

UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA
FACULTATEA DE AUTOMATICĂ, CALCULATOARE ȘI
ELECTRONICĂ

VINTILĂ FLORIN FILIPESCU

CIRCUITE ELECTRONICE
DIGITALE

CURS

Editura UNIVERSITARIA

2002

Cuprins

Cap. 1. Elemente de algebră booleană	1
1.1. Funcții logice elementare	2
1.2. Axiomele algebrei Boole	6
1.3. Regulile de calcul ale algebrei Boole	6
1.4. Exprimarea algebrică a funcțiilor booleene	8
1.4.1. Forme canonice	8
1.4.1.1. Forma canonică disjunctivă	8
1.4.1.2. Forma canonică conjunctivă	9
1.4.2. Forma elementară	9
1.4.3. Forma neelementară	10
1.5. Reprezentarea funcțiilor booleene cu ajutorul diagramelor VK	11
1.6. Minimizarea funcțiilor logice	14
1.6.1. Minimizarea cu ajutorul diagramelor VK	14
1.6.2. Minimizarea prin metoda analitică	19
1.6.3. Minimizarea funcțiilor incomplet definite	20
1.6.4. Concluzii	20
Cap. 2. Regimul de comutație al dispozitivelor semiconductoare	22
2.1. Regimul de comutație al diodei semiconductoare	22
2.2. Regimul de comutație al tranzistorului bipolar	23
2.3. Regimul de comutație al tranzistorului unipolar	29
2.4. Comparație între tranzistorul unipolar și cel bipolar	32
2.5. Reprezentarea electrică a variabilelor booleene	33
Cap. 3. Circuite logice elementare	34
3.1. Circuite logice elementare cu componente discrete	34
3.1.1. Circuite logice elementare cu componente pasive	34
3.1.1.1. Circuitul logic ȘI (AND) pasiv	34
3.1.1.2. Circuitul logic SAU (OR) pasiv	35
3.1.2. Circuite logice elementare cu componente active	36
3.1.2.1. Circuitul logic NU (NOT)	37
3.1.2.2. Circuitul logic ȘI-NU (NAND)	37
3.1.2.3. Circuitul logic SAU-NU (NOR)	38
3.2. Circuite logice elementare integrate	38
3.2.1. Circuite logice integrate realizate în tehnologie bipolară	39
3.2.1.1. Circuite logice RTL	39
3.2.1.2. Circuite logice DTL	40
3.2.1.3. Familia TTL standard	40
3.2.1.3.1. Poarta NAND – TTL	40
3.2.1.3.2. Inversorul TTL	42
3.2.1.3.3. Poarta NOR – TTL	47
3.2.1.3.4. Caracteristicile statice ale familiei TTL standard	48
3.2.1.3.5. Parametrii familiei TTL standard	51
3.2.1.4. Subfamilia TTL rapidă (HTTL)	55
3.2.1.4.1. Creșterea vitezei de lucru prin creșterea puterii disipate pe poartă	55

3.2.1.4.2. Creșterea vitezei de lucru prin introducerea montajului Darlington	55
3.2.1.4.3. Creșterea vitezei de lucru prin introducerea rezistenței neliniare	57
3.2.1.5. Subfamilia TTL Schottky	59
3.2.1.6. Circuite logice cu colectorul în gol	59
3.2.1.7. Circuite logice cu 3 stări	64
3.2.1.8. Familia logică ECL	66
3.2.1.9. Circuite logice I ² L	71
3.2.2 Circuite logice integrate realizate în tehnologie unipolară	73
3.2.2.1. Familia logică NMOS statică	74
3.2.2.1.1. Inversorul NMOS static	74
3.2.2.1.2. NAND-ul NMOS static	76
3.2.2.1.3. NOR-ul NMOS static	77
3.2.2.2. Poarta de transfer NMOS	78
3.2.2.3. Familia logică NMOS dinamică	79
3.2.2.3.1. Inversorul NMOS dinamic	79
3.2.2.3.2. NAND-ul NMOS dinamic	80
3.2.2.3.3. NOR-ul NMOS dinamic	80
3.2.2.4. Familia logică CMOS	81
3.2.2.4.1. Inversorul CMOS	81
3.2.2.4.2. NAND-ul CMOS	84
3.2.2.4.3. NOR-ul CMOS	85
3.2.2.4.4. Poarta de transfer CMOS	86

