen $u = (u_0, u_1, \dots, u_{k-1})$ a k hosszúságú üzenetszegmens, és

$$u(x) = u_0 + u_1x + u_2x^2 + \dots + u_{k-1}x^{k-1},$$

akkor az n hosszú c Reed-Solomon kódszót a következő módon állítjuk elő ($n \leq q-1$):

$$c_0 = u(1)$$

$$c_1 = u(\alpha)$$

$$c_2 = u(\alpha^2)$$

$$c_{n-1} = u(\alpha^{n-1}),$$

ahol α a $GF(q)$ primitív eleme.

Egyszerűen belátható, hogy a Reed-Solomon kód lineáris, és a generátormátrixa

$$G = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 & \dots & \alpha^{n-1} \\ 1 & \alpha^2 & \alpha^4 & \dots & \alpha^{2(n-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \alpha^{k-1} & \alpha^{2(k-1)} & \dots & \alpha^{(k-1)(n-1)} \end{pmatrix}$$

7.1. Tétel: Az (n,k) paraméterű RS kód kódtávolsága

$$d_{\min} = n - k + 1,$$

vagyis a RS kód maximális távolságú.

Bizonyítás: $w(c) = |\{c \text{ nem } 0 \text{ koordinátái}\}| =$

$$= n - |\{c \text{ } 0 \text{ koordinátái}\}| \geq$$

$$\geq n - |\{u(x) \text{ gyökei}\}| \geq$$

$$\geq n - (k-1),$$

tehát

$$w_{\min} \geq n - k + 1.$$

Ugyanakkor a Singleton korlát és a 3.2. Tétel miatt

$$n - k + 1 \geq d_{\min} = w_{\min},$$

következésképp az állítást bebizonyítottuk.

Az (n,k) paraméterű Reed-Solomon kód tehát $n-k$ hibát tud jelezni, $\lfloor (n-k)/2 \rfloor$ egyszerű hibát javítani és $n-k$ törléses hibát javítani. Ez utóbbi azt is jelenti, hogy az u ismeretlenre vonatkozó

$$uG = c$$

n darab egyenletből bármelyik $n-k$ egyenlet elhagyásával egy egyértelműen megoldható egyenletrendszer marad, tehát a G mátrix minden $k \times k$ -s négyzetes részmátrixa invertálható.

Példaként a digitális hangrögzítésben (CD és DAT) alkalmazott Reed-Solomon kódot említenénk ([13]-[17]). A kódolási eljárás lényegét közelítőleg a következő módon lehet összefoglalni: a 44.1 kHz-cel mintavételezett és 16 bitbe kvantált

mintákat két byte-ban ábrázoljuk, és egy mátrixba írjuk be oszlopfolytonosan, nevezetesen egy 24×24 -es mátrix oszlopai egymásután következő 6 mintavételi időpontban vett két minta (bal és jobb csatorna) 4 byte-ját tartalmazza. Ha $x_{i,1}, x_{i,2}$ jelöli a jobb csatorna mintáját az i -edik időpillanatban, és $y_{i,1}, y_{i,2}$ a bal csatornáét, akkor az 1. ábra mutatja a minták beírását a táblázatba. A kapott 24×24 -es mátrix minden oszlopát kódoljuk egy

R Ö G Z Í T É S I R Á N Y A									
M I N T A V É T E L	X _{1,1}	X _{7,1}	X _{13,1}	·	X _{139,1}	r _{1,1}	r _{1,2}	r _{1,3}	r _{1,4}
	X _{1,2}	X _{7,2}	X _{13,2}	·	X _{139,2}	r _{2,1}	r _{2,2}	r _{2,3}	r _{2,4}
	Y _{1,1}	Y _{7,1}	Y _{13,1}	·	Y _{139,1}	r _{3,1}	r _{3,2}	r _{3,3}	r _{3,4}
	Y _{1,2}	Y _{7,2}	Y _{13,2}	·	Y _{139,2}	r _{4,1}	r _{4,2}	r _{4,3}	r _{4,4}
	·	·	·	·	·	·	·	·	·
	·	·	·	·	·	·	·	·	·
	·	·	·	·	·	·	·	·	·
	X _{6,1}	X _{12,1}	X _{18,1}	·	X _{144,1}	r _{21,1}	r _{21,2}	r _{21,3}	r _{21,4}
	X _{6,2}	X _{12,2}	X _{18,2}	·	X _{144,2}	r _{22,1}	r _{22,2}	r _{22,3}	r _{22,4}
	Y _{6,1}	Y _{12,1}	Y _{18,1}	·	Y _{144,1}	r _{23,1}	r _{23,2}	r _{23,3}	r _{23,4}
I R Á N Y A	Y _{6,2}	Y _{12,2}	Y _{18,2}	·	Y _{144,2}	r _{24,1}	r _{24,2}	r _{24,3}	r _{24,4}
	q _{1,1}	q _{1,2}	q _{1,3}	·	q _{1,24}	q _{1,25}	q _{1,26}	q _{1,27}	q _{1,28}
	q _{2,1}	q _{2,2}	q _{2,3}	·	q _{2,24}	q _{2,25}	q _{2,26}	q _{2,27}	q _{2,28}
	q _{3,1}	q _{3,2}	q _{3,3}	·	q _{3,24}	q _{3,25}	q _{3,26}	q _{3,27}	q _{3,28}
	q _{4,1}	q _{4,2}	q _{4,3}	·	q _{4,24}	q _{4,25}	q _{4,26}	q _{4,27}	q _{4,28}

1. ábra

$(28,24)$ paraméterű $GF(2^8)$ feletti szisztematikus Reed-Solomon kóddal. A j -dik oszlop paritásbyte-jait jelöltük $q_{1,j}, q_{2,j}, q_{3,j}, q_{4,j}$ -vel. Ennek a kódnak a kódtávolsága 5, tehát 4 hibát tud jelezni, 2 egyszerű hibát tud javítani és 4 törléses hibát tud javítani. A digitális lemezen előforduló hibák jól modellezhetők egy kétállapotú csatornával. Az egyik állapotot nevezzük Jó állapotnak, melyben átlagosan 10000-20000 bit ideig tartózkodik, és ekkor a hibák előfordulása független egymástól és valószínűsége kb. 10^{-4} . A másik állapotot nevezzük ROSSZ állapotnak, amiben 30-40 bit ideig tartózkodik, és ekkor gyakorlatilag használhatatlan a vétel. Ekkor azt mondjuk, hogy hibázás burst-ös. Az ilyen csatornák kódolására találták ki az interleaving technikát, amikor az előbbi mátrixot sorfolytonosan olvassák ki, de előtte mindegyik sort is kódolják ugyanazzal a $(28,24)$ paraméterű Reed-Solomon kóddal. A j -edik sor paritásbyte-jait jelöli $r_{j,1}, r_{j,2}, r_{j,3}, r_{j,4}$.

A Sony és a Philips megegyezett a fentiekhez hasonló (kicsit bonyolultabb) kódolásban azért, hogy a tömeges digitális hanglemezzgyártás elindulhasson. A verseny nyitott viszont a lejátszó készülékben, vagyis a dekódolás terén. A különböző dekódolások igazából a következő egyszerű eljárás finomításai: számítsuk ki soronként a szindrómát! Ha a szindróma 0, akkor azzal a sorral készen vagyunk. Ha egy hiba volt, akkor azt kijavítjuk, és az oszloponkénti javításhoz ezeket a hibahelyeket megjegyezzük, azaz mesterségesen törléses hibákat generálunk. Minden egyéb esetben az egész sort törléses hibaként regisztráljuk. Ezek után oszloponként javítunk, ha ott legfeljebb két

törléses hiba volt (emlékeztetünk, hogy 4 törléses hibát képes a rendszer javítani). Ha a hibák száma nagyobb, mint 2, akkor a környező hibátlan mintákból interpolálunk. Látható, hogy a hibajavítás nem használja ki a Reed-Solomon kód hibajavítási lehetőségét, aminek elsősorban technológiai okai vannak, mivel a dekódolás bonyolultsága a javítandó hibák számának négyzetével arányos, és itt igen gyorsan kell dekódolni (a forrás sebessége $2 \times 44 \times 100 \times 16 = 1.4112 \text{ Mbit/sec}$)

Irodalom

- [1] Györfi László, Simonyi Gábor, Vajda István, Zsels Tamás "A hibajavító kódolás elemei" Intézeti tanulmány, BME HEI 1986.
- [2] Fritz József, Császár Imre "Információelmélet" Tankönyvkiadó 1983.
- [3] Vajda István "Hibajavító kódolás és műszaki alkalmazásai" BME Mérnöki Továbbképző Intézet, 1982.
- [4] R.B.Ash "Information Theory" Interscience Publishers, 1965.
- [5] R.G.Gallager "Information Theory and Reliable Communication" Wiley 1968.

- [6] R.J.McEllice "The theory of Information and Coding" Addison-Wesley Publishing Company, 1977.
- [7] W.W.Peterson "Error Correcting Codes" MIT Press Cambridge, Mass., and Wiley, 1961
- [8] E.R.Berlekamp "Algebraic Coding Theory" McGraw Hill, 1968
- [9] F.J.MacWilliams, N.J.A.Sloane "The Theory of Error-Correcting Codes" North-Holland, 1977
- [10] R.E.Blahut "Theory and Practice of Error Control Codes" Addison-Wesley Publishing Company, 1983
- [11] Ferenczy Pál "Video- és hangszerek" Műszaki Könyvkiadó, 1986.
- [12] Specification of the D2-MAC/PACKET System EBU/SPB 352/B/1985 febr.
- [13] All about the Compact Disc System Compact Disc Digital Audio - Sony 1981-es kiadvány
- [14] K.Odaka, T. Furuya, A. Taki "LSIs for Digital Signal Processing to be used in CD Players" No 1860 AES 71. Convention, 1982 March, Motreux
- [15] T.Doi "Error Correction for Digital Audio Recordings" No 1991 AES 73. Convention, 1983 March, Eindhoven
- [16] Y. Ishida, M. Ishida, K. Nakagawa, Y. Osuga, J. Yanabe "On the development of a car use rotary-head digital audio tape recorder" No 2318 AES 80. Convention, 1986 March, Montreux
- [17] E.R.Berlekamp "The Technology of Error-Correcting Codes" Proc. IEEE, 68, May 1980.
- [18] E.R.Berlekamp, R.E. Peile, S.P. Pope "The Application of Error Control to Communications" IEEE Communications Magazine, 25, April 1987.

SZEMLE

Összeállította: GÁL FERENC

Az USA-beli Corning Glass Works új színesképcső gyártó üzemét épít Kínában a Hongkong közelében lévő Sencsen különleges gazdasági övezetbe. A beruházás értéke 100 millió dollár. Az üzemvezető a sencseni Cnec-Conic Glass Co. vállalat lesz.

(Világ gazdaság, 1989. május 12.)

"Három éven belül Dél-Korea-uralja majd a memóriaplacot" jósolja a Goldstar Semiconductor korábbi ügyvezető igazgatója, aki azzal indokolta kijelentését, hogy 1987 kezdete és 1989 vége között a három legnagyobb dél-koreai, félvezetőgyártó vállalat - a Samsung, a Hyundai és a Goldstar - több mint 2 Mrd USD-t ruház be integrált áramkörök gyártásába.

Ez a hatalmas mértékű beruházás 1983-ban indult, amikor is a dél-koreai kormány a félvezetőgyártást stratégiai fontosságú iparnak nyilvánította.

A Samsung vállalat 1974 óta gyárt félvezetőket, hosszabb ideje, mint bármelyik helybéli versenytársa. Azonban csak az utóbbi 5 évben tértek át a VLSI, ezen belül is főleg a DRAM eszközök gyártására. Ez ugyan érzékenyen érintette a vállalatot, de kifizetődő lépésnek bizonyult.

A Samsung drágán megfizetett az új technológiáért. DRAM-ok szabadalmának megsértéséért is beperelték: 1988-ban mintegy 40 M USD értékben a Texas Instrumentsnek kellett fizetnie, májusban pedig a Hitachi perelte be. A Samsung úgy becsülte, hogy a félvezetők eladásából 1988-ban 800 M USD nyereséget könyvelhet el.

A Samsung fő terméke a 256 kbit-es DRAM. Júniusban az 1 Mbit-es DRAM-ok sorozatgyártását is megkezdtek, amelynek a tervek szerint decemberre kellene elérnie a havi 2 millió darabos termelési mennyiséget. 1989-ben a termelés növekedésének jóvoltából 200 M USD értékű beruházást terveznek.

A Samsung integrált áramköreinek nagy részét az Egyesült Államokba exportálja. Amerikai kirendeltségük San Joséban (Kalifornia) található, ahol az eladási tevékenységben dolgozók mellett 150 kutató-fejlesztő mérnök dolgozik.

A Hyundai szintén megpróbálkozott amerikai hídfőállás kiépítésével, hogy ezáltal biztosítsa helyét a félvezetőiparban: 1983-ban létesített kutató-fejlesztő központot Santa Claraban.

A félvezetőiparban tapasztalt 1985 évi válság idején a Hyundai mintegy 30 M USD veszteséggel, hirtelen bezárta kaliforniai központját, de nem adta fel a harcot.

A Szöul mellett lévő három új, szilíciumszeleket előállító gyáregységünket középpontba helyezve szervezték újjá a vállalatot. Igazán üdvöztető megoldást azonban a Texas Instruments céggel kötött megegyezés hozott: cserébe a Hyundai termékeiért az amerikai vállalat bevezette őket a DRAM-gyártás titkaiba. A Hyundai úgy becsülte, hogy 1988-ra a saját védjeggyel ellátott integrált áramkörök eladásából 200 M USD bevételt könyvelhet el, amelyet 1989-re szándékozik kétszerezni.

A Samsung, Hyundai és Goldstar vállalatoknak sikerült megszerezniük a világ DRAM-placának mintegy 7...12 %-át, újabban pedig azon fáradoznak, hogy kutatási alapjukat összeadva, 1989 közepére kifejlesszék a 4 Mbit-es tároló IC-t.

(Far Eastern Economic Review - OMIKK Mikroelektronikai Gyorstájékoztató)

A Kontakta Ózdon 2400 négyzetméteres új üzemcsarnokot épített. Maga az épület 68,8 millió forint, s ezenkívül még 40 milliót költenek gépi beruházásra. Mindezek alapján az új üzemmel a termelési érték megduplázódik.

A termelés zömét a szövegszerkesztő, valamint a szenzoros fényerő-szabályozó kapcsoló teszi ki. Ez utóbbiból 1988-ban 60 ezret gyártottak. A mintadarabokat kiküldték Svédországba és Izraelbe, meglehetősen nagy az érdeklődés irántuk. De ugyancsak büszkék a miniatűr és szubminiatűr kapcsolókra, ezek tökéletes importot váltanak ki. A Kódex szövegszerkesztőnek telexváltózatát is kívánják gyártani.

Ez egyébként az egyik legjobb termékük, 1988-ban több mint 400-at adtak el belőle. Fokozatosan bővítik a berendezés szolgáltatásait. Ilyen például az automatikus sorrelválasztó, a margaréta fej csere, amivel a legkülönbözőbb jelekkel lehet írni a gépeken, s talán a legfontosabb újítás az IBM kompatibilis lemezkezelés.

(Kontakta Híradó, 1988. december)

(Folytatás a 239. oldalon)

Semi-Markov folyamatok megbízhatósági alkalmazással

BEGAIN, Khalid

Jordánia

BME, Híradástechnikai Elektronika Intézet

ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen cikk a semi-Markov folyamatok alapmodelljének kialakításával, analízisével és egyfajta alkalmazásával foglalkozik. Célja az általános meghibásodási-javítási folyamatokkal rendelkező bonyolult rendszerek megbízhatósági vizsgálatának lehetővé tétele, és ezen rendszerek megbízhatósági paramétereinek meghatározása. A kapott eredmények (megfelelő interpretációval) alkalmasak különböző átlagos tartózkodási időparaméterek vizsgálatára.

1. BEVEZETÉS

1.1 Előszó

A semi-Markov folyamat olyan sztochasztikus folyamat, amelyben az állapotok közötti átmenetek egy Markov-láncot alkotnak, de az egyes állapotban eltöltött idők tetszőleges eloszlásúak.

A következőkben az alapvető jelöléseket és definíciókat vezetjük be. Az irodalomban többféle módon jelölik az egyes mennyiségeket, ennek ellenére a továbbiakban következetesen igyekezünk eljárni, lehetőleg követve ezzel Howard [1]-ben használt jelölés rendszerét, és ettől csak akkor térünk el, ha az érthetőség azt megköveteli.

A továbbiakban feltételezzük, hogy az olvasó tisztában van a markovi folyamatok alap definíciójával és összefüggésével. Arra a célra tömör összefoglalókat a [10, 11]-ben, és részletesebb leírásokat a [1, 3, 6]-ben találunk.

1.2 Osztályozás

Hasonlóan a markovi folyamatokhoz, a semi-markovi folyamatokat alapvetően két szempont alapján osztályozhatjuk:

- időparaméter szerint lehet
 - diszkrét idejű, illetve
 - folytonos idejű semi-markovi folyamat,
- állapotter szerint lehet
 - diszkrét állapotterű, és ezen belül
 - véges állapotterű, vagy
 - megszámlálhatóan végtelen állapotterű folyamat,
 - folytonos állapotterű semi-Markov folyamat.

A következőkben csak a véges állapotterű folytonos idejű semi-Markov folyamatokkal foglalkozunk, mivel ezek segítségével tudjuk a valós rendszerek meghibásodási-javítási folyamatait leírni. A diszkrét időre csak abban az esetben térünk ki, ha ennek segítségével a számítás szempontjából sokkal egyszerűbb rekurzív kifejezéseket kapunk.

Beérkezett: 1988. VII. 22. (H)



BEGAIN, KHALID

Villamosmérnök, illetve Híradástechnikai szakmérnöki diplomáját a Budapesti Műszaki Egyetemen 1986-ban, illetve 1988-ban szerezte. A cikk írásakor a BME Híradástechnikai Elektronika

Intézetében dolgozott, mint tudományos segédmunkatárs. Fő érdeklődési területe a bonyolult rendszerek megbízhatósági vizsgálata és az általános tömeg-kiszolgálási elmélet.

2. A SEMI-MARKOV FOLYAMATOK ALAP MODELLE

2.1 Alapmennyiségek és definíciók

Tekintsünk egy sztochasztikus folyamatot, amelyben J_0 jelöli a folyamat kezdeti állapotát. Minden $k \geq 1$ -re, J_k jelöli a folyamat állapotát az k -adik átlépést követően. Legyen

$$p_{ij}^k = P[J_k = j | J_{k-1} = i] \quad (2.1)$$

annak valószínűsége, hogy a folyamat az i . állapotot követően a j . állapotba fog lépni. A következőkben nem kívánunk foglalkozni az átlépésszámtól való függéssel, így ezt a felső k index elhagyásával jelezzük. Jelölje továbbá $x = \{x_1, \dots, x_N\}$ a folyamat állapotterét. A t_{ij} átmeneti valószínűségeknek teljesíteniük kell ugyanazokat a követelményeket, mint a markovi folyamatok esetében, azaz

$$p_{ij} \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (2.2)$$

$$\sum_{j=1}^N p_{ij} = 1, \quad (2.3)$$

ahol N a rendszer állapotainak a számát jelöli.

Ha a folyamat belép az i . állapotba azonnal ki-sorsolja a következő állapotot $P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{iN}$ valószínűségi eloszlás alapján. Miután a j . állapot kiválasztásra kerül a folyamat egy τ_{ij} ún. tartásidőt tölt el az i . állapotban az újabb átlépésig ($i \rightarrow j$). A tartásidő pozitív valós értékű valószínűségi változó, melynek sűrűségfüggvényét $h_{ij}(\cdot)$ -vel jelöljük.

Megfigyelhető, hogy a $\{J_n, n = 1, 2, \dots\}$ folyamat egy Markov-láncot alkot P_{ij} átmeneti valószínűségekkel. Az ilyen folyamatokat beágyazott Markov folyamatoknak szokás hívni. Jelölje továbbá $n_i(t)$ az i . állapotba történt belépések számát a $(0, t)$ időintervallumban, és definiáljuk az összes átlépés számot, mint

$$n(t) = \sum_{i=1}^N n_i(t) \quad (2.4)$$

Ha $Z(t)$ -vel jelöljük az eredeti sztochasztikus folyamat állapotát, akkor

$$Z(t) = J_n(t). \quad (2.5)$$

Definíció 1.

$A\{Z(t), t \geq 0\}$ sztochasztikus folyamatot semi-Markov folyamatnak nevezzük.

Definíció 2.

Az $\{n(t) = (n_1(t), \dots, n_N(t), t \geq 0\}$ sztochasztikus folyamatot Markov felújítási folyamatnak nevezzük.

Az eddigiek alapján világos, hogy a semi-Markov folyamat megadja a folyamat állapotát a t időpillanatban, míg a Markov felújítási folyamat egy számláló folyamat, amely számlálja az egyes állapotokban történt (ill. az összes) belépések számát az adott t idő alatt.

Egy semi-Markov folyamat megadásához specifikálni kell N^2 tartásidő sűrűségfüggvényt a p_{ij} átmeneti valószínűségek megadása mellett.

A τ_{ij} tartásidő elteltével a folyamat átlép a j . állapotba, ahol azon nyomban kisorsolja a következő k állapotot és ez alapján $h_{jk}(t)$ sűrűségfüggvényű τ_{jk} véletlen tartásidőt tölt el ott, és így tovább.

Az első felvetődő kérdés most az, hogy történhet-e végtelen számú átlépés véges idő alatt.

Definíció 3.

Egy i állapot reguláris, ha

$$P[n(t) = \infty | J_0 = i] = 0 \quad \text{mindent } t < \infty \quad (2.6)$$

Egy Markov felújítási folyamat reguláris, ha minden állapota reguláris.

Egy véges állapotterű Markov felújítási folyamat mindig reguláris, ha minden állapotra annak valószínűsége, hogy az adott állapotban a tartózkodási idő nullával egyenlő, egyenél kisebb [2].

Tekintettel arra, hogy mi csak véges állapotterű rendszereket vizsgálunk, célszerűnek látszik a mátrixos formák bevezetése. A következőkben bevezetendő mátrixok mérete $N \times N$ kivéve, ha ezt külön megadjuk.

Ezek alapján jelölje $P = \{p_{ij}\}$ az átmeneti valószínűségek mátrixát, a $H(\cdot) = \{h_{ij}(\cdot)\}$ mátrix pedig a hozzátartozó tartásidő sűrűségfüggvényeket tartalmazza.

2.2 A magfüggvény

Vezessük be a $c_{ij}(\cdot)$ mennyiségeket a következő módon:

$$c_{ij}(t) = p_{ij} \cdot h_{ij}(t) \quad (2.7)$$

A $c_{ij}(t)$ mennyiségeket magfüggvényeknek, a $C(t) = \{c_{ij}(t)\}$ mátrixot magmátrixnak nevezzük.

