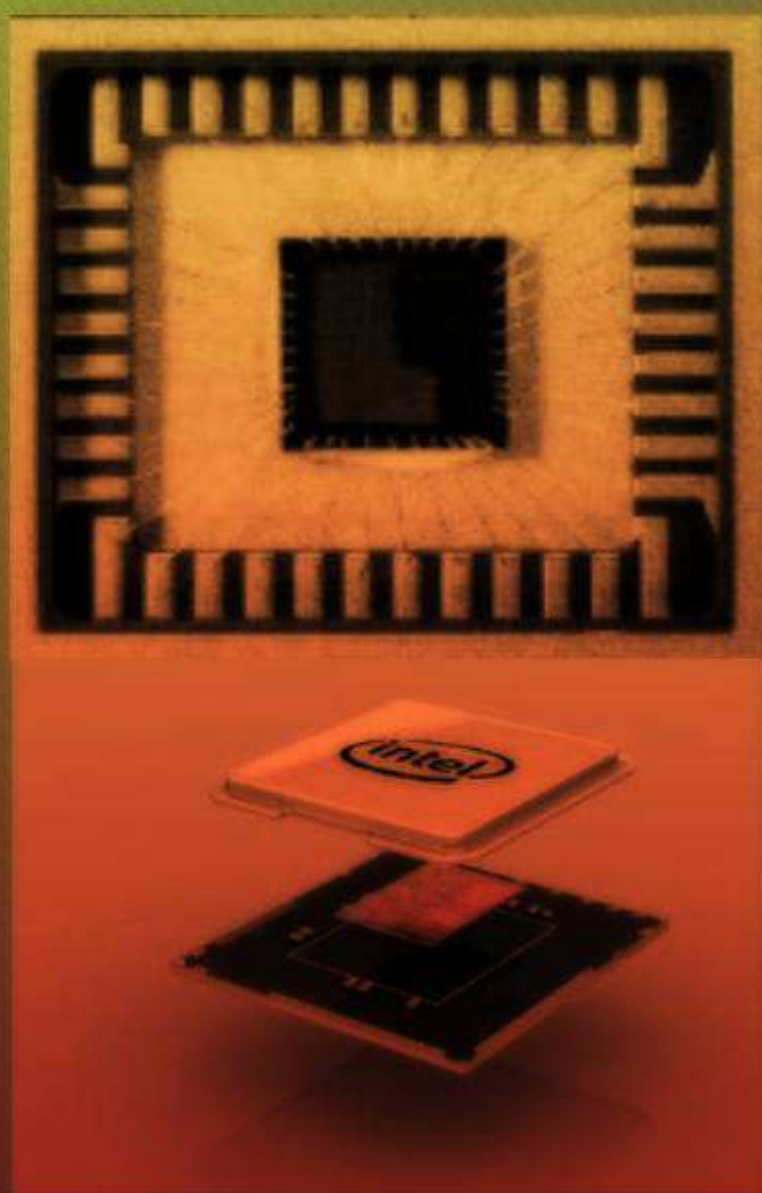


LUCIAN VINTAN

ADRIAN FLOREA

# MICROARHITECTURI DE PROCESARE A INFORMAȚIEI





## **PREFATA**

*Aceasta carte se constituie într-un efort de prezentare a unor aspecte aferente vastei problematice a microarhitecturilor de procesare a informației, din cel puțin trei puncte de vedere "intersectate": formativ, informativ și aplicativ. Considerăm ca necesitatea unei asemenea carti este imediata în contextul societății informaționale spre care ne îndreptăm. În particular pentru România, cu atât mai mult este de dorit o înțelegere profundă a faptului că - printre altele - o viață mai bună este posibilă numai printr-o maturizare a domeniului "electronicii și calculatoarelor" și, în consecință, a creșterii complexității proiectelor ingineresti autohtone. Acesta este și mesajul esențial al cartii noastre. Subliniem acest lucru pentru că, din păcate, mai există unele opinii care consideră că "aplicațiile hardware" performante nu mai sunt posibile în România de azi, uitând că, dacă singurele "output-uri" vizibile utilizatorului aplicației sunt reprezentate de monitorul video sau de imprimanta, complexitatea ingineriască este fatalmente extrem de limitată și ca urmare, beneficiul social, la fel. Iar apoi, nu este rău să fie clar pentru toată lumea, faptul că nici un algoritm sau program nu rulează prin eforturile magice ale vreunui drăcușor fantomatic, chiar dacă, vrând - nevrând, nocivă disjunctie "hardware-software" ("tehnologie-concept") tine, câteodată, locul naturalei fuziuni. Ca și contra-balansare la acest gen de "opinie" pesimiste, subliniem faptul că tehnologiile de proiectare automată în microelectronica ("EDA Techniques") cu performanțe practic sincronizate cu nivelul mondial, sunt accesibile acum pe scară largă și la noi. Ele se constituie în suportul tehnologic principal al arhitecturilor și aplicațiilor dedicate ("embedded"), atât de necesare și diverse azi, când vorbim de informatică și electronică "domestică", personalizarea aplicațiilor, control automat și robotica etc.*

*Pe scurt, lucrarea este structurată astfel. În capitolul 1 se prezintă elementele esențiale ale arhitecturii microcontrolerelor - instrumente importante ale dezvoltării de arhitecturi și aplicații dedicate. Capitolele 2 și 3 fac o trecere în revistă a principalelor caracteristici hardware-software ale actualei generații de microprocesoare, de la ierarhizarea sistemului de memorie până la optimizarea de cod. Capitolul 4 prezintă un studiu de caz axat pe modernă arhitectura HSA (Hatfield Superscalar Architecture). Se prezintă aici, în premieră la noi în țară credem noi, principiile moderne ale optimizării statice de cod, pe baza unor exemple sugestive. La fel, capitolul*

5 prezintă succint noua arhitectura Intel pe 64 de biți IA-64, al cărui prim procesor comercial se va numi "Itanium". Capitolul 6 este unul "de forță", poate cel mai drag autorilor, în care, pe baza unei extrem de laborioase cercetări și cugetări bibliografice, s-a încercat predictarea caracteristicilor hard-soft ale următoarei generații arhitecturale de microprocesoare comerciale. Marturisim acum că, scriindu-l, ne-am "înfierbântat" copios, încântați de rolul nostru temporar de...prezicători. Capitolul următor, al 7-lea, are drept scop justificarea faptului că arhitectura calculatoarelor se constituie într-un domeniu viu și fascinant, posibil a fi investigat de fiecare dintre noi. Va recomandăm să-l citiți și apoi să încercați să vă construiți propriul dvs. simulator, dedicat unei anumite probleme. În capitolul 8 am prezentat câteva aspecte privind arhitectura sistemelor multiprocesor, incluzând modelele de performanță și problemele de coerență și sincronizare implicate. Capitolele 9 și 10 sunt dedicate propunerii și rezolvării de probleme. Considerăm că numai prin soluționarea sistematică de probleme diverse și fecunde se poate aprofunda o asemenea disciplină tehnică de vârf, prin excelență aplicativă.

Modernitatea și caracterul pragmatic al lucrării sunt întărite prin acompanierea textului scris de un compact disc care conține aplicații utile, servind ca suport concret pentru cei care vor dori să treacă dincolo de o simplă informare. Pe CD-ul atasat se află la dispoziția cititorului o multime de instrumente software originale, dezvoltate în mare parte de către grupul nostru de cercetare, constituind tot atâtea posibilități de investigare interactivă a microarhitecturilor avansate. Așteptăm cu interes sugestiile și observațiile cititorilor, pentru care le mulțumim anticipat, pe adresele noastre de e-mail: [vintan@jupiter.sibiu.ro](mailto:vintan@jupiter.sibiu.ro) și [aflorea@vectra.sibiu.ro](mailto:aflorea@vectra.sibiu.ro).

Această lucrare nu ar fi putut să apară fără eforturile admirabile ale d-lui prof.dr.ing. Gh. Toacse - inițiatorului și contractorul programului de cooperare academică TEMPUS JEP AC -13559/98 "RESUME", prin care s-a finanțat apariția cărții. Îi mulțumim domnului profesor și pe această cale pentru sprijinul acordat precum și pentru faptul de a ne fi transmis câte ceva din viziunea sa profesională care intergrează atât de firesc tehnologia cu arhitectura. Mulțumirile autorilor se îndreaptă și asupra colegilor din Catedra de Calculatoare a Facultății de Inginerie din Sibiu, pentru microclimatul profesional propice scrierii acestei cărți. În final întreaga noastră grațitudine se cuvine familiilor noastre, pentru sprijinul generos pe care ni l-au acordat dintotdeauna. Le promitem că pe viitorul apropiat vom încerca să ne angajăm mai puțin în asemenea "proiecte" și le vom acorda mai mult timp, spre bucuria noastră și a lor.

Sibiu, decembrie 2000

Autorii

## CUPRINS

<b>1. ARHITECTURA MICROCONTROLLERELOR.....</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCERE ÎN PROBLEMATICA.....	1
1.2. ARHITECTURA FAMILIEI 80C51.....	2
1.2.1. ORGANIZAREA MEMORIEI.....	2
1.2.2. MODURILE DE ADRESARE.....	9
1.2.3. TIPURI DE INSTRUCȚIUNI.....	10
1.2.4. ARHITECTURA INTERNA.....	17
1.3. STRUCTURA INTERFETELOR DE INTRARE / IESIRE.....	27
1.4. MAGISTRALA DE INTERCONECTARE – I <sup>2</sup> C.....	34
1.5. MAGISTRALA ACCESS.BUS.....	42
1.6. PLACA DE DEZVOLTARE DB – 51.....	48
<b>2. ARHITECTURA MICROPROCESOARELOR ACTUALE.....</b>	<b>51</b>
2.1. MODELUL DE MICROPROCESOR SCALAR RISC.....	51
2.2. MICROARHITECTURI CU EXECUTII MULTIPLE ALE INSTRUCȚIUNILOR.....	57
2.3. OPTIMIZAREA PROGRAMELOR OBIECT. TEHNICI MODERNE DE PROCESARE.....	63
<b>3. ARHITECTURA SISTEMULUI IERARHIZAT DE MEMORIE.....</b>	<b>67</b>
3.1. MEMORII CACHE.....	67
3.2. MEMORIA VIRTUALA.....	90
<b>4. O MICROARHITECTURA MODERNA REPREZENTATIVA: HSA.....</b>	<b>99</b>
4.1. INTRODUCERE.....	99
4.2. ARHITECTURA HSA. COMPONENTE PRINCIPALE.....	102
4.3. OPTIMIZAREA STATICA A PROGRAMELOR.....	114
4.3.1. INTRODUCERE.....	114
4.3.2. HSS ÎN CONTEXTUL ACTUAL.....	115
4.3.3. MECANISMUL DE REORGANIZARE SI OPTIMIZARE.....	118
<b>5. PROCESORUL IA-64: ÎNTRE EVOLUTIE SI REVOLUTIE.....</b>	<b>135</b>
<b>6. ARHITECTURA MICROPROCESOARELOR, ÎNCOTRO ? .....</b>	<b>147</b>
<b>7. SIMULAREA UNEI MICROARHITECTURI AVANSATE.....</b>	<b>181</b>
7.1. INTRODUCERE.....	181
7.2. PRINCIPIILE IMPLEMENTARII SOFTWARE.....	184
7.2.1. INTERFATA CU UTILIZATORUL. CREAREA RESURSELOR.....	186
7.2.2. INTERFATA CU UTILIZATORUL. NUCLEUL FUNCTIONAL AL PROGRAMULUI.....	195
<b>8. ARHITECTURA SISTEMELOR MULTIPROCESOR .....</b>	<b>205</b>
8.1. DEFINIRI. CLASIFICARI.....	205
8.2. ARHITECTURI CONSACRATE.....	208
8.3. GRANULARITATE SI COMUNICARE.....	214

8.4. MODELE ANALITICE DE ESTIMARE A PERFORMANTEL.....	217
8.5. ARHITECTURA SISTEMULUI DE MEMORIE.....	222
8.5.1. DEFINIREA PROBLEMEI.....	222
8.5.2. PROTOCOALE DE ASIGURARE A COERENTEI CACHE-URILOR.....	224
8.6. SINCRONIZAREA PROCESELOR.....	228
8.6.1. ATOMIZARI SI SINCRONIZARI.....	231
8.7. CONSISTENTA VARIABILELOR PARTAJATE.....	235
8.8. METODE DE INTERCONECTARE LA MAGISTRALAE.....	237
8.9. TRANSPUTERE ÎN SMM.....	244
8.10. ELEMENTE PRIVIND IMPLEMENTAREA SISTEMULUI DE OPERARE...	251
<b>9. PROBLEME PROPUSE SPRE REZOLVARE.....</b>	<b>253</b>
<b>10. INDICATII DE SOLUTIONARE.....</b>	<b>275</b>
<b>11. CE GASITI PE CD ?.....</b>	<b>299</b>
11.1. SIMULAREA UNOR ARHITECTURI CU PARALELISM LA NIVELUL INSTRUCTIUNII.....	299
11.2. PROGRAME DIVERSE.....	305
11.3. DOCUMENTE.....	306
<b>BIBLIOGRAFIE.....</b>	<b>307</b>

# 1. ARHITECTURA MICROCONTROLLERELOR

---

## 1.1. INTRODUCERE ÎN PROBLEMATICA

Capitolul de față reprezintă o descriere a familiei de microcontrollere pe 8 biți, bazate pe arhitectura 80C51, realizate de firma Philips Semiconductors, precum și a altor componente furnizate de către respectivul producător. Un microcontroller este un microprocesor destinat în general controlului unor procese industriale care conține memorii și diverse porturi de I/O integrate pe același cip. În continuare se vor prezenta modulele de adresare, setul de instrucțiuni, partajarea memoriei ș.a. în cadrul familiei de microcontrolle 80C51.

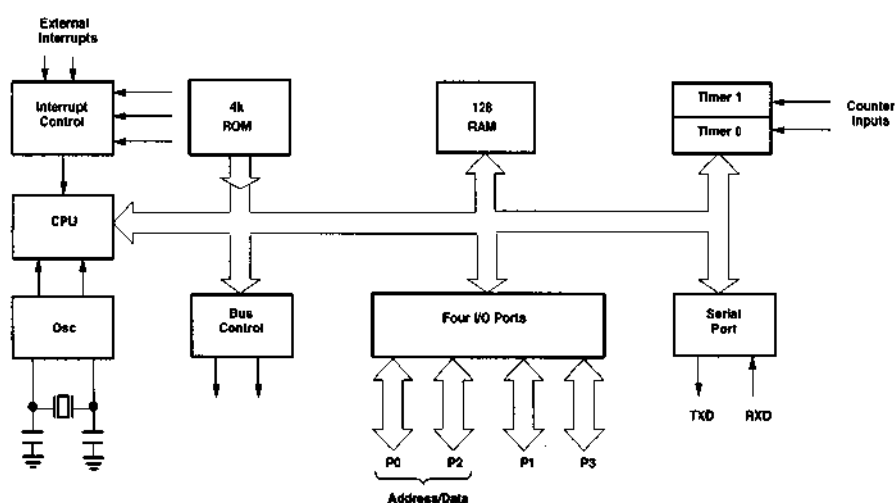
Microcontrollere derivate conțin și o interfață serială I<sup>2</sup>C (magistrală de interconectare a circuitelor integrate), care permite conectarea cu ușurință la peste alte 100 de componente integrate, sporind capacitatea și funcționalitatea microsistemului realizat. Pentru aplicații industriale și automate, microcontrollerele sunt însoțite de alta o magistrală serială de control (Control Area Network - CAN).

Familia de microcontrollere pe 16 biți, 90CXXX se bazează pe arhitectura Motorola 68000. În timp ce microcontrollerele sunt pe 16 biți în exterior, în interior unitatea centrală a arhitecturii 68000 este pe 32 de biți. Acest fapt conferă utilizatorului o putere de procesare mai mare, în condițiile creșterii necesităților de proiectare, trecând de la microcontrollere pe 8 biți la cele pe 16 biți. Microcontrollerele pe 16 biți ai firmei Philips Semiconductors sunt compatibile software cu codul procesorului Motorola 68000.



## 1.2. ARHITECTURA FAMILIEI 80C51

### 1.2.1. ORGANIZAREA MEMORIEI



**Figura 1.1.** Schema bloc a microprocesoarelor 80C51

Toate procesoarele 80C51 au spatii de adrese separate pentru instructiuni si date implementând deci o arhitectura de tip Harvard a memoriei (vezi figura 1.1). Accesarea zonei de date se face pe o magistrala de 8 biti, data citita putând fi rapid memorata si manipulata de catre registrii pe 8 biti ai CPU. Memoria program este de tip ROM sau EPROM si poate avea capacitati de pâna la 64ko. La dispozitivele 80C51, cei mai putin semnificativi 4ko de memorie sunt implementati în cip. Memoria de date este de tip RAM. Cei mai putin semnificativi 128 octeti ai memoriei de date sunt implantati în cip, restul de pâna la 64ko regasindu-se extern pe placa.

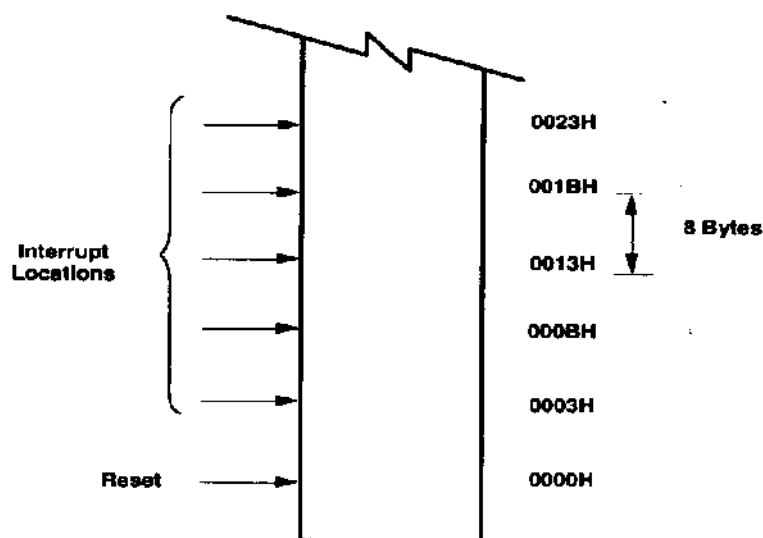
### Memoria program

Figura 1.2 ilustreaza harta memoriei program - partea cea mai putin semnificativa. Dupa resetarea sistemului, CPU (unitatea centrala de procesare) începe executia de la adresa 0000H, în conformitate cu initializarea PC-ului. Primii trei octeti ai Memoriei Program pot codifica de exemplu, o instructiune de salt neconditionat (*JUMP <Adresa>*)



reprezentând prima instrucțiune care se execută imediat după inițializare. De fapt are loc un salt la adresa de început a **programului monitor** – program ce realizează verificarea configurației hardware a microsistemului, teste de memorie, interfata cu utilizatorul, etc.

Fiecarei întreruperi îi este asignată o locație fixă în memoria program. Întreruperea determină CPU să execute salt la locația respectivă, unde începe executia rutinei de serviciu (tratare a întreruperii). Zona de program aferentă rutinelor de tratare a întreruperii se împarte în intervale de 8 octeți: 0003H - pentru întreruperea externă 0, 000BH - pentru circuitul Timer 0 (numarator), 0013H - pentru întreruperea externă 1, 001BH - pentru circuitul Timer 1 etc. Dacă o rutină de serviciu este suficient de scurtă, ea poate fi inclusă în interiorul unui astfel de interval de 8 octeți. Rutinele mai lungi de opt octeți vor folosi în general o instrucțiune de salt codificată pe maximum trei octeți pentru a nu altera zona aferentă unei alte întreruperi active.

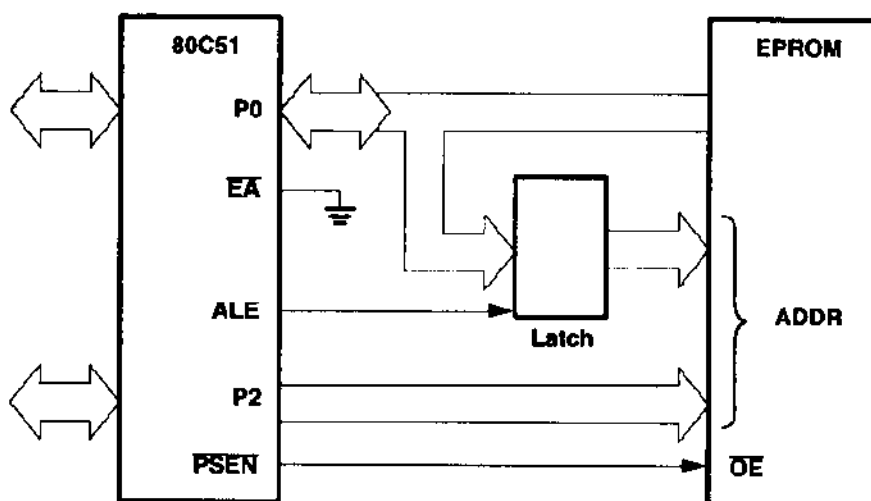


**Figura 1.2.** Memoria program la procesoarele 80C51

Cei mai semnificativi 4 ko ai memoriei program pot fi implementați fie în cipul ROM intern fie în memoria ROM externă. Selecția se face prin conectarea pinului  $\overline{EA}$  la tensiunea de alimentare ( $V_{cc}$ ) sau la masă ( $V_{ss}$ ). Dacă  $\overline{EA}$  este legat la  $V_{cc}$ , accesul de citire din zona de memorie program cuprinsă între 0000H și 0FFFH sunt direcționate spre memoria ROM – intern implementată. Accesul de citire din zona de memorie program de la adresa 1000H la FFFFH sunt îndreptate spre memoria ROM externă. Dacă

$\overline{EA}$  se conectează la masă atunci toate citirile din memoria program sunt direcționate spre memoria externă ROM.

Figura 1.3 reprezintă configurația hardware pentru executia unui program stocat în memoria program externă. Se observă 16 linii de intrare / ieșire (porturile 0 și 2) având funcții de magistrală dedicată citirii codului (datei) din memoria program externă. Portul 0 servește la multiplexarea magistralei de date / adresă. Aceasta multiplexare implică desigur o scădere a vitezei de lucru cu memoria și este datorată unor constrângeri tehnologice legate de numărul de pini ai microcontrollerului. În cadrul unui ciclu de aducere (fetch) a instrucțiunii el emite octetul cel mai puțin semnificativ al registrului Program Counter (PCL) ca și adresă și rămâne în stare de așteptare până la sosirea octetului de cod din memoria program. În momentul în care octetul cel mai puțin semnificativ al registrului Program Counter este valid în portul 0, semnalul ALE (Address Latch Enable) strobează acest octet într-un latch ale cărui ieșiri ataca memoria. Între timp, portul 2 emite cel mai semnificativ octet al registrului Program Counter (PCH). În final, semnalul de validare a citirii ( $\overline{PSEN}$ ) se activează iar EPROM-ul emite octetul de cod cerut de către microcontroller, prin intermediul aceluiași port P0, aflat de data aceasta pe post de magistrală de date.



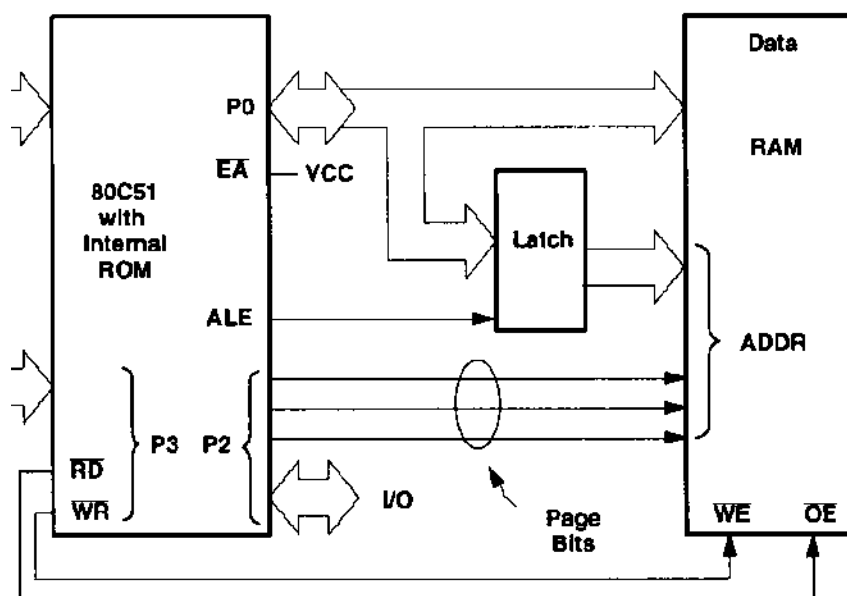
**Figura 1.3.** Executia programelor stocate în Memoria Externă

Adresarea memoriei program se face întotdeauna pe 16 biți, chiar dacă capacitatea memoriei program fizic implementată este mai mică de 64 ko.

Executia programelor externe sacrifica doua din porturile pe 8 biti (P0 si P2) acordându-le acestora functii de adresare a memoriei program.

### Memoria de date

În figura 1.4, se prezinta o configuratie hardware pentru accesarea de pâna la 2 ko de memorie RAM externa. CPU în acest caz executa instructiunile din memoria ROM interna. Portul 0 servește ca multiplexor al magistralei de date respectiv adrese care "ataca" memoria RAM, iar cele 3 linii de intrare / iesire ale portului 2 sunt folosite la paginarea memoriei RAM (8 pagini). CPU genereaza semnalele de comanda  $\overline{RD}$  si  $\overline{WR}$  (validare citire respectiv scriere) necesare în timpul acceselor la memoria RAM externa.



**Figura 1.4.** Accesarea memoriei de date externa

Adresarea memoriei de date externe poate fi facuta pe 8 sau 16 biti. Adresarea pe 8 biti este deseori folosita în conjunctie cu una sau mai multe linii de intrare / iesire pentru paginarea memoriei RAM. Adresarea pe 16 biti implica folosirea portului 2 ca emitent al octetului cel mai semnificativ de adresa, asa cum s-a mai aratat.

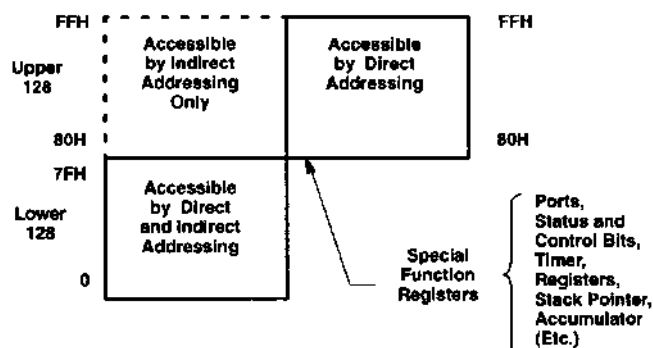


Figura 1.5. Memoria de date internă

Memoria de date internă este împărțită în trei blocuri (vezi figura 1.5), referite sub numele: *cei mai puțin semnificativi* 128o (inferiori), *cei mai semnificativi* 128o (superiori), și SFR (spațiu alocat registrilor cu funcții speciale). Adresarea memoriei de date interne se face pe cuvinte de 1 octet rezultând un spațiu adresabil de 256o. Folosind un mic artificiu, modurile de adresare ale memoriei de date interne pot gazdui 384o și nu doar 256o cum s-ar părea la o primă vedere. Adresarea celor 128o inferiori (00 - 7FH) se poate face direct sau indirect. Adresarea celor 128o superiori (80 - FFH) se face doar prin adresare indirectă iar accesul la spațiul registrilor cu funcții speciale (SFR) se face doar prin adresare directă. Rezulta că zona de 128o superiori și spațiul SFR ocupă același bloc de adrese, de la 80H la FFH, deși fizic constituie două entități diferite.

Figura 1.6 reflectă maparea celor 128o inferiori ai memoriei interne. Cei mai puțin semnificativi 32 de octeți sunt grupați în 4 bancuri a câte 8 registrari. Instrucțiunile programelor apelează acești registrari sub numele R0÷R7. Doi biți din registrul de stare program (PSW) selectează bancul de registrari folosit. Aceasta permite o eficientizare a spațiului de cod întrucât instrucțiunile cu operare pe registrari ocupă mai puțin spațiu în memoria program decât instrucțiunile care folosesc adresarea directă. Următorii 16o, succesorii bancurilor de registrari formează un bloc de memorie adresabil pe bit. Setul de instrucțiuni al microcontrollerului 80C51 cuprinde un număr mare de instrucțiuni având operanți codificați pe un singur bit.

Maparea spațiului de memorie aferent registrilor cu funcții speciale (SFR) este exemplificată în figura 1.7. De remarcat că în spațiul alocat SFR nu toate adresele sunt ocupate. Adresele libere nu sunt implementate în cip fiind probabil rezervate pentru îmbunătățiri ulterioare ale arhitecturii. Accesele de citire la aceste locații vor returna date aleatoare, iar accesele de scriere nu vor avea nici un efect. Dintre registrii cu funcții speciale amintim: acumulatorul (A), registrul de stare program (PSW), pointerul de stivă (SP),

pointerul de date (DPTR), registrul tampon (buffer) serial de date (SBUF), registrii timer, de control, de validare întreruperi, cu prioritati de întrerupere, 4 porturi.

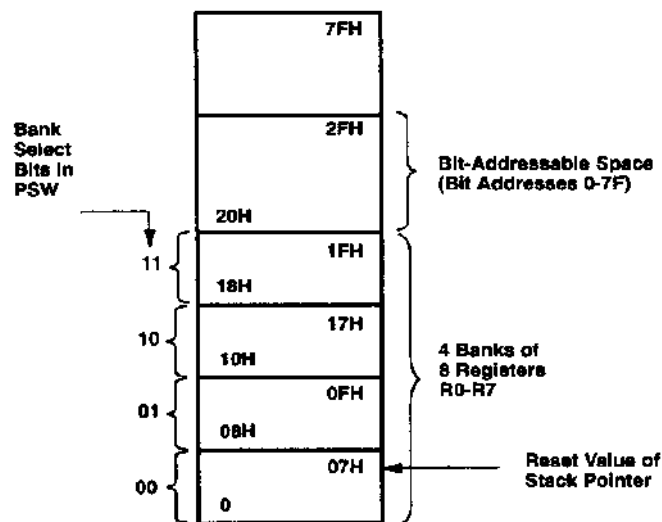


Figura 1.6. Reprezentarea celor 128 octeti inferiori ai memoriei RAM interna

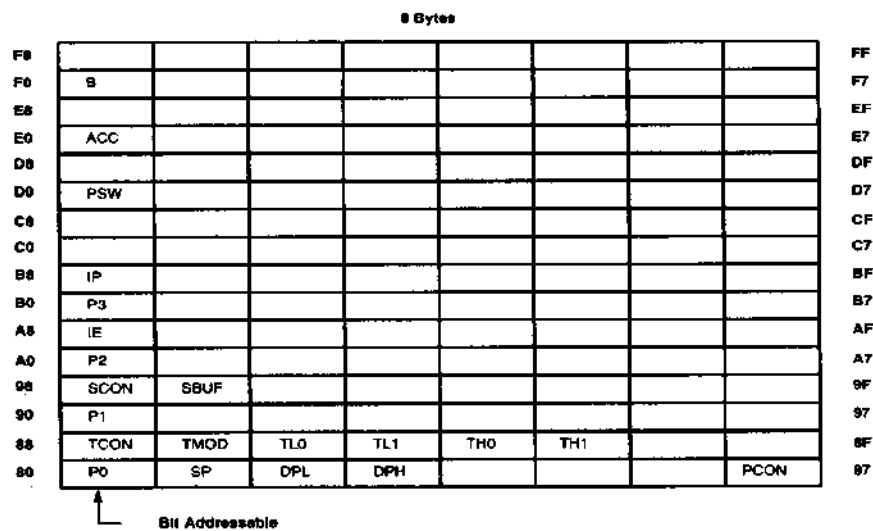
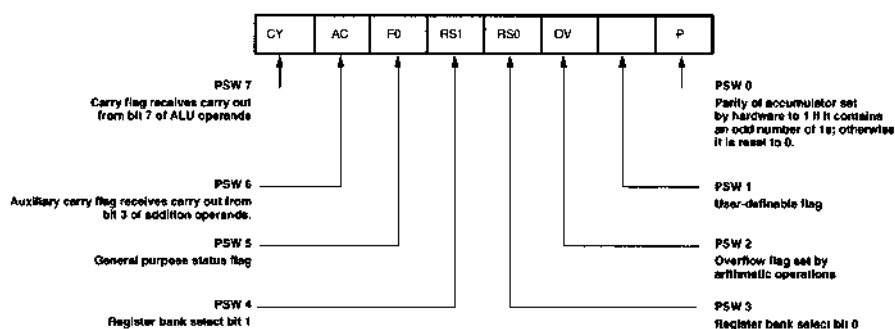


Figura 1.7. Maparea spatiului de memorie aferent registrilor cu functii speciale

Registrul de stare program (vezi figura 1.8) contine biti de stare care reflecta starea curenta a CPU. Contine bitii de transport - Carry, Auxiliary Carry, de depasire - Overflow, de paritate, doi biti de selectie ai bancului de registre si doi biti de stare la dispozitia utilizatorului. Registrul B este folosit în cadrul operatiilor de înmultire / împartire. Registrul SP este pe 8 biti si este incrementat înainte ca data sa fie memorata în timpul executiei instructiunilor PUSH sau CALL (SP - pointeaza spre ultima locatie ocupata din stiva). Acest lucru este atipic întrucât în majoritatea procesoarelor registrul SP este predecrementat la salvarea în stiva si nu preincrementat ca în acest caz. Desi stiva poate rezida oriunde în memoria RAM, registrul SP este initializat cu valoarea 07H imediat dupa semnalul Reset. Aceasta determina ca stiva sa înceapa practic de la locatia 08H. Registrul DPTR poate fi folosit ca un registru pe 16 biti sau ca doi registri independenti pe 8 biti (DPH - octetul superior al registrului DPTR si DPL - octetul inferior al registrului DPTR). Registrii pereche (TH0, TL0) si (TH1, TL1) sunt registri numaratori pe 16 biti pentru circuitele timer 0 si 1. Registrul TMOD este un registru de control si specifica modul de lucru a celor doua circuite timer. Alti registri de control sunt TCON (control al circuitelor timer), SCON (control al portului serial), PCON (control al sursei de alimentare).



**Figura 1.8.** Registrul de Stare Program (PSW)

Setarea / resetarea bitilor de selectie ai celor patru bancuri de registre (PSW<sub>3</sub>, PSW<sub>4</sub>) se face prin metode software. De exemplu: orice instructiune care adreseaza spatiul de memorie de date 00H ÷ 1FH modifica corespunzator bitii de selectie din PSW.

### 1.2.2. MODURILE DE ADRESARE

Pentru aplicatii de control pe 8 biti, setul de instructiuni al microcontrollerului 80C51 a fost optimizat. Acesta permite o varietate mare de moduri rapide de adresare, pentru accesarea memoriei RAM interne, facilitând operatii pe octet asupra structurilor de date de dimensiuni reduse. Setul de instructiuni permite manevrarea directa a operanzilor la nivel de bit în sisteme logice si de control care necesita procesare booleana.

- a. Adresare directa** - operandul este specificat printr-un câmp de adresa pe 8 biti al instructiunii. Doar memoria RAM interna si SFR sunt adresabile direct.

**Exemplu:**      `ADD A, 7FH` ;adunare în mod de adresare direct  
memorie

Dupa cum s-a aratat, registrul Acumulator (adresa E0H în spatiul SFR) apartine zonei de memorie SFR si poate fi adresat direct. Astfel, instructiunea de adunare devine:

`ADD E0H, 7FH`

si s-ar putea crede ca respectiva instructiune este codificata pe 3 octeti (1 – opcode-ul instructiunii; 2,3 – cei doi operanzi [adresele de memorie]). Totusi, respectiva instructiune este codificata pe doar 2 octeti (1 – opcode-ul instructiunii [ce include si primul operand - acumulatorul] si 2 – al doilea operand [adresa de memorie]) lucru aratat si în [1]. De fapt, arhitectura microcontrollerului fiind orientata pe acumulator (instructiunile aritmetico – logice cu doi operanzi au acumulatorul implicit ca sursa si destinatie), acesta – prin exceptie fata de ceilalti registri SFR – nu mai este necesar a fi adresat direct prin adresa E0H, fiind codificat în chiar opcode-ul instructiunii. Astfel, instructiunile aritmetico – logice cu doi operanzi în modul de adresare direct sunt codificate pe doar doi octeti în loc de trei.

- b. Adresare indirecta** - adresa operandului este specificata în mod indirect prin intermediul unui registru pointer. Pentru adrese pe octet registrul folosit sunt R0 sau R1 din bancul de registri selectat, sau SP (stack pointer) în cazul acesarii stivei. Pentru adrese pe doi octeti se foloseste doar registrul pointer de date (DPTR). Atât memoria RAM interna cât si cea externa sunt adresabile indirect.

**Exemplu:**      `ADD A, @R0`

- c. Adresarea prin registri** - 3 biti din opcode-ul instructiunii specifica unul din cei 8 registri (R0÷R7) care vor fi accesati. Bancul de registri este specificat prin cei doi biti dedicati ai



registrului PSW în momentul execuției instrucțiunii. Instrucțiunile care accesează registrul în acest mod se numesc optimizatoare de cod întrucât se elimină necesitatea unui octet de adresă (de exemplu, în modul direct, adresarea R0 ÷ R7 mai consumă un octet care în plus trebuie să fie adus din memoria program).

**Exemplu:**      ADD    A, R7

**d. Adresarea prin instrucțiuni cu registre specifice** - este cazul instrucțiunilor care operează asupra registrului acumulator (A) sau pointer de date (DPTR). Nu este necesar un octet de adresă pentru operanții respectivi, codificarea operanzilor se face în chiar opcode-ul instrucțiunii.

**e. Adresarea prin constante imediate** - folosită la încărcarea unei valori imediate într-un registru. Valorile pot fi în sistem zecimal sau hexazecimal.

**Exemplu:**      ADD    A, #127

**f. Adresarea indexată** - este folosită la citirea tabelelor de memorie program. Doar memoria program este adresabilă indexat. Registrul DPTR sau PC reține adresa de bază a tabelului, iar registrul acumulator reține numărul intrării în tabel. Adresarea indexată este folosită și în cazul instrucțiunilor de selecție de tip "case" din limbajele de nivel înalt. În acest caz adresa instrucțiunii destinație se calculează ca suma dintre un pointer de bază și acumulator.

**Exemplu:**      MOVC      A, @A+DPTR

### 1.2.3. TIPURI DE INSTRUCȚIUNI

**a. Instrucțiuni aritmetice** - sunt ilustrate în tabelul 1.1, împreună cu modurile de adresare aferente, timpul de execuție, operația executată. Timpul de execuție presupune o frecvență de ceas de 12 MHz iar instrucțiunile și datele se presupune că sunt stocate în memoriile interne 80C51.

**Obs. 1.** Rezultatul pe 16 biți al înmulțirii dintre registrul B și acumulator (A), este depus în registrul obținut prin concatenarea registrelor B și A.

**Obs.** 2. Instructiunea DIV AB realizeaza împartirea dintre A si data din registrul B si depune câtul în registrul A si restul în B. Instructiunea DIV AB se foloseste mai puțin în rutine matematice de împartire decât în conversii de baza sau operatii de deplasare (shift) - aritmetice.

**Obs.** 3. Modifica flagurile din PSW în concordanta cu operatia executata, astfel: adunarea, scaderea (C, OV, AC), împartire / înmultire (C, OV) iar celelalte instructiuni doar bitul C. Totodata, toate tipurile de instructiuni (aritmetico – logice, de transfer, booleene, etc) altereaza flagurile PSW<sub>3</sub> si PSW<sub>4</sub> pentru selectia bancului corespunzator de registre din spatiul 00H ÷ 1FH al memoriei de date, dupa cum de altfel am mai aratat.

MNEMONIC	OPERATION	ADDRESSING MODES				EXECUTION TIME (µs)
		DIR	IND	REG	IMM	
ADD A,<byte>	A = A + <byte>	X	X	X	X	1
ADDC A,<byte>	A = A + <byte> + C	X	X	X	X	1
SUBB A,<byte>	A = A - <byte> - C	X	X	X	X	1
INC A	A = A + 1					1
INC <byte>	<byte> = <byte> + 1	X	X	X		1
INC DPTR	DPTR = DPTR + 1					2
DEC A	A = A - 1					1
DEC <byte>	<byte> = <byte> - 1	X	X	X		1
MUL AB	B:A = B × A					4
DIV AB	A = Int(A/B) B = Mod(A/B)					4
DA A	Decimal Adjust					1

Tabelul 1.1.

### Instructiunile aritmetice aferente microcontrollerului 80C51

**b. Instructiuni logice** - sunt reprezentate în tabelul 1.2. Instructiunile care realizeaza operatii booleene (AND, OR, XOR, NOT) asupra operanzilor octeti, executa operatia booleana la nivel de bit. Operatiile booleene pot fi executate asupra operanzilor octeti în spatiul memoriei interne de date fara a fi necesar transferul acestor operanzi în acumulator (se salveaza timp si efort necesar salvarii în stiva).

**Obs.** Modifica flagul C din PSW.

MNEMONIC	OPERATION	ADDRESSING MODES				EXECUTION TIME (μs)
		DIR	IND	REG	IMM	
ANL A,<byte>	A = A AND <byte>	X	X	X	X	1
ANL <byte>,A	<byte> = <byte> AND A	X				1
ANL <byte>,#data	<byte> = <byte> AND #data	X				2
ORL A,<byte>	A = A OR <byte>	X	X	X	X	1
ORL <byte>,A	<byte> = <byte> OR A	X				1
ORL <byte>,#data	<byte> = <byte> OR #data	X				2
XRL A,<byte>	A = A XOR <byte>	X	X	X	X	1
XRL <byte>,A	<byte> = <byte> XOR A	X				1
XRL <byte>,#data	<byte> = <byte> XOR #data	X				2
CPL A	A = NOT A					1
RL A	Rotate ACC Left 1 bit					1
RLC A	Rotate Left through Carry					1
RR A	Rotate ACC Right 1 bit					1
RRC A	Rotate Right through Carry					1
SWAP A	Swap Nibbles in A					1

Tabelul 1.2.

### Instructiunile logice aferente microcontrollerului 80C51

#### c. Instructiuni de transfer date

##### c1) din memoria de date interna

Tabelul 1.3 descrie instructiunile care realizeaza transferuri de date din sau în spatiul memoriei interne. Instructiunea *MOV <dest>, <src>* permite transferuri între oricare din spatiile memoriei interne sau SFR fara a trece operanzii prin acumulator. La dispozitivele 80C51 stiva se afla implementata în cipul memoriei RAM si creste de la adrese mici la adrese mari. Instructiunea *PUSH* incrementeaza întâi SP apoi scrie octetul în stiva iar instructiunea *POP* preia vârful stivei pentru ca mai apoi sa decrementeze SP-ul. Instructiunile *PUSH* si *POP* pot folosi adresarea directa pentru identificarea octetului salvat sau restaurat, dar uzual stiva este accesata prin adresare indirecta utilizând registrul pointer de stiva SP. Stiva poate ajunge pâna în cei 128 octeti superiori ai memoriei RAM interne, daca acestia sunt implementati. Instructiunile *XCH* si *XCHD* sunt folosite la favorizarea interschimbarii datelor (reduce numarul de octeti de cod folositi si timpul de executie; daca n-ar exista aceste instructiuni ar trebui emulate prin 3 MOV-uri).