Cap. 4 Circuite logice combinaționale	90
4.1. Analiza și sinteza circuitelor logice combinaționale	91
4.1.1. Analiza circuitelor logice combinaționale	91
4.1.2. Sinteza circuitelor logice combinaționale	92
4.2. Detectorul de paritate	94
4.2.1. Detectorul de paritate impară cu 4 variabile de intrare	95
4.2.2. Detectorul de paritate comandat	96
4.3. Multiplexoare	98
4.3.1. Circuitul de multiplexare cu 4 intrări	99
4.4. Demultiplexoare	100
4.4.1. Circuitul de demultiplexare cu 4 ieșiri	100
4.5. Comparatoare numerice	101
4.5.1. Comparatorul numeric de 1 bit	102
4.5.2. Comparatorul numeric de 4 biți	103
4.5.3. Comparatorul numeric de 8 biți	105
4.6. Sumatoare	105
4.6.1. Semisumatorul	106
4.6.2. Sumatorul complet de 1 bit	106
4.6.3. Sumatorul complet de 4 biți	108
4.7. Convertoare de cod	109
4.7.1. Convertorul de cod “binar natural – Gray”	109
4.7.2. Convertorul de cod “Gray – binar natural”	111
4.8. Codificatoare	113
4.8.1. Codificatorul de adresă simplu	113
4.9. Decodificatoare	115

4.9.1. Decodificatorul de adresă	115
4.9.2. Decodificatorul BCD – zecimal	116
4.9.3. Decodificatorul BCD - 7 segmente	117
4.9.3.1. Decodificatorul BCD - 7 segmente cu componente discrete	118
4.9.3.2. Decodificatorul BCD - 7 segmente în variantă integrată	122
4.10. Memorii ROM	123
4.10.1. Memorii ROM bipolare	125
4.10.1.1. Memorii ROM bipolare programabile la producător	125
4.10.1.2. Memorii ROM bipolare programabile la utilizator	126
4.10.2. Memorii ROM unipolare	127
4.10.2.1. Memorii ROM unipolare programabile la producător	127
4.10.2.2. Memorii ROM unipolare programabile la utilizator	127
4.10.2.2.1. Memorii EPROM	127
4.10.2.2.2. Memorii E ² PROM	129
4.10.3. Organizarea unei memorii de 8 Kb	129
4.10.4. Extinderea capacității memoriilor ROM	131
4.10.4.1. Extinderea la intrare a capacității memoriei ROM	131
4.10.4.2. Extinderea la ieșire a capacității memoriei ROM	132
4.10.4.3. Extinderea la mixtă a capacității memoriei ROM	132
4.11. Arii logice programabile	133
Cap. 5. Circuite logice secvențiale	137
5.1. Circuite basculante bistabile SR	138
5.1.1. Circuitul basculant bistabil SR asincron	138
5.1.1.1. Circuitul basculant bistabil SR asincron realizat cu NOR-uri	138
5.1.1.2. Circuitul basculant bistabil SR asincron realizat cu NAND-uri	140
5.1.2. Circuitul basculant bistabil SR sincron	141
5.1.3. Circuitul basculant bistabil SR Master-Slave	143
5.2. Circuite basculante bistabile de tip D	145
5.2.1. Circuitul basculant bistabil de tip D asincron	145
5.2.2. Circuitul basculant bistabil de tip D sincron	146
5.2.2.1. Latch-ul adresabil	147
5.2.2.2. Memoria RAM	148
5.2.3. Circuitul basculant bistabil D Master-Slave	149
5.2.3.1. Registrul de deplasare serie	150
5.2.3.2. Registrul paralel	150
5.2.3.3. Registrul combinat	151
5.2.3.4. Registrul universal bidirecțional de 4 biți	152
5.3. Circuite basculante bistabile de tip T	154
5.4. Circuite basculante bistabile de tip JK	154
5.4.1. Circuitul basculant bistabil JK asincron	155
5.4.2. Circuitul basculant bistabil JK sincron	156
5.4.3. Circuitul basculant bistabil JK Master-Slave	157
5.4.3.1. Numărătorul asincron	157
5.5. Conversia circuitelor basculante bistabile	158
5.5.1. Conversia în T	158
5.5.2. Conversia în SR	160
Anexa 1. Circuite cu transfer de sarcină	161