A fenti művelet nem hagyományos mátrixszorzás, hanem két mátrix azonos helyen lévő elemének a szorzata. Erre bevezetjük a kongruens mátrix szorzási műveletet úgy, hogy

$$c_{ij} = a_{ij} \cdot b_{ij} \quad (2.8)$$

és azt a következőképpen jelöljük

$$C = A \boxtimes B \quad (2.9)$$

A függelék több Információt és néhány elemi azonosságot tartalmaz a kongruens szorzásról.

Ezek alapján a magmátrix a következő módon is kifejezhető

$$C(t) = P \boxtimes H(t) \quad (2.10)$$

2.3 Várakozási idők

Definiáljuk azt a τ_i feltétel nélküli időt, amely megadja egy adott i . állapotban eltöltött időt a következő állapot ismerete nélkül. Ezt az időt az i . állapotbeli várakozási időnek nevezzük.

Legyen $w_i(t)$ ezen várakozási idő sűrűségfüggvénye, így

$$w_i(t) = \sum_{j=1}^N p_{ij} h_{ij}(t) = \sum_{j=1}^N c_{ij}(t), \quad (2.11)$$

amely a magmátrixban a sorösszegeket jelenti.

A definíció alapján a várakozási idő momentumai meghatározhatók a tartásidő momentumai segítségével

$$\begin{aligned} \tau_i^k &= \int_0^\infty \tau^k \sum_{j=1}^N p_{ij} h_{ij}(\tau) d\tau = \sum_{j=1}^N p_{ij} \int_0^\infty h_{ij}(\tau) \tau^k d\tau = \\ &= \sum_{j=1}^N p_{ij} \tau_{ij}^k \end{aligned} \quad (2.12)$$

Mátrix formában $W(t) = \{w_i(t)\}$.

2.4 Az intervallum átmeneti valószínűségek

Legyen $\phi_{ij}(t)$ annak valószínűsége, hogy a folyamat a j . állapotban lesz a t időpillanatban feltéve, hogy a 0 pillanatban lépett be az i . állapotba. Ezt a valószínűséget a $(0, t)$ időintervallumra vonatkozó intervallum átmeneti valószínűségnek fogjuk hívni.

Vizsgáljuk meg azt, hogy milyen módon lehet az a folyamat t idő múlva j . állapotban, amely éppen most lépett be az i . állapotba? Az egyik lehetséges eset az, ha i és j ugyanazt az állapotot jelöli, és a folyamat egyáltalán nem lépett ki ebből az állapotból a $(0, t)$ idő alatt. Ez azt is jelenti, hogy a folyamat csak t idő után teszi meg az első átlépést. Minden más esetben a folyamat szükségszerűen megtesz legalább egy átlépést a $(0, t)$ idő alatt. Például, először átlép egy k állapotba τ idő után, azután onnan bizonyos számú átlépésben átkerül a j . állapotba a maradék $t - \tau$ idő alatt.

Összefoglalva ezeket a megfontolásokat a következőt kapjuk:

$$\phi_{ij}(t) = \delta_{ij} W^C_i(t) + \sum_{k=1}^N p_{ik} \int_0^t h_{ik}(\tau) \phi_{kj}(t - \tau) d\tau \quad (2.13)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{ha } i = j \\ 0 & \text{ha } i \neq j \end{cases}, \quad i, j = 1, 2, \dots, N, \quad t \geq 0$$

ahol $W^C_i(t) = P[\tau_i > t]$. Ugyanez mátrix alakban:

$$\Phi(t) = W^C(t) + \int_0^t (P \boxtimes H(\tau)) \Phi(t - \tau) d\tau =$$

$$= W^C(t) + \int_0^t C(\tau) \Phi(t-\tau) d\tau \quad (2.14)$$

Most láthatjuk a $C^0(\tau)$ mátrix bevezetésének a célszerűségét, miből a $C(\tau)$ mátrix sorösszeggel megadják a $W(\tau)$ diagonalmátrix elemelt. $C(\tau)$ τ minden értéke mellett integrálja megadja a P átmeneti valószínűség mátrixot.

Mint látjuk, (2.17) egyenlet megoldásához egy integrálegyenletet kellene megoldani, amely általában nem egyszerű feladat. Diszkrét idejű semi-Markov folyamatok esetében a fenti kifejezés a következő alakban írható le a $(0, n)$ időintervallumra:

$$\varphi_{ij}(n) = \delta_{ij} W^C_{ij}(n) + \sum_{k=1}^N p_{ik} \sum_{m=0}^n h_{ik}(m) \varphi_{ij}(n-m) \quad (2.15)$$

amely egyszerű rekurzív kifejezés. Ebből következően egyes esetekben érdemes áttérni a diszkrét idővel történő számításra.

3. FOLYTONOS IDEJŰ SEMI-MARKOVI FOLYAMATOK ANALIZISE TRANSZFORMÁCIÓVAL

3.1 A Laplace transzformáció

Mint láttuk, ha az intervallum átmeneti valószínűségeket akarjuk meghatározni, akkor ezt csak hosszadalmas számítások útján tehetjük meg. Az analitikus vizsgálatokban viszont igen elterjedt a transzformációk használata. Folytonos idejű vizsgálatok esetén a Laplace-transzformációt használják a leggyakrabban.

A Laplace-transzformáció részletesebb ismertetésére itt nem szeretnék kitérni, mivel erre több irodalomban találunk igen jó leírásokat és összefoglalókat. A következőkben a transzformáltat egy felső csillag indexszel $\dot{\cdot}$ fogjuk jelölni.

3.2 Az intervallum átmeneti valószínűségek transzformáltja

Képezzük a (2. 13) kifejezés transzformált alakját:

$$\dot{\varphi}_{ij}(s) = \delta_{ij} \dot{W}^C_{ij}(s) + \sum_{k=1}^N p_{ik} \dot{h}_{ik}(s) \dot{\varphi}_{kj}(s) \quad (3.1)$$

A transzformációnak köszönhetően a konvolúció szorzattá változik.

A Laplace-transzformáció elmélete alapján az i -edik állapot várakozási ideje komplementer eloszlásfüggvényének transzformáltja kifejezhető a várakozási idő transzformált sűrűségfüggvénye segítségével

$$\dot{W}^C_{ij}(s) = \frac{1}{s} (1 - \dot{w}_{ij}(s)) \quad (3.2)$$

Mivel a várakozási idő sűrűségfüggvénye megadható az átmeneti valószínűségek és a tartási idők sűrűségfüggvénye (magfüggvények) segítségével

$$\dot{w}_{ij}(s) = \sum_{j=1}^N p_{ij} \dot{h}_{ij}(s) = \sum_{j=1}^N \dot{c}_{ij}(s) \quad (3.3)$$

így az intervallum átmeneti valószínűségek transzformáltja csupán az átmeneti valószínűségektől és a tartási idők transzformált sűrűségfüggvényétől függ.

Most fejezzük ki a (3. 1)-t transzformált mátrix formában:

$$\dot{\Phi}(s) = \dot{W}^C(s) + (P \boxtimes H(s)) \dot{\Phi}(s) = \dot{W}^C(s) + \dot{C}(s) \dot{\Phi}(s). \quad (3.4)$$

A fenti egyenlet megoldása:

$$\dot{\Phi}(s) = [I - \dot{C}(s)]^{-1} \dot{W}^C(s), \quad (3.5)$$

ahol I az egység mátrixot jelöli.

A fenti mátrixinverz mindig létezik az általunk vizsgált való rendszerek esetében.

3.3 Stacionárius viselkedés

Térjünk ki most az intervallum átmeneti valószínűségek viselkedésének vizsgálatára hosszú működési időt feltételezve. Vezessük be a stacionárius intervallum átmeneti valószínűségek mátrixát:

$$\Phi = \lim_{t \rightarrow \infty} \Phi(t). \quad (3.6)$$

A Laplace-transzformáció határértéktétele alapján Φ kifejezhető, mint

$$\Phi = \lim_{s \rightarrow 0} s \dot{\Phi}(s). \quad (3.7)$$

Mint ahogy a szorzat határértéke megegyezik a határértékek szorzatával (ha ezek léteznek), így

$$\Phi = \lim_{s \rightarrow 0} s \dot{\Phi}(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s [I - \dot{C}(s)]^{-1} \lim_{s \rightarrow 0} \dot{W}^C(s). \quad (3.8)$$

Tekintsük most egyenként a jobb oldali mennyiségeket. A második határérték:

$$\lim_{s \rightarrow 0} \dot{W}^C(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1 - \dot{w}(s)}{s} \stackrel{\text{L'Hospital}}{=} \lim_{s \rightarrow 0} -\frac{d}{ds} \dot{w}(s) = M \quad (3.9)$$

ahol $M = \{\bar{\tau}_{ij}\}$ a várakozási idők átlagértékének diagonalmátrixa.

Definiáljunk továbbá a $T(s)$ transzformált mátrixot, mint

$$T(s) = s [I - \dot{C}(s)]^{-1} = s [I - P \boxtimes H(s)]^{-1}, \quad (3.10)$$

és rendezzük át az egyenlőséget a következő módon:

$$T(s) - T(s) [P \boxtimes H(s)] = sI. \quad (3.11)$$

Vizsgáljuk meg ezt az egyenletet az $s \rightarrow 0$ esetre, és vegyük észre, hogy a Laplace-transzformáció definíciójából következik, hogy

$$H(0) = U, \quad (3.12)$$

ahol U jelöli a csupa 1-es elemű mátrixot. A (3. 11) egyenlet így a következőre egyszerűsödik:

$$T(0) = T(0) P. \quad (3.13)$$

Mint látjuk $T(0)$ a mátrixnak ugyanazt az egyenletet kell teljesíteni, mint a beágyazott Markov-lánc stacioner állapotvalószínűség vektorának, azaz

$$\Pi = \Pi P, \quad (3.14)$$

így a $\dot{T}(0)$ mátrix mindegyik sora egy arányossági tényezőtől eltekintve megegyezik a beágyazott Markov-lánc stacioner állapot valószínűség vektorával, amely egyértelmű, ha a lánc ergodikus.

Most már felírhatjuk Φ (3. 8)-nak megfelelő értékét:

$$\Phi = \dot{T}(0) M \quad (3.15)$$

amelynek elemei

$$\varphi_{ij} = t_{ij}(0) \tau_j = k_i \pi_j \tau_j \quad i, j = 1, \dots, N, \quad (3.16)$$

ahol a k_i határozatlan arányossági tényező a $\dot{T}(0)$ mátrix i -edik eleme és a Π vektor között. Mivel a φ_{ij} intervallum átmeneti valószínűségek összege az összes állapotra eggyel egyenlő, így

$$\sum_{j=1}^N \varphi_{ij} = 1 = \sum_{j=1}^N k_i \pi_j \tau_j = k_i \sum_{j=1}^N \pi_j \tau_j, \quad (3.17)$$

amelyből

$$k_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^N \pi_j \tau_j} \quad i, j = 1, \dots, N. \quad (3.18)$$

Látható, hogy az arányossági tényező ugyanaz az összes állapotra. Defináljuk az egy tetszőleges állapotbeli átlagos várakozási időt

$$\bar{\tau} = \sum_{j=1}^N \pi_j \tau_j \quad (3.19)$$

és írjuk át a (3. 16) kifejezést a következő alakra:

$$\varphi_{ij} = \frac{\pi_j \tau_j}{\bar{\tau}} = \varphi_j \quad (3.20)$$

Mint várható volt, az intervallum átmeneti valószínűségek határértékei függetlenek a semi-markovi folyamat kezdeti állapotától, így elegendő a második index használata az elemek megkülönböztetésére. Szavakba foglalva a (3. 20) kifejezést: a semi-markovi folyamat határ int. átmen. valószínűsége megegyeznek a hozzátartozó beágyazott Markov-lánc stacionárius állapotvalószínűséggel, megszorozva az adott állapot átlagos várakozási idejével és normalizálva az állapotok átlagos várakozási idejére.

Újból emlékezzünk arra, hogy a φ_j mennyiség megadja annak valószínűségét, hogy a folyamat a j . állapotban található feltéve, hogy a folyamat elég hosszú ideje működik.

Egy nagyon fontos megfigyelés a (3. 20) kifejezéssel kapcsolatban az, hogy a folyamat stacionárius viselkedését a tartási idő eloszlásoknak csupán a várható értéke befolyásolja.

Mivel a Φ mátrix sorai megegyeznek, így definiálhatjuk a határ intervallum átmeneti valószínűségek vektorát $\psi = \{\varphi_j\}$, és kifejezhetjük ezt a beágyazott Markov-lánc stacionárius állapotvalószínűség vektorának segítségével:

$$\psi = \frac{1}{\bar{\tau}} \Pi M \quad (3.21)$$

4. ÁLLAPOTCSOPORTBAN ELTÖLTÖTT ÁTLAGOS IDŐ

A következőkben bevezetünk néhány új valószínűség-és időfogalmat az állapottérre, vagy annak egy részére. Célunk ezzel az, hogy megteremtjük a megfelelő apparátust néhány rendszerjellemző meghatározásához. Ilyen jellemzők a megbízhatósági vizsgálatok esetén az adott állapotcsoportbeli tartózkodási valószínűségek (pl. készenléti tényező) vagy az állapotok egy csoportjára vonatkozó várakozási idők (MTFF, MTTF, MUT, MDT, stb.).

Jelölje ν_{ij} egy adott R állapotcsoport elhagyásáig a $j \in R$ állapotban eltöltött összidőt feltéve, hogy a folyamat az $i \in R$ állapotba lépett be a $t = 0$ -ban. Az állapotcsoportban eltöltött idők vizsgálatához rendezzük át oly módon az állapottérre, hogy a vizsgált állapotcsoportba tartozó állapotok előre kerüljenek, azaz $R = \{X_1, X_2, \dots, X_k\} \subset X$, ahol X a teljes állapottérre jelöl. Nevezzük az állapottérnek az R állapotcsoporton kívüli részét S -sel, azaz $S = X \setminus R = \{X_{k+1}, \dots, X_N\}$. Ennek megfelelően rendezzük át a folyamathoz tartozó alapláncmátrixokat (P , $H(t)$ és $W(t)$) a következő minta szerint, pl. P mátrixra

$$P = \begin{bmatrix} P_{RR} & P_{RS} \\ P_{SR} & P_{SS} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Jelölje ν az átlépési időt az R állapotcsoportból az S -be, feltéve, hogy a folyamat egy R állapotcsoportbeli állapotban kezdte a működését, azaz

$$\sum_{i=1}^k \varphi_i(0) = 1. \quad (4.2)$$

A ν átlépési idő vizsgálatához eltekintünk az S állapotcsoporton belüli, és az $S \rightarrow R$ állapotváltozásoktól is, így $P_{SR} = 0$ és $P_{SS} = 0$.

Definiáljuk az $x_{ij}(t)$ indikátorfüggvényt, amelynek értéke 1, ha a folyamat a j . állapotban van a t időpillanatban, és 0, ha nem, feltéve, hogy a folyamat az i . állapotba lépett be a $t=0$ -ban.

Könnyen belátható, hogy

$$\nu_{ij} = \int_0^{\infty} x_{ij}(t) dt, \quad (4.3)$$

és a j . állapotban eltöltött idő várható értéke

$$\bar{\nu}_{ij} = \int_0^{\infty} \overline{x_{ij}(t)} dt, \quad (4.4)$$

Mivel azonban $P[x_{ij}(t) = 1 | i] = \varphi_{ij}(t)$ és $P[x_{ij}(t) = 0 | i] = 1 - \varphi_{ij}(t)$, így,

$$\bar{\nu}_{ij} = \int_0^{\infty} \varphi_{ij}(t) dt, \quad (4.5)$$

Figyelembe véve a Laplace-transzformáció definícióját ezt felírhatjuk, mint

$$\bar{\nu}_{ij} = \int_0^{\infty} \varphi_{ij}(t) e^{-st} dt \Big|_{s=0} = \dot{\varphi}_{ij}(0) \quad (4.6)$$

Felhasználva az előző fejezetben kapott eredményt, mégpedig

$$\Phi(s) = [I - C^*(s)]^{-1} W^{C^*}(s) = [I - P \square H^*(s)]^{-1} W^{C^*}(s)$$

$s=0$ -t behelyettesítve az előzőeknek megfelelően

$$\Phi(0) = \lim_{s \rightarrow 0} s \Phi(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s [I - C^*(s)]^{-1} \lim_{s \rightarrow 0} W^{C^*}(s) \quad (4.7)$$

és mivel tudjuk, hogy $H^*(0) = U$, ill. $\lim_{s \rightarrow 0} W^{C^*}(s) = M =$

$\{\bar{\pi}_i\}$, akkor vezessük be az $\bar{N} = \{\bar{\nu}_{ij}\}$ mátrixot:

$$\bar{N}_{RR} = [I_{kk} - P_{RR}]^{-1} M_{RR} \quad (4.8)$$

ahol $\bar{N}_{RR}$ az R állapotcsoportra vonatkozó várható átlépési idők mátrixa, mérete $k \times k$.

Jelölje $\bar{\nu}_i$ az állapotcsoportban eltöltött idő várható értékét, feltéve, hogy a folyamat I -be lépett be a $t=0$ -ban.

Akkor

$$\bar{\nu}_i = \sum_{j=1}^k \bar{\nu}_{ij} \quad (4.9)$$

Ha a folyamat a $t=0$ időpillanatban bizonyos kezdeti valószínűségi eloszlás szerint lép be az egyes állapotokba

$$\Pi(0) = \{\pi_1(0), \dots, \pi_k(0), \pi_{k+1}, \dots, \pi_N(0)\}$$

Ha feltesszük, hogy a folyamat 1 valószínűséggel a vizsgált állapotcsoportból indult, azaz $\pi_1(0) = 0$, ha $l > k$ akkor ezen kezdeti eloszlással kiszámítjuk az állapotcsoportból való kilépés idejének ν várható értékét, amely

$$\nu = \Pi_k(0) \bar{N}_{RR} I_k \quad (4.10)$$

ahol I_k egy k hosszúságú csupa egyes elemű oszlopvektor.

5. MEGBÍZHATÓSÁGI PARAMÉTEREK MEGHATÁROZÁSA

Az eddigiekben bemutattuk a semi-Markov folyamatokat, és meghatároztunk néhány jellemző mennyiséget velük kapcsolatban. Mint láttuk, a semi-markovi folyamatok időfüggő vizsgálata transzformációk segítségével elvégezhető. Az így kapott eredmények viszont nehezen értékelhetők, mivel a legtöbb esetben nem, vagy nagyon nehezen tudjuk a megoldást időtartományba visszatranszformálni. A fent említettek miatt általában a semi-Markov folyamatok stacionárius jellemzőinek meghatározásával, és így a kapott eredmények általában stacionárius valószínűségek, vagy átlagos idők. Jelen fejezetben az eddigi eredmények egyfajta alkalmazását mutatjuk be, az általános meghibásodási-javítási folyamattal rendelkező rendszerek megbízhatósági vizsgálatában. Az általános folyamatot az teszi indokoltá, hogy amíg a homogén Markov-láncok jó modellt alkotnak az elektronikus rendszerek meghibásodási folyamataira, addig a nem elektronikus meghibásodási és javítási folyamatok esetében szük-

ségessé válik általánosabb tartási időeloszlások használata is.

Tegyük fel, hogy a vizsgált rendszer megbízhatósági (meghibásodási-javítási) viselkedését leíró $\{z(t), t \geq 0\}$ folyamat semi-Markov folyamat $(P, H(t))$, és legyen X a folyamat állapottere. Különböztessünk meg két állapotcsoportot az állapottérben:

$R = \{X_1, \dots, X_k\}$ a működéses állapotok és

$S = X \setminus R = \{X_{k+1}, \dots, X_N\}$ a működésképtelen állapotok csoportja.

A továbbiakban ugyanazt a vektor és mátrix partícionálást alkalmazzuk, mint az 4.2. pontban tettük, az ott tárgyalt eredmények segítségével határozzuk meg a megbízhatósági paramétereket.

5.1 A készenléti tényező

A készenléti tényező a következőképpen értelmezhető:

$$K = \lim_{t \rightarrow \infty} P[z(t) \in R] = \lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^k P[z(t) = X_j] = \sum_{j=1}^k \varphi_j \quad (5.1)$$

Ennek alapján a készenléti tényező meghatározásához meg kell oldani a folyamathoz tartozó beágyazott Markov-láncrea a

$$\Pi = \Pi P \quad (5.2)$$

egyenletet [1], és abból kell meghatározni a stacionárius intervallum átmeneti valószínűségeket az összefüggés alapján.

$$\psi = \frac{1}{\tau} \Pi M \quad (5.3)$$

5.2 Az első meghibásodás várható ideje, MTFF

MTFF-nek nevezzük a meghibásodás bekövetkezésének várható idejét, feltéve, hogy a $t=0$ -ban a rendszer a tökéletes állapotban volt. Az általánoság megszorítása nélkül feltesszük, hogy az X_1 állapot jelöli a rendszer tökéletes állapotát. Ekkor a $\psi_R(0)$ k hosszúságú kezdeti eloszlás vektor feltételezésével az (4.10) kifejezés felhasználásával

$$MTFF = \{1 \ 0 \dots 0\} \bar{N}_{RR} I_k, \quad (5.4)$$

ahol $\bar{N}_{RR}$ az R állapotcsoportra vonatkozó várható átlépési idők mátrixa; mérete $k \times k$.

5.3 A következő meghibásodás várható ideje, MTTF

MTTF-nek nevezzük a meghibásodás bekövetkezésének várható idejét, feltéve, hogy a $t=0$ -ban a rendszer egy jó állapotban volt. Itt azt tételezzük fel csupán, hogy a rendszer 1 valószínűséggel működőképes állapotban volt.

A kezdeti eloszlás akkor

$$\psi_R(0) = \frac{\psi_R}{\psi_R I_k}$$

és így

$$MTTF = \frac{\psi_R}{\psi_R I_k} \bar{N}_{RR} I_k \quad (5.5)$$

5.4 Várható működési idő, MUT

MUT a következő meghibásodás várható ideje, feltéve, hogy a $t=0$ -ban fejeződött be a javítás. A mostani helyzet kissé eltér az eddigiektől, hiszen az (4.10) összefüggés felhasználásához meg kell határozni azt a stacionárius valószínűségi eloszlást, amely megadja azt, hogy az S állapotcsoportból való kilépést követően a folyamat milyen valószínűséggel lép be először valamelyik R állapotcsoportba.

