

CAPITOLUL 5

CIRCUITE INTEGRATE DIGITALE

5.1. Probleme generale.

5.1.1. Funcții logice elementare

Sistemul binar și funcțiile de variabile binare care mai sunt denumite funcții logice booleene (fiind introduse de matematicianul G. Boole acestea operează cu două valori, adevărat și fals) sunt larg utilizate în domenii cum sunt calculatoarele, transmisia informației, automată, sisteme de măsură și control, prin circuitele electronice denumite digitale care modelează astfel de funcții.

Sistemul binar este cel mai bine adaptat circuitelor electronice deoarece, pe de o parte, dispozitivele electronice principale pot funcționa foarte bine ca niste comutatoare cu doar două stări iar pe de altă fiindcă folosirea a doar două nivele de tensiune corespunzătoare celor două cifre, 0 și 1, se face electronic simplu, cu precizie și siguranță.

Argumentele unei funcții booleene pot lua două valori distincte, 0 sau 1. Funcția la fel, poate avea de asemenea doar două valori 0 sau 1. Definirea curentă a unei astfel de funcții se face printr-un tabel, numit de adevăr, care dă valoarea funcției pentru toate combinațiile de valori posibile ale variabilelor.

Algebra booleană arată că orice funcție de variabile binare poate fi exprimată și matematic cu ajutorul unui grup de trei funcții care reprezintă și operații între variabile sau funcții cu reprezentare grafică distinctă. Acestea sunt funcțiile SAU cu operatorul similar sumei, SI cu operatorul similar produsului și NU cu operatorul reprezentând o linie deasupra operandului, fie acesta o variabilă sau o altă funcție.

Un astfel de grup de funcții prin care se pot exprima toate celelalte funcții se numește sistem complet de funcții.

Mai există două sisteme complete de funcții în afară de SI, SAU, NU. Acestea sunt formate de fapt din câte o singură funcție și anume SI-NU și SAU-NU.

Un circuit care realizează o funcție logică se mai numește și poartă logică.

Circuitele care realizează funcții de variabile binare s-au dovedit a fi foarte potrivite realizării integrate.

5.1.2. Evoluția circuitelor integrate digitale

Primele circuite digitale care modelau funcții logice au fost realizate cu relee. Într-adevăr, combinația serie a contactelor unor relee poate produce funcția SI deoarece contactul total (funcția) e făcut doar dacă toate contactele (variabilele) sunt făcute. Similar, o combinație paralel de contacte reprezintă funcția SAU.

Iar sistemele construite au fost complexe. Germanul **Konrad Zuse** a imaginat în 1930 o mașină programabilă, cu relee electromecanice, care avea unitate aritmetică, memorie, unitate de control și carduri perforate pentru introducerea datelor.

Zuse, care intenționa să utilizeze apoi tuburi electronice, nu a putut, din cauza războiului, să-și ducă planurile la bun sfârșit. Sistemul construit de el, distrus în timpul războiului, a fost refăcut ca fiind istoric primul calculator digital funcțional și este azi piesa de muzeu (figura 5.1).



Fig. 5.1. Primul calculator electromecanic al lui Konrad Zuse.

Au urmat circuitele digitale cu tuburi electronice cu rezultate mai importante. În figura 5.2. este primul calculator electronic universal, **ENIAC**, care utiliza peste 17.000 de tuburi electronice, consuma aproape 200 kW și avea o memorie de 1000 de biți, construit în 1946 de **John Mauchly** și **John Adam Presper Eckert Jr.**

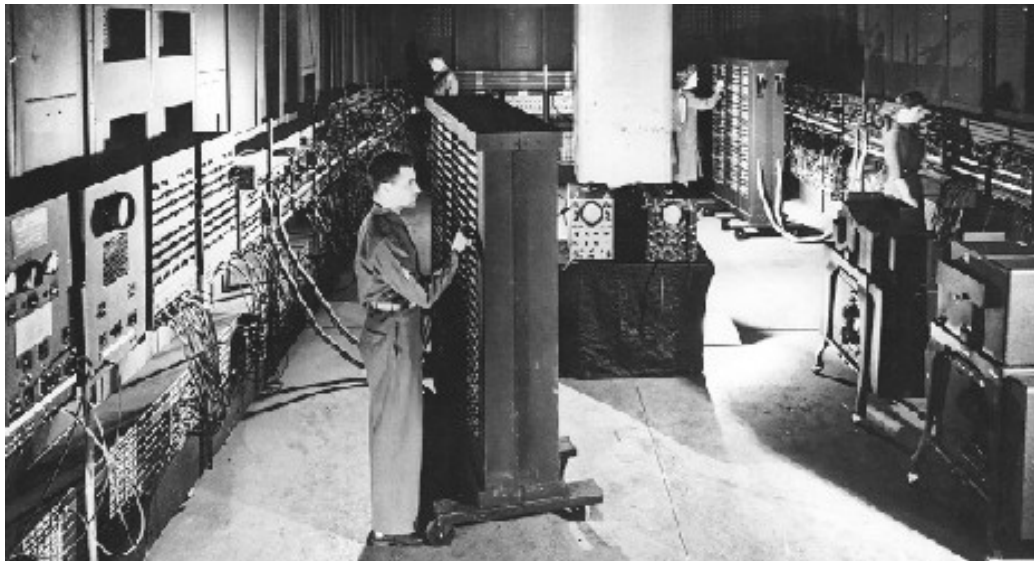


Fig. 5.2. Primul calculator electronic universal, ENIAC.

Circuitele digitale intră apoi în epoca dispozitivelor semiconductoare. Apar primele familii de circuite logice, la început tot cu elemente discrete. Acestea primesc acronime care vin în general de la dispozitivele utilizate.

O familie cuprinde circuite realizate tehnologic similar, alimentate la fel în c.c., care modelează funcții diverse și care sunt compatibile, adică ieșirile pot comanda în siguranță intrări din aceeași familie.

DL (Diode-Logic)

Este o familie dintre cele mai utilizate în perioada discretă. Are avantajul simplității și a unor timpi reduși de tranziție. Schema pentru un circuit SI cu două intrări este prezentată în figura 5.3.

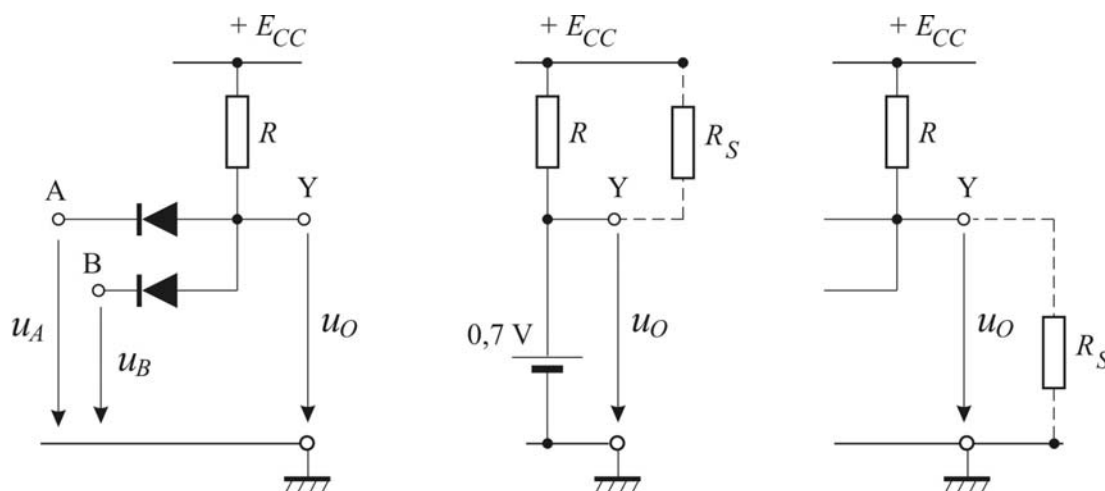


Fig. 5.3. Circuit SI cu diode, comportarea cu ieșirea la nivel coborât și ridicat și efectul unei sarcini exterioare.

Dacă una dintre intrări este la nivel zero atunci dioda este polarizată direct, este deschisă și are aproximativ 0,7 volți tensiunea anod-catod. Nivelul la ieșire este coborât și este echivalat cu cifra 0. Situația nu se schimbă dacă ambele intrări sunt la zero sau dacă există o rezistență de sarcină. Tensiunea pe o diodă deschisă depinde puțin de curent.

Rezistența de sarcină este conectată la $+E_{CC}$ pentru a sublinia faptul că dacă nivelul la ieșire este coborât (teoretic zero, aici 0,7 volți) atunci poarta absoarbe curent de la sursă prin R_S .

Dacă ambele intrări sunt la nivelul sursei $+E_{CC}$ atunci ambele diode sunt blocate deoarece fără R_S tensiunea pe ele este 0 iar cu R_S este cu $+$ pe catod. Nivelul la ieșire este ridicat și este echivalat cu cifra 1.

Dacă nu există rezistența de sarcină nivelul este chiar $+E_{CC}$

Dacă există rezistența de sarcină este conectată la masă pentru a sublinia faptul că dacă nivelul la ieșire este 1 atunci poarta generează curent de la sursă spre R_S .

Prezența R_S mai ridică o problemă generală pentru familiile de circuite integrate digitale și anume aceea a degradării nivelelor de tensiune.

Pentru 0 aici aveam un nivel mic, aproape constant, chiar pentru sarcini mari (R_S mici).

Pentru 1 nivelul este dependent puternic de R_S care formează un divizor de tensiune cu R . În acest caz se stabilește un nivel de degradare admis care va limita R_S la o valoare minimă.

Familia DL mai are dezavantajul că funcția NU este greu de realizat fără a utiliza un tranzistor.

Cu toate acestea portile cu diode mai sunt utilizate în diverse situații unde simplitatea este esențială.

RTL (Rezistor Transistor Logic).

Este o familie care rezolvă dezavantajele familiei DL și deși la început a fost realizată cu elemente discrete ea s-a impus în special ca prima familie de circuite integrate logice.

Apariția **circuitului integrat** va conduce la o evoluție foarte rapidă a sistemelor de calcul, evoluție care continuă și astăzi. Până atunci circuitele electronice ale calculatoarelor se realizau cu componente discrete. Acestea erau tranzistoare, utilizate atât ca amplificatoare cât și ca elemente de comutație, dar și diode, rezistente, condensatoare și bobine. Ele ocupau mult spațiu iar prețul pe element nu putea fi scăzut.

În 1961 apare prima familie de circuite integrate logice, RTL. Circuitele integrate astfel create au fost imediat adoptate de NASA dar și de alte companii, iar anul 1962 a fost anul începerii producției de masă de circuite integrate.

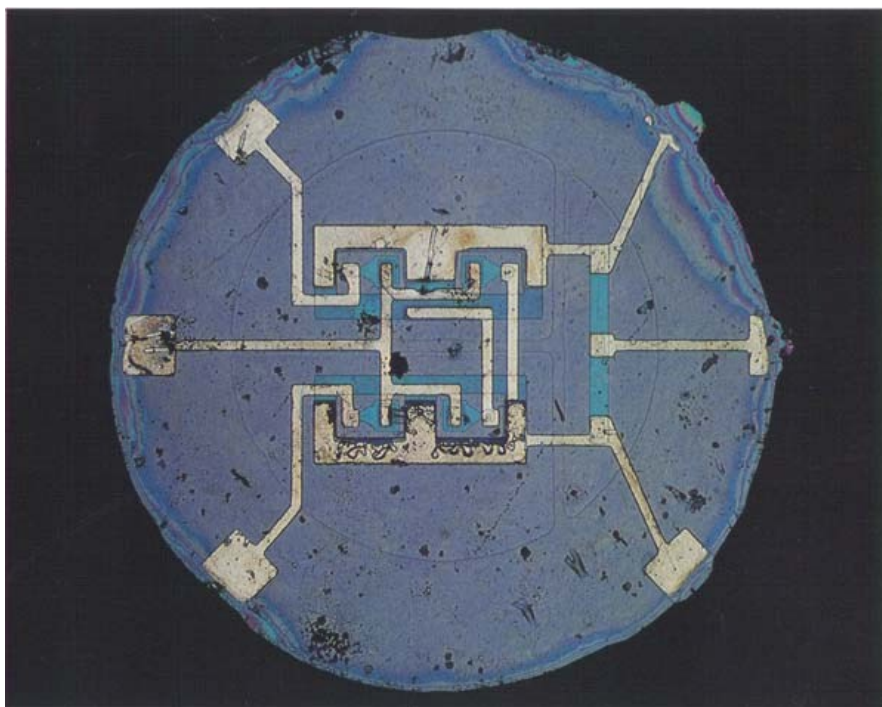


Fig. 5.4. Circuit basculant bistabil în tehnologie RTL

În figura 5.4 este un circuit basculant bistabil în tehnologie RTL, cu patru tranzistoare, formele albastru deschis cu margine triunghiulară din centru, 5 rezistente, liniile albastru deschis orizontale și verticale. Culoarea deschisă este metalizare pentru conectoare. Firele exterioare nu sunt anexate. Petele mici întunecate sunt imperfecțiuni în suprafața stratului semiconductor.

Familia RTL nu mai este utilizată, la fel ca și cea care a urmat-o, familia:

DTL (Diodă Tranzistor Logic)

Aceasta a fost o perfecționare a familiei RTL dar ca și aceasta a fost înlocuită de familia TTL care a devenit cea mai răspândită pentru mai mult de două decenii.

TTL (Tranzistor Tranzistor Logic)

Este o familie realizată în tehnologie bipolară, care are o variantă standard, urmată de-a lungul timpului de alte variante care îmbunătățesc fiecare unul sau mai mulți dintre parametrii principali inițiali.

ECL (Emitter Coupled Logic)

Este o familie realizată tot în tehnologie bipolară, cu tranzistoare într-o structură de amplificator diferențial care nu intră în saturație și asigură astfel timpi de tranziție mai mici. Este încă destul de utilizată.

I²L (Integrated Injection Logic)

Este o familie de circuite realizate doar cu tranzistoare bipolare, fără rezistențe și care au din acest motiv o densitate de integrare foarte mare (în circuitele integrate rezistențele ocupă suprafețe mult mai mari decât tranzistoarele – se poate observa și pe figura 5.4).

Următoarea tehnologie, tehnologia MOS (Metal-Oxid-Semiconductor), crește spectaculos densitatea integrării și devine dominantă în circuitele integrate. Unul din primele circuite integrate realizate doar cu tranzistoare MOS este prezentat în figura 5.5. Tranzistoarele au aici forma de halteră. (Circuitul real apare în vârful pensetei din partea stânga, sus).

Primele familii de circuite integrate digitale au utilizat tranzistoare MOS similare.

PMOS (MOS cu canal P)

Familie ce utilizează doar tranzistoare MOS cu canal P

NMOS (MOS cu canal N)

Familie ce utilizează doar tranzistoare MOS cu canal P

CMOS (MOS complementar)

Este familia cea mai răspândită și utilizează tranzistoare MOS complementare de tip P și N.

Această familie are, ca și familia TTL numeroase subfamilii.

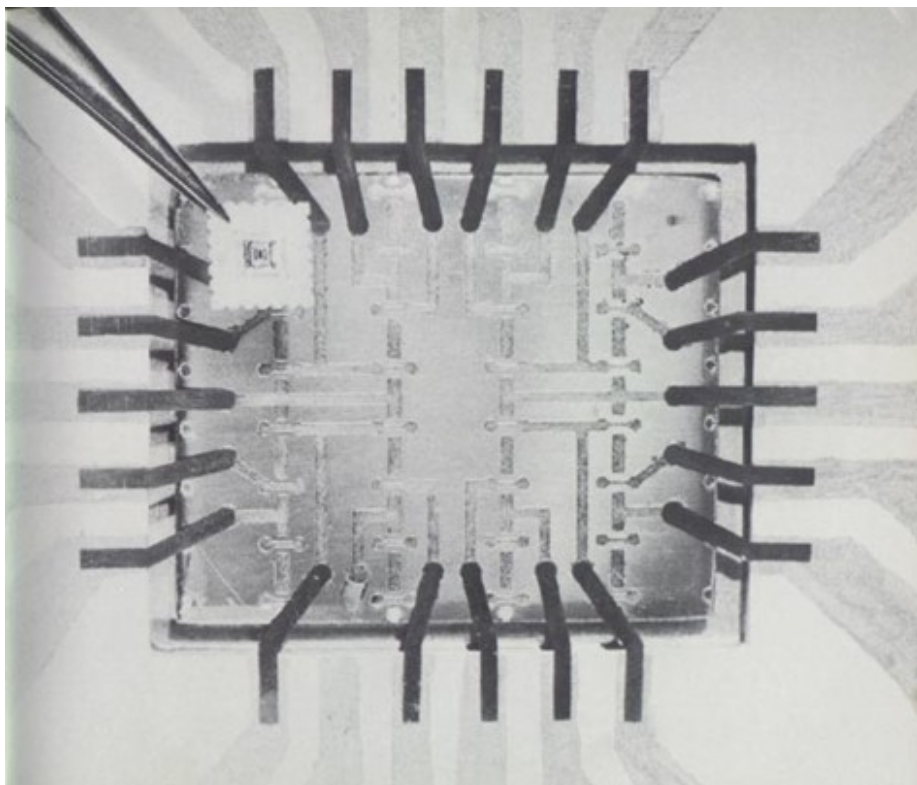


Fig. 5.5. Circuit integrat în tehnologie MOS.

Dezvoltarea circuitelor integrate a fost marcată de nivelele de integrare, de la zeci de tranzistoare pe un cip, integrare pe scară mică SSI (small scale integration) la sute, integrare pe scară medie MSI (medium scale integration) și apoi mii, integrare pe scară largă LSI (large scale integration).

A patra generație începe în jurul anului 1980 o dată cu nivelul de integrare pe scară foarte largă, VLSI (very large scale integration), cu mai mult de 10.000 de tranzistoare pe un cip.

Astăzi s-a depășit de mult un milion de tranzistoare pe cip, nivelul fiind ULSI (ultra large scale integration).

Evoluția a ramas spectaculoasă. Densitatea și viteza au crescut constant. Au apărut tehnici noi:

BiCMOS - combinație de tehnologie bipolară cu MOS;

WSI – integrare pe plăci întregi de siliciu (wafer) care au dimensiuni mari;

3D – circuite cu aranjament și conexiuni în spațiu.

Se prevede o încetinire a ritmului datorită îndeosebi limitelor siliciului.

Căi de progres mai sunt. În primul rând utilizarea unui alt substrat în locul siliciului, cum ar fi galiu-arsen. Avantajele sunt mobilizate a purtătorilor de 6 ori mai mare decât în cazul siliciului, consum mai mic de putere, rezistență la radiații. Dezavantaje, prețul mai mare dar și faptul că materialul este foarte toxic.

5.1.3. Capsulele utilizate pentru circuitele integrate

Tipurile capsulelor circuitelor integrate digitale pot fi clasificate după câteva criterii, dintre care principalele sunt prezentate și exemplificate.

Dupa materialul capsulei se împart în două categorii mari:

- cu capsula ceramică, care sunt notate obisnuit cu litera C (ceramic);
- cu capsula de plastic, care sunt notate obisnuit cu litera P (plastic).

Uneori mai exista porțiuni de suprafață metalică pentru racire (suprafețele mai întunecate din figura 5.6.a și 5.6.b).

Dupa așezarea pinilor (figura 5.6) circuitele sunt:

- cu pinii așezați în linie (figura 5.6.a), cu notația obisnuită I sau IL (in-line);
- cu pinii așezați după două linii paralele (figura 5.6.b), cu notațiile DIL(dual in-line) sau DIP (dual in-line package);
- cu pinii așezați în careu (figura 5.6.c) cu notația Q (quad)
- cu pinii așezați în formă de matrice (figura 5.6.d) cu notația A (array)

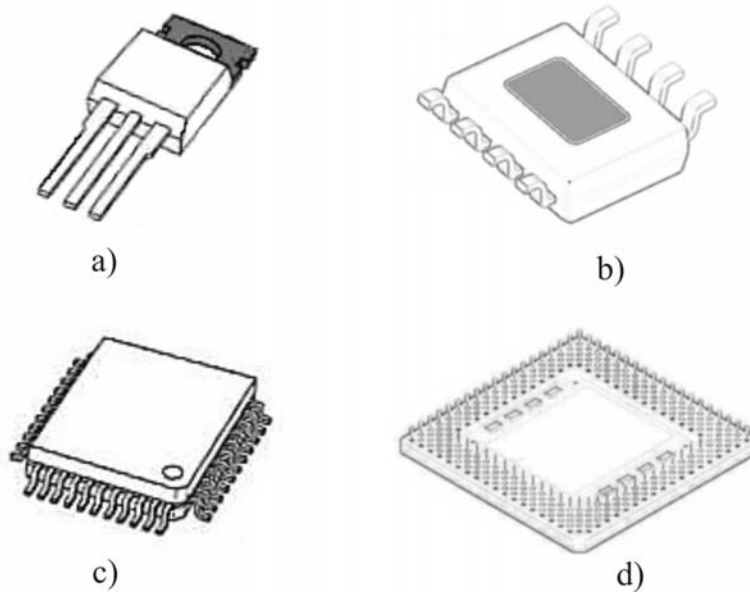


Fig. 5.6. Tipuri de capsule după așezarea pinilor

Dupa forma pinilor (figura 5.7) circuitele sunt:

- cu pinii drepti (figura 5.7.a), destinați fie plantării în orificii în circuitele imprimate fie fixării în socluri.
- cu pinii în forma de J, presate în socluri speciale care la randul lor aveau pini pentru plantat (figura 5.7.b);
- cu pinii cu aripioare cu lipire pe suprafața circuitului imprimat (gull-wing – aripi de pescăruș) (figura 5.7.c);
- cu pinii puncte de cositor, tot pentru lipire pe suprafața circuitului imprimat (figura 5.7.d);

- cu pini sub formă de mici suprafețe pentru contact prin presiune. (figura 5.7.e).

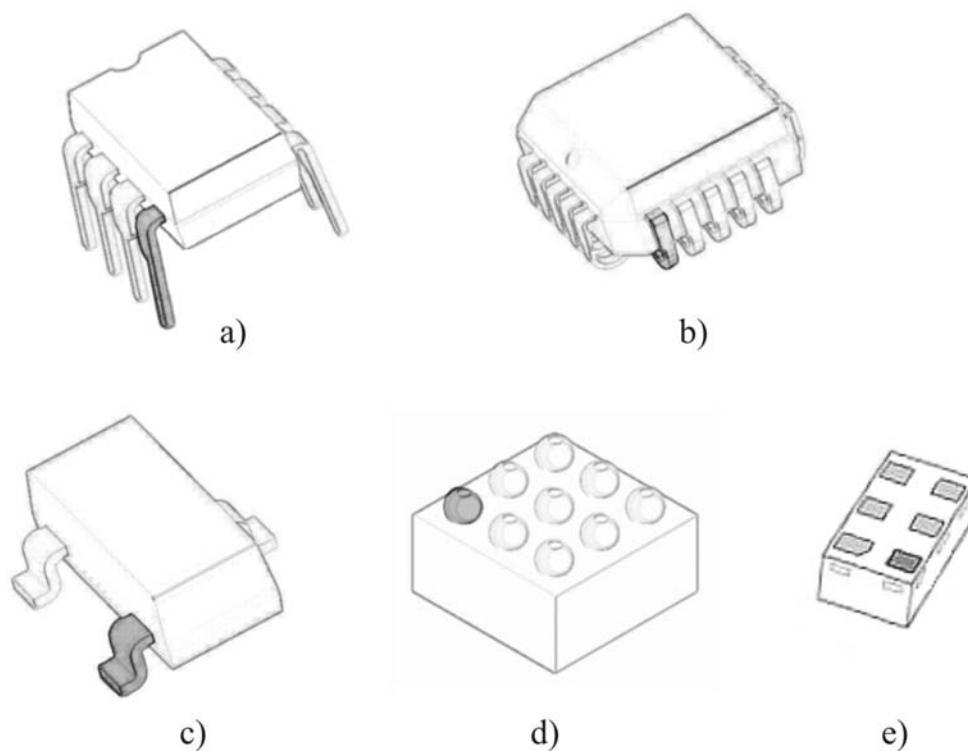


Fig. 5.7. Tipuri de capsule după forma pinilor

5.2. Parametrii unei familii de circuite logice

O familie de circuite integrate digitale are un număr de parametri mai importanți care sunt prezentați pe scurt în continuare

5.2.1. Fan in

Fan in reprezintă numărul de intrări pe care le are un circuit din familie (fan – evantai). De exemplu circuitul din figura 5.8 are un fan in de 4. Uneori fan in reprezintă numărul maxim de intrări specific unei familii (de exemplu, pentru TTL standard este 8). O creștere a fan in conduce la creșterea întârzierii pe care o produce circuitul.

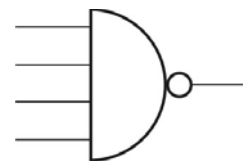


Fig. 5.8. Fan in

5.2.2. Fan out

Fan out reprezintă numărul maxim de intrări de care pot fi conectate la iesirea unui circuit din familie fără să se producă degradări ale nivelelor de tensiune (figura 5.9. – circuit cu fan out de 8).

În esență parametrul depinde de nivelul de curent pe care o iesire îl poate asigura atât pentru valoarea logică 0 cât și pentru 1 la ieșire și de nivelul curentilor la o intrare pentru aceleași valori logice.

Dacă numărul de intrări conectate la o ieșire crește, atunci:

- Nivelul 0 logic crește ca valoare;
- Nivelul 1 logic scade ca valoare;
- Fronturile se deteriorează și cresc întârzierile.

5.2.3. Viteza de propagare

Viteza de propagare sau întârzierea (delay) produsă de o poarta reprezintă intervalul de timp dintre schimbarea nivelului logic de la intrare și schimbarea rezultată la iesirea unui circuit.

Se definesc două întârzieri, una pentru schimbarea 0-1 la intrare care se mai numeste și întârziere la comutație directă (turn-on delay) și una pentru schimbarea 1-0 la intrare care se mai numeste și întârziere la comutație inversă (turn-off delay).

În figura 5.10. aceste mărimi sunt prezentate pentru un circuit buffer, care este un circuit care nu face operații logice ci doar realizează o adaptare sursă-sarcină similară cu aceea pe care o face un circuit repetor pe emitor și transmite nivelul logic nemodificat (dar întârziat după cum se observă).

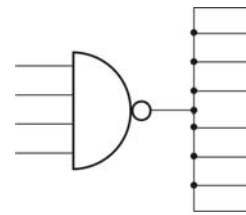


Fig. 5.9. Fan out

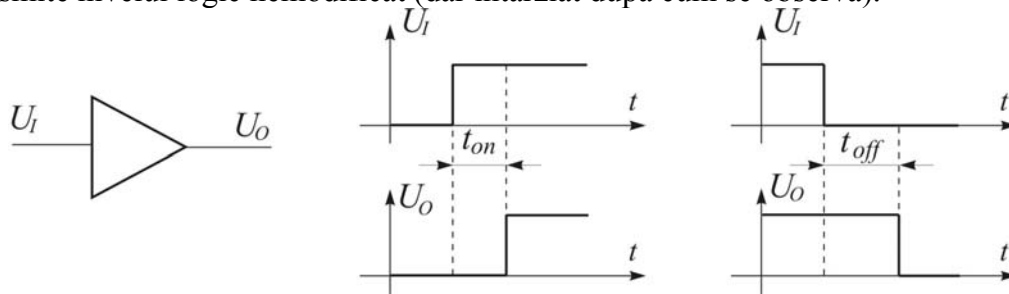


Fig. 5.10. Viteza de propagare sau întârzierea unui CI

Există în cazul circuitelor legate printr-un conductor mai lung și o întârziere pe linia de transmisie (figura 5.11)

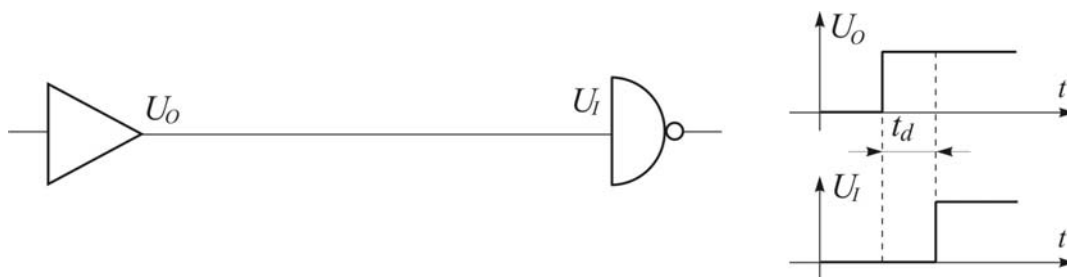


Fig. 5.11. Întârzierea pe linie

Se mai definește, legat de această întârziere pe linia de transmisie și o întârziere a unui același semnal la mai multe intrări diferite ale unor circuite (figura 5.12, un circuit ceas –ck-al cărui semnal ajunge la două intrări diferite cu întârziere diferită), numită și skew delay (skew-oblic)

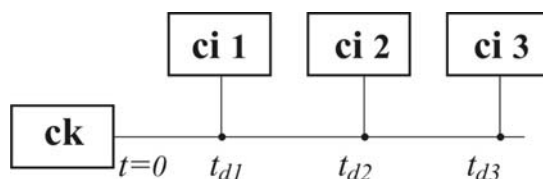


Fig. 5.12. Întârzierea la intrări diferite

Mai trebuie precizat că fronturile sunt considerate în figură ideale, dar nu acesta este cazul real, unde și tranziția se face într-un interval de timp (figura 5.13) iar în acest caz măsurarea timpilor se face la nivelul de 50% din valoarea maximă.

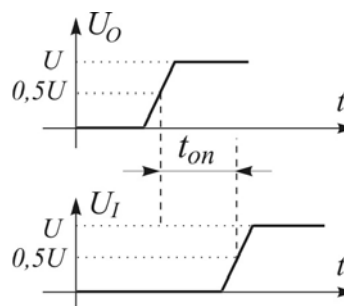


Fig. 5.13. Întârzierea la fronturi reale

5.2.4. Nivele logice de tensiune

Nivelele logice de tensiune sunt valorile tensiunilor de intrare sau de ieșire care sunt garantate pentru valorile logice 1 și 0, sau, așa cum apar în foile de catalog, nivelele H (high-1) și L (low-0).

Ca o regulă generală, pentru nivelul H este important ca el să nu scadă sub o anumită valoare, astfel că pentru nivele H se definesc valori minime, iar pentru nivelul L este important ca el să nu crească peste o anumită valoare, astfel că pentru nivele L se definesc valori maxime.

Sunt definite 4 asemenea nivele, nivele de intrare, L și H și nivele de ieșire, L și H:

1. U_{OHmin} – tensiunea de ieșire minimă pentru nivelul 1(H).

Acest parametru precizează nivelul tensiunii care mai poate fi recunoscut cu siguranță drept variabila 1 la ieșirea unui circuit.

2. U_{IHmin} – tensiunea de intrare minimă pentru nivelul 1(H).

Acest parametru precizează nivelul tensiunii care mai poate fi recunoscut cu siguranță drept variabila 1 de către intrarea unui circuit.

Între cele doua valori exista condiția:

$$U_{OHmin} > U_{IHmin}$$

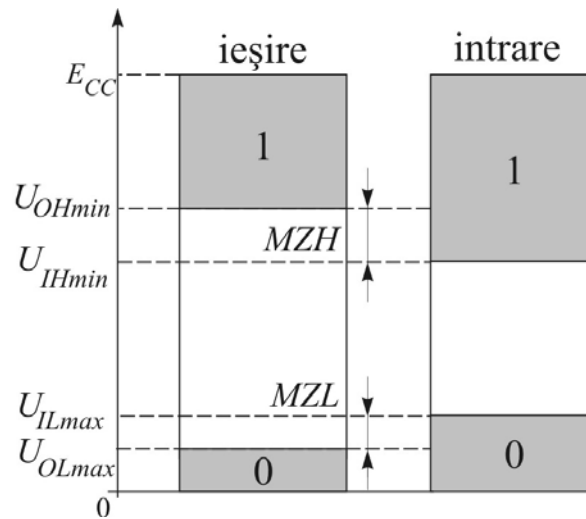


Fig. 5.14. Nivele de tensiune și margine de zgomot

3. U_{OLmax} – tensiunea de ieșire maximă pentru nivelul 0(L).

Acest parametru precizează nivelul tensiunii care mai poate fi recunoscut cu siguranță drept variabila 0 la ieșirea unui circuit.

4. U_{ILmax} – tensiunea de intrare maximă pentru nivelul 0(L).

Acest parametru precizează nivelul tensiunii care mai poate fi recunoscut cu siguranță drept variabila 0 de către intrarea unui circuit.

Între cele doua valori exista condiția:

$$U_{OLmax} < U_{ILmax}$$

Se obișnuiește ca nivelele să fie reprezentate grafic (figura 5.14) pentru o mai bună înțelegere a raporturilor dintre ele. Partea umbră este zona valorilor permise, partea albă este zona valorilor interzise, valori care apar doar în timpul tranzițiilor.

5.2.5. Margine de zgomot

Marginea de zgomot reprezintă diferența dintre nivelele la ieșirea unui circuit și intrarea circuitului următor. Există o margine de zgomot la nivelul ridicat, MZH și una la nivelul coborât, MZL (figura 5.14).

Prin această diferență un zgomot (o variație de tensiune suprapusă peste semnal) de valoarea marginii de zgomot nu perturbă funcționarea unui sistem realizat cu circuitele familiei.

Zgomotul poate fi datorat:

- Variației E_{CC} ;
- Variației de temperatură;
- Tensiunilor induse pe linii de alimentare de c.c. sau de transmisie de semnal

5.2.6. Nivele ale curenților

Pe lângă nivele de tensiune există și nivele de curent pe care le furnizează sau le absorb circuitele dintr-o anumită familie. Valorile acestora sunt valori maxime, fie furnizate fie absorbite în condițiile în care nu există o degradare a nivelelor de tensiune.

Circulația curenților în circuitele logice integrate pentru toate cele 4 situații care au fost prezentate la nivelele de tensiune se face ca în figurile 5.15.a, b, c, și d. Circuitele sunt de tip buffer, și a fost reprezentată și sursa de alimentare de tensiune continuă cu legăturile la circuit.

La ieșire, pentru nivel de tensiune ridicat poarta este un generator care furnizează curent etajului următor (fig. 5.15.a), așa cum se poate vedea și pentru cazul intrării unui circuit la nivel ridicat, care absoarbe curent (fig. 5.15.b). Există deci:

I_{OHmax} – curentul maxim furnizat de o ieșire care păstrează nivelul de tensiune U_{OHmin}

I_{IHmax} – curentul maxim absorbit de o intrare la nivelul de tensiune U_{IHmin}

La ieșire, pentru nivel de tensiune coborât poarta este un consumator care absoarbe curent prin etajului următor (fig. 5.15.c), așa cum se poate vedea și pentru cazul intrării unui circuit la nivel coborât, care furnizează curent (fig. 5.15.d). Există deci:

I_{OLmax} – curentul maxim absorbit de o ieșire care păstrează nivelul de tensiune U_{OLmax}

I_{ILmax} – curentul maxim furnizat de o intrare la nivelul de tensiune U_{ILmax}

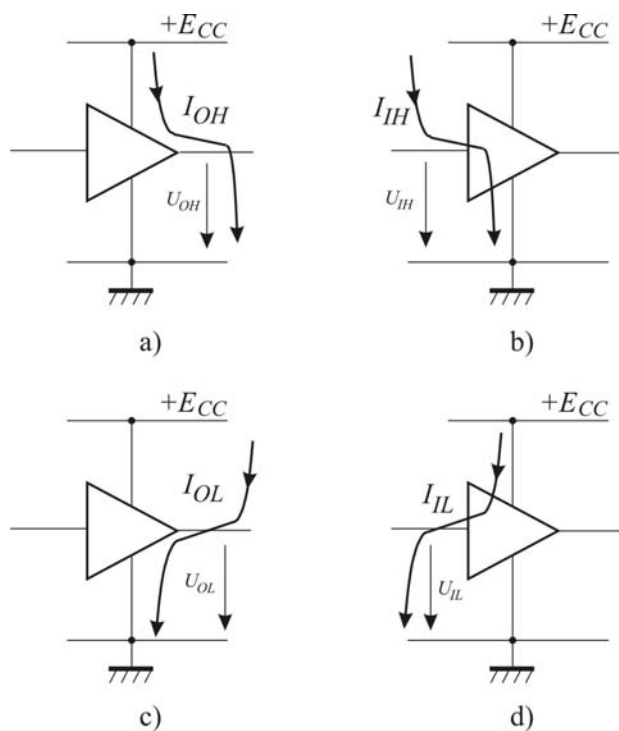


Fig. 5.15. Circulația curenților la CI logice

5.2.7. Timpi de comutație

În afară de timpii de întârziere mai exista și timpi de comutație, similari cu cei de la comutația dispozitivelor semiconductoare. Aceștia sunt timpul de creștere (rise), t_r și timpul de cadere (fall), t_f .

5.2.8. Puterea disipată

Un alt parametru important este puterea disipată pe o poartă. Acesta este o putere medie, deoarece există o putere disipată în starea 1, o alta în starea 0 și deasemenea mai sunt puterile disipate pe timpul tranzițiilor 0-1 și 1-0, care cresc puterea medie o dată cu mărirea frecvenței

5.2.9. Factor de merit

Un alt parametru care da o privire globală a performanțelor de viteză și consum de putere este produsul putere-întârziere (viteză) care se mai numește și factor de merit sau factor de calitate al familiei.