MNEMONIC	OPERATION	ADDRESSING MODES				EXECUTION TIME (μs)
		DIR	IND	REG	IMM	
MOV A,<src>	A = <src>	X	X	X	X	1
MOV <dest>,A	<dest> = A	X	X	X		1
MOV <dest>,<src>	<dest> = <src>	X	X	X	X	2
MOV DPTR,#data16	DPTR = 16-bit immediate constant				X	2
PUSH <src>	INC SP;MOV @SP,<src>	X				2
POP <dest>	MOV <dest>,@SP;DEC SP	X				2
XCH A,<byte>	ACC and <byte> exchange data	X	X	X		1
XCHD A,@Ri	ACC and @Ri exchange low nibbles		X			1

Tabelul 1.3.

### Instructiunile de transfer care acceseaza spatiul memoriei interne RAM

### Exemplu:

Presupunem ca registrul R0 contine adresa 20H si acumulatorul valoarea 3FH. La locatia RAM interna 20H se afla memorata valoarea 75H. Atunci, dupa executia instructiunii: **XCH A, @R0** la locatia 20H vom avea memorata valoarea 3FH iar acumulatorul va contine valoarea 75H. Instructiunea de interschimbare prezentata poate fi înlocuita, bineînțeles în mod dezavantajos ca si timp de executie, cu o secventa de trei instructiuni MOV consecutive.

i. Interschimbare folosind XCH.

MOV	R0, #20H	
MOV	@R0, #75H	Initializare registri
MOV	A, #3FH	
XCH	A, @R0	Realizare interschimbare

ii. Interschimbare folosind trei instructiuni MOV.

MOV	R0, #20H	
MOV	@R0, #75H	Initializare registri
MOV	A, #3FH	
MOV	30H, A	$(30H) \leftarrow A$ ; $(30H) \leftarrow 3FH$
MOV	A, @R0	$A \leftarrow (20H)$ ; $A \leftarrow 75H$
MOV	@R0, 30H	$(20H) \leftarrow (30H)$ ; $(20H) \leftarrow 3FH$

### **c2) din memoria de date externa**

Lista instructiunilor care acceseaza memoria de date externa este prezentata în tabelul 1.4. Singurul mod de adresare al memoriei de date externe este cel indirect. De observat ca, în toate accesele la memoria externa de date acumulatorul este unul din operanzi (fie sursa, fie destinatia). Semnalele de citire / scriere sunt activate doar în timpul executiei instructiunii MOVX. În mod normal, aceste semnale sunt inative si daca ele nu vor fi folosite deloc, pinii aferenti (semnalelor) sunt disponibili ca linii de intrare / iesire suplimentari.

ADDRESS WIDTH	MNEMONIC	OPERATION	EXECUTION TIME ( $\mu s$ )
8 bits	MOVX A, @Ri	Read external RAM @Ri	2
8 bits	MOVX @Ri, A	Write external RAM @ Ri	2
16 bits	MOVX A, @DPTR	Read external RAM @ DPTR	2
16 bits	MOVX @DPTR, A	Write external RAM @ DPTR	2

*Tabelul 1.4.*

### **Instructiunile de transfer care acceseaza spatiul memoriei externe RAM**

#### d. Instructiuni de citire din tabele de cautare

Tabelul 1.5 reda doua instructiuni disponibile pentru citirea din tabele de cautare (lookup) din memoria program. Tabelele de cautare pot fi doar citite, nu si actualizate. Tabelele pot avea pâna la 256 intrari (de la 0 la 255). Numarul intrarii dorite este încarcat în acumulator iar adresa de început de tabel se depune în DPTR sau PC.

MNEMONIC	OPERATION	EXECUTION TIME ( $\mu$ s)
MOVC A,@A+DPTR	Read program memory at (A + DPTR)	2
MOVC A,@A+PC	Read program memory at (A + PC)	2

Tabelul 1.5.

#### Instructiuni de citire din tabele de cautare

#### e. Instructiuni booleene

Dispozitivele 80C51 poseda un procesor boolean complet pe un singur bit. Tabelul 1.6 ilustreaza toate instructiunile booleene existente (salturi conditionate, instructiuni de setare, stergere, OR, AND, complementare). În cazul instructiunilor de salt, adresa destinatie este specificata printr-o eticheta sau prin adresa actuala din memoria program. Salturilor pot avea loc de la -128o la +127o în memoria program relativ la primul octet care urmeaza respectiva instructiune de salt (salturi relative).

MNEMONIC	OPERATION	EXECUTION TIME ( $\mu$ s)
ANL C,bit	C = C.AND.bit	2
ANL C,/bit	C = C.AND..NOT.bit	2
ORL C,bit	C = C.OR.bit	2
ORL C,/bit	C = C.OR..NOT.bit	2
MOV C,bit	C = bit	1
MOV bit,C	bit = C	2
CLR C	C = 0	1
CLR bit	bit = 0	1
SETB C	C = 1	1
SETB bit	bit = 1	1
CPL C	C = .NOT.C	1
CPL bit	bit = .NOT.bit	1
JC rel	Jump if C = 1	2
JNC rel	Jump if C = 0	2
JB bit,rel	Jump if bit = 1	2
JNB bit,rel	Jump if bit = 0	2
JBC bit,rel	Jump if bit = 1; CLR bit	2

Tabelul 1.6.

#### Instructiunile booleene la microcontrollerul 80C51

### **Exemplu:**

Consideram urmatoarea functie logica ce opereaza asupra variabilelor booleene A, B, C, D, astfel:

$$Q = A.B + C + /D \text{ (A and B or C or not D)}$$

Variabilele logice de intrare se vor conecta la circuit prin intermediul bitilor de la 0 la 3 ai portului P1. Bitul 0 al portului P3 reprezinta iesirea functiei logice. Porturile vor fi folosite dupa cum urmeaza:

*Intrarea A* = Bitul 0 al portului P1 (adresa 90H) – vezi figura 1.7 (Maparea spatiului de memorie aferent registrilor cu functii speciale).

*Intrarea B* = Bitul 1 al portului P1 (adresa 91H)

*Intrarea C* = Bitul 2 al portului P1 (adresa 92H)

*Intrarea D* = Bitul 3 al portului P1 (adresa 93H)

*Iesirea Q* = Bitul 0 al portului P3 (adresa B0H)

Valoarea adresei X nu este specificata si poate avea orice valoare valida din spatiul memoriei program al microcontrollerului 80C51.

Adresa	Secventa de instructiuni	Observatii
X	MOV P1, #FFH	Initializarea Portului P1
X+3	MOV C, P1.0	Preluarea intrarii A
X+5	ANL C, P1.1	A and B
X+7	ORL C, P1.2	A and B or C
X+9	ORL C, /P1.3	A and B or C or not D
X+B	MOV P3.0, C	Predarea rezultatului
X+D	SJMP X+3	Reluarea bucla

### **f. Instructiuni de salt**

#### **f1) neconditionat**

Tabelul 1.7 prezinta instructiuni de salt neconditionat, apeluri si reveniri din subrutina / intrerupere. Adresa de salt este specificata printr-o eticheta sau o constanta pe 16 biti. Desi în tabel se afla o singura instructiune de salt *JMP addr*, în realitate distingem trei astfel de instructiuni:

- ♦ *SJMP* (adresa destinatie este un offset relativ la adresa instructiunii curente) – salt relativ la PC (utile în scrierea programelor relocabile)
- ♦ *LJMP* (adresa destinatie este o constanta pe 16 biti) – salt direct
- ♦ *AJMP* (adresa destinatie este o constanta pe 11 biti)
- ♦ Instructiunea *Call addr* substituie, de asemenea, doua instructiuni de apel:
- ♦ *LCALL* (adresa destinatie este pe 16 biti, rezultând ca subrutina se poate afla oriunde în spatiul de 64ko ai memoriei program)

- ♦ *ACALL* (formatul adresei destinatie este pe 11 biti, subrutina aflându-se în blocul de 2ko, succesori instructiunii de apel)

Programatorul specifica asamblorului adresa subrutinei fie ca eticheta, fie ca si constanta pe 16 biti. Asamblorul are desigur sarcina de a stabili adresa în formatul corect cerut de instructiune.

Diferenta dintre instructiunile *RET* (revenire din subrutina) si *RETI* (revenire din întrerupere), este aceea ca *RETI* anunta sistemul de control al întreruperii ca întreruperea în curs s-a încheiat. Daca nu exista nici o întrerupere în curs în momentul executiei instructiunii *RETI*, atunci executia celor doua instructiuni de revenire este identica si consta în preluarea celor doi octeti din vârful stivei si încarcarea lor în PC astfel încât executia programului sa continue din punctul din care a fost întrerupt. Instructiunea *RETI* - spre deosebire de *RET* - permite unei întreruperi care a încercat sa o întrerupa pe cea în curs si având acelasi nivel de prioritate, sa se starteze la finele rutinei de tratare a întreruperii curente (altfel, aceasta cerere de întrerupere nu s-ar mai lua în considerare niciodata). Cu alte cuvinte, instructiunea de revenire din întrerupere marcheaza în mod explicit finele tratarii întreruperii si permite gestionarea unor noi cereri prin resetarea bitului aferent din registrul IP (vezi în continuare, figura 1.17).

MNEMONIC	OPERATION	EXECUTION TIME (μs)
<i>JMP</i> addr	Jump to addr	2
<i>JMP</i> @A+DPTR	Jump to A + DPTR	2
<i>CALL</i> addr	Call subroutine at addr	2
<i>RET</i>	Return from subroutine	2
<i>RETI</i>	Return from interrupt	2
<i>NOP</i>	No operation	1

Tabelul 1.7.

### Instructiuni de salt neconditionat la microcontrollerul 80C51

#### f2) conditionat

Lista instructiunilor de salt conditionat disponibile utilizatorului dispozitivelor 80C51 este redată de tabelul 1.8. Salturile sunt relative la adresa PC (urmatoarea celei de salt conditionat), într-o marja de la -128o la +127o. Adresa de salt e specificata identic ca la celelalte instructiuni de salt. Întrucât registrul de stare program (PSW) nu contine un bit de Zero, instructiunile *JZ* si *JNZ* testeaza continutul acumulatorului (A). Instructiunile *DJNZ* (decrementeaza si executa salt daca primul operand e diferit de zero) si *CJNE* (compara operanzii si executa salt doar daca operanzii sunt diferiti) au fost introduse pentru controlul buclor de program.



MNEMONIC	OPERATION	ADDRESSING MODES				EXECUTION TIME ( $\mu s$ )
		DIR	IND	REG	IMM	
JZ rel	Jump if A = 0					?
JNZ rel	Jump if A $\neq$ 0					2
DJNZ <byte>,rel	Decrement and jump if not zero	X		X		2
CJNE A,<byte>,rel	Jump if A $\neq$ <byte>	X			X	2
CJNE <byte>,<data>,rel	Jump if <byte> $\neq$ <data>		X	X		2

Tabelul 1.8.

### Instructiuni de salt conditionat la microcontrollerul 80C51

#### Exemplu:

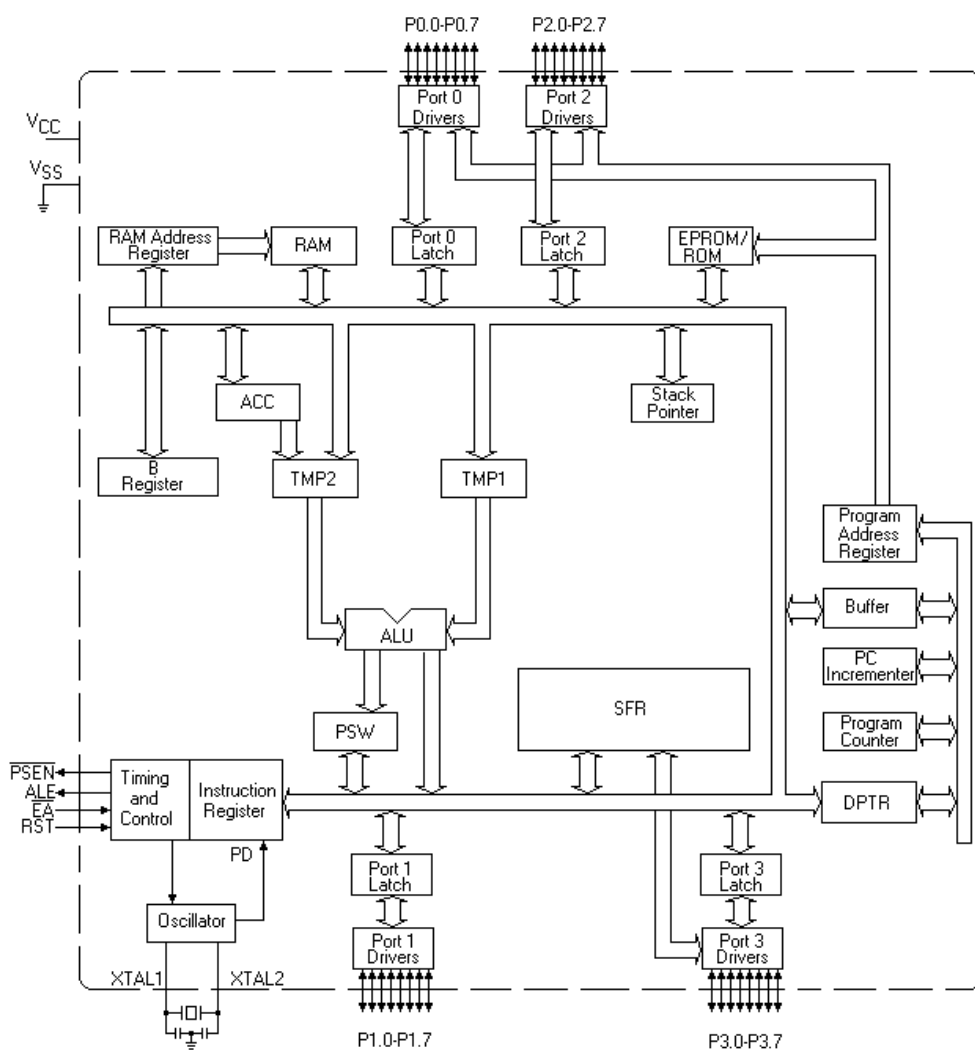
Se considera urmatoarea secventa care adauga o întârziere într-un program, acolo unde este inserata. Registrul R0, R1 si R2 reprezinta contoarele celor 3 bucle existente. Portul P1 este folosit pe post de numarator binar. Valoarea adresei X nu este specificata si poate avea orice valoare valida din spatiul memoriei program al microcontrollerului 80C51.

Adresa	Secventa de instructiuni	Observatii
X	INC P1	Se incrementeaza numaratorul binar
X+2	MOV R0, #02H	Seteaza prima constanta de întârziere
X+4	MOV R1, #FFH	Seteaza a doua constanta de întârziere
X+6	MOV R2, #FFH	Seteaza a treia constanta de întârziere
X+8	DJNZ R2, X+8	Decremeteaza R2 si executa salt la adresa specificata daca R2 $\neq$ 0
X+A	DJNZ R1, X+4	Decremeteaza R1 si executa salt la adresa specificata daca R1 $\neq$ 0
X+C	DJNZ R0, X+2	Decremeteaza R0 si executa salt la adresa specificata daca R0 $\neq$ 0
X+E	SJMP X	Reluarea bucla

### 1.2.4. ARHITECTURA INTERNA

Figura 1.9 prezinta schema bloc de principiu a microcontrollerelor 80C51. Toate resursele interne sunt centrate în jurul unei magistrale care permite schimbul de date practic între toate modulele componente (ROM, RAM, porturi I/O, ACC, SFR, SP etc.). Astfel de exemplu, în cazul unei operatii de adunare operanzii sursa sunt înscrise în registrul temporari TMP1,2 (invizibili pentru programator) iar rezultatul este depus pe magistrala centrala de unde apoi este înscris în registrul destinatie (de obicei

în acumulator). Memoriile ROM si RAM sunt adresate prin registre de adrese special dedicati, desigur invizibili pentru programator. Toate resursele sunt comandate de catre o unitate de control care are relul de a genera secventiat în timp toate semnalele de comanda interne sau externe necesare desfasurarii operatiilor efectuate de catre microcontroller (aducere instructiuni / date, scriere rezultate, decodificari instructiuni, achitare întreruperi etc.). Registrul de instructiuni, destinatia implicita a oricarui ciclu de aducere instructiune, este inclus si el în aceasta unitate de comanda.



**Figura 1.9.** Arhitectura 80C51. Schema interna

## Sursa de ceas a unitatii centrale

Toate microcontrollerele familiei 80C51 au încorporate în cip un oscilator (circuit basculant astabil), care poate fi folosit dacă se dorește, ca sursa de semnal de ceas pentru CPU. În acest sens, se conectează cristalul de cuarț sau ceramica între pinii XTAL1 și XTAL2 ai microcontrollerului, și capacitățile condensatorilor la masa (vezi figura 1.10). Figura 1.11 conține exemple de utilizare și a semnalelor de ceas extern pentru microcontroller. La dispozitivele NMOS, semnalele de la pinul XTAL2 devine generatorul de ceas intern. La dispozitivele CMOS, semnalul primit la pinul XTAL1 reprezintă sursa de ceas CPU.

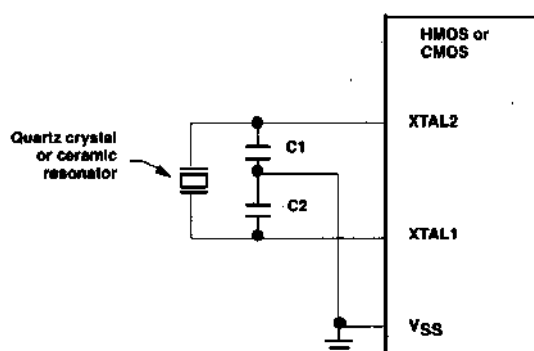


Figura 1.10. Utilizarea unui oscilator implantat în cip drept sursă de ceas

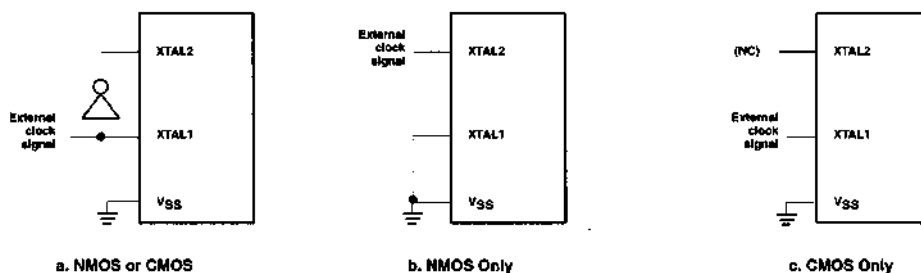
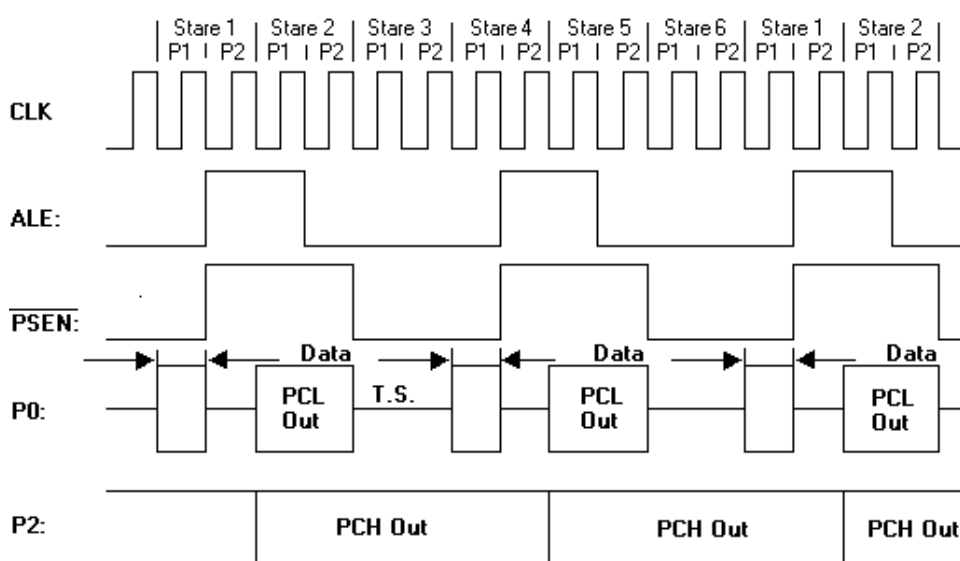


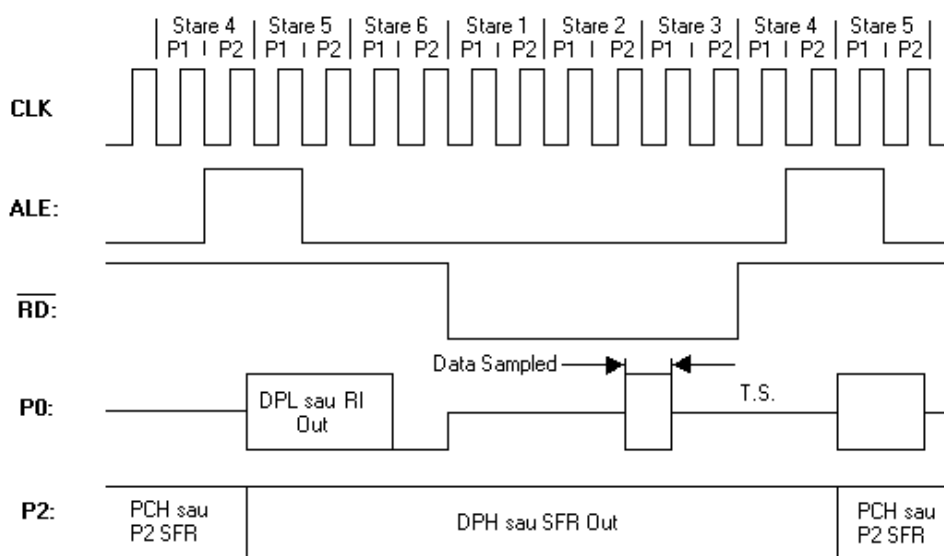
Figura 1.11. Folosirea unei surse de ceas externe pentru CPU

## Accesarea memoriei externe

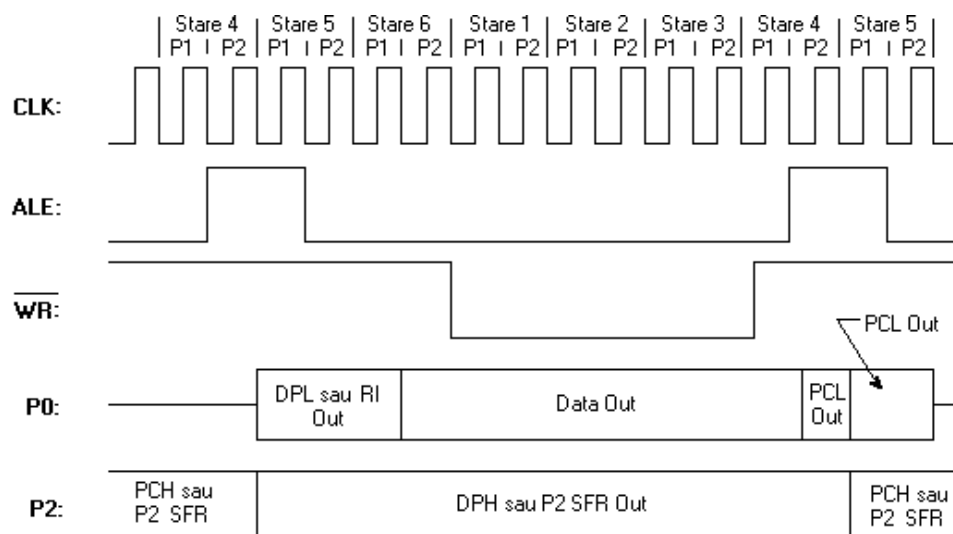
Distingem două tipuri de accese la memoria externă: accese la memoria program externă (vezi figura 1.12) și accese la memoria de date externă (vezi figurile 13 și 14). Orice ciclu de acces se constituie dintr-o secvență de 6 stări, fiecare împărțită în 2 perioade de tact (P1, P2).



**Figura 1.12.** Extragerea instructiunilor din memoria program externa



**Figura 1.13.** Ciclul de citire din memoria de date externa



**Figura 1.14.** Ciclul de scriere în memoria de date externa

Semnalul de validare a citirii instructiunilor din memoria program este  $\overline{\text{PSEN}}$  (program store enable). Instructiunea se citește efectiv sincron cu un front al ceasului, în ultima parte a intervalului în care semnalul  $\overline{\text{PSEN}}$  este activ, perioada în care portul P0 îndeplinește funcția de magistrală de intrare date și nu de magistrală de adrese ca până în acest interval. Accesele la memoria de date externa folosesc semnalele  $\overline{\text{RD}}$  sau  $\overline{\text{WR}}$  (funcții alternate ale pinilor 6 și 7 ai portului P3) pentru a valida citirea / scrierea datelor. Și în acest caz, perioada de activare a acestor două semnale determina schimbarea funcției portului P0 din port de adrese în port de date (prin multiplexare). Desigur că aceasta multiplexare în timp a funcțiilor portului P0 (adrese – date) are repercursiuni negative asupra vitezei de transfer a microcontrollerului.

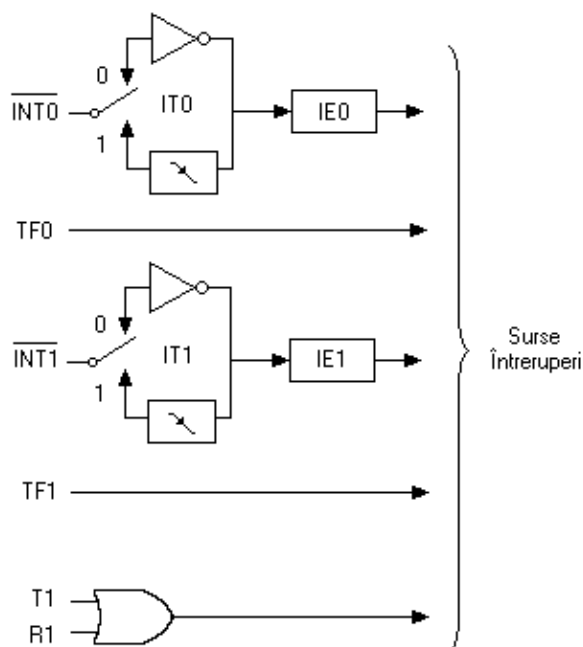
Adresarea memoriei externe de program se face întotdeauna pe 16 biți, în timp ce, memoria externa de date poate fi adresată fie pe 16 biți (**MOVX A, @DPTR**) fie pe 8 biți (**MOVX A, @Ri**). La adresarea pe 16 biți, octetul superior de adresa este furnizat de portul P2 și este reținut de acesta pe toată durata ciclului de citire sau scriere. În cazul adresării pe 8 biți, conținutul portului P2 rămâne disponibil la pinii acestuia pe toată durata ciclului de citire / scriere a memoriei, una sau mai multe din liniile de intrare / ieșire fiind folosite în conjuncție cu octetul de adresa furnizat de portul P0, facilitând paginarea memoriei. În ambele cazuri, octetul inferior de adresa este furnizat temporar de către portul P0. Semnalul ALE (address latch enable) trebuie să memoreze octetul de adresa într-un latch extern, întrucât în

continuare el își va schimba funcția în magistrala de date. Octetul de adresa devine valid la tranziția negativă a semnalului ALE, când va fi memorat în acel registru extern. În cazul ciclului de scriere, octetul de date ce va fi scris va fi disponibil în portul P0 înainte de activarea semnalului  $\overline{WR}$  și rămâne astfel până la dezactivarea respectivului semnal. În ciclul de citire, octetul de date citit este acceptat în portul P0 chiar înainte ca semnalul  $\overline{RD}$  să fie dezactivat.

Reamintim că pentru accesarea memoriei program externe este necesară cel puțin una din condițiile: **1** – semnalul  $\overline{EA}$  este activ sau **2** – registrul PC conține o valoare mai mare decât 0FFFH. Când CPU execută programe nesituate în memoria program externă, toți cei 8 biți ai portului P2 au funcții dedicate de ieșire și nu pot fi folosiți drept linii de intrare / ieșire. În timpul extragerii de instrucțiuni din memoria program externă, portul P2 va conține octetul superior al PC.

### Structura de întreruperi

Microcontrolerile din familia 80C51 precum și cele realizate, folosind sau nu, circuite ROM sau EPROM au cinci surse de întrerupere: 2 întreruperi externe, 2 întreruperi de timer și întreruperea pe port serial (vezi figura 1.15).



**Figura 1.15.** Sursele de întrerupere aferente microcontrollerului 80C51

Cele cinci surse de întrerupere sunt interne și respectiv externe. Cele 3 întreruperi endogene sunt prezentate succint în continuare. Prima ar fi cea de emisie-recepție serială, adică  $P3.0 = R_xD$  (întrerupere la recepția serială de date, deci buffer de recepție “plin”) sau  $P3.1 = T_xD$  (întrerupere la transmisia serială de date, deci buffer de emisie “gol”). Diferențierea între întreruperea de emisie și cea de recepție se face doar în cadrul rutinei de tratare prin examinarea unui registru de control care specifică explicit cauza întreruperii (bit  $TI=1$  sau/si bit  $RI=1$ ). În general, în caz de conflict, se da prioritate întreruperii de recepție. Celelalte 2 întreruperi interne ar fi cele provocate de timerele interne comandate cu ceas prin pinii:  $P3.4 = T0$  (întreruperea de timer 0 - depasire) și  $P3.5 = T1$  (întreruperea de timer 1 - depasire). Celelalte 2 întreruperi sunt de natură exogenă și anume: pe pinul  $P3.2 = \overline{INT0}$  (întreruperea externă 0), pe pinul  $P3.3 = \overline{INT1}$  (întreruperea externă 1).

**Validarea** sau invalidarea surselor de întrerupere poate fi făcută individual prin setarea sau stergerea unui bit în registrul IE (interrupt enable) din SFR. Registrul respectiv conține, de asemenea, un bit de dezactivare globală care sters, poate dezactiva toate sursele de întrerupere în acel moment (vezi figura 1.16).

(MSB)			(LSB)				
EA	x	x	ES	ET1	EX1	ET0	EX0
Symbol	Position		Function				
EA	IE.7		Disables all interrupts. If EA = 0, no interrupt will be acknowledged. If EA = 1, each interrupt source is individually enabled or disabled by setting or clearing its enable bit.				
	IE.6		Reserved.				
	IE.5		Reserved.				
ES	IE.4		Enables or disables the Serial Port interrupt. If ES = 0, the Serial Port interrupt is disabled.				
ET1	IE.3		Enables or disables the Timer 1 Overflow interrupt. If ET1 = 0, the Timer 1 interrupt is disabled.				
EX1	IE.2		Enables or disables External interrupt.1. If EX1 = 0, External interrupt 1 is disabled.				
ET0	IE.1		Enables or disables the Timer 0 Overflow interrupt. If ET0 = 0, the Timer 0 interrupt is disabled.				
EX0	IE.0		Enables or disables External interrupt. 0. If EX0 = 0, External interrupt 0 is disabled.				

Figura 1.16. Registrul de validare al întreruperii (IE)

## Prioritățile de întrerupere

Fiecare sursă de întrerupere poate fi în mod individual programată pe unul din cele două nivele de prioritate existente, prin setarea sau stergerea unui bit într-unul din registrele SFR numite IP (interrupt priority) - vezi figura 1.17. Rutina aferentă unui nivel de prioritate scăzut (low) poate fi întreruptă



de catre un nivel de prioritate ridicat (high), dar nu de catre un nivel de prioritate scazut. Un nivel de prioritate ridicat al unei întreruperi nu poate fi întrerupt de nici una din sursele de întrerupere, pe nici un nivel de prioritate. Daca doua întreruperi, fiecare fiind caracterizate de nivele de prioritate diferite, sunt receptionate simultan, cea cu nivelul de prioritate ridicat este deservita mai întâi. În cazul în care, cele doua întreruperi sunt la acelasi nivel de prioritate si sunt receptionate simultan, o secventa interna de interogare (polling) va determina care întrerupere va fi deservita prioritar. Astfel, în cadrul fiecarui nivel de prioritate (0 sau 1) exista o structura de prioritati secundara, determinata de secventa de interogare (polling), dupa cum urmeaza (vezi tabelul 1.9):

Sursa	Prioritatea în cadrul nivelului
IE0	Cea mai ridicata (prioritara)
TF0	.
IE1	.
TF1	.
RI+TI	Cea mai joasa (mai putin prioritara)

Tabelul 1.9.

#### Structura secundara de prioritati de întrerupere

IE1 / IE0 reprezinta al doilea / al patrulea bit al registrului TCON (registru de control al circuitelor timer). Sunt setati de hardware la detectia unei întreruperi externe. Sunt resetati dupa tratarea întreruperii.

TF1 / TF0 – reprezinta cel mai semnificativ / al saselea bit al registrului TCON. Sunt setati de hardware la realizarea unei operatii de depasire (overflow) de catre circuitele timer 1 sau 0. Sunt resetati prin hardware când se trece la executia rutinei de tratare a întreruperii.

TI reprezinta flagul de întrerupere pe transmisie de date. Este setat de hardware la sfârșitul transmisiei celui de-al 8-lea bit de date (buffer emisie “gol”), în modul 0 de lucru al portului serial sau la începutul transmisiei bitului de STOP în celelalte moduri de lucru, în orice transmisie seriala. Trebuie resetat prin software. RI reprezinta flagul de întrerupere pe receptie de date si la fel ca TI apartin registrului SCON (registrul de control al portului serial). Este setat de hardware la sfârșitul receptionarii celui de-al 8-lea bit de date (buffer receptie “plin”), în modul 0 de lucru al portului serial sau la jumătatea trnsmisiei bitului de STOP în celelalte moduri de lucru, în orice receptie seriala. Trebuie resetat prin software.

**Exemplu:** Dacă flagul de validare a întreruperii este setat pe 1 în registrul IE (interrupt enable), sistemul de întreruperi generează un apel LCALL la locația corespunzătoare în memoria program după activarea întreruperii și doar dacă alte condiții nu inhibă întreruperea. Există câteva condiții de blocare a unei întreruperi dintre care o amintim pe aceea că o întrerupere de prioritate mai mare sau egală se afla în progres în acel moment. Instrucțiunea LCALL, generată practic prin hardware, determină depunerea conținutului registrului PC (program counter) pe stivă și încărcarea registrului PC cu adresa de început a rutinei de serviciu (tratare a întreruperii). Reamintim că, rutinele de serviciu ale fiecărei întreruperi încep la locații fixate în memoria program (vezi figura 1.2). Doar registrul PC este salvat automat în stivă, nu și PSW sau orice alt registru. Acest lucru permite programatorului să decidă cât timp să aloce salvării altor registre funcție de numărul registrelor ce trebuie salvate (cei alterați de către rutina de tratare a întreruperii). Aceasta determină reducerea timpului de răspuns al întreruperilor, programatorul acționând direct asupra acestui parametru. Ca rezultat, multe funcții de întrerupere, care se regăsesc în aplicații de control, cum ar fi: complementarea, alternanța (toggling) unui pin aferent porturilor, reîncărcarea unui numărator (timer), descărcarea unui buffer serial etc. pot fi deseori realizate într-un timp mult mai scurt decât cel necesar realizării respectivelor funcții de întrerupere pe alte arhitecturi.

(MSB)				(LSB)			
X	X	X	PS	PT1	PX1	PT0	PX0

Symbol	Position	Function
	IP.7	Reserved.
	IP.6	Reserved.
	IP.5	Reserved.
PS	IP.4	Defines the Serial Port Interrupt priority level. PS = 1 programs it to the higher priority level.
PT1	IP.3	Defines the Timer 1 Interrupt priority level. PT1 = 1 programs it to the higher priority level.
PX1	IP.2	Defines the External Interrupt 1 priority level. PX1 = 1 programs it to the higher priority level.
PT0	IP.1	Enables or disables the Timer 0 Interrupt priority level. PT0 = 1 programs it to the higher priority level.
PX0	IP.0	Defines the External Interrupt 0 priority level. PX0 = 1 programs it to the higher priority level.

**Figura 1.17.** Registrul cu nivele de prioritati de întrerupere (IP)

### Simularea unui al treilea nivel de întrerupere în software

Unele aplicatii necesita mai mult decât cele doua nivele de prioritate care sunt implementate prin hardware în cip la microcontrollerele 80C51. În acest caz se realizeaza aplicatii software simple care au acelasi efect ca si un al treilea nivel de prioritate al unei întreruperi. Pentru asta, mai întâi, întreruperii care urmeaza sa aiba prioritatea mai mare decât 1 i se asigneaza prioritatea 1 în registrul IP (interrupt priority). Rutina de tratare pentru întreruperea de prioritate 1, care se presupune posibil a fi întrerupta de întreruperea cu prioritate 2, este scrisa incluzându-se si urmatorul cod:

```

PUSH IE
MOV IE, #MASK ;valideaza exclusiv întreruperea de "nivel" 2 în
                IE.
CALL LABEL
*****
(Executia rutinei de serviciu – aferenta întreruperii cu nivelul 1 de
prioritate. Aceasta poate fi întrerupta de o întrerupere de nivel 2!)
*****
POP IE
RET
LABEL:
      RETI

```

De îndata ce sunt cunoscute toate prioritatile de întrerupere, registrul de validare a întreruperii (IE) este redefinit pentru a dezactiva toate sursele de întrerupere mai putin cea de prioritate 2. Apoi, prin apelul CALL la eticheta LABEL, se executa instructiunea RETI, care încheie (elibereaza) întreruperea de prioritate 1, aflata în progres (RETI – spune sistemului de control al întreruperii ca întreruperea aflata în progres s-a încheiat si prin urmare permite dupa executie luarea în considerare a întreruperii de nivel 2 pe parcursul executiei rutinei de tratare aferente întreruperii de nivel 1). În acest moment, orice întrerupere de prioritate 1 care este validata poate fi deservita, însa doar întreruperea de "prioritate 2" este validata. Dupa executia rutinei de serviciu aferenta întreruperii de prioritate 2, care poate fi tratata oriunde în memoria program, are loc restaurarea registrului IE din stiva cu octetul original de validare a întreruperilor. Apoi, instructiunea RET este folosita pentru a încheia rutina de serviciu aferenta întreruperii de prioritate 1, cea initiala.

### 1.3. STRUCTURA INTERFETELOR DE INTRARE / IESIRE

Microcontrollerele, spre deosebire de microprocesoare, se caracterizeaza prin includerea în propriul cip a diverselor porturi de I/O seriale si paralele, a circuitelor timer, memorii, sursa de ceas interna, etc. În compensatie, structura si filosofia lor de functionare sunt mai simple, adaptate la cerintele controlului diverselor procese industriale.

#### Structura porturilor

Toate cele patru porturi ale microcontrollerului 80C51 sunt bidirectionale. Fiecare consta dintr-un latch (P0÷P3) – registre din spatiul SFR, un driver de iesire si un buffer de intrare. Scrierea unui 1 respectiv 0 într-un bit al oricarui port SFR (P0, P1, P2 sau P3) determina comutarea pinului de iesire al portului corespondent în stare “high” respectiv “low”. Drivele de iesire ale porturilor P0 si P2, si bufferul de intrare al portului P0 sunt folosite în accese la memoria externa. Asa cum s-a mai aratat, portul P0 emite octetul inferior de adresa necesar adresarii memoriei externe, multiplexat cu octetul de date ce va fi scris sau citit. Portul P2 emite octetul superior de adresa catre memoria externa, în cazul adresarii pe 16 biti. Altfel portul P2 indica continutul registrului din spatiul SFR. Toti pini portului P3 sunt multifunctionali. Acestia nu sunt doar pini ai portului 3 ci servesc si la realizarea a diverse functii (vezi tabelul 1.10).

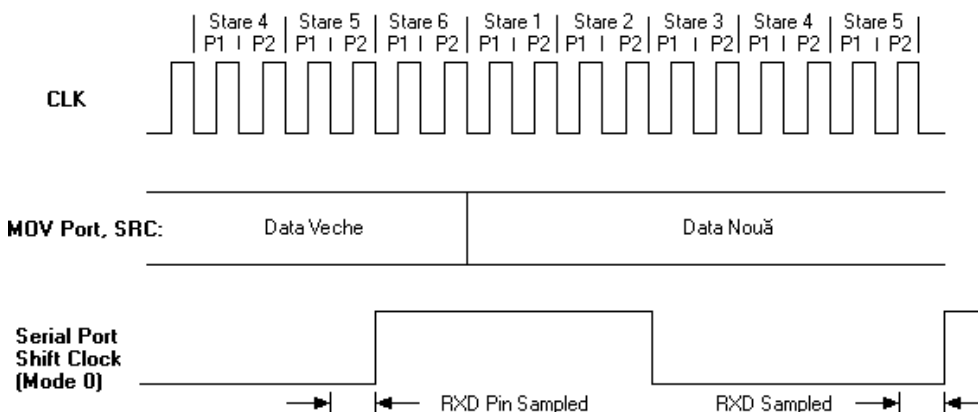
Pinii portului P3	Funcția alternativă
P3.0	$R_xD$ (intrare seriala a portului)
P3.1	$T_xD$ (iesire seriala a portului)
P3.2	$\overline{INT0}$ (întreruperea externa 0)
P3.3	$\overline{INT1}$ (întreruperea externa 1)
P3.4	T0 (intrarea externa a circuitului Timer 0)
P3.5	T1 (intrarea externa a circuitului Timer 1)
P3.6	$\overline{WR}$ (semnal de strobare la scrierea octetului de date în memoria externa)
P3.7	$\overline{RD}$ (semnal de strobare la citirea datelor din memoria externa)

*Tabelul 1.10.*

#### Funcțiile alternative ale pinilor portului P3

Funcțiile alternative pot fi activate doar dacă bitul din latch-ul corespondent din SFR este 1. Rolul driverelor de ieșire ale porturilor P0 și P2 poate comuta între magistrala de adresă a memoriei interne (ADDR) și rol de magistrala de adresă / date în cazul acceselor la memoria externă. În timpul acceselor la memoria externă, registrul P2 din SFR rămâne nemodificat, dar în registrul P0 din SFR este înscrisă valoarea 1. Fiecare linie de I/O poate fi folosită în mod independent atât ca intrare cât și ca ieșire. Porturile P0 și P2 nu pot fi folosite ca și registre de uz general de I/O atunci când sunt folosite în operații de accesare a memoriei externe. Toate latch-urile microcontrollerului 80C51 sunt inițializate cu valoarea 0FFH de către funcția Reset. Dacă într-un latch al unui port se scrie ulterior un 0, portul poate fi reconfigurat ca intrare prin scrierea unui 1 în latchul portului respectiv.

Scrierea în porturi este ilustrată în figura 1.18 fiind similară cu accesul la memorie prezentat anterior.



**Figura 1.18.** Scrierea în porturi

În execuția unei instrucțiuni care modifică valoarea într-un latch al porturilor, noua valoare este memorată în latch în timpul fazei a doua din starea sase a ciclului final al instrucțiunii (S6P2). Totuși, conținutul latchurilor sunt disponibile la bufferele lor de ieșire doar în timpul fazei întâi a perioadei de tact iar în timpul fazei a doua bufferul de ieșire reține valoarea respectivă. În consecință, noua valoare în latchul portului nu va apărea la pinul de ieșire până în următoarea fază P1 din ciclul masina următor scrierii în port (S1P1).