Jelölje $f_{ij}(t)$ annak valószínűségét, hogy az a folyamat, amely a $t=0$ -ban lépett be az $i \in S$ állapotba, a t időpillanatban lép ki először az S állapotcsoportból és egy $j \in R$ állapotba lép be. Ezt az eseményt úgy lehet elképzelni, hogy a folyamat τ idő alatt bizonyos számú lépésben átkerül egy $k \in S$ állapotba, és azt követően $t - \tau$ idő alatt egy lépésben átlép a $j \in R$ állapotba. Mindezt kifejezésbe foglalva

$$f_{ij}(t) = \int_0^t \sum_{r=k+1}^N \varphi_{ir}(\tau) p_{rj} h_{rj}(t-\tau) d\tau \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned} j &= 1, 2, \dots, k, \\ i &= k+1, \dots, N, \quad t \geq 0 \end{aligned}$$

Használjuk most is a megoldásra a már bevált transzformációs módszert, és képezzük a (5.6) összefüggés Laplace alakját

$$\dot{f}_{ij}(s) = \sum_{r=k+1}^N \dot{\varphi}_{ir}(s) p_{rj} \dot{h}_{rj}(s) \quad (5.7)$$

Ezt mátrix alakban felírva

$$\dot{F}_{SR}(s) = \dot{\Phi}_{SS}(s) (P_{SR} \square \dot{H}_{SR}(s)) \quad (5.8)$$

A Laplace-transzformáció határértéktételének segítségével

$$\begin{aligned} F_{SR} &= \lim_{s \rightarrow 0} s \dot{F}_{SR}(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \dot{\Phi}_{SS}(s) = \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} (P_{SR} \square \dot{H}_{SR}(s)). \end{aligned} \quad (5.9)$$

Figyelembe véve azt, hogy

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \dot{\Phi}_{SS}(s) = \Phi_{SS} \quad \text{és} \quad \dot{H}_{SR}(0) = U_{SR},$$

azt kapjuk, hogy

$$F_{SR} = \Phi_{SS} \cdot P_{SR} \quad (5.10)$$

Ha feltesszük, hogy a folyamat a $t=0$ -ban 1 valószínűséggel tartózkodott valamelyik $i \in S$ állapotban, akkor a feltétel nélküli f_R valószínűségi sorvektor

$$f_R = \frac{\psi_S}{\psi_S I_{N-k}} \Phi_{SS} \cdot P_{SR} = \psi_S \cdot P_{SR} \quad (5.11)$$

ahol $\psi_S = \{\psi_{k+1}, \dots, \psi_N\}$. A kapott eredmény egyszerűen abból adódik, hogy a stacioner intervallum átmeneti valószínűségek, mint tudjuk, függetlenek a kezdeti valószínűségeloszlástól.

Mivel mi az S állapotcsoportból történő kilépést követő eloszlásra vagyunk kíváncsiak, így azt a megfelelő normalizálással kapjuk meg, azaz

$$\psi_R(0) = \frac{f_R}{f_R I_k} = \frac{\psi_S P_{SR}}{\psi_S P_{SR} I_k} \quad (5.12)$$

A (4.10) kifejezésbe behelyettesítve

$$MUT = \frac{\psi_S P_{SR}}{\psi_S P_{SR} I_k} \bar{N}_{RR} I_k \quad (5.13)$$

5.5 Várható kiesési idő, MDT

MDT a javítás elvégzésének várható idejét adja, feltéve, hogy a $t=0$ -ban következett be a meghibásodás. Világosan látszik, hogy most is ugyanazzal a problémával állunk szemben, mint az előző részben, felcserélve R és S állapotcsoportnak a szerepét.

Az előző pont analógiájára

$$\psi_S(0) = \frac{f_S}{f_S I_{N-k}} = \frac{\psi_R P_{RS}}{\psi_R P_{RS} I_{N-k}} \quad (5.14)$$

és így

$$MDT = \frac{\psi_R P_{RS}}{\psi_R P_{RS} I_{N-k}} \bar{N}_{SS} I_{N-k} \quad (5.15)$$

5.6 Várható ciklus idő, MCT

Az MCT két egymást követő meghibásodás közötti átlagos idő a meghibásodási és a javítási időket beleértve. Az MCT-t nem kell külön levezetni, mivel ez a definícióból egyszerűen a következő módon megadható:

$$MCT = MUT + MDT \quad (5.16)$$

A fenti várható ciklusidő ismeretével meg tudjuk határozni a készletléti tényezőt a következőképpen is:

$$K = \frac{MUT}{MCT} = \frac{MUT}{MUT + MDT} \quad (5.17)$$

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk kidolgozása során Dr. Jereb László a műszaki tudományok kandidátusa témavezetőm és Telek Miklós villamosmérnök kollégám sokat tettek az eredmények ellenőrzésével és hasznos észrevételeikkel. Az értékes segítségért a szerző ezúton is mond köszönetet.

A tanulmány során szükségessé vált az ún. kongruens (meg-
egyező) mátrixszorzás (angolul: Congruent matrix multiplicati-
on) bevezetése. Legyen A és B két azonos méretű mátrix. Az A és
B mátrix C kongruens szorzatának a mérete ugyanakkora, és az
elemek a következő módon megkaphatók:

$$c_{ij} = a_{ij} \cdot b_{ij} \quad \forall i, j \text{-re} \quad (F.1)$$

Így a kongruens mátrixszorzás az azonos helyen lévő elemek
szorzatából adódik. A kongruens szorzás műveletét kis négyzet
alakú "doboz" operátorral jelöljük, és így az (F. 1) kifejezés má-
trix formában is felírható:

$$C = A \boxtimes B$$

A kongruens mátrixszorzás nem csak egyszerű mátrix szor-
zásra alkalmazható, hanem mátrixok formálására és csonkításá-
ra is. Így például, ha $I = \{\delta_{ij}\}$ jelöli az egységmátrixot, és $U = \{u_{ij} = 1\}$
a csupa 1 elemű mátrixot, akkor az $(A \boxplus I)$ mátrix az A mátrix fő-
átlóját tartalmazó diagonál mátrix, és $(A \boxminus (U - I))$ viszont meg-
egyezik az A mátrix-szal, nulla főátlóbeli elemekkel.

Könnyen mutatható, hogy a kongruens mátrixszorzás rendel-
kezik több hasznos algebrai tulajdonsággal.

Például legyen A, B és C azonos méretű mátrix, az (F. 1) kifejezés
segítségével bebizonyítható, hogy a kongruens mátrixszorzás:

$$\text{Kommutatív} \quad A \boxtimes B = B \boxtimes A \quad (F.3)$$

$$\text{Asszociatív} \quad (A \boxtimes B) \boxtimes C = A \boxtimes (B \boxtimes C) \quad (F.4)$$

$$\text{Disztributív} \quad A \boxtimes (B + C) = (A \boxtimes B) + (A \boxtimes C) \quad (F.5)$$

Továbbá definiálhatjuk az A mátrix kongruens inverzmátrixát
 A^{-1} úgy, hogy

$$A \boxtimes A^{-1} = A^{-1} \boxtimes A = U \quad (F.6)$$

$$\text{így } A^{-1} = \{a^{-1}_{ij} = \frac{1}{a_{ij}}\}.$$

- [1] HOWARD, R.A.: Dynamic Probabilistic Systems.
Volume I.: Markov Models.
Volume II.: Semimarkov and Decision Processes.
John Wiley & Sons, INC. New York, 1971.
- [2] ROSS, S. M.: Applied Probability Models with Optimization
Applications. Holden-day, San Francisco, 1970.
- [3] ROSS, S. M.: Introduction to Probability Models.
Academic Press N. Y.-London, 1972.
- [4] KLEINROCK, L.: Queuing Systems. Vol I: Theory
John Wiley & Sons, New York, 1975.
- [5] BUZACOTT, J. A.: Markov Approach to Finding Failure Times
of Repairable Systems. IEEE. Trans. on Reliability, Vol. R-19
Nov. 1970. pp. 152-156.
- [6] TAKÁCS, L.: Introduction to the Theory of Queues.
New York, Oxford University Press, 1962.
- [7] TOMKÓ, J.: Renewal Method in the Theory of Semi-Markov
Processes on Arbitrary Spaces. Prob. Theory and Math. stat.
VNU Science Press, 1986.
- [8] FELLER, W.: An Introduction to Probability Theory and Its App-
lications, Vol.I., John Wiley & Sons, N.Y. 1957.
- [9] FELLER, W.: On Semi-Markov Processes.
Proc. National Academy of Science, 51, (1964) pp. 653-659.
- [10] JEREB, L.: Számítási módszerek bonyolult rendszerek meg-
bízhatóságának meghatározására. Kandidátusi értekezés,
Budapest, 1985.
- [11] BEGAIN, K.: Bonyolult rendszerek megbízhatósági vizsgálá-
ta. Diplomaterv, BME-HEI, 1986.
- [12] TELEK, M.: Bonyolult rendszerek megbízhatósága. Diplo-
materv, BME-HEI, 1987.

(Folytatás a 232. oldalról.)

Az NSZK Bundespost magánvállalatot preferál a mobil telefon
hálózat kialakítására, így versenyt hozna létre az állami telefon-
társasággal. A Bell cég érdekeltségel, továbbá olyan vállalatok,
mint a Deutsche Bank, Racal Telecommunications és a Bell Ca-
nada Enterprise élénken érdeklődnek az NSZK piac iránt, ahol a
90-es évek elején várhatóan 130000, 2000-re pedig már 2 millió
cellás mobil telefon fog működni. Az amerikai Arthur D. Little pi-
ackutató cég becslése szerint egymillió előfizető évi 550 millió
USD árbevételt jelent. A Bundespost saját hálózatának kialakítá-
sát csupán 1991-re tervezi.

(Business Week, 1988. november 7.)

A BIS Makintosh piackutató intézet szerint a "lapos képernyők"
piaca 1992-ben 750 M USD, 1996-ra pedig 2 Mrd USD értéket fog
elérni. Az aktívelem-mátrixos lapos képernyők kereskedelmi cé-
lú gyártása terén máris jelentős előnyre tettek szert a japánok,
annak ellenére, hogy a kutatási szakaszban európai és amerikai
vállalatok játszottak úttörő szerepet. (Európában megintcsak
felmerül, miért nem tud az ipar marketinggel és tömeggyártással
reagálni a tudományos eredményekre.)

Különösen a legújabb termékek árcsökkenése szembeszökő.
Míg a 18 cm képátmérőjű színes aktívelemes mátrix ára 1987-
ben 600 USD körül volt, 1988 végére már 500 USD lesz, és várha-
tóan valamivel 250 USD felett fog megállapodni. Míg a 7,62 cm
átmérőjű aktívelem-mátrix ára 1987-ben 170 USD volt, e válto-
zat ára 1992-re várhatóan 70 USD-re csökken.

A katódsugárcsövek ára meglehetősen stabil marad - lévén
olyan beérett technika, amely terén nem várható jelentős, az elő-
állítási költségeket csökkentő újítás. A 30 cm-es ernyőátmérőjű
fekete-fehér (monokrom) csövek ára már 20 USD alatt van, míg a
35 cm-es színes csöveké 70 USD körül. Ez utóbbi ugyan 1992-
ig csökken néhány dollárral, ez azonban nem számottevő ol-
csóbbodás.

Jelenleg a folyadékkristály megjelenítők alkalmazása gyakor-
latilag a zsebtelevíziókra és a hordozható számítógépekre kor-
látozódik. Ezek az eszközök az 1990-es években lesznek ver-
senyképesek árban a hagyományos technikákkal. Jelenleg a pi-
ac 60 %-át a miniatűr képernyőkkel elégítik ki, de ez az arány ro-
hamosan csökken (1996-ra 19 %-ra).

A 640 és 400 képelem felbontású "lapos képernyők" gyártása
megindult és ez azt ígéri, hogy az 1990-es évek közepére 1024
x 1024-es felbontásúak készülhetnek. Jelenleg az aktív mátrixos
megjelenítők 12 %-át képviselik a folyadékkristályosak. Ez az
arány 1996-ra 40 %-ot fog elérni.

Országoként tekintve, a piacot ma Japán uralja: részesedése
94,8 %, míg az USA 3,7 %-ot, Európa 1,5 %-ot mondhat magáé-
nak. Japán sikere abban rejlik, hogy hatalmas teljesítőképessé-
gű iparát fogyasztói tömegcikk termékekre tudta ráállítani.
1992-ben az USA 10,7 %-ra, Európa 6,7 %-ra reméli növelni pi-
aci részesedését. 1996-ra ezek az arányok 20,3 %, ill. 8,8 %
lesznek.

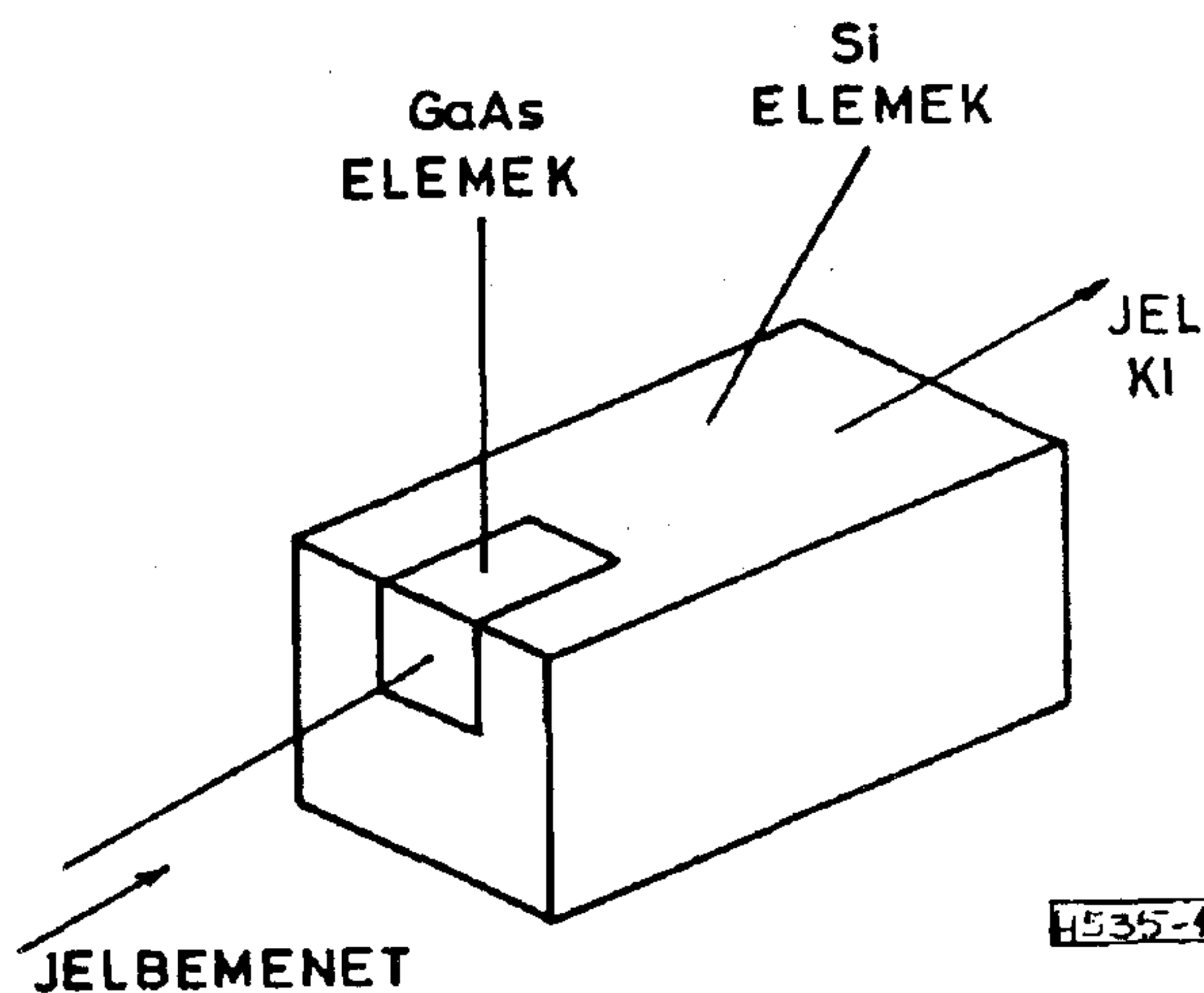
(Elektronique Industrielle - OMIKK Mikroelektronikai Gyorstájé-
koztató, 1989/4.)

(Folytatás a 249. oldalon.)

Az első szilícium-galliumarzenid monolit integrált áramkör

A szilícium napjaink legfontosabb félvezető anyaga. A germánium speciális félvezető eszközök alapanyaga lett, alkalmazása egyre szűkül, a vegyületfélvezetők alkalmazása egyre bővül, elsősorban a mikrohullámú és optoelektronikai területeken. Mai ismereteink szerint azonban itt nem várható olyan váltás, mint a germánium és a szilícium között lezajlott. A szilícium gyakorlatilag korlátlanul áll rendelkezésünkre, igaz, hogy a vegyületfélvezetőket sem korlátozza a szükséges nyersanyag hiánya, mivel egyre több ilyen vegyületfélvezető hulladékot újrafeldolgoznak. A szilícium eszközök technológiája jelenti a mikroelektronikai technológia csúcsát, ettől a gallium arzenid (GaAs) eszköztechnológia élvonalának lemaradása 5-8 évre tehető. Ebben részben az anyagi jellemzők (pl. mechanikai szilárdság) illetve a megfelelő anyagtudományi ismeretek hiánya jelenti a fő nehézséget. A szerző véleménye szerint az emberiség, mint anyagot, a szilíciumot ismeri legjobban. A GaAs eszköztechnológia viszonylagos elmaradásának további oka az, hogy az alacsony hőmérsékleten (kb. 500°C) bekövetkező termikus bomlás miatt a szilícium eszköztechnológia egy sor lépése nem alkalmazható. További nehézség az, hogy a GaAs saját oxidja maszkolásra nem használható, egyéb dielektrikumok felvitelével pedig mindeddig nem sikerült megfelelő határrejteget előállítani. (Ez az oka annak, hogy a GaAs tranzisztorok és IC alapeleme a fém-félvezető átmenet, s a tervezérlést itt ennek az átmenetnek a kiűrtésével oldják meg.)

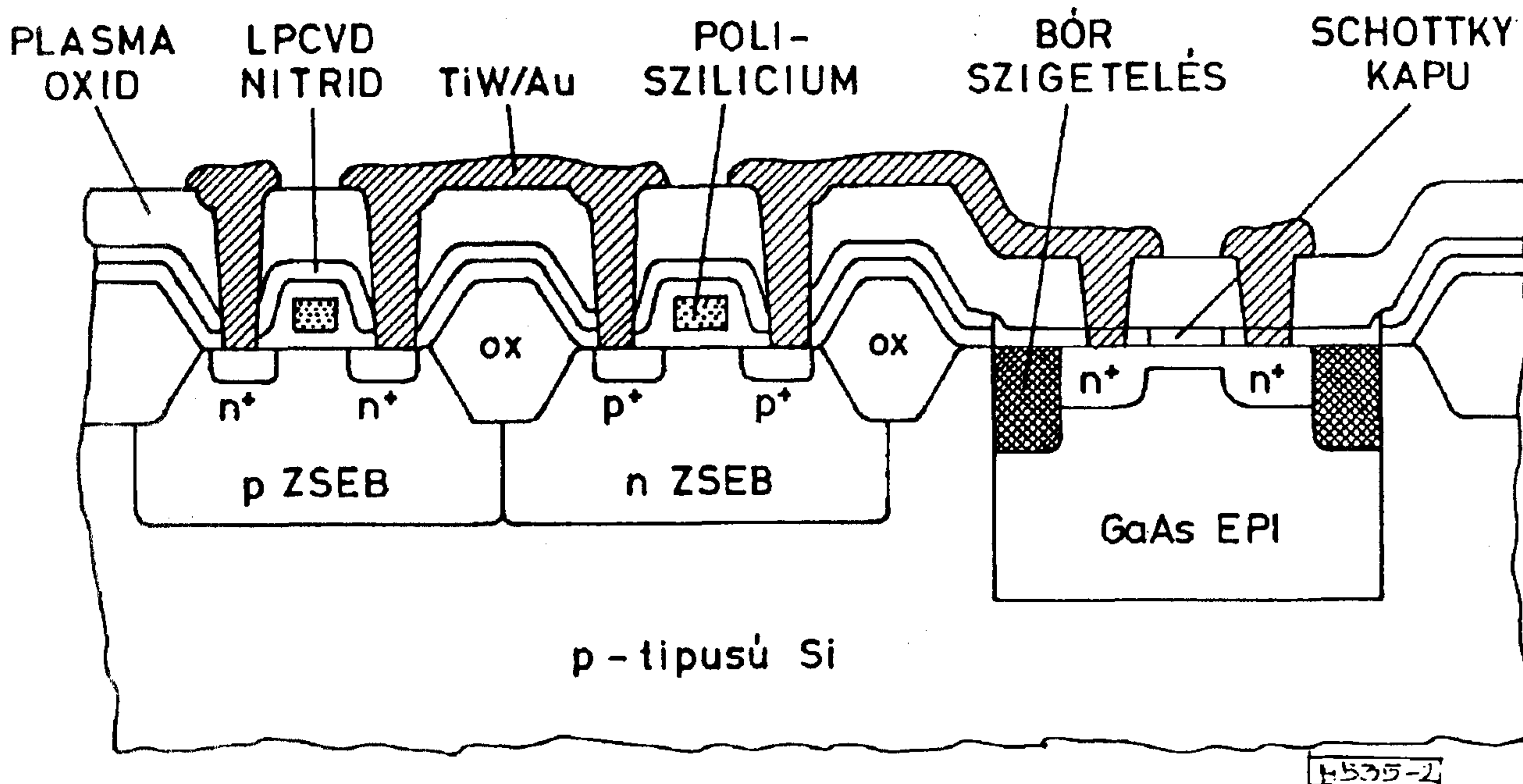
A GaAs mint anyag azonban számos vonzó fizikai tulajdonsággal rendelkezik. A széles tilos sáv, a nagy határsebesség és mozgékony sávspeciális sáv szerkezet - többek között - lehetővé teszi a szilícium eszközöket esetenként jelentősen felülmúló sebességértékek elérését. Ezért lenne célszerű egy olyan integrált áramkör megvalósítása, amelynek a bemenetén GaAs elemek végeznék a gyors funkciókat (pl. frekvenciaosztás), majd a további feldolgozást az áramkör szilíciumból készített része végezné. Egy ilyen áramkör elvi rajzát mutatja az 1. ábra. Ennek során Si-hordozóra növesztenék a GaAs-t, ami a két kristály rácsállandójának különbsége miatt nem egyszerű feladat. Egy mostanában megjelent közlemény (Mikrowellen Magazin 14, No 7, 680 1988) tanúsítja, hogy a Texas Instruments kutatólaboratóriumában sikerült egy olyan kointegrációs eljárást kifejleszteni, mely segítségével sikerült egy chip felületén 76 elemből álló gyűrűs oszcillátort létrehozni. (Ismeretes, hogy 30 évvel ezelőtt J.S. KILBY az első integrált áramkör megalkotója is ilyen eszközzel



1. ábra

bizonyította be az integrálás lehetőségét. Az így kifejlesztett áramkör metszeti rajzát a 2. ábra szemlélteti.) Mint látható, a GaAs epitaxiális réteget egy 2-3 μm mély "zsebbe" helyezték el, így a szelet felülete sík maradt, ami a litográfia szempontjából kedvező. Az eljárás nagyszámú technológiai lépés igen megbízható megvalósítását teszi szükségessé. Az így előállított elemek jól használhatóak a gyorsműködésű számítógépekben. A GaAs alkalmazása ezekben az áramkörökben két-háromszoros sebességnövekedést tesz lehetővé. További előny, hogy a GaAs szigetben optoelektronikai elemek is kialakíthatók, melynek segítségével az optikai kábeleken megszokott adatátviteli sebesség 10...20-szorosára növelhető. Az így kifejlesztett technológiai eljárás tette lehetővé, hogy a GaAs-re jellemző nagy sebességet és előnyös optikai tulajdonságait, a nagy elemsűrűséget és kis teljesítményfelvételt mutató szilícium technika egyesítsék.