Anexa 2. Microprocesoare și microcalculatoare	164
A2.1. Microprocesorul	164
A2.2. Microcalculatorul	165
A2.3. Microcalculatorul pe un singur chip	166
A2.4. Aplicații	166
Bibliografie	169

P R E F A Ț Ă

Cursul *Circuite electronice digitale* se adresează studenților din anii III ai facultăților de Electrotehnică și Electromecanică, dar poate fi util și studenților a căror instruire se desfășoară în cadrul secțiilor Facultății de Automatică, Calculatoare și Electronică, precum și inginerilor care doresc să-și completeze sau actualizeze cunoștințele de specialitate.

Experiența acumulată în cei peste 13 ani de activitate în domeniu, a condus la actuala structurare a lucrării, care acoperă domeniul *Electronicii digitale* de la *algebra booleană* și până la *microprocesor*, acordând atenția cuvenită tuturor familiilor de circuite logice elementare precum și principalelor categorii de circuite logice combinaționale și secvențiale.

Deși aparent inoportun într-o astfel de lucrare, *Regimul de comutație al dispozitivelor semiconductoare* permite transferul direct în plan tehnic al noțiunilor introduse de *algebra booleană*, constituind un liant important între aceasta și capitolele următoare ale cursului.

Cele două anexe de la finalul lucrării, conținând *circuitele cu transfer de sarcină* și *microprocesoarele*, reprezintă domenii moderne, cu aplicații numeroase și diverse, care vin să întreprindă problematica tratată de prezentul curs.

Desigur, apariția acestei lucrări nu ar fi fost posibilă fără un uriaș volum de muncă și, mai ales, fără ajutorul neprecupețit al valoroaselor cadre didactice din Facultatea de Automatică, Calculatoare și Electronică.

Astfel, doresc să adresez cele mai călduroase mulțumiri domnului prof. univ. dr. ing. Mircea Ivănescu, rectorul Universității din Craiova, care, în calitate de deschizător de drumuri în acest domeniu în facultatea noastră, a acceptat să lectureze manuscrisul lucrării și să formuleze unele observații binevenite.

Aceleași călduroase mulțumiri le datorez domnului prof. univ. dr. ing. Dănilă Cerbulescu, șeful Catedrei de Electronică și Măsurări a Facultății de Automatică, Calculatoare și Electronică și domnului conf. univ. dr. ing. Mircea Mihaiu, pentru sugestiile utile și răbdarea cu care au recenzat manuscrisul.

Un rol important în ceea ce privește partea grafică a lucrării l-a avut studentul Paul Glogogeanu, anul V, secția Electronică Aplicată, căruia i se cuvin cele mai frumoase aprecieri.

În final, dar nu în ultimul rând, doresc să mulțumesc întregii mele familii pentru modul în care a știut să accepte frustrările pe care le implică elaborarea unei astfel de lucrări.

Autorul

ANEXA 1

Circuite cu transfer de sarcină

Circuitele cu transfer de sarcină, cunoscute și sub denumirile de *circuite cu cuplaj prin sarcină* sau *CCD* (Charge Coupled Devices = dispozitive cu cuplaj prin sarcină), sunt utilizate în special în tehnologia LSI (Large Scale Integration = integrare pe scară largă) și nu au nici un echivalent în variante cu componente discrete.

CCD-urile sunt construite sub forma unei matrice de capacități MOS cu n intrări, de-a lungul căreia sunt transferate sarcini electrice cu ajutorul câmpurilor generate de trei tensiuni negative ale căror module se află în relația: $V_3 > V_2 > V_1$.

Principiul transferului de sarcini între două locații vecine ale matricei, este ilustrat în fig. A1.1.

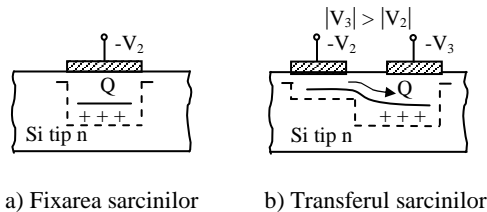


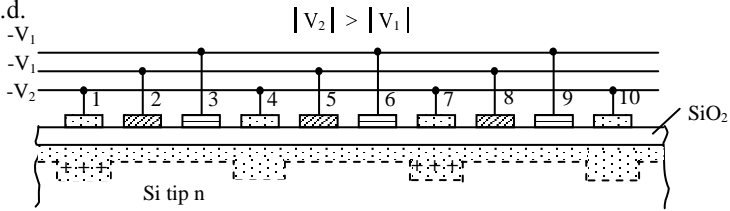
Fig. A1.1. Ilustrarea principiului transferului de sarcini

Astfel, potențialul $-V_2$ generează în substratul semiconductor de tip n un câmp electric care respinge purtătorii de sarcină majoritari (electronii) din zona de sub stratul de oxid, fixând purtătorii de sarcină pozitivi care au fost injectați în substrat printr-un mijloc oarecare (joncțiune pn, tranzistor integrat în același substrat, prin iluminare), fig. A1.1 a.

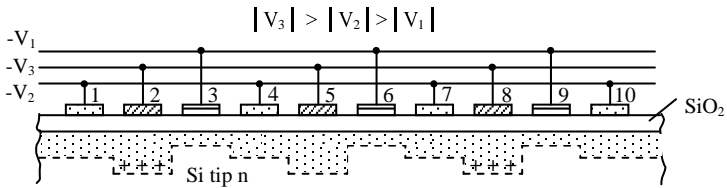
Aplicând un potențial $-V_3$, cu $|V_3| > |V_2|$, electrodului învecinat, fig. A1.1 b, purtătorii de sarcină mobili sunt transferați în locația vecină pe care nu o mai pot părăsi atâta timp cât pe electrodul corespunzător există un potențial mai mare (în valoare absolută) decât al locațiilor vecine.

Revenind la matricea cu capacități MOS din care am prezentat în fig. A1.2 una din cele n căi, observăm comportamentul de registru de deplasare al acesteia.

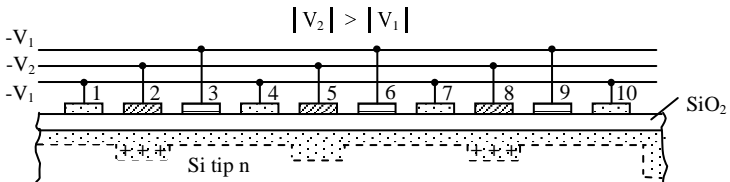
Astfel, aplicând structurii din fig. A1.2 secvențele de potențiale prezentate în tab. A1.1, realizăm transferul succesiv al sarcinilor de la locațiile 1, 7 la locațiile 2, 8, ș.a.m.d.



a) Fixarea sarcinilor la locația 1



b) Transferul sarcinilor la locația 2



c) Fixarea sarcinilor la locația 2

Fig. A1.2. Etapele transferului de sarcini de la o locație la alta

Tab. A1.1. Explicativ pentru funcționarea structurii din fig. A1.2

Fig.	Zona								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
a	V ₂	V ₁	V ₁	V ₂	V ₁	V ₁	V ₂	V ₁	V ₁
b	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁
c	V ₁	V ₂	V ₁	V ₁	V ₂	V ₁	V ₁	V ₂	V ₁
-	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃
-	V ₁	V ₁	V ₂	V ₁	V ₁	V ₂	V ₁	V ₁	V ₂
-	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂
-	V ₂	V ₁	V ₁	V ₂	V ₁	V ₁	V ₂	V ₁	V ₁
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Observăm că transferul de sarcini către o locație vecină se face prin aplicarea unui potențial $|V_3| > |V_2|$ pe electrodul acesteia din urmă, v. fig. A1.2 b, după care sarcina este fixată la locația respectivă printr-un potențial $-V_2$, mai mare în valoare absolută decât potențialul $-V_1$ al zonelor vecine, fig. A1.2 c.

Această etapă intermediară creează posibilitatea utilizării potențialului $-V_3$ pentru transferul de sarcini către locația următoare.

Din tab. A1.1 se remarcă cu ușurință ciclicitatea funcționării registrului CCD, precum și zonele în care se află sarcinile în fiecare moment (zonele hașurate).

Viteza de transfer a sarcinilor permite funcționarea până la cca. 20 MHz, la un consum de $5 \mu\text{W} / \text{bit}$.

Registrele CCD sunt utilizate pentru transferul reliefului de sarcini de pe suprafețele fotosensibile ale camerelor de luat vederi moderne.

Tehnologia CCD este utilizată și pentru realizarea unor funcții logice elementare cum ar fi ȘI-NU, SAU-NU, SAU-EXCLUSIV, sau a unor circuite logice de tipul sumatoarelor, multiplicatoarelor, memoriilor RAM, etc.

În fig. A1.3 am prezentat structura unor porți logice ȘI și SAU în tehnologie CCD.

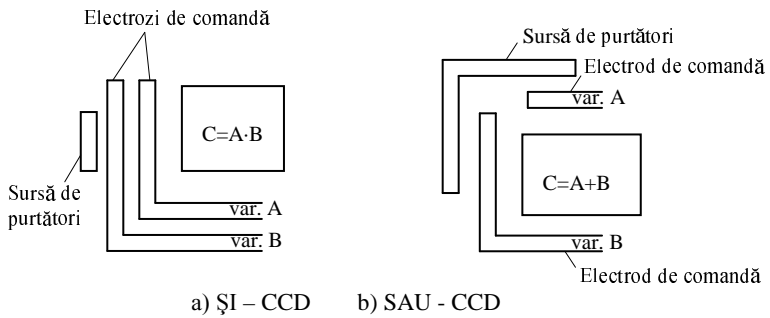


Fig. A1.3. Porți logice elementare în tehnologie CCD

În cazul în care sursa de purtători de sarcină (de exemplu, o joncțiune direct polarizată) este excitată, sarcinile nu pot ajunge în *capcana* C decât dacă electrozii de comandă A ȘI B, respectiv A SAU B SAU ambii, sunt astfel polarizați încât să permită transferul de sarcini.

ANEXA 2

Microprocesoare și microcalculatoare

A 2.1. Microprocesorul

Microprocesorul este un sistem integrat pe un singur „chip”, conținând cel puțin întreaga gamă de circuite aritmetice, precum și logica de control și comandă a unui sistem universal de tratare a datelor, sau a unui sistem de calcul, sau a ambelor.

Majoritatea microprocesoarelor moderne conțin și o mică memorie și chiar un ceas propriu.

Această combinație de circuite (subsisteme) formează unitatea centrală (UC) a sistemului.

Structura internă tipică a unui microprocesor este reprezentată în figura A2.1 și conține principalele subsisteme încorporate.

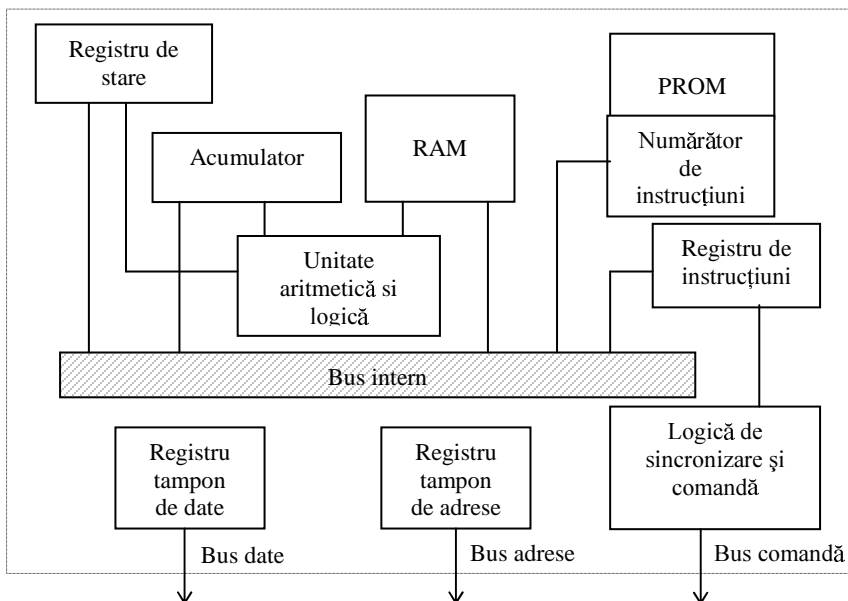


Fig. A2.1. Structura internă a unui microprocesor

Lungimea cuvântului la procesoarele oferite pe piață este de 4, 8, 16 și 32 biți.

Deși se construiesc în aproape toate tehnologiile existente, microprocesoarele cele mai recente sunt realizate în tehnologiile MOS cu porți de polysiliciu de 2 μm , NMOS și CMOS.

Un exemplu în acest sens îl constituie procesorul CMOS pe 32 biți *Motorola MC 68020*, având o dimensiune de aproximativ 9,5 mm x 8,9 mm și conținând peste 200.000 tranzistoare. „Chipul” semiconductor al microprocesorului comportă un mare număr de secțiuni (ROM, PLA, unitate aritmetică, etc), constituite din circuite integrate pe scară foarte largă.

Tehnologia bipolară, cum ar fi cea a familiei TTL de mică putere, cu un excelent factor de calitate și o foarte bună viteză de lucru, este și ea utilizată.

A 2.2. Microcalculatorul

Pentru a executa toate sarcinile cerute unui calculator, este necesară adăugarea unei memorii, a unor dispozitive de control și comandă și a unor adaptori de interfațare pentru echipamentele de intrare și de ieșire (I/O) ale unității centrale. În figura A2.2 este prezentată schema funcțională elementară a unui asemenea sistem.

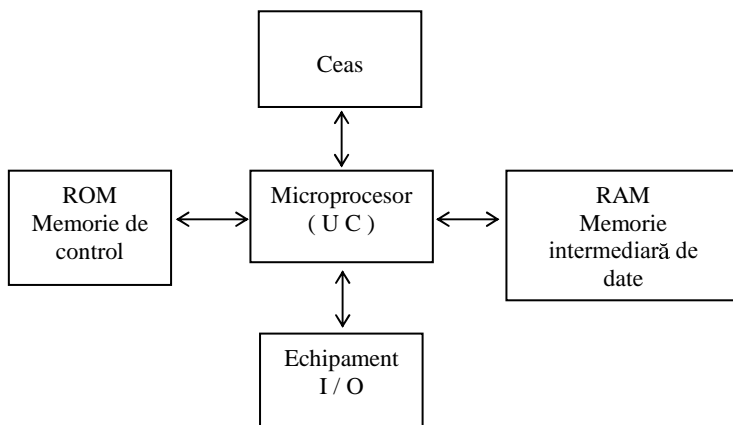


Fig. A2.2 Schema funcțională a unui microcalculator

Calculatoarele „specializate”, adică acelea care sunt construite pentru a executa un ansamblu anume de sarcini, cum ar fi cazul sistemelor de injecție electronică a benzinei, necesită ROM-uri cu remanență pentru stocarea programelor și tabelelor. Dacă programul nu este complet fixat, pot fi utilizate PROM-uri, EPROM-uri sau E²PROM-uri. Memoriile intermediare sunt rezidente pe chip în RAM. Pentru memoriile mari, se utilizează discuri magnetice dure (HDD), sau flexibile (dischete), sau ambele. Echipamentul de intrare-ieșire conține tastaturi, display-uri și imprimante. Sistemele de telecomunicații, de control și comandă bazate pe microprocesoare, comportă adesea transductoare, convertoare analog-numeric și numeric-analogice care convertesc măsurile fizice în semnale numerice și invers.

Diverse alte subsisteme de comandă, control și prelucrare (neprezentate în figura A2.2) sunt concepute pentru a funcționa cu UC: coprocesoarele și chip-urile de memorie. Coprocesoarele, cum ar fi Motorola MC 6881, constituite pentru a funcționa împreună cu MC 68020, extind capacitatea de calcul în virgulă mobilă a UC.

Accesul direct la memorie, asigurat de modul de gestionare a acesteia, permite un transfer performant de informație de la discurile magnetice la RAM sau invers. Numărul de chip-uri care pot înconjura microprocesorul poate atinge 100. Toate chip-urile sunt montate pe o placă de cablaj imprimat, adeseori inferioară unui format A4. Numărul echivalent de tranzistoare conținut de o astfel de placă depășește adeseori 1.000.000.

A 2.3. Microcalculatorul pe un singur chip

Integrarea circuitelor de sincronizare și comandă, a memoriei (ROM și RAM), a acceselor de intrare-ieșire și a circuitelor periferice cu UC, dă un microcalculator pe un singur chip.

Un exemplu în acest sens îl constituie microcalculatorul *Motorola MC68HC11* care conține peste 100.000 tranzistoare pe o suprafață de 6,5 mm x 7,4 mm, o UC, un ceas propriu, o interfața I/O, o memorie (RAM, ROM, E²PROM) și un convertor analog-numeric.

Microcalculatorul pe un singur chip poate fi extins cu alte chip-uri pentru a-i crește capacitatea de memorie și a permite interfațarea cu o mare varietate de echipamente I/O și de telecomunicații.

A 2.4. Aplicații

Discutarea detaliată a aplicațiilor microprocesoarelor depășește cu mult cadrul acestei lucrări.

Din acest motiv, considerăm utilă o simplă listă care enumeră aplicațiile care presupun microprocesoare:

<i>Electronică pentru marea public</i>	<i>Electronică comercială și industrială</i>	<i>Instrumentație</i>	<i>Birotică pentru afaceri</i>
* Calculatoare; * Ceasuri numerice; * Jocuri video sau telegocuri; * Comanda aparatelor electrice; * Sisteme casnice recreative; * Sisteme de securitate casnice; * Stocarea energiei casnice;	* Comanda mașinilor și proceselor industriale; * Dirijarea navigației; * Sisteme de aterizare automată a aeronavelor; * Injecția electronică a benzinei; * Controlul transmisiei de masă; * Sisteme antipoluare; * Transmisiuni de date, telematică;	* Echipament de autoetalonare; * Echipament de supraveghere a radiațiilor; * Sisteme de analiză în laborator; * Înregistrarea pe bandă magnetică; * Echipamente de diagnostică; * Aparate medicale; * Echipamente de avertizare incendiu și securitate a clădirilor și uzinelor;	* Terminale ale rețelelor de calculatoare; * Echipamente de automatizare a operațiilor bancare; * Terminale în punctele de vânzare; * Gestionarea stocurilor; * Fotocopiatore.

Microprocesoarele tratează semnalele numerice. Procesoarele de semnal programabile pe un singur chip, cum ar fi *Texas Instruments TMS 32010*, execută funcții de analiza spectrului în timp real, filtraj numeric, compresia vorbirii și modemi de analiză muzicală.

Aceste aplicații diverse arată că microprocesorul a devenit o componentă importantă a sistemelor electronice.

Fiind programabil, el poate îndeplini diverse funcțiuni utilizând *aceeași structură fizică*.

Gama sa de aplicații nu are altă limită decât aceea a ingeniozității și imaginației inginerilor care-l utilizează.