Dintre instrucțiunile care citesc un port distingem instrucțiuni care citesc portul propriu zis și respectiv instrucțiuni care citesc pinii aferenți portului. Instrucțiunile care citesc porturi se caracterizează prin faptul că

citesc o valoare, o modifica posibil, si apoi o rescriu în port. Operandul destinatie poate fi un port sau un bit al portului respectiv. Aceste instructiuni se numesc instructiuni “**citeste – modifica – scrie**” (read-modify-write). În continuare prezentam câteva astfel de instructiuni:

Instructiunea	Operatia executata
ANL P1, A	P1 SI LOGIC A (Acumulatorul)
ORL P2, A	P2 SAU LOGIC A
XRL P3, A	P3 XOR LOGIC A
JBC P1.1, Label	Daca P1.1 = 1 executa salt si reseteaza bitul
CPL P3.0	Complementeaza respectivul bit
INC P2	Incrementeaza latchul portului P2
DEC P2	Decrementeaza latchul portului P2
DJNZ P3, Label	Decrementeaza P3 si executa salt daca P3 > 0
MOV Px.y, C	Transfera bitul Carry la bitul y al portului x
CLR Px.y	Reseteaza bitul y al portului x
SET Px.y	Seteaza bitul y al portului x

*Tabelul 1.1.*

### Instructiuni de scriere în porturi

Deși nu sunt evidente, ultimele trei instructiuni sunt de tipul “citeste – modifica – scrie”. Acestea citesc octetul de date al portului (toti cei 8 biti), modifica bitul adresat si apoi scrii noul octet în port. Motivul pentru care instructiunile de tipul “citeste – modifica – scrie” sunt directionate mai mult catre porturi decât catre pini consta în evitarea unei posibile interpretari gresite a nivelului electric al pinilor. De exemplu, se considera ca un bit al unui port este folosit la comanda bazei unui tranzistor. Când acest bit este setat pe ‘1’ tranzistorul este pornit. Daca CPU citeste apoi acelasi bit al portului la nivel de pin, acesta va citi tensiunea de baza a tranzistorului si va fi interpretata ca 0. Citind acelasi bit din latchul aferent portului respectiv, vom avea valoarea corecta, si anume 1.

### Interfata seriala standard

Portul serial este de tip “full – duplex”, ceea ce înseamna ca poate emite si receptiona date simultan. Registrul de emisie – receptie ai portului serial sunt accesati prin registrul SBUF din spatiul SFR. Bufferul serial consta de fapt din doua registre separate, un buffer de emisie si unul de receptie. Când o data este depusa în SBUF, ea e directionata spre bufferul de emisie si retinuta pentru transmisie seriala. Când o data este mutata din

SBUF aceasta provine din bufferul de reeptie. Portul serial poate opera în patru moduri asincrone:

- a. **Modul 0.** Intrarea si iesirea seriala se face pe linia  $R_xD$ . La iesirea  $T_xD$  vom avea linia de ceas. Sunt transmisi / receptionati 8 biti de date, începând cu cel mai puțin semnificativ (LSB). Rata de transfer a datelor (exprimata în baud) este fixata la 1/12 din frecventa de oscilatie a generatorului de tact.
- b. **Modul 1.** Sunt transmisi 10 biti (pe linia  $T_xD$ ) sau receptionati (pe linia  $R_xD$ ), în formatul asincron: un bit de start (0), 8 biti de date (cel mai puțin semnificativ - primul) si un bit de stop (1). La receptie, bitul de stop e înscris în RB8, bit aparținând registrului SCON (vezi figura 1.19). Rata de transfer este variabila, functie de frecventa de tact.
- c. **Modul 2.** Sunt transmisi (pe linia  $T_xD$ ) sau receptionati (pe linia  $R_xD$ ) 11 biti: bitul de start (0), 8 biti de date (primul LSB), un bit programabil (al 9-lea bit de date) si un bit de stop (1). La transmitia datelor, celui de-al 9-lea bit de date (bitul TB8 din SCON – vezi figura 1.19) îi poate fi asignata valoarea 0 sau 1. La receptie, cel de-al 9-lea bit este înscris în RB8 al SCON, iar bitul de stop este ignorat. Rata de transfer este programabila fie la 1/32 fie la 1/64 din frecventa de oscilatie a generatorului de tact.
- d. **Modul 3.** Este identic cu modul 2 de operare, exceptând rata de transfer. În modul 3, rata de transfer este variabila. Util în comunicatia multiprocesor dupa cum se va arata în continuare.

În toate cele patru moduri transmitia este initiata de catre orice instructiune care foloseste registrul SBUF (buffer de emisie) ca destinatie. Receptia este initiata în modul 0 de catre conditiile **(RI=0) AND (REN=1)**. Receptia este initiata, în celelalte moduri, clasic pentru protocoalele asincrone, de catre sosirea bitului de start daca **REN=1**.

Registrul de stare si control al portului serial – SCON (vezi figura 1.19) contine nu doar bitii de selectie ai modului de operare ci si al 9-lea bit de date dintr-o transmisie sau receptie (TB8 si RB8), si bitii de întrerupere ai portului serial (TI si RI).



(MSB)				(LSB)			
SM0	SM1	SM2	REN	TB8	RB8	TI	RI
SM0, SM1 - specifica modul de lucru al portului serial.				TB8 - este al 9-lea bit de date care va fi transmis in modurile 2 si 3. Setat/resetat software.			
SM0	SM1	Descriere	Rata de transfer	RB8 - in modurile 2 si 3 este al 9-lea bit de date care a fost receptionat. In modul 1, daca SM2=0, RB8 este bitul de STOP care a fost receptionat. in modul 0 nu este folosit.			
0	0	Registru de deplasare	$f_{OSC}/12$	TI - este flagul de intrerupere pe transmisie de date. Setat de catre hardware la sfarsitul celui de-al 8-lea impuls de tact in modul 0, sau la inceputul bitului de STOP in celelalte moduri. Trebuie resetat software.			
0	1	UART pe 8 biti	variabila	RI - este flagul de intrerupere pe receptie de date. Setat de catre hardware la sfarsitul celui de-al 8-lea impuls de tact in modul 0, sau la jumătatea impulsului de tact aferent bitului de STOP in celelalte moduri. Trebuie resetat software.			
1	0	UART pe 9 biti	$f_{OSC}/64$ sau $f_{OSC}/32$				
1	1	UART pe 9 biti	variabila				
SM2 - valideaza caracteristica de comunicatie multiprocesor in modurile 2 si 3. In aceste doua moduri, daca SM2 e setat pe 1 atunci RI nu va fi activat daca al 9-lea bit de date (RB8) este 0. In modul 1, daca SM2=1, atunci RI nu va fi activat daca nu s-a receptionat un bit de STOP valid. In modul 0 SM2 trebuie sa fie 0.							
REN - Setat/resetat software pentru a valida/invalida receptia seriala.							

Figura 1.19. Registru de control al portului serial (SCON)

## Comunicatia în sisteme multiprocesor

Modurile de operare 2 si 3 trateaza special comunicatia în sisteme multiprocesor. În aceste moduri, sunt receptionati 9 biti de date. Cel de-al 9-lea bit este memorat în RB8 al registrului SCON. Apoi urmeaza bitul de STOP. Portul poate fi programat astfel încât, la receptionarea bitului de stop, întreruperea de port serial va fi activata doar daca RB8=1. Caracteristica de comunicatie multiprocesor e validata daca bitul SM2 din SCON este setat. O modalitate de a folosi respectiva caracteristica în sisteme multiprocesor este urmatoarea:

Când un procesor master doreste sa transmita un bloc de date unuia din dispozitivele slave, acesta trimite mai întâi un cuvânt de adresa care identifica slave-ul destinatie. Un cuvânt de adresa difera de unul de date prin aceea ca al 9-lea bit este 1 în cuvântul de adresa si 0 în cel de date. Când SM2=1, nici un slave nu va fi întrerupt de catre un octet de date. Un cuvânt de adresa, totusi, va întrerupe toate dispozitivele slave, astfel încât fiecare slave sa poata examina si detecta daca cuvântul receptionat reprezinta adresa sa. Slave-ul adresat va reseta bitul SM2 si se va pregati sa receptioneze cuvântul de date. Dispozitivele slave care nu au fost adresate lasa bitii SM2 aferenti lor setati si își continua activitatea neperturbate, ignorând cuvântul de date. SM2 nu are nici un efect în modul 0, iar în modul 1 poate fi folosit sa verifice validitatea bitului de stop. În receptia din modul 1, daca SM2=1, întreruperea de receptie nu va fi activata daca nu se receptioneaza un bit de stop valid.

## Circuite Timer/Numaratoare

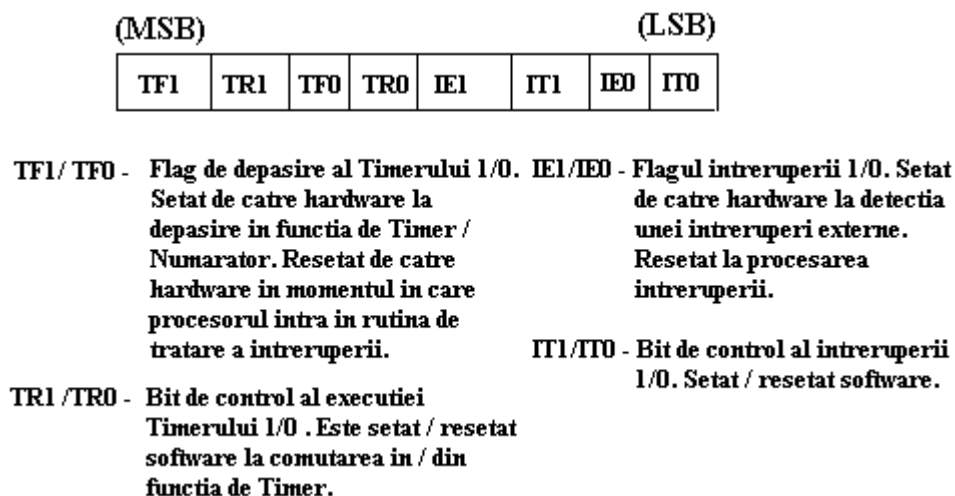
Microcontrollerul 80C51 contine doua registre timere/numaratoare pe 16 biti: Timer 0 si Timer 1. Ambele pot fi configurate sa opereze atât ca circuite timer (periodizatoare) cât si ca numaratoare. Având functia de timer, registrul este incrementat cu fiecare ciclu masina. Întrucât un ciclu masina consta din 12 perioade de oscilatie ale generatorului de tact, rata de numarare este 1/12 din frecventa oscilatorului. Având functia de numarator, registrul este incrementat ca raspuns la o tranzitie din 1 în 0 a intrarii externe corespundente de la pinul  $T_0$  sau  $T_1$ . Noua valoare numerica apare în registru în timpul fazei P1 a ciclului (S3P1) urmator celui în care s-a detectat tranzitia. Întrucât dureaza doi cicli masina (24 perioade de oscilatie) pentru a recunoaste o tranzitie din 1 în 0, rata maxima de numarare este 1/24 din frecventa oscilatorului.

Pe lângă posibilitatea de selectie între functia de timer sau numarator, circuitele Timer0 si Timer1 sunt caracterizate de patru moduri de operare. Functia de timer sau numarator este selectata cu ajutorul bitilor C/T din registrul TMOD din spatiul SFR (vezi figura 1.20). Bitii M1 si M0, aparținând aceluiași registru TMOD, selecteaz modul de operare. Modurile 0, 1 si 2 sunt aceleasi atât pentru Timer/Numaratorul 0 cât si pentru Timer/Numaratorul 1. Modul 3 este diferit functie de circuit.

(MSB)				(LSB)			
Gate	C/T	M1	M0	Gate	C/T	M1	M0
Timer 1				Timer 0			
				M1	M0	Operatia	
Gate - Cand este setat opreste controlul. Timerul/Numaratorul 'x' este validat doar cand pinul $\overline{INTx}$ este high si pinul de control $TRx$ este setat.				0	0	Timer 8048.	
				0	1	Timer/Numarator pe 16 biti $THx$ si $TLx$ sunt cascade.	
				1	0	Timer/Numarator pe 8 biti cu reincarcare. $THx$ retine valoarea care urmeaza sa fie reincarcata in $TLx$ la fiecare depasire.	
C/T - Selectorul functiei de Numarator (intrarea 0 reprezinta ceasul intern sistemului) sau Timer (intrarea 0 reprezinta pinul de intrare $Tx$ )				1	1	(Timer 0) $TL0$ este un Timer / Numarator pe 8 biti controlat de bitii standard de control ai Timerului 0. $TH0$ este timer pe 8 biti controlat doar de biti de control ai Timerului 1.	
				1	1	(Timer 1) Timerul / Numaratorul 1 este oprit.	

**Figura 1.20.** Registrul de control al modului de functionare al circuitelor Timer (TMOD)

- a. Circuitele Timer în **modul 0** se comporta precum circuitul Timer 8048, care este un numarator pe 8 biti. În acest mod registrul timer este configurat ca un registru pe 13 biti. Dacă numărul existent în registru devine din toți bitii pe 1 în toți bitii pe 0, este setat flagul de întrerupere pe Timerul 1 (TF1). Intrarea de numărare este validată când  $TR1=1$  și, fie  $GATE=0$  fie  $\overline{INT1}=1$ . Setând  $GATE$  pe 1 se permite timerului să fie controlat de intrarea externă  $\overline{INT1}$ , facilitând măsurarea perioadei de tact.  $TR1$  este un bit de control din registrul TCON aparținând SFR (vezi figura 1.21).  $GATE$  aparține registrului SMOD. Cei 13 biti ai registrului constau din 8 biti din TH1 și 5 biti din TL1. Cei 3 biti superiori ai TL1 sunt nedeterminați și trebuie ignorați. Setarea flagului de execuție ( $TR1$ ) nu re setează conținutul registrului timer.
- b. **Modul 1** este identic cu modul 0, exceptând faptul că registrul timer rulează cu toți cei 16 biti ai săi.
- c. **Modul 2** configurează registrul timer ca un numarator pe 8 biti (TL1) cu reîncărcare automată. Depășirea din TL1 nu doar setează TF1 dar și reîncarcă TL1 cu conținutul lui TH1, care este presetat software. Reîncărcarea lasă TH1 nemodificat. Modul 2 operează în același mod și asupra Timerului/Numaratorului 0.
- d. În **modul 3** Timerul 1 reține numărul. Efectul este identic cu setarea  $TR1$  pe 0. Timerul 0 în modul 3 identifică pe TL0 și TH0 ca două numărătoare separate. TL0 utilizează bitii de control ai Timerului 0: **C/T**, **GATE**, **TR0**, **INT0** și **TF0**. TH0 este fixat (blocat) într-o funcție timer (numărare a ciclilor masina) ce are ca argumente pe  $TR1$  și  $TF1$  din Timerul 1. Astfel, TH0 controlează și întreruperea de Timer 1. Modul 3 este furnizat pentru aplicații care necesită timere/numărătoare ce depășesc 8 biti. Cu Timerul 0 în modul 3 de operare, microcontrollerul 80C51 simulează trei timere/numărătoare. Când Timerul 0 este în modul 3, Timerul 1 poate fi pornit/oprit prin comutarea sa în/din modul 3, sau poate fi folosit de către portul serial ca generator de rate de transfer, sau în orice aplicație care nu necesită o întrerupere.



**Figura 1.21.** Registrul de control al cicuitelor Timer/Numarator (TCON)

## 1.4. MAGISTRALA DE INTERCONECTARE – I<sup>2</sup>C

I<sup>2</sup>C, magistrala bidirectionala pe doua fire, a fost dezvoltata de catre compania Philips, pentru eficientizarea (maximizarea performantei hardware si respectiv simplitatea circuitelor) controlului interconectarii circuitelor. Toate dispozitivele compatibile cu magistrala I<sup>2</sup>C contin o interfata implementata în cip care permite tuturor dispozitivelor de acest gen sa comunice între ele prin respectiva magistrala. Acest concept de proiectare rezolva multe probleme de interfatare ce apar în proiectarea circuitelor de control digital. El se remarca prin simplitate si eficienta, caracteristici deosebit de apreciate în controlul industrial al proceselor tehnologice.

### Caracteristicile magistralei de interconectare

- Necesita doar doua linii de magistrala (o linie seriala de date – SDA, si o linie seriala de ceas – SCL).
- Fiecare dispozitiv conectat la magistrala este software adresabil printr-o adresa unica si în fiecare moment exista o relatie simpla de tip *master / slave*.
- Este o magistrala *multimaster* care include detectia coliziunilor si arbitrarea acestora pentru a preveni inconsistenta datelor în cazul în care

doua sau mai multe dispozitive master initiaza simultan transferul de date.

- Pe magistrala seriala de date, pe 8 biti, au loc transferuri bidirectionale de date cu viteze pâna la 100kbit / s în mod standard sau pâna la 400kbit / s în mod rapid (fast).
- Filtrele implementate în cip elimina zgomotele datorate diafoniilor, reflexiilor, etc (spike-uri) de pe linia de date pentru pastrarea integritatii datelor.
- Numarul de circuite care pot fi conectate la aceeasi magistrala este limitat doar de capacitatea maxima a respectivei magistrale, anume de 400pF.

Avantajele proiectantului constau în facilitatea oferita de circuitele integrate interconectate prin magistrala I<sup>2</sup>C, privind trecerea rapida de la organigrama cu blocuri functionale la prototip. Circuitele integrate (IC – Integrated Circuits) sunt conectate la magistrala I<sup>2</sup>C fara o interfata suplimentara externa, permitând modificarea sau îmbogatirea sistemului prototip simplu prin conectarea sau deconectarea de la magistrala (sisteme de dezvoltare).

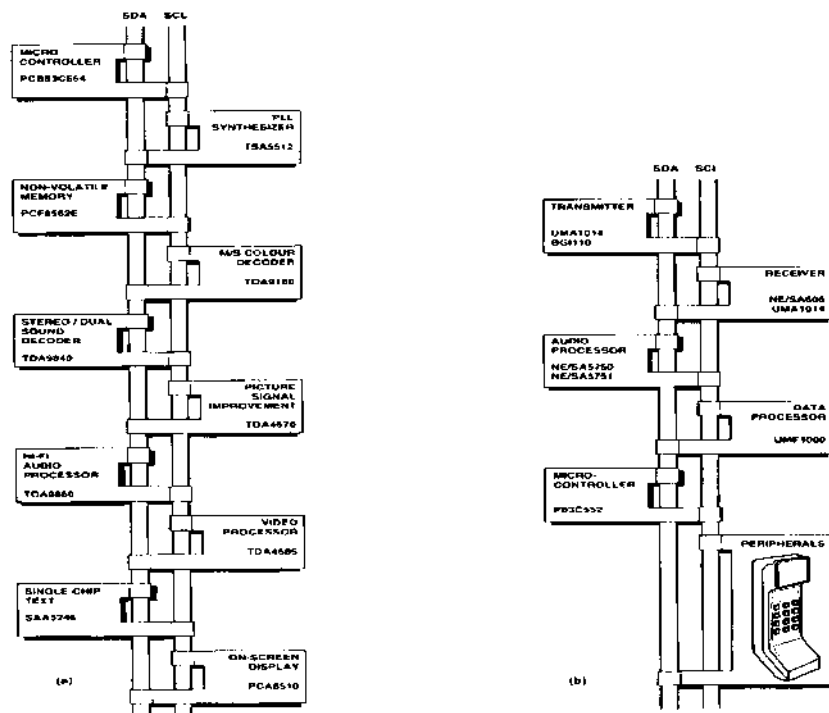


Figura 1.22. Aplicații utilizând magistrala I<sup>2</sup>C

Figura 1.22 ilustreaza în mod intuitiv doua aplicatii utilizând magistrala de interconectare I<sup>2</sup>C.

### **Caracteristicile circuitelor integrate compatibile cu magistrala I<sup>2</sup>C**

- Blocurile functionale din organigrama corespund cu circuitele integrate actuale.
- Nu este necesara proiectarea interfetei la magistrala deoarece interfata I<sup>2</sup>C este deja integrata în cip.
- Adresarea integrata si protocolul de transfer de date permite sistemului sa fie definit complet din punct de vedere software.
- Aceleasi tipuri de IC - uri pot fi des folosite în mai multe aplicatii diferite.
- Timpul de proiectare reduce durata procesului de familiarizare a proiectantului cu cele mai frecvent folosite blocuri functionale, reprezentate de circuitele integrate compatibile cu magistrala I<sup>2</sup>C.
- Circuitele integrate pot fi adaugate sau înlaturate din sistem fara a afecta celelalte circuite conectate la magistrala ( asadar caracteristici de modularizare si toleranta la defectari).
- Depanarea disfunctionilor se poate realiza *pas cu pas*.
- Timpul de dezvoltare software poate fi redus prin asamblarea unor biblioteci cuprinzând module software refolosibile.

Circuitele integrate compatibile cu magistrala I<sup>2</sup>C, de tip CMOS, ofera proiectantului proprietati speciale, atractive pentru echipamentele portabile si sistemele alimentate de baterie. Ele se caracterizeaza prin:

- Consum redus de energie electrica.
- Imunitate ridicata la zgomot.
- Suporta variatii largi de tensiune.
- Suporta variatii mari de temperatura.

### **Avantajele fabricantului de circuite integrate compatibile cu magistrala I<sup>2</sup>C**

- ✓ Magistrala I<sup>2</sup>C este compusa din doua fire simple, fapt ce minimizeaza interconexiunile si fac ca circuitele integrate sa aiba un numar redus de pini.
- ✓ Protocolul de magistrala I<sup>2</sup>C elimina necesitatea unui decodor de adrese.
- ✓ Capacitatea de multimaster a magistralei I<sup>2</sup>C permite testarea rapida si alinierea echipamentului utilizatorului prin conexiuni externe la un computer printr-un program ( eventual scris în asamblare).
- ✓ caracteristica a magistralei I<sup>2</sup>C, apreciata atât de catre proiectanti cât si de catre fabricanti, este aceea ca, natura simpla, bazata pe doar doua fire si

capabilitatea adresarii software, fac din I<sup>2</sup>C o platforma ideala pentru magistrala ACCESS.bus (vezi figura 1.27). Aceasta reprezinta o alternativa, din punct de vedere cost / performanta, pentru interfata RS – 232C de conectare a perifericelor la un calculator gazda printr-un conector simplu având patru pini.

### **Specificatii privind magistrala I<sup>2</sup>C**

Pentru aplicatii de control digital pe 8 biti, cum sunt cele care necesita microcontrollere, se stabilesc criteriile principale de proiectare, astfel:

- ⇒ Un sistem complet consta, de regula, din cel putin un microcontroller, memorii si alte dispozitive periferice cum ar fi extensiile de porturi de intrare / iesire.
- ⇒ Costul interconectarii diverselor dispozitive trebuie sa fie minim.
- ⇒ Un sistem care executa o functie de control nu necesita un transfer rapid de date.
- ⇒ Eficienta globala depinde de dispozitivele alese si de natura structurii magistralei de interconectare.

Pentru realizarea unui sistem care sa satisfaca aceste criterii, este nevoie de o structura de magistrala seriala. Desi, magistralele seriale nu au aceleasi capabilitati ca cele paralele, ele necesita mai putine fire si mai putini pini din partea circuitelor integrate ce se vor conecta. O magistrala însa, nu reprezinta numai “niste sârme” de interconectare, ci întruchipeaza toate formatele si procedurile de comunicare din interiorul sistemului. Comunicatiile între dispozitive prin intermediul magistralei I<sup>2</sup>C trebuie realizate prin protocoale clar definite si complete, pentru a se evita toate posibilitatile de confuzie, pierderi de date si blocaje informationale. Dispozitivele rapide trebuie sa poata comunica cu dispozitivele lente. Sistemul nu trebuie sa fie dependent de dispozitivele conectate la el, altfel nu ar fi posibile eventuale modificari si îmbunatatiri. O procedura trebuie sa decida care dispozitiv va controla magistrala, si când. În cazul interconectarii dispozitivelor cu rate de ceas diferite, trebuie specificat sursa semnalului de ceas al magistralei.

### **Conceptul de magistrala de interconectare**

Cele doua fire (SDA - date si SCL - ceas) transporta informatie între dispozitivele conectate la magistrala. Fiecare dispozitiv este caracterizat de o adresa unica – daca este microcontroller, driver LCD, memorie, interfata pentru tastatura – si pot opera fie ca *emitor* fie ca *receptor*, dependenta de functia dispozitivului. Evident ca un driver LCD este doar receptor, în timp ce memoria poate fi fie receptor fie emitor. În timpul realizarii

transferurilor de date, dispozitivele pot fi considerate ca master sau slave (vezi tabelul 1.12).

Term	Description
Transmitter	The device which sends the data to the bus
Receiver	The device which receives the data from the bus
Master	The device which initiates a transfer, generates clock signals and terminates a transfer
Slave	The device addressed by a master
Multi-master	More than one master can attempt to control the bus at the same time without corrupting the message
Arbitration	Procedure to ensure that, if more than one master simultaneously tries to control the bus, only one is allowed to do so and the message is not corrupted
Synchronization	Procedure to synchronize the clock signals of two or more devices

Tabelul 1.12.

### Definitii privind terminologia de magistrala I<sup>2</sup>C

Un dispozitiv este considerat *master* daca initiaza un transfer de date pe magistrala si genereaza semnalul de ceas pentru a permite transferul. În acel moment, orice dispozitiv adresat e considerat *slave*. Întrucât magistrala I<sup>2</sup>C este de tip multimaster rezulta ca pot fi conectate la aceasta mai mult de un dispozitiv capabil de a controla magistrala. Pentru a evita “haosul” care se poate instaura în urma unor astfel de evenimente se introduce o **procedura de arbitrare**. Aceasta se bazeaza pe conexiunea **SI LOGIC** (AND) a tuturor interfetelor I<sup>2</sup>C aferente dispozitivelor conectate la magistrala I<sup>2</sup>C. Semnalul de ceas în timpul arbitrării este o combinatie sincronizata a semnalelor de ceas generate de dispozitivele master folosind conexiunea **SI LOGIC** asupra liniei SCL. Fireste, generarea semnalelor de ceas pe magistrala I<sup>2</sup>C este întotdeauna responsabilitatea dispozitivului master. Pentru transferarea datelor pe magistrala, fiecare din dispozitivele master genereaza propriul sau semnal de ceas. Acest semnal poate fi alterat doar datorita unui dispozitiv slave lent, care întârzie semnalul activ de ceas sau de catre un alt dispozitiv master când se realizeaza arbitarea. Un dispozitiv master poate starta transferul doar daca magistrala este libera.

### Transferul datelor

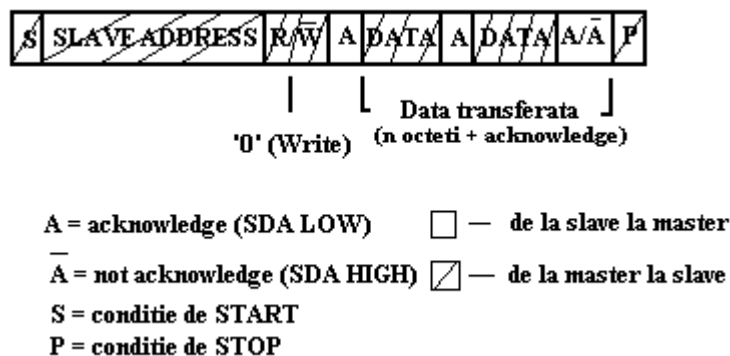
Pe durata unui transfer de date, apar doua situatii unice definite drept conditii de **START** si **STOP**. O tranzitie din stare HIGH în stare LOW a liniei de date (SDA), în timp ce semnalul de ceas (SCL) este în stare HIGH, indica o conditie de START. O tranzitie din LOW în HIGH a liniei de date, în timp ce semnalul de ceas ramâne în stare HIGH, defineste o conditie de STOP. Cele doua conditii de START si STOP sunt generate întotdeauna de



catre dispozitivul master. Magistrala se considera a fi ocupata dupa o conditie de START si libera dupa o conditie de STOP. Detectia celor doua conditii de catre dispozitivele conectate la magistrala este simpla daca ele încorporeaza o interfata hardware necesara.

Fiecare data depusa pe linia de date (SDA) a magistralei I<sup>2</sup>C trebuie sa aiba lungimea de 8 biti. Numarul de octeti transmisi per transfer este nelimitat. Fiecare octet trebuie sa fie urmat de un bit de recunoastere (*Acknowledge*). Datele sunt transferate cu cel mai semnificativ bit întâi. Daca receptorul nu poate receptiona complet octetul de date, deoarece se afla în executia unui alt proces (ex: deservirea unei întreruperi), acesta retine semnalul de ceas SCL în stare LOW fortând intrarea transmitatorului în stare de asteptare (wait). Transferul de date continua de îndata ce receptorul este gata pentru a primi un alt octet de date si elibereaza semnalul de ceas. În unele cazuri, este permisa folosirea unor formate de date diferite fata de formatul I<sup>2</sup>C – bus (de exemplu, pentru dispozitive compatibile CBUS). Un mesaj care starteaza cu o adresa CBUS poate fi terminat prin generarea unei conditii de STOP, chiar în timpul transmisiei unui octet, în acest caz, nefiind generat nici un bit de recunoastere.

Transferul de date trebuie sa cuprinda obligatoriu bitul de recunoastere. Bitul de Acknowledge este transmis de slave (vezi figura 1.23).



**Figura 1.23.** Dispozitivul Master – emitator adreseaza un Slave – receptor cu o adresa pe 7 biti

Emitatorul master elibereaza linia de date (SDA), aflata în stare HIGH, pe durata respectivului impuls de tact. Totodata, receptorul trebuie sa determine trecerea liniei de date în stare LOW. Fiecare bit de date este sincronizat cu un impuls de ceas (vezi figura 1.24).

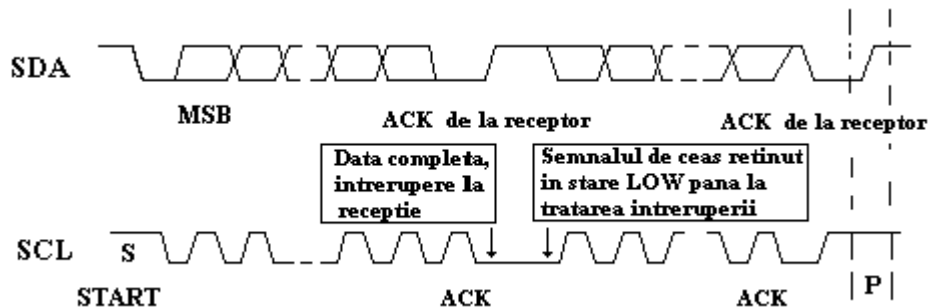
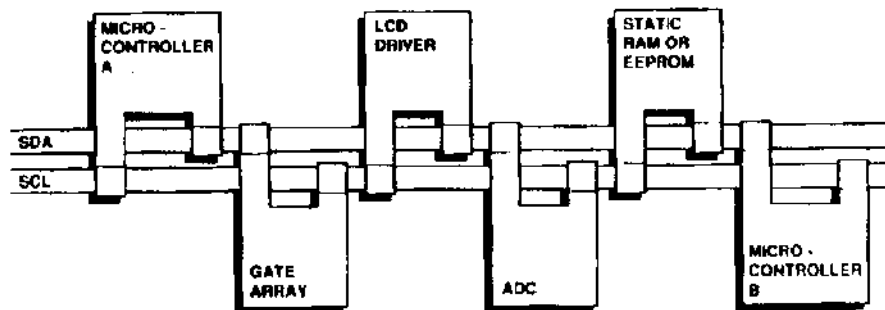


Figura 1.24. Transferul de date pe I<sup>2</sup>C

De regula, un receptor care a fost adresat este obligat sa genereze bitul de recunoastere (acknowledge) dupa fiecare octet receptionat, exceptie facând mesajele care încep cu o adresa CBUS. Când un **slave – receptor** nu recunoaste adresa de slave (de exemplu nu poate receptiona deoarece executa o functie în timp real), linia de date trebuie lasata în stare HIGH de catre slave. Dispozitivul master poate genera atunci o conditie de STOP care va întrerupe transferul. Daca un **slave – receptor** recunoaste adresa, dar mai târziu în transfer nu mai poate receptiona nici o data, dispozitivul master trebuie sa întrerupa din nou transferul. Acest lucru este indicat de catre slave prin generarea unui bit de recunoastere negat la finele primului octet ce urmeaza. Slave-ul lasa linia de date în stare HIGH iar dispozitivul master genereaza conditia de STOP.

Daca un **master – receptor** este implicat într-un transfer, el trebuie sa semnaleze sfârșitul octetilor de date **emitorului – slave**, prin faptul de a nu genera un bit de acknowledge dupa ultimul octet trimis de slave. Slave-ul emitor trebuie sa elibereze linia de date pentru a permite dispozitivului master sa genereze conditia de STOP.

Ca dispozitive master, de regula, sunt utilizate microcontrollere. Presupunem urmatorul exemplu, de transfer de date între doua microcontrollere conectate la magistrala I<sup>2</sup>C (vezi figura 1.25). Considerând transferul datelor în format cu 7 biti de adresa se vor exemplifica doua situatii: una în care dispozitivul master este emitor si slave-ul receptor si alta în care dispozitivul master este receptor iar slave-ul emitor. Dupa conditia de start S, se transmite adresa unui slave pe 7 biti. Aceasta este urmata de un bit de directie ( $\overline{R/W}$ ) (vezi figura 1.23). Daca acesta este '0' indica o scriere de date (WRITE) iar succesiunea de mesaje este urmatoarea:



**Figura 1.25.** Configuratie de magistrala I<sup>2</sup>C folosind doua microcontrollere

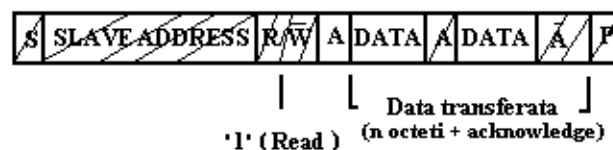
1. Presupunem ca microcontrollerul A doreste sa trimita informatie microcontrollerului B.

- ✓ Microcontrollerul A (master) apeleaza (adreaseaza) microcontrollerul B (slave).
- ✓ Microcontrollerul A (emitator) transmite data microcontrollerului B (receptor).
- ✓ Microcontrollerul A încheie transferul.

Daca bitul de directie este '1' el indica o cerere de date (READ), succesiunea de mesaje fiind (vezi figura 1.26):

2. Presupunem ca microcontrollerul A doreste sa receptioneze informatie de la microcontrollerul B.

- ✓ Microcontrollerul A (master) se adreseaza microcontrollerului B (slave).
- ✓ Microcontrollerul A (master-receptor) primeste data de la microcontrollerul B (slave-emitator).
- ✓ Microcontrollerul A încheie transferul.



A = acknowledge (SDA LOW)    ☐ — de la slave la master  
 $\bar{A}$  = not acknowledge (SDA HIGH)    ☒ — de la master la slave  
 S = conditie de START  
 P = conditie de STOP

**Figura 1.26.** Dispozitivul Master-receptor citeste datele trimise de Slave-ul - emitator imediat dupa primul octet

Chiar si în aceasta situatie, dispozitivul master va fi A, care va genera semnalul de ceas si va încheia transferul. Transferul de date se încheie întotdeauna printr-o conditie de stop **P** generata de catre master. Totusi, daca un dispozitiv master doreste sa comunice pe magistrala, el poate genera o conditie repetata de start **Sr** si adreseaza un alt slave fara a genera întâi o conditie de stop.

## 1.5. MAGISTRALA ACCESS.BUS

Reprezinta magistrala de conectare a dispozitivelor accesorii la un calculator gazda, un standard introdus de catre compania Digital Equipment Corporation (actualmente înglobata în Compaq). Accesoriile sunt dispozitive periferice, de intrare / iesire, având o viteza relativ redusa fata de cea a calculatorului gazda. Ca exemple de dispozitive accesorii amintim: tastatura, scanere, cititoare de cod de bare, cititoare de cartele magnetice (card), imprimanta, convertoare de semnal, aplicatii de control în timp real etc. Topologia de conectare a dispozitivelor accesorii este de tip magistrala. Prin intermediul magistralei ACCESS pot fi conectate pâna la 125 de dispozitive periferice la un calculator gazda. Lungimea cablului de conectare poate fi pâna la 8 m. Viteza maxima de transfer pe magistrala este de 80 Kbit/s.

Magistrala ACCESS ofera avantaje atât utilizatorilor cât si dezvoltatorilor de sisteme si dispozitive periferice. Un calculator gazda necesita doar un port hardware pentru conectarea la un numar de dispozitive. Trasaturile comune în metodele de comunicare, pentru un numar mare de diverse tipuri de dispozitive, conduc la economii în dezvoltarea hardware si software.



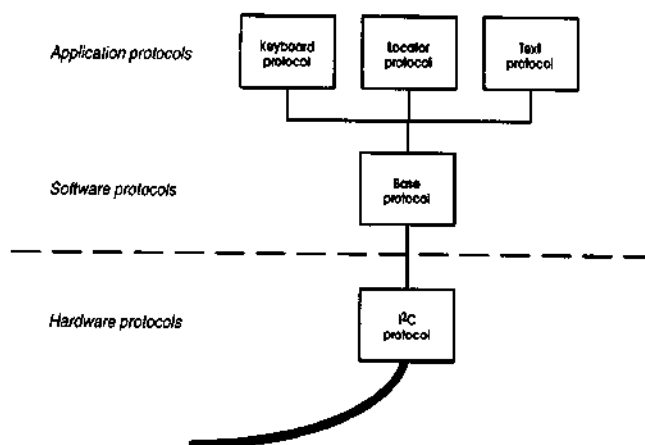
**Figura 1.27.** Magistrala ACCESS.bus – o alternativa cost/performanta interfetei RS-232C

## Nivelul hardware al magistralei ACCESS.bus

La nivel hardware, magistrala ACCESS se bazează pe principiile magistralei seriale de interconectare a circuitelor integrate ( $I^2C$ ), prezentată succint anterior. Mediul fizic pentru magistrala ACCESS este compus dintr-un cablu cu patru fire izolate între ele: semnalul de date (SDA), semnalul de ceas (SCL), alimentarea (+5V) și masa (GND). Dispozitivele conectate la magistrala pot fi înlanțuite prin intermediul a doi conectori. Dispozitivele portabile pot avea un cablu de conectare la magistrala principală prin intermediul unui conector în "T". Semnalele seriale de ceas și date (SCL și SDA) lucrează împreună pentru a defini informația transferată pe magistrală. Calculatorul gazdă alimentează prin intermediul liniei de +5V, asigurând un curent minim de 50 mA, dispozitivele periferice. Totodată acestea pot fi alimentate și de o sursă externă.

## Nivelele ierarhice ale protocolului de magistrala ACCESS.bus

Protocolul de comunicație ACCESS.bus este compus din trei nivele: protocolul  $I^2C$ , protocolul de **bază** și protocolul de **aplicație**.



**Figura 1.28.** Nivelele ierarhice ale protocolului de magistrala ACCESS.bus

La nivelul cel mai de jos, apropiat de hardware, disciplina de bază a magistralei ACCESS este definită ca un subset al protocolului de magistrală  $I^2C$ . **Protocolul  $I^2C$**  definește o magistrală simetrică de tip multimaster, în care procesul de arbitraj între dispozitivele master se efectuează fără a pierde datele.

Nivelul de protocol următor este **protocolul de bază**. Acest nivel este comun tuturor tipurilor de dispozitive conectate prin magistrala ACCESS și

stabileste natura asimetrica de interconectare între calculatorul gazda si un numar de dispozitive periferice. Calculatorul gazda are un rol special ca manager al magistralei. Comunicatia de date se face întotdeauna între calculator si dispozitivele periferice, niciodata între doua periferice. Daca protocolul I<sup>2</sup>C asigura rol de conducator al unei tranzactii pe magistrala fie emitorului fie receptorului, protocolul de comunicatie ACCESS.bus asigura rol de master exclusiv emitorului, în timp ce rolul de slave e atribuit exclusiv receptorului. La momente diferite de timp, atât calculatorul gazda cât si dispozitivele periferice pot fi si master / emitor si slave / receptor.

Protocolul de baza al ACCESS.bus defineste formatul mesajului împachetat, transferat prin magistrala ACCESS, care reprezinta o tranzactie pe magistrala I<sup>2</sup>C, însoțita de o semantica suplimentara, incluzând sume de control. În plus, protocolul de baza defineste un set de sapte controale si tipuri de mesaje de stare care sunt folosite în procesul de configurare. Cele opt mesaje si parametrii aferenti care definesc protocolul de comunicatie ACCESS.bus sunt:

- a. Mesaje de la calculatorul gazda la dispozitivele periferice:
  1. Reset ().
  2. Identificarea cererii ().
  3. Asignarea adresei (ID string, new addr) respectivului dispozitiv.
  4. Cereri de capacitate (offset) – (capabilities request) provenite de la un dispozitiv.
- b. Mesaje de la dispozitivele periferice la calculatorul gazda:
  1. Attentionare (status).
  2. Identificarea raspunsului (ID string).
  3. Raspunsuri de capacitate (offset, data frag).
  4. Eroare de interfata ().

Doua caracteristici unice ale procesului de configurare sunt autoadresarea si conectarea rapida la cald. Autoadresarea se refera la modul în care dispozitivelor le sunt asignate adrese de magistrala unice în procesul de configurare fara a fi nevoie pentru a seta jumperi sau comutatori ai dispozitivelor. Conectarea rapida la cald se refera la abilitatea de atasare sau deconectare a dispozitivelor, în timp ce sistemul functioneaza fara a fi nevoie de restartarea acestuia.

Pe nivelul cel mai înalt privind protocolul de comunicatie ACCESS.bus se afla **protocolul aplicatie**. Acesta defineste semantica mesajelor specifice tipurilor functionale particulare de dispozitive. Tipuri diferite de dispozitive necesita protocoale de aplicatie diferite. Acest tip de protocol a fost definit pentru trei clase de dispozitive: **tastatura**, **dispozitive de transfer text** si **dispozitive de localizare** (locators).

Protocolul de tastatura defineste mesajele standard generate în urma apasarii tastelor si mesaje necesare controlului tastaturii. Protocolul încearca sa defineasca cel mai simplu set de functii din care poate fi construita interfata standard de tastatura.

Protocolul aferent dispozitivelor localizatoare defineste un set de mesaje standard generate în urma miscarii acestor dispozitive sau activarii unor chei întrerupatoare (comutatoare) pentru dispozitivele de pozitionare. Dispozitive mai complexe pot fi modelate ca o combinatie dintre dispozitive de baza sau pot asigura propriul lor driver.

Protocolul de comunicatie prin dispozitive cu transfer de text intentioneaza sa furnizeze un mod simplu de transmitere a datelor în format caracter sau binar, la si de la dispozitive orientate fisier, cum sunt cititoare în cod de bare sau modem-uri. Modelul de fisier secvential în format caracter serveste ca numitor comun pentru conectarea dispozitivelor interfata la RS-232C.