Dr. Mojzes Imre



2. ábra

Módszerek a nagybonyolultságú IC-k kihozatalának becslésére a gyártási eljárás szimulációjával

HOSSZÚ GÁBOR

Mikroelektronikai Vállalat

ÖSSZEFOGLALÁS

Az integrált áramkörök gyártásától elválaszthatatlanok az anyagminőség és a gyártóberendezések működésének ingadozásai. Az ezek által okozott hibák az áramkörök parametrikus és funkcionális tulajdonságaira hatnak. Attól függően, hogy melyik hibatípus a domináns, kétféle kihozatali szokás számítani.

A cikk tárgyalja a kihozatalcsökkenést előidéző hibák tulajdonságait, és az áramkörre gyakorolt hatásuk alapján történő osztályozásukat, majd bemutat számos, a hibák modellezésére és a kihozatal becslésére mostanáig kidolgozott statisztikus módszert.

Végül ismertetésre kerül egy új, mindkét hibatípust számításba vevő megközelítés a gyártási kihozatal becslésére.

I. Bevezetés

Az integrált áramkörök bonyolultságának növekedésével az eszközök méretel állandóan csökkennek, s így nő az áramkörök érzékenysége az eljárás véletlen ingadozásaitól. Mivel az IC gyártás jövedelmezősége egyenesen arányos a *kihozattal* (=a helyesen működő chippek és az összes gyártott chip számának hányadosa), világszerte növekvő erőfeszítéseket tesznek a kihozatal növelését szolgáló módszerek fejlesztésére. Ennek egyik fontos útja, hogy egy konkrét IC terv kihozatalát a gyártás elkezdése előtt igyekeznek CAD-módszerekkel *megjósolni*, és a gyártás során *megbecsülni* az egyes részlépések hatását a kihozatalra. Az így nyert ismeretekből meg lehet határozni azokat a szükséges változtatásokat az IC tervezési szabályokban és /vagy a gyártási eljárás feltételeiben, amelyekkel a kihozatalt növelni lehet [1].

II. A kihozatal becslési és optimalizálási feladat

Sok év óta foglalkoznak a kihozatal modellezés és optimalizálás feladatával [2, 10]. A kidolgozott módszerek két csoportba oszthatók. Az elsőbe tartozók azon alapulnak, amelyeknél az integrált áramkörök gyártásakor az elkészített áramkörök bizonyos jellemző értékeinek adott, ún. elfogadási tartományon belülre kell esniük.

Abban az esetben, ha a kihozatalt befolyásoló tényezők között csak a paraméterek értékinga-



HOSSZÚ GÁBOR

1985-ben végzett a Budapesti Műszaki Egyetem Villamosmérnöki Kar, Híradástechnika Szak, Műszaki fizika ágazatán "B" oktatási formában. 3 évig MTA ösztöndíjas aspiráns volt, jelenleg a MEV fejlesztő mérnöke. A Villamosmérnöki Karon

megrendezésre került Végzős Konferencián részt vett diplomamunkájával, melynek témája magasszintű fordító programok átvihetőségének vizsgálata volt. Azóta integrált áramkörök gyártási eljárásának statisztikus szimulációjával foglalkozik.

dozásait veszik figyelembe, a számított kihozatalt *parametrikus kihozatalnak* hívják, és ez lényegében mint egy tűrésmező kijelölési feladat jelenik meg. Az ún. *ponthibák* az áramkör *katasztrófális* meghibásodását okozhatják, az ezekből kapott kihozatalt *katasztrófális* vagy *funkcionális kihozatalnak* nevezik [4].

A funkcionális kihozatalbecslések olyan egyszerűsítő feltételezésekkel alapulnak, minthogy pl. a kihozatal csökkenéséért csak uniformizált ponthibák felelősek [7]. Finomabb modellek a hiba-, ill. a hibaméret-eloszlás különbözőségével is számolnak [9], valamint a chipen levő esetleges redundáns áramköröket is tekintetbe veszik [15]. A fenti megközelítések bizonyos alkalmazásokban megfelelőek, de az igen nagy bonyolultságú áramkörök esetében már nem tudnak kezelni minden tényezőt, ami a kihozatalra hat.

Az eddigi módszerek legnagyobb elvi hiányossága az, hogy determinisztikusan írják le a kihozatalcsökkenést előidéző - valójában véletlenszerű folyamatokat. Ennek kiküszöbölésére jelentek meg a statisztikus eljárás-szimulációs módszerek, amelyekben következetesen valószínűségi változóként veszik számításba a véletlenszerű megnyilvánulásokat.

A hibáknak tulajdonságaik alapján történő osztályozása továbbra is indokolt, hiszen az egyes hibaosztályokat külön-külön kezelve a legcélszerűbb módszereket alkalmazhatjuk, s így csökkenthetők a számítási költségek. A vizsgálat legnagyobb gátja az elfogadhatatlanul nagy számítási idő. Ezért az erőfeszítéseinknek arra kell irányulniuk, hogy a hibák tulajdonságait és hatását a gyártott áramkörökre minél jobban megismerve megtaláljuk a leglényegesebb pontokat az IC kihozatal csökkenésének folyamatában.

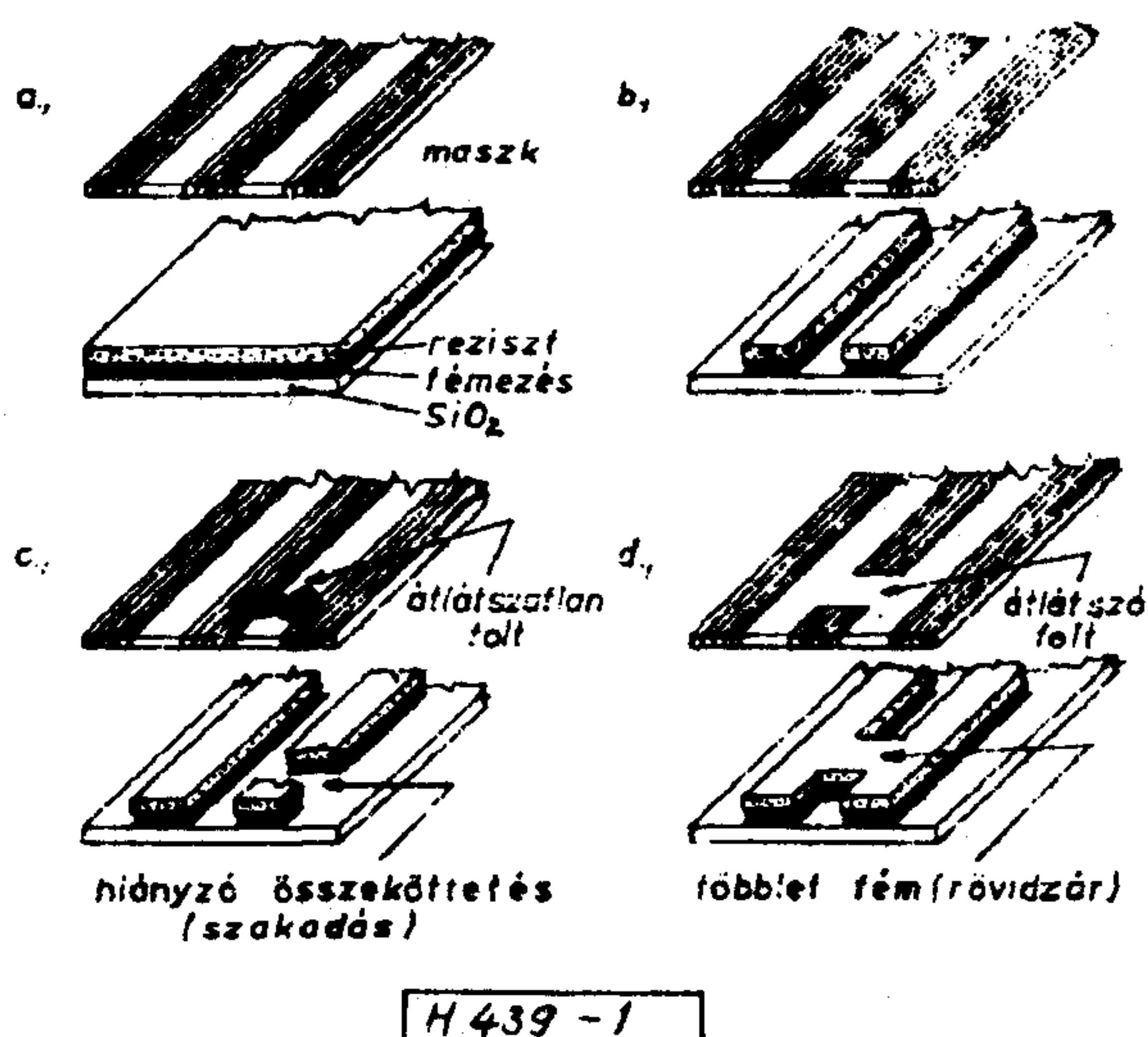
A cikkben először a kihozatal csökkenésének okait vizsgáljuk, majd a IV. és V. fejezetben néhány eddig kidolgozott parametrikus ill. funkcionális kihozatalszámítási módszer kerül bemutatásra.

Beérkezett: 1989. II. 10. (*)

A VI. fejezetben bemutatjuk egy új rendszer elvét és részletesen kifejtjük a fent leírt megközelítést.

III. A kihozatal csökkenésének okai

A kihozatal csökkenése az eljárás során fellépő hibákból adódik, amelyek a véletlenszerű, ún. eljárás-zavarok miatt jelennek meg. Az eljárás-zavaroknak azt a részét, amelyek az összes IC elemre egyaránt deformációként hatnak, *globális*-sáknak nevezzük. A maszk elillesztés egy példa a globális deformációra. Az eljárás-zavarok másik része csak helyi deformációkat okoz, amelyeket *helyi* zavaroknak nevezzük. Ilyenek pl. a túlyukak és általában a ponthibák. Ezekre látható példa az 1. ábrán.



1. ábra. A fémréteggel kapcsolatos ponthibák létrejöttének mechanizmusa

A hibákat eredetük szerint is lehet csoportosítani.

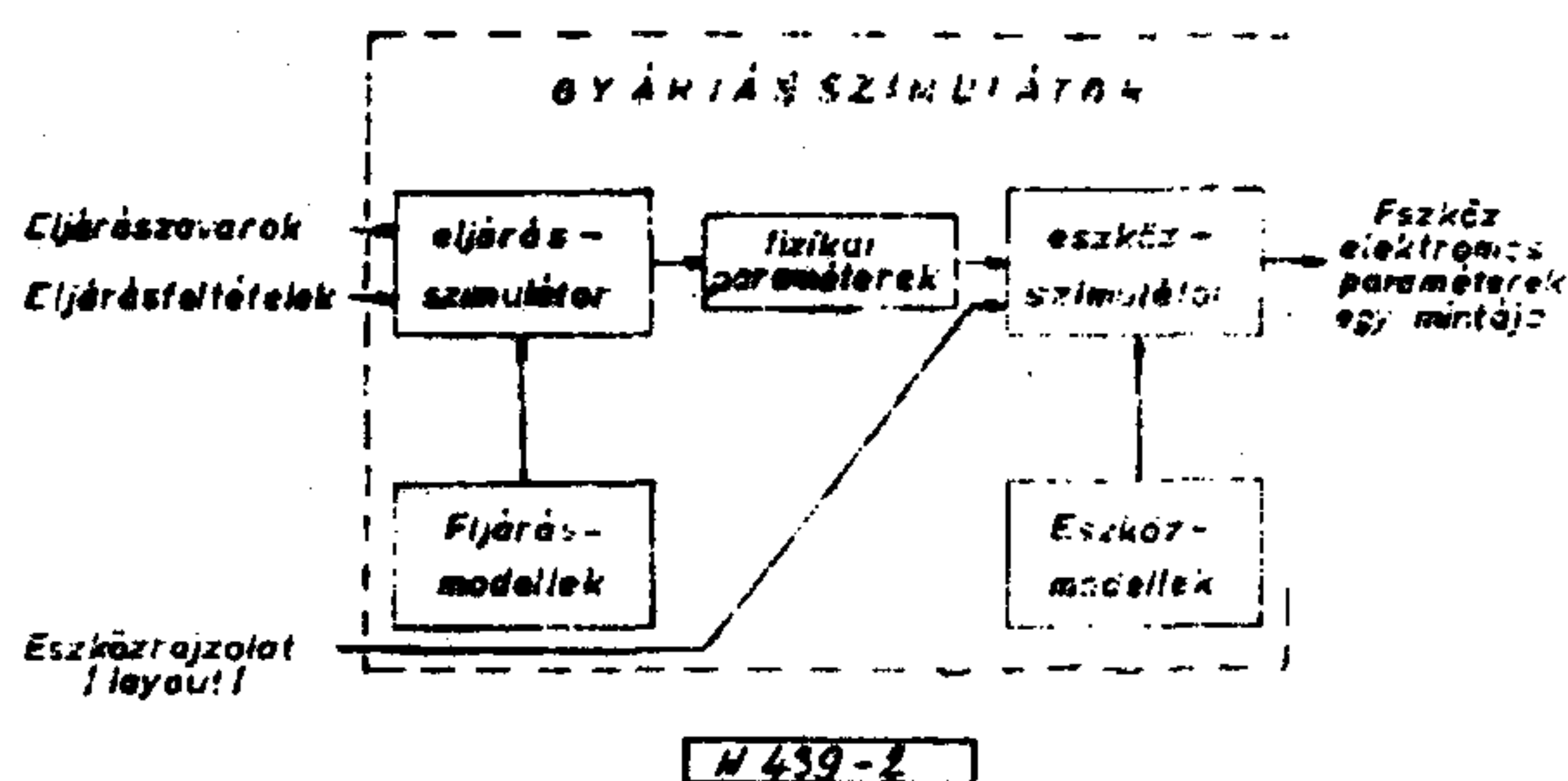
- Emberi hibák és a berendezések meghibásodásával,
- Instabilitások az eljárásfeltételekben,
- Anyagi instabilitások,
- Szubsztrát inhomogenitások,
- Litográfiával foltok.

A zavarokat aszerint is csoportosíthatjuk, hogy az IC geometriájára, vagy közvetlenül elektromos jellemzőire hatnak-e.

A *geometriai* deformációknak három típusát lehet megkülönböztetni: a *laterális hatások*, a *vertikális hatások* és a *ponthibák*. A laterális hatások lehetnek *laterális széleltolódások* vagy *maszk elillesztések*. Az előbbiek az anizotróp karakterisztikájú eljáráslépések, az utóbbiak a maszk-illesztés során fellépő véletlen hibákból erednek. A vertikális hatások az IC rétegek vastagságának és a pn-átmenet mélységének deformációját okozhatják.

IV. Parametrikus kihozatalszámítási módszerek

Az integrált áramkörök gyártásakor fellépő ingadozások a VLSI áramkörök elektromos paramétereinek szórását okozzák. A gyártási folyamatot ezért, mint sztochasztikus folyamatot kell szimulálni. Az egyik legjobban kidolgozott gyártásszimulátor, a Pittsburgh-i Carnegie-Mellon Egyetemen kifejlesztett FABRICS II (2), két fő részből áll, az egyik az eljárás-szimulátor, a másik pedig egy eszközszimulátor (2. ábra). Mivel itt az eljárást



2. ábra. Gyártásszimulátor felépítése

statisztikusan szimulálják, így a szimulátor által előállított eszközparaméterkészlet közelíti a valóságos gyártási eljárásból előálló paramétereket. A szimulált paraméterek tükrözik az eszközök közötti korrelációt is a chipen, szeleten ill. partin belül. Az eljárás pontosságát azt értjük, hogy a szimulátor kimenetének együttes valószínűségi sűrűségfüggvénye (EVSF) bizonyos pontossággal megegyezik a gyártósoron mért adatok megfelelő EVSF-ével.

Eljárás-zavarok

Az eljárás-zavarok fogalma azon alapfeltételezésen nyugszik, hogy az összes eljárásbelli ingadozás oka egy alacsony szintű, nem mérhető, nem szabályozható, statisztikusan függetlenül változó fizikai mennyiségekből álló csoport: ezek tagjait hívjuk eljárás-zavaroknak (6).

Az eljárás-zavarok statisztikájának meghatározását nehezíti, hogy azokat a fizikai okokat, amelyek a gyártási eljárás ingadozásaiért felelősek és amelyeket az eljárás-zavarok testesítenek meg, nem lehet a gyártási lépések modelljében használt paraméterekkel expliciten leírni. Például a szilícium kristálybelli hibák, amelyek a diffúziós eljárásra hatnak, létrejöhetnek a kristálynövesztés, a szilícium szelet polírozása vagy bármelyik hőmérsékleti vagy mechanikai kezelés hatására. Így nyilvánvaló, hogy a diffúziós eljárás modelljével nem tartalmazhatunk annyi paramétert, hogy az összes jelenséget leírják, ami a diffúzióra hat. Sok esetben

az ezeket a jelenségeket leíró statisztikai összefüggések expliciten nem is ismertek. Egy másik nehézség az, hogy azoknak a paramétereknek, amelyeket eljárás-zavaroknak választunk, statisztikusan független eloszlásúaknak kell lenniük, hogy egymástól függetlenül kezelhessük őket.

Szokásos feltételezés, hogy az eljárás-zavarok normális eloszlásúak. A szimmetrikus eloszlások ugyanis nagyon közel állnak a normális eloszláshoz, az ilyen eloszlású paramétert tehát normális eloszlásúnak tekinthetjük. Ha viszont az eloszlás nem szimmetrikus, akkor megfelelő nemlineáris transzformációval normális eloszlásúvá alakítható át. Az itt leírtakat kísérleti úton is igazolták [12].

Egy-egy chipre a valamilyen μ várható értékkel és σ szórással jellemzett normális eloszlású véletlenszám-generátorral (VSZG) az adott eljárás-zavar valósághű értékkel előállíthatók. Ahhoz, hogy az adott eljárás-zavart az egész partiban valósághűen írjuk le, figyelembe kell vennünk, hogy egy szeleten belül a különböző chipken megjelenő eloszlások sokkal jobban hasonlítanak egymáshoz, mint a különböző szeleten lévő chipok eloszlása. Az eljárás-zavarok eloszlása tehát a valóságban egymásraépülő, hierarchikus természetű.

Végül tekintsünk néhány példát az eljárás-zavarok kiválasztására. Elvileg bármelyik jelenséget választhatjuk eljárás-zavarnak, ha ez a többi eljárás-zavarnak választott mennyiségtől statisztikusan független. A gyakorlatban két fő csoportot különböztethetünk meg. Az elsőbe az eljárás-szabályozó paraméterek tartoznak (pl. hőmérséklet, nyomás, maszk elillesztés, gázok áramlási sebessége, stb.). A második a fizikai paraméterekben megjelenő szórásokat fejezi ki. Ilyenek pl. a foto-reziszt sűrűsége, a víz és a gázok tisztasága, a vegyületek fizikai jellemzői, a diffúziós állandó, az oxid növekedési tényező, stb. Az eljárás-zavarok, az eljárás-feltételek és az áramkör layoutja alapján elvileg megvalósítható az eljárás- és eszköz-szimuláció, s a végül kiadódó eszközparaméterek, amelyek értelemszerűen valóságnak megfelelő eloszlású véletlenszerű mennyiségek lesznek. Ennek alapfeltétele a bemeneti adatok helyessége. Az eljárás-feltételek és a layout paraméterek pontosságát viszonylag könnyebb biztosítani, az eljárás-zavarok értékét viszont nem, vagy csak nagyon bonyolult és hosszadalmas módon lehet megmérni. Így ahhoz, hogy egy szimulátor egy gyártósort valósághűen írjon le, rá kell *hangolni* az adott gyártósorra. Az eljárás-zavarok eloszlásfüggvényére elsősorban a tesztábrás mérések kiértékelésével lehet következtetni. Erre szolgál a PROMETHEUS [3] program, mely az eljárás-zavarok eloszlásfüggvényének meghatározásával ráhangolja a szimulátort az adott gyártási eljárásra.

A fentiek ismeretében nincs elvi akadálya annak, hogy az eljárásfeltételek és/vagy a layout tervezési szabályok megfelelő módosításával a kihozatalt maximalizáljuk. Ehhez a nagyon bonyolult, és a gyakorlatban csak elhanyagolásokkal megoldható feladathoz nyújtanak segítséget a FABRICS II-höz kidolgozott különböző egyszerűsíté-

téseket alkalmazó módszerek, melyek közül egyet a következőkben részletesen ismertetünk.

A legrosszabb-eset analízis

Az IC tervet addig kell módosítani, amíg a parametrikus kihozatal megfelelő értéket el nem ér. De minden egyes módosítás után újra elvégezni a kihozatalbecslést még a fent leírt egyszerűsítések mellett is elfogadhatatlanul sok számítási munkát igényel. Ezért az IC tervet gyakran az ún. *legrosszabb esethez* tartozó feltételek mellett ellenőrzik, vajon az áramköri jellemzők az elfogadhatósági határon belülre kerülnek-e [13]. A régebbi megközelítésekben az eszközparaméterek közötti korrelációk együtthatót nem veszik figyelembe, ezért az IC jellemzőkre vonatkozó becslés az eszközparaméterek valóságban soha elő nem forduló kombinációján alapján történik. Így az ilyen analízis eredménye túl pesszimisztikus lesz. A megoldást az jelenti, ha a legrosszabb-eset analízist a paraméterek egy alacsonyabb szintű készletére építjük, amik már független véletlen változóknak tekinthetők. Ilyenek az előzőekben tárgyalt eljárás-zavarok. Ez természetesen azzal jár, hogy szükségünk van egy gyártásszimulátorra is, amivel ezeket az eszközök elektromos paramétereire lehet kapcsolni, amikből azután pl. analóg szimulációval megkaphatók az áramköri paraméterek. Ezek után a legrosszabb-eset analízist külön-külön el lehet végezni az egyes IC paraméterekre, mint pl. az átlagos teljesítmény disszipáció, a jelkésleltetés, a felfutási ill. lefutási idők, stb. Az ismertetendő módszer először az áramköri paramétereknek az eljárás-zavarokra vonatkozó érzékenységet határozza meg. Ezt az eljárás-zavaroknak a névleges értékük körüli kismértékű perturbációja által az áramköri paraméterekben létrehozott változás alapján számítják ki [5].

