

Pannon Egyetem


Villamosmérnöki és Információs Rendszerek

Tanszék



Digitális Technika

Hazárd jelenségek



Hazárd jelenségek kombinációs logikai hálózatok (K.H.) esetén

Hazárd jelenségek

- Kombinációs logikai hálózatok (K.H.) esetén alapvetően három fajtája létezik:
 - Statikus,
 - Dinamikus,
 - Funkcionális.
- Megj: szekvenciális hálózatok (S.H.) esetén további hazárd jelenségek lehetnek:
 - Lényeges hazárd (lásd később)
 - Rendszer hazárd (vagy „kritikus versenyhelyzet”)

Eddig:

- Ideális áramkörök: A **kapuk késleltetését**, illetve az **összeköttetések/vezetékek jelterjedési késleltetését** nem vettük figyelembe: feltételeztük, hogy a bemeneti jelek egyszerre érkeznek meg, és a kimeneti érték ezzel egyidejűleg jelenik meg (végtelenül rövid idő alatt).
- Valós áramkörök: A valóságban azonban a késleltető hatásoknak fontos befolyásoló/nem elhanyagolható szerepük van az áramkörök működésére, amelyeket már a *tervezés* során figyelembe kell venni, ha lehet ki kell *küszöbölni*, ill. meg kell *szüntetni*.

Definíció: Hazárd jelenségek

- **DEF:** A bemeneti kombináció változásakor az egyes jelek terjedésében mutatkozó különböző *késleltető hatások* átmenetileg olyan kimeneti kombináció(ka)t hozhatnak létre, amelyek zavart okozhatnak a hálózat működésében. E hatások veszélyességét fokozza, hogy a jelterjedési késleltetéseket előre pontosan megadni nem lehet, és nagyban függ a belső /külső környezeti feltételektől (pl. hőmérséklet, öregedés stb.).
- Az ilyen hibajelenségeket a rendszertelen és véletlenszerű jellegük miatt ***hazárdjelenségeknek*** nevezzük.
- Cél: törekedni *kiküszöbölésükre tervezéskor*

Hazárd jelenségek

- Hazárdok: Késleltetés okozta nem-kívánt kimenetek, állapotok.

- *Hazárd alakulhat* ki, ha egy kapu kimenete a bemenetek változásához képest csak véges időn belül változik (pl. szilícium lapkán lévő elektron-, és lyuk-vezetés stb. ideje következtében).

$T_{\text{propagation delay}}$

- *Hazárdoknak* több fajtája lehetséges (K.H.):

- Statikus



- Dinamikus

- Funkcionális

Hazárdok kialakulása I.

- a.) „**Jelterjedési**” (propagation delay) vagy „**megszólalási**” késleltetés:
a logikai kapu bemeneteinek és a kimeneteinek változása közötti időkülönbség miatt (bár rövid, de véges tranziens idő alatt változik meg).
- Függhet:
 - Jelalak a bemeneten (waveform),
 - Hőmérséklet,
 - Kimenet terhelése (output loading – Fan-out),
 - Disszipált teljesítmény (operating power),
 - Logikai eszköz típusa (type / device family),

JELLEMZŐK	TTL RENDSZER	CMOS RENDSZER
Tápfeszültség	5 V	2 V - 15 V
Átlagos fogyasztás (1 kapu)	2 mW - 30 mW	10 nW - 1 mW
Jelterjedési idő	3 - 30 nsec	10 - 100 nsec
Kimeneti terhelhetőség (fan out)	10	30

Hazárdok kialakulása II.

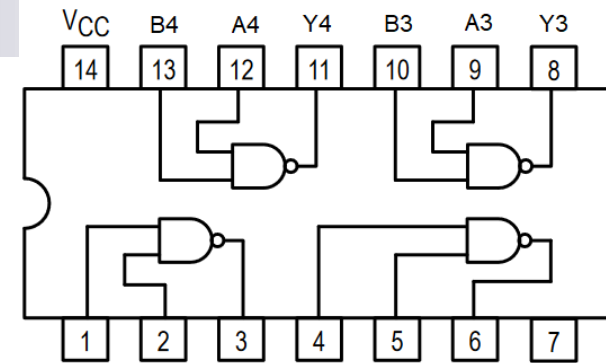
■ b.) „**Összeköttetési**” (interconnection delay)

késleltetés:

a logikai kapukat összekötő vezetéken lévő véges jelterjedés miatt

- 20 cm/ns sebességű jelátvitel az elektromos vezetéken,
 - A vákuumban minden elektromágneses hullám a frekvenciájától függetlenül ugyanazzal a sebességgel terjed. Ezt a sebességet fénysebességnek (c) hívjuk, és értéke kb. 3×10^8 m/s, azaz kb. 30 cm/ns. Rézben és üvegszálban ez a sebesség nagyjából a 2/3-ára csökken.
- bizonyos vezetékhoosszúság felett léphet fel:
 - ha gyors(változású) jelünk (\sim rövid felfutási idővel rendelkeznek),
- *Szórt kapacitás, ill. induktivitás* (\sim a jel a vezetéken mintha egy késleltető áramkörön haladna keresztül).
 - Ekkor a *tápvonal* modellt kell használni (egyébként pedig a *koncentrált* paraméterű a modellt).

Technológia fejlődésének hatása a késleltetésekre



- Az építőelem készlet technológiai fejlődésével (integráltsági fok növekedésével SSI ... → VLSI) a kapuk *jelterjedési késleltetése egyre inkább összemérhető a vezetékek összeköttetési késleltetésével.*
- KATALÓGUS: kapu építőelem leírásokban általában a **min. / tipikus (nominális) / maximális** jelterjedési értékek is adottak.

Switching Characteristics

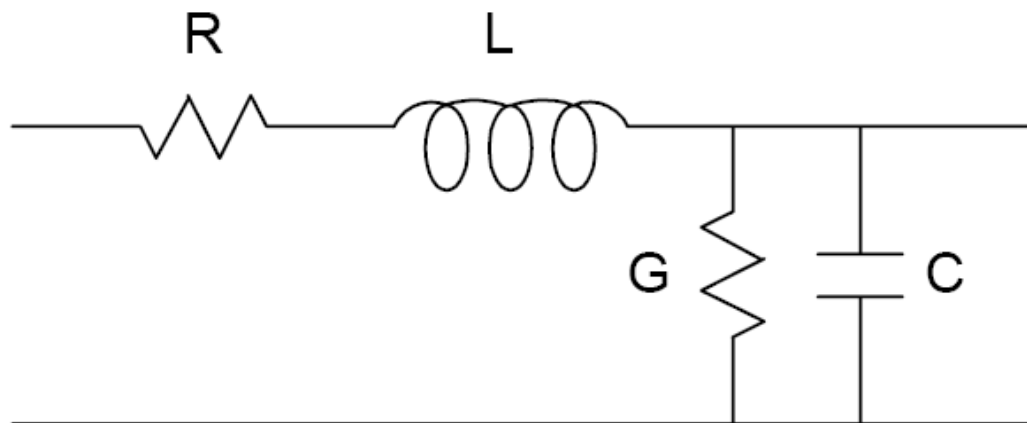
at $V_{CC} = 5V$ and $T_A = 25^\circ C$

Példa: TTL **74LS00**

Symbol	Parameter	$R_L = 2\text{ k}\Omega$				Units
		$C_L = 15\text{ pF}$		$C_L = 50\text{ pF}$		
		Min	Max	Min	Max	
t_{PLH}	Propagation Delay Time LOW-to-HIGH Level Output	3	10	4	15	ns
t_{PHL}	Propagation Delay Time HIGH-to-LOW Level Output	3	10	4	15	ns

Switching (kapcsolási) / AC karakterisztika: időfüggést mutat – ‚propagációs’ késleltetések leírása. Egy egyszerű TTL74-es eszköz ~5ns-os jelterjedési késleltetéssel rendelkezik

Megjegyzés: Tápvonal vs. koncentrált paraméterű hálózat



Tápvonal áramköri modellje: A paraméterek: soros ellenállás R , soros induktancia L ; sönt konduktancia G ; és sönt kapacitás C , (mindegyik egységnyi hosszra vonatkoztatva).

- Ha az összeköttetés *rövid*, vagy a *jel felfutási ideje hosszú* (pl. kapuknál), akkor a tápvonal-hatás nem jelentős. Ekkor az induktancia elhanyagolható, és a vonal közelíthető egy **koncentrált paraméterű kapacitással (C)**.
- Az induktancia akkor válik fontossá, amikor a *összeköttetés hosszú*, vagy a *jel felfutási ideje rövid* és így $\frac{Ldi}{dt} = U$ növekszik.
- Az induktancia miatt a tápvonalban folyó áramot nem lehet a végtelenségig növelni az ellenállás csökkentésével és ez jelent alapvető korlátot egy feszültség/áram „hullám” terjedési sebességében (**ebben az esetben tápvonal hatás válik jelentőssé**).

Megjegyzés (folyt): Tápvonal vs. koncentrált paraméterű hálózat

- **Mikor kell tápvonal analízist használni?**

- A tápvonathatás akkor válik jelentőssé, amikor egy *jel felfutási ideje* (t_r) kisebb vagy összemérhető a tápvonal *jelterjedési idejével* (t_f). (Itt a felfutási idő az az idő, amely alatt a jel a végértékének 10%-áról 90%-ára nő)

a jelterjedési idő:
$$t_f = \frac{l}{v},$$

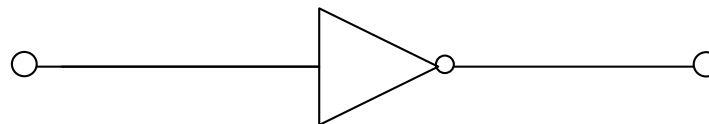
ahol l a tápvonal hossza és v a jel terjedési sebessége. Egyszerű szabályként azt mondhatjuk, hogy a **tápvonal-hatás** akkor jelentős, ha

$$t_r < 2.5 \cdot t_f \quad \text{összemérhető!}$$

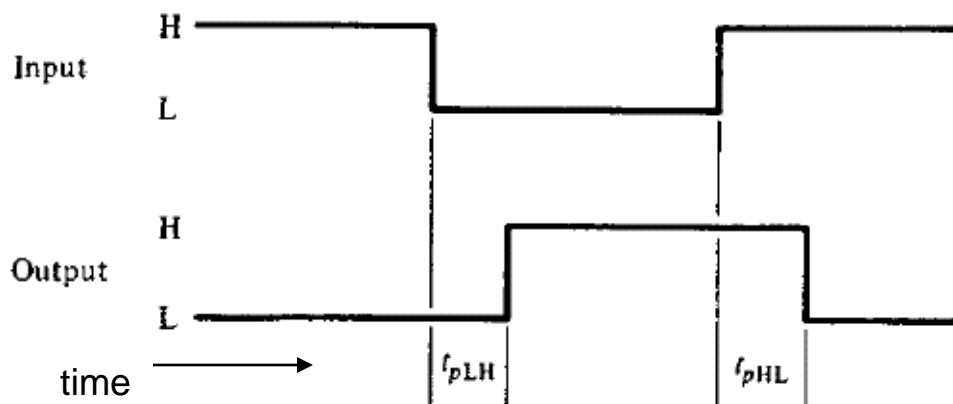
és a tápvonal **koncentrált paraméterű** kapacitásként viselkedik, ha

$$t_r > 5 \cdot t_f$$

Példa: t_p késleltetés



- **Idődiagram analízis:** a bemenet változását a kimenet csak véges idő alatt követi (t_{pLH} ill. t_{pHL})



Propagációs (jelterjedési) késleltetések!

(Waveform-ok)

Késleltetések modellezése:
A hálózatokban minden kapu bemenetére és kimenetére helyezünk késleltető elemeket (Jel: Δt_i).

a.) Statikus hazárd

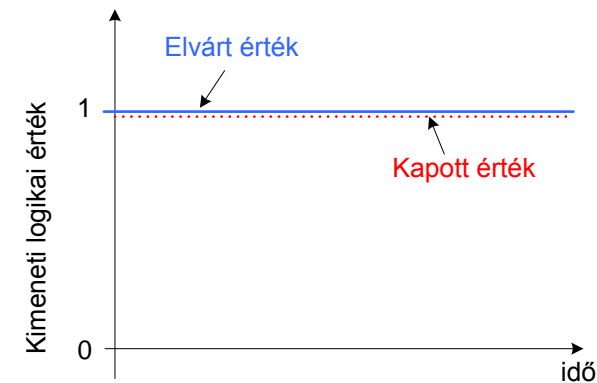
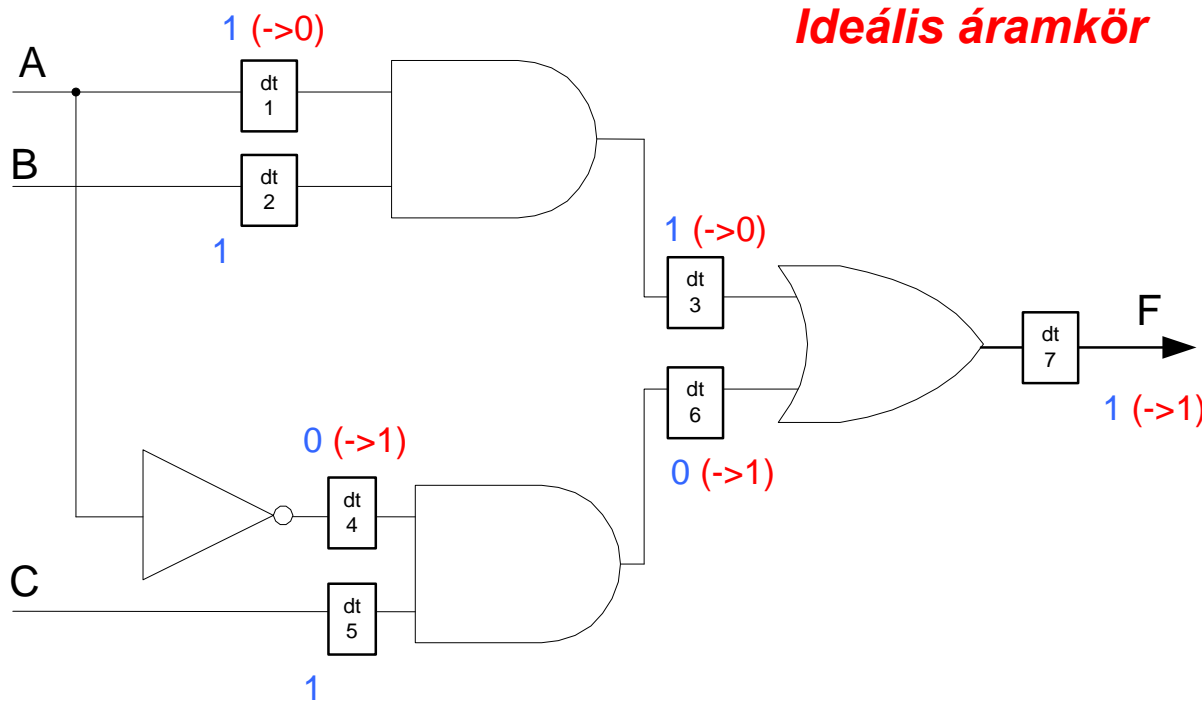
- **Példa 1:** Adott a következő logikai függvény DNF alakja.
- Ha szükséges, hazárd mentesítsük a hálózatot!

$$F^3 = \sum_{i=0}^{2^3-1} (1, 3, 6, 7) = A \cdot B + \bar{A} \cdot C$$

A	BC			
	00	01	11	10
0	0	1	1	0
1	0	0	1	1

Példa 1./a. – Ideális: késleltetési viszonyok figyelembe vétele nélkül! ($T_{fh} \Delta t_i = 0$)

- Az elvi logikai rajzot kiegészítjük *koncentrált késleltetésekkel* (jelölve Δt_i -kel). Feltételezzük: a hálózatot szomszédos bemeneti változás éri (egyetlen bemeneti jel változik meg). Mi játszódik le ekkor az ideális hálózatban?



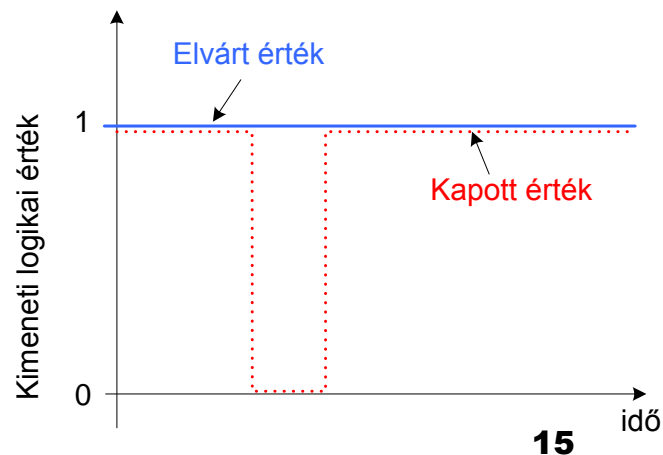
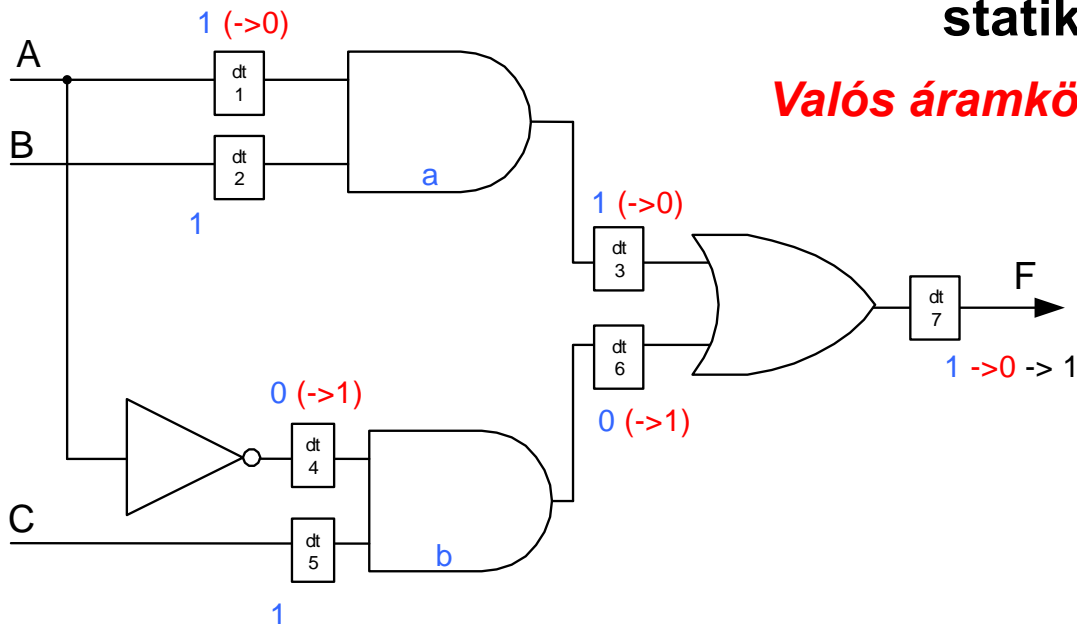
Amikor a bemeneten $ABC=111$, majd a vele szomszédos változás $ABC=011$ következik be (tehát $A: 0 \rightarrow 1$ lesz). A kimeneten mindkét esetben $F='1'$ -et várunk.

Példa 1./b. Valós: késleltetési viszonyok figyelembe vételével (Tfh. Δt_i -k különböznek!)

■ Tegyük fel hogy $0 < (dt1+dt3) < (dt4+dt6)$. Ekkor a VAGY kapunak a felső 'a'-val jelölt ÉS ága előbb hajtódik végre (értékelődik ki), mint az alsó 'b' ÉS ág. Előbb megy végbe az $1 \rightarrow 0$ (A) átmenet, mint az alsó ágon a $0 \rightarrow 1$ (inverter) változása. Így 'a' kapu kimenetén előbb vált '0'-ra, a VAGY-on előáll a '00' párosítás, amelyre „átmenetileg” a kimenet is $F='0'$ lesz!

■ Csak $(dt4+dt6) - (dt1+dt3) > 0$ idővel később lesz megint a várt $F='1'$. Tehát a kimeneten $1 \rightarrow 0 \rightarrow 1$ jelváltás megy végbe, ami **hibát**,

statikus hazárdot jelent!



Definíció: Statikus hazard

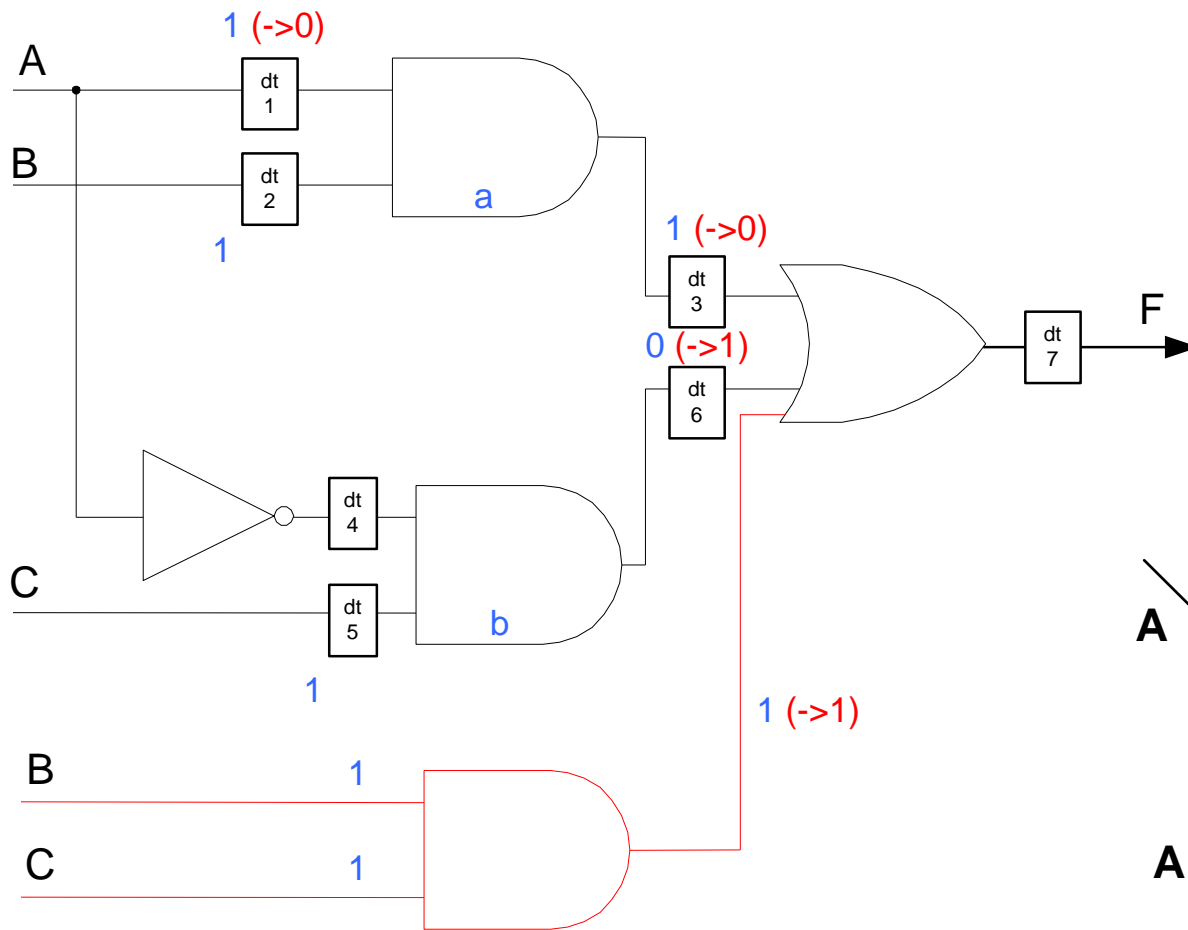
- Kétszintű digitális logikai kombinációs hálózatokban jöhet létre, ahol adott két szomszédos bemeneti kombináció (az előző és az új bemeneti kombinációk Hamming-távolsága=1). Jelölje őket rendre X és X' , amelyre a kimeneti függvényérték azonos $F(X) \equiv F(X')$.
- Ha a bemeneti kombináció egyik szomszédról a másikra változik, és ezalatt a kimenetén átmenetileg F^* érték jelenik meg, amely $F^* \neq (F(X) \equiv F(X'))$ -al, vagyis a kimenetén $F(X) \rightarrow F^* \rightarrow F(X')$ változás következik be a késleltetési viszonyoktól függően a hálózatban **statikus hazard** alakulhat ki.

Általános definíció:

Statikus hazard kiküszöbölése

- A kétszintű (ÉS-VAGY) DNF hálózat pontosan akkor mentes a statikus hazardtól, ha az '1'-es kimeneteket előállító bemeneti kombinációk (mintermek) közül bármely két szomszédos mintermhez található egy olyan **ÉS kapu**, amelynek kimenete mindkét szomszédos bemeneti kombináció (minterm) esetén '1'.
- Azaz: *bármely két szomszédos mintermhez található legalább egy olyan prímisszorzó, amely mindkét mintermet lefedi.*
 - **Statikus hazard megszüntetése:** 1.szinten az ÉS kapuval a szomszédos mintermek összevonását megvalósítani, és ezt kell VAGY kapcsolatba hozni a 2. szinten, így módosítva a hálózatot.
 - *Megj: hasonlóan igaz KNF hálózat esetében is (VAGY-ÉS szintek).*

Példa 1./b. Megoldás: statikus hazárdmentes a hálózat



*Megjegyzés:
a hazárdmentesített hálózat
nem a legegyszerűbb DNF
alakot fogja ábrázolni a
redundancia miatt!*

		C			
		B			
A	BC	00	01	11	10
	0	0	1	1	0
1	0	0	1	1	

0
1
2
3
4
5
6
7
8

További példák: Statikus hazard

- Általában elegendő időt várakozva a kimenet az elvárt (becsült) logikai- és feszültség- értékre áll be (lásd előző példa).
- De vannak olyan hazard-jelenségek is, melyek idővel sem szűnnek meg, további tervezői beavatkozást igényel (pl. funkcionális hazard – szinkronizálással stb.)
 - Példa: ha szomszédos 1-esek vannak Karnaugh táblában, amelyek nincsenek egy tömbbe összevonva, akkor hazard kialakulása lehetséges.
 - Megszüntetés: prímisszorzók lefedés!

Példa 2: Statikus hazárd (DNF)

- Vegyünk egy 3-változós esetet:

		C			
		BC		B	
A	0	00	01	11	10
	1	0	1	3	2
0	1	0	1	0	0
1	4	5	7	6	0

$$F = \sum_{i=0}^{n=3} (0, 1, 5, 7)$$

$$F^3 = \bar{A} \cdot \bar{B} + A \cdot C + \bar{B} \cdot C$$

↑
hazárdmentesítés

- Ha a szomszédos (itt kételemű) hurkok között a „szaggatottal” jelölt összevonást képezzük, akkor biztosíthatjuk a hazárdmentességet (de extra kapu szükséglete van: 1 AND ill. OR kapu kibővítése).
- A Hazárdmentes hálózat nem a legegyszerűbb DNF alakot fogja megadni.

Példa 3: hazárdmentesítésre DNF

■ Legyen $F = \sum_{i=0}^{15} (0,1,2,5,7,10,11,13,15)$ TSH

■ Ekkor a következő K-tábla írható fel (DNF):

		CD					
		00	01	11	10		
A	AB	00	1	1	0	1	B
		01	0	1	1	0	
	11	0	1	1	0		
	10	0	0	1	1		
		D					

$$F(A, B, C, D) = \bar{A} \cdot \bar{B} \cdot \bar{C} + B \cdot D +$$

$$+ A \cdot C \cdot D + \bar{B} \cdot C \cdot \bar{D} +$$

$$+ \bar{A} \cdot \bar{C} \cdot D + A \cdot \bar{B} \cdot C + \bar{A} \cdot \bar{B} \cdot \bar{D}$$

Hazárdmentesítés miatt kellene (extra kapuk)

Ebből már felrajzolható a hazárdmentesített áramkör (7+1 kapuból)!

Példa 3: hazárdmentesítésre **KNF**

■ Legyen $F = \sum_{i=0}^{15} (0, 1, 2, 5, 7, 10, 11, 13, 15)$ TSH

■ Megvizsgálni, **KNF-el nem egyszerűbb-e?**

		CD			
		00	01	11	10
AB	00	1	1	0	1
	01	0	1	1	0
	11	0	1	1	0
	10	0	0	1	1
		D			

Diagram showing a 4x4 Karnaugh map for function F(A,B,C,D). The map is labeled with variables A, B, C, and D. The top row is labeled CD, and the left column is labeled AB. The cells are numbered 0 to 15. The function value is 1 for cells 0, 1, 2, 5, 7, 10, 11, 13, 15 and 0 for cells 3, 4, 6, 8, 9, 12, 14. A blue arrow points from the map to the equation. A red dashed circle highlights cells 8 and 9. A black circle highlights cell 3. A black oval highlights cells 0, 1, 2, 5, 7, 10, 11, 13, 15. A black arrow points from the equation to the text below.

$$F(A, B, C, D) = (\bar{B} + D) \cdot (\bar{A} + B + C) \cdot$$

$$\cdot (A + B + \bar{C} + \bar{D}) \cdot$$

$$\cdot (\bar{A} + C + D)$$

Hazárdmentesítés miatt kellene (extra kapuk)

Ebből már felrajzolható a hazárdmentesített áramkör (4+1 kapuból)! Itt: **KNF optimálisabb!**

Statikus hazard több-kimenetű hálózatokban

- TSH: Több-kimenetű hálózatokban a statikus hazard minden kimeneten felléphet a szomszédos jelváltozásra.
 - Kiküszöböléséhez a módszer hasonlóan történik, mint egy-kimenetű esetben, csak **kimeneti függvényenként külön-külön** kell az összes prímisszósítást megvalósítani. (Azaz az összesített prímisszósítás tábla képzése és lefedése elhagyható – nincs lényeges prímisszósítás)
 - A közös prímisszósításokat elegendő egyszer megvalósítani.
- NTSH: intuitív módon, próbálgatással kell előállítani a kétszintű statikus hazard mentes hálózatot.
 - Optimális lefedéseket keresni, miközben vizsgálni kell a lefedések közötti átmeneteken a statikus hazard-ot.

b.) Definíció: Dinamikus hazárd

- Adott két szomszédos bemeneti kombináció (Hamming távolságuk = 1), jelölje őket X és X' amelyre az kezdeti - elvárt kimeneti függvényértékek eltérőek $F(X) \neq F(X')$!
- Ha a bemeneti kombináció egyik szomszédáról a másikra változik ($X \rightarrow X'$), mialatt a kimenetén átmenetileg $F(X) \rightarrow F(X')$ helyett $F(X) \rightarrow F(X') \rightarrow F(X) \rightarrow F(X')$ jelváltozások sorozata játszódik le, akkor a késleltetési viszonyoktól függően a hálózatban **dinamikus hazárd** van.
- Kialakulás feltétele: Olyan **többszintű** (>2) **digitális logikai kombinációs hálózatokban** jöhet létre, ahol a *statikus hazárd az alacsonyabb hierarchia szinteken nem lett megszüntetve*.
- **Megszüntethető**: az alacsonyabb hierarchia szinteken történő statikus hazárd kiküszöbölésével.

Példa: Dinamikus hazárd vizsgálat

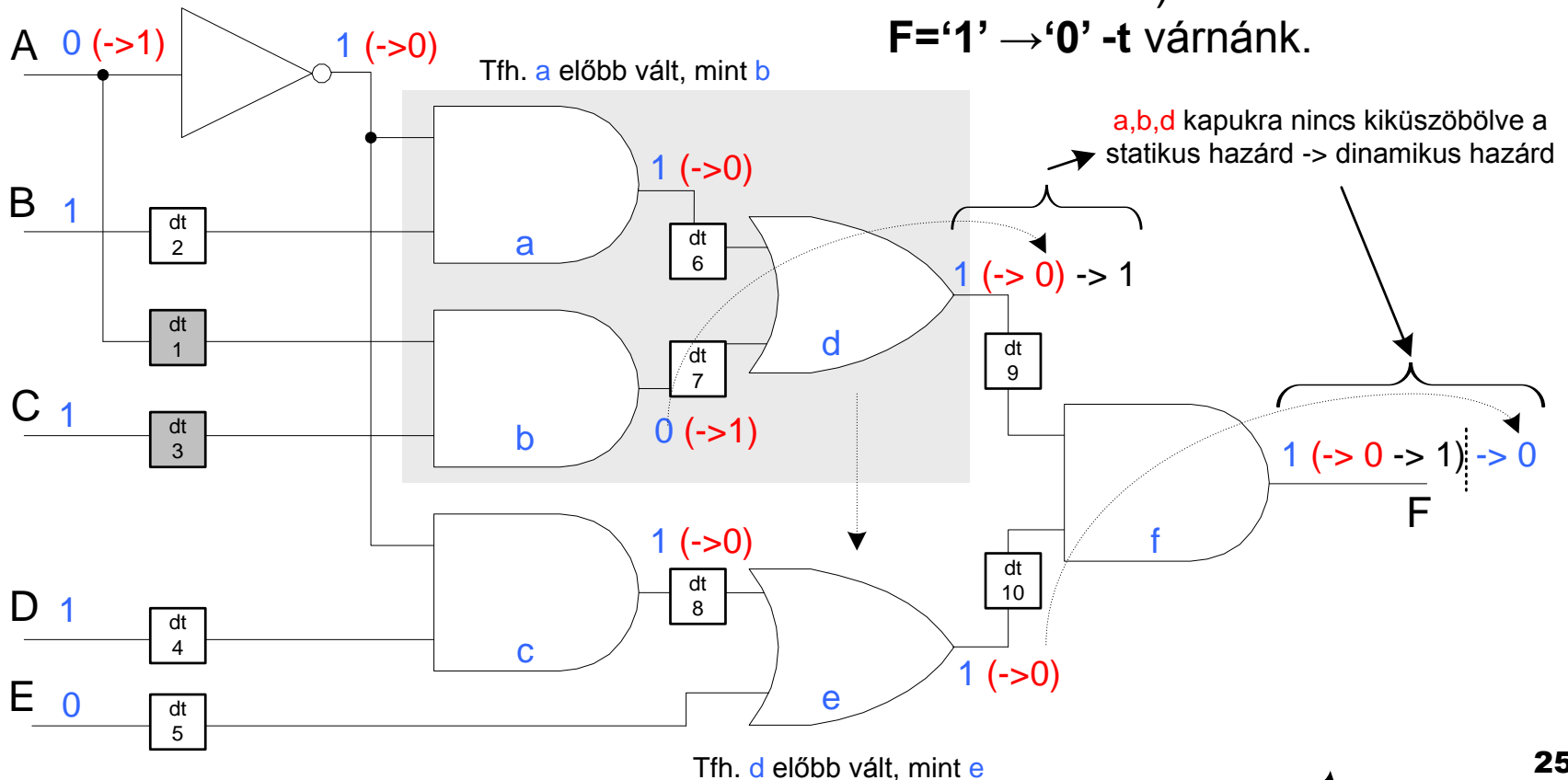
- Adott a következő többszintű F függvény:

$$F^{n=5} = (\overline{AD} + E)(\overline{AB} + AC)$$

Amikor a bemeneten **ABCDE=01110**, majd a szomszédos változás **ABCDE=11110** következik be (tehát A: 0 → 1 változás). A kimeneten ekkor **F='1' → '0'**-t várnánk.

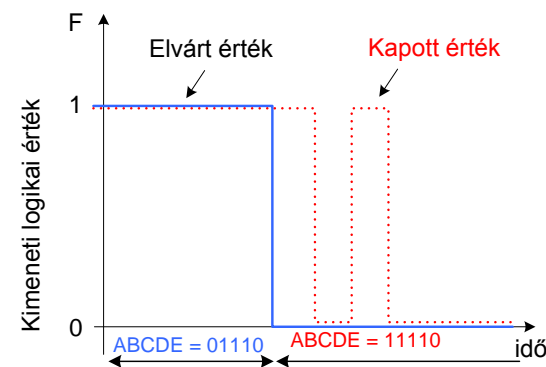
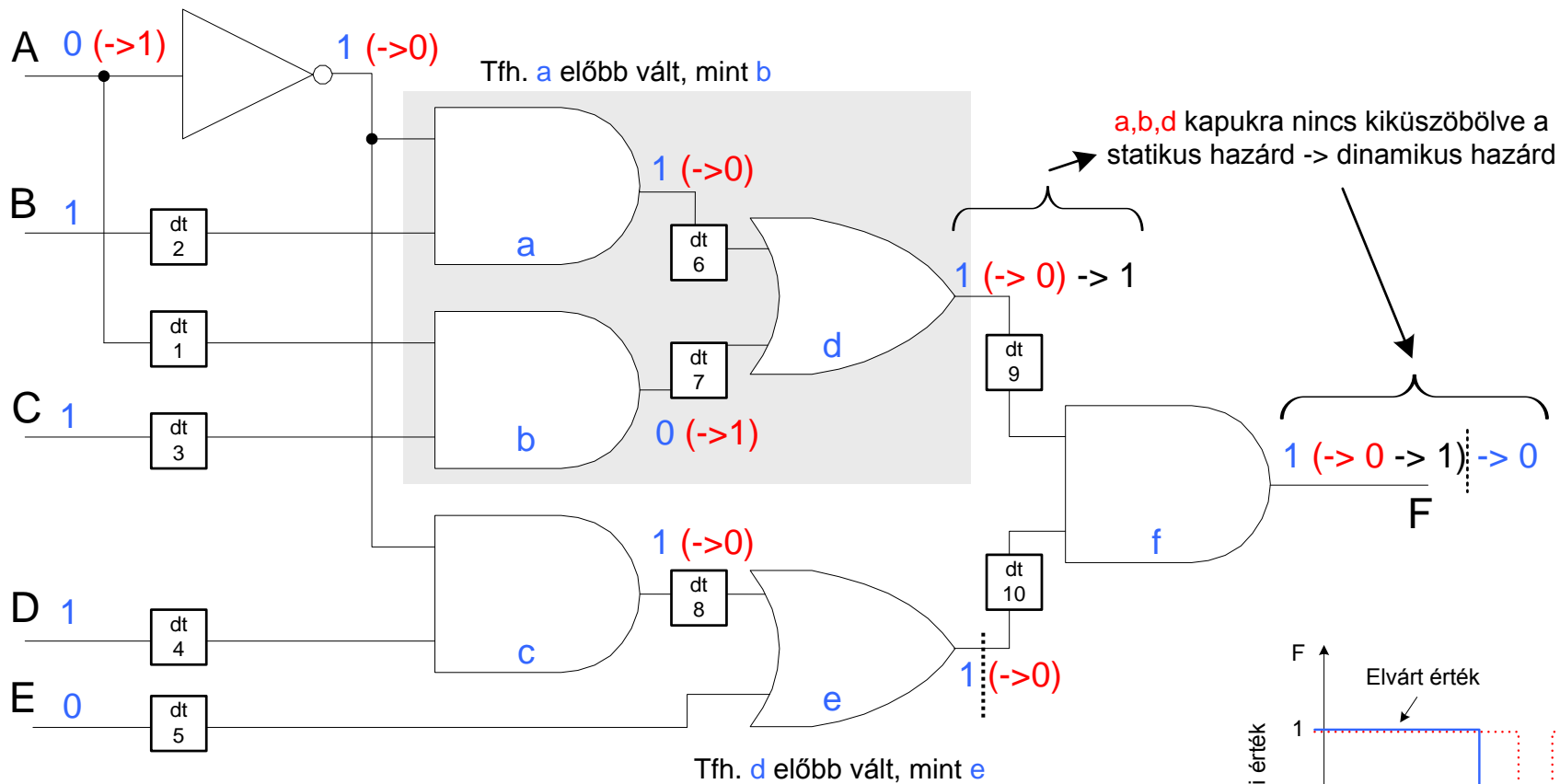
Szomszédos változás

ÉS-VAGY-ÉS hierarchia



Dinamikus hazárd vizsgálat

$ABCDE = \underline{0}1110,$
 $ABCDE = \underline{1}1110$



Példa (folyt): Dinamikus hazárdra

$$F^{n=5} = (\overline{AD} + E)(\overline{AB} + AC)$$

Szomszédos
változás

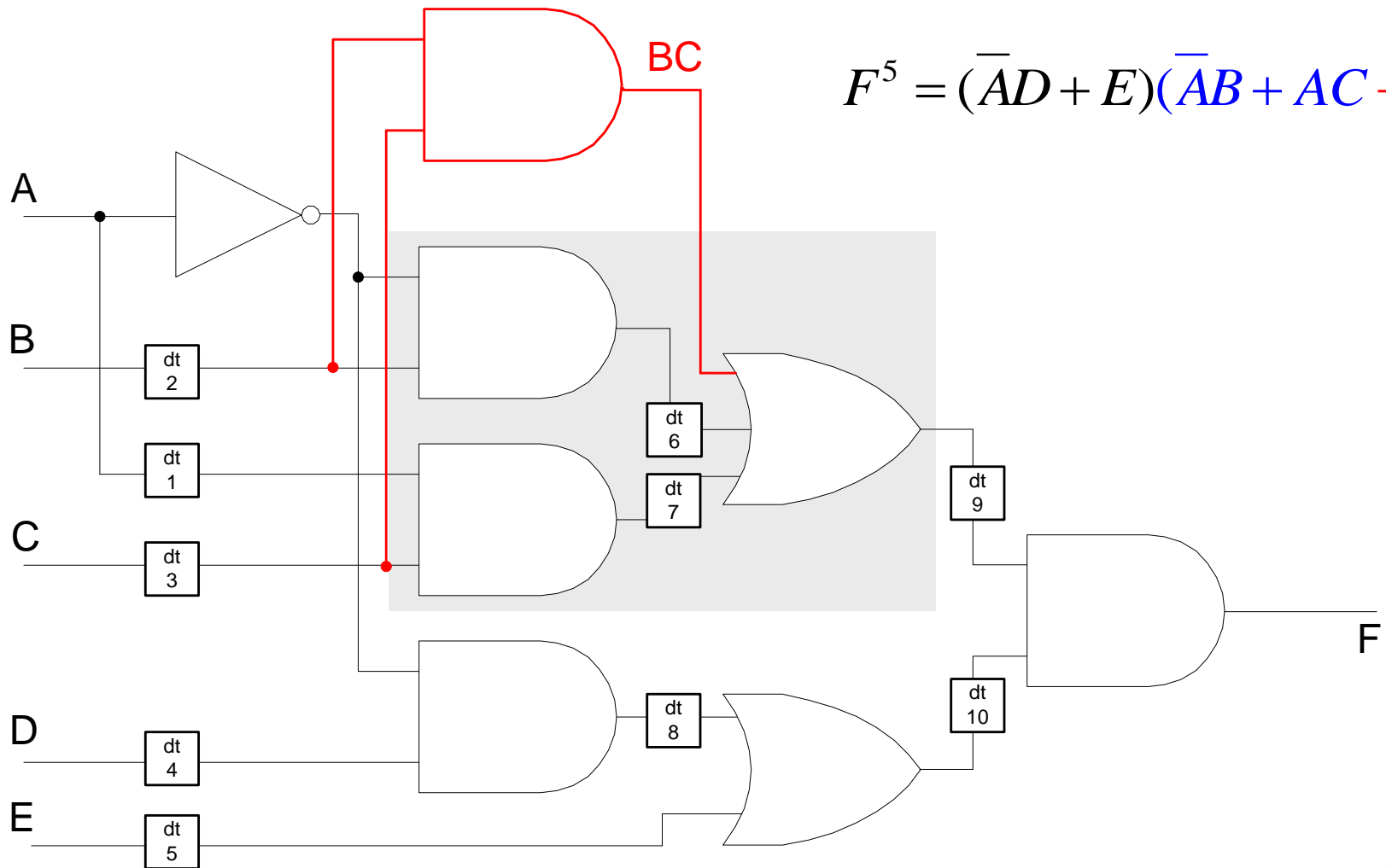
Amikor a bemeneten
ABCDE=01110, majd a
szomszédos változás
ABCDE=11110 következik be
(tehát 0→1 lesz A). A kimeneten
ekkor F='1'→'0'-t várnánk.

		D				C			
		00	01	11	10	00	01	11	10
AB	00	Y ₀	Y ₁	Y ₃	Y ₂	Y ₆	Y ₇	Y ₅	Y ₄
	01	1 ₈	1 ₉	1 ₁₁	1 ₁₀	1 ₁₄	1 ₁₅	1 ₁₃	1 ₁₂
	11	Y ₂₄	Y ₂₅	Y ₂₇	Y ₂₆	1 ₃₀	1 ₃₁	1 ₂₉	1 ₂₈
	10	Y ₁₆	Y ₁₇	Y ₁₉	Y ₁₈	1 ₂₂	1 ₂₃	1 ₂₁	1 ₂₀
		E				E			
		A				B			

**Dinamikus hazárd
megszüntetése: statikus
hazárd megszüntetésével
hierarchia szintenként**

$$F^5 = (\overline{AD} + E)(\overline{AB} + AC + BC)$$

Dinamikus hazárd megszüntetése



$$F^5 = (\bar{A}D + E)(\bar{A}B + AC + BC)$$

c.) Funkcionális hazard

- Eddig: csak *szomszédos (minterm) bemeneti változások* esetén vizsgáltuk a hazard jelenségeket (késleltetések hatását).
- Most: **tetszőleges bemeneti (azaz nem-szomszédos, Hamming-távolság > 1)** kombináció változásokra is meg kell vizsgálni, milyen változások játszódhatnak le a hálózat kimenetén.
 - Azaz ha adott változó, bármelyik másik változóval egyszerre vált értéket,
 - vagy egyszerre több bemeneti változó vált értéket.

Általános definíció:

Funkcionális hazard és megszüntetése

- Ha a *nem-szomszédos* bemeneti kombinációk változásait a hálózat egyes részei *szomszédos változások sorozataként* érzékelik.
 - **Megszüntetés I. mód:** a hálózatba szándékosan beépített késleltetésekkel úgy kell beállítani a jelterjedési késleltetés értékeit, hogy azok minden lehetséges megváltozásakor csak olyan „**közbenső értékek** alakuljanak ki” (*Példa 1.-ben* $ABC='000' = '1'$), amelyek nem hoznak létre átmeneti hibát.
 - Buffer: páros számú inverter fokozat. Ez egyszerű és hatékony megoldás lehet, de lassítja a működést.
 - **Megszüntetés II. mód:** szinkronizáló órajelekkel ún. „elnyeletni” a hazard jelenséget. (*Példa 2.*).
 - Ez a megvalósítási mód már a Sorrendi logikai hálózatok tervezési módszerei felé mutat.

Példa 1: Funkcionális hazárd

- Vegyünk egy 3-változós esetet:

		C			
		B			
A	BC	00	01	11	10
	0		1	1	0
1		1	0	0	0

A 4-es állapot (A=0, B=0, C=0) és a 1-es állapot (A=0, B=1, C=0) közötti átmenet funkcionális hazárd. A diagram a 4-es állapotból a 1-es állapot felé mutat egy piros nyílra, amely az A változó megváltozását jelöli. A 1-es állapotból a 0-es állapot felé mutat egy kék nyílra, amely az A változó megváltozását jelöli. A 4-es állapotból a 5-ös állapot felé mutat egy kék nyílra, amely az A változó megváltozását jelöli.

$$F^{n=3} = \sum_{i=0}^7 (0, 1, 4)$$

$$F^{n=3} = \overline{A} \cdot \overline{B} + \overline{B} \cdot \overline{C}$$

Vizsgáljuk: ha bemeneti változás során az A és C változó vált értéket.

(Előfordulhat, hogy A megváltozása, más esetben C megváltozása jut el előbb bizonyos kapuk bemenetére.)

- Nem szomszédos változás (változás sorozat): $m4 \rightarrow m1$ ($4 \rightarrow 1$)

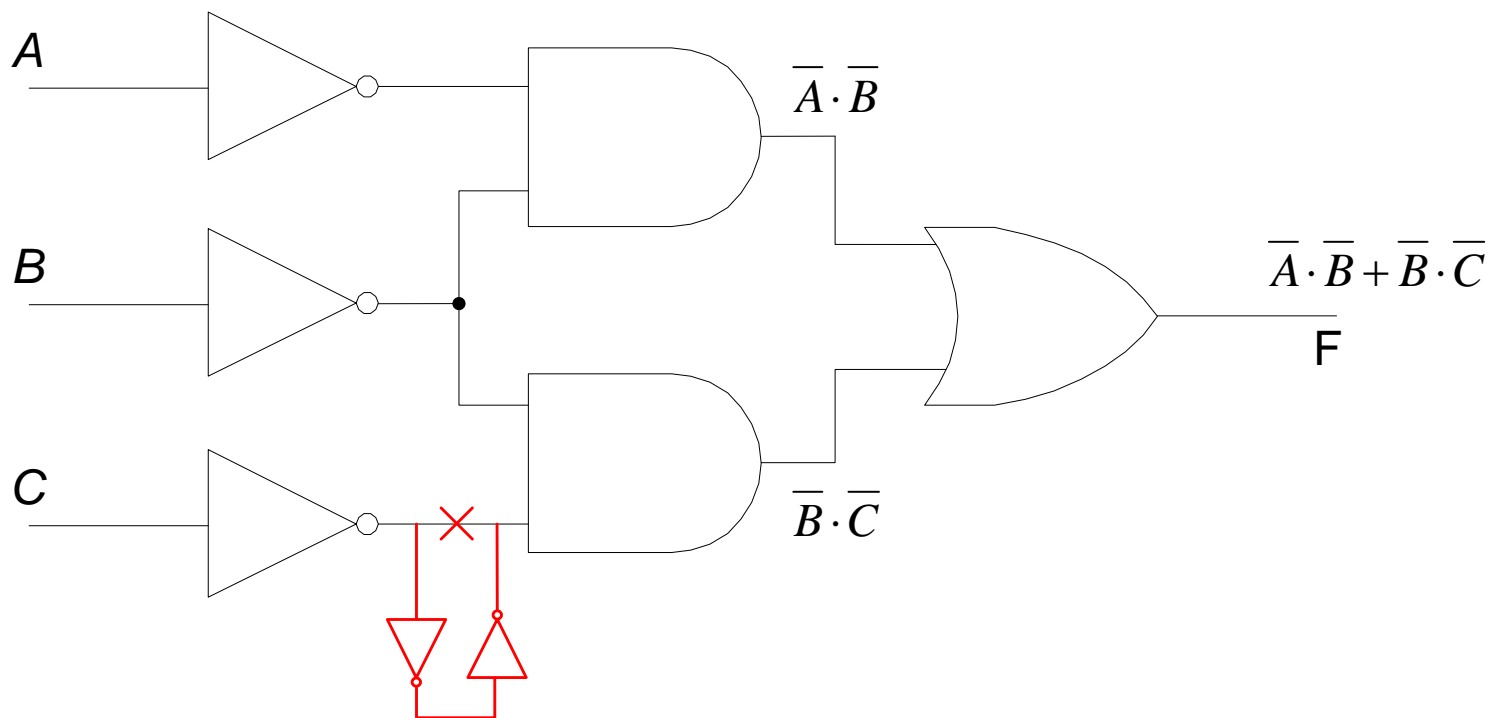
- 4: 100
 - 1: 001
- Nem szomszédok 100 -> 001**

- Az átmenet két lehetséges úton realizálható (változás sorozattal):

- A.) $4 \rightarrow 0 \rightarrow 1 = 100 \rightarrow 000 \rightarrow 001 = '1' \rightarrow '1' \rightarrow '1'$
- B.) $4 \rightarrow 5 \rightarrow 1 = 100 \rightarrow 101 \rightarrow 001 = '1' \rightarrow '0' \rightarrow '1'$ (funkcionális hazárd!!!
átmeneti hiba)

Példa 1.) Funkcionális hazárd megszüntetése (I. módszer)

- A direkt késleltetendő 'C' ágba páros számú inverter fokozat (buffer) beépítése. Így már az 'A' változása előbb realizálódik, a 'C' megváltozása pedig később.



Példa 2: Funkcionális hazárd

- Vegyünk egy 3-változós esetet:

		C			
		B			
A	BC	00	01	11	10
	0	0	1	0	0
1	1	0	0	0	0
		4	5	7	6

Diagram showing a 3-variable Karnaugh map for variables A, B, and C. The map is a 2x4 grid. The top row is labeled '0' for A, and the bottom row is labeled '1' for A. The columns are labeled '00', '01', '11', and '10' for BC. The cells contain values: (0,00)=0, (0,01)=1, (0,11)=0, (0,10)=0; (1,00)=1, (1,01)=0, (1,11)=0, (1,10)=0. A red arrow points from cell (0,01) to (1,01), and a blue arrow points from (1,01) to (1,00). Dashed circles highlight cells (0,01) and (1,00).

$$F = \sum_{i=0}^{n=3} (1, 4)$$

$$F^3 = A \cdot \bar{B} \cdot \bar{C} + \bar{A} \cdot \bar{B} \cdot C$$

Vizsgáljuk: bemeneti változás során az A és C változó vált értékét.

(Előfordulhat, hogy A megváltozása, más esetben C megváltozása jut el előbb bizonyos kapuk bemenetére.)

- Nem szomszédos változás (változás sorozat): m4 -> m1 (4->1)

- 4: 100
 - 1: 001
- Nem szomszédok 100 -> 001***

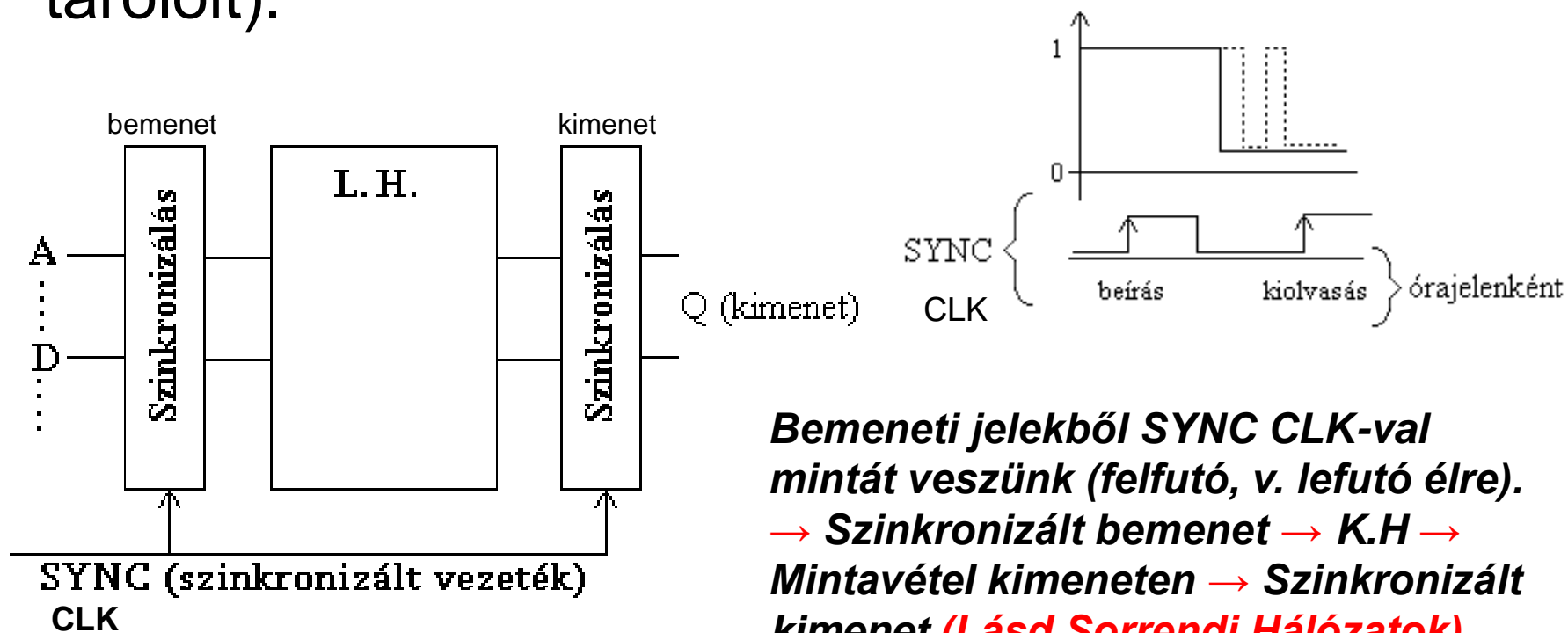
- Az átmenet két lehetséges úton realizálható (változás sorozattal):

- A.) 4 -> 0 -> 1 = 100 -> 000 -> 001 = '1' -> '0' -> '1' (funkcionális hazárd!)
- B.) 4 -> 5 -> 1 = 100 -> 101 -> 001 = '1' -> '0' -> '1' (funkcionális hazárd!)

(átmeneti hibák) 33

(II. mód) Funkcionális hazard mentesítése

- Megszüntethető: *szinkronizációval* (órajel fel-, vagy lefutó élére működtetjük a hálózat be-, és kimeneti tárolóit).



**Bemeneti jelekből SYNC CLK-val mintát veszünk (felfutó, v. lefutó élre).
→ Szinkronizált bemenet → K.H. →
Mintavétel kimeneten → Szinkronizált kimenet (Lásd Sorrendi Hálózatok)**

Példa 2.) Funkcionális hazárd megszüntetése (II. módszer)

■ Megszüntethető: szinkronizációval

- fel-, vagy lefutó élre mintavétel a bemeneten → Szinkronizált bemenet → K.H. → Mintavétel a kimeneten → Szinkronizált kimenet