Un avantaj major în proiectarea dispozitivelor este acela ca ele pot împarti software-ul specific unui dispozitiv, atât la nivel firmware (rezident în dispozitiv) cât si la nivel software (rezident în driver), necesar sistemului de operare al calculatorului gazda pentru a permite programelor de aplicatie sa acceseze respectivele dispozitive. Ca si concluzie, toate cele trei nivele de protocol necesita inteligenta la nivel de dispozitiv. Nivelele de protocol joase ale acestui firmware sunt comune mai multor dispozitive. Nivelele de protocol ridicate sunt specifice functie de dispozitiv sau aplicatie.

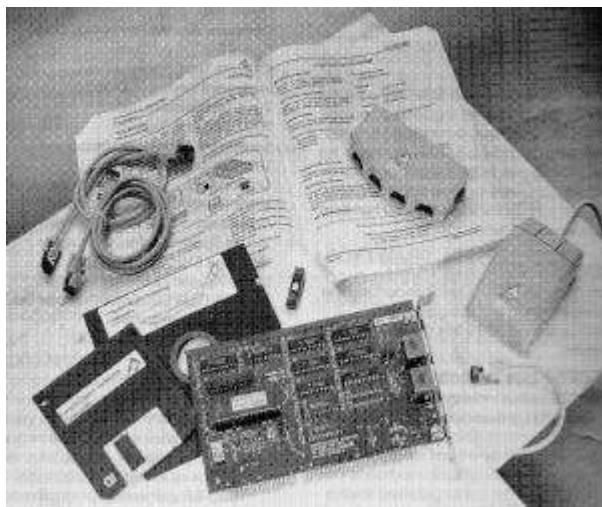
### **Kit-ul de dezvoltare ACCESS.bus**

ACCESS.bus este un standard industrial deschis ce asigura un mod simplu si uniform de conectare a maxim 125 de dispozitive la un singur port al unui computer. Caracteristicile principale ar fi: rata de transfer a datelor 100.000 biti / s, arbitrare hardware, reconfigurare dinamica, suporta diverse drivere de dispozitiv.

Caracteristicile kit-ului de dezvoltare software sunt:

- ✓ Satisface în întregime standardul ACCESS.bus.
- ✓ Pachetul hardware include:
  - ⇒ Controller-ul de placa ACCESS.bus – 125I PC / AT.
  - ⇒ Un mouse ACCESS.bus.
  - ⇒ priza extensoare.
  - ⇒ Cabluri ACCESS.bus (2 ft – picioare lungime si 4 ft – picioare lungime)
  - ⇒ Microcontroller Philips 87C751 (în mare parte compatibil 80C51).
- ✓ Pachetul software complet contine:
  - ⇒ Microcod (MC) înscris pe placa aferent controller-ului principal.

- ⇒ Program manager, ce functioneaza ca un program TSR (terminate and stay resident) sub DOS.
- ⇒ Program de monitorizare si control al magistralei ACCESS.bus.
- ⇒ Cod sursa pentru driver-ele software aferent atât calculatorului gazda cât si dispozitivelor periferice.
- ⇒ Cod sursa pentru nivelul aplicatie al protocolului ACCESS.bus.



**Figura 1.29.** Kit-ul de dezvoltare ACCESS.bus – accesorii si software complet

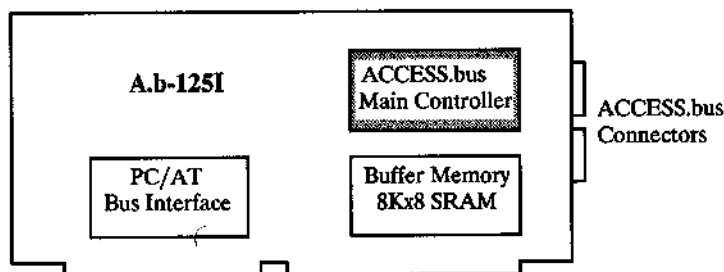
### **Controller-ul de placa ACCESS.bus – 125I PC / AT**

Se bazeaza pe microcontrollerul Philips 8xC654 cu interfata I<sup>2</sup>C. Interfata ACCESS.bus controleaza o retea de tip ACCESS.bus. Este realizata din conectori alimentati la +5V si 0.75A. Dimensiunea retelei ACCESS.bus este de maxim 125 de dispozitive. Distanța fizica dintre dispozitive este maxim 25 ft (picioare, un picior ~ 0.3m). Interfata cu sistemul IBM PC / AT sau compatibil, se face folosind un mecanism PC / AT de intrare / iesire programabil, pe 16 biti. Adresele de I / O selectabile de utilizator sunt:

- ⇒ De la 0x250 la 0x25F
- ⇒ De la 0x260 la 0x26F
- ⇒ De la 0x350 la 0x35F.

Întregerile selectabile de utilizator sunt: IRQ10, IRQ11 si IRQ12. Pe placa se afla un buffer de memorie de 8 ko SRAM (vezi figura 1.30).





**Figura 1.30.** Controller-ul de placa ACCESS.bus – schema bloc

### **Pachetul software aferent kit-ului de dezvoltare ACCESS.bus**

Microcodul (MC) înscris pe placa este un pachet de programe **în timp real** ce controlează operațiilor diverselor dispozitive conectate la ACCESS.bus. Programul manager rulează ca un program rezident TSR (Terminate and Stay Resident) sub sistemul de operare DOS sau WINDOWS, comunică cu microcodul MC și cu variate drivere de dispozitiv. El rutează mesajele de aplicație și control între dispozitivele fizice și driverele lor software. Programul monitor, este bazat pe meniuri, ușor accesibile utilizatorului, afișează mesajele selectate de utilizator și permite acestuia să controleze dispozitivele specifice. La alimentarea plăcii este realizat un test complet de diagnosticare proprie (memorie, periferice aferente). Diagnosticarea se realizează sub controlul programului monitor.

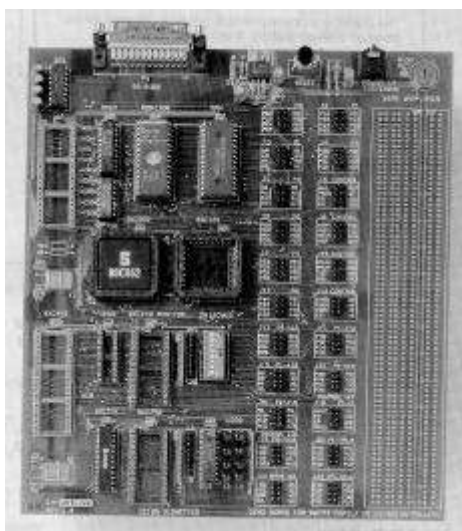
### **Protocolul CAN (rețea de control)**

CAN este un protocol de multiplexare al instalațiilor electrice dezvoltat de firma Bosch pentru aplicații industriale automatizate, mașini și utilaje, echipamente medicale, echipamente de control în construcții. Protocolul este atractiv pentru utilizarea într-o varietate de aplicații deoarece reprezintă un instrument puternic de detecție a erorilor. Poate fi utilizat cu succes în medii cu nivel de zgomot ridicat sau critic. CAN este foarte flexibil în termenii transmisiei de date și schemei de conectare și poate fi ușor adaptat la majoritatea aplicațiilor.

Compania Philips oferă o varietate de dispozitive care suportă protocolul CAN, cum ar fi: dispozitive “stand-alone” (de sine - statatoare) dar și microcontrollere cu interfața CAN integrată. Dintre acestea amintim: 82C200 – controller stand alone, 82C150 (dispozitive periferice legate serial la CAN) și 82C250 (controller de emisie – recepție legat la CAN). Exemple de microcontrollere care au integrat o interfață CAN sunt 8xC592 și 8x598.

## 1.6. PLACA DE DEZVOLTARE DB – 51

DB-51 este o placa de dezvoltare / proiectare a unui sistem de înalta performanta dedicat familiei de microcontollere Philips 80C51. DB-51 reprezinta un instrument flexibil, usor de folosit care permite utilizatorului sa construiasca un prototip primar, sa-l analizeze si sa-l depaneze, sa faca schimbari asupra sa si sa continue depanarea. Îmbunatatirea deciziilor de proiectare se face folosind DB-51 pentru a verifica si testa avantajele câtorva microcontrollere diferite. De asemenea, placa de dezvoltare DB-51 reprezinta un instrument ideal de antrenare pentru familiarizarea utilizatorului cu proiectarea, folosind arhitectura 80C51. De remarcat ca, DB-51 nu intentioneaza totusi sa înlocuiasca un sistem de emulare complet în proiectarea complexa cu microcontrollere.



**Figura 1.31.** Placa de dezvoltare DB-51

### Caracteristici de baza

- Suporta majoritatea microcontrollerelor derivate ale familiei Philips 80C51 (8x31/51, 8x32/52, 8xC31/51, 8xC32/52, 8xC652, 8xC654, 8xC851, 8xC550, 8xC552, 8xC562, 8xC451, 8xC528 si altele cu memorie externa adresabila si suport UART).
- Se conecteaza prin serial la un calculator IBM – PC sau la alte calculatoare gazda compatibile.

- Sistemul de memorie al DB-51 consta din 32 ko RAM. În acest spațiu se încarcă și modifică programele utilizator.
- Contine puncte de întrerupere software (breakpoint). Acestea permit executia programelor în timp real până când opcode-ul instrucțiunii, pe care s-a setat punctul de întrerupere, este citit de la respectiva adresa.
- Examinează și alterează conținutul registrilor, memoriei RAM și porturile.
- Contine un debugger simbolic, compatibil cu link-editorul de fișiere obiect. DB-51 permite depanarea simbolică pas cu pas a programelor, atât în limbaj de asamblare cât și în limbaje de nivel înalt (PLM, C). Debugger-ul folosește simboluri continute în fișiere absolute (complete), generate de majoritatea programelor de relocare și link-editare. Debuggerul obișnuiește să încarce un program, să-l execute în timp real sau să simuleze mediul software, să programeze microcontrollerul sau să execute multe alte funcții. Programele pot fi executate în mod continuu (**run**) sau pas cu pas (**trace**). Depanarea poate fi făcută folosind linii de program scrise în limbaj de nivel înalt sau instrucțiuni în asamblare. Debuggerul trebuie să permită cunoașterea permanentă (prin intermediul unei ferestre) a stării programului din diverse perspective, cum ar fi: a variabilelor și a valorilor lor, a punctelor de întrerupere, a fișierului sursă, a registrelor procesorului, a locațiilor memoriei, a registrelor periferice. Variabilele programului pot fi inspectate, iar valorile aferente lor pot fi reținute pe toată durata rularii programului. De asemenea, valoarea curentă a unei variabile poate fi înlocuită cu una specificată. Pentru depanarea simbolică a programelor sursă, trebuie ca acestea să fie prevăzute (pregătite) cu informația de depanare (numărul fiecărei linii de cod, referințe globale și locale, etichete etc). Pregătirea unui program pentru depanare se realizează în etapele:
  1. *Scrierea* codului sursă cu ajutorul unui **Editor**.
  2. *Compilarea* surselor de către un **Asamblor** sau un **Cross-compiler** de limbaje de nivel înalt.
  3. *Localizarea și link-editarea* fișierelor obiect cu programul **Intel RL51** sau cu unul asemănător, program care generează un format compatibil cu cel al procesorului Intel.
- Reprezintă un analizor de performanță.
- Încarcă și descarcă fișiere în format ASCII și obiect.
- Se furnizează împreună cu un ghid de utilizare, dotat cu exemple și aplicații destinate familiarizării utilizatorului cu arhitectura 8x51, programarea și utilizarea plăcii de dezvoltare / proiectare DB-51.
- Limitări:

- ⇒ Programul monitor foloseste partea inferioara a celor 32 ko de memorie.
- ⇒ Standardul UART (Universal Asynchron Receiver / Transmitter) este folosit la comunicatia cu PC-ul si astfel, nu este în mod normal disponibil programului utilizator.
- ⇒ Raspunsul la întreruperi este întârziat usor prin redirectarea de la programul monitor la programul uilizator.
- ⇒ Folosirea circuitelor numaratoare de tip “**watchdog**” sau “**power-down**” pentru avertizarea împotriva caderii sursei de alimentare, sau modurile de operare lente, temporizatoare sunt limitate datorita interactiunii cu programul monitor.
- Software-ul utilizator furnizat de placa DB-51 este caracterizat atât de un program bazat pe meniuri cât si de o interfata software bazata pe linia de comanda. Asamblorul si dezasamblorul sunt furnizate împreuna, cu posibilitati de încarcare si descarcare a fisierelor în format ascii sau obiect.
- Setul de comenzi acceptate:  
 ASM – BIT – BYTE – BREAKPOINT [enable, disable, reset] – CHIP [type] – CLS – CODE – DATA – DASM – DEFAULT – DIR – EVALUATE – EXIT – GO [from, till] – HALT – HELP – HISTORY – LINES – LIST [file] – LOAD [code, symbols] – LOCALS – MODULES – PORTS – PROCEDURES – PUBLICS – RBIT – RBYTE – REGISTERS – RESET – SAVE – SOUND – STATUS – STEP [n] – TIME
- Caracteristicile calculatorului gazda:  
 IBM PC / AT / XT sau compatibile în configuratia 512 ko RAM minim, un disc floppy, o interfata RS – 232 pentru PC, cablu, sistem de operare PC DOS versiunea minim 6.0 .

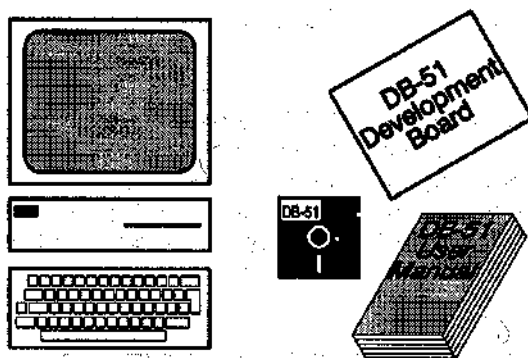


Figura 1.32. Proiectarea folosind placa DB-51

## **2. ARHITECTURA MICROPROCESOARELOR ACTUALE**

---

### **2.1. MODELUL DE MICROPROCESOR SCALAR RISC**

Microprocesoarele RISC (Reduced Instruction Set Computer) au aparut ca o replica la lipsa de eficienta a modelului conventional de procesor de tip CISC (Complex Instruction Set Computer – inamicii conceptului RISC spuneau Complete Instruction Set Computer). Multe dintre instructiunile masina ale procesoarelor CISC sunt folosite rar în softul de baza, cel care implementeaza sistemele de operare, utilitarele, translatoarele, etc. Lipsa de eficienta a modelului conventional CISC a fost pusa în evidenta prin anii '80 de arhitecturi precum INTEL 80x86, MOTOROLA 680x0, iar in domeniul sistemelor în special de catre arhitecturile VAX-11/780 si IBM - 360,370, cele mai cunoscute la acea vreme. Modelele CISC sunt caracterizate de un set foarte bogat de instructiuni - masina, formate de instructiuni de lungime variabila, numeroase moduri de adresare deosebit de sofisticate, lipsa unei interfete hardware – software optimizate etc. Evident ca aceasta complexitate arhitecturala are o repercursiune negativa asupra performantei masinii.

Din punct de vedere istoric, primele microprocesoare RISC s-au proiectat la IBM si respectiv la Universitatea Berkeley, USA (1981). Spre deosebire de CISC-uri, proiectarea sistemelor RISC are în vedere ca înalta performanta a procesarii se poate baza pe simplitatea si eficacitatea proiectului. Strategia de proiectare a unui microprocesor RISC trebuie sa tina cont de analiza aplicatiilor posibile pentru a determina operatiile cele mai frecvent utilizate, precum si optimizarea structurii hardware în vederea unei executii cât mai rapide a instructiunilor. Dintre aplicatiile specifice sistemelor RISC se amintesc: conducerea de procese în timp real, procesare de semnale (DSP – Digital Signal Processing), calcule stiintifice cu viteza ridicata,

grafica de mare performanta, elemente de procesare în sisteme multiprocesor si alte sisteme cu prelucrare paralela etc.

Caracteristicile de baza ale modelului RISC sunt urmatoarele:

- Timp de proiectare si erori de constructie mai reduse decât la variantele CISC comparabile.
- Unitate de comanda hardware în general cablata, cu firmware redus sau deloc, ceea ce mareste rata de executie a instructiunilor.
- Utilizarea tehnicilor de procesare pipeline a instructiunilor, ceea ce implica o rata teoretica de executie de o instructiune / ciclu, pe modelele de procesoare care pot lansa în executie la un moment dat o singura instructiune (procesoare scalare).
- Memorie sistem de înalta performanta, prin implementarea unor arhitecturi avansate de memorie cache si MMU (Memory Management Unit ). De asemenea contin mecanisme hardware de memorie virtuala bazate în principal pe paginare, ca si sistemele CISC de altfel.
- Set relativ redus de instructiuni simple, majoritatea fara referire la memorie si cu putine moduri de adresare. În general, doar instructiunile LOAD / STORE sunt cu referire la memorie (arhitectura tip LOAD / STORE). La implementarile recente caracteristica de "set redus de instructiuni" nu trebuie înțeleasa add literam ci mai corect în sensul de set optimizat de instructiuni în vederea implementarii aplicatiilor propuse (în special implementarii limbajelor de nivel înalt - C, C++, Pascal, etc.).
- Datorita unor particularitati ale procesarii pipeline (în special hazardurile pe care aceasta le implica), apare necesitatea unor compilatoare optimizate zise si reorganizatoare sau schedulere, cu rolul de a reorganiza programul sursa pentru a putea fi procesat optimal din punct de vedere al timpului de executie.
- Format fix al instructiunilor, codificate în general pe un singur cuvânt de 32 biti, mai recent pe 64 biti (Alpha 21264, IA-64 Merced etc.).
- Necesitati de memorare a programelor mai mari decât în cazul microsistemelor conventionale, datorita simplitatii instructiunilor cât si reorganizatoarelor care pot actiona defavorabil asupra "lungimii" programului obiect.
- Set de registre generale substantial mai mare decât la CISC-uri, în vederea lucrului "în ferestre" (register windows), util în optimizarea instructiunilor CALL / RET. Numarul mare de registre generale este util si pentru marirea spatiului intern de procesare, tratarii optimizate a evenimentelor de exceptie, modelului ortogonal de programare, etc.

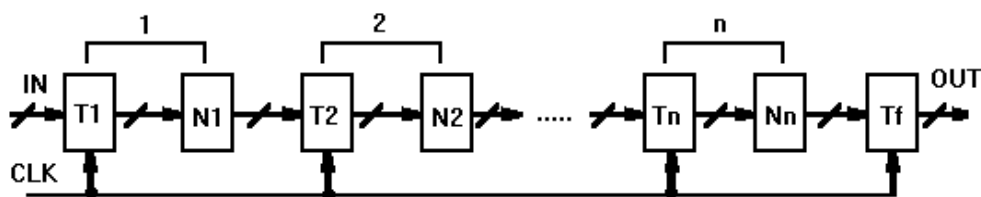
Registrul R0 este cablat la zero în majoritatea implementarilor, pentru optimizarea modurilor de adresare si a instructiunilor [3].

În proiectarea setului de instrucțiuni aferent unui microprocesor RISC intervin o multitudine de considerații dintre care se amintesc:

- a) Compatibilitatea cu seturile de instrucțiuni ale altor procesoare pe care s-au dezvoltat produse software consacrate (compatibilitatea de “sus în jos”, valabilă de altfel și la CISC-uri). Portabilitatea acestor produse pe noile procesoare este condiționată de această cerință care vine în general în contradicție cu cerințele de performanță ale sistemului.
- b) În cazul microprocesoarelor, setul de instrucțiuni este în strânsă dependență cu tehnologia folosită, care de obicei limitează sever performanțele (constrângeri legate de aria de integrare, numărul de pini, cerințe restrictive particulare ale tehnologiei, etc.).
- c) Minimizarea complexității unității de comandă precum și minimizarea fluxului de informație procesor - memorie.
- d) În cazul multor microprocesoare RISC setul de instrucțiuni masina este ales ca suport pentru implementarea unor limbaje de nivel înalt.

Setul de instrucțiuni al unui microprocesor RISC este caracterizat de simplitatea formatului precum și de un număr limitat de moduri de adresare. De asemenea, se urmărește ortogonalizarea setului de instrucțiuni.

Conceptul cel mai important însă în cazul acestor microprocesoare constă în implementarea tehnicii pipeline de procesare a instrucțiunilor. Ideea nu era nouă dar arhitectura RISC definită succint anterior se mapează optimal pe acest concept. Tehnica de procesare pipeline reprezintă o tehnică de procesare paralelă a informației prin care un proces secvențial este divizat în subproces, fiecare subproces fiind executat într-un segment special dedicat și care operează în paralel cu celelalte segmente. Fiecare segment execută o procesare parțială a informației. Rezultatul obținut în segmentul  $i$  este transmis în tactul următor spre procesare segmentului  $(i+1)$ . Rezultatul final este obținut numai după ce informația a parcurs toate segmentele, la ieșirea ultimului segment. Denumirea de pipeline provine de la analogia cu o bandă industrială de asamblare. Este caracteristic acestor tehnici faptul că diversele procese se pot afla în diferite faze de prelucrare în cadrul diverselor segmente, simultan. Suprapunerea procesărilor este posibilă prin asocierea unui registru de încărcare fiecărui segment din pipeline. Registrele produc o separare între segmente astfel încât fiecare segment să poată prelucra date separate (vezi Figura 2.1). În figura 2.1. s-au notat prin  $T_i$  - registrele tampon iar prin  $N_i$  - nivelele de prelucrare (combinatoriale sau secvențiale).



**Figura 2.1.** Structura de procesare tip pipeline.

Procesarea pipeline a instrucțiunilor reprezintă o tehnică de procesare prin intermediul căreia fazele (ciclii) aferente multiplelor instrucțiuni sunt suprapuse în timp. Se înțelege printr-o fază aferentă unei instrucțiuni masina o prelucrare atomică a informației care se desfășoară după un algoritm implementat în hardware (firmware) și care durează unul sau mai mulți tacti. În acest sens se exemplifică: faza de aducere (fetch) a instrucțiunii, faza de decodificare, faza de execuție, faza de citire / scriere date, etc. Arhitectura microprocesoarelor RISC este mai bine adaptată la procesarea pipeline decât cea a sistemelor convenționale CISC, datorită instrucțiunilor de lungime fixă, a modurilor de adresare specifice, a structurii interne bazate pe registre generale, etc. Microprocesoarele RISC uzuale dețin o structură pipeline de instrucțiuni întrege pe 4 - 6 nivele. De exemplu, microprocesoarele companiei MIPS au următoarele 5 nivele tipice:

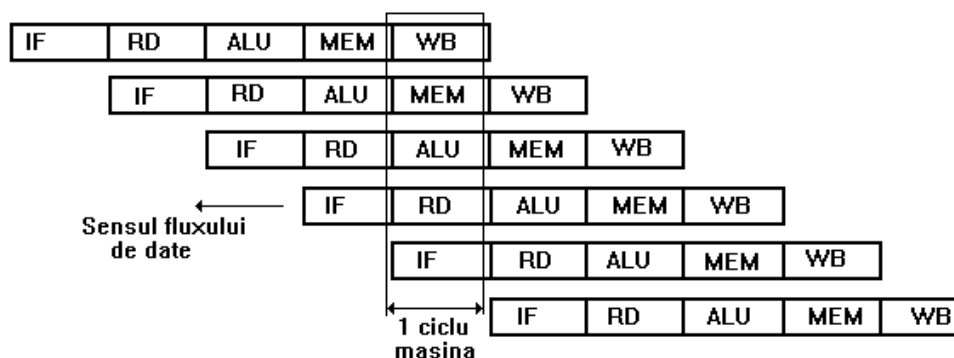
1. Nivelul **IF (instruction fetch)** - se calculează adresa instrucțiunii ce trebuie citită din cache-ul de instrucțiuni sau din memoria principală și se aduce instrucțiunea;
2. Nivelul **RD (ID)** - se decodifică instrucțiunea adusă și se citesc operanzii din setul de registre generali. În cazul instrucțiunilor de salt, pe parcursul acestei faze se calculează adresa de salt;
3. Nivelul **ALU** - se execută operația ALU asupra operanzilor selectați în cazul instrucțiunilor aritmetico-logice; se calculează adresa de acces la memoria de date pentru instrucțiunile LOAD / STORE;
4. Nivelul **MEM** - se accesează memoria cache de date sau memoria principală, însă numai pentru instrucțiunile LOAD / STORE. Acest nivel pe funcția de citire poate pune probleme datorate neconcordanței între rata de procesare și timpul de acces la memoria principală. Rezultă deci că într-o structură pipeline cu N nivele, memoria trebuie să fie în principiu de N ori mai rapidă decât într-o structură de calcul convențională. Acest lucru se realizează prin implementarea de arhitecturi de memorie rapide (cache, memorii cu acces întretesut, etc.). Desigur că un ciclu cu MISS în cache pe acest nivel (ca și pe nivelul IF de altfel), va determina stagnarea temporară a acceselor la memorie sau chiar a



procesarii interne. La scriere, problema aceasta nu se pune datorita procesorului de iesire specializat DWB care lucreaza în paralel cu procesorul central dupa cum deja am aratat.

5. Nivelul **WB (write buffer)** - se scrie rezultatul ALU sau data citita din memorie (în cazul unei instructiuni LOAD) în registrul destinatie din setul de registri generali ai microprocesorului.

Prin urmare, printr-o astfel de procesare se urmareste o rata ideala de o instructiune / ciclu masina ca în Figura 2.2, desi dupa cum se observa, timpul de executie pentru o instructiune data nu se reduce.



**Figura 2.2.** Principiul procesarii pipeline într-un procesor RISC

Se observa imediat necesitatea suprapunerii a 2 nivele concurențiale: nivelul IF și respectiv nivelul MEM, ambele cu referire la memorie. În cazul microprocesoarelor RISC aceasta situație se rezolvă deseori prin legături (busuri) separate între procesor și memoria de date respectiv de instrucțiuni (arhitectura Harvard).

În literatura se citează un model de procesor numit superpipeline. Acesta este caracterizat printr-un număr relativ mare al nivelelor de procesare. Desigur că în acest caz detectia și corectia hazardurilor de date și ramificații este mai dificilă în acest caz. Arhitecturile superpipeline se pretează la tehnologiile cu grade de împachetare reduse unde nu este posibilă multiplicarea resurselor hardware, în schimb caracterizate prin viteze de comutație ridicate (ECL, GaAs). O asemenea arhitectura caracterizează de ex. procesoarele din familia DEC (Digital Equipment Corporation, azi înglobată de către Compaq) Alpha. Avantajul principal al arhitecturilor superpipeline este că permit frecvențe de tact deosebit de ridicate (600-1000 MHz la nivelul tehnologiilor actuale), aspect normal având în vedere super - divizarea stagiilor de procesare. Fluxul procesării pipeline poate fi stagnat de anumite evenimente nedorite numite hazarduri.

Acestea se împart principal în 3 categorii distincte: structurale, de date și de ramificație.

Hazardurile structurale sunt determinate de conflictele la resurse comune, adică atunci când mai multe procese simultane aferente mai multor instrucțiuni în curs de procesare, accesează o resursă comună. Pentru a le elimina prin hardware, se impune de obicei multiplicarea acestor resurse. De exemplu, un procesor care are un set de registre generali de tip uniport și în anumite situații există posibilitatea ca 2 procese să dorească să scrie în acest set simultan. O altă situație de acest fel, după cum deja am mai arătat, poate consta în accesul simultan la memorie a 2 procese distincte: unul de aducere a instrucțiunii (IF), iar celălalt de aducere a operandului sau scriere a rezultatului în cazul unei instrucțiuni LOAD / STORE (nivelul MEM). După cum am mai arătat, această situație se rezolvă în general printr-o arhitectură Harvard a busurilor și cache-urilor.

Hazardurile de date apar când o instrucțiune depinde de rezultatele unei instrucțiuni anterioare în bandă. Pot fi la rândul lor clasificate în 3 categorii (RAW, WAR, WAW), dependent de ordinea acceselor de citire respectiv scriere, în cadrul instrucțiunilor.

Considerând instrucțiunile  $i$  și  $j$  succesive, hazardul RAW (Read After Write) apare atunci când instrucțiunea  $j$  încearcă să citească o sursă înainte ca instrucțiunea  $i$  să scrie în aceasta. Apare deosebit de frecvent în implementările actuale de procesoare pipeline și este singura stagnare obiectivă, care implică secvențialitatea execuției instrucțiunilor respective.

Hazardul WAR (Write After Read) poate să apară atunci când instrucțiunea  $j$  scrie o destinație înainte ca aceasta să fie citită pe post de sursă de către o instrucțiune anterioară notată  $i$ . Poate să apară când într-o structură pipeline există o fază de citire posterioară unei faze de scriere. De exemplu, modurile de adresare indirectă cu predecrementare pot introduce acest hazard, de aceea ele nici nu sunt implementate în arhitecturile de tip RISC. De precizat că aceste hazarduri WAR, pot apărea și datorită execuției instrucțiunilor în afara ordinii lor normale, din program (execuție Out of Order). Această procesare Out of Order este impusă de creșterea performanței și se poate realiza atât prin mijloace hardware cât și software, legat de optimizarea programelor pe arhitecturile pipeline.

Hazardul WAW (Write After Write), apare atunci când instrucțiunea  $j$  scrie un operand înainte ca acesta să fie scris de către instrucțiunea  $i$ . Asadar, în acest caz scrierile s-ar face într-o ordine eronată. Hazardul WAW poate apărea în structurile care au mai multe nivele de scriere sau care permit unei instrucțiuni să fie procesată chiar dacă o instrucțiune anterioară este blocată. Modurile de adresare indirectă cu postincrementare pot introduce acest hazard, fapt pentru care ele sunt evitate în procesoarele

RISC. De asemenea, acest hazard poate sa apară în cazul executiei Out of Order a instructiunilor care au aceeași destinație. Hazardurile WAR și WAW sunt doar conflicte de nume și prin redenumirea resurselor implicate, ele dispar. Astfel, acestea nu mai implica în mod necesar o secvențialitate In Order a executiei instructiunilor respective [3].

Hazardurile de ramificație pot fi generate de către instructiunile de ramificație (branch). Cauzează pierderi de performanță în general mai importante decât hazardurile structurale și de date, mai ales la procesoarele superscalare. Efectele defavorabile ale instructiunilor de ramificație pot fi reduse prin metode soft (reorganizarea programului sursă), sau prin metode hard care determină în avans dacă saltul se va face sau nu (branch prediction) și calculează în avans noul PC (program counter). Diverse statistici arată că instructiunile de salt necondiționat au o frecvență între 2 - 8% din instructiunile unui program de uz general, iar cele de salt condiționat între 11 - 17%. S-a arătat că salturile condiționate simple se fac cu o probabilitate de cca. 50%, loop-urile cu o probabilitate de cca. 90%, iar majoritatea salturilor orientate pe bit nu se fac.

Acest model de procesare are consecințe imediate extrem de criticabile precum:

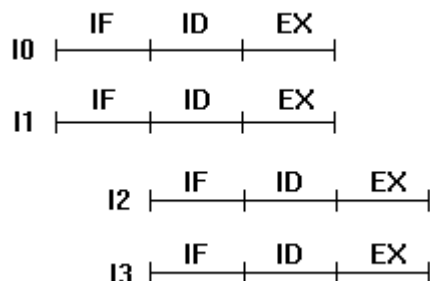
- Instructiunile de pe calea “*cea rea*” cauzează hazarduri structurale și deci încetiniri ale procesării.
- Aceleași instructiuni pot conduce la miss-uri în cacheuri având consecințe defavorabile asupra procesului de fetch al căii “*corecte*”.
- Speculațiile “*în adâncime*” amplifică exponențial dezavantajele mai sus menționate și de asemenea “*foamea*” de resurse hardware.

## 2.2. MICROARHITECTURI CU EXECUTII MULTIPLE ALE INSTRUCTIUNILOR

Microprocesoarele avansate actuale ating, teoretic cel puțin, rate medii de procesare de mai multe instructiuni per tact. Procesoarele care inițiază executia mai multor operații simultan într-un ciclu (sau tact) se numesc procesoare cu execuții multiple ale instructiunilor. Un astfel de procesor aduce din cache-ul de instructiuni una sau mai multe instructiuni simultan și le distribuie spre execuție în mod dinamic sau static (prin reorganizatorul de program), multiplelor unități de execuție.

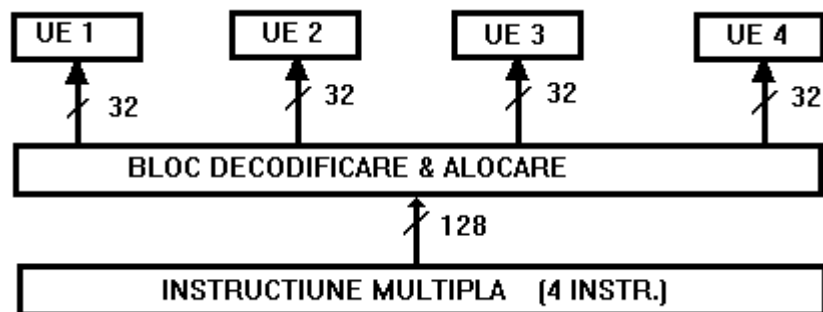
Principiul acestor procesoare paralele numite și "mașini cu execuție multiplă" (MEM) constă în existența mai multor unități de execuție paralele, care pot avea latențe diferite. Pentru a facilita procesarea acestor instrucțiuni, acestea sunt codificate pe un singur cuvânt de 32 sau 64 de biți uzual, pe modelul RISC anterior prezentat. Există desigur și implementări MEM realizate pe modele de programare de tip CISC, cum este cazul lui Intel Pentium, dar și aici principiile RISC s-au impus, cel puțin la nivel de microprogram. Dacă decodificarea instrucțiunilor, detectia dependențelor de date dintre ele, rutarea și lansarea lor în execuție din bufferul de prefetch înspre unitățile funcționale se fac prin hardware, aceste procesoare MEM se mai numesc și superscalare. Pot exista mai multe unități funcționale distincte, dedicate de exemplu diverselor tipuri de instrucțiuni tip întreg sau flotant. În cazul procesoarelor MEM, paralelismul temporal determinat de procesarea pipeline se suprapune cu un paralelism spațial determinat de existența mai multor unități de execuție. În general structura pipeline a coprocesorului are mai multe nivele decât structura pipeline a procesorului ceea ce implică probleme de sincronizare mai dificile decât în cazul procesoarelor pipeline scalare. Același lucru este valabil și între diferite alte tipuri de instrucțiuni având latențe de execuție diferite. Caracteristic decilor procesoarelor superscalare este faptul că dependențele de date între instrucțiuni se rezolvă prin hardware, în momentul decodificării instrucțiunilor. Modelul intuitiv ideal de procesare superscalară, în cazul unui procesor care poate aduce și decodifica 2 instrucțiuni simultan este prezentat în Figura 2.3.

Este evident că în cazul superscalar complexitatea logicii de control este mult mai ridicată decât în cazul pipeline scalar, întrucât detectia și sincronizarile între structurile pipeline de execuție cu latențe diferite și care lucrează în paralel devin mult mai dificile. De exemplu un procesor superscalar având posibilitatea aducerii și execuției a "N" instrucțiuni masina simultan, necesită  $N(N-1)$  unități de detectie a hazardurilor de date între aceste instrucțiuni (comparatori digitale), ceea ce conduce la o complexitate ridicată a logicii de control.



**Figura 2.3.** Modelul execuției superscalare

Procesoarele VLIW (Very Long Instruction Word) reprezintă procesoare care se bazează pe aducerea în cadrul unei instrucțiuni multiple a mai multor instrucțiuni RISC independente pe care le distribuie spre procesare unitatilor de execuție. Asadar, rata de execuție ideală la acest model, este de  $n$  instrucțiuni/ciclu. Pentru a face acest model viabil, sunt necesare instrumente soft de exploatare a paralelismului programului, bazate pe gruparea instrucțiunilor simple independente și deci executabile în paralel, în instrucțiuni multiple. Arhitecturile VLIW sunt tot de tip MEM. Principiul VLIW este sugerat intuitiv în Figura 2.4:

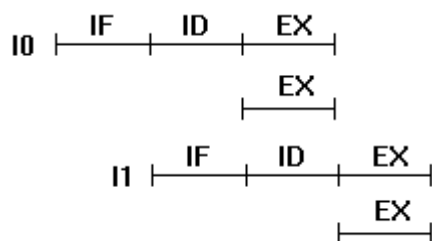


**Figura 2.4.** Decodificarea și alocarea instrucțiunilor într-un procesor VLIW

În cadrul acestui model, se încearcă prin transformări ale programului, ca instrucțiunile RISC primitive din cadrul unei instrucțiuni multiple să fie independente și deci să se evite hazardurile de date între ele, a căror gestionare ar fi deosebit de dificilă în acest caz. Performanța procesoarelor VLIW este esențial determinată de programele de compilare și reorganizare care trebuie să fie deosebit de "inteligente". De aceea acest model de arhitectură se mai numește uneori și EPIC (Explicitly Parallel Instruction

Computing – terminologie Intel Co. folosită în documentația microprocesorului IA-64 Merced).

Prin urmare, în cazul modelului de procesor VLIW, compilatorul trebuie să înglobeze mai multe instrucțiuni RISC primitive independente în cadrul unei instrucțiuni multiple, în timp ce în cazul modelului superscalar, rezolvarea dependentelor între instrucțiuni se face prin hardware, începând cu momentul decodificării acestor instrucțiuni. De asemenea, poziția instrucțiunilor primitive într-o instrucțiune multiplă determină alocarea acestor instrucțiuni primitive la unitățile de execuție, spre deosebire de modelul superscalar unde alocarea se face dinamic prin control hardware. Acest model de procesor nu mai necesită sincronizări și comunicatii de date suplimentare între instrucțiunile primitive după momentul decodificării lor, fiind astfel mai simplu din punct de vedere hardware decât modelul superscalar. Un model sugestiv al principiului de procesare VLIW este prezentat în Figura 2.5.

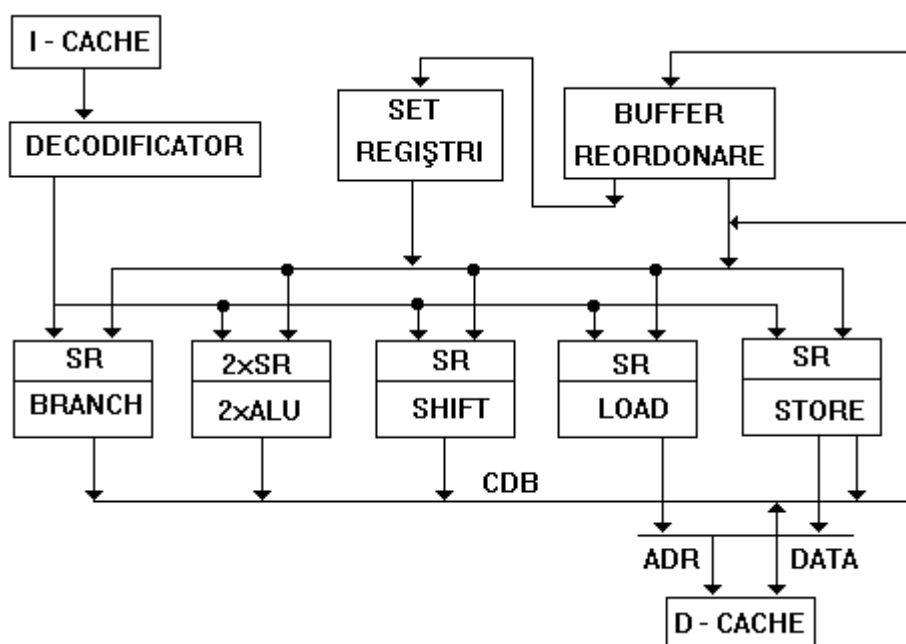


**Figura 2.5.** Principiul de procesare VLIW

Având în vedere ideile de implementare a execuțiilor multiple, o arhitectura superscalară reprezentativă este prezentată în Figura 2.6. Menționăm că la ora actuală, pe plan comercial, piața este dominată de microprocesoarele superscalare, în principal datorită dezideratelor de compatibilitate între versiunile din cadrul aceleiași familii. Prin SR am notat stadiile de rezervare aferente unităților de execuție ale procesorului. Acestea implementează printre altele bufferul "instruction window" necesar procesoarelor superscalare cu execuție Out of Order. Numărul optim de locații al fiecărei SR se determină pe baza de simulare.

Deși performanța maximă a unei asemenea arhitecturi ar fi de 6 instrucțiuni/ciclu, în realitate, bazat pe simulări ample, s-a stabilit că rata medie de execuție este situată între 1-2 instrucțiuni / ciclu. În sub 1% din cazuri, măsurat pe benchmark-uri nenumerice, există un potențial de paralelism mai mare de 6 instrucțiuni / ciclu în cazul unei arhitecturi superscalare "pure". Aceasta se datorează în primul rând capacității limitate

a bufferului de prefetch care constituie o limitare principala a oricarui procesor, exploatarea paralelismului între instrucțiuni fiind limitată de capacitatea acestui buffer. În tehnologia actuală acesta poate memora între 8 - 64 instrucțiuni, capacități mai mari ale acestuia complicând mult logica de detecție a hazardurilor RAW după cum am arătat. În continuare se prezintă pe scurt rolul modulelor componente din această schema tipică.



**Figura 2.6.** Arhitectura tipică a unui procesor superscalar

Decodificatorul plasează instrucțiunile multiple în SR - urile corespunzătoare. O unitate funcțională poate starta execuția unei instrucțiuni din SR imediat după decodificare dacă instrucțiunea nu implică dependențe, operandii îi sunt disponibili și dacă unitatea de execuție este liberă. În caz contrar, instrucțiunea așteaptă în SR până când aceste condiții vor fi îndeplinite. Dacă mai multe instrucțiuni dintr-o SR sunt simultan disponibile spre a fi executate, procesorul o va selecta pe prima din secvența de instrucțiuni. Desigur că este necesar un mecanism de arbitraj în vederea accesării busului de date comun (CDB – Common Data Bus) de către diversele unități de execuție (UE). În vederea creșterii eficienței, deseori magistralele interne sunt multiplicat.

Bufferul de reordonare (RB - Reorder Buffer) este în legătură cu mecanismul de redenumire dinamică a registrelor în vederea execuției Out of Order precum și cu necesitatea implementării unui mecanism precis de

tratare a evenimentelor de exceptie (derute, devieri, întreruperi hard-soft, etc.). Acest deziderat nu este deloc trivial având în vedere procesarea pipeline a instructiunilor si posibilitatea aparitiei unor exceptii imprecise. Acest RB contine un numar de locatii care sunt alocate în mod dinamic rezultatelor instructiunilor.

În urma decodificarii unei instructiuni, rezultatul acesteia este asigant unei locatii din RB, iar numarul registrului destinatie este asociat acestei locatii. În acest mod, registrul destinatie este practic redenumit printr-o locatie din RB. În urma decodificarii se creaza prin hard un "tag" care reprezinta numele unitatii de executie care va procesa rezultatul instructiunii respective. Acest tag va fi scris în aceeasi locatie din RB. Din acest moment, când o instructiune urmatoare face referire la respectivul registru pe post de operand sursa, ea va apela în locul acestuia valoarea înscrisa în RB sau, daca valoarea nu a fost înca procesata, tag-ul aferent locatiei. Daca mai multe locatii din RB contin acelasi numar de registru (mai multe instructiuni în curs au avut acelasi registru destinatie), se va genera locatia cea mai recent înscrisa (tag sau valoare).