Ezután érdemes közelebbről megvizsgálni, melyek is a szóbanforgó eljárás-zavarok. Többféle eljárás-zavar csoportot is ki lehet jelölni. Pl. a *vonalszélesség változását* (Δl), vagy magát a *vonalszélességet* (l) is tekinthetjük eljárás-zavarnak. Az eloszlásfüggvény szempontjából nincs különbség, hiszen a második változót úgy kapjuk, hogy a véletlen változó Δl -hez hozzáadjuk az l névleges értékét. A tárgyalás megkönnyítése érdekében olyan mennyiségeket választunk eljárás-zavaroknak, amelyek névleges értékkel az eljárás-feltételekből vagy a layout geometriából jönnek ki (példánkban l -t) és ezeket *tervezési paramétereknek* fogjuk hívni. A tervezési paraméterek természetesen szintén független véletlen változók, s ezért becsülni lehet egy adott kombinációjuk megjelenési valószínűségét az egyes tagok megfelelő értékkel megjelenési valószínűségeinek szorzataként. Ezt később ki fogjuk használni. A tervezési paraméterek egy adott kombinációjának megjelenési valószínűségéből kiszámítható a gyártott áramkör jóságának valószínűsége is. A gyakorlatban azonban úgy jelenik meg

a feladat, hogy gazdaságosságl, stb. számításokból kladódott egy ν minimális valószínűség, ami az áramkör parametrikus kihozatalának felel meg. Ezt az értéket felírhatjuk azon valószínűségekkel is, hogy az i -dik tervezési paraméter (x_i) elfogadható értéket vesz fel. Az előzőekben leírt függetlenségük miatt írhatjuk:

$$\nu = \prod_{i=1}^n \nu_{x_i} \quad (1)$$

Ha $\Phi(x_i)$ az (x_i) valószínűségi sűrűségfüggvénye és x_i^{LRE} -vel jelöljük a legrosszabb esethez tartozó feltételt, akkor

$$\nu_{x_i} = \int_{-\infty}^{x_i^{LRE}} \Phi(x_i) dx_i$$

vagy (2)

$$\nu_{x_i} = 1 - \int_{-\infty}^{x_i^{LRE}} \Phi(x_i) dx_i$$

attól függően, hogy milyen az éppen vizsgált áramköri paraméterhez tartozó x_i - re vonatkozó legrosszabb-eset irány.

Ha az összes tervezési paramétert ugyanakkora valószínűségi távolsággal térítjük el (pl $\pm 2\sigma$),

$$\nu_x = \nu^n \quad (3)$$

akkor az összes ν_{x_i} érték megegyezik egy ν_x -szel, tehát (1) átírva:

Továbbá a tervezési paramétereket normális eloszlásúaknak vesszük (hiszen az eljárás-zavarok bevezetésénél ezt tettük fel), akkor az x legrossz-

$$x_i^{LRE} = m_i + \omega_i \sigma_i \Phi^{-1}(\nu_x) \quad (4)$$

szabb esethez tartozó értéke a következő módon számítható:

ahol ω_i az i -edik tervezési paraméterhez tartozó LRE irány, az m_i és σ_i pedig az x_i valószínűségi sűrűségfüggvényének becsült várható értéke és szórása, Φ pedig a standard normális eloszlás eloszlásfüggvénye. Az x_i^{LRE} ismeretében ki lehet számítani az áramköri jellemzők legrosszabb esethez tartozó értékét. Példaként tekintsünk egy 7 tranzistoros $3\mu\text{m}$ -es NMOS technológiával készült OR kaput [5]. Átlagos teljesítmény disszipációjának és jelkésleltetésének a különböző tervezési paraméterektől való érzékenységet vizsgálták és a következőket találták a legnagyobb hatásúaknak a két áramköri paraméter ingadozására:

L_N - vonalszélesség a nitrídréteg litografálásában

L_P - vonalszélesség a polyszilíciumréteg litografálásában

D_B - bór diffúzió

D_{As} - arzén diffúzió

R_{OX} -száraz oxidálás parabolikus növekedési tényezője

Tehát az adott áramkörnél ezek azok a tervezési paraméterek, amelyekre a legrosszabb-eset analízist el kell végezni.

Áramköri jellegzetességek figyelembevétele

A kihozatalszimuláció hatásosságát jelentősen lehet fokozni azzal is, ha a megvalósítandó áramkörből kiindulva, az áramkör működése szempontjából legfontosabb részre végzik el a kihozatal-lemzést. Egy ilyen megközelítés [8] abból indul ki, hogy az analóg MOS áramkörökben (mint pl. a szűrő, az A/D konverter, a kódoló, stb.) a működés kritikusan függ az áramkörbeli kapacitás-arányok pontosságától. Egyszerű alapfeltevésekből kiindulva kimutatták, hogy a $\Delta C/C$ relatív hiba arányos $C^{-\frac{3}{4}}$ -nel, ha csak a szélhatást vesszük figye-

lembe, és $C^{-\frac{1}{2}}$ -nel, ha az oxid szórása a domináns hatás. Ezek az eredmények hasznosíthatók annak meghatározásánál, hogy egy adott esetben melyik mechanizmus okozza elsősorban a kapacitás szórását, feltéve, hogy $\Delta C/C$ szórásáról a kísérleti adatok rendelkezésre állnak.

V. Funkcionális kihozatalszámítási módszerek

A funkcionális kihozatal csökkenését döntő részben a katasztrófális hibák okozzák. A katasztrófális hibák általában helyi hibák, főleg ponthibák, és túlnyomó részben a litográfiai műveletekkel kapcsolatban jelennek meg. Ezért a funkcionális kihozatal modellezésére vonatkozó megközelítések elsősorban a litográfiai maszkokkal kapcsolatos ponthibákra összpontosítottak.[7,9].

Azon modellekkel szemben, amelyek a litográfiának a gyártási kihozatalra való hatását írják le, három fontos elvárásunk van.

1. A maszkon fellépő litográfiai hibáknak a gyártási kihozatal csökkenésében játszott szerepének becslése.

2. A maszk korlátozta kihozatal jóslása a maszkellenőrzésből kapott eredmények alapján.

3. A tervezési szabályok optimalizálása tekintettel a rendelkezésre álló litográfiai eljárásra.

Egyes, nagyon egyszerű módszerek közvetlenül a maszkhibák előfordulási gyakoriságából vonnak le következtetéseket a katasztrófális kihozatal csökkenésére. Ezeknek az a legnagyobb hibájuk, hogy nem veszik figyelembe, hogy egy maszkon lévő hiba vagy szennyező részecske a valóságban milyen hibát okoz. Márpedig a chipen megjelenő hibák egy része teljesen hatástalan az áramkör működése szempontjából, pl. a helyzeténél fogva. Ezen kívül az egyes hibák hatását jelentősen befolyásolja a hiba geometriai környezete, a hiba mérete, az, hogy milyen rétegre vagy rétegekre hat, stb.

Az optikai hibák pl. a következő deformációkat okozhatják az IC layouton:

a/ a vezető csík megszakadása,

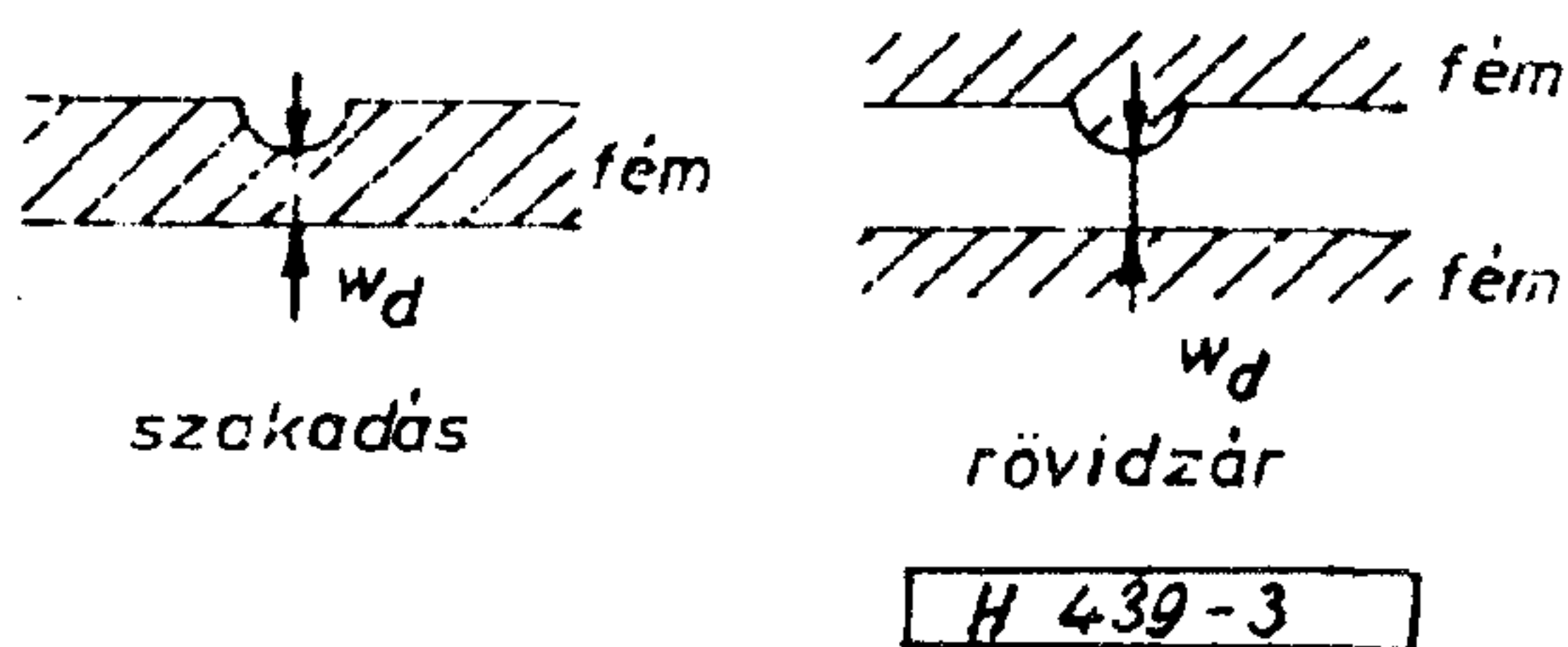
b/ rövidzár,

c/ nem várt aktív (parazita) elem megjelenése.

Egyszerűsített kihozatalbecslési modell

A kihozatalbecslési feladat megoldásának megkönnyítése érdekében érdemes néhány egyszerűsítő feltételezéssel élnünk. A későbbiekben meg fogjuk nézni, hogyan lehet az eljárást kiterjeszteni a figyelmen kívül hagyott esetekre is.

- Minden chipre azonos x számú ponthibát veszünk figyelembe.
- Csak egy maszkot veszünk számításba.
- A ponthibákat kör alakúaknak vesszük, így jellemző paraméterük az R sugaruk.
- Csak az a/ típusú hibákra szorítkozunk, vagyis a vezető csík szakadását (elvékonyodását) vizsgáljuk.
- A chipen csak azonos szélességű párhuzamos csíkokból álló layoutot feltételezünk (3. ábra).



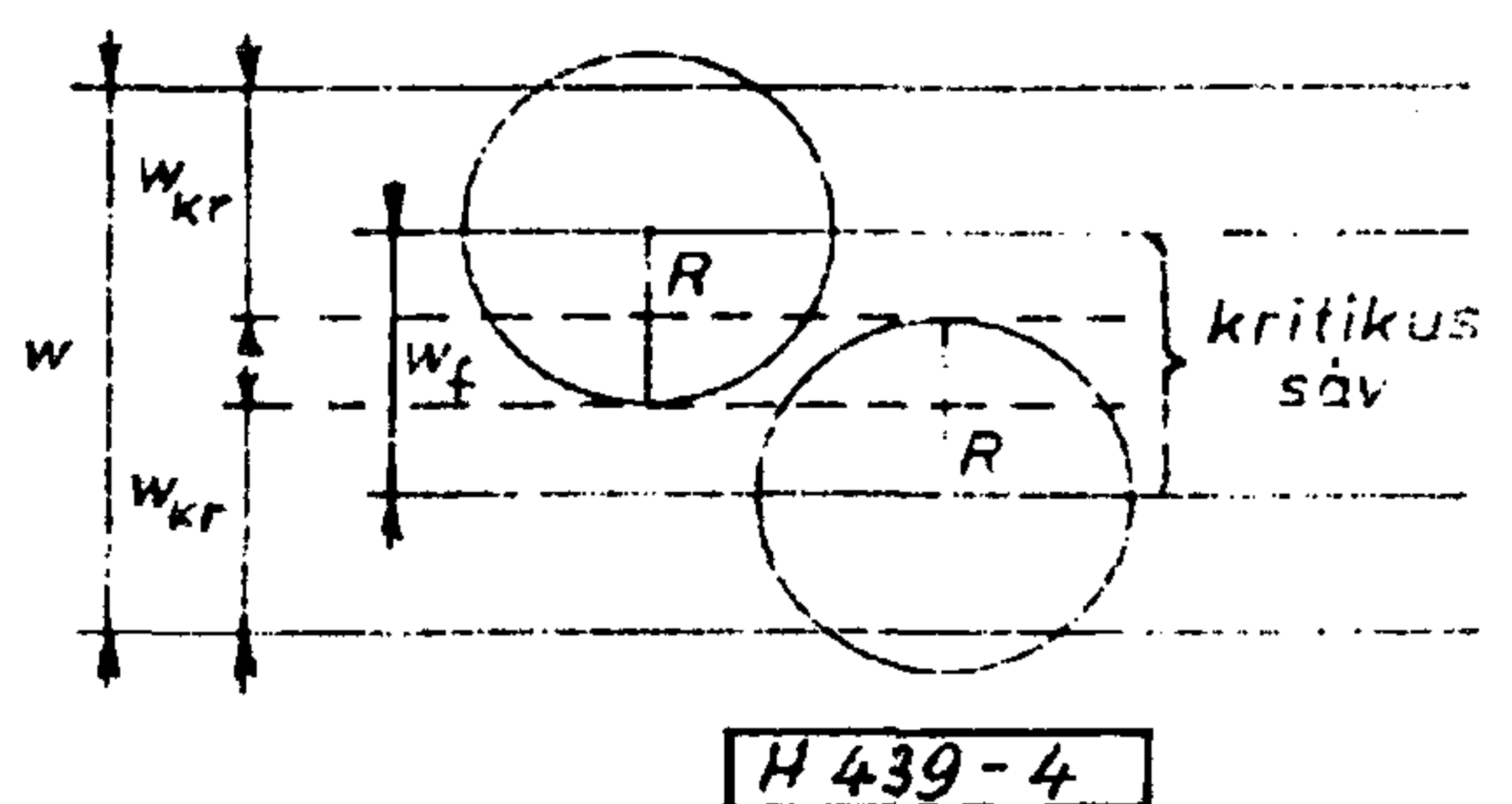
3. ábra. Ponthiba hatása a fémezésre

A deformált szélességet nevezzük W_d -nek. Indokolt bevezetni egy W_{kr} kritikus csíkszélességet, amelynél ha kisebb W_d , a hibát figyelembe kell vennünk. W_{kr} függ a szóbanforgó réteg fizikai tulajdonságaitól és az áramsűrűségtől.

Így a kihozatal egyenlő annak a valószínűségével, hogy minden maszkhibára $W_d \geq W_{kr}$.

A valóságban az R -t valószínűségi változónak kell tekintenünk, $f(R)$ sűrűségfüggvénnyel, melyet most tekintsünk Poisson eloszlásúnak, a későbbiekben még visszatérünk rá. Ezek után vizsgáljuk meg, hogy adott R sugar esetén hol helyezkedhetnek el a ponthibák középpontjai, hogy hibát okozzanak. Tekintve, hogy csak a $2R > W - W_{kr}$ méretű ponthibák okozhatnak hibát, könnyen meggondolhatjuk, hogy minden fémcsíkhöz egy ún. kritikus sáv lesz a keresett mértani hely. Ha W a vezető csík szélessége és egy $W_f = 2(R + W_{kr}) - W$ szélességű sávon belülre esik a ponthiba középpontja, $W_d < W_{kr}$ lesz, így áramköri hibát okoz (4. ábra).

A helyzetet bonyolítja, hogy $f(R)$ a maszkon vagy a fotorezisztén lévő szennyező részecskék vagy foltok sűrűségfüggvénye, a chipen megjelenő hibák nagyságát azonban befolyásolja még a litográfiail műveletek pontatlansága is. Így a pont-



4. ábra. A kritikus sáv

hiba valódi átmérője: $R_v = R + \Delta W$, ahol ΔW normális eloszlású valószínűségi változó, $f(\Delta W)$ sűrűségfüggvénnyel. Így W_f helyesebb értéke: $W_f = 2R_v + 2W_{kr} - W$.

A kihozatalt, azaz, hogy a hiba középpontja a kritikus területen kívülre esik, a kritikus sáv és R_v eloszlásának ismeretében ki lehet számítani.

Kihozatal becslési eljárás

Az előbbiekben egy nagyon leegyszerűsített esetre mutattuk be a hibamodellézést. A valóságghűbb leíráshoz a következő feladatokat kell megoldani.

Először is, csak a vezető sávban képződő elvékonyodásokat vettük figyelembe, de a fenti gondolatmenettel teljesen analóg módon számíthatjuk ki a szigetelő sávokban képződő elvékonyodások következtében fellépő hibák valószínűségét.

A másik gond, hogy a valóságos alakzatoknál a hibák összegzése és így a meghibásodási valószínűség bonyolultabb képlettel írható csak fel mint a vezető ill. a szigetelő csíkok esetén. Aktív eszközöknél W_{kr} értelmezése természetesen megváltozik.

Harmadikként figyelembe kell vennünk, hogy elvileg sem helyes egy-egy maszkra külön, egymástól függetlenül számítani a meghibásodási valószínűséget, hiszen a hiba hatása a kihozatalra jelentősen függ a hely fizikai jelentésétől, tehát a többi maszktól. Ez nyilván külön hibaanalízist igényel.

Egy áramkörben előforduló ponthibák x számára (7) szerint a következő megfontolásokat tehetjük. Mivel sok, a chip méretéhez képest elhanyagolható méretű túlyuk található egy chipen, ezért ezek Poisson eloszlást követnek. Így ha λ a túlyukak átlagos sűrűsége egy szeleten (túlyukak száma per az áramkörök száma) és $P(x)$ annak a valószínűsége, hogy egy adott áramkörben x túlyuk van, akkor

$$P(x) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^x}{x!} \quad (5)$$

Az egy áramkörre eső túlyukak számára vonatkozó eredményt továbbfejlesztve [9] λ -t valószínűségi

nűség! változóként lehet értelmezni, amelynek $(0, \infty)$ -n értelmezett sűrűségfüggvénye: $f(\lambda)$

$$P(x) = \int_0^{\infty} \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!} f(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

$f(\lambda)$ -t gamma eloszlással közelítve:

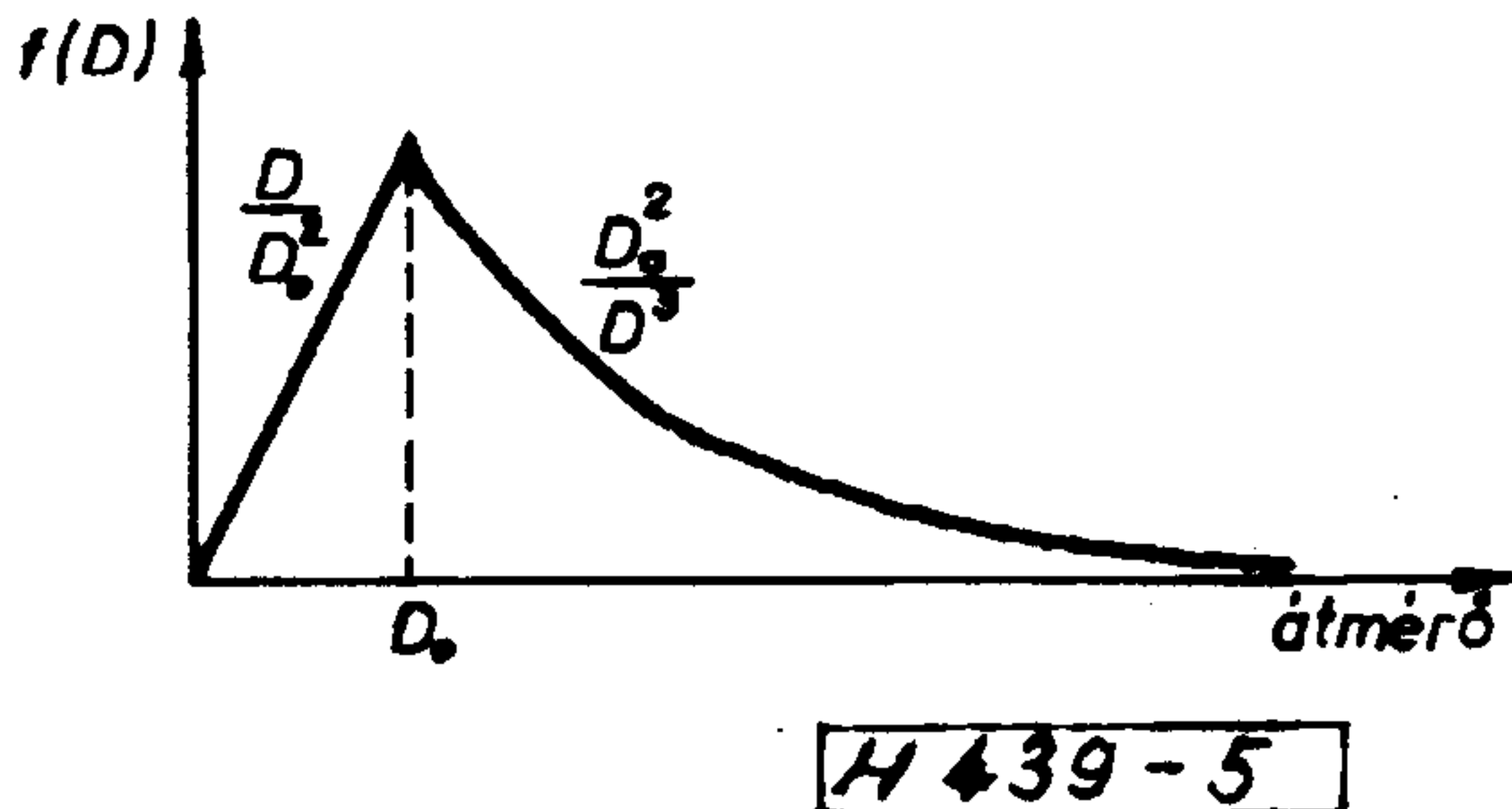
$$f(\lambda) = \frac{1}{\Gamma(\alpha) \cdot \beta^\alpha} \lambda^{\alpha-1} e^{-\lambda/\beta} \quad (7)$$

ezekután (6)-t integrálva kapjuk:

$$P(x) = \frac{\Gamma(x+\alpha)}{x! \Gamma(\alpha)} \cdot \frac{\beta^x}{(\beta+1)^{x+\alpha}} \quad (8)$$

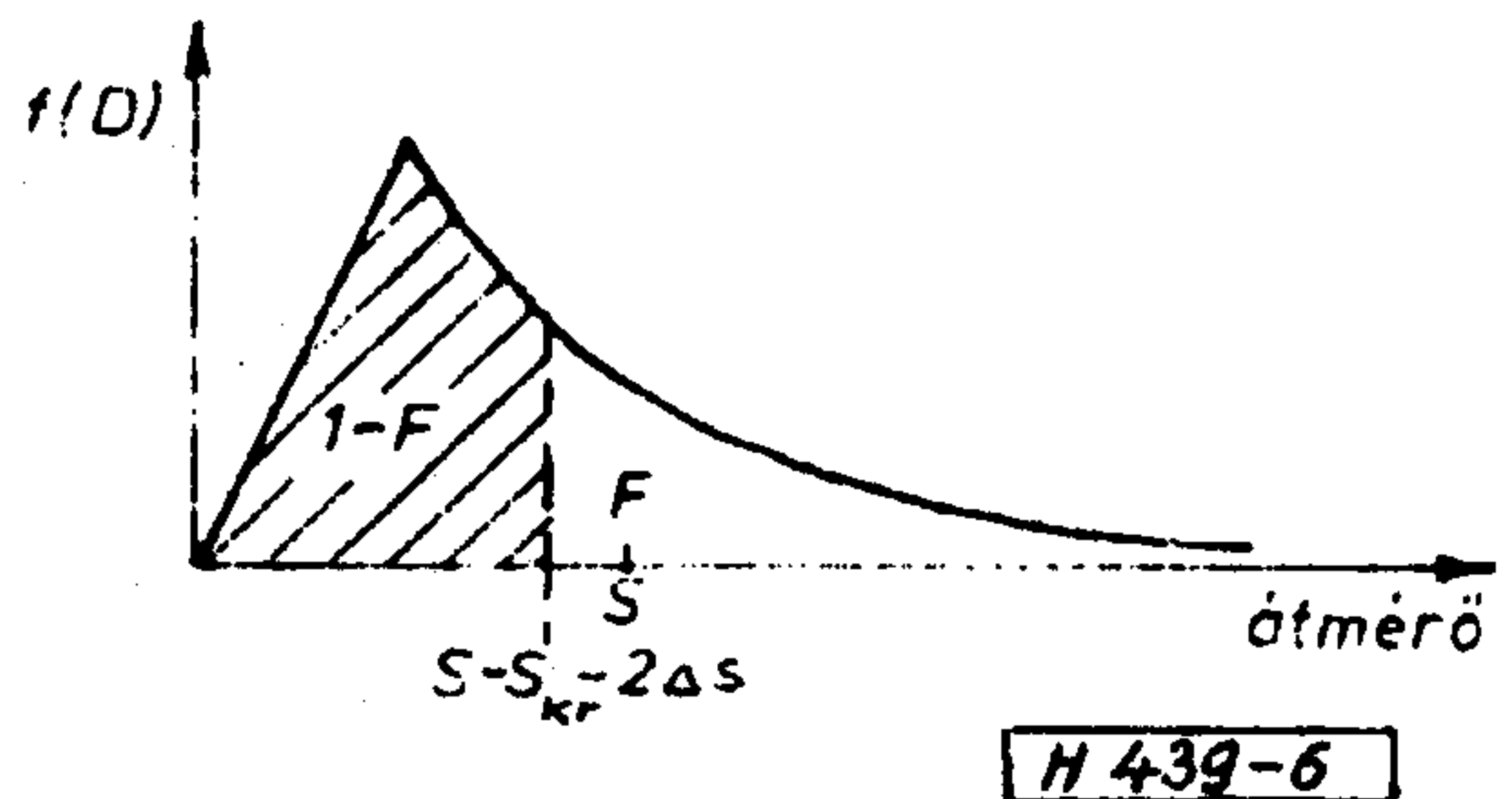
Ez pedig egy negatív binomiális eloszlás. Várható értéke $\alpha \cdot (\beta+1)$, szórásnégyzete: $\alpha \cdot \beta \cdot (\beta+1)$. α és β a mért adatok várható értékéből és szórásából megkapható.

Az eddigiekben a *hibák térbeli eloszlásával* foglalkoztunk, de a határos hibamodellezéshez a *hibaméret eloszlását* is ismernünk kell. Az előzőekben Poisson eloszlásúnak vettük a hibákat, de vannak eltérő megközelítések is. Ilyen pl. az 5. ábrán látható eloszlás, melyet tesztábrás mé-



5. ábra. Hibaméret-eloszlás

résekkel igazoltak (4,10). Itt a $D=2R$ hibaátmérő $f(D)$ sűrűségfüggvényét láthatjuk. A D_0 , a legnagyobb valószínűségű hibaátmérő nagysága megegyezik a litográfiai eljárás felbontóképességével. Így megkaphatjuk R keresett sűrűségfüggvényét, amit felhasználva az egyszerűsített kihozatalbecslési modellünkben, megkaphatjuk a ponthibák okozta kihozatalcsökkenést. R (ill. D) sűrűségfüggvényének ismeretében azonban más úton is eljuthatunk a kihozatalhoz. A további tárgyalás megkönnyítése érdekében csak a fémcsíkok között fellépő tűpont hibákat tekintjük. A tervezési szabályok előírják a fémcsíkok minimális távolságát a ship-layouton. Jelöljük ezt az értéket S -sel (6. ábra). Így az S -nél kisebb ponthibákat első közelítésben figyelmen kívül lehet hagyni. Ezek után annak a valószínűsége, hogy a fellépő pont-



6. ábra. Csonkított hibaméret-eloszlás

hiba elég nagy lesz ahhoz, hogy rövidzárlatot okozzon, megegyezik az F területtel, ami $D^2/(2S^2)$. Ha pl. $D_0 = 0,5 \mu m$ és $S = 3 \mu m$, akkor ha az $f(D)$ sűrűségfüggvény alapján generáljuk a szimulációban a tűpontokat, átlagban csak minden 72-diket kell figyelembe vennünk. Így 72-szeresére növelhetjük a tűponthiba szimulációjának hatásosságát, ha $f(D)$ helyett a csonkított sűrűségfüggvény alapján generáljuk a hiba-mintákat.

A pontosság kedvéért S helyett $S - S_{kr} - 2\Delta S$ -t kell számításba vennünk, ahol a két fémezés közötti azon legkisebb távolságot jelenti, amin keresztül még nincs átütés, $2\Delta S$ pedig a litográfiai eljárás során fellépő csíkszélesség-ingadozást jelöli.

VI. új megközelítés a gyártási kihozatal optimalizálására

Ha gyártási kihozatal javító számítógépes rendszert akarunk készíteni, akkor a következő - részben a feltételekből adódó - tényezőket kell figyelembe venni:

- A/ A számítási költségek nem lehetnek magasak és a számítási kapacitások nem korlátlanok.
- B/ Egy új technológia bevezetésénél nincsen, és valószínűleg rövid időn belül nem is lesz valószínű modellünk a gyártási eljárásról.
- C/ Ha új a technológia, sokkal kevesebb tapasztalat áll rendelkezésünkre, és ha kisebb sorozatok futnak, kevesebb adat van a statisztikai feldolgozáshoz.
- D/ Az eljáráshoz tartozó véletlen ingadozások nagyon nagyok, mivel ezek általában csak hosszú idő után csökkenthetők, mikor az egyes gyártóberendezések egyedi tulajdonságait megismerték.
- E/ Bármelyik kihozatalnövelésre irányuló módszernek olcsón megvalósíthatónak kell lennie.

Megvalósíthatónak tűnik az az elképzelés, hogy első lépésként egy kis- vagy közepes számítógépen futó kihozatal-javító programot kell készíteni, mely a mérési eredmények alapján időről időre javítja a benne lévő modellt és ezzel párhuzamosan folyamatosan ráhangolja magát a gyártási eljárásra (*önhangoló rendszer*). Ez javaslatokat tesz

majd az eljárás-feltételek és/vagy a tervezési szabályok módosítására, majd az ezek bevezetése után módosult eljáráson végzett méréseket kiértékelve javíthatja az előző ciklusban tett javaslatait.

Az eljárás-zavaroknak, mint valószínűségi változóknak az eloszlásfüggvényét *analitikusan* írjuk be a programba, természetesen néhány paramétert betéve a függvényekbe, amit a program módosíthat az eljárásra való ráhangolódásban. Egy áramkör-szimulátort is kapcsolunk a rendszerhez, hogy megkaphassuk, mely áramköri paraméterek a legérzékenyebbek az eljárás ingadozásaira, ill. mely előállítási jellemzők okozzák elsősorban az áramköri paraméterek szórását. A kihozatal növelésében ezután már csak ezen "lényeges" hatásokkal ill. az ezeket kiváltó előállítási jellemzőkkel kell foglalkoznunk. Természetesen a szimuláció végén, ha a valósággal való egyezés nem kielégítő, akkor számításba lehet venni az addig elhanyagolt hibamechanizmusok közül a kihozatal csökkenésében legnagyobb szerepet játszókat is.

A programcsomag első változatban egy IBM PC-n is megvalósulhat. Az A feltétel miatt könnyen kezelhető eljárás- és eszközlírást kell használni. Az egyszerűbb modell ellenére is, a célnak legmegfelelőbb illesztési eljárást használva a mért adatokból megfelelő eredményeket nyerhetünk, mint pl. [14]-ben.

A B feltétellel kapcsolatban a következő megfontolásokat kell tennünk. A szimuláció során azért kell bizonyos mennyiségeket véletlen változóként figyelembe venni, mert a gyártási eljárást leíró modellünk nem tökéletes. Ha durvább modellel dolgozunk, ezt a hátrányt részben ki lehet küszöbölni megfelelően választott véletlen változókkal. Ezek eloszlásfüggvényükben "hordozzák" a modellből kimaradt információkat. Csak hogy ezen eloszlásfüggvények így még bonyolultabbak, mint egy finomabb modell alkalmazása esetén, ami az eddigi kihozatal becslő és optimalizáló rendszerekben alkalmazott matematikai módszereknél is hatékonyabb és finomabb eljárás használatát kívánja meg a számítások idejének csökkentése érdekében.

Másrészt az eljárás-modell egyszerűsítése azt jelenti, hogyha egy olyan determinisztikus, kívülről beállítható tényező megváltozik, amely a sűrűségfüggvényekben jelentkezik, modellünkben ez egy vagy több valószínűségi változó eloszlásfüggvényének megváltozását eredményezi. Kíváncos ezért, hogy a félvezető gyártósoron az idő függvényében minél kevésbé változzanak a gyártási körülmények. Ez nem jelent akadályt a módszer bevezetésében, hiszen ez a feltétel egyébként is fennáll. Indokolt különböző bonyolultságú eljárás- ill. eszközmodellek [11] felállítása, melyek egymással kicserélhető modulokat alkotnak.

Rendszerünk folyamatos ráhangolódása a technológiára kiküszöböli a C-ben leírt nehézségeket is.

A D feltételt akkor lehet kielégíteni, ha minél jobban megismerjük az adott gyártósorra jellemző, a kihozatalt lerontó tényezőket. Ezt a tényezők kiválasztását a fentiekben leírtak szerint a program maga el fogja végezni.

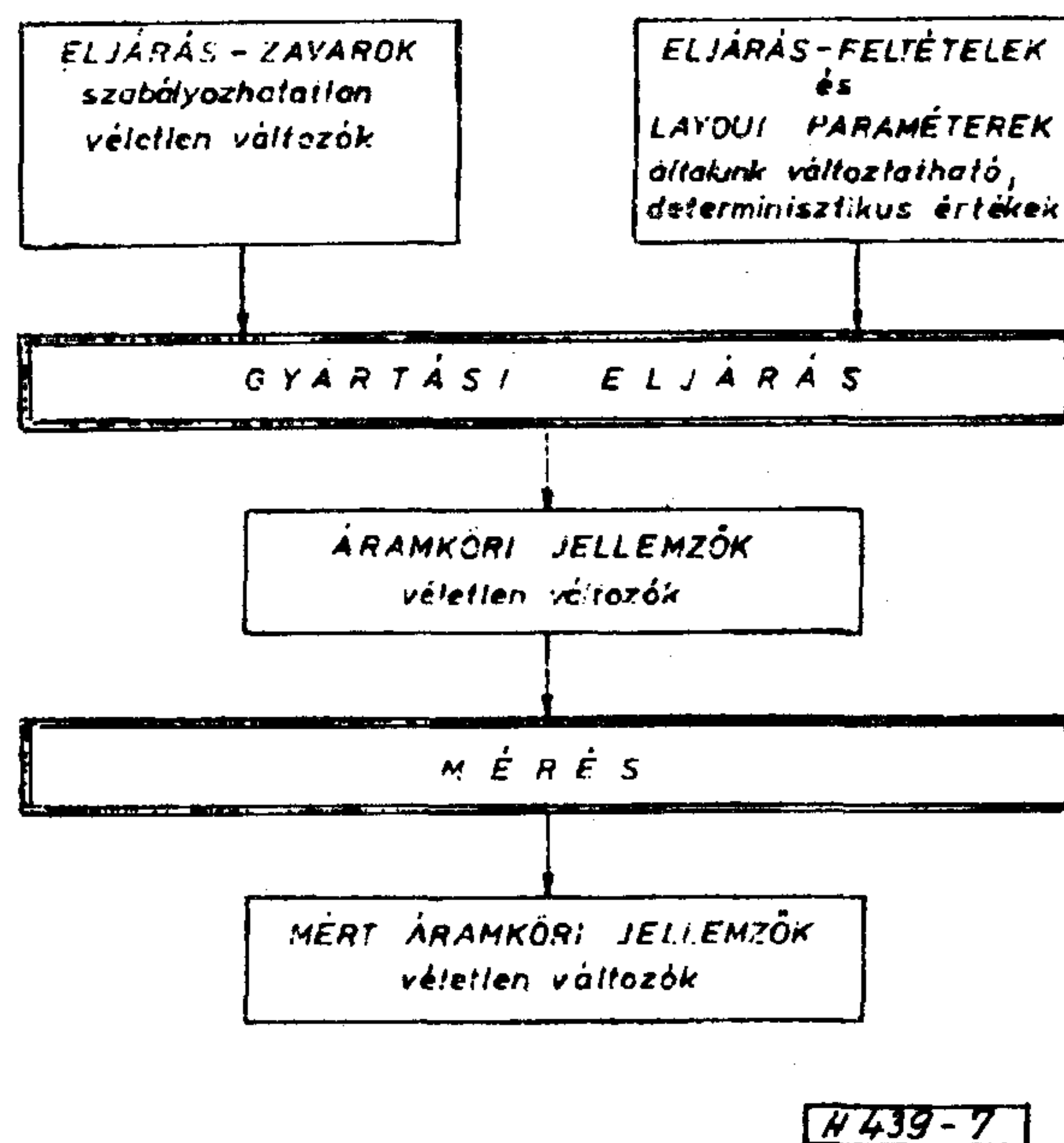
A kihozatalnövelés költségére vonatkozó E feltételt azzal elégíthetjük ki, hogy software úton (tehát beruházások nélkül) és az egyébként is szükséges teszttábra és eljárásközbeni mérések adatait felhasználva tesz javaslatokat a rendszer az eljárás-feltételek és/vagy a layout tervezési szabályok módosítására.

Az eddig felhalmozódott tapasztalatokat részben a beépített eljárásmodellben, részben az eljárás-zavarok paraméteres sűrűségfüggvényében lehet felhasználni. Mivel az eljárásmodell moduláris felépítésű lesz, az újabb kutatási eredményeket új modulok beépítésével ill. a régiek kicserélésével figyelembe lehet venni.

A rendszer működése során a gyártási eljárás bizonytalanságot is megadja, így segíthet a technológia-fejlesztés irányának kijelölésében is.

Ezek után nézzük meg közelebbről az elképzelés megvalósítása során felmerülő matematikai problémákat.

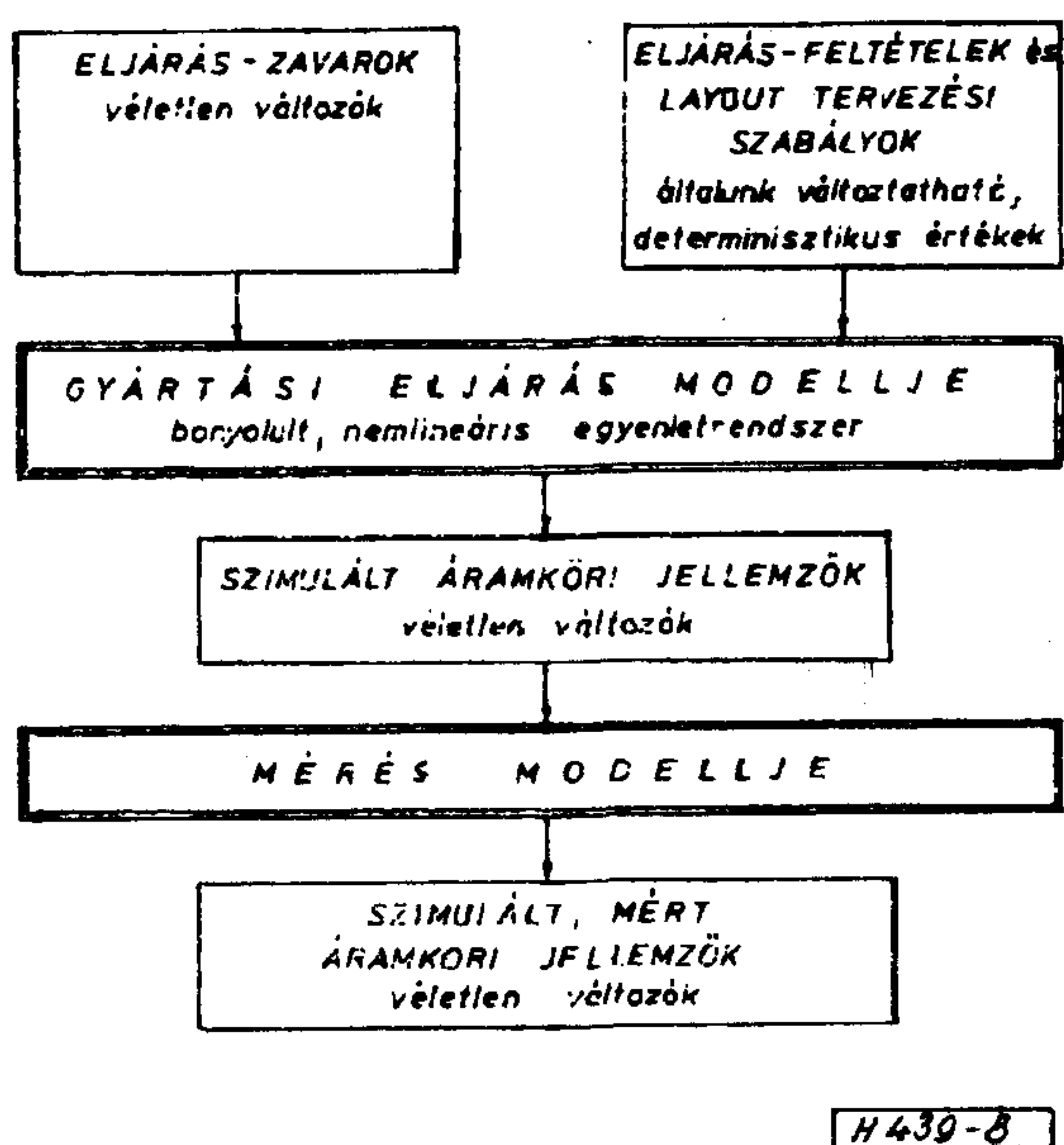
A gyártás célja, hogy az előállító áramköri jellemző készletek egy adott, ún. elfogadási tartományba essenek. A gyártási eljárás során a véletlen változó mennyiségek fellépése a 7. ábrán lát-



7. ábra. Véletlen változók megjelenése a gyártás és a mérés során

ható tömbvázlattal szemléltethető.

Az általunk elképzelt szimulátor a 8. ábra szerint írja le az áramköri jellemzők "létrejöttét". Ennek alapján két célt tudunk megfogalmazni.



8. ábra. A gyártás és a mérés szimulációja.

Közvetlen cél: A szimuláció érvényességének biztosítása:

A SZIMULÁLT, MÉRT ÁRAMKÖRI JELLEMZŐK együttes valószínűségi sűrűségfüggvényének bizonyos pontossággal meg kell egyeznie a MÉRT ÁRAMKÖRI JELLEMZŐK együttes valószínűségi sűrűségfüggvényével.

Végső cél:

AZ ELJÁRÁSFELTÉTELEK ÉS A LAYOUT TERVEZÉSI SZABÁLYOK megfelelő beállításával a SZIMULÁLT ÁRAMKÖRI JELLEMZŐK minél nagyobb valószínűséggel esnek az elfogadási tartományba.

Ebből adódik az első feladat: Olyan eljárás kidolgozása, amellyel meg lehet határozni az eljárás-zavarok együttes valószínűségi sűrűségfüggvényét a gyártási eljárás modellje, a mérés modellje és a mért áramköri jellemzők együttes valószínűségi sűrűségfüggvényének ismeretében.

A második feladat pedig az eljárás-feltételek és a layout tervezési szabályok optimumra való beállítását megkönnyítő módszer kidolgozása. Ezen feladatok megoldása érdekében megkezdtem egy paraméter meghatározó rendszer kifejlesztését. Ehhez tesztabrák szükségesek, de a ma használatos tesztabrák nem felelnek meg minden szempontból, mivel nem adnak lehetőséget minden eszközparaméter megfelelő pontosságú meghatározásához. Másrészt hiába kapunk meg egy-egy paramétert nagyon pontosan, mert az egész kiértékelés pontosságát az ezek feldolgozásához használt modell jósága határozza meg. Végül azt is tekintetbe kell venni, hogy a szükséges statisztikai vizsgálatokhoz (selejtanalízis) sok és gyors mérést kell elvégeznünk. Ezek miatt egy új tesztabra kifejlesztése van folyamatban, amelynél az eddigiekhez képest kevesebb mérésekből is

több adat nyerhető a statisztikus módszer számára, s ezek kiértékelése teljesen automatikusan történik. A kiértékelés pontossága függ a gépben lévő modelltől, de ez az előbbiek szerint *nem jelent megszorítást* a pontosságra nézve. Viszont a gyártás eredményének kiértékelése rendkívül leegyszerűsödik, és így felgyorsítható lesz a pontosság megtartása mellett. Az ezen munkák során nyert eredmények egy következő cikkben kerülnek ismertetésre.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetet mondok Dr. Kovács Ferenc egyetemi docensnek, aki útmutatásával és kritikával bátorított és sokat segített munkám folytatásában és e cikk elkészítésében, valamint Lestyán Gábornak a közös konzultációkért és a Mikroelektronikai Vállalat Számítógépközpontja dolgozóinak, akik segédkeztek számításgényes munkám elvégzésében.

Függelék

Eljárás szabályozó paraméterek (vagy eljárás feltételek):

A gyártási eljárást meghatározó, determinisztikus, a gyártó által beállított, konkrét értékkel rendelkező paraméterek (pl.: névleges hőmérséklet, névleges nyomás, gázáramlási sebesség, egy-egy gyártási lépés ideje, stb.).

Eljárás zavarok: Az IC gyártási eljárástól elválaszthatatlan véletlen ingadozások. Két fajtájuk van:

- Eljárás-szabályozásbeli ingadozások (pl. hőmérséklet, reaktáns gázok parciális nyomása, maszk elillesztések, stb.)
- Anyagi inhomogenitásokat modellező fizikai paraméterek (pl. adalékatomok diffúziósebessége, oxid növekedési sebesség, stb.)

Parametrikus kihozatal: Specifikációs paramétereit (pl. sebesség, teljesítményigény, stb.) tekintve jól működő chipek száma per az összes gyártott chip száma.

Funkcionális kihozatal: Feladatát tekintve jól működő chipek száma per az összes gyártott chip száma.

Áramköri elektromos paraméterek: A gyártott áramkör tulajdonságait mutatják, pl. analóg erősítő esetén a nyílt hurkú erősítés, a bemeneti offset, stb.

Eszköz elektromos paraméterek: A chipen lévő eszközt jellemzik, pl. tranzistor esetén a küszöb feszültség, a nyereség, stb.

Véletlen változó: = valószínűségi változó

Előállítási jellemzők: = eljárás-zavarok, eljárás-feltételek és layout tervezési szabályok együttesen

Áramköri jellemzők: = áramköri elektromos paraméterek + az áramkör funkcionális tulajdonságait jellemző mennyiségek

Gyártásszimulátor: = eljárás- és eszközszimulátor

IRODALOM

- [1] R. Razdan, A. J. Strojwas: A statistical design rule developer, IEEE Trans. Computer-Aided Design of ICAS, vol. CAD-5, no. 1, pp. 508-520, October 1986.
- [2] S.R. Nassif, A. J. Strojwas, S. W. Director: FABRICS II: A statistically based IC fabrication process simulator, IEEE Trans. Computer-Aided Design of ICAS, vol. CAD-3, no. 1, pp. 40-46, January 1984.
- [3] C. J. Spanos, S. W. Director: PROMETHEUS: A program for VLSI process parameter extraction, Proc. 1983. ICCAD, 1983. pp. 176-177.

- [4] H. Walker, S. W. Director: VLASIC: A catastrophic fault yield simulator for integrated circuits, IEEE Trans. Computer-Aided Design, vol. CAD-5, no. 4, pp. 541-556, October 1986.
- [5] A. J. Strojwas, S.R. Nassif and S. W. Director: A methodology for worst case design of integrated circuits Proc. 1983. IC-CAD, pp. 152-153.
- [6] W. Maly, A. J. Strojwas: Statistical simulation of the IC manufacturing process, IEEE Trans. Computer-Aided Design of ICAS, vol. CAD-1, no. 3, pp. 120-131, July 1982.
- [7] T.R. Lawson, Jr.: A prediction of the photoresist influence on integrated circuit yield, SCP and Solid State Technology, vol. 9, pp. 22-25, July 1966.
- [8] J. Shyu, G.C. Temes, K. Yao: Random errors in MOS capacitors, IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. SC-17, no. 6, pp. 1070-1076, December 1982.
- [9] C. Stapper: Modelling of defects in integrated circuit photolithographic patterns, IBM J. Res. Develop. vol. 28, no. 4, pp. 461-475, July 1984.
- [10] C. Stapper: The effects of wafer to wafer defect density variations on integrated circuit defect and fault distributions, IBM J. Res. Develop. vol. 29, no. 1, pp. 87-97, January 1985.
- [11] S. Onga, M. Konaka, A. Omichi, K. Konzaki and R. Dang: A composite two-dimensional process/device simulation system/TOPMODE/ and its application for total process designing in submicron VLSI MOS device phase, IEEE Trans. Computer-Aided Design, vol. CAD-5, no. 3, pp. 365-370, July 1986.
- [12] C. J. B. Spanos, S. W. Director: Parameter extraction for statistical IC process characterization, IEEE Trans. Computer-Aided Design, vol. CAD-5, no. 1, pp. 66-78, January 1986.
- [13] S. R. Nassif, A. J. Strojwas, S. W. Director: A methodology for worst-case analysis of integrated circuits, IEEE Trans. Computer-Aided Design, vol. CAD-5, no. 1, pp. 104-113, January 1986.
- [14] W. Maes, K. M. De Meyer, L. H. Dupas: SIMPAR: A versatile technology independent parameter extraction program using a new optimized fit-strategy, IEEE Trans. Computer-Aided Design, vol. CAD-5, no. 2, pp. 320-325, April 1986.
- [15] C. H. Stapper et al.: Yield modeling for productivity optimization of VLSI memory chips with redundancy and partially good product, IBM J. Res. Develop. vol. 24, pp. 398-409, May 1980.

(Folytatás a 239. oldalról.)

A Forst And Sullivan Amerikai piackutató cég tanulmánya szerint az értéknövelt hálózatok piaca Európában 1991-re eléri az 5 milliárd USD-t.

Megoszlása a legnagyobb felhasználó között:

Nagy Britannia	35 %
Franciaország	25 %
NSZK	12 %
Skandinávia	10 %
Olaszország	4 %
egyéb	14 %

(Resources Temps Réel, 1988)

Az 1986-1990 közötti időszakra szóló tervtörvény szerint a nép-gazdaság korszerűsítését és hatékonyságának javítását a központi gazdaságfejlesztési programokkal is alá kell támasztani. Ilyen programok készültek többek közt

- az elektronika társadalmi-gazdasági alkalmazására és terjesztésére,
- az elektronikai alkatrészek és részegységek gyártásának fejlesztésére.

A programok megvalósítását szolgáló fejlesztésekhez a vállalati saját erő kiegészítéseként kedvezményes lejáratu beruházási hitelt, állami támogatást, állami alapjuttatást, illetve költségvetési juttatást kaphatnak a pályázók. De az elektronikai alkatrészgyártás pályázati feltételeinek megfelelő beruházások felhalmozási adó- és vámkedvezményt is élveztek. Három egyéb, úgynevezett takarékosági programra eredetileg öt évre összesen 11 milliárd forint támogatást irányoztak elő (jórészt közvetlen állami támogatás és nem kamatkedvezmény formájában), amiből végül is mintegy 4,5 milliárd lesz, beleszámítva az 1988-ra áthúzódó támogatásokat is. A központi támogatás megvonása tehát jelentősen kíméli az államkasszát, miközben megszüntetése a normatív vállalati szabályozást erősíti.

Változatlanul tovább élnek az elektronikus programok sőt ezzel kapcsolatban a kormány szilárd elhatározását tükrözi a szándék, hogy még nehéz költségvetési helyzetben is mindenképpen biztosítja a két program tervezett támogatási összegét.

A VII. ötéves terv időszakában az államkassza a tervszámok szerint 17-20 milliárd forintot fordít az elektronika társadalmi-gazdasági elterjesztésére.

Az Országos Tervhivatal azonban ma már szívesebben beszél 10 milliárdos támogatási tervről, holott illetékes fórum hivatalo-

san nem csökkentette a támogatás tervezett összegét. És valóban az első háromévi felhasználás teszi ki ezt a támogatási összeget. Bármelyik számot nézzük is, ez a legnagyobb támogatási háttérű program, de az összeg nagyságának értékeléséhez tudni kell, hogy az elektronikai kutatások és oktatás-fejlesztése, valamint az államigazgatás számítástechnikai korszerűsítése mellett ide tartozik a távközlés is. Más megközelítésben pedig még azzal lehet minősíteni a támogatásra szánt összegek nagyságát, és ezáltal a várható orientációs hatásukat, hogy ezek túlnyomó részt nem szabadon megpályázható pénz, illetve kedvezmény, mivel ide számították azokat a költségvetési támogatásokat is, amelyeket egyes költségvetési szervek egyébként is megkaphatnának az ilyen jellegű, a programtól függetlenül is folyó fejlesztéseikhez. Ami valós kedvezmény a vállalatok részére, az ezévből négy formában vehető igénybe: gyorsított leírás alkalmazása, vámkedvezmény a robotok és az elektronikai termékek behozatalához, a szocialista importból származó számítógépek ártámogatása és négy gépipari szakágazatban lehetőség van a meglévő berendezések pótlólagos automatizálásának adómentes forrásából (költségéből) történő finanszírozására. Ezek a támogatási módok egy-egy fejlesztési területen hathatós ösztönzést jelenthetnek, de széles körben nem alkalmasak a kutatás-fejlesztés és a termelő beruházások közötti szakadék áthidalására.

Az elektronikai program feladataira felhasznált állami támogatások (millió forint)

Fejlesztési feladatok	1986	1987	1988. évi előirányzat
Távközlés	1367	1700	1650
Államigazgatási számítástechnika	451	406	376
Oktatás	80	108	188
Központi elektronizálási K + F (OKKFT - G - 1)	273	575	750
Vállalati beruházások	300	700	700
Összesen	2471	349	3664

(Figyelő, 1988. március 24.)

(Folytatás a 253. oldalon.)

Beszámoló a VLSI-áramkörök Anyagainak és Technológiáinak Minősítése Nemzetközi Konferenciáról (ICMPC'88, Sanghaj)

KORMÁNY TERÉZ

BME Elektronikus Eszközök Tanszék

ERLAKY GYÖRGY

REMIX Rádiótechnikai Vállalat

A Híradástechnikai Tudományos Egyesület, az Országos Tudományos Kutatási Alap és a Remix Rádiótechnikai Vállalat támogatása révén 1988. október 24-29 között résztvehettünk az ICMPC'88-on, Sanghajban, amiért ezúton is köszönetünket fejezzük ki.

A nemzetközi konferenciát a Fudan Egyetem (Sanghaj), és egy jól ismert amerikai műszergyártó cég a Charles Evans & Associates (Redwood City, California) rendezte. A konferenciát anyagilag és erkölcsileg támogatta:

- a Kínai Nemzeti Tudományos Alap;
- a Kínai Nevelésügyi Állami Bizottság;
- a Kínai Állami Tudományos és Technológiai Bizottság;
- a Kínai Elektronikai Ipari Minisztérium;
- a Kínai Üripari Minisztérium;
- az Általános Fémipari Kutató Intézet (Peking) és
- a Sanghaji Tudományos és Technológiai Bizottság.

A nemzetközi tanácsadó testületben és a programbizottságban az előzőekben felsoroltakon kívül sok más jelentős kínai és külföldi egyetem, ill. kutatóintézet képviselője is résztvett. Ezek közül a legfontosabbak:

- a Shanxi Mikroelektronikai Intézet;
- a Wuxi Mikroelektronikai Kutatócentrum;
- a Hetel Félvezető Kutatóintézet;
- a Kínai Tudományos Akadémia Félvezető Intézete (Peking);
- a Kínai Elektronikai Intézet;
- a Kínai Félvezető és IC-technológiai Társaság (CIE);
- a Pekingi Egyetem;
- a Tsinghua Egyetem;
- a Gakushin Egyetem (Japán);
- a Berkeley Kaliforniai Egyetem (USA)
- az IBM; az INTEL CO.; az AT&T Bell Laboratóriuma és a Lockheed az USA-ból;
- a holland Philips;
- a Sanghaji 14.sz. Rádiógyár és az 5.sz. Alkatrészgyár, a Wuxi-i Félvezetőgyár; a Sanghaji 2.sz. Metallurgiai Gyár.

A nemzetközi Konferencián kb. 160 fő vett részt, közöttük 40 külföldi (a tajvani küldötteket nem tekintették külföldinek), legnépesebb volt az amerikai delegáció, az európai országokat Franciaország, Olaszország, Anglia az NSZK és Ma-

gyarország képviselték, Ázsiát Japán és Szingapúr.

A konferencia előadásai (összesen több mint 130) 2 párhuzamos szekcióban hangzottak el:

1./ Elektronikai anyagok minősítése és diagnosztika.

2./ Technológiai folyamatok minősítése.

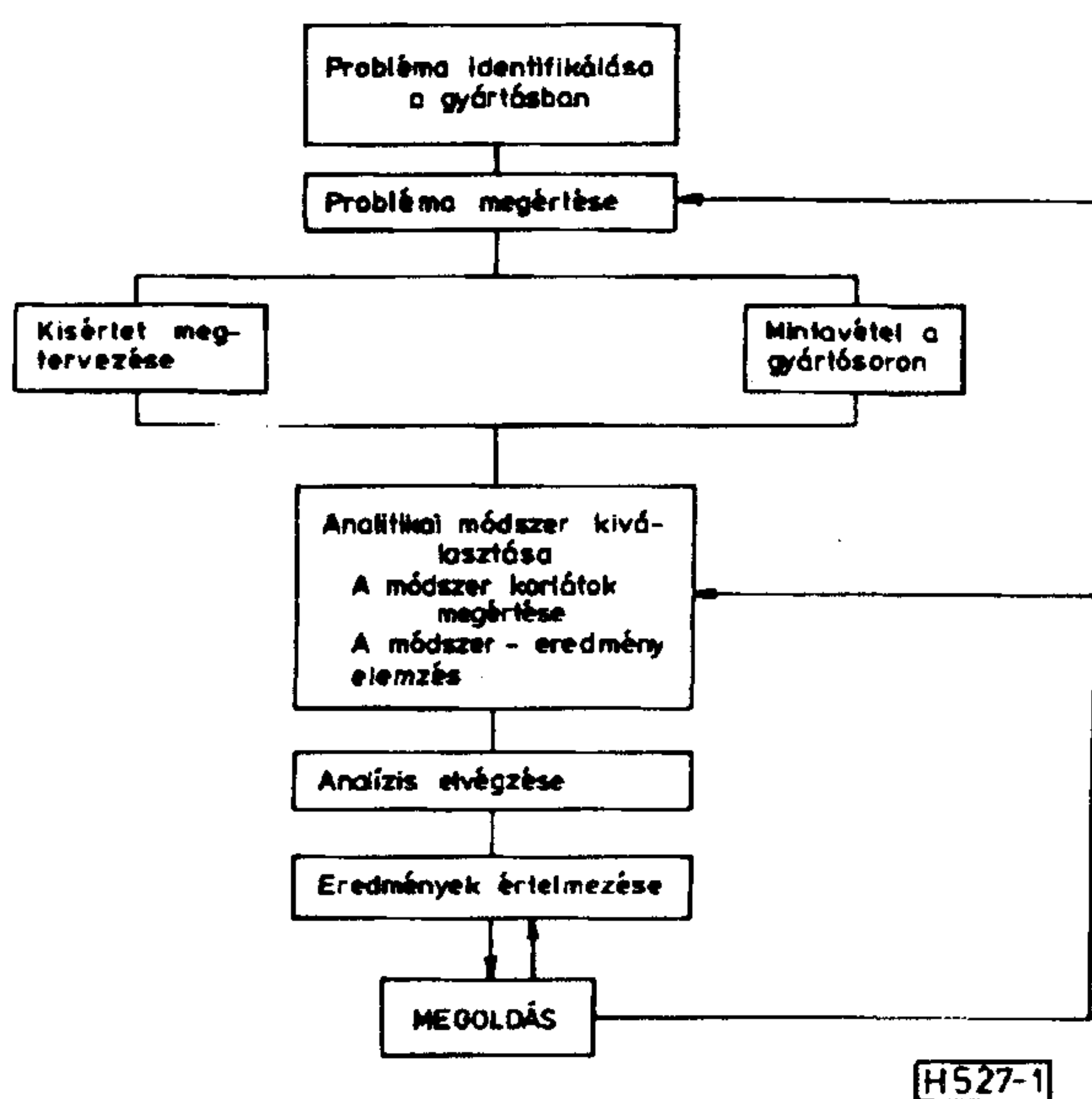
Rendeztek egyik este egy ún. "joint venture" kerekasztalt is, ahol Sanghaj város állami és pártvezetői - angol nyelven - ismertették új technológiai parkjuk legfontosabb műszaki és infrastrukturális jellemzőit, valamint a pénzügyi kondíciókat.

A vita nagyon élénk, sőt időnként elég szenvedélyes is volt. A 16 milliós Sanghajban és környékén az elmúlt 2 évben a fejlett ipari országok vállalatai 2 milliárd \$-t ruháztak be (Philips, M, XMR Inc., stb.). A jelenlévő amerikaiak azonban kifejezték azt az aggodalmukat, hogy a további befektetést gátolja a kétszintű pénzrendszer, az ebből adódó értékesítési nehézségek, a bérezés állami korlátai, (csak 30 %-al lehet magasabb a vegyes vállalatban, mint másutt), és a tisztázatlan tulajdonlási kérdések.

A Nemzetközi Konferencián igen magas színvonalú előadások hangzottak el. Az anyag és technológiaminősítés filozófiáját talán legjobban McDonald (Intel, USA) fogalmazta meg plenáris előadásában, aki szerint (és szerintünk is) "IC-t gyártani csak ismert tulajdonságú anyagokkal lehet olyan folyamatellenőrzést végezve, amely segít megérteni és verifikálni a tervezett gyártási technológiát. Az anyagminősítés és technológiaminősítés értéke abban rejlik, hogy a gyártási problémákra megoldást ad és megmutatja a követendő fejlesztési irányt." Nagyon tanulságos volt az általa bemutatott ún. problémamegoldási ábra /1. ábra/.

Az 1. szekció előadásaiból a "Milyen elektronikai anyagokat vizsgálunk, és mivel vizsgálunk az IC-gyártásban, kutatásban?" kérdésre kaphattunk választ.

A Si-egyikristályok minősítése változatlanul igen fontos. Az integráltsági fok növekedésével olyan eddig elhanyagolható tulajdonságok válnak ugyanis meghatározóvá, mint a ponthibakonzentráció és eloszlás (Si, O, C, átmeneti fémek) és ezek befolyása a technológiai folyamatokban keletkező termikus donorokra, precipitátumokra. A nagytisztaságú víz analízisében többé nem elha-



nyagolható a $\leq 0,2 \mu\text{m}$ átmérőjű részecskék koncentrációjának megállapítása, az elhalt baktériumok kimutatása, a klórozott szénhidrogén- a cink-, króm-, nikkel- tartalom mérése. A kontaktusfém III. az összekötő fémzés anyagainak változásával - nemcsak a poli-Si, de a szilícidek, közülük is elsősorban a TaSi_2 - szemcseméretének, a fázishatároknak, a sztöchiometriai összetételnek, az oxid- szilícid határfelületnek a belső feszültségeknek a vizsgálata került előtérbe.

Az integráltsági fok növekedése megköveteli, hogy egyre komplexebb s ennek megfelelően egyre drágább mikroelektronikai berendezéseket alkalmazzanak még rutin feladatok megoldására is és természetesen "on-line" azaz a gyártósorba beépítve.

Az ellenőrzés klasszikus tesztábról kiegészülnek olyan áramköri elemekkel, amelyek lehetővé teszik az elektronsugár-indukált feszültségkontraszt vizsgálatot pásztázó elektronmikroszkóppal, a kisebbségi töltéshordozók élettartamának mérését, zajméréseket, a fényemisszió meghatározását, stb. Ezeket a vizsgálatokat azért végzik mert, nagyon érzékenyen jelzik az áramkörgyártás során esetleg létrejövő kristályhibákat, hibastruktúrákat, szennyezőelemeket.

A szigetelő hordozón kialakított egykristályrétegek (SOI- struktúra) elterjedése a VLSI-áramkörökben is új módszereket, elsősorban rétegvizsgálatokat (kristályos állapot meghatározás, poli-kristályos göcképződés okainak feltárása, stb) igényelt.

Az előadásokból és a közvetlen konzultációkból azt a következtetést lehetett levonni, hogy az IC-gyártás és kutatás a VLSI-korszakban ($1,2 \mu\text{m}$ -es, III. szubmikrométeres vonalszélesség) az alábbi fizikai-kémiai analízismódszereket igényli:

- röntgendiffrakció és topográfia (kristályos állapot, belső feszültségek, kristályhibák meghatározása, fázisazonosítás, stb.)

- pásztázó elektronmikroszkópia (nagy mélységélességű és felbontású felvételek a felület morfológlájáról, a kritikus méretek meghatározása, stb.)
- elektronsugaras mikroanalízis (vékonyrétegek összetételének és vastagságának meghatározása, szennyezések azonosítása, stb.)
- szekunder ion tömegspektroszkópia (adalékprofil meghatározás egykristályos Si-ban és poli-Si-ban, szennyezők felületi- és mélységbeli azonosítása, oxigén-tartalom mélységi analízise, stb.)
- infravörös spektroszkópia (bór- és foszforüvegek B- III. P- tartalmának mérése, rétegvastagságmérés, O- és C-tartalom III. precipitátumok meghatározása, stb.)
- Rutherford visszaszórásos spektroszkópia (kvantitatív, roncsolásmentes mélységi analízis vékonyrétegekben)
- Auger - elektronspektroszkópia (felületi szennyezők azonosítása, vékonyrétegek mélységi analízise, kötésviszonyok felderítése, adhézió mérése, stb.)
- transzmissziós elektronmikroszkópia (nanométer-nagyságrendű kristályhibák azonosítása, szemcse- és fázishatárok vizsgálata, stb.)
- elektronspektroszkópia kémiai analízis céljára (elemazonosítás, kötésviszonyok meghatározása)
- mélynívó spektroszkópia, fotolumineszcencia spektroszkópia (a tiltott sávban mélynívókat létrehozó szennyezők kimutatása, szennyező-beépülés felderítése)

Ezek a módszerek s a módszer műveléséhez szükséges - 100000 - 1 millió \$ értékű műszerek Kínában több kutatóhelyen is rendelkezésre állnak.

A gyártásban is általános Kínában a pásztázó elektronmikroszkópia (PEM), az elektronsugaras mikroanalízis (EPMA-EDX III. EPMA-WDX), az optikai mikroszkópia infravörös, lézersugaras fajtái és a szekunder-ion tömegspektroszkópia. (SIMS)

2. Technológiai műveletek

A VLSI technológiában a következő műveleteket használják:

- Ionimplantáció
 - p-n átmenetek kialakítására,
 - szigetelő rétegek kialakítására (SOI),
 - MOS tranzistorok nyitófeszültség beállításra, getterezéshez
- Kémiai gőzfázisú leválasztás (CVD)
 - szilícium rétegek leválasztása (epitaxiális és polikristályos)
 - dielektrikum rétegek leválasztása
 - fémrétegek leválasztása
- Hőkezelések
 - oxidáció
 - Implantáció utáni a sugárkárosodást megszüntető hőkezelés
- Fotolitográfia

- Marási műveletek
- Vezető rétegek kialakítása.

Mindezen technológiai műveletek során rendkívül nagy gondot fordítanak arra, hogy a lehető leg-tökéletesebb kristálystruktúra megmaradjon, a kialakult felület illetve a felületi réteg ne károsodjon vagy ne szennyeződjön.

Az egyes műveletekről változó súllyal tartottak előadásokat, viszonylag kevés előadás volt ionimplantációról és azt követő hőkezelésről. A kristályminősítések során felhozott példák tartalmaztak információkat ezekről a műveletekről. Jelenleg a 10–160 keV energiatartományú ionimplantációt használják adalékolásra összekapcsolva vagy alacsony hőmérsékletű vagy magas hőmérsékletű, de gyors hőkezeléssel.

Az ionimplantációt megelőzheti egy amorfizálás is. A kontakt ellenállás csökkentésére kísérleteznek olyan módszerekkel amelyeknél az implantálást titánszilícid rétegen keresztül végzik. Az áramköri elemek elszigetelésére eltemetett szilíciumnitrid réteget lehet kialakítani 190 keV nitrogén implantálással, és azt követő hőkezeléssel.

A kémiai leválasztás (CVD) módszereknél a kémiai elvek lényegében változatlanok maradnak a VLSI áramkörök technológiájában is, de csökkennie kell a hőmérsékletnek javítani kell a lépcsők fedését, csökkenteni kell a hőtágulási együtthatóból következő mechanikai feszültségeket, javítani kell a rétegek egyenletességét és csökkenteni kell a szelektívalással járó szennyeződéseket. A fenti feltételeknek az LPCVD (alacsony nyomású kémiai leválasztás) a plazmás és fotonos CVD felel meg. A plazmás és fotonos CVD módszereknél a reakcióhoz szükséges energiát a gáztérrel plazmakisülés illetve foton abszorpció útján közöljük. A fotonabszorpcióhoz a gáztérbe abszorbeáló anyagot kell juttatni ez nem minden esetben felel meg a tisztasági követelményeknek.

A CVD módszerrel leválasztott rétegek közül legérdekesebb a szilíciumnitrid. A technológiai paraméterek módosításával az LPCVD módszerrel előállított szilíciumnitrid optimalizálható a memória áramkörökben való alkalmazásra. Azt tapasztalták, hogy a nitridben lévő oxigén mennyisége befolyásolja a töltéscsapdák számát, viszont túl nagy oxigéntartalomnál a csapdák gyorsan kiürülnek.

Döntő szerepe van a fotolitográfiának a VLSI áramkörökben. A maszkkészítésre elektronsugaras berendezéseket használnak, az általunk meglátogatott Wuxi-i Félvezető gyárban NDK gyártmányú ZBA 20 maszkkészítő van. A maszkkészítésnél lényeges szempont a villantások számának csökkentése, ennek érdekében negatív elektron reziszt anyagot is használnak, így a fémezés maszkját nem kell körbevillantani. A szelektívalással az ábrát 1:1 vagy 5x kicsinyítéssel direkt léptetéssel viszik át. A Wuxi-i gyárban erre is NDK gyártmányú berendezés volt.

A rezisztálak eltávolítását plazmás módszerrel végzik villágszerte. A VLSI áramkörökben használt 60 nm vastag oxidréteget a plazma keletke-

zésével járó ionbombázás károsítja. A károsodás eredményeként a nyitófeszültség stabilitása romlik. A plazmás lakkeltávolító átkonstruálásával térben elválasztották a szeleteket és a plazma előállítását, így csökkenthető az oxidréteg károsodása. Króm rétegek felületéről a rezisztálakot széndioxid lézerrel lehet eltávolítani. A króm réteg nem melegszik fel az eltávolítás során és nem oxidálódik.

A nedves kémiai marás helyett használt plazmás és reaktív ionmarók károsítják az oxidréteget, a sekély diffúziót és a fémrétegeket szerencsétlen esetben az elektróda anyaggal, szénnel és fluorral szennyezhetik a felületet.

Megint különös figyelmet érdemel a szilíciumnitrid marása, nagy energiájú ionsugárral (60 keV Xe) XeF₂ gáz bekeverésével maszk nélkül marhatók 0,5 µm méretű struktúrák.

A Al + 4 % Cu fémrétegek reaktív ion marásánál korróziós nyomok keletkeznek a felületen.

A gyorsító feszültség és a kamra nyomásának optimalizálásával ezt a jelenséget sikerült eltüntetni.

A VLSI technológiában használt összeköttetéseknek és kontaktusoknak kis fajlagos ellenállásúnak kell lenni. A bonyolult áramkörökben a vezetők hosszúak a csíkszélesség pedig kicsi. A kis vonalszélesség miatt az elfedésnek is tökéletesnek kell lennie. Mindezen feltételeknek a különböző szilicidok (Ti és W) felelnek meg. A leválasztást általában porlasztással valósítják meg. A porlasztás jó elfedést biztosít de a target bombázására használt nemesgáz beépülhet a rétegbe és gázzárványokat okozhat. A jelenség csökkenthető ha az általában használt rádiófrekvenciás porlasztás helyett egyenáramú porlasztásra térnek át.

Fontos probléma az összeköttetések alatti felület milyensége. Minél nagyobb a felület eltérése a síktól annál nagyobb a lépcsők száma - annál nagyobb az összekötő vezetékek megszakadásának valószínűsége. A felület planarizálására különböző módszereket ismertettek. Alumínium réteget 308 nm hullámhosszú lézerrel megvilágítva az megolvad és sík felület alakul ki. A megolvastás után a rétegben megmaradó lépcsők nagysága kisebb mint 80 nm. A megolvastós módszer további előnye, hogy a megolvadt fém a legkisebb kontaktusba is befolyik. A kontaktusban az ötvöződést TiW réteg akadályozza meg.

A fotoreziszt réteg felvitelkor is közel sík felület keletkezik, úgy hogy a lépcsős alap felett különböző vastagságú rezisztálak lesz. A rezisztálak reaktív ionmaróban úgy marva, hogy a marási sebessége egyenlő legyen az alatta lévő foszfor-üveg marási sebességével szintén sík felület érhető el.

A lézerrel segített CVD módszer lehetőséget ad arra, hogy wolfram réteget válasszunk le az integrált áramkör tetszőleges helyére - így az összeköttetések külön rezisztművelet nélkül megvalósíthatók.

Összefoglalás:

A konferencián elhangzott előadások és magánbeszélgetések alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy a VLSI áramkörök fejlesztéséhez feltétlenül szükség van megfelelően modern technológiával géppark mellett hatásos vizsgáló laboratóriumokra is. A VLSI áramkörök technológiája a terméken keresztül csak elektromos paraméterekkel nem minősíthető kielégítően.

Ez a berendezésállomány annyira költséges, hogy egy vállalat önállóan nem tudja megvásárolni és fenntartani, még olyan nagy cégek sem mint pl. a Motorola. A megoldás útja lehet a több vállalat

és szervezet által fenntartott államilag támogatott fejlesztő intézet. Kínában a szükséges berendezések a technológiával alapműveletek fejlesztéséhez és az eredmények értékeléséhez rendelkezésre állnak. Nagyon sok kínai szakember jár hosszabb-rövidebb tanulmányúton fejlett ipari országokban, és megvan az a lehetősége, hogy tapasztalatokat azonnal hasznosítsa.

A konferencia megrendezése lehetőséget adott számunkra, hogy egyszerre sok szakemberük kerüljön kapcsolatba a vezető cégek kutatóival. Jó lenne ha ezt a példát hazánkban is követni lehetne.

(Folytatás a 249. oldalról.)

Az 1988 október 20. és 26. között megrendezett 27. stockholmi műszaki vásár és a kapcsolódó 20 féléle szeminárium és tanfolyam 73000 látogatót vonzott. A fő témát ugyan a szerszámgépek képezték, de azt több "alvásár", köztük a "Szatellit TV 1988" kiállítás egészítette ki. Ez utóbbi számos kábel TV berendezést mutatott be. Svédország az egyik legnagyobb európai kábel TV felhasználó félmillió előfizető háztartással.

(Science and Technology - Newsletter on Industry and Research in Sweden)

*

Adatok a Videoton Számítástechnikai Gyár munkájáról

	1985	1986	1987
Árbevétel (millió Ft)	6360	6494	7100
Konvertibilis elszámolású export (%)	12,5	13,1	13,6
KGST export (%)	69,2	69,0	68,1
Belföldi kiadás (%)	18,3	17,9	18,3
Adózás utáni nyereség (millió Ft)	800	770	600
Álló és forgóeszközök értéke (mFt)	2763	3403	4164
Létszám (fő)	3899	3868	3860
K+F kiadás (millió Ft)	590	787	567
Az egyes termékcsoporthoz			
részaránya az eladásokból (%)	46,0	45,9	39,7
Számítógéprendszerek	46,0	45,9	39,7
Nyomtatók	18,0	20,1	24,7
Videoterminálok	14,0	9,2	10,7
Szoftver és szolgáltatás	10,3	10,4	10,5
Egyéb	11,7	14,4	14,4

(CWI-Számítástechnika, 1988. november 3.)

*

A professzionális híradástechnikai rendszerek amerikai eladásainak alakulása az elmúlt 2 évben és prognózis 1989-re (millió USD-ban):

	1987	1988	1989
Adatátvitel összesen:	4265	4898	5600
- Koncentrátorok	370	380	400
- Front-end processzorok	845	890	960
- Modemek	1650	1840	1900
- Multiplexerek	840	1080	1190

- LAN vezérlők	560	728	1150
Faksimile terminálok	1130	1825	2200
Száloptikai rendszerek	640	670	780
Rodar rendszerek	5400	5710	6160
Rádió rendszerek összesen	4248	4655	5216
- Amatőr (mobil és fix)	32	43	37
- Léglökötledés mobil + földi támogató rendszer	179	202	221
- Műsorszóró berendezések	879		
- Földi mobil (+bázis állomás)	1470	1700	2010
- Tengeri mobil	182	197	226
- Mikrohullámú rendszerek antennákkal (együtt)	588	670	763
- Szatellit földi állomások (fogyasztói nélkül)	918	927	934
Hírközlő rendszerek összesen	7785	8045	8356
- Kapcsoló berendezések	6100	6280	6500
- Telefonok összesen	1685	1767	1856
= vezetékes	1038	1020	1040
= vezetékek nélküli	438	475	498
= Integrált telefon és üzenetközvetítő eszközök	209	270	318
Televíziós berendezések összesen	1720	1839	1970
- Műsorszóró	1265	1395	1500
- CATV	363	350	375
- CCTV	92	94	95
HÍRADÁSTECHNIKA ÖSSZESEN	25188	27642	30302

(Elektronics, 1989. január)

*

A Du Pont cég vastagréteg anyagcsaládot hozott ki piacra, elsősorban hibrid áramkörök gyártásához nagyobb sűrűséggel és megbízhatósággal és alacsonyabb költséggel.

A "Q sorozat" két tagja a "Q-SII" és a "Q-Plus" a szokásos ezüst/palládium helyett olcsóbb anyagokat alkalmaz, de így is sikerült igen jó vezetőképességet elérni és komplex lyukgalvanizált áramkörök kialakítása is lehetséges. Mindkét rendszert alapos vizsgálatnak, többek között 1000 órás gyorsított élettartam vizsgálatnak vetették alá extrém hőmérsékleti és nedvességi körülmények között, ami 20 éves normál működésnek felel meg. (Du Pont Information Service)



BERUHÁZÁS HELYETT – KÖLCSÖNÖZZÖN MŰSZERT!

DEVIZA NÉLKÜL is hozzájuthat a legkorszerűbb precíziós műszerekhez!

MEGTÉRÜL A KÖLCSÖNDÍJ, mert:

A megfelelő időszakban rendelkezésre álló, MÉRÉSAUTOMATIZÁLÁSRA is alkalmas korszerű műszerek használatával időt, munkaerőt, adót, amortizációs költségeket, javítási-karbantartási költséget takarít meg.

NE FELEDJE: egy műszer haszna a mérésekből – nem pedig a tulajdonjogból ered!
NE SZAPORÍTSA KIHASZNÁLATLAN ESZKÖZEIT!

ÓRIÁSI VÁLASZTÉK: oszcilloszkópok, multiméterek, jelgenerátorok, analizátorok, mérésadatgyűjtők, regisztrálók, analitikai-környezetvédelmi műszerek, rendszervezérlők, stb., stb.
ÁLL AZ ÖN RENDELKEZÉSÉRE!

FOGYÓANYAG, TARTOZÉK pótlás, – ugyancsak forintért!

LIZING LEHETŐSÉG: egyes műszer, vagy számítógép típusokra!

SZAKTANÁCSADÁS · HÁZHOZZÁLLÍTÁS · BEMUTATÁS!

KÉRJE INGYENES KÖLCSÖNMŰSZER-KATALÓGUSUNKAT!

FELVILAGOSÍTÁS, ELŐJEGYZÉS, ÜGYINTÉZÉS: 1810-903 vagy 166-23-66/176 telefonon.
MTA MŰSZERÜGYI ÉS MÉRÉSTECHNIKAI SZOLGÁLATA MŰSZERKÖLCSÖNZÉSI FŐOSZTÁLY
Budapest XI., Szakasits Á. út 59-61. I. em. 107. szoba.
H-1502 Budapest Pf. 58



ДЬЕРФИ, Л. – ВАЙДА, И.:

Конструкция не двоичных кодов

HÍRADÁSTECHNIKA (Хирадаштехника, Будапешт) 1989. № 8.

В данной статье излагается конструкция не двоичных Hamming кодов и Reed – Solomon кодов с приведением примеров их использования

Беггин, Кхалид:

Процессы семи-маркова с применением их для надежности

HÍRADÁSTECHNIKA (Хирадаштехника, Будапешт) 1989. № 8.

Данная статья занимается созданием основной модели, проведения анализа и использования семи-марковских процессов. Цель статьи заключается в обеспечении проведения испытания по надежности сложных систем, обладающих общими процессами повреждения -ремонта, также определением параметров по надежности данных систем. Полученные результаты (со соответствующей интерпретацией) пригодны для применения испытания различных общих временных параметров нахождения.

Хоссу, Г.:

Методы для оценки продуктивности сложных электрических цепей с симуляцией производящего процесса

HÍRADÁSTECHNIKA (Хирадаштехника, Будапешт) 1989. № 8.

С производством интегрированной электрической цепи связаны колебания хода материального качества и производящих оборудования. Ошибки, сделанные ими, влияют на параметрические и функциональные свойства электрических цепей. В зависимости от того, какой тип ошибки доминирующий, учитывают два типа продуктивности. В статье обсуждаются характеристики ошибок, служащих причиной понижения продуктивности, и дается их классификация на основе их влияния на электрическую цепь. В статье описываются статистические параметры, которые касаются моделирования ошибок и расценки продуктивности. Наконец описывается новый подход к расценке продуктивности, который принимал во внимание оба типа ошибок.

* * *

Györfi, L - Vajda, I:

Konstruktion von nichtbinären Codes

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) 1989. Nr. 8

In diesem Artikel werden die Konstruktionen und die Konstruktionen Eigenschaften nichtbinärer Hamming und Reed-Solomon Codes dargestellt. Es werden auch einige Anwendungsbeispiele vorgeführt.

Khalid Begain:

SEMI-MARKOV PRZESSE MIT ZUVERLÄSSIGKEITSANWENDUNGEN

HÍRADÁSTECHNIKA, (Budapest) 1989. Nr. 8

In dem Beitrag wird die Formulierung, die Analyse eine Anwendung des Grundmodells der Semi-Markow Prozesse verhandelt.

Híradástechnika, XL. évfolyam, 1989. 8. szám

Die Zielsetzung ist die Zuverlässigkeitsanalyse komplexer Systeme mit Ausfall-Reparatur Prozessen zu ermöglichen und die Zuverlässigkeitsparameter dieser Systeme zu bestimmen. Die Ergebnisse sind mit entsprechenden Interpretation geeignet, verschiedene erwarteten Verweilenparameter zu analysieren.

Hosszú, G.:

Methoden zur Ausbeuteschätzung hochintegrierter Schaltkreise mittels Simulierung des Fertigungsprozesses

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) 1989. Nr. 8

Die Herstellung integrierter Schaltkreise ist engst verbunden mit Schwankungen in der Materialqualität und in der Funktionsfähigkeit der angewendeten Apparate. Die dadurch verursachten Fehler beeinflussen die parametrischen und funktionalen Eigenschaften der Schaltkreise. Dem dominierenden Fehlertyp entsprechend werden zwei Arten der Ausbeute gerechnet. Die Eigenschaften der ausbeutevermindernden Fehler werden erörtert und an Hand ihren Einflusses auf die Schaltkreisparameter klassifiziert. Mehrere zur Modellierung der Fehler und zur Schätzung der Ausbeute bisher angewandte statistische Methoden werden diskutiert. Eine neue Annäherung, welche zur Schätzung der Ausbeute beide Fehlertypen in Betracht nimmt wird ebenfalls erörtert.

* * *

Györfi, L - Vajda, I:

Generation of nonbinary codes

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) 1989. No 8

In this tutorial paper construction and basic properties of non-binary Hamming codes and Reed-Solomon codes are detailed. Few examples for application are shown, as well.

Khalid Begain:

SEMI-MARKOV PROCESSES WITH RELIABILITY APPLICATION

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) 1989. No. 8

The paper deals with the forming, analysis and a kind of application of basic model of the semi-Markov processes. Its is to give the possibility for the reliability investigation of complex systems with general failure-repair processes, and to determine the reliability of the investigation of different average solution times.

Hosszú, G.:

Methods for Yield Estimation of Large Scale IC Manufacturing by Process Simulation

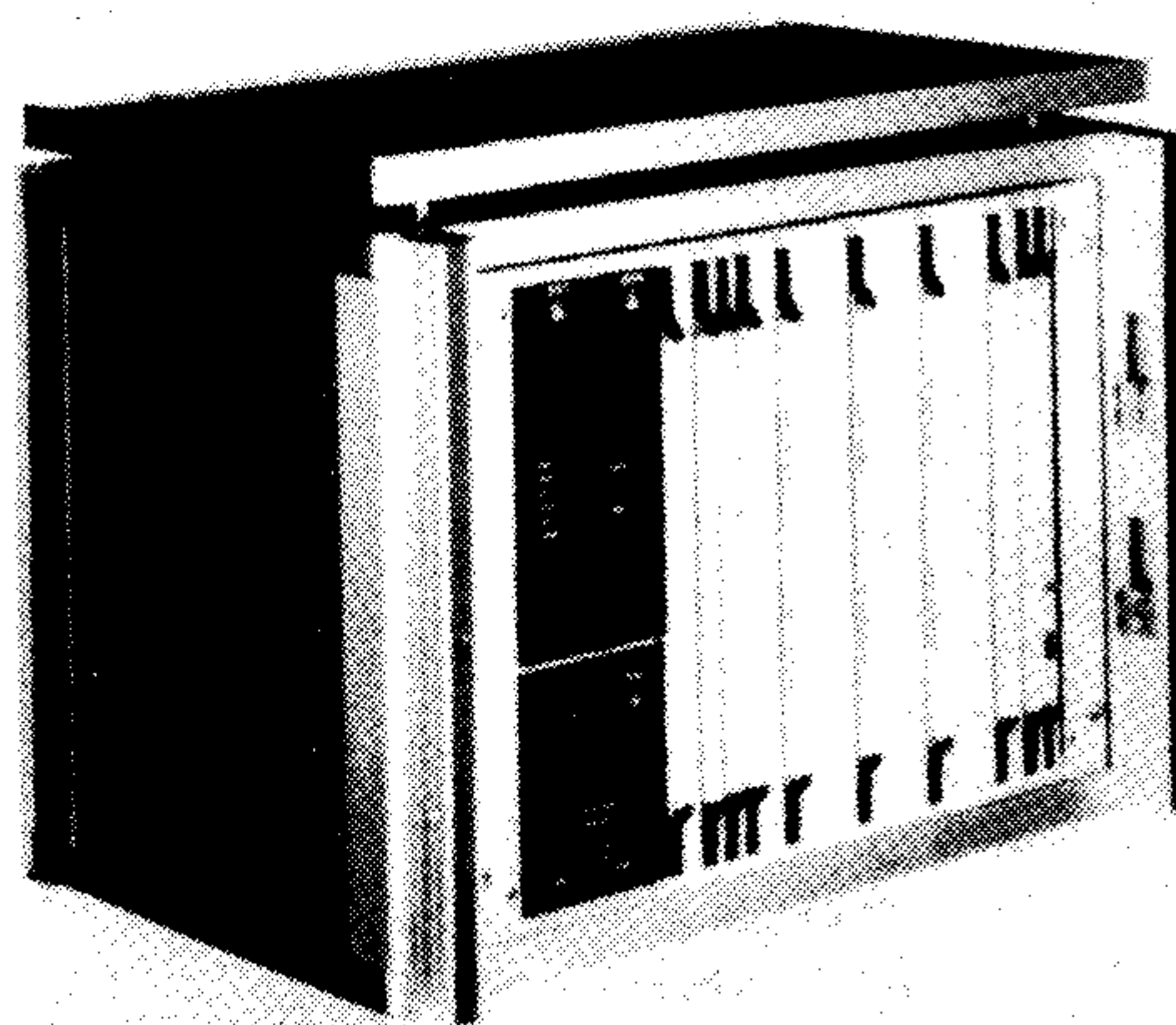
HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) 1989. No. 8

The integrated circuit manufacturing process is subject to interent statistical fluctuations of material quality and equipment performance. The failures due to these fluctuations effect the parametric and functional properties of the circuits. Depending on what the dominant defect-type is, it is usual to count two types of the yield. The paper discusses properties and classification of defects causing yield loss, then presents a number of statistical methods which have been developed to model defects and estimate yield. Finally it introduces a new approach to the manufacturing yield estimation which takes both defect types into account.

Kiskapacitású elektronikus alközpont család: EP 8, 16, 32, 64, 128.

Mikroprocesszor vezérelt alközpontok 8–400 mellékállomás kapacitással.

Alkalmasak kis, közepes és nagyobb üzemek, intézmények, iskolák, szállodák, kórházak stb. távbeszélő forgalmának lebonyolítására.



BHG Híradástechnikai Vállalat
Budapest XI., Fehérvári út 70.
Tel: 181-3300 Telex: 225933

HÍRADÁSTECHNIKA

A szerkesztésért felelős: Dr. Tófalvi Gyula. Szerkesztőségünk címe: Budapest V. Kossuth Lajos tér 6 - 8. 1055. Telefon: 153 - 1027. Kiadja a DELTA Szaklapkiadó és Műszaki Szolgáltató leányvállalat. Budapest, 1053. Kossuth L. u. 17., 1093. Telefon: 117 - 4793. Felelős kiadó: Budai Ferenc főigazgató. Terjeszti a Magyar Posta. Előfizethető bármely postahivatalnál, a kézbesítőknél, a Posta hírlapüzleteiben és a Hírlapelőfizetési és Lapellátási Irodánál (HELIR, Budapest, Lehel u. 10/a. 1900) közvetlenül vagy postautalványon, valamint átutalással a HELIR 215 - 96 162 pénzforgalmi jelzőszámra. Előfizetési díj: fél évre 180,-Ft, egész évre 360,-Ft. Egyes számára 30,-Ft. Megjelenik havonta. A folyóirat külföldre előfizethető: a "KULTÚRA" Külkereskedelmi Vállalat, H - 1389 Budapest, postafiók 149. és a Magyar Média, 1392 Budapest, Pf. 279.86 - 253.
Szedte: "3T" GMR

HU ISSN 0018 — 2028

Index: 25 375