9. HAZARDUL STRUCTURILOR LOGICE

Circuitele logice folosesc elemente de comutație pe care le-am considerat până acum ca fiind elemente ideale în sensul că $(x, \overline{x}) = (0, 1)$ sau $(x, \overline{x}) = (1, 0)$. În realitate, pe durata regimurilor tranzitorii, apar situații în care $(x, \overline{x}) = (0, 0)$ sau $(x, \overline{x}) = (1, 1)$.

În figurile 9.1 şi 9.2 sunt exemplificate situații practice în care apar valori incorecte ale variabilelor de ieşire.

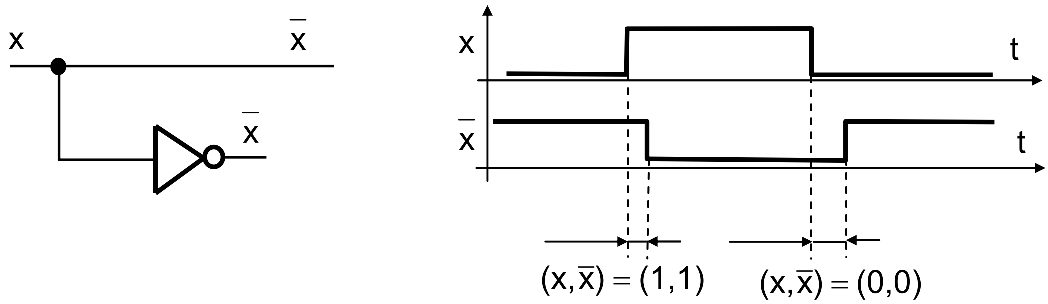


Figura 9.1 Exemplu combinațional de apariție a unor valori logice false la ieşire

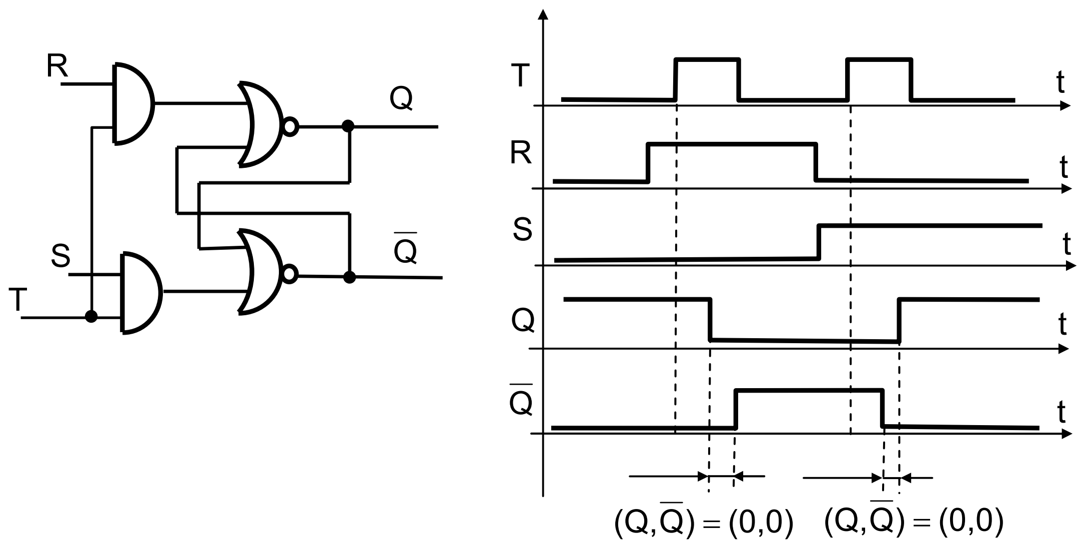


Figura 9.2 Exemplu secvențial de apariție a unor valori logice false la ieşire

Influența acestor regimuri tranzitorii asupra funcționării circuitelor logice este cunoscută sub numele de *hazard în funcționare*.

9.1 Hazardul în circuitele logice combinaționale

În cazul CLC, hazardul în funcționare este clasificat după regimul tranzitoriu al variabilelor de ieşire în *hazard static*, *hazard dinamic* şi *hazard de curse*.

9.1.1 Hazardul static

Un CLC prezintă hazard static dacă pentru două valori adiacente ale intrărilor ieşirea trebuie să rămână constantă, dar există un regim tranzitoriu pe durata căruia ieşirea îşi schimbă valoarea.

Ieşirea z a unui circuit se poate scrie în raport cu variabila x sub una din următoarele două forme:

1.

$$z = Ax + B\bar{x} + C \qquad (9.1)$$

$$A = B = 1, C = 0 \Rightarrow z = x + \bar{x} = 1$$

$$\left(x, \bar{x}\right) = \left(0,0\right) \Rightarrow z = 0 \rightarrow \text{ hazard static în 1}$$

Pentru eliminarea acestui tip de hazard trebuie respectată condiția C ≥ AB.

Fie funcția logică z = R_1(1,3,6,7). Hazardul static este evidențiat în cele ce urmează, pentru metodele uzuale de sinteză.

1.a. metoda Veitch-Karnaugh:

$x_2 \setminus x_1x_0$	00	01	11	10
0		1	1	
1			1	1

$$z = \bar{x}_2x_0 + x_2x_1$$

$$x_0 = 1, x_1 = 1 \Rightarrow z = \bar{x}_2 + x_0 \rightarrow \text{hazard static in 1}$$

(9.2)

Hazardul static în 1 apare dacă în diagrama Karnaugh există celule adiacente ce conțin 1 şi care nu sunt acoperite de acelaşi implicit prim. Eliminarea acestui tip de hazard poate fi realizată dacă de elimină situațiile descrise prin introducerea unor termeni redundanți în expresia funcției:

$$z = \bar{x}_2x_0 + x_2x_1 + x_1x_0$$

$$x_0 = 1, \bar{x}_1 = 1 \Rightarrow z = \bar{x}_2 + x_2 + 1 \qquad (9.3)$$

1.b. metoda Quine-McCluskey:

	-	-
1	001	1
2	011	3
	110	6
3	111	7

A	0-1	R(1,3)
B	-11	R(3,7)
C	11-	R(6,7)

$A = \overline{x}_2 \cdot x_0, B = x_1 \cdot x_0$

$C = x_2 \cdot x_1$

	1	3	6	7
A	1	1		
B		1		1
C			1	1

$F_A (F_A + F_B) F_C (F_B + F_C) = 1$

$F_A F_C = 1$

$$z = A + C$$
$$z = \overline{x}_2 x_0 + x_2 x_1 \tag{9.4}$$

Există hazard static în 1 dacă x_0=1, x_1=1. Circuitul poate prezenta deci hazard static în 1, la comutațiile x_2, în situațiile:

$011 \leftrightarrow 111 \Leftrightarrow 3 \leftrightarrow 7$

Pentru a elimina acest tip de hazard, în expresia funcției trebuie adăugați implicanții primi care sunt egali cu 1 pentru aceste comutări, adică B.

$$z = \overline{x}_2 x_0 + x_2 x_1 + x_1 x_0 \tag{9.5}$$

2. $z = (R + x) \cdot (S + \overline{x}) \cdot T$

$R = S = 0, T = 1 \Rightarrow z = x\overline{x}$

$\left(x, \overline{x}\right) = (1,1) \Rightarrow z = 1 \rightarrow$ hazard static în 0

Pentru eliminarea acestui tip de hazard trebuie respectată condiția T ≤ R+S. Măsurile luate sunt similare celor utilizate pentru forma disjunctivă.

9.1.2 Hazardul dinamic

Un CLC prezintă *hazard dinamic* dacă pentru două intrări adiacente ieşirea trebuie să comute $0 \rightarrow 1$ $(1 \rightarrow 0)$, însă pe durata regimului tranzitoriu ieşirea evoluează în secvența $0 \rightarrow 1 \rightarrow 0 \rightarrow 1$ (respectiv $1 \rightarrow 0 \rightarrow 1 \rightarrow 0$). Hazardul dinamic poate să apară în circuitele în care există 3 sau mai multe căi de semnal şi timpi de propagare diferiți pentru aceeaşi variabilă.

Un astfel de exemplu este prezentat în figura 9.3.

În cazul CLC pe două nivele sintetizate corect nu poate să apară hazard dinamic (considerând că timpii de propagare sunt aceeaşi pentru porți similare).

9.1.3 Hazardul de curse

Un CLC prezintă *hazard de curse* dacă atunci când cel puțin două intrări se modifică ieşirea trebuie să rămână constantă, dar ea îşi schimbă valoarea pe durata regimului tranzitoriu.

Condiția necesară şi suficientă pentru ca între două puncte de funcționare să nu existe hazard de curse este ca funcția de ieşire a circuitului să conțină implicantul prim ce închide cele două puncte.

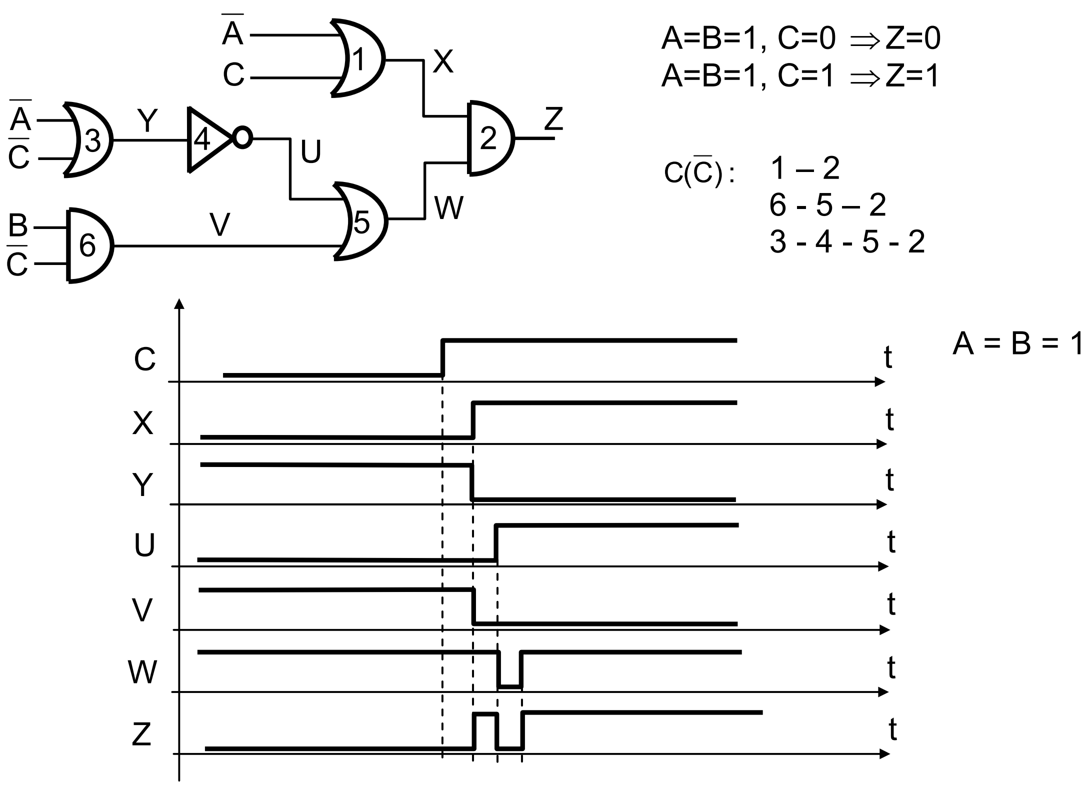


Figura 9.3 Exemplificarea hazardului dinamic

Pentru a exemplifica hazardul de curse vom considera funcția z, de trei variabile, de mai jos (relația 9.6).

$$z = \overline{x}_2 x_0 + x_2 x_1 + x_1 x_0 \qquad (9.6)$$

(nu prezintă hazard static în 1)

La comutarea $001 \rightarrow 111$, variabila care nu se modifică, conform reprezentării Karnaugh din figura 9.4, este $x_0 = 1$. Prin sinteză se obține:

$$z = \overline{x}_2 + x_2 x_1 + x_1 \qquad (9.7)$$

Dacă $\overline{x}_2$, x_2 şi x_1 comută conform diagramei de semnale din figura 9.4, atunci apare hazard de curse.

$x_2 \backslash x_1 x_0$	00	01	11	10
0		1	1	
1			1	1

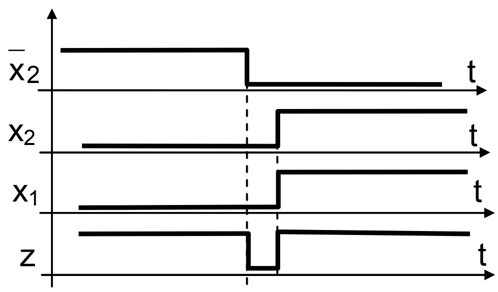


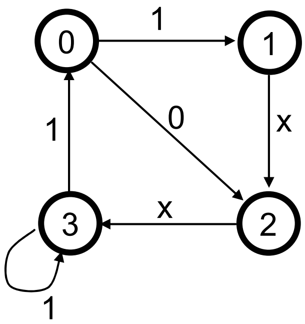
Figura 9.4 Exemplificarea hazardului de curse

Cele două puncte (între care apare hazard de curse) nu pot fi incluse în acelaşi implicant prim, deci hazardul de curse nu poate fi eliminat prin metoda menționată. O soluție ar fi validarea ieşirilor numai după terminarea regimului tranzitoriu. În cazul CLC, hazardul nu modifică decât regimul tranzitoriu al circuitului, fără a schimba regimul permanent.

9.2 Hazardul în sisteme secvențiale asincrone

9.2.1 Hazardul de curse

Fie un sistem secvențial asincron având graful de fluență din figura 9.5.



Q \ x	0	1
0	2	1
1	2	2
2	3	3
3	$\boxed{3}$	0

Q	y_1	y_0
0	0	0
1	0	1
2	1	1
3	1	0

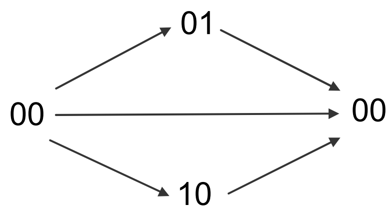
y_1 y_0 \ x	0	1
00	11	01
01	11	11
11	10	10
10	10	00

Figura 9.5 Exemplificarea hazardului de curse în sisteme secvențiale asincrone

Dacă automatul se află într-o anumită stare, iar starea următoare este aceeaşi pentru o anumită intrare, atunci starea respectivă se numeşte *stare stabilă* şi se încercuieşte (starea 3 pentru x = 0).

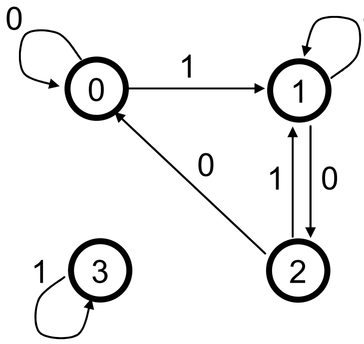
Dacă automatul se află în starea 3 şi x = 0, nu are loc nici o tranziție. Dacă x devine 1, automatul trece în starea 0, apoi în 1, 2, 3 şi din nou în 0 etc. Pentru x = 1, automatul nu evoluează spre o stare stabilă şi trece periodic prin aceeaşi succesiune de stări, descriind un ciclu. Dacă x devine din nou 0 atunci când automatul se află în starea 0, atunci el trece în starea 2, apoi în starea stabilă 3.

Dacă asignarea de stare se face conform tabelei din figura 9.4, tranziția $0 \to 2$ se codifică $00 \to 11$. Tehnologic este imposibil ca ambele variabile (y_1, y_0) să se modifice simultan. Există 3 posibilități de modificare a variabilelor de stare y_1 y_0 din 00 în 11:



O succesiune de comutații care înlocuieşte o comutație unică se numeşte *cursă*.

Corespunzător acestor 3 variante, există 3 posibilități de evoluție a automatului, ilustrate pe matricea de excitație. În toate cele 3 cazuri, automatul ajunge în starea stabilă 3 (10) pe care nu o mai părăseşte până la o nouă modificare a intrării x. Se spune că această cursă *nu este critică*, deoarece rezultatul comutărilor succesive este identic cu cel prevăzut în matricea de excitație (atingerea stării stabile 3). Există şi curse pentru care starea finală depinde de ordinea în care are loc comutarea variabilelor de stare. Astfel de curse se numesc *curse critice*. Pentru a ilustra astfel de curse, considerăm sistemul descris în figura 9.6.



Q \ x	0	1
0	0	1
1	2	1
2	0	1
3	3	3

Q	y_1	y_0
0	0	0
1	1	1
2	0	1
3	1	0

$y_1 y_0$ \ x	0	1
00	00	11
01	00	11
11	01	11
10	10	10

Figura 9.6 Exemplificarea curselor critice

Dacă automatul se află în starea 00 cu x = 0 şi apoi x devine 1, acesta trece direct în 11 dacă y_1y_0 comută simultan. Dacă y_0 comută primul, starea finală este tot 11, dar se trece şi prin 01. În schimb, dacă y_1 comută primul, automatul ajunge în starea 10 (3) din care nu mai poate fi scos, indiferent de valoarea lui x.

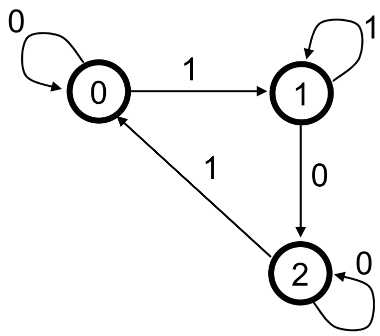
În acelaşi mod pot fi studiate şi cursele asupra variabilelor de intrare, atunci când automatul are mai multe intrări ce se modifică simultan.

Hazardul de curse se elimină dacă sunt respectate următoarele condiții:

1. dacă modificarea intrării se face prin schimbarea unei singure variabile de intrare, dar sunt necesare circuite suplimentare care să asigure această condiție.
2. dacă tranzițiile între stări au loc prin schimbarea unei singure variabile de stare; stările între care au loc tranziții trebuie să fie codificate prin valori adiacente ale variabilelor de stare.

În continuare sunt ilustrate asignările de stare, fără hazard de curse, pentru automate cu 3 şi 4 stări.

Exemplul 1



y_1 \ y_0	0	1
0	0	1
1	f	2

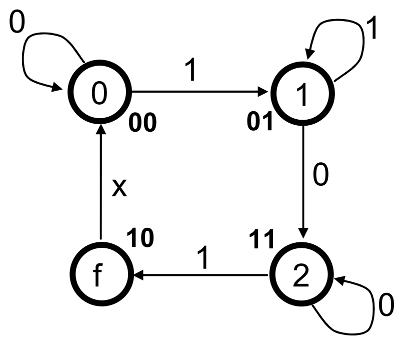
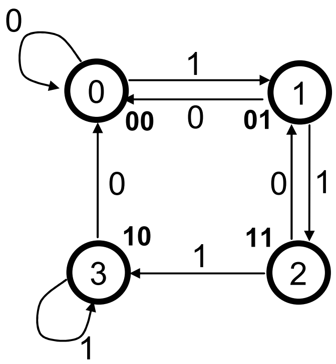


Figura 9.7 Exemplu de asignare de stare pentru automate cu 3 stări

Se observă că este imposibilă o asignare de stare fără hazard de curse dacă au loc tranziţii între fiecare două stări. Rezolvarea acestei probleme presupune ca stările între care au loc tranziţii să fie codificate prin valori adiacente ale variabilelor de stare. Adiacenţa este pusă simplu în evidenţă pe diagramele Karnaugh. Pentru asignarea propusă, stările 0 şi 1 sunt adiacente, de asemenea stările 1 şi 2. Este necesar ca şi stările 2 şi 0 să fie adiacente. Pentru aceasta, se introduce *starea fictivă f* şi se impune condiţia ca automatul să treacă necondiţionat din f în 0. Tranziţia 2 - 0 devine în acest caz 2 - f - 0, rezolvându-se astfel problema adiacenţelor între stările între care au loc tranziţii.

Exemplul 2



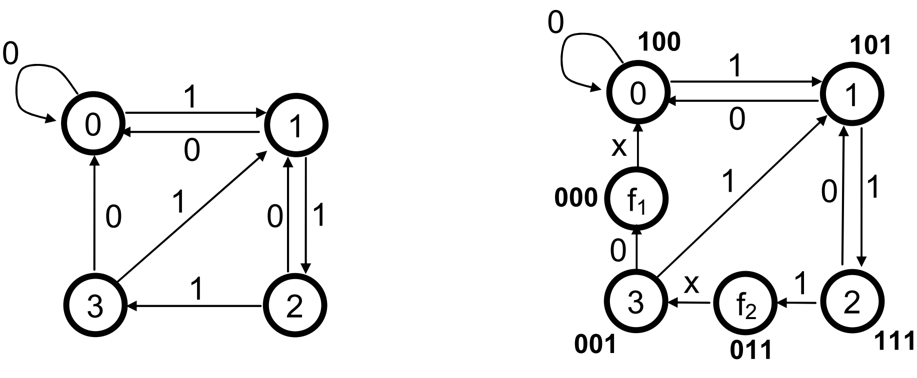
$y_1 \backslash y_0$	0	1
0	0	1
1	3	2

Q	y_1	y_0
0	0	0
1	0	1
2	1	1
3	1	0

Figura 9.8 Exemplu de asignare de stare pentru automate cu 4 stări

Asignarea de stare fără hazard de surse se poate realiza numai cu două variabile de stare.

Exemplul 3

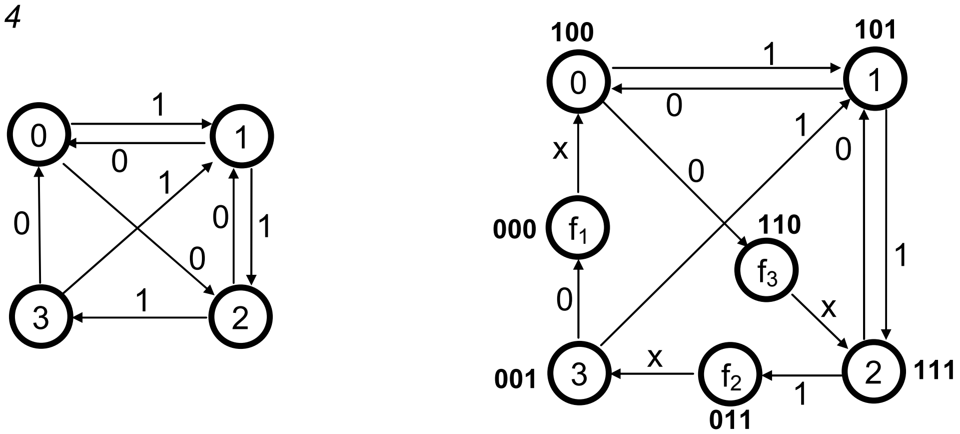


$y_2 \backslash y_1 y_0$	00	01	11	10
0	f_1	3	f_2	
1	0	1	2	

Figura 9.9 Exemplu de asignare de stare pentru automate cu 4 stări având o diagonală în graful de fluenţă

În cazul automatelor cu 4 stări al căror graf de fluență are o diagonală, eliminarea hazardului de curse nu se poate rezolva doar cu două variabile de stare. Oricum s-ar alege aceste variabile, vor rezulta tranziții care se realizează prin modificarea a două variabile de stare. Problema se poate rezolva dacă se vor aloca 3 variabile de stare. Următoarele perechi de stări sunt adiacente: 0-1, 1-2, 1-3. Pentru a rezolva şi adiacența între stările 2-3 şi 3-0, se introduc două stări fictive f_1 şi f_2. Graful de fluență modificat conține 6 stări, dintre care 2 sunt fictive. Fiecare tranziție din acest graf are loc între stări adiacente (2-f_2-3, 3-f_1-0, 0-1, 1-2, 1-3), deci a fost rezolvată problema hazardului de curse.

Exemplul 4



$y_2 \backslash y_1 y_0$	00	01	11	10
0	f_1	3	f_2	
1	0	1	2	f_3

Figura 9.10 Exemplu de asignare de stare pentru automate cu 4 stări având o diagonală în graful de fluență

Dacă graful de fluență are 2 diagonale, problema hazardului de curse poate fi rezolvată prin introducerea unei a treia stări fictive, care să rezolve adiacența între stările 0-2: 0-f_3-2. Se obține un graf de fluență modificat, cu 7 stări, dintre care 3 sunt fictive, în care toate tranzițiile au loc între stări vecine.

9.2.2. Hazardul de continuitate

Hazardul de continuitate se referă la regimul tranzitoriu al unei variabile logice, evidențiat prin relațiile: $(x, \overline{x}) = (0, 0)$ sau $(x, \overline{x}) = (1, 1)$.

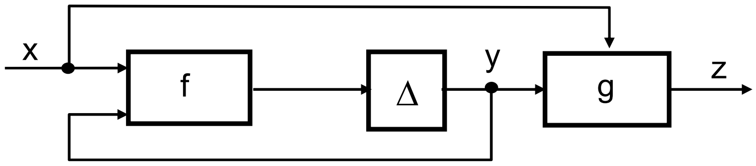


Figura 9.11 Structura secvențială

Hazardul de continuitate pentru structura g (figura 9.11) poate fi asimilat hazardului static al CLC, care nu modifică decât regimul tranzitoriu al structurii, fără a schimba regimul permanent. În schimb, prezența hazardului de continuitate în structura f poate determina modificarea variabilelor de stare pe durata regimului tranzitoriu, dacă aceasta durată este mai mare decât timpul de reacție al sistemului, putând determina o evoluție improprie.

Problema se poate rezolva prin următoarele măsuri:

1. eliminarea hazardului static în structurile combinaționale f şi g;
2. reducerea duratelor regimurilor tranzitorii ale variabilelor sub timpii de reacție ai sistemului (timpii de trecere dintr-o stare în alta).

9.2.3 Hazardul de propagare

Considerăm un sistem secvențial la care structura combinațională f este constituită din mai multe blocuri f_1, … , f_p, problema hazardului de continuitate fiind rezolvată pentru fiecare din aceste blocuri. Dacă un semnal de comandă se aplică unor blocuri diferite f_i, f_j, pot apare decalaje de timp, la un bloc, relativ la celălalt. Dacă sub influența acestor decalaje automatul evoluează spre o stare stabilă diferită de cea din matricea de excitație, atunci spunem că sistemul prezintă *hazard de propagare*.

Soluția de eliminare a acestui tip de hazard constă în introducerea unor întârzieri suplimentare pentru unele blocuri, astfel încât să dispară decalajele relative de timp.

9.3 Hazardul sistemelor secvențiale sincrone

În cazul sistemelor secvențiale sincrone, tipurile de hazard menționate pentru sistemele asincrone sunt eliminate prin introducerea semnalului de ceas. Problemele de hazard care pot să apară se datorează nerespectării condițiilor impuse de parametrii dinamici ai circuitelor utilizate (duratele impulsurilor, timpii de prestabilire, timpii de menținere, timpii de propagare, frecvența maximã de lucru).

9.3.1 Hazardul datorat intrărilor asincrone

Un sistem secvențial sincron este comandat, pe de o parte de ceasurile interne, iar pe de altă parte de semnalele externe, asincrone în raport cu primele. Decalajele relative dintre semnalele externe şi ceasurile interne sunt oarecare, ceea ce poate conduce la nerespectarea timpilor de prestabilire şi de menținere sau la obținerea unor impulsuri de durate prea scurte, fenomene ce pot produce hazard în funcționare.

Exemplu 1

Realizarea numărătoarelor modulo $p \neq 2^k$ prin metoda aducerii la zero sau prin metoda presetării controlate (când se foloseşte o reacție asincronă), poate determina apariția hazardului.

Soluția constă în sincronizarea reacției prin utilizarea unui bistabil care să memoreze semnalul de reacție, asigurându-i astfel o durată satisfăcătoare a acestuia.

Exemplul 2

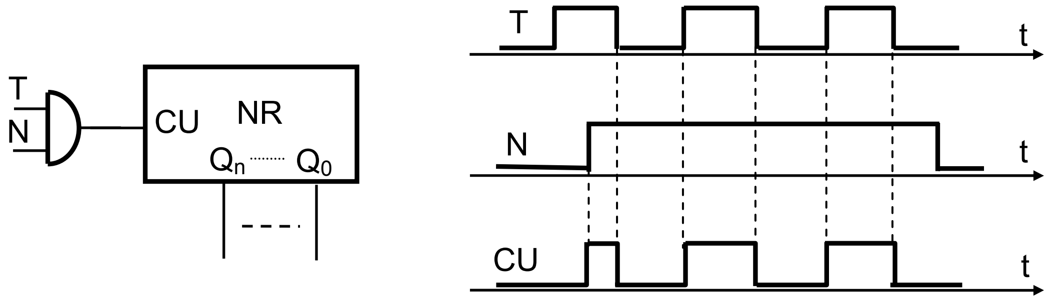


Figura 9.12 Apariția hazardului datorită nesincronizării semnalelor de comandă

Semnalul CU care determină incrementarea conținutului numărătorului (figura 9.12) poate avea în unele cazuri o durată activă prea mică. Soluția constă în utilizarea unui al doilea ceas, decalat față de primul, care să sincronizeze semnalul extern N, memorându-l într-un bistabil (figura 9.13).

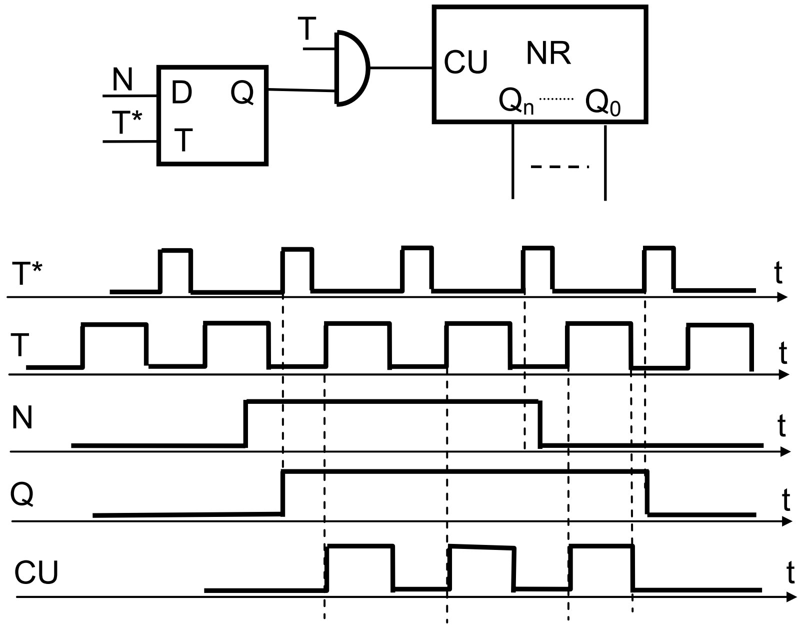


Figura 9.13 Eliminarea hazardului prin sincronizarea semnalului de comandă folosind bistabil

Pentru sincronizarea mai multor semnale, se poate folosi un număr corespunzător de bistabile, sau un registru de memorie.

9.3.2 Hazardul datorat semnalelor parazite pe intrări

În cazul bistabilelor J-K MASTER-SLAVE, semnalele parazite pe intrările J sau K, pe durata palierului H al ceasului, pot determina bascularea circuitului MASTER, a cărui stare este copiată pe frontul negativ al ceasului în bistabilul SLAVE. Pentru a evita acest hazard, este necesar ca palierul H al ceasului să dureze cât mai puțin posibil.

Aceasta anomalie nu poate sa apară la bistabilele D active pe front dacă se respectă t_{su} şi t_h, deoarece nu sunt luate în considerare modificările intrării D înainte sau după frontul pozitiv al ceasului T. Pot apare însă probleme dacă durata frontului pozitiv este prea mare, datorită zgomotelor suprapuse peste semnalul de ceas (efectul de ceas multiplu). În consecință trebuie asigurate fronturi pozitive cât mai bune, cu durata de minim 50 ns.

9.3.3 Hazardul datorat decalajului de ceas

În unele situații trebuie comandate mai multe intrări de ceas, astfel încât, pentru respectarea *fan-out*-ului este necesară multiplicarea ceasului.

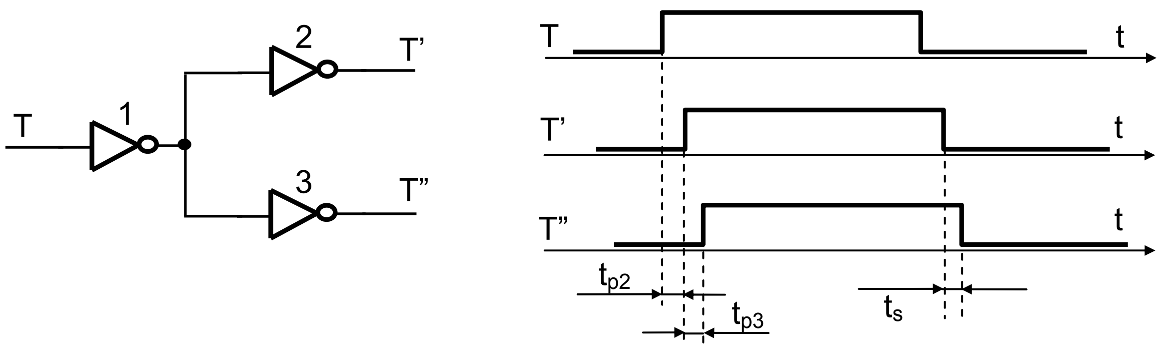


Figura 9.14 Hazard datorat timpilor de propagare diferiți ai porților

Datorită neidentității circuitelor 2 şi 3 pot apare decalaje între T' şi T" (*skew time*), ceea ce poate conduce la hazard în funcționare (figura 9.14).

Pentru eliminarea acestui tip de hazard se poate folosi una din următoarele soluții:

1. comanda tuturor intrărilor de ceas de la o singură sursa obținută prin conectarea în paralel a mai multor părți cu ieşire de tip colector în gol (figura 9.15).

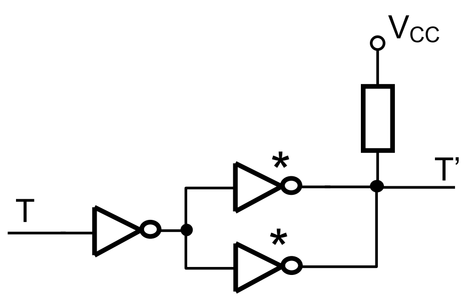


Figura 9.15 Hazard datorat timpilor de propagare diferiți ai porților

2. comanda intrărilor de ceas pentru bistabilele legate în cascadă astfel încât ultimul bistabil din cascadă să basculeze primul (figura 9.16).

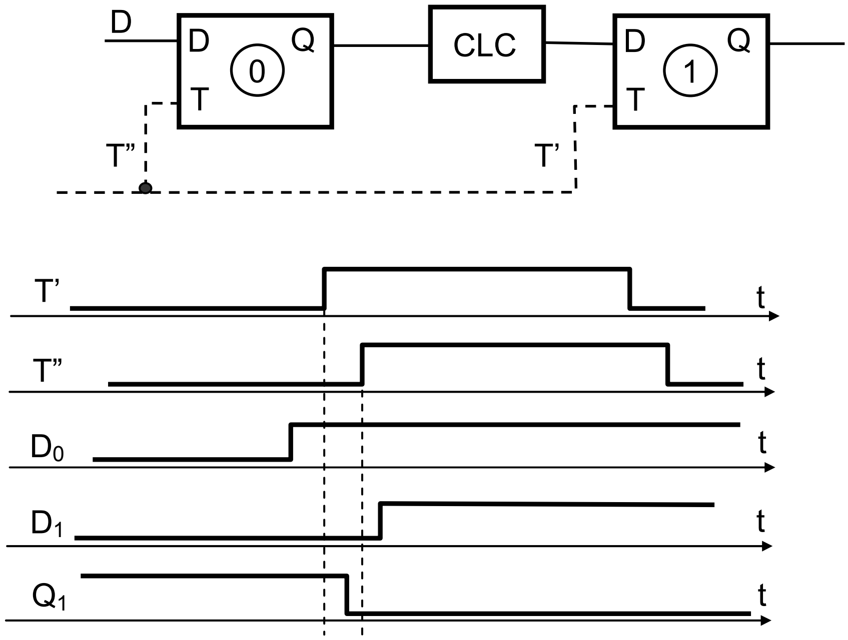


Figura 9.16 Eliminarea hazardului prin controlul ordinii de basculare a bistabilelor cu ajutorul semnalelor de ceas