Este evident deja ca RB se implementeaza sub forma unei memorii asociative, cautarea facându-se dupa numarul registrului destinatie la scriere, respectiv sursa la citire. Daca accesarea RB se soldeaza cu miss, atunci operandul sursa va fi citit din setul de registri. În caz de hit, valoarea sau tag-ul citite din RB sunt memorate în SR corespunzatoare. Când o unitate de executie genereaza un rezultat, acesta se va înscrie în SR si în locatia din RB care au tag-ul identic cu cel emis de catre respectiva unitate. Rezultatul înscris într-o SR poate debloca anumite instructiuni aflate în asteptare. Dupa ce rezultatul a fost scris în RB, instructiunile urmatoare vor continua sa-l citeasca din RB ca operand sursa pâna când va fi evacuat si scris în setul de registri. Evacuarea se va face în ordinea secventei originale de instructiuni pentru a se putea evita exceptiile imprecise. Asadar, redenumirea unui registru cu o locatie din RB se termina în momentul evacuării acestei locatii.

Bufferul RB poate fi gestionat ca o memorie FIFO (First In First Out). În momentul decodificarii unei instructiuni, rezultatul acesteia este alocat în coada RB. Rezultatul instructiunii este înscris în momentul în care unitatea de executie corespunzatoare îl genereaza. Când acest rezultat ajunge în prima pozitie a RB, daca între timp nu au aparut exceptii, este înscris în setul de registri. Daca instructiunea nu s-a încheiat atunci când locatia alocata în RB a ajuns prima, bufferul RB nu va mai avansa pâna când aceasta instructiune nu se va încheia. Decodificarea instructiunilor poate însa continua atât timp cât mai exista locatii disponibile în RB.



### 2.3. OPTIMIZAREA PROGRAMELOR OBIECT. TEHNICI MODERNE DE PROCESARE

Ca și în cazul procesoarelor scalare, reorganizarea programelor (scheduling) reprezintă procesul de aranjare a instrucțiunilor din cadrul unui program obiect astfel încât acesta să se execute pe arhitectura hardware într-un mod cvasioptimal din punct de vedere al timpului de procesare. Procesul de reorganizare a instrucțiunilor determină creșterea probabilității ca procesorul să aducă simultan din cache-ul de instrucțiuni mai multe instrucțiuni independente. De asemenea asigură procesarea eficientă a operațiilor critice din punct de vedere temporal în sensul reducerii prin masacare a latentelor specifice acestor operații. Este rezolvată demult problema optimizării "basic block"-urilor, adică a acelor unități secvențiale de program care nu conțin ramificații și nu sunt destinate unor instrucțiuni de ramificație. Cel mai utilizat algoritm euristic în acest sens este cunoscut sub numele de "List Scheduling". Acesta parcurge graful dependentelor asociat unității secvențiale de program de jos în sus. În fiecare pas se încearcă lansarea în execuție a instrucțiunilor disponibile. După ce aceste instrucțiuni au fost puse în execuție, instrucțiunile precedente devin disponibile spre a fi lansate în pasul următor. Fiecărei instrucțiuni *i* se atasează un grad de prioritate egal cu latentă la intrarea în instrucțiune. Algoritmul da rezultate cvasioptimale și are avantajul parcurgerii grafului dependentelor de date asociat "basic-block"-ului într-o singură trecere (o prezentare completă se găsește în [3, 4]). De remarcat că schedulingul în procesoarele superscalare poate determina o simplificare substanțială a arhitecturii hardware precum și o îmbunătățire a gradului de utilizare aferent resurselor hardware. Optimizarea "basic-block"-urilor unui program nu implică în mod necesar optimizarea întregului program datorită problemelor legate de instrucțiunile de ramificație. Reorganizarea programelor care conțin branch-uri este mai dificilă întrucât aici "mutările" de instrucțiuni pot cauza incorectitudini ale programului reorganizat care ar trebui corectate. Această optimizare se mai numește și optimizare globală. Problema optimizării globale este una de mare actualitate și interes, întrucât paralelismul la nivelul basic-block-urilor, după cum arătau încă din anii '70 pionierii ca *Michael Flynn*, este relativ scăzut (doar 2-3 instrucțiuni). Deoarece majoritatea programelor HLL (High Level Languages) sunt scrise în limbaje imperative și pentru mașini secvențiale cu un număr limitat de registre în vederea stocării temporare a variabilelor, este de așteptat ca gradul de dependente între instrucțiunile adiacente să fie ridicat. Asadar pentru

marirea nivelului de paralelism este necesara suprapunerea executiei unor instructiuni situate în basic-block-uri diferite, ceea ce conduce la ideea optimizarii globale.

Numeroase studii au aratat ca paralelismul programelor de uz general poate atinge în variante idealizate (resurse hardware nelimitate, redenumire perfecta a registrilor în cazul hazardurilor WAR si WAW, analiza antialias perfecta etc.) în medie 50-60 instructiuni simultane. De remarcat ca schedulerile actuale, cele mai performante, raporteaza performante cuprinse între 3-7 instructiuni simultane. Se apreciaza ca realiste obtinerea în viitorul apropiat a unor performante de 10-15 instructiuni simultane bazat pe îmbunatatirea tehnicilor de optimizare globala. Problema optimizarii globale este una deschisa la ora actuala, având o natura NP - completa. Una dintre cele mai cunoscute metode de optimizare globala este tehnica "Trace Scheduling" (TS). Tehnica TS este similara cu tehnicile de reorganizare în "basic block"-uri, cu deosebirea ca aici se va reorganiza o întreaga cale (Trace) si nu doar un basic - block. În esenta, ea se bazeaza pe optimizarea celor mai probabile cai în a fi executate, bazat pe informatii culese în timpul rularilor (profilings). Se defineste o cale ("Trace") într-un program ce contine salturi conditionate, o ramura particulara a acelui program legata de o asumare data a adreselor acestor salturi. Rezulta deci ca un program care contine  $n$  salturi conditionate va avea  $2^n$  posibile cai (trace-uri). Asadar, o cale a unui program va traversa mai multe unitati secventiale din acel program. Alte metode de optimizare mai recente, vor fi prezentate sugestiv si pe baza unor implementari academice si comerciale în paragrafele 4 si 5.

O alta tehnica de scheduling esentiala în arhitecturile MEM actuale tine de optimizarea buclelor de program. Aceasta optimizare este foarte importanta pentru ca în buclele de program se pierde cea mai mare parte a timpului de executie aferent respectivului program, dupa regula binecunoscuta care afirma ca "90% din timp executa cca. 10% din program". Aici, 2 tehnici sunt mai uzitate: tehnica "Loop Unrolling" (LU) respectiv tehnica "Software Pipelining" [3]. Tehnica LU se bazeaza pe desfasurarea buclelor de program si apoi, reorganizarea acestora ca basic - block - uri prin algoritmi de tip LS. Prin aceasta desfasurare a buclei de un numar de ori se reduce si din efectul defavorabil al instructiunilor de ramificatie. Tehnica software pipelining (TSP) este utilizata în reorganizarea buclelor de program astfel încât fiecare iteratie a buclei de program reorganizata sa contina instructiuni aparținând unor iteratii diferite din bucla originala. Aceasta reorganizare are drept scop scaderea timpului de executie al buclei prin eliminarea hazardurilor intrinseci, eliminând astfel stagnarile inutile pe timpul procesarii instructiunilor.

Dintre tehnicile agresive de procesare a instructiunilor cele mai în voga actualmente, se numara executia predicativa si respectiv predicativa a instructiunilor, caracteristici esentiale de exemplu în arhitectura IA – 64 Merced (vezi paragraful 5). Executia conditionata (predicativa) se refera la implementarea unor asa numite instructiuni conditionate. O instructiune conditionata se va executa daca o variabila de conditie inclusa în corpul instructiunii îndeplineste conditia dorita. În caz contrar, instructiunea respectiva nu va avea nici un efect (NOP). Variabila de conditie poate fi memorata într-un registru general al procesorului sau în registri special dedicati acestui scop numiti registri booleeni. Astfel de exemplu, instructiunea CMOVZ R1, R2, R3 muta (R2) în R1 daca (R3) = 0. Instructiunea TB5 FB3 ADD R1, R2, R3 executa adunarea numai daca variabilele booleene B5 si B3 sunt '1' respectiv '0'. În caz contrar, instructiunea este inefectiva. Desigur ca variabilele booleene necesita biti suplimentari în corpul instructiunii.

Executia conditionata a instructiunilor este deosebit de utila în eliminarea salturilor conditionate dintr-un program, simplificând programul si transformând deci hazardurile de ramificatie în hazarduri de date. Sa consideram spre exemplificare o constructie *if-then-else* ca mai jos:

if (R8<1)	LT	B6, R8, #1;	if R8<1, B6<---1
R1 = R2 + R3,	BF	B6, Adr1;	Daca B6=0 salt la Adr1
else	ADD	R1, R2, R3	
R1 = R5 - R7;	BRA	Adr2 ; salt la Adr2	
R10 = R1 + R11;	Adr1: SUB	R1, R5, R7	
	Adr2: ADD	R10, R1, R11	

Prin rescrierea acestei secvente utilizând instructiuni conditionate se elimina cele 2 instructiuni de ramificatie obtinându-se urmatoarea secventa mai simpla si mai eficienta de program:

	LT	B6, R8, #1
TB6	ADD	R1, R2, R3
FB6	SUB	R1, R5, R7
	ADD	R10, R1, R11

Este clar ca timpul de executie pentru aceasta secventa este mai mic decât cel aferent secventei anterioare. Se arata în literatura de specialitate ca astfel de transformari reduc cu cca. 25-30% instructiunile de salt conditionat dintr-un program. Aceasta executie conditionata a instructiunilor faciliteaza executia speculativa a acestora. Codul situat dupa un salt conditionat în program si executat înainte de stabilirea conditiei si adresei de salt cu ajutorul instructiunilor conditionate, se numeste cod cu executie speculativa, operatia respectiva asupra codului numindu-se predicare. Predicarea reprezinta o tehnica de procesare care - utilizând instructiuni cu executie conditionata - urmareste executia paralela prin speculatie a unor instructiuni

si reducerea numarului de ramificatii din program, ambele benefice pt. minimizarea timpului de executie al programului. Acest mod de executie a instructiunilor poate fi deosebit de util în optimizarea executiei unui program.

Prezentam în continuare o secventa de cod initiala si care apoi e transformata de catre scheduler în vederea optimizarii executiei prin speculatia unei instructiuni.

SUB	R1, R2, R3		SUB	R1, R2, R3
LT	B8, R1, #10		LT	B8, R1, #10
BT	B8, Adr	FB8	ADD	R7, R8, R1; speculativa
ADD	R7, R8, R1		BT	B8, Adr
SUB	R10, R7, R4		SUB	R10, R7, R4

Executia speculativa a instructiunii ADD putea fi realizata si în lipsa variabilelor de garda booleene dar atunci putea fi necesara redenumirea registrului R7 (daca acesta ar fi în viata pe ramura pe care saltul se face). Orice instructiune - cu exceptia celor de tip STORE, scrieri în memoria de date - poate fi executata speculativ. O posibila strategie de a permite instructiuni STORE speculative consta în introducerea unui Data Write Buffer (DWB). Memorarea se va face întâi aici si abia când conditia de salt este cunoscuta se va înscrie în memorie. Pe lângă avantajele legate de eliminarea salturilor, facilitarea executiei speculative, predicarii etc., executia conditionata are si câteva dezavantaje dintre care amintim:

- ◆ instructiunile conditionate anulate (NOP) necesita totusi un timp de executie. În cazul speculatiei, în aceste conditii performanta în executie scade.
- ◆ daca variabila de conditie e evaluata târziu, utilitatea instructiunii conditionate va fi micșorata.
- ◆ promovarea unei instructiuni peste mai multe ramificatii conditionate în vederea executiei speculative necesita gardari multiple.
- ◆ instructiunile conditionate pot determina scaderea frecventei de tact a microprocesorului.

Având în vedere cele de mai sus, utilitatea executiei conditionate este încă discutata. MIPS, POWER-PC, SUN-SPARC, DEC ALPHA detin doar o instructiune de tip MOVE conditionata, în timp ce alte microarhitecturi precum HEWLET PACKARD PA, HARP, HSA, etc., permit executia conditionata a majoritatii instructiunilor masina. La ora actuala exista încă putine evaluari cantitative care sa stabileasca avantajele/dezavantajele acestei idei într-un mod clar. Implementari concrete ale acestor tehnici, bazat pe exemple, se vor analiza si în paragrafele 4.3.

### 3. ARHITECTURA SISTEMULUI IERARHIZAT DE MEMORIE

---

#### 3.1. MEMORII CACHE

*Cache: a safe place for hiding or storing things. (Webster's New World Dictionary of the American Language, Third College Edition - 1988)*

Memoria cache este o memorie situată din punct de vedere logic între CPU (Central Processing Unit - unitate centrală) și memoria principală (uzual DRAM - Dynamic Random Access Memory), mai mică, mai rapidă și mai scumpă (per byte) decât aceasta și gestionată – în general prin hardware – astfel încât să existe o cât mai mare probabilitate statistică de găsire a datei accesate de către CPU, în cache. Altfel, cache-ul este adresat de către CPU în paralel cu memoria principală (MP): dacă data dorită a fi accesată se găsește în cache, accesul la MP se abortează, dacă nu, se accesează MP cu penalizările de timp impuse de latența mai mare a acesteia, relativ ridicată în comparație cu frecvența de tact a CPU. Oricum, data accesată din MP se va introduce și în cache.

Memoriile cache sunt implementate în tehnologii de înaltă performanță, având deci un timp de acces foarte redus dacă sunt integrate în microprocesor (cca. 1 – 5 ns la ora actuală). În prezent presiunea asupra acestor memorii este foarte ridicată, rolul lor fiind acela de a apropia performanța microprocesoarelor (care crește cu cca. 50 – 60 % pe an) cu aceea a memoriilor DRAM, a căror latență scade cu doar cca. 7 % pe an. În general, pentru a accesa o locație DRAM, un procesor “pierde” 15 – 50 de impulsuri de tact ( $\sim \text{timp acces DRAM} / T_{\text{CLK}}$ ,  $T_{\text{CLK}}$  = perioada ceasului microprocesorului), în schimb accesarea cache-ului se face în doar 1 – 3 impulsuri de tact. Cu alte cuvinte, memoria cache reduce timpul mediu de acces al CPU la MP, ceea ce este foarte util.

Se definește un acces al CPU cu hit în cache, un acces care găsește o copie în cache a datei accesate. Un acces cu miss în cache este unul care nu

gaseste o copie în cache a datei accesate de catre CPU si care, prin urmare, adreseaza MP cu toate penalizarile de timp care deriva din accesarea acesteia.

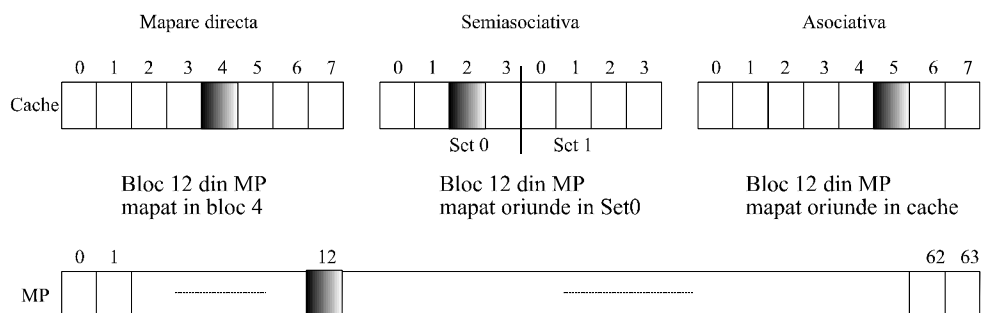
Se defineste ca parametru de performanta al unei memorii cache rata de hit, ca fiind raportul statistic între numărul acceselor cu hit în cache respectiv numărul total al acceselor CPU la memorie. Masurat pe benchmark-uri (programe de test) reprezentative, la ora actuala sunt frecvente rate de hit de peste 90 %. Rata de miss (RM) este complementara ratei de hit (RH), astfel ca:  $RH [\%] + RM [\%] = 100 \%$ . În esenta, utilitatea cache-ului deriva din urmatorul fapt: la o citire cu miss (din MP), data adusa din MP este introdusa si în cache, în speranta ca la o urmatoare citire a aceleiasi date, aceasta se va gasi în cache (hit). În realitate, în cazul unei citiri cu miss în cache se aduce din MP nu doar data (cuvântul) dorita de catre CPU ci un întreg bloc (4 – 16 cuvinte) care evident contine data respectiva. O citire cu miss presupune aducerea blocului din MP dar înainte de aceasta se impune evacuarea în MP a unui bloc din cache. Asadar, transferul din cache în MP se face tot la nivel de bloc si nu de cuvânt. Astfel, se optimizeaza traficul între cache si MP pe baza a 2 principii care vor fi discutate în continuare.

În esenta, eficienta memoriilor cache se bazeaza pe 2 principii de natura statistica si care caracterizeaza intrinsec notiunea de program: principiile de localitate temporala si spatiala. Conform principiului de localitate temporala, exista o mare probabilitate ca o data (instructiune) accesata acum de catre CPU sa fie accesata din nou, în viitorul imediat. Conform principiului de localitate spatiala, exista o mare probabilitate ca o data situata în imediata vecinatate a unei date accesate curent de catre CPU, sa fie si ea accesata în viitorul apropiat (pe baza acestui principiu statistic se aduce din MP în cache un întreg bloc si nu doar strict cuvântul dorit de catre CPU). O bucla de program – structura esentiala în orice program – exemplifica foarte clar aceste principii si justifica eficienta conceptului de cache.

O combinatie a celor 2 principii anterior expuse conduce la celebra "regula 90/10" care spune ca cca. 90 % din timpul de rulare al unui program se executa doar cca. 10 % din codul acestuia. Personal, credem ca mai putin. Pe baza acestor principii empirice se situeaza întreg esafodajul conceptului de cache; eficienta sa deosebita nu poate fi explicata prin considerente analitice pentru simplul fapt ca este practic imposibil a descrie analitic notiunea de program. În fond, ce este un program? Care este distributia instructiunilor sau a primitivelor structurale într-un program? Poate fi aceasta descrisa concret, pe baza unor modele deterministe sau aleatoare? Dificultatea unor raspunsuri exacte la aceste întrebări – data în fond de

imposibilitatea punerii în ecuație a minții umane, cea care creează infinita diversitate de “programe” – face ca cea mai bună explicație asupra eficienței memoriilor cache să stea în cele 2 principii empirice anterior schitate, caracterizând intrinsec noțiunea de program.

Din punct de vedere arhitectural, există 3 tipuri distincte de memorii cache în conformitate cu gradul de asociativitate: cu mapare directă, semiasociative și total asociative.



**Figura 3.1.** Scheme de mapare în cache

La cache-urile cu mapare directă, ideea principală constă în faptul că un bloc din MP poate fi găsit în cache (hit) într-un bloc unic determinat. În acest caz regula de mapare a unui bloc din MP în cache este:

$$(\text{Adresa bloc MP}) \bmod (\text{Nr. blocuri din cache})$$

Strictetea regulii de mapare conduce la o simplitate constructivă a acestor memorii dar și la fenomenul de interferență al blocurilor din MP în cache. Astfel, de exemplu, blocurile 12, 20, 28, 36, 42 etc. nu pot coexista în cache la un moment dat întrucât toate se mapează pe blocul 4 din cache. Prin urmare, o buclă de program care ar accesa alternativ blocurile 20 și 28 din MP ar genera o rată de hit egală cu zero.

La cache-urile semiasociative există mai multe seturi, fiecare set având mai multe blocuri componente. Aici, regula de mapare precizează strict doar setul în care se poate afla blocul dorit, astfel:

$$(\text{Adresa bloc MP}) \bmod (\text{Nr. seturi din cache})$$

În principiu blocul dorit se poate mapa oriunde în setul respectiv. Mai precis, la un miss în cache, înainte de încărcarea noului bloc din MP, trebuie evacuat un anumit bloc din setul respectiv. În principiu există implementate două-trei tipuri de algoritmi de evacuare: pseudorandom (cvasialeator),

FIFO si LRU (“Least Recently Used”). Algoritmul LRU evacueaza blocul din cache cel mai demult neaccesat, în baza principiului de localitate temporala (aflat oarecum în contradictie cu o probabilitica markoviana care ar sugera sa fie pastrat!). Daca un set din cache-ul semiasociativ contine  $N$  blocuri atunci cache-ul se mai numeste “tip  $N$ -way set asociative”.

Este evident ca într-un astfel de cache rata de interferenta se reduce odata cu cresterea gradului de asociativitate ( $N$  “mare”). Aici, de exemplu, blocurile 12, 20, 28 si 36 pot coexista în setul 0. Prin reducerea posibilelor interferente ale blocurilor, cresterea gradului de asociativitate determina îmbunatatirea ratei de hit si deci a performantei globale. Pe de alta parte însă, asociativitatea impune cautarea dupa continut (se cauta deci într-un set daca exista memorat blocul respectiv) ceea ce conduce la complicatii structurale si deci la cresterea timpului de acces la cache si implicit la diminuarea performantei globale. Optimizarea gradului de asociativitate, a capacitatii cache, a lungimii blocului din cache etc., nu se poate face decât prin laborioase simulari software, variind toti acesti parametri în vederea minimizarii ratei globale de procesare a instructiunilor [instr./cicli].

În fine, memoriile cache total asociative, implementeaza practic un singur set permitând maparea blocului practic oriunde în cache. Ele nu se implementeaza deocamdata în siliciu datorita complexitatii deosebite si a timpului prohibit de cautare. Reduc însă (practic) total interferentele blocurilor la aceeasi locatie cache si constituie o metrica superioara utila în evaluarea ratei de hit pentru celelalte tipuri de cache-uri (prin comparatie). Cele 3 scheme urmatoare prezinta implementari realizate pentru tipurile de cache anterior discutate.



### Cache semiasociativ pe 2 cai

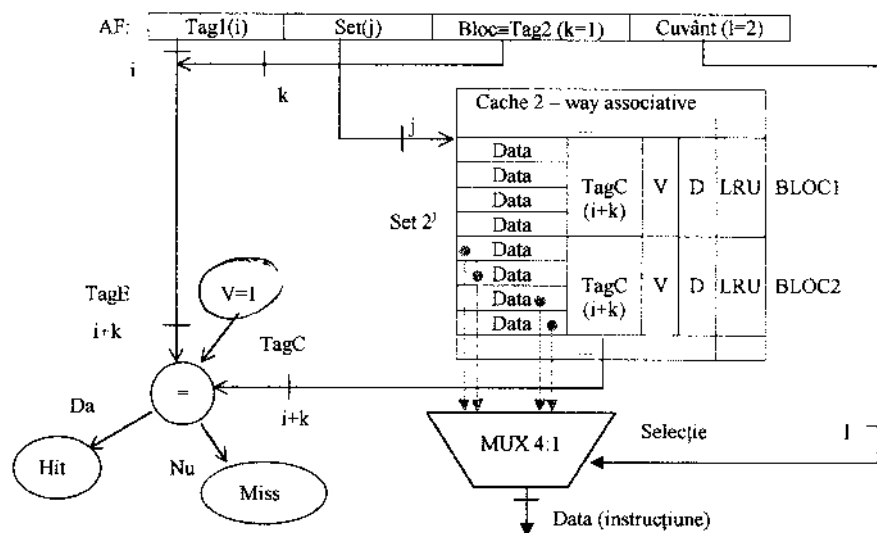


Figura 3.2. Cache semiasociativ pe 2 cai

### Cache complet asociativ

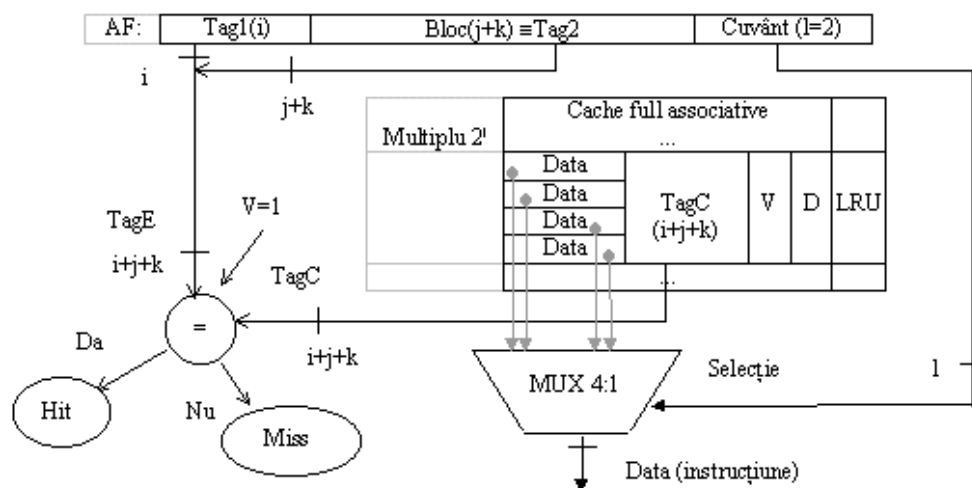
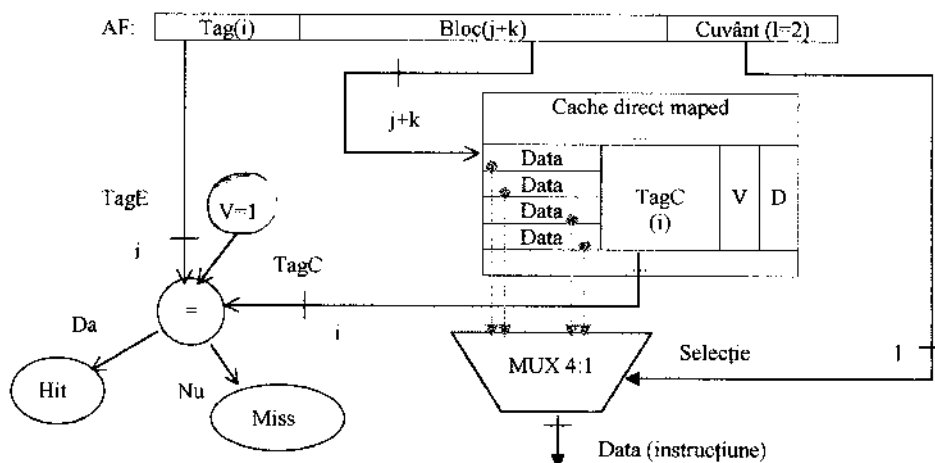


Figura 3.3. Cache complet asociativ

### Cache direct mapat



**Figura 3.4.** Cache direct mapat

S-a considerat un bloc compus din 4 cuvinte. Bitul V este un bit de validare a blocului,  $V = 1$  fiind o condiție necesară a obținerii hitului. Bitul este util îndeosebi în Sistemele multiprocesor în vederea menținerii coerenței memoriilor cache locale datorită redundanței informaționale. Mai precis, aici apare necesitatea citirii din cache-ul propriu a ultimei copii modificate a datei respective. Când un procesor modifică o copie locală a unei date, toate blocurile care conțin acea dată din cadrul celorlalte procesoare, trebuie invalidate prin resetarea  $V = 0$ . Necesitatea invalidării blocurilor ( $V = 0$ ) apare chiar și în sistemele uniprocessor. Imediat după resetarea sistemului, uzual, procesorul execută un program încărcător rezident în memoria EPROM. Cum imediat după initializarea sistemului conținutul cache-ului e practic aleator, pentru a evita false hituri la citirea programului încărcător din EPROM, se initializează bitii V cu zero. La prima încărcare a unei date (instrucțiuni) în cache, bitul V aferent se va seta pe '1', validând astfel hitul.

Bitul D (Dirty) este pus pe '0' la încărcarea inițială a blocului în cache. La prima scriere a acelui bloc, bitul se pune deci pe '1'. Evacuarea propriu-zisă a blocului se face doar dacă bitul  $D = 1$ . Practic prin acest bit se minimizează evacuările de blocuri în MP, pe baza principiului ca un bloc trebuie evacuat numai dacă a fost scris în cache.

În acest sens, din punct de vedere al acceselor de scriere a unui procesor, există 2 posibilități:

- a) Strategia “Write Through” (WT), prin care informatia este scrisa de catre procesor atât în blocul aferent din cache cât si în blocul corespunzator din memoria principala.
- b) Strategia “Write - Back” (WB), prin care informatia este scrisa numai în cache, blocul modificat fiind transferat în MP numai la evacuarea din cache.

În vederea mentinerii coerenței cache-urilor cu precadere în sistemele multimicroprocesor – exista 2 posibilitati în functie de ce se întâmpla la o scriere (vezi pentru detalii capitolul dedicat sistemelor multimicroprocesor):

- a) Write invalidate – prin care CPU care scrie determina ca toate copiile din celelalte memorii cache sa fie invalidate înainte ca el sa si modifice blocul din cache-ul propriu.
- b) Write Broadcast – CPU care scrie pune data de scris pe busul comun spre a fi actualizate toate copiile din celelalte cache-uri.

Ambele strategii de mentinere a coerenței pot fi asociate cu oricare dintre protocoalele de scriere (WT, WB) dar de cele mai multe ori se prefera WB cu invalidare. Nu detaliam aici problemele de coerența întrucât acestea se refera cu deosebire la problematica sistemelor multiprocesor si deci depasesc cadrul acestei prezentari.

Apar posibile 4 procese distincte într-un cache ca în tabelul urmator:

Tip acces	Hit / Miss	Actiune în cache
Citire	Miss	Evacuare bloc + încărcare bloc nou
Citire	Hit	(comparare tag-uri)
Scriere	Miss	Evacuare bloc + încărcare bloc nou + scriere data în bloc
Scriere	Hit	Scriere data în blocul din cache (WB)

*Tabelul 3.1.*

### Tipuri de acces în cache

Asadar, memoriile cache îmbunatatesc performanta îndeosebi pe citirile cu hit iar în cazul utilizarii scrierii tip “Write Back” si pe scrierile cu hit.

Îmbunatatirea accesului la memorie pe citirile CPU este normala având în vedere ca acestea sunt mult mai frecvente decât scrierile (orice instructiune implica cel puțin o citire din memorie pentru aducerea sa; statistic, cca. 75 % din accesele la memorie sunt citiri).

Explicatia la cauzele miss-urilor în cache-uri, conform literaturii acestui domeniu, sunt de 3 tipuri:

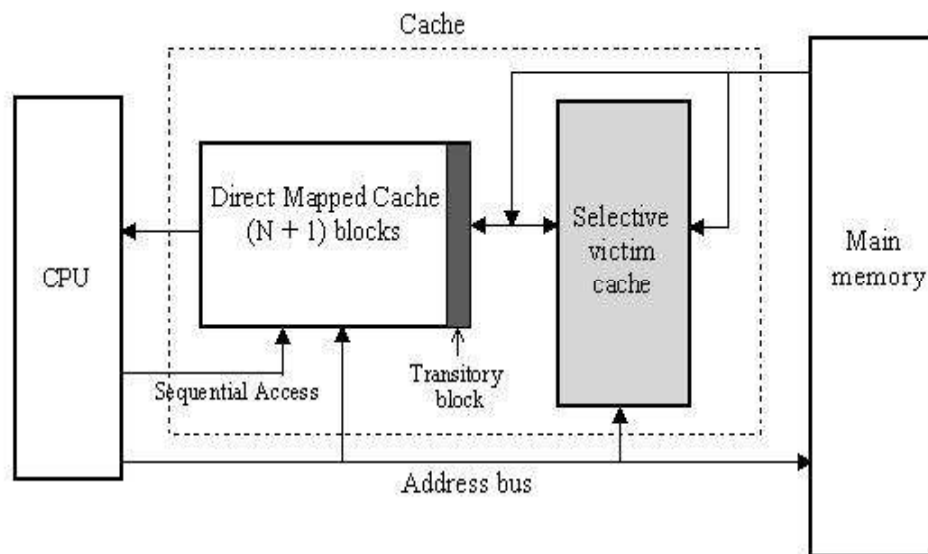
- datorita faptului ca în fond primul acces la un bloc genereaza întotdeauna miss (*compulsory*); sunt inevitabile.
- datorita capacitatii fatalmente limitate a cache-ului care nu poate contine la un moment dat toate blocurile din MP, ceea ce implica evacuari / încarcari (*capacity*).
- datorita interferentelor (conflictelor) unor blocuri din MP pe acelasi bloc din cache (*conflict*); acestea se reduc odata cu cresterea capacitatii si a gradului de asociativitate.

Primul care a pus în lumina conceptul de memorie cache a fost prof. Maurice Wilkes (Univ. Cambridge, Anglia) – un pionier al calculatoarelor care a inventat în 1951 si tehnica microprogramarii unitatilor de comanda aferente procesoarelor – într-un articol publicat în 1965 (“*Slave memories and dynamic storage allocation*”, IEEE Trans. Electronic Computers, April, 1965). Prima implementare a unui cache (cu mapare directa) apartine probabil lui Scarrott, în cadrul unui sistem experimental construit tot la Universitatea din Cambridge. Primul sistem comercial care utiliza cache-urile a fost IBM 360/85 (1968). Conceptul de cache s-a dovedit a fi foarte fecund nu numai în hardware dar si în software prin aplicatii dintre cele mai diverse în sistemele de operare (memoria virtuala), retele de calculatoare, baze de date, compilatoare etc.

Pentru a reduce rata de miss a cache-urilor mapate direct (fara sa se afecteze însa timpul de hit sau penalitatea în caz de miss), cercetatorul Norman Jouppi (DEC) a propus conceptul de “victim cache”. Aceasta reprezinta o memorie mica complet asociativa, plasata între primul nivel de cache mapat direct si memoria principala. Blocurile înlocuite din cache-ul principal datorita unui miss sunt temporar memorate în victim cache. Daca sunt referite din nou înainte de a fi înlocuite din victim cache, ele pot fi extrase direct din victim cache cu o penalitate mai mica decât cea a memoriei principale [5]. Deoarece victim cache-ul este complet asociativ, multe blocuri care ar genera conflict în cache-ul principal mapat direct, ar putea rezida în victim cache fara sa dea nastere la conflicte. Decizia de a plasa un bloc în cache-ul principal sau în victim cache (în caz de miss) este facuta cu ajutorul unei informatii de stare asociate blocurilor din cache. Bitii de stare contin informatii despre istoria blocului. Aceasta idee a fost propusa de McFarling, care foloseste informatia de stare pentru a exclude blocurile sigure din cache-ul mapat direct, reducând înlocuirile ciclice implicate de acelasi bloc. Aceasta schema, numita excludere dinamica, reduce miss-urile de conflict în multe cazuri. O predictie gresita implica un acces în nivelul urmator al ierarhiei de memorie contrabalansând eventuale câstiguri în

performanta. Schema este mai putin eficace cu blocuri mari, de capacitati tipice cache-urilor microprocesoarelor curente.

Pentru a reduce numarul de interschimbari dintre cache-ul principal si victim cache, Stiliadis si Varma au introdus un nou concept numit selective victim cache(SVC)[6].



**Figura 3.5.** Ierarhia de memorie pentru scema cu Selective Victim Cache

Cu SVC, blocurile aduse din memoria principală sunt plasate selectiv fie în cache-ul principal cu mapare directă fie în selective victim cache, folosind un algoritm de predicție euristic bazat pe istoria folosirii sale. Blocurile care sunt mai puțin probabil să fie accesate în viitor sunt plasate în SVC și nu în cache-ul principal. Predicția este de asemenea folosită în cazul unui miss în cache-ul principal pentru a determina dacă este necesară o schimbare a blocurilor conflictuale. Algoritmul obiectiv este de a plasa blocurile, care sunt mai probabil să fie referite din nou, în cache-ul principal și altele în victim cache.

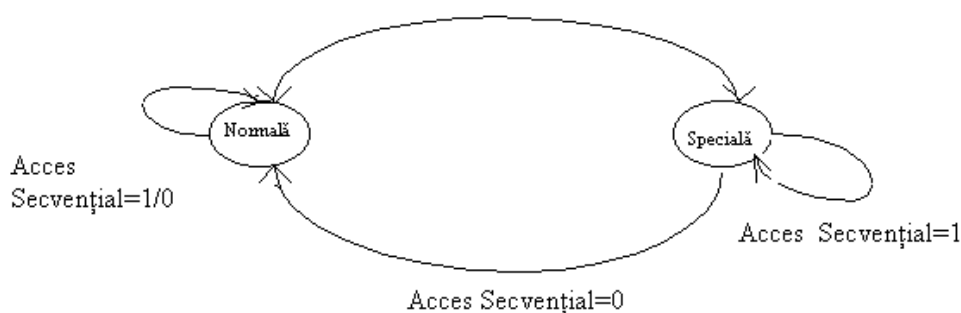
La referirea unui cache mapat direct, victim cache-ul este adresat în paralel; dacă rezulta miss în cache-ul principal, dar hit în victim cache, instrucțiunea (în cazul ICache-ului) este extrasă din victim cache. Penalitatea pentru miss în cache-ul principal, în acest caz este mult mai redusă decât costul unui acces în nivelul următor de memorie. Algoritmul de victim cache încearcă să izoleze blocurile conflictuale și să le memoreze doar unul în cache-ul principal restul în victim cache. Dacă numărul blocurilor conflictuale este suficient de mic să se potrivească în victim cache, atât rata de miss în nivelul următor de memorie cât și timpul mediu

de acces va fi îmbunătățit datorita penalității reduse implicate de prezenta blocurilor în victim cache.

Cache-ul mapat direct crește cu un bloc pentru a implementa conceptul de selective victim cache. Acest bloc adițional se numește *bloc tranzitoriu*, și este necesar pentru două motive. Primul ar fi acela că, blocul tranzitoriu este folosit de algoritmul de predicție pentru referiri secvențiale într-un același bloc. Hardware-ul este capabil să determine accese secvențiale, folosind semnalul “Acces Secvențial” activat de CPU, când referirea curentă se face în același bloc ca și cel anterior. Semnalul este folosit de către cache pentru a evita actualizarea bitilor de stare folosiți de algoritmul de predicție la referințe repetate în același bloc tranzitoriu. Al doilea motiv constă în faptul că, atunci când are loc un hit în victim cache și algoritmul de predicție decide să nu se interschimbe blocurile, blocul corespundent este copiat din victim cache în blocul tranzitoriu. Astfel, blocul tranzitoriu servește ca buffer, accesele secvențiale la acel bloc fiind satisfăcute direct din acest buffer la timpul de acces al cache-ului principal. Similar, la un miss în următorul nivel de memorie, algoritmul de predicție va decide să plaseze blocul sosit în victim cache și în blocul tranzitoriu.

Întrucât un al doilea sau un al n-lea acces consecutiv în același bloc în cache-ul principal poate fi servit din blocul tranzitoriu, acestuia îi este adăugat un bit de stare pentru a adresa cache-ul principal. Acest bit de stare urmărește starea datei din blocul tranzitoriu. Când starea este *normală*, adresa sosită pe bus este decodificată pentru a accesa cache-ul principal în mod obișnuit; când starea este *specială*, accesul se face în blocul tranzitoriu. Figura următoare arată tranzițiile dintre cele două stări. Mai jos se prezintă acest algoritm sub forma de “mașină secvențială de stare”.

Data Transferată în Blocul Tranzitoriu



**Figura 3.6.** Mașina secvențială de stare și tranzițiile ei

Inițial starea mașinii este resetată în stare *normală*. Dacă avem un miss în cache-ul mapat direct, acesta este servit fie de victim cache fie de

nivelul urmator de memorie. În fiecare din cazuri, algoritmul de predicție este folosit pentru a determina care bloc urmează a fi memorat în cache-ul principal. Dacă algoritmul de predicție plasează blocul accesat în cache-ul principal, starea mașinii rămâne în stare normală. Altfel, blocul este copiat în blocul tranzitoriu din acest cache și mașina tranzitează în starea *specială*. Referirea secvențială a aceluiași bloc păstrează semnalul “Acces Secvențial” activat iar mașina în starea *specială*. Datele se extrag din blocul tranzitoriu. Primul acces nesecvențial resetează starea mașinii în stare *normală*, distingându-se trei cazuri distincte, pe care le vom discuta mai jos.

### Algoritmul Selective Victim Cache

1. **Hit în cache-ul principal:** dacă cuvântul este găsit în cache-ul principal, el este extras pentru CPU. Nu este nici o diferență față de cazul cache-ului mapat direct. Singura operație suplimentară este o posibilă actualizare a bitilor de stare folosiți de schema de predicție. Actualizarea se poate face în paralel cu operația de fetch și nu introduce întârzieri suplimentare.
2. **Miss în cache-ul principal, hit în victim cache:** în acest caz, cuvântul este extras din victim cache în cache-ul mapat direct și înaintat CPU. Un algoritm de predicție este invocat pentru a determina dacă va avea loc o interschimbare între blocul referit și blocul conflictual din cache-ul principal. Dacă algoritmul decide că blocul din victim cache este mai probabil să fie referit din nou decât blocul conflictual din cache-ul principal se realizează interschimbarea; altfel blocul din victim cache este copiat în blocul tranzitoriu al cache-ului principal iar mașina secvențială de stare trece în starea specială. Datele pot fi înaintate CPU. În ambele cazuri blocul din victim cache este marcat drept cel mai recent folosit din lista LRU. În plus, biții de predicție sunt actualizați pentru a reflecta istoria acceselor.
3. **Miss atât în cache-ul principal cât și în victim cache:** dacă cuvântul nu este găsit nici în cache-ul principal nici în victim cache, el trebuie extras din nivelul următor al ierarhiei de memorie. Aceasta înseamnă că fie blocul corespondent din cache-ul principal este “gol”, fie noul bloc este în conflict cu un alt bloc memorat în cache (mai probabil). În primul caz, noul bloc este adus în cache-ul principal iar victim cache-ul nu este afectat. În cel de-al doilea caz, trebuie aplicat algoritmul de predicție pentru a determina care din blocuri este mai probabil să fie referit pe viitor. Dacă blocul care sosește din memoria centrală are o probabilitate mai mare decât blocul conflictual din cache-ul principal, ultimul este mutat în victim cache și noul bloc îi ia locul în cache; altfel, blocul sosit este direcționat spre victim cache și copiat în blocul tranzitoriu al cache-

ului mapat direct, de unde poate fi accesat mai iute de catre CPU. Masina secventiala de stare trece în starea speciala iar bitii de predictie sunt actualizati.

Diferenta de esenta dintre schema prezentata (*selective victim cache*) si conceptul de victim cache simplu se observa în cazurile 2 si 3. În cazul 2, blocurile conflictuale din cache-ul principal si cele din victim cache sunt întotdeauna schimbate în cazul folosirii victim cache-ului traditional, pe când schema prezentata face acest lucru într-un mod selectiv, euristic. Similar, în cazul 3, prin folosirea victim cache-ului obisnuit blocurile din memorie sunt întotdeauna plasate în cache-ul principal, pe când în cazul *Selective Victim Cache*-ului plaseaza aceste blocuri selectiv în cache-ul principal sau în victim cache. Orice algoritm de înlocuire poate fi folosit pentru victim cache. LRU (cel mai putin recent referit) pare sa fie cea mai buna alegere, întrucât scopul victim cache-ului este de a captura cele mai multe victime recent înlocuite si victim cache-ul este de dimensiune mica.

### Algoritmul de Predictie

Scopul algoritmului de predictie este de determina care din cele doua blocuri conflictuale este mai probabil sa fie referit pe viitor. Blocul considerat cu o probabilitate mai mare de acces în viitor este plasat în cache-ul principal, celalalt fiind plasat în victim cache. Astfel, daca blocul din victim cache este pe viitor înlocuit datorita capacitatii reduse a victim cache-ului, impactul ar fi mai putin sever decât alegerea opusa (interschimbarea permanenta a blocurilor din cazul schemei cu victim cache obisnuit).

Algoritmul de predictie se bazeaza pe algoritmul de excludere dinamica propus de McFarling [7]. Algoritmul foloseste doi biti de stare asociati fiecarui bloc, numiti *hit bit* si *sticky bit*. Hit bit este asociat logic cu blocul din nivelul 1 (L1 - level one) al cache-ului care se afla pe nivelul 2 (L2) sau în memoria centrala. Hit bit egal cu 1 logic indica, faptul ca a avut cel putin un acces cu hit la blocul respectiv de când el a parasit cache-ul principal (cache-ul de pe nivelul L1). Hit bit egal cu 0 înseamna ca blocul corespunzator nu a fost deloc accesat de când a fost înlocuit din cache-ul principal. Într-o implementare ideala, bitii de hit sunt mentinuti în nivelul L2 de cache sau în memoria principala si adusi în nivelul L1 de cache cu blocul corespondent. Daca blocul este înlocuit din cache-ul principal (L1 cache), starea bitului de hit trebuie actualizata în L2 cache sau în memoria centrala. Când un bloc, sa-l numim  $\alpha$ , a fost adus în cache-ul principal, bitul sau sticky este setat. Fiecare secventa cu hit la blocul  $\alpha$  reîmprospateaza bitul sticky la valoarea 1. La referirea unui bloc conflictual, fie acesta  $\beta$ , daca algoritmul de predictie decide ca blocul sa nu fie înlocuit din cache-ul



principal atunci bitul sticky este resetat. Dacă un acces ulterior în cache-ul principal intra în conflict cu blocul care are bitul sticky resetat, atunci blocul va fi înlocuit din cache-ul principal. De aceea, sticky bit de valoare 1 pentru blocul  $\alpha$  semnifica faptul ca nu a avut loc nici o referire la un bloc conflictual cu  $\alpha$ , de la ultima referire a acestuia.

Este usor de înțeles rolul blocului tranzitoriu în algoritmul de predicție. Dacă algoritmul trateaza toate fetch-urile în același fel, accesese secventiale în același bloc vor seta întotdeauna bitul sticky. Algoritmul de predicție va fi incapabil sa determine dacă blocul a fost referit repetat în interiorul unei bucle, sau dacă mai mult decât un cuvânt din același bloc a fost extras din cache fara o referinta intervenita la un alt bloc. O solutie similara a acestei probleme a fost propusa și în [7].

```

Cazul 1: Accesarea blocului  $\beta$ , hit în cache-ul principal
  Actualizează biții hit și sticky
  hit[ $\beta$ ] ← 1; sticky[ $\beta$ ] ← 1;
Cazul 2: Accesarea blocului  $\beta$ , hit în victim cache
  Fie  $\alpha$  blocul conflictual din cache-ul principal
  if sticky[ $\alpha$ ] = 0 then
    interschimbă  $\alpha$  cu  $\beta$ 
    sticky[ $\beta$ ] ← 1; hit[ $\beta$ ] ← 1
  else
    if hit[ $\beta$ ] = 0 then
      sticky[ $\alpha$ ] ← 0;
      copiază  $\beta$  în blocul tranzitoriu
    else
      interschimbă  $\alpha$  cu  $\beta$ 
      sticky[ $\beta$ ] ← 1; hit[ $\beta$ ] ← 0;
    endif
  endif
Cazul 3: Accesarea blocului  $\beta$ , miss atât în cache-ul principal cât și în victim cache
   $\alpha$  este blocul conflictual din cache-ul principal
  if sticky[ $\alpha$ ] = 0 then
    mută  $\alpha$  în victim cache
    transferă  $\beta$  în cache-ul principal
    sticky[ $\beta$ ] ← 1; hit[ $\beta$ ] ← 1;
  else
    if hit[ $\beta$ ] = 0 then
      transferă  $\beta$  în victim cache
      copiază  $\beta$  în blocul tranzitoriu
      sticky[ $\alpha$ ] ← 0;
    else
      mută  $\alpha$  în victim cache
      transferă  $\beta$  în cache-ul principal
      sticky[ $\beta$ ] ← 1; hit[ $\beta$ ] ← 0;
    endif
  endif

```

**Figura 3.7.** Algoritmul de Selective Victim Cache

În algoritmul Selective Victim Cache prezentat în figura anterioară, se disting trei cazuri: în primul caz, un hit în cache-ul principal setează bitii de stare hit și sticky. În al doilea caz, blocul accesat, fie acesta  $\beta$ , se considera rezident în victim cache. Acesta implică un conflict între blocul  $\beta$  și cel din cache-ul principal, notat  $\alpha$ . În acest caz, algoritmul de predicție este aplicat pentru a determina dacă va avea loc o interschimbare. Dacă bitul sticky al lui  $\alpha$  este 0, semnificând faptul că blocul nu a fost accesat de la conflictul anterior la acest bloc, noul bloc  $\beta$  primește o prioritate superioară lui  $\alpha$ , determinând o interschimbare. De asemenea, dacă bitul hit al lui  $\beta$  este setat pe 1, acestuia îi este dată o prioritate mai mare decât lui  $\alpha$ , și ele sunt interschimbate. Dacă bitul sticky al lui  $\alpha$  este 1 și bitul hit al lui  $\beta$  este 0, accesul este satisfăcut din victim cache și nu are loc nici o interschimbare (se considera că blocul  $\beta$  nu este suficient de “valoros” pt. a fi adus în cache-ul principal). Bitul sticky aferent lui  $\alpha$  este resetat astfel încât o secvență următoare care implică conflict la acest bloc va determina mutarea lui  $\alpha$  din cache-ul principal. În final, cazul 3 al algoritmului prezintă secvența de acțiuni care au loc în cazul unor accese cu miss atât în cache-ul principal cât și în victim cache. Secvența este similară cu cea de la cazul 2, cu excepția faptului că, destinația blocului sosit se alege fie cache-ul principal fie victim cache-ul. În situația cu victim cache simplu, blocul conflictual din cache-ul principal era mutat în victim cache înainte să fie înlocuit. În cazul de față când blocul sosit este plasat în victim cache, el este de asemenea plasat și în blocul tranzitoriu pentru a servi eventualele viitoare referințe secvențiale.

Operațiile algoritmului de Selective Victim Cache pot fi ilustrate printr-o secvență de instrucțiuni repetate  $(\alpha^m \beta \gamma)^n$  implicând trei blocuri conflictuale  $\alpha$ ,  $\beta$  și  $\gamma$ . Notatia  $(\alpha^m \beta \gamma)^n$  reprezintă executia unei secvențe compuse din două bucle de program imbricate, bucla interioară constând în  $m$  referințe la blocul  $\alpha$ , urmate de accesul la blocurile  $\beta$  și  $\gamma$  în bucla exterioară, care se execută de  $n$  ori. Primul acces îl aduce pe  $\alpha$  în cache-ul principal și atât bitul hit cât și cel sticky sunt setați după cel mult două referințe ale acestuia. Când  $\beta$  este referit, bitul sau hit este inițial 0. De aceea el nu-l înlocuiește pe  $\alpha$  în cache-ul principal și este memorat în victim cache. Conflictul generat determină resetarea bitului sticky al lui  $\alpha$ . Când  $\gamma$  este referit, bitul sau hit este 0, dar bitul sticky al lui  $\alpha$  este tot 0. Deci,  $\gamma$  îl înlocuiește pe  $\alpha$ . Blocul  $\alpha$  este transferat în victim cache și bitul sau hit rămâne 1 datorită referinței sale anterioare. În ciclul următor când  $\alpha$  este referit din nou, el este mutat înapoi în cache-ul principal datorită bitului sau de hit, rămas setat. Astfel, dacă victim cache-ul este suficient de mare pentru

a încape atât  $\alpha$  și  $\beta$ , sau  $\beta$  și  $\gamma$ , doar trei referințe ar fi servite de către al doilea nivel de cache. Numarul total de interschimbari nu va depăși  $2n$ . În cazul unei scheme simple de predicție fără victim cache, numarul total de referințe cu miss ar fi  $2n$ , în cazul în care schema poate rezolva doar conflicte între două blocuri. Un victim cache simplu, fără predicție ar fi capabil să reducă numarul de accese cu miss la cel de-al doilea nivel de cache la 3, dar ar necesita  $3n$  interschimbari în timpul execuției buclei exterioare, cu influențe evident defavorabile asupra timpului global de procesare. Aceasta arată avantajul Selective Victim Cache-ului superioară altor scheme care tratează conflicte implicând mai mult de două blocuri. De reținut că, penalitatea pentru o predicție greșită în această schemă este limitată la accesul în victim cache și o posibilă interschimbare, presupunând că victim cache-ul este suficient de mare pentru a reține blocurile conflictuale între accese.

### Metrici de performanță

Metricile de performanță folosite sunt rata de miss la nivelul L1 de cache și timpul mediu de acces la ierarhia de memorie. În cazurile cu victim cache simplu și cel cu victim cache selectiv, folosim de asemenea și numarul de interschimbari între cache-ul principal și victim cache ca metrică de comparație. Rata de miss la nivelul L1 de cache se bazează pe numarul de referințe propagate în nivelul următor al ierarhiei de memorie. În caz de miss în cache-ul principal acestea sunt servite de către victim cache, fiind platită o penalitate pentru accesul în victim cache precum și pentru interschimbarile de blocuri rezultate între cache-ul principal și victim cache. Timpul mediu de acces la ierarhia de memorie ia în calcul și aceste penalizări și de aceea este un bun indicator al performanței memoriei sistemului, desigur mai complet decât rata de miss în nivelul L1 de cache.

Deoarece obiectivul principal al victim cache-ului este de a reduce numarul de *miss-uri de conflict* în cache-ul mapat direct, este de asemenea important să comparăm procentul de miss-uri de conflict eliminate prin fiecare din scheme. Miss-urile de conflict sunt de obicei calculate ca miss-uri suplimentare ale unui cache, comparate cu un cache complet asociativ de aceeași mărime și care dezvoltă un același algoritm de înlocuire. Algoritmul folosit este LRU (Least Recently Used, cel mai de demult nefolosit) [8, 9]. Deși acest model pare intuitiv corect, el poate genera și rezultate eronate uneori. De exemplu, numarul total de accese cu miss poate uneori să crească când crește asociativitatea, iar politica de înlocuire LRU este departe de a fi cea optimă pentru unele din programe. Această anomalie poate fi evitată prin folosirea algoritmului optim (OPT) în loc de LRU ca bază pentru clasificarea miss-urilor în cache [10]. Algoritmul OPT, prima dată studiat în

[11], înlocuiește întotdeauna blocul care va fi înlocuit cel mai târziu în viitor. Un astfel de algoritm s-a dovedit a fi optimal pentru toate pattern-urile de program, ratele de miss fiind cele mai mici în acest caz, dintre toate politicile de înlocuire folosite.

### Modelarea timpului de acces la ierarhia de memorie

Estimarea timpului de acces se face ca o funcție de mărimea cache-ului, dimensiunea blocului, asociativitatea și organizarea fizică a cache-ului. Presupunem ca penalitatea medie pentru un miss în cache-ul de pe nivelul L1 este același pentru toate arhitecturile și este de  $p$  ori ciclul de bază al cache-lui principal, unde  $p$  variază între 1 și 100. Considerăm un bloc de dimensiune de 32 octeți, penalitate în caz de miss de 10-50 de cicluri, în caz ca nu există un nivel L2 de cache. Câteva studii, precum [12] raportează ca penalitatea pentru un miss poate fi până la 100-200 de cicluri când nu este inclus un al doilea nivel de cache.

Parametrii	C ache Mapat Direct	V ictim Cache Simplu	Selective Victim Cache	2-way cache
Referințe totale	R			
Număr total de miss-uri în L1 cache	$M_d$	$M_v$	$M_s$	$M_2$
Hit-uri în victim cache		$h_v$	$h_s$	
Interschimbări între victim cache și cache-ul principal		$I_v$	$I_s$	
Timp mediu de acces	$T_d$	$T_v$	$T_s$	$T_2$
Timp mediu de penalizare (în cicluri CPU)	p			
Perioada de tact CPU	clk			clk <sub>2-way</sub>

Tabelul 3.2.

### Notatiile folosite în calculul timpului de acces

Tabelul 3.2., rezumă toate notatiile privitoare la calculul timpului de acces la memorie.  $R$  este numărul total de referințe generate de programele de tip trace. În cazul cache-ului simplu mapat direct,  $M_d$  reprezintă numărul total de accese cu miss în cache. În cazul folosirii unui victim cache obișnuit sau a unui Selective Victim Cache,  $M_v$  și  $M_s$  sunt folosite pentru a nota numărul de accese cu miss în primul nivel de cache care sunt servite de al doilea nivel al ierarhiei de memorie. Numărul total de hituri în victim cache pentru aceste scheme le-am notat cu  $h_v$  și respectiv  $h_s$ .

Timpul mediu de acces pentru un cache mapat direct se calculeaza astfel:

$$T_d = \text{clk} \times \frac{R + p \times M_d}{R} = \text{clk} \left( 1 + p \cdot \frac{M_d}{R} \right) \quad (3.1)$$

Pentru fiecare miss, sunt necesari  $p$  cicli suplimentari. Presupunem ca cei  $p$  cicli includ toate “cheltuielile” CPU-ului. În cazul victim cache-ului simplu, o penalitate de  $p$  cicli este produsa la fiecare miss în primul nivel al ierarhiei de memorie. În plus, pentru fiecare referinta servita de catre victim cache, o penalizare suplimentara de cel putin un ciclu este platita pentru accesarea în victim cache, iar operatia de interschimbare dintre cache-ul principal si victim cache necesita o penalitate de câtiva cicli (presupunem 3 cicli, de altfel minimali). Aceasta penalitate ar fi chiar mai mare daca matricea memoriei cache-ului mapat direct sau a victim cache-ului este organizata fizic în cuvinte egale cu o fractiune din marimea blocului de cache. De exemplu, blocul poate avea dimensiunea de 32 de octeti, dar cache-ul poate fi organizat în cuvinte de 8 sau 16 octeti. În acest caz penalitatea pentru interschimbare va fi multiplicata cu raportul:

$$\frac{\text{Dimensiune a blocului de cache}}{\text{Mărimea cuvântului de date al cache - ului}}$$

Astfel, timpul mediu de acces la memorie pentru un sistem cu victim cache simplu, se calculeaza astfel:

$$T_v = \text{clk} \left( 1 + p \cdot \frac{M_v}{R} + \frac{h_v + 3 \times I_v}{R} \right) \quad (3.2)$$

Într-un sistem cu *Selective Victim Cache*, timpul mediu de acces la memorie poate fi calculat în acelasi fel ca în cazul victim cache-ului simplu. O penalitate de  $p$  cicli este aplicata de câte ori este accesat nivelul urmator al ierarhiei de memorie. Un ciclu suplimentar este necesar la un hit în victim cache si 3 cicli suplimentari pentru operatia de interschimbare de blocuri. Timpul mediu de acces la memorie este dat de formula:

$$T_s = \text{clk} \left( 1 + p \cdot \frac{M_s}{R} + \frac{h_s + 3 \times I_s}{R} \right) \quad (3.3)$$

Se observa ca, chiar daca rata de miss  $M_s$  este foarte aproape de cea a victim cache-ului simplu, sistemele ce folosesc *selective victim cache* pot totusi oferi o îmbunatatire substantiala a performantei superioara sistemelor cu victim cache simplu, din urmatoarele doua motive:

1. Rata de miss locala în cache-ul principal poate fi îmbunatatita printr-un plasament mai bun al blocurilor.
2. Numarul de interschimbari poate descreste ca rezultat al algoritmului de predictie. Aceasta reduce media penalizarii pentru accesese care sunt servite de victime cache, în special când numarul de cicli folositi la o interschimbare este ridicat.

Se foloseste timpul mediu de acces la memorie pentru un sistem cu un cache “2-way associative”, ca o referinta pentru evaluarea performantei sistemului cu *selective victim cache*. Pentru estimarea timpului de acces la un cache cache “2-way associative”, se presupune ca penalitatea în nanosecunde pentru al doilea nivel al ierarhiei de memorie ramâne aceeași ca și în cazul cache-ului mapat direct. Pot exista unele constrângeri de implementare care afecteaza penalitatea în caz de miss. Accesarea magistralei sistem, poate implica o secventa de operatii care necesita un numar fix de perioade de tact. Astfel, numarul de cicli necesari pentru deservirea unui miss nu poate descreste proportional cu cresterea perioadei de tact CPU, rezultând într-o penalizare mai mare în cazul cache-ului cache “2-way associative”. Timpul mediu de acces la memorie acestui cache este estimat de relatia:

$$T_2 = clk \left( \frac{clk_{2-way}}{clk} + p \cdot \frac{M_2}{R} \right) \quad (3.4)$$

Primul termen reprezinta timpul de acces la cache iar al doilea termen este timpul de acces la nivelul urmator de memorie. Comparând aceasta ecuatie cu (3.1), orice îmbunatatire a performantei se datoreaza celui de-al doilea termen, în timp ce primul termen reprezinta câstigul introdus prin asociativitatea cache-ului asupra timpului de acces. Daca îmbunatatirea datorata celui de-al doilea termen nu este adecvata pentru a compensa acest câstig, performanta cache-ului 2-asociativ poate fi inferioara celei a cache-ului mapat direct.

Îmbunatatirea în performanta obtinuta atât prin victim cache cât și prin selective victim cache variaza în functie de trace, depinzând de marimea lor și de numarul de conflicte de acces pe care schema de predictie le elimina. Chiar pentru programe mici, *selective victim cache* asigura o îmbunatatire semnificativa comparata cu victim cache-ul simplu, când cache-ul nu este

suficient de mare pentru a memora întreg programul. Stiliadis si Varma, în [6], afirma ca cea mai buna îmbunatatire a performantei în termenii ratei de miss, de aproximativ 33%, este obtinuta pentru cache-uri de instructiuni de 8 pâna la 16 Kocteti. Pentru cache-uri mai mari de dimensiuni 64 pâna la 128 Kocteti, majoritatea trace-urilor pot fi usor memorate în cache si miss-urile de conflict reprezinta un mic procent din numarul total de accese cu miss. În aceste cazuri victim cache-ul simplu este capabil sa elimine majoritatea conflictelor, si performanta sa este comparabila cu cea a selective victim cache-ului.

O problema potentiala cu algoritmul de predictie dezvoltat în *selective victim cache* este aceea ca, performanta sa se poate degrada odata cu cresterea dimensiunii blocului, ca rezultat al partajarii bitilor de stare de cuvinte din interiorul aceluiasi bloc. *Selective victim cache* asigura o îmbunatatire semnificativa a ratei de miss indiferent de dimensiunea blocului. Pentru blocuri de dimensiune de 4 octeti, selective victim cache reduce rata de miss cu aproximativ 30% fata de o arhitectura cache cu mapare directa, în timp ce pentru blocuri de dimensiuni de 64 octeti, rata de miss este redusa cu aproape 50%. Aceste rezultate contrazic comportamentul excluziunii dinamice [7], unde reducerea ratei de miss scade cu cresterea dimensiunii blocului. Rezultatele se datoreaza mentinerii la aceeasi dimensiune a victim cache-ului în termenii numarului de blocuri, astfel ca, o crestere a dimensiunii blocului determina o crestere efectiva a capacitatii cache-ului. Aceasta crestere în capacitate compenseaza mai mult decât orice degradare a ratei de predictii prin cresterea dimensiunii blocului. Acest fapt nu creste semnificativ complexitatea implementarii victim cache-ului, deoarece asociativitatea ramâne aceeaasi. Indiferent de marimea cache-ului, numarul de interschimbari prin folosirea selective victim cache-ului este redus cu 50% sau mai mult fata de folosirea unui victim cache simplu. Când dimensiunea blocului este mai mare, în functie de implementare, operatia de interschimbare poate necesita câtiva cicli. Prin îmbunatatirea atât a ratei de hit cât si a numarului de interschimbari, selective victim cache-ul poate creste semnificativ performanta primului nivel de cache, superioara victim cache-ului simplu si cache-ului "two-way set associative". Pentru diverse dimensiuni de cache, îmbunatatirea ratei de miss la cache-ul two-way semiasociativ nu este suficienta pentru a compensa cresterea timpului de acces, rezultând într-o crestere neta a timpului mediu de acces la memorie superior cache-urilor mapate direct. Cea mai mare crestere în performanta a selective victim cache-ului superioara cache-ului semiasociativ, este aproximativ 25%, obtinuta pentru dimensiuni de cache-uri de 16-64 Kocteti.

Politica de scriere implementata este write back cu write allocate. Pentru a mentine proprietatea de incluziune multinivel, blocurile din cache-ul de pe nivelul L1 au fost invalidate când au fost înlocuite pe nivelul L2 de cache. Desi selective victim cache-ul produce îmbunatatiri semnificative ale ratei de hit comparativ cu cache-urile mapate direct de dimensiune redusa, performanta sa este inferioara celei obtinuta folosind victim cache simplu. De fapt, îmbunatatirile ratei de miss variaza semnificativ în functie de trace-uri. Sunt doua motive care explica acest rationament: primul este natura acceselor la memorie a programelor folosite. Programele care implica o alocare statica a datelor si structurilor de date, arata o îmbunatatire cu selective victim cache, ca rezultat al folosirii algoritmului de predictie. Structurile de date principale ale acestor programe sunt vectori. Algoritmul de predictie este capabil sa rezolve un numar mare de conflicte în aceste cazuri, fara sa acceseze al doilea nivel. În programele cu alocare dinamica a memoriei si folosire a extensiei de pointeri, conflictele sunt mai greu de rezolvat de catre algoritmul de predictie. Ratele de miss în situatia folosirii selective victim cache-ului pentru aceste trace-uri sunt mai mari decât în cazul folosirii unui simplu victim cache. În timp ce pentru selective victim cache presupunem un al doilea nivel de cache si mentinem proprietatea de incluziune, simularea victim cache-ului simplu presupune ca al doilea nivel al ierarhiei este memoria principala.

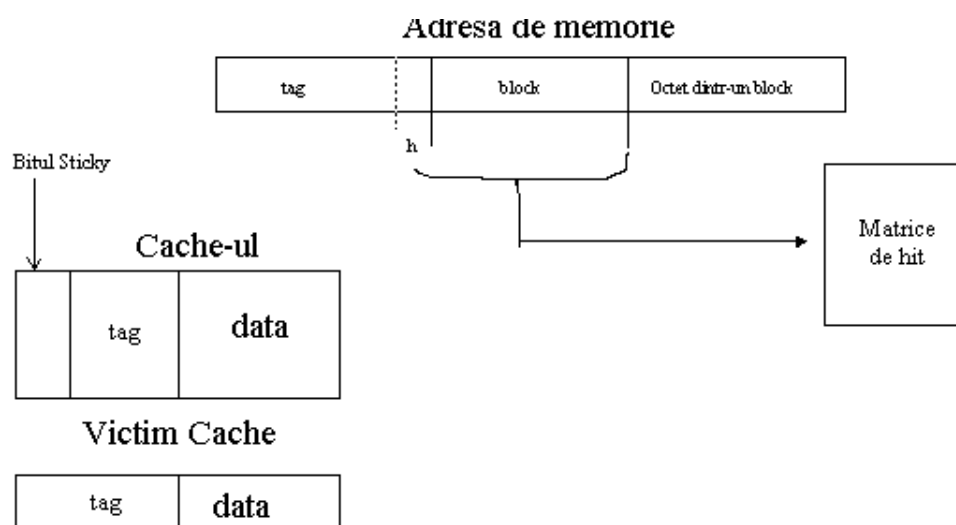
Chiar daca îmbunatatirile asupra ratei de miss sunt mai putin convingatoare în cazul cache-urilor de date comparativ cu cel de instructiuni, selective victim cache poate reduce timpul mediu de acces la memorie pentru primul nivel al cache-ului de date prin reducerea numarului de interschimbari. Pentru cache-uri de dimensiuni pâna la 64 Kocteti, numarul de interschimbari pentru selective victim cache este mult mai mic decât cel pentru victim cache simplu. În câteva cazuri îmbunatatirea este mai mare de 50%. Numarul de interschimbari pentru victim cache simplu descreste sub selective victim cache pentru dimensiuni mai mari sau egale cu 128 Kocteti. Astfel, pentru cache-uri de 128 Kocteti, selective victim cache este capabil sa reduca rata de miss prin cresterea numarului de interschimbari. Desi, victim cache-ul simplu, pare sa se comporte mai bine decât selective victim cache-ul, pentru cache-uri de dimensiuni sub 8 Kocteti, din punct de vedere al timpului mediu de acces. Performanta cache-ului semiasociativ este inferioara ambelor (simplu victim cache si selective victim cache), dar superioara cache-ului mapat direct.

Trace-urile de date sunt caracterizate de o rata de miss mai mare decât trace-urile de instructiuni. În plus miss-urile de conflict sunt raspunzatoare de procentul ridicat din rata totala de miss. Sunt doua consecinte ale acestui fapt: primul, efectul reducerii ratei de miss asupra timpului de acces la



memorie este mai pronunțat, iar al doilea, cache-urile semiasociative pe 2 cai asigură îmbunătățiri în timpul mediu de acces chiar și pentru cache-uri mari, spre deosebire de cache-urile de instrucțiuni, unde avantajul obținut prin reducerea ratei de miss datorată creșterii asociativității este mai mare decât câștigul obținut asupra timpului de acces la cache. Concluzionăm că, atât victim cache-ul simplu cât și selective victim cache-ul sunt mult mai puțin atractive pentru folosire în cache-ul de date comparativ cu cel de instrucțiuni.

În continuare se analizează modul în care informațiile de stare de care are nevoie schema de predicție dezvoltată în selective victim cache pot fi stocate în interiorul ierarhiei de memorie. După cum s-a arătat schema selective victim cache-ului necesită doi biți de stare pentru a păstra informații despre istoria blocurilor din cache - bitul sticky și bitul hit. Bitul sticky este asociat logic cu blocul din cache-ul principal. De aceea este normal să se memoreze acest bit în cache-ul mapat direct ca parte a fiecărui bloc. Pe de altă parte, bitul hit este asociat logic cu fiecare bloc din memoria principală. Astfel, într-o implementare perfectă, bitii de hit trebuie memorati în memoria principală. Aceasta abordare este impracticabilă în majoritatea cazurilor.



**Figura 3.8.** Implementarea schemei de memorare a bitilor de hit

Dacă ierarhia de memorie include un la doilea nivel de cache, este posibil să se memoreze bitii de hit în cadrul blocurilor din acest nivel. Când un bloc este adus pe nivelul L1 de cache din nivelul L2, o copie locală a bitului de hit este memorată în blocul de pe nivelul L1. Aceasta elimină nevoia de acces a nivelului L2 de cache de fiecare dată când bitul hit este

actualizat de catre algoritmul de predictie. Când blocul este înlocuit din nivelul L1 de cache, bitul hit corespondent este copiat în nivelul L2. O problema ar fi însa aceea ca, multiple locatii din memoria principala sunt fortate sa împarta acelasi bit de pe nivelul L2. Astfel, când un bloc este înlocuit de pe nivelul L2 de cache, toate informatiile lui de stare se pierd, reducând eficacitatea algoritmului de predictie. De fiecare data când un bloc este adus pe nivelul L2 de cache din memoria principala, bitul hit al sau trebuie setat la o valoare initiala. Pentru o secventa specifica de acces, valori initiale diferite pot produce rezultate diferite. Cu cache-urile de pe nivelul L2 de dimensiuni mari, efectul valorilor initiale este probabil mai mic.

O tratare alternativa este de a mentine bitii de hit în interiorul CPU, în cadrul nivelului L1 de cache. În abordarea lui Stiliadis si Varma, un sir de biti de hit numit *hit array* este mentinut ca parte a nivelului L1 de cache. Fiecare bloc de memorie este asociat unuia din bitii acestui sir. Lungimea sirului este inevitabil mai mica decât numarul maxim de blocuri care pot fi adresate. Deci, mai mult de un bloc va fi mapat aceluasi bit de hit, cauzând datorita interferentelor un aleatorism ce trebuie introdus în procesul de predictie. Desi, aceasta poate potential reduce performanta selective victim cache-ului, rezultatele simularilor nu confirma acest lucru chiar si pentru siruri de hit de dimensiune modesta.

Implementarea nivelului L1 de cache sistem este prezentata în Figura 4. Bitul sticky este mentinut cu fiecare bloc în cache-ul principal. Nici un bit de stare nu este necesar în victim cache. Bitii de hit sunt pastrati în *hit array*, adresati de o parte a adresei de memorie. Dimensiunea sirului de hit bit este aleasa ca un multiplu al numarului de blocuri din cache-ul principal. Astfel,

$$\text{Dimensiunea sirului hit array} = \text{Numar de blocuri în cache-ul principal} \cdot H$$

unde  $H$  determina gradul de partajare a bitilor de hit de catre blocurile memoriei principale. Se presupune ca  $H$  este o putere a lui 2,  $H=2^h$ . *Hit array* poate fi adresat de adresa de bloc concatenata cu cei mai putin semnificativi biti  $h$ , din partea de tag a adresei. O valoare mare pentru  $H$  implica mai putine interferente între blocurile conflictuale la bitii de hit. Daca  $H$  este ales ca raport dintre dimensiunea cache-ului de pe nivelul L2 si cea a cache-ului de pe nivelul L1 (principal), atunci efectul este similar cu mentinerea bitilor hit în nivelul L2 de cache.

O problema a implementarii schemei atât a victim cache-ului cât si a selective victim cache-ului este costul implementarii victim cache-ului full asociativ. Chiar si atunci când aceste cache-uri sunt foarte mici, costul hardware al memoriei adresabila contextual (CAM) poate fi semnificativ.

Cache-urile complet asociative cu algoritm de înlocuire LRU pot uneori suferi de o rata de miss mai ridicata decât cache-urile two-way asociative deoarece algoritmul de înlocuire nu este cel optimal [6, 10]. Efectul ambelor probleme de mai sus poate fi diminuat prin reducerea asociativitatii victim cache-ului. Cu un victim cache semiasociativ pe 2 cai, nu se observa nici o crestere a ratei de miss la nivelul urmator al ierarhiei de memorie pentru nici o instructiune din trace-urile simulate, atât în victim cache simplu cât si în selective victim cache. Surprinzător, victim cache-ul semiasociativ pe 2 cai poate îmbunătăți rata de miss si timpul mediu de acces pentru mai multe trace-uri. Acest comportament se datoreaza algoritmului de înlocuire LRU dezvoltat în victim cache-ul complet asociativ. Blocurile mutate în victim cache-ul complet asociativ ca rezultat al conflictelor din cache-ul principal sunt înlocuite frecvent înainte de a fi accesate din nou. Victim cache-ul semiasociativ pe 2 cai asigura o mai buna izolare pentru blocurile sale în multe cazuri, micșorând rata de miss în victim cache. În plus, datorita dimensiunii sale reduse, miss-urile de conflict formeaza doar o mica fractiune din numarul total de accese cu miss în victim cache comparativ cu miss-urile de capacitate. Aceasta limiteaza îmbunătățirea ratei de miss prin cresterea asociativitatii victim cache-ului, chiar cu un algoritm optimal de înlocuire. Se observa ca, victim cache-ul full asociativ poate îmbunătăți dramatic rata de miss în cazul conflictelor ce implica mai mult de trei blocuri, blocurile conflictuale fiind retinute în victim cache între accese.

Cu un victim cache simplu continutul cache-ului principal mapat direct este neafectat de asociativitatea acestuia. Astfel, rata de miss locala ramâne neschimbata în timp ce se variaza asociativitatea victim cache-ului. Prin urmare toate îmbunătățirile efectuate asupra ratei de miss la nivelul L1 de cache pot fi atribuite îmbunătățirii ratei de miss locale a victim cache-ului. Cu victim cache-ul selectiv, asociativitatea poate afecta potential atât rata de miss locala a cache-ului principal cât si numarul de interschimbari dintre cele doua cache-uri. Comparatia timpului de acces tine cont de schimbarile aparute în rata de miss si numarul de interschimbari (substantial micșorat) si de aceea timpul mediu de acces reprezinta o masura mai buna pentru caracterizarea efectului de asociativitate al victim cache-ului asupra performantei sistemului. Chiar cu un victim cache mapat direct, timpul mediu de acces este mai mare sau egal decât cel din cazul victim cache-ului complet asociativ. Când folosim un victim cache de date semiasociativ pe 2 cai, rezultatele sunt mai proaste decât acelea cu un victim cache complet asociativ, atât pentru victim cache simplu cât si pentru victim cache-ul selectiv. Acest lucru nu surprinde, dând conflictelor de acces la date o natura aleatorie. Astfel, un cache complet asociativ poate fi înca atractiv

când este folosit ca si cache de date. Totusi, îmbunatatirile observate sunt mai mici.

Chiar daca nu este nici o îmbunatatire a ratei de hit în cache-ul principal, schema victim cache-ului selectiv poate totusi asigura o îmbunatatire a performantei superioara victim cache-ului simplu. Pentru schema cu SVC rezultatele demonstreaza ca îmbunatatirile de performanta sunt puternic determinate de impactul algoritmului de predictie asupra numarului de interschimbari cu cache-ul mapat direct. Algoritmul poate de asemenea contribui la o mai buna plasare a blocurilor în cache, reducând numărul de accese în victim cache si generând rate de hit ridicate în cache-ul mapat direct.

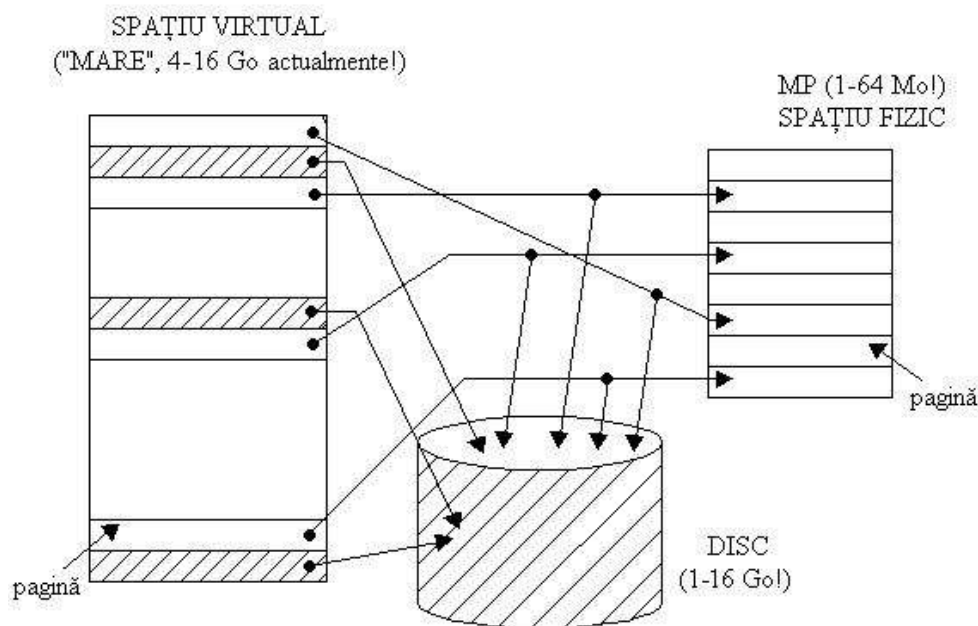
Folosirea victim cache-ului selectiv determina îmbunatatiri ale ratei de miss precum si ale timpului mediu de acces la memorie, atât pentru cache-uri mici cât si pentru cele mari (4Kocteti - 128 Kocteti). Simulari facute pe trace-uri de instructiuni a 10 benchmark-uri SPEC'92 arata o îmbunatatire de aproximativ 21% a ratei de miss, superioara folosirii unui victim cache simplu de 16 Kocteti cu blocuri de dimensiuni de 32 octeti; numărul blocurilor interschimbate între cache-ul principal si victim cache s-a redus cu aproximativ 70%.

### 3.2. MEMORIA VIRTUALA

Memoria virtuala reprezinta o tehnica de organizare a memoriei prin intermediul careia programatorul "vede" un spatiu virtual de adresare foarte mare si care, fara ca programatorul sa "simta", este mapat în memoria fizic disponibila. Uzual, spatiul virtual de adrese corespunde suportului disc magnetic, programatorul având iluzia prin mecanisme de memorie virtuala (MV), ca detine o memorie (virtuala) de capacitatea hard-discului si nu de capacitatea memoriei fizice preponderenta DRAM (limitata la  $64 \div 1024$  Mo la ora actuala).

În cazul MV, memoria principala este analoaga memoriei cache între CPU (*Central Processing Unit*) si memoria principala, numai ca de aceasta data ea se situeaza între CPU si discul hard. Deci memoria principala (MP) se comporta oarecum ca un cache între CPU si discul hard. Prin mecanisme de MV se mareste probabilitatea ca informatia ce se doreste a fi accesata de catre CPU din spatiul virtual (disc), sa se afle în MP, reducându-se astfel dramatic timpul de acces de la  $8 \div 15$  ms la  $45 \div 70$  ns în

tehnologiile actuale (1999) ! De obicei, spatiul virtual de adresare este împartit în entitati de capacitate fixa ( $4 \div 64$  Ko actualmente), numite pagini. O pagina poate fi mapata în MP sau pe disc.



**Figura 3.9.** Maparea adreselor virtuale în adrese fizice

În general, prin mecanismele de MV, MP contine paginile cel mai recent accesate de catre un program, ea fiind dupa cum am mai aratat, pe post de “cache” între CPU si discul hard. Transformarea adresei virtuale emisa de catre CPU într-o adresa fizica (existenta în spatiul MP) se numeste mapare sau translatare. Asadar mecanismul de MV ofera o functie de relocare a programelor (adreselor de program), pentru ca adresele virtuale utilizate de un program sunt relocate spre adrese fizice diferite, înainte ca ele sa fie folosite pentru accesarea memoriei. Aceasta mapare permite aceluiasi program sa fie încărcat si sa ruleze oriunde ar fi încărcat în MP, modificarile de adrese realizându-se automat prin mapare (fara MV un program depinde de obicei în executia sa de adresa de memorie unde este încărcat).

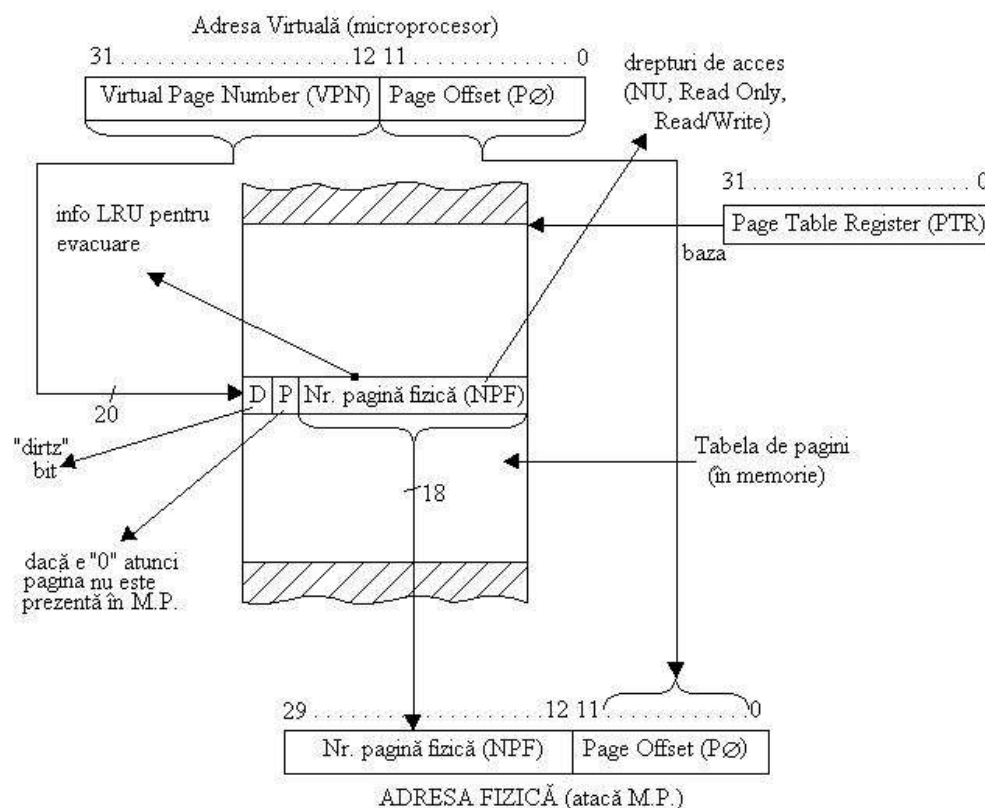
MV este un concept deosebit de util în special în cadrul sistemelor de calcul multiprogramate care - de exemplu prin “time-sharing” - permit executia cvasi-simultana a mai multor programe (vezi sistemul de operare

WINDOWS 2000, NT, Unix, Ultrix etc.). Fiecare dintre aceste programe are propriul sau spatiu virtual de cod si date ( având alocate un numar de pagini virtuale), dar în realitate toate aceste programe vor partaja aceeași MP, care va contine dinamic, pagini aferente diverselor procese. Paginile vor fi dinamic încărcate de pe disc în MP respectiv evacuate din MP pe disc (spre a permite încărcarea altora, mai “proaspete”).

Când o pagina accesata nu se gaseste în MP, ea va trebui adusa prin declansarea unui mecanism de exceptie, de pe disc. Acest proces – analogul miss-urilor de la cache-uri – se numeste “*page fault*” (PF). Evenimentul PF va declansa un mecanism de exceptie care va determina intrarea într-o subrutina de tratare a evenimentului PF. Aici – prin software deci – se va aduce de pe disc în MP pagina dorita dupa ce, fireste, în prealabil s-a evacuat eventual o alta pagina din MP. Acest proces este unul de lunga durata, necesitând câteva ms bune la ora actuala. Având în vedere multitaskingul, MV trebuie sa asigure si mecanismul de protectie a programelor (ex. sa nu permita unui program utilizator sa scrie zona de date sau cod a sistemului de operare sau a altui program, sa nu permita scrierea într-o pagina accesabila numai prin citire etc.).

În implementarea MV trebuie avute în vedere urmatoarele aspecte importante:

- ♦ paginile sa fie suficient de mari (4 ko ÷ 16 ko ... 64 ko) astfel încât sa compenseze timpul mare de acces la disc (9 ÷ 12 ms).
- ♦ organizari care sa reduca rata de evenimente PF, rezultând un plasament flexibil al paginilor în memorie (MP)
- ♦ PF-urile trebuie tratate prin software si nu prin hardware (spre deosebire de miss-urile în cache-uri), timpul de acces al discurilor permitând lejer acest lucru.
- ♦ scrierile în MV se fac dupa algoritmi tip “Write Back” si nu “Write Through” (ar consuma timp enorm).



**Figura 3.10.** Traducere adresa virtuala în adresa fizica

**Obs.** Fiecare program are propria sa tabela de pagini care mapeaza spatiul virtual de adresare al programului într-un spatiu fizic, situat în M.P.

Tabela de pagini + PC + registrele microprocesorului formeaza starea unui anumit program. Programul + starea asociata caracterizeaza un anumit proces (task). Un proces executat curent este activ, altfel el este inactiv. Comutarea de taskuri implica inactivarea procesului curent si activarea altui proces, inactiv pâna acum rezultând deci ca fiind necesara salvarea/restaurarea starii proceselor. Desigur, sistemul de operare (S.Ø.) trebuie doar sa reîncarce registrul pointer al adresei de baza a paginii (PTR) pentru a pointa la tabela de pagini aferenta noului proces activ.

### **Exceptia Page Fault (P.F. )**

Apare în cursul mecanismului de traducere a adresei virtuale în adresa fizica, daca bitul  $P = 0$ . Ca urmare, printr-o procedura de exceptie se

da controlul unui handler al S.Ø. în vederea tratării. Aici S.Ø. va trebui să decida ce pagină din M.P. va trebui evacuată în vederea încărcării noii pagini de pe disc. În general, ca principiu, se poate merge pe ideea LRU (“*Least Recently Used*”), adică va fi evacuată pagina care nu a mai fost accesată de către CPU de cel mai mult timp (se merge deci implicit pe principiul localității temporale).

**Exemplu:** CPU a accesat în ordine paginile: 10,12,9,7,11,10 iar acum accesează pagina 8 care nu este prezentă în MP  $\Rightarrow$  evacuează pagina 12 ! Dacă următorul acces generează PF  $\Rightarrow$  evacuează pagina 9, s.a.m.d.

**Obs.** Unele mașini (ex. Pentium) implementează în tabela de pagini câte un bit de referință pentru fiecare pagină. Acest bit este setat la fiecare accesare a acelei pagini. S.Ø. șterge periodic acești biți – nu înainte de a le memora starea – astfel încât să implementeze pentru fiecare pagină un contor; astfel, bazat pe starea de moment a acestor contoare, se stabilește care pagină va fi evacuată.

Scrierile în MP se desfășoară după următoarele principii:

- ♦ strategie similară cu cea de tip write-back de la memoriile cache (*copy-back*)
- ♦ se adaugă un “Dirty Bit” (D) în tabela de pagini pentru fiecare pagină. Bitul D e setat la fiecare scriere în pagină  $\Rightarrow$  la evacuare, o pagină având bitul D=0, nu are rost să se evacueze efectiv pe disc  $\Rightarrow$  pierdere mare de timp  $\Rightarrow$  minimizare scrieri !

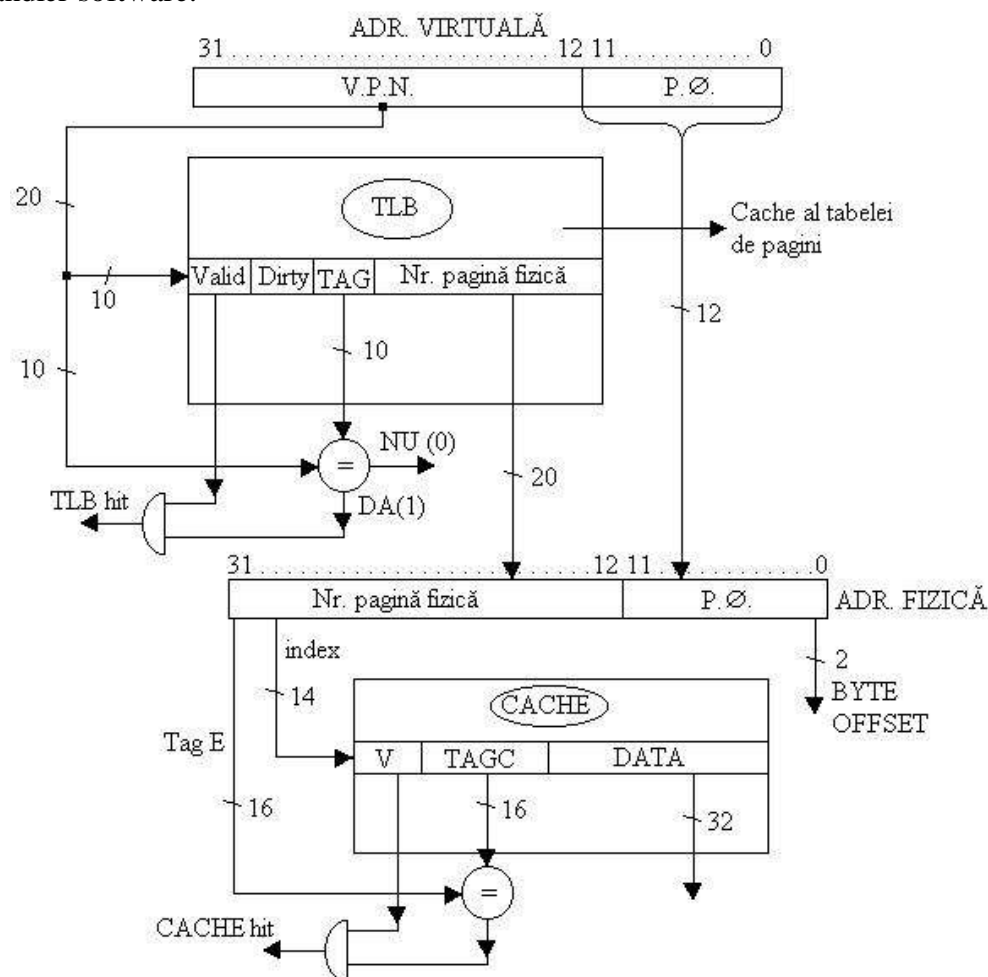
### Translation – Lookaside Buffers (TLB)

Prin paginare, fiecare acces la o dată necesită 2 accese la memorie: unul pentru obținerea adresei fizice din tabela de pagini, iar celălalt pentru accesarea propriu-zisă a datei în M.P. În vederea reducerii acestui timp de acces (dublu), tabela de pagini este “casată” (memorată parțial) în CPU. Memoria cache care memorează maparea tabelului de pagini se numește TLB (Translation Lookaside Buffer). Ca orice cache, TLB-ul poate avea diferite grade de asociativitate. Există evacuări/încărcări între TLB și tabela de pagini din M.P.

Deoarece TLB-ul este implementat în general “on-chip”, capacitatea sa este relativ mică ( $32 \div 1024$  intrări), în comparație cu tabela de pagini care are  $1 \div 4$  M intrări. De obicei TLB-ul se implementează complet asociativ (full-associative), pentru a avea o rată de miss scăzută ( $0,01 \% \div 0,1 \% \div 1$



%). Missurile în TLB se pot rezolva atât prin protocol hardware cât și printr-un handler software.



**Figura 3.11.** Relația TLB - cache într-un microsistem DEC 3100 (microprocesor MIPS-R2000)

**Obs.** Ar fi mai rapid dacă s-ar adresa cache-ul cu adresa virtuală (cache-uri virtuale) și nu cu cea fizică. Probleme/soluții în acest sens sunt date în [8] (comutari taskuri- Process Identifier, antialias, "page colouring" etc.) O soluție simplă și imediată ar consta în adresarea cache-ului cu bitii PØ care sunt nemodificați prin procesul de traducere. Desigur în acest caz este necesar ca dimensiunea cache  $\leq$  dimensiunea paginii.

### Protectia în sistemele cu M.V.

Deși fiecare proces are propriul sau spațiu virtual de adresare, memoria fizică (MP) este partajată între mai multe procese (proces utilizator, S.Ø, driverele I/O etc.). Desigur, trebuie să se controleze strict accesul unui proces în zonele de cod și date ale altui proces rezultând necesitatea protecției la scrieri/citiri. De exemplu, numai S.Ø. trebuie să poată modifica tabelele de pagini aferente diferitelor procese. În vederea implementării protecțiilor, hardul trebuie să asigure cel puțin următoarele 3 condiții:

1. Cel puțin 2 moduri distincte de rulare a unui program: modul supervizor (kernel, executiv) în care un proces poate să execute orice instrucțiuni și să acceseze oricare resurse și respectiv modul user în care un proces are o multitudine de restricții legate de protecția și securitatea sistemului.
2. Să existe o parte a stării CPU în care un proces user să nu poată scrie. De exemplu: biți de stare user/kernel, registrul PTR, bitul validare/invalidare, excepții, pagini kernel (ACCES) etc. Posibilitatea unui proces user să scrie astfel de resurse ar determina S.Ø. (proces supervizor) să nu poată controla procesele user.
3. Mecanismele de tranziție a procesorului din modul supervizor în modul user și invers. Tranziția user-supervizor în modul user se poate face printr-o excepție (întrerupere) sau printr-o instrucțiune specială de tip SYSTEM CALL, care transferă controlul la o adresă dedicată din spațiul de cod supervizor (CALL GATE – la Pentium). Se salvează PC-ul și contextul procesului curent și CPU e plasat în modul de lucru anterior (user aici).

De asemenea, din modul “supervizor” se poate trece în modul “user” prin simpla modificare a bitilor de mod (e permis !). De exemplu, să presupunem că un proces P2 dorește să îi transmită (citire) anumite date, printr-o pagină proprie, unui alt proces P1. Pentru asta, P2 ar putea apela o rutină a S.Ø. (printr-un SYSTEM CALL), care la rândul ei (fiind privilegiată!) va crea o intrare în tabela de pagini a lui P1 care să se mapeze pe pagina fizică pe care P2 dorește să o pună la dispoziție. S.Ø. (supervizor) poate să utilizeze bitul “Write Protection” pentru a împiedica procesul P1 să altereze respectiva pagină. Și alți biți de control de tip “drepturi de acces” în pagină pot fi incluși în tabela de pagini și în TLB.

**Obs.** În cazul unei comutări de taskuri de la procesul P1 la procesul P2, TLB-ul trebuie golit din 2 motive: în caz de hit P2 să nu utilizeze paginile lui P1 și respectiv să se încarce în TLB intrările din tabela de

pagini a procesului P2 (pointata de noul PTR). Asta se întâmplă numai dacă P1 și P2 folosesc VPN-uri identice (bitii  $31 \div 12$  din adrese virtuale). Pentru a nu goli TLB-ul prea des, se preferă adăugarea la tag-ul acestuia a unui câmp numit PID ("Process Identifier" – identificator al procesului), care va contribui corepunzător la HIT. Această informație (PID) este ținută de obicei într-un registru special, ce va fi încărcat de către S.Ø. la fiecare comutare de taskuri. Ca și consecință se evita în majoritatea cazurilor golirea (și implicit reumplerea!) TLB-ului.

În concluzie, foarte succint, protecția este asigurată în principal prin:

- ◆ moduri de lucru CPU de diferite nivele de privilegiu
- ◆ control strict al S.Ø. asupra tranzițiilor din user în kernel (prin CALL GATES-uri - porți de apel - la o anumită adresă determinată din spațiul de cod kernel)
- ◆ protecție a paginilor prin "drepturi de acces" la pagina (read only, read/write etc).

### **Tratarea miss-urilor în TLB și a PF-urilor**

Pe durata procesului de traducere a adresei virtuale în adresă fizică pot să apară 2 evenimente de excepție:

1. TLB miss, dar pagina accesată este prezentă în memoria fizică (M.P.)
2. Page Fault (PF), adică TLB miss urmat de faptul că pagina dorită nu este prezentă în tabela de pagini rezidentă în M.P. (bit P=0).

Un TLB miss generează de obicei o procedură hardware de aducere a numărului paginii fizice din tabela de pagini. Această operație se poate implementa prin hardware, ea durând un timp relativ scurt (cca. 20 – 50 tacte CPU).

Tratarea PF în schimb, necesită un mecanism de tratare al excepției care să întrerupă procesul activ, să transfere controlul rutinei de tratare PF (S.Ø.) și apoi să redea controlul procesului întrerupt. PF va fi recunoscut pe parcursul ciclilor de acces la memorie. Cum instrucțiunea care a cauzat PF trebuie reluată, rezultă că trebuie salvat în stivă (automat) PC-ul aferent acesteia. Pentru asta, există un registru special EPC (Exception PC), întrucât PC-ul propriu-zis poate să fie mult incrementat sau chiar complet altul (din motive de prefetch, branch-uri etc.). Mai apoi, printr-un sistem de întreruperi (vectorizate) se dă controlul rutinei de tratare din cadrul S.Ø. Aici, se află cauza excepției prin consultarea registrului "cauza excepție" iar apoi se salvează întreaga stare (context) a procesului întrerupt (registrii

generali, PTR, EPC, registri “cauza excepție” etc.). Dacă PF-ul a fost cauzat de un “fetch sau write data”, adresa virtuală care a cauzat PF trebuie calculată din însuși formatul instrucțiunii pe care PF s-a produs (PC-ul aferent acesteia e memorat în EPC), de genul “base + offset”.

Odată știută adresa virtuală care a cauzat PF, rutina de tratare a S.Ø. aduce pagina de pe disc în MP, după ce mai întâi a evacuat (LRU) o pagina din MP pe disc. Cum accesul pe disc durează mii de tacte, uzual S.Ø. va activa un alt proces pe această perioadă.

### Segmentarea

Constituie o altă variantă de implementare a MV, care utilizează în locul paginilor de lungime fixă, entități de lungime variabilă zise segmente. În segmentare, adresa virtuală este constituită din 2 cuvinte: o bază a segmentului și respectiv un deplasament (offset) în cadrul segmentului. Datorită lungimii variabile a segmentului (de ex. 1 octet ÷  $2^{32}$  octeți la arhitecturile Intel Pentium), trebuie făcută și o verificare a faptului că adresa virtuală rezultată (bază + offset) se încadrează în lungimea adoptată a segmentului. Desigur, segmentarea oferă posibilități de protecție puternice și sofisticate a segmentelor. Pe de altă parte, segmentarea induce și numeroase dezavantaje precum:

- ◆ 2 cuvinte pentru o adresă virtuală, necesare având în vedere lungimea variabilă a segmentului. Asta complică sarcina compilatoarelor și a programelor
- ◆ încărcarea segmentelor variabile în memorie mai dificilă decât la paginare
- ◆ fragmentare a memoriei principale (porțiuni nefolosite)
- ◆ frecvent, trafic inefficient MP-disc (de exemplu pentru segmente “mici”, transferul cu discul e complet inefficient – accese la nivel de sector = 512 octeți)

Există în practică și implementări hibride segmentare – paginare.

## 4. O MICROARHITECTURA MODERNA REPREZENTATIVA: HSA

---

### 4.1. INTRODUCERE

Caracteristica principală a arhitecturii HSA (Hatfield Superscalar Architecture) o constituie exploatarea paralelismului la nivelul instrucțiunii, într-un mediu superscalar, prin scheduling agresiv aplicat codului sursă în momentul compilării. HSA reprezintă un procesor puternic paralel, caracterizat de un set de instrucțiuni RISC simple ce permit exploatarea eficientă a unităților funcționale pipelineizate. Instrucțiunile sunt întâi extrase din cache-ul de instrucțiuni sau memoria principală (în caz de miss în cache) și stocate în bufferul de prefetch. La nivelul acestuia, după verificarea dependențelor de date între instrucțiuni și a constrângerilor legate de resurse, grupuri formate de instrucțiuni sunt expediate spre unitățile funcționale de execuție. Nu este necesară aplicarea tehnicii de renumire a registrilor, schedulerul CGS tratând probleme legate de renumirea și reordonarea codului. Întrucât arhitectura HSA nu implementează mecanismul de branch prediction, schedulerul rezolvă problema penalităților introduse de instrucțiunile de salt prin rearanjarea codului în zone (secțiuni) “*branch delay slot*” minimizând întârzierile provocate astfel. Instrucțiunile sunt trimise spre execuție în ordinea lor inițială “*in order*” dar execuția lor se poate încheia într-o ordine arbitrară “*out of order*”. Unitățile funcționale generează noile rezultate, le depune pe magistrala rezultat pentru a fi înscrise în fișul de registre sau înaintate celorlalte unități funcționale care au nevoie de respectiva dată. Arhitectura HSA implementează trei fișuri de registre pentru memorarea variabilelor întregi, booleene sau flotante.

Execuția condiționată este implementată prin atasarea variabilelor garda booleene instrucțiunilor, permițând procesorului să distingă între instrucțiunile aparținând diferitelor fire de execuție dar care au fost reorganizate (împachetate) în aceeași fereastră de întârziere a branch-urilor.

Evacuarea codului executabil conditionat din bufferul de prefetch se face de îndată ce se cunoaște dacă instrucțiunile se vor executa sau nu, prin intermediul variabilelor garda booleene. Evacuarea vremelnică a codului nedorit determină creșterea performanței globale a procesoarelor cu resurse limitate.

Arhitectura superscalară are patru nivele distincte în procesarea instrucțiunilor. În nivelul **IF** (fetch instrucțiune) - se calculează adresa grupului de instrucțiuni ce trebuie citite din cache-ul de instrucțiuni sau din memoria principală; după citire, blocul de instrucțiuni este plasat în partea superioară a Buffer-ului de Prefetch. Instrucțiunile din partea inferioară a buffer-ului sunt selectate și trimise celui de-al doilea nivel: **ID** (decodificare instrucțiune) - în care sunt decodificate instrucțiunile aduse, se citesc operanții din setul de registre generali, se calculează adresa de salt (pentru instrucțiunile de ramificație) și respectiv se calculează adresa de acces la memorie (pentru instrucțiunile **LOAD** sau **STORE**). Instrucțiunile sunt apoi pasate unităților funcționale potrivite, care folosesc operanții sursă în timpul celei de-a treia faze de procesare a pipe-ului: **ALU/MEM**. În această fază se execută operația **ALU** asupra operanților selectați în cazul instrucțiunilor aritmetico-logice și se accesează memoria cache de date sau memoria principală (în caz de miss în cache), pentru instrucțiunile cu referire la memorie (citire sau scriere). Unitățile de execuție a instrucțiunilor **LOAD** și **STORE** sunt singurele unități funcționale care interacționează în mod direct cu cache-ul de date. În final, avem cel de-al patrulea nivel **WB** (scriere date) - în care, unitățile funcționale preiau rezultatul final al instrucțiunilor aritmetico-logice sau datea citită din memorie, și o depun pe magistrala rezultat, de unde este copiată în registrul destinație din setul de registre generali.

Arhitectura HSA este puternic parametrizabilă. Dimensiunea blocului accesat din cache -ul de instrucțiuni și capacitatea maximă a bufferului de prefetch sunt parametri care variază între implementări diferite ale procesorului. Bufferul de prefetch este implementat ca o structură de date dinamică de tip coadă ce lucrează după principiul **FIFO**. Numărul de instrucțiuni ce pot fi trimise simultan spre execuție este dat de numărul "pipe"-urilor logice asigurate de arhitectura superscalară. Într-un ciclu de execuție, instrucțiuni noi din partea inferioară (bottom) a bufferului de prefetch sunt selectate și formează grupuri independente gata de execuție, fiecărei instrucțiuni fiindu-i asignat câte un pipe logic. Pipe-urile funcționează ca dispozitive de rutare a instrucțiunilor spre unitățile funcționale de execuție corespunzătoare.

În continuare, se prezintă schema bloc a arhitecturii superscalare HSA, urmând a se discuta despre elementele sale componente pe parcursul acestui capitol.

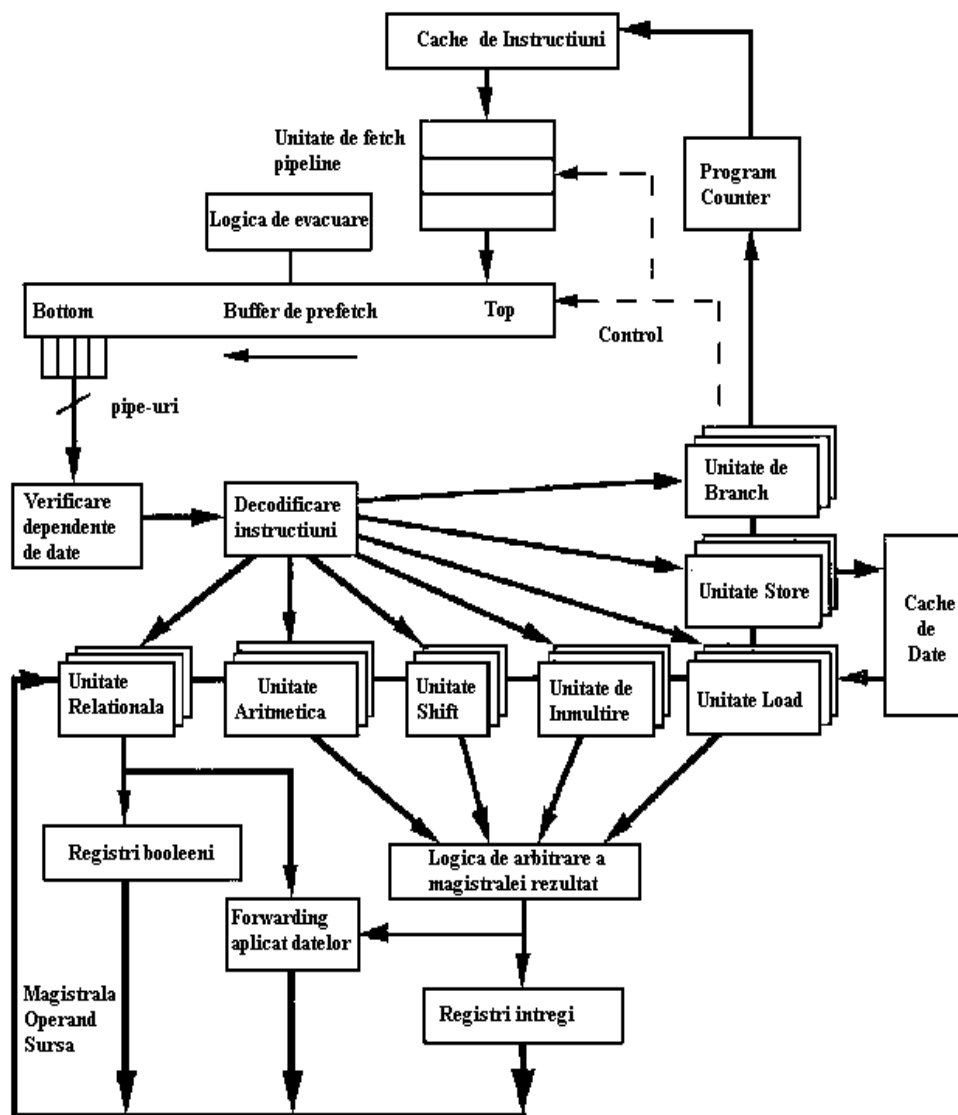


Figura 4.1. Schema bloc a arhitecturii HSA

## 4.2. ARHITECTURA HSA. COMPONENTE PRINCIPALE.

### Modurile de adresare

Pentru instructiunile cu referire la memorie, arhitectura HSA ofera doua moduri de adresare: **indirect registru** si **indexat** (indirect registru + offset). Calculul adresei se realizeaza însumând fie continutul a doi registri fie un registru cu o valoare imediata. Registrul R0 este cablat la masa, ca în toate procesoarele RISC, si este folosit pentru simularea adresarii directe (offset + (R0)).

Daca în cazul unei instructiuni LOAD, adresa de memorie este calculata abia în nivelul EX de procesare, va exista o penalitate de cel puțin o perioada de tact în obtinerea valorii dorite din memorie. Aceasta întârziere se rasfrânge asupra executiei instructiunilor succesoare care au ca operand sursa respectiva valoare (cea din memorie), indisponibila înca. Evitarea penalitatii introduse de LOAD se face prin modul de adresare “**OR**”. Acest mod substituie, atunci când este posibil (când ultimii  $n$  biti ai registrului de adresa folosit, unde  $n$  reprezinta numarul de biti pe care este reprezentat offsetul, sunt zero) operatia de adunare dintre registru si offset (consumatoare de timp prin propagarea transportului) cu cea de SAU logic mult mai rapida. Pretul utilizarii acestui mod de adresare consta în faptul ca structurile de date si memoria stiva trebuie aliniate de catre compilator în zone de memorie de capacitate puteri ale lui 2, ceea ce determina cresterea necesarului de memorie a unui program.

### File-urile de registre

Arhitectura HSA defineste trei seturi distincte de registri: întregi, booleani si flotanti. Numarul registrilor aferenti fiecarui set variaza în functie de fiecare instantă simulata (implementata) însa trebuie sa fie suficient sa satisfaca necesarul tehnicii de schedulling CGS (conditional group schedulling). Tipic, exista 32÷64 registri întregi, 8÷16 registri booleani si un numar parametrizabil de registri flotanti.

Fiecare registru contine un flag care indica daca data continuta este “*invalida*”. Aceasta caracteristica serveste la doua scopuri: executia speculativa instructiunilor si depanarea run-time a programelor de test. Un alt flag poate fi folosit pentru a marca faptul ca un registru este “*indisponibil*”, datorita calcularii valorii sale de catre unitatile functionale de executie. Instructiunile urmatoare, care au nevoie de respectiva data ca si



operand sursa sunt fortate sa ramâna în stare “*wait*” pâna la generarea rezultatului de catre unitatile functionale.

În general, instructiunile cu operanzi întregi au doi registri sursa si unul destinatie. Instructiunile booleene sunt caracterizate de doi registri sursa si unul sau doi registri destinatie. Folosirea a doi registri destinatie într-o singura instructiune booleana este exploatata prin tehnica CGS, când codul este reorganizat în zone de umplere a “*branch delay slot*” – ului generat de instructiunile de salt în cadrul buclelor de program.

Toate unitatile functionale de executie folosesc magistrala rezultat pentru a scrie valoarea calculata în urma operatiilor efectuate si pentru a înainta noua valoare rezultata altor unitati functionale care o necesita. În functie de variantele de implementare a procesorului, numarul magistralelor rezultat poate fi mai mic decât numarul unitatilor functionale de executie. În aceste cazuri, unitatile functionale trebuie sa partajeze folosirea magistralei rezultat, fiind necesar un mecanism de arbitrare al acestora care sa decida asupra unitatii care poate înscrie rezultatul pe magistrala. Prioritatea maxima se acorda instructiunilor cu latente mari si acelor instructiuni care se afla deja în stare “*wait*” datorita unei cereri anterioare de alocare a magistralei rezultat, nesatisfacute.

Instructiunile pot fi retinute în bufferul de prefetch datorita dependentelor de tip WAW (“*write after write*”). Într-un astfel de hazard, o instructiune calculeaza un nou rezultat pentru un registru care este folosit ca registru destinatie de catre o alta instructiune, considerata deja expediată spre executie. Daca instructiunea din urma se executa integral înainte ca prima instructiune sa se încheie, este posibil ca valoarea finala memorata în registrul destinatie sa fie incorecta. Totusi, daca o instructiune este promovata speculativ înaintea unui salt conditional de pe o ramura, registrul destinatie nu mai este de nici un folos daca programul urmeaza executia de pe cealalta (alternativa) ramura.

La apelul procedurilor si la folosirea modului de adresare “OR” un numar de 4 registri sunt rezervati compilatorului [16]. Doi registri pointeri la memorie, GP (global pointer) si SP (stack pointer) sunt folositi pentru adresa de baza a obiectelor globale de date, respectiv a segmentului de stiva. Registrul de stare program (SR) poate fi folosit pentru a retine continutul file-ului de registre boolean si a-l salva în stiva în cazul apelurilor de proceduri. Uneori, este folosit si un registru pointer de stiva suplimentar (SP1), atunci când e necesara valoarea anterioara a registrului SP. Doar registrul SR necesita suport arhitectural din partea hardware-ului, celelalte trei registre reprezentând conventii de nume folosite de compilator.

### Unitatea de fetch si Bufferul de prefetch

O caracteristica importanta a arhitecturii HSA consta în faptul ca, rata de fetch a instructiunilor (FR – numarul de instructiuni citite simultan din cache-ul de instructiuni sau memoria centrala) nu depinde de numarul instructiunilor trimise simultan spre executie. În fiecare ciclu de executie, grupuri de FR instructiuni sunt extrase din cache-ul de instructiuni sau memorie, de la adresa data de registrul PC (program counter) si, daca exista spatiu disponibil, depuse în bufferul de prefetch. Concomitent, alte grupuri de instructiuni, existente în bufferul de prefetch, sunt selectate pentru trimiterea în executie, instructiunile ramase fiind deplasate în buffer pentru a elibera spatiul, necesar aducerii altor FR instructiuni din cache în ciclul urmator de executie. Desi dependentele reale de date – RAW (“*read after write*”) limiteaza rata de procesare, aceasta nu are efect direct asupra ratei de fetch. Abilitatea arhitecturii HSA de a forma run-time grupuri de instructiuni independente în bufferul de prefetch, face ca pierderea de performanta rezultata din faptul ca, rata de fetch este mai mica decât numarul pipe-urilor logice, sa nu fie resimtita în asa de mare masura asupra ratei de procesare.

La întâlnirea unei instructiuni de salt care se va executa (*taken branch*), valoarea registrului PC trebuie modificata astfel încât urmatoarea instructiune extrasa din cache sa fie facuta de la dresa destinatie a branch-ului. De asemenea, instructiunile aduse în buffer, ulterioare instructiunii de salt, trebuie evacuate deoarece acestea nu se vor mai executa. O instructiune de salt nu trebuie sa altereze valoarea registrului PC pâna când toate instructiunile, care vor umple “*branch delay slot*”-ul, nu vor fi aduse în bufferul de prefetch.

Când instructiunile sunt expediate cu succes din bufferul de prefetch spre unitatile functionale de executie, ele trebuie marcate drept “*evacuabile*” (*squashed*), grupuri contigue de astfel de instructiuni fiind apoi eliminate din buffer. Instructiunile valide ramase se vor deplasa înspre zona inferioara a bufferului, în cea superioara aducându-se alte FR instructiuni din cache. O caracteristica importanta a arhitecturii HSA consta în posibilitatea eliminarii codului executabil conditionat din bufferul de prefetch, într-un nivel pipeline anterior selectiei pentru expediere spre unitatile functionale de executie, existente în numar limitat. Totusi, nu trebuie eliminat codul conditionat care depinde de rezultatul unei instructiuni booleene neexecutate înca, din buffer. Prin aceasta evacuare se îmbunătăteste mult rata de utilizare a setului de unitati functionale sporind si rata de procesare. Acest mecanism contrabalanseaza efectele negative ale expansiuni codului generat prin promovarea instructiunilor de pe calea eronata (“*untaken branch*”), pe care

nu va continua programul. Codul executabil conditionat poate fi marcat ca evacuabil fara a tine cont de pozitia lor în bufferul de prefetch. Instructiunile evacuabile, care se afla între instructiuni neevacuabile în buffer, nu sunt eliminate imediat deoarece contin si transmit informatia pozitionala, esentiala pentru functionarea corecta a mecanismului de întârziere a branch-ului. Valoarea numerica care însoteste branch-ul indica pozitia relativa a ultimei instructiuni dependente de cea de salt, astfel încât este esentiala pastrarea reprezentarii spatiale corecte în bufferul de prefetch (vezi tabelul 4.1).

Valoare numerică însoțitoare a instrucțiunii de salt						Zonă de cod dependent de branch				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Condiții						TB3	TB3	FB3		
Instrucțiuni	Instr1	Instr2	Instr3	Instr4	BRA (3)	Instr6	Instr7	Instr8	Instr9	Instr10
Evacuabile	E	E	E			E	E			
Instrucțiuni expediate spre unitățile funcționale						B3 este evaluat ca "false"				

Tabelul 4.1.

### Evacuarea codului din bufferul de prefetch

În tabelul 4.1, se prezinta comportarea instructiunilor în buffer. Primele trei instructiuni au fost expediate cu succes spre unitatile functionale de executie si sunt marcate drept "evacuabile". Instructiunile conditionate, pozitiile 6 si 7 în buffer, sunt de asemenea "evacuabile", întrucât registrul boolean B3 a fost evaluat deja ca fiind "false". Instructiunea de ramificatie, pozitia 5 în bufferul de prefetch, prin valoarea numerica însoțitoare, specifica o zona dependenta de evaluarea branch-ului "taken / non taken", de trei instructiuni. Instructiunile evacuabile din pozitiile 6 si 7 nu sunt eliminate din buffer pâna când branch-ul nu este procesat de catre unitatea functionala corespunzatoare, întrucât prezenta lor e necesara pentru a identifica exact ultima instructiune dependenta de cea de salt.

### Executia conditionata si speculativa

Implementarea executiei conditionate se face prin atasarea uneia sau mai multor variabile garda booleene, unei instructiuni date. Daca instructiunile executabile conditionat expediate spre unitatile functionale nu îndeplinesc toate conditiile impuse de variabilele garda booleene, unitatile functionale sunt reinitializate si devin disponibile pentru noi intrari în ciclul urmator de executie. Consideram urmatorul exemplu:

**TB5** ADD R4, R5, #10      /\* R4 = R5 + 10 \*/  
**TB5** LD R6, (R4, R7)      /\* Încarca în R6 valoarea de la adresa data de  
 (R4+R7) \*/  
**FB6** ST (R4, R8), R9      /\* Memoreaza R9 la adresa data de (R4+R8)\*/  
 ADD R1, R1, #1      /\* R1 = R1 + 1 \*/

Pentru executie, primele doua instructiuni necesita ca variabila booleana B5 sa fie evaluata ca "True", iar cea de-a treia are nevoie ca registrul boolean B6 sa fie evaluat ca "False". Ultima instructiune, negardata, se va executa indiferent de variabilele garda B5 si B6. Costul implementarii executiei gardate consta în biti suplimentari necesari codificarii informatiei garda în opcode-ul instructiunii. Unele metode codifica direct doar registrul boolean respectiv, în timp ce altele, pentru gardare folosesc o masca de biti a tuturor registrilor booleani. Alegerea metodei folosite depinde de numarul maxim de variabile garda atasate unei instructiuni individuale si de dimensiunea setului de registri booleani. Valorile booleene folosite pentru executia conditionata a instructiunilor sunt obtinute direct din file-ul de registri booleani sau pot fi înaintate de catre unitatile functionale de executie la încheierea operatiilor logice sau relationale.

Instructiunile de salt conditionat deseori definesc doua cai de control a executiei programului, care se unesc ulterior dupa câteva instructiuni. Pentru separarea celor doua cai de urmat precum si pentru eliminarea instructiunilor de salt se introduce executia conditionata (gardata). Un exemplu sugestiv îl constituie constructia "if-then-else".

```

if (R8 < 1)
    R1 = R2 + R3
else
    R1 = R5 - R7
    R10 = R1 + R11
  
```

În acest exemplu, valoarea continuta de registrul R8 determina care din cele doua instructiuni vor fi selectate pentru a calcula noua valoare a lui R1. Transpunerea în limbaj de asamblare HSA a exemplului anterior enuntat este urmatoarea:

```

I1      LT B6, R8, #1
I2      BF B6, dest1
I3      ADD R1, R2, R3
I4      BRA dest2
dest1: I5      SUB R1, R5, R7
dest2: I6      ADD R10, R1, R11
  
```

Instructiunea de salt conditionat I2, selecteaza pentru executie dintre instructiunile I3 si I5 în momentul executiei, în functie de valoarea registrului boolean B6. Executia conditionata permite eliminarea instructiunilor de salt I2 si I4, astfel:

	LT B6, R8, #1
<b>TB6</b>	ADD R1, R2, R3
<b>FB6</b>	SUB R1, R5, R7
	ADD R10, R1, R11

Transformarile efectuate asupra codului sunt benefice doar daca latenta totala a instructiunilor întâlnite pe calea determinata de branch pâna la punctul de reunificare a cailor de control a executiei, este mai mica decât latenta de penalizare a branch-urilor si daca prin eliminarea instructiunilor de salt se îmbunătătește timpul de executie.

Executia conditionata introduce variabilele garda, atasate instructiunilor, ce vor fi reorganizate de scheduler în zona de cod “*branch delay slot*”. Unele tehnici de scheduling implica promovarea instructiunilor “de jos în sus”, uneori putând depasi chiar instructiunea de salt conditionat, riscul fiind acela de a aplica tehnica de “*renaming*” asupra registrului destinatie. Codul care este promovat dincolo de instructiunea de salt conditionat se numeste **executat speculativ**, deoarece e posibil ca în momentul rularii programului (executiei branch-ului) saltul sa fie evaluat ca non-taken. Codul executat speculativ e marcat în acest sens de catre scheduler, facând disponibil procesorului aceasta informatie în momentul executiei. Marcarea unei instructiuni aparținând setului HAS, ca fiind speculativa, se face prin atasarea simbolului “!” opcode-ului instructiunii. Consideram urmatorul exemplu de cod executat speculativ:

Cod original	Dupa promovare
SUB R1, R2, R3	SUB R1, R2, R3
LT B8, R1, #10	LT B8, R1, #10
BT B8, dest3	<b>FB8</b> ADD! R7, R8, R1
ADD R7, R8, R1	BT B8, dest3
SUB R10, R7, R4	SUB R10, R7, R4

Codul promovat dincolo de instructiunea de salt poate fi însoțit de aceeași garda booleana ca cea folosita pentru controlul saltului, evitând astfel necesitatea de a redenumi registrul destinatie. Desi codul speculativ poate fi expedit spre unitatile functionale de executie, nu se permite

încheierea executiei acestuia pâna când branch-ul care determina calea de urmat, de unde este originar si codul speculativ, este taken.

Este important ca nici o eroare sau exceptie generata de executia unui cod speculativ (depasire aritmetica) sa nu întrerupa executia normala a procesorului pâna când nu este sigura necesitatea rezultatului executiei respectivului cod. De exemplu, este posibil ca executia speculativa a unei instructiuni Load sa cauzeze o eroare a magistralei de adresa. Daca aceasta instructiune cu referire la memorie este originara de pe o cale determinata de un branch, care în momentul executiei se evalueaza ca non-taken, în cazul respectivei erori nu se întreprinde nici o actiune. Registrul destinatie nu este marcat drept "invalid" si, doar daca o instructiune nespeculativa încearca sa acceseze acest registru ca operand sursa, se va genera o exceptie. Instructiunile speculative urmatoare celei cu referire la memorie, care acceseaza registrul alterat vor seta bitul de invalidare al registrilor destinatie aferenti noilor instructiuni, propagând potentialul de eroare pâna când problema va fi rezolvata.

Orice instructiune poate fi marcata drept speculativa, exceptând instructiunea Store, întrucât aceasta altereaza în permanenta starea masinii la fiecare scriere în memorie. O strategie posibila de executie speculativa a instructiunii Store consta în introducerea unui buffer de scriere (**Write Buffer**) pentru noile valori, mai degraba decât alterarea în mod direct a memoriei. Arhitectura HSA permite unei instructiuni Store sa promoveze înaintea unei instructiuni de salt conditionat, daca este gardata cu aceeasi variabila garda (conditie booleana) ca cea folosita pentru a selecta calea de urmat ("*branch path*") din care este originara instructiunea Store. Astfel de gardari (conditionari) pot limita promovarea ulterioara a instructiunii Store datorita dependentelor de date fata de instructiunea booleana care controleaza executia branch-ului.

### **Selectia si expedierea instructiunilor spre unitatile functionale de executie**

Arhitectura HSA expediază instructiunile din bufferul de prefetch spre unitatile functionale în ordinea fireasca a programului ("*in order*"). Prima instructiune neevacuata din partea inferioara a bufferului de prefetch este decodificata si primeste prioritatea cea mai mare, iar o alta instructiune neevacuata poate fi expediată concurent doar daca nu exista dependente de date cu membri grupului de instructiuni paralelizabile, existent deja. Numarul maxim de instructiuni care sunt expediate concurent este parametrizabil si determinat de numarul de pipe-uri logice asigurate în modelul arhitectural. În momentul determinarii unei dependente de date nici o alta instructiune nu se mai adauga grupului de instructiuni paralelizabile,

nepermitându-se expedierea instructiunilor “*out of order*”. Instructiunile din grupul creat sunt predate apoi spre executie unitatilor functionale corespunzatoare. Odata cu instructiunile (codul operatiei), unitatilor functionale le sunt transmise si operanzii sursa. Daca valoarea unui operand sursa nu este disponibila în file-ul de registri înseamna ca o noua valoare este calculata de catre o unitate functionala aferenta unei instructiuni anterior expediate. Daca unul din operanzii sursa este imposibil de obtinut, instructiunea aferenta este blocata si nici o alta instructiune nu mai este expediată în acest ciclu. Operanzii sursa specificati de catre o instructiune sunt identificati pe nivelul pipeline ID (decodificare) si pregatiti, pentru accesarea de catre unitatile functionale în timpul nivelului pipeline EX (executie). Este esential ca accesul la registri sa se faca pe nivelul ID, înainte de executia instructiunii, pentru a nu creste în mod nejustificat latimea perioadei de tact a procesorului.

Unitatile functionale gestioneaza un fond comun de resurse, care vor fi puse la dispozitia instructiunilor din grupul celor paralelizabile dupa principiul FIFO. Daca unei instructiuni nu i se poate asigura o unitate functionala de executie, respectiva instructiune este blocata si nici una din cele care i-ar urma nu mai sunt expediate spre executie. Orice instructiune care nu a fost expediată cu succes spre unitatile functionale vor ramâne în buffer si vor face parte din urmatorul grup paralelizabil de instructiuni decodificate, care vor fi trimise în ciclul urmator de executie.

Salturile întârziate reprezinta caracteristica esentiala a arhitecturii HSA, ce permite codului reorganizat generat de scheduler sa poata fi aplicat (transmis) unui sir de implementari diferite de procesoare, prin aceeasi secventa de cod. Valoarea definita de parametrul “*branch delay count*” [17] reprezinta numarul de instructiuni care trebuie executate înainte de executia codului de la adresa destinatie a saltului.

### Procesarea instructiunilor de salt

Instructiunile de salt difera de celelalte tipuri de instructiuni prin faptul ca sunt executate în nivelul pipeline ID mai degraba decât în nivelul EX. La expedierea unei instructiuni Branch se detecteaza o unitate functionala corespunzatoare disponibila, iar procesarea se face în acelasi nivel ID. La evaluarea unei instructiuni drept non-taken, operatia este întrerupta, unitatea de branch este reinitializata, fiind disponibila pentru ciclul urmator de executie. La gasirea unui salt drept taken pot apare câteva situatii:

- Daca valoarea numerica ce însoteste instructiunea de salt este zero, înseamna ca nu exista instructiuni ce trebuie reorganizate, din zona dependenta de branch, iar bufferul de prefetch poate fi umplut cu

instrucțiuni începând cu locația instrucțiunii de salt, ascendent. Registrul PC este actualizat cu adresa destinație a instrucțiunii de salt. Instrucțiunile succesoare branch-ului, existente în bufferul de prefetch înainte de procesarea acestuia, sunt inhibate din procesarea lor. Unitatea funcțională de branch își încheie activitatea.

- Dacă valoarea ce însoțește instrucțiunea de salt este diferită de zero, ultima instrucțiune dependentă de cea de salt poate fi în buffer, pe magistrală în urma citirii din memorie, sau nu a fost extrasă din cache-ul de instrucțiuni.

În primul rând se determină dacă ultima instrucțiune dependentă de salt se află în buffer de prefetch. În acest caz se spune despre dependență ca este „*satisfacută*” și se pot aduce în siguranță instrucțiuni buffer începând cu prima locație de dincolo de ultima instrucțiune dependentă, precum și se întrerupe procesul curent de fetch instrucțiune aflat în derulare. Instrucțiunile situate în același grup paralelizabil cu instrucțiunea de salt, dar situate în buffer dincolo de zona dependentă de salt, vor fi inhibate în procesul lor de execuție. Noua valoare a registrului Program Counter devine efectivă după ce unitatea de branch a încheiat procesarea.

Următorul caz ce va fi tratat este acela în care ultima instrucțiune dependentă de salt nu se găsește în buffer, dar se află pe magistrală ce uneste cache-ul de instrucțiuni cu procesorul (bufferul de prefetch). Instrucțiunile ce sosesc în buffer sunt înscrise începând cu prima locație evacuabilă până la locația aferentă ultimei instrucțiuni dependente de salt. Execuția instrucțiunilor din grupul celor decodificate (paralelizabile) continuă nestingerită. Încheierea procesării de către unitatea de branch, face disponibilă noua valoare a registrului PC.

Ultimul caz considerat este cel în care ultima instrucțiune dependentă de salt nu a fost extrasă încă din cache-ul de instrucțiuni. Se calculează numărul de poziții ocupate din bufferul de prefetch care urmează instrucțiunii de salt și se adaugă numărului de instrucțiuni care sunt citite din cache în acel moment. Numărul rezultat se scade din valoarea numerică ce însoțește instrucțiunea de salt pentru a afla numărul de instrucțiuni („*short fall*”) dependente de salt care trebuie extrase din cache. Această valoare („*short fall*”) este reținută de unitatea de branch, care continuă procesarea saltului în perioadele de tact următoare. Pot trece mai multe perioade de tact până la detectarea ultimei instrucțiuni dependente de salt, și în timpul fiecărei perioade valoarea „*short fall*” este recalculată. Doar când „*short fall*” devine zero, noua valoare a registrului PC poate avea efect și unitatea de branch încheie procesarea.

Este posibilă reorganizarea codului de către schedulerul HSS, aferent arhitecturii HSA, astfel încât instrucțiuni de salt să se regasească în zone



dependente de un salt anterior. În momentul în care grupul de instrucțiuni decodificate, paralelizabile, sunt expediate spre unitatile functionale de executie, pot exista mai multe instrucțiuni de salt în același grup. Atâta timp cât există suficiente unități de branch disponibile, toate instrucțiunile de salt pot fi expediate spre executie, funcție doar de dependentele de date existente. Orice număr de salturi evaluate ca non-taken pot fi procesate în paralel, până la inclusiv primul branch gasit taken. Odata detectat un branch taken, valoarea ce însoțește instrucțiunea de salt poate inhiba executia instrucțiunilor din același grup paralelizabil. Dacă un al doilea branch, din același grup paralelizabil de instrucțiuni decodificate, este evaluat ca fiind taken, nu este permis ca branch-ul să aibă efect în ciclul curent, chiar dacă valoarea numerică ce însoțește instrucțiunea de salt este cunoscută. În fiecare ciclu, doar o instrucțiune de salt evaluată ca fiind taken poate altera registrul PC. A doua instrucțiune de salt, taken fiind, este tratată în ciclurile ulterioare, când valoarea numerică ce însoțește branch-ul este reevaluată pentru a determina dacă zona de cod dependentă de salt este cunoscută. Această decizie depinde de modificarea stării bufferului de prefetch și de gradul de ocupare al unității de fetch, cauzate de procesarea primului salt și a instrucțiunilor dependente de primul salt. Primul salt poate determina ca, instrucțiunile din buffer dependente de al doilea salt, să fie eliminate. Astfel, este indicat ca, o instrucțiune de salt, aflată în zona de cod dependentă de un salt anterior, să fie ea însăși urmată de o zona de cod dependentă, de dimensiune cel puțin egală cu zona de cod dependentă, aferentă primului salt.

### Unitatile functionale si partajarea resurselor

Setul de instrucțiuni al arhitecturii HSA este divizat în două tipuri, în funcție de natura destinației fiecărei instrucțiuni. Această clasificare simplifică implementarea hardware a procesorului prin gruparea fizică a unităților functionale specifice unui tip de instrucțiuni în jurul file-urilor de registri cu care ele interacționează. Prin această abordare se reduce complexitatea interconectării necesară într-un procesor puternic paralel. Arhitectura HSA este caracterizată de următoarele tipuri de unități functionale de executie:

- ❖ **Aritmetica**
- ❖ **Multiplcative**
- ❖ **Load** (citire din memorie)
- ❖ **Branch** (de salt)
- ❖ **Relatională** (booleană)
- ❖ **Shift** (de deplasare și rotire)
- ❖ **Store** (scriere în memorie)

Numarul maxim de instructiuni care pot fi expediate spre executie într-un ciclu variaza între implementarile diferite de procesoare, în functie de numarul de pipe-uri logice disponibile. Pipe-urile servesc la rutarea instructiunilor, împreuna cu operanzii lor sursa, spre unitatile functionale corespunzatoare. Prin asigurarea unui fond comun de unitati functionale disponibile tuturor pipe-urilor, se realizeaza o economie de resurse. Se realizeaza un compromis între reducerea complexitatii de implementare *on chip* a arhitecturii si cresterea riscului de blocare a procesarii (hazarduri structurale) datorita lipsei de resurse. Este de dorit ca numarul de unitati functionale sa fie pastrat cât mai mic posibil pentru reducerea problemelor hardware de interconectare, si pentru utilizarea eficienta a resurselor cât mai mult timp posibil (procesarea de cod folositor de catre unitatile functionale).

Toate unitatile functionale sunt disponibile în forma pipeline sau non-pipeline. Unitatile non-pipeline pot procesa doar o instructiune la un moment dat si sunt indisponibile pentru o noua intrare pâna când instructiunea curenta s-a încheiat de executat. Unitatile pipeline sunt disponibile întotdeauna pentru o noua intrare în fiecare perioad de tact, doar daca nu se afla “în asteptare” pentru ocuparea magistralei rezultat. O exceptie de la cele enuntate anterior o reprezinta unitatea aritmetica de procesare a instructiunilor de împartire cu operanzi întregi. Întrucât frecventa de aparitie a instructiunilor de împartire în programele de uz general este redusa [8], nu se justifica necesitatea unei unitati functionale speciale, dedicata împartirii. În schimb, unitatea aritmetica este fortata sa adopte mai degraba latentă asociată instructiunii de împartire decât latentă aritmetica uzuala. O unitate aritmetica pipeline va functiona ca o unitate non-pipeline la procesarea instructiunii de împartire, semnificând faptul ca, intrările unitatii functionale sunt blocate pentru mai multi cicli, în functie de diferenta relativa a latentei instructiunilor.

Unitatile de branch difera de celelalte unitati functionale prin faptul ca ele pot încheia procesarea instructiunii în nivelul pipeline ID si au latentă fixă, unitară. Aceasta reprezintă valoarea minimă a latentei unitatii functionale branch, întrucât încheierea procesarii poate dura mai multe perioade de tact daca trebuie sa astepte pentru aducerea tuturor instructiunilor dependente de salt în bufferul de prefetch.

Ultima sarcină a unitatilor functionale de executie o reprezintă scrierea rezultatului, pe nivelul pipeline **WB** (write back), în file-ul de registri corespunzator. Dacă o instructiune ulterioară necesita respectivul rezultat ca si operand sursă, noua valoare este înaintată unitatii functionale care emite cererea, fara a mai astepta încheierea procesului de scriere în registri. Totusi, numarul magistralelor rezultat pentru valori întregi este limitat în modele particulare de procesare, fiind necesară o arbitrare a unitatilor functionale

care vor sa acceseze respectiva magistrala. Doar unitatile carora le-au fost alocate magistrala rezultat pot sa-si încheie operatiile interne si sa paseze rezultatul altor unitati functionale. Unitatile care nu au primit acceptul de accesare a magistralei rezultat sunt stagnate în executia lor, dar beneficiaza de tratament preferential la urmatoarea runda de arbitrare. Unitatile functionale pipeline care au iesirea (rezultatul) în stare de asteptare vor fi disponibile sa preia spre procesare noua instructiune în ciclul urmator de executie doar daca nivelele pipeline nu sunt toate deja ocupate. Arhitectura HSA ofera un numar suficient de magistrale rezultat booleene, nefiind necesara o arbitrare la nivel de magistrala pentru unitatile care opereaza asupra instructiunilor booleene (logice).

### Setul de instructiuni al procesorului superscalar HSA

Setul de instructiuni al arhitecturii HSA se bazeaza pe setul de instructiuni al procesorului HARP [13] si cuprinde toate formatele de instructiuni HARP posibile. Pe lânga acestea, distingem instructiuni complexe, care implementeaza operatii combinate implicând trei operanzi sursa, sau operatii în virgula mobila. Toate instructiunile pot fi multiplu gardate si marcate pentru executie speculativa, exceptând scrierile în memorie. Instructiunile oferite de arhitectura HSA sunt caracterizate de latente diferite, variabile ca marime. Majoritatea instructiunilor au latentă unitară (o perioada de tact). Instructiunea aritmetica de împartire (DIVIDE) are latentă tipică de 16 perioade de tact. Înmultirile sunt efectuate în unitati aritmetice dedicate (multiplicative) si au latentă de 3 perioade de tact. Instructiunile cu referire la memorie si cele de salt au latentă dependentă de timpul de acces la ceche-urile de date respectiv instructiuni, primul tip de instructiuni fiind influentat si de modul de adresare adoptat (adresare OR).

Pe lânga instructiunile **aritmetico-logice** uzuale, specifice procesoarelor RISC (vezi [15], Cap. 5 – *Arhitectura Microprocesoarelor Mips R2000/R3000*), de adunare, scadere, înmultire, împartire, SI/SAU logic, deplasare aritmetico-logica, cu operanzi registri, si/sau valoare imediata, cu sau fara semn, distingem si instructiuni de extensie semn, instructiuni logice combinate.

Instructiunile **relationale**, cu sau fara semn, seteaza / reseteaza registri booleeni, acestia fiind folositi ulterior în cadrul instructiunilor de salt. Totodata, registrii booleeni pot fi alterati de catre instructiunile booleene, de cele de transfer sau chiar de cele cu referire la memorie. În ultimele doua cazuri, registrii booleeni sunt înscrise cu cel mai putin semnificativ bit al registrului sursa, sau al locatiei de memorie citite. Exista, de asemenea, instructiuni speciale de **validare / invalidare întreruperi**, **exceptii software**.

Instructiunile **cu referire la memorie** (load / store) se caracterizeaza prin faptul ca pot avea unul sau doi operanzi sursa. Registrul destinatie poate fi fie un registru întreg fie unul boolean. Atunci când operandul sursa este compus din doi registri efectul este înscrierea a pâna la patru registri generali (citire pe cuvânt = 4octeti, pe dublu cuvânt si pe patru cuvinte) sau scrierea în memorie a pâna la 16 octeti (scriere un cuvânt, dublu cuvânt sau patru cuvinte) de date.

Instructiunile **în virgula mobila** (aritmetico-logice, de transfer, relationale si cu referire la memorie) sunt similare cu cele aferente numerelor întregi, diferenta fiind ca operanzii sunt registrii flotanti (simpla sau dubla precizie).

### 4.3. OPTIMIZAREA STATICA A PROGRAMELOR

#### 4.3.1. INTRODUCERE

Scheduler-ul dezvoltat la Universitatea din Hertfordshire, UK (HSS - Hatfield Superscalar Scheduler) [28] a fost implementat ca parte integranta a proiectului HSA (Hatfield Superscalar Architecture) – o arhitectura superscalara minima care combina cele mai bune caracteristici ale conceptelor VLIW si superscalare [30]. Obiectivul HSS este atingerea unor performante cu un ordin de marime mai mari comparativ cu un procesor scalar RISC clasic, evitând totodata cresterea exploziva a codului.

HSS rearanjeaza codul HSA scris în limbaj de asamblare [14, 7] pentru a forma grupuri de instructiuni care pot fi expediate în paralel unitatilor functionale în momentul executiei. Scheduling-ul instructiunilor poate fi vazut ca un proces în care fiecare instructiune se încearca a fi succesiv mutata sau “*infiltrata în sus*” [23] prin structura de cod într-o încercare de a fi executata cel mai devreme posibil. Acest proces este stopat de catre dependentele de date dintre instructiuni.

### 4.3.2. HSS ÎN CONTEXTUL ACTUAL

Trace Scheduling [21], care este poate cea mai cunoscuta tehnica de scheduling, a fost dezvoltata de catre J. Fisher pe baza unei arhitecturi VLIW (Bulldog). La baza acestei tehnici sta conceptul de *trace* – care reprezinta o cale printr-o secventa de basic block-uri. Trace-urile sunt selectate si reorganizate în ordinea frecventei lor de executie. Trace-ul selectat este reorganizat ca si cum ar fi un singur basic block. La intrarea si iesirea din trace este adaugat codul necesar pentru a pastra semantica programului dupa scheduling. Procesul se repeta pâna când tot codul este optimizat în vederea executiei. Totusi, codul din trace-uri succesive nu se suprapune niciodata si nu se aplica tehnica *software pipelining* [19, 22, 25]. Aceasta problema poate fi rezolvata prin desfasurarea buclelor (“*loop unrolling*”), obținându-se un trace mai mare, în care corpul buclei pentru iteratii diferite este executat în paralel. Dezavantajul este ca loop unrolling este un mecanism care implica explozia codului.

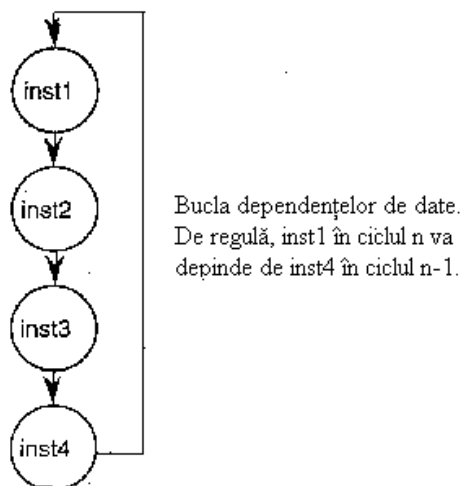
Tehnica introdusa de Fisher poate fi aplicata la fel de bine si procesoarelor superscalare cu executie *in order*. Sunt necesare doar usoare modificari pentru a pastra semantica la nivelul instructiunii si a se asigura executia codului rezultat si în stilul secvential original.

Dezvoltarile actuale în scheduling încearca sa aplice tehnica software pipelining si se bazeaza fie pe *Tehnica Modulara de Scheduling* [26, 25] a lui Rau si Fisher fie pe algoritmul *Enhanced Percolation Scheduling* [20] dezvoltat de catre K. Ebcioglu la IBM. Software pipelining este o metoda de suprapunere a instructiunilor din iteratii diferite ale buclelor, fara derularea initiala a buclei, în scopul minimizarii numarului de cicluri între iteratiile succesive ale buclei.

Schedulingul modular se bazeaza pe un interval de inițiere (II) fixat. II reprezinta întârzierea dintre începutul iteratiilor succesive ale buclelor. Scheduling-ul modular calculeaza o limita inferioara pentru II. Valoarea minima pentru II poate fi determinata din bucla dependentelor de date. Bucla dependentelor de date (figura 4.2) contine dependentele dintre instructiuni aflate în iteratii diferite ale buclei. Lantul dependentelor de date din figura 4.2 implica un II de minim 4 instructiuni. II poate fi, de asemenea, limitat de numarul de instructiuni care pot fi lansate în executie în fiecare ciclu. De exemplu, daca exista 5 instructiuni aritmetice în bucla si doar doua operatii ALU pot fi lansate în executie în fiecare ciclu, II trebuie sa fie minim 3. Daca II ar fi 2, în conditiile de mai sus, nu ar aparea hazard (nici macar structural).

Se va crea astfel, o bucla de optimizat – numita *fereastră* – având un număr de instrucțiuni egal cu valoarea minimă a lui  $II$ . O tabelă de rezervă este folosită pentru a înregistra resursele folosite în mod curent de către instrucțiunile din bucla respectivă. Unele instrucțiuni pot fi lăsate în poziția inițială din program ("nescheduled") datorită conflictelor la resurse și reordonate ulterior în fereastră, ca parte a algoritmului de backtracking aplicat. Când o instrucțiune este marcată ca "nescheduled", informațiile despre resursele aparținând acelei instrucțiuni sunt înlăturate din tabelă de rezervă. Dacă fereastră nu poate fi schedulată pentru un  $II$  dat,  $II$  este incrementat și procesul se reia până când se obține o buclă schedulată satisfăcătoare. După scheduling pot apărea zone de cod anterioare și / sau posterioare buclei schedulate.

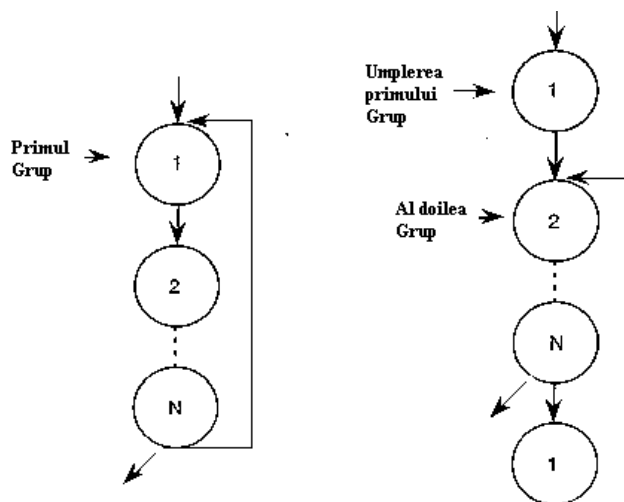
Schedulingul modular funcționează doar pe basic block-uri separat. Principala provocare este de a extinde aplicarea algoritmului la bucle cu structură arbitrară oricât de complexă.



**Figura 4.2.** Bucla dependențelor de date

O altă tehnică propusă este execuția gardată (condiționată prin variabile booleene de gardă) a basic block-urilor multiple într-un singur basic block înainte de scheduling. Tehnica se numește *if – conversie* [32], însă codul schedulat rezultat este departe de a fi optim.

În contrast cu schedulingul modular, algoritmul *Enhanced Percolation Scheduling* păstrează corpul buclei intact pe parcursul procesului de scheduling.



**Figura 4.3.** Algoritmul Enhanced Percolation Scheduling

Un grup de instrucțiuni, numit "*fence*" este selectat și sunt cautate instrucțiuni care pot coexista cu grupul selectat. Procesul continuă până când se umple grupul sau până când nu mai găsim astfel de instrucțiuni. Instrucțiuni succesoare grupului deja creat vor forma noi grupuri. Instrucțiunile din grupurile deja create pot migra spre începutul buclei. Pentru a facilita această mișcare de cod sunt introduse două copii ale primului grup, una la intrarea și alta la ieșirea din buclă (figura 4.3). Copia de la sfârșitul buclei reprezintă operațiile din iteratia urmatoare a buclei. Întregul proces este repetat până când toate instrucțiunile au fost mutate în grupuri. O provocare referitor la această tehnică o constituie evitarea expansiunii codului cauzată de duplicarea agresivă a unor astfel de grupuri.

Bazat pe acest algoritm HSS poate reorganiza bucle de orice complexitate. Există totuși o diferență privind două aspecte: primul, fiecare instrucțiune este reordonată și se încearcă infiltrarea ei în sus prin structura de cod cât mai mult posibil; alegerea instrucțiunilor candidate se face doar pentru a vedea dacă pot fi incluse în grupul de instrucțiuni curent asamblate. Al doilea aspect se referă la restricționarea traversării codului dincolo de punctul de start al buclei. HSS permite utilizarea tehnicii software pipelining [22].

### 4.3.3. MECANISMUL DE REORGANIZARE SI OPTIMIZARE

HSS a fost dezvoltat pentru îmbunătățirea performanței prin schedulingul static al instrucțiunilor. Înaintea procesului de scheduling, HSS introduce informațiile aferente programelor de test în structurile de date corespunzătoare. Schedulerul citește cuvinte de instrucțiuni – LIW (long instruction word), detectează basic block-uri, tinte branch-urilor, proceduri, bucle, bucle imbricate și calculează durata de viață a registrelor (numărul de instrucțiuni aflate între instrucțiunea care înscrie un registru și ultima instrucțiune care îl utilizează pe post de sursă). Există suplimentar posibilitatea de a aplica *inlining funcțiilor*.

La un moment dat, programul reorganizează o singură procedură. Deoarece programele pierd mult timp în bucle care asigură un mare potențial de paralelism, buclele imbricate sunt optimizate primele, urmate de buclele exterioare și apoi de restul de cod.

HSS este un scheduler parametrizabil caracterizat de două tipuri de parametri de configurare. Primul tip selectează modelul de arhitectură (de exemplu, numărul și tipul unităților de execuție). Al doilea tip de parametri specifică diversele opțiuni de scheduling disponibile (de exemplu, decizia ca un bloc de instrucțiuni să poată - sau nu - fi promovat în sus, într-un basic block încheiat cu o instrucțiune BSR).

Mecanismul de scheduling HSS examinează tehnica de infiltrare locală și globală a instrucțiunilor. Aceasta implică două procese majore: verificarea apartenenței instrucțiunilor la grupurile de instrucțiuni deja create, și în caz afirmativ, determinarea posibilității ca respectivele instrucțiuni să treacă în grupul următor de instrucțiuni.

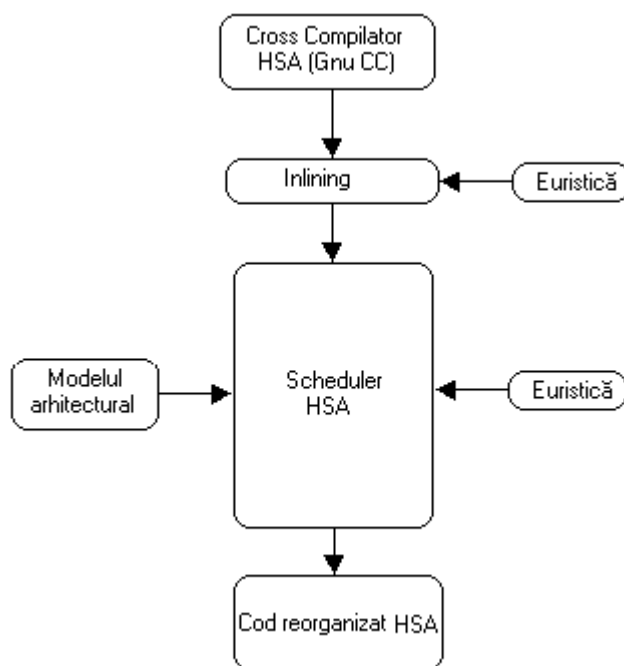
Structura HSS (figura 4.4) are la bază algoritmul “Backedge” și înglobează ambele tehnici de infiltrare (percolare) locală și globală. Întâi este apelată cea locală, apoi cea globală pentru a determina dacă o instrucțiune poate trece într-un alt basic blok situat anterior. Se verifică totodată posibilitatea combinării instrucțiunilor (*merging*) – tehnica folosită pentru eliminarea dependentelor reale de date (RAW) precum și analiza aliasurilor la memorie în cazul existenței acestora (adresele instrucțiunilor cu referire la memorie – Load/Store).

#### Verificarea coexistenței instrucțiunilor

Se face în timpul procesului de infiltrare. O instrucțiune, care urmează a fi infiltrată în sus în structura de cod obiect poate coexista în interiorul unui grup de instrucțiuni dacă nu există dependente reale de date între respectiva instrucțiune și cele deja existente în grup și dacă există suficiente



unitati functionale disponibile. Considerând doua instructiuni, *inst1* deja existenta în grupul de instructiuni, si *inst2* – cea care va fi infiltrata, daca apare o antidependenta (hazard WAW) între cele doua instructiuni nu este nici o problema deoarece *inst2* este adaugata implicit la sfârșitul grupului de instructiuni. Acolo unde este posibil dependentele sunt tratate prin stergerea lui *inst1*. Însa daca *inst2* este gardata ea nu se executa neaparat întotdeauna daca *inst1* se executa, caz în care nu este bine sa se stearga *inst1*. În cazul prezentei hazardurilor RAW acestea pot fi eliminate fie prin tehnica “*merging*” fie prin colapsare dinamica a instructiunilor [27, 33].



**Figura 4.4.** Structura schedulerului HSS

### Verificarea posibilitatii trecerii instructiunilor

Daca apare o antidependenta între un grup de instructiuni si o instructiune care se infiltreaza atunci registrul destinatie al instructiunii respective trebuie renumit înainte de a trece de instructiunea din grup care a cauzat ambiguitatea. Este apelata tehnica de analiza anti-alias la memorie care compara cele doua adrese si în caz ca acestea difera este permisa trecerea instructiunii care se infiltreaza dincolo de instructiunea din grup.

### Infiltrarea individuala a instructiunilor

La infiltrarea individuala a unei instructiuni trebuie examinata posibilitatea de deplasare atât prin basic block-ul curent cât si prin blocurile succesoare celui curent. De regula, o instructiune trebuie sa fie capabila sa se infiltreze pe mai multe cai. Schedulerul trebuie sa lucreze cu copii multiple ale instructiunii percolante care pot patrunde în acelasi basic block pe cai diferite. În consecinta, trebuie rezolvate aceste probleme pentru pastrarea corecta a semanticii programului.

### Infiltrarea basic block-urilor

Consideram urmatorul exemplu:

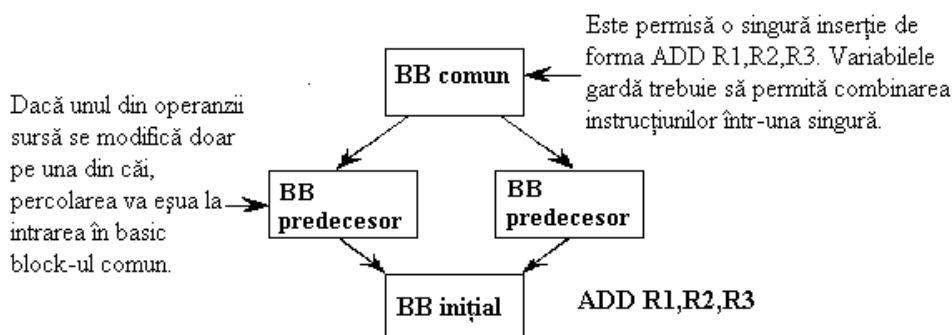
```
LIW0: SUB R2, R3, #4
LIW1: LD  R1, (R0, R5)
LIW2: MOV R7, R2; ADD R2, R3, R4
inst3: ADD R5, R1, R6 /* instructiunea care se infiltreaza */
```

Exemplul respectiv arata ca desi instructiunea inst3 poate trece de toate instructiunile din LIW2 datorita dependentei RAW dintre inst3 si instructiunea LD din LIW1, inst3 nu poate promova mai sus. Inst3 poate coexista în interiorul grupului LIW2 astfel:

```
LIW0: SUB R2, R3, #4
LIW1: LD  R1, (R0, R5)
LIW2:  MOV R7, R2; ADD R2, R3, R4, ADD R5, R1, R6
inst3:
```

Daca o instructiune ajunge sa fie prima într-un basic block atunci ea se infiltreaza atât în basic block-ul predecesor cât si în basic block-ul destinatie. Instructiunile care se infiltreaza trebuie sa reuseasca în toate blocurile atât cel predecesor cât si cel destinatie pentru a pastra validitatea semanticii programului. Tehnica “*percolation*” poate implica, inserarea uneia sau a mai multor versiuni ale instructiunii originale si stergerea celei originale din scheduler. Exista doua aspecte majore ce trebuie rezolvate de catre scheduler. Primul, daca o instructiune merge pe mai multe cai distincte, si întâlnește ulterior tot o versiune a ei (fie aceasta copia nr. 2) într-un basic block, ea poate fi cu succes inserata în acel bloc daca orice garda booleana sau orice alteratii aparute în timpul infiltrarii permit ambelor copii ale instructiunii sa fie combinate pentru a forma o singura instructiune; în caz contrar infiltrarea primei copii a instructiunii va esua. Al doilea aspect

se refera la faptul ca, daca o copie a unei instructiuni s-a infiltrat deja cu succes în tot basic block-ul de pe o anumita cale, atunci cea de-a doua copie a instructiunii urmând o alta cale nu poate fi inserata în acel basic block. De asemenea, aceasta trebuie sa strabata prin tot block-ul, altfel procesul esueaza.



**Figura 4.5.** Combinarea instrucțiunilor într-un Basic Bloc Comun

### Execuția condiționată a instrucțiunilor

La intrarea într-un nou basic block, pot fi adăugate variabile de garda booleene dacă fluxul de control al programului din block este determinat de un salt condițional (**BT** pe “true” sau **BF** pe “false”). Presupunem că avem instrucțiunea: **BT B1, Label**. Dacă blocul predecesor este următorul în secvență atunci acestuia i se adaugă garda opusă **F B1**. Pe de altă parte, dacă blocul predecesor este un bloc destinație atunci se adaugă garda **T B1**. Numărul variabilelor garda conjugate (**AND**) este setat de către utilizator. Astfel, la promovarea unei instrucțiuni printr-o serie de basic block-uri implică adăugarea de garzi multiple. Considerăm, drept exemplu, următoarea secvență:

```
NE B1, R11, R12
BT B1, L8
...
ADD R10, R6, #-1 ; secvența succesoare care se deplasează
L8: MOV R5, #6 ; secvența destinație care se deplasează
```

După reorganizare secvența devine:

```
NE B1, R11, R12
BT B1, L8
FB1 ADD R10, R6, #-1
TB1 MOV R5, #6
```

În timpul infiltrării o instrucțiune poate capta un număr mai mare decât cel permis de garzi. Dacă instrucțiunea nu este un *store* sau un *branch* atunci variabila de garda care a fost captată cel mai devreme este înlocuită și registrul destinație este redenumit. Pentru instrucțiunile de salt și scriere în memorie problema este tratată diferit. În primul rând o instrucțiune de salt nu trebuie să piardă vreo gardă. În al doilea rând, o instrucțiune *store* nu poate fi executată în mod speculativ, deoarece s-ar altera iremediabil contextul programului.

### Tratarea instrucțiunilor cu latente mari

Instrucțiunile a căror execuție necesită mai mult de un ciclu se numesc instrucțiuni “cu latente mari”. Astfel de instrucțiuni sunt cele de înmulțire, împărțire, flotante și cele cu referire la memorie. Numărul de cicli în care se execută o instrucțiune *load* depinde de numărul de cicli necesari accesării datei din cache-ul de date sau din memoria internă. Când o astfel de instrucțiune se infiltrează într-un nou grup de instrucțiuni, acest grup trebuie să nu conțină instrucțiuni care folosesc ca sursă registrul destinație al instrucțiunii *load*. În timpul rularii procesul va stagna până când execuția instrucțiunii *load* se va fi încheiat, scheduler-ul nefiind unul optim.

#### Exemplu:

**LIW1:** ADD R1, R2, R3; LD R5, (R0,R6)

**LIW2:** SUB R8, R5, R4

Pentru obținerea unui scheduler optim trebuie inserat un grup de instrucțiuni suplimentar. Optimizarea HSS se face prin inserarea unei copii virtuale (**VCOPY**) între cele două grupuri de instrucțiuni, necesară terminării execuției instrucțiunii cu latentă mare. Copiile virtuale au forma **VCOPY Ri, Ri** – unde Ri este registrul destinație al instrucțiunii cu latentă mare. Acestea nu folosesc nici o resursă și nici nu sunt incluse în codul final schedulat. Scopul lor este de a pune în valoare instrucțiunile cu latentă mare în timpul procesului de scheduling. Exemplul de mai sus devine:

**LIW1:** ADD R1, R2, R3; LD R5, (R0,R6)

**LIW2:** VCOPY R5, R5

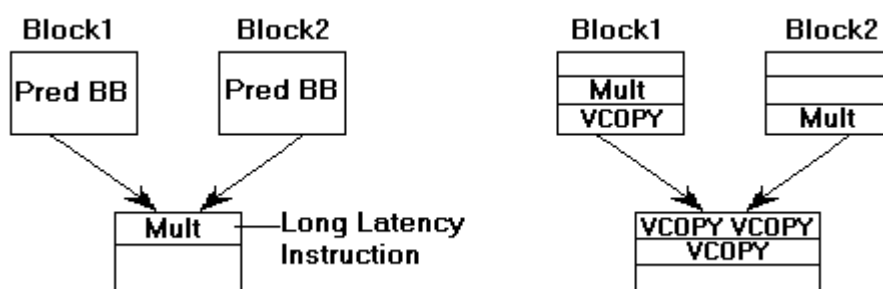
**LIW3:** SUB R8, R5, R4

VCOPY asigură ca instrucțiunea SUB nu poate fi mutată în grupul LIW2 datorită dependențelor reale de date prin registrul R5.

Instructiunile VCOPY sunt tratate exact la fel ca celelalte instructiuni si pot promova la rândul lor în sus în structura de cod. Probleme apar când instructiunile cu latentă mare se infiltrează pe cai diferite în câteva basic block-uri distincte. Dacă VCOPY este generată o singură dată atunci ea nu poate fi utilizată de către toate noile instructiuni cu latentă mare inserate. Ulterior, ele tind să se separe de instructiunile cu latentă mare corespunzătoare în timpul scheduling-ului. Separarea se face prin *renaming* aplicat atât instructiunii cu latentă mare cât și copiei virtuale VCOPY.

Versiunea nouă a HSS generează o instructiune VCOPY pentru fiecare instanță a instructiunii cu latentă mare. Acest lucru implică refacerea cailor de infiltrație prin câteva basic block-uri. Totodată ștergerea unei instructiuni cu latentă mare din scheduler determină ștergerea copiei asociate VCOPY.

Următorul exemplu arată cum sunt inserate instructiunile VCOPY când o instructiune de înmulțire se infiltrează cu succes în două basic block-uri, ca în figura de mai jos.



**Figura 4.6.** Inserarea unei instructiuni VCOPY după o instructiune cu latentă mare

O instructiune de înmulțire se execută pe procesorul HSA în trei cicli și de aceea necesită două instructiuni VCOPY. În basic block-ul 1 instructiunea de înmulțire s-a infiltrat în penultimul grup de instructiuni iar în basic block-ul 2 în ultimul grup. Copiile virtuale sunt introduse astfel: blocul 1 are o instructiune VCOPY în ultimul grup iar cealaltă copie se află în primul grup al blocului succesor care este de fapt blocul de unde a promovat instructiunea de înmulțire originală. În blocul 2 deoarece instructiunea de înmulțire se află în ultimul grup cele două copii vor fi inserate în blocul succesor în primul și al doilea grup de instructiuni. Dacă instructiunea de înmulțire se reinfiltrează cu succes în alte blocuri, noi instructiuni VCOPY vor fi inserate odată cu ea, iar copiile originale aferente instructiunii de înmulțire anterior introduse pe aceeași cale vor fi șterse.

### Infiltrarea instructiunilor de salt

HSS considera drept “*Delay Slot*” numarul de grupuri de instructiuni situate dupa grupul care contine instructiunea de salt si care trebuie executate înainte ca branch-ul sa fie executat. HSS trateaza instructiunile de salt care promoveaza în sus similar cu celelalte instructiuni: verificarea dependentele si antedependentele de date, verificarea apartenetei instructiunilor la grupurile de instructiuni deja create, si în caz afirmativ, determinarea posibilitatii ca respectivele instructiuni sa treaca în grupul de instructiuni urmator. Totusi, infiltrarea instructiunilor de salt difera de celelalte în doua aspecte importante. Primul, este acela ca salturile pot urca în program doar cu un numar de grupuri de instructiuni maxim egal cu parametrul Delay Slot. Al doilea aspect se refera la faptul ca, daca un salt (fie acesta al doilea branch) urca într-un basic bloc predecesor care contine deja o instructiune de salt (primul branch), atunci al doilea branch devine instructiune în primul *branch delay slot* si celelalte instructiuni din primul delay slot care urmeaza celui de-al doilea branch vor fi incluse în cel de-al doilea *branch delay slot*.

### Fuzionarea instructiunilor ( *merging* )

HSS foloseste tehnica “*merging*” pentru a depasi limitarile introduse prin dependentele reale de date. Aceasta implica combinarea a doua instructiuni într-una singura. Exista trei categorii de astfel de instructiuni. Prima categorie, numita **MOV Merging** implica o pereche de instructiuni în care prima din ele este MOV. A doua categorie numita **Immediate Merging** se caracterizeaza prin faptul ca ambele instructiuni au ca operanzi sursa valori imediate. A treia categorie se numeste **MOV Reabsorption** si are ca a doua instructiune o instructiune MOV sau instructiunea ce se va infiltra va fi convertita la tipul primei instructiuni.

#### ❖ MOV Merging

Când apare o dependenta reala de date între o instructiune MOV si o instructiune care încearca sa promoveze în sus în structura de cod a programului, se verifica faptul daca cele doua instructiuni pot fi procesate în paralel. În caz afirmativ instructiunea ce se infiltreaza își continua drumul ascendent prin basic block. În continuare vom prezenta tipurile de situatii ce pot sa apara în cadrul tehnicii MOV merging.

- ❑ Combinarea cu o instructiune de **adunare**.

a) Secventa initiala:

MOV R6, R7

ADD R3, R6, R5 /\* instructiunea care se infiltreaza \*/

Secventa modificata:

MOV R6, R7; ADD R3, R7, R5

b) Secventa initiala:

MOV R6, #4

ADD R3, R6, #5 /\* instructiunea care se infiltreaza \*/

Secventa modificata:

MOV R6, #4; MOV R3, #9

Prin înlocuirea registrului R6 cu valoarea imediata respectiva instructiunea de adunare devine MOV.

❑ Combinarea cu o instructiune **store**

Secventa initiala:

MOV R3, #0

ST (R1, R2), R3 /\* instructiunea care se infiltreaza \*/

Secventa modificata:

MOV R3, #0; ST (R1, R2), R0

Registrul R3 este înlocuit cu R0 deoarece toate procesoarele RISC au registrul R0 cablat la 0.

❑ Combinarea cu o instructiune **relationala**

Secventa initiala:

MOV R4, #4

GT B1, R4, R3 /\* instructiunea care se infiltreaza \*/

Secventa modificata:

MOV R4, #4; LTE B1 R3, #4

Registrul R4 este înlocuit cu valoarea imediata memorata de el si instructiunea GT devine LTE pentru a permite operanzilor instructiunilor interschimbarea.

❑ Combinarea instructiunilor **gardate**

a) Secventa initiala:

EQ B3, R0, R0 /\* B3 := true \*/

**TB3** ADD R10, R11, R12/\* instructiunea care se infiltreaza \*/

Secventa modificata:

EQ B3, R0, R0; ADD R10, R11, R12

Instructiuni de tipul EQ Bi, R0, R0 si NE Bi, R0, R0 sunt folosite pentru a înlocui instructiunile MOV Bi, #true sau MOV Bi, #false pe care arhitectura HSA nu le pune la dispozitie. Deoarece B3 este întotdeauna *true* garda TB3 aferenta instructiunii de adunare poate fi înlaturata. Daca B3 ar fi

evaluata întotdeauna la *false* atunci instrucțiunea care se infiltrează va fi înlocuită cu un NOP.

b) Secvența inițială:

MOV B1, B2

**TB1** LD R4, (R0, R6) /\* instrucțiunea care se infiltrează \*/

Secvența combinată:

MOV B1, B2; **TB2** LD R4, (R0, R6)

Pentru eliminarea dependențelor de date, garda instrucțiunii LD devine acum B2.

c) Secvența inițială:

MOV B1, B2

BT B1, label /\* instrucțiunea care se infiltrează \*/

Secvența modificată:

MOV B1, B2; BT B2, label

d) Secvența inițială:

EQ B1, R0, R0

BT B1, label /\* instrucțiunea care se infiltrează \*/

Secvența modificată:

BRA label

Dacă registrul boolean care constituie garda pentru instrucțiunea care se infiltrează are valoare constantă saltul fie va fi eliminat fie va fi transformat într-unul necondiționat (BRA).

### ❖ Immediate Merging

Această tehnică implică orice pereche de instrucțiuni care au valori imediate pe post de al doilea operand sursă.

Secvența inițială:

SUB R3, R6, #3

ADD R4, R3, #1 /\* instrucțiunea care se infiltrează \*/

Secvența modificată:

SUB R3, R6, #3; ADD R4, R6, #-2

### ❖ MOV Reabsorption

Acest tip de combinație implică transformarea instrucțiunii MOV într-o instrucțiune de același tip cu prima.



Secventa initiala:

ADD R3, R4, R5

MOV R6, R3 /\* instructiunea care se infiltreaza \*/

Secventa combinata:

ADD R3, R4, R5; ADD R6, R4, R5

Ideea aflata la baza acestei metode este de a absorbi instructiunea MOV prin *renaming* aplicat registrului destinatie al primei instructiuni reducând astfel expansiunea codului. În cazul în care prima instructiune este una cu referire la memorie (Load sau Store) duplicarea instructiunilor poate duce la reducerea performantei datorita numarului limitat de porturi de date ale cache-ului.

Prin tehnica *merging* pot aparea doua conflicte majore. Primul este acela ca prin combinare instructiunile vor fi inserate mai degraba la mijlocul grupului de instructiuni decât la sfârșit. Al doilea se refera la faptul ca daca o instructiune este inserata în mijlocul grupului poate fi necesar ca ea sa fie redenumita. O instructiune va fi inserata în mijlocul grupului daca ea trece de câteva instructiuni din grup si va fi combinata cu alta. Întrucât prin combinare, în general, se altereaza operanzii sursa ai instructiunii care se infiltreaza, tehnica *merging* poate introduce o falsa dependenta de date (WAR, WAW) cu una din instructiunile din grup situata dupa prima instructiune aferenta tehnicii *merging*. Pentru a elimina aceasta falsa dependenta instructiunea care se infiltreaza urmeaza sa fie introdusa înaintea instructiunii care ar implica dependenta. Inserarea în mijlocul unui grup poate implica ulterior false dependente deoarece operandul destinatie poate deveni sursa pentru una din instructiunile situate în continuare spre sfârșitul grupului. Aceste false dependente pot fi eliminate prin *renaming* aplicat registrului destinatie a instructiunii inserate. Urmatorul exemplu exemplifica cele enuntate anterior.

**LIW1:** ADD R1, R2, R3; MOV R7, R8; LD R8, (R0,R5); SUB R9, R3, #4

**LIW2:** ADD R3, R7, R4 /\* instructiunea care se infiltreaza \*/

Instructiunea de adunare din LIW2 se va combina cu instructiunea MOV din LIW1 creând noua instructiune ADD R3, R8, R4 si va fi necesar sa fie introdusa în fata instructiunii LD pentru a evita o falsa dependenta prin registrul R8. În plus, deoarece instructiunea SUB din LIW1 este dependenta WAR prin registrul R3 fata de instructiunea care se infiltreaza, acesta va trebui redenumit în instructiunea de adunare. Codul final va arata astfel:

**LIW1:** ADD R1, R2, R3; MOV R7, R8; **ADD R6, R8, R4;** LD R8, (R0,R5); SUB R9, R3, #4  
**LIW2:** MOV R3, R6 /\*instructiune introdusa datorita renaming-ului aplicat lui R3 \*/

Ca o concluzie, instructiunile cu care se combina instructiunile inserate nu sunt sterse sau alterate niciodata din motivul ca valoarea din registrul lor destinatie poate fi necesara altor instructiuni ulterioare. Ca rezultat, instructiunea MOV din LIW2 poate fi stearsa doar daca si când o alta instructiune care odata inserata în grup determina ca registrul R6 nu mai este necesar (teoretic a expirat durata lui de viata).

### Combining – ul instructiunilor

Tehnica de *combining*, numita si colapsare statica a dependentelor de date, este identica în principiu cu tehnica *merging* în sensul depasirii problemelor legate de dependente reale de date, combinarea si schimbarea operanzilor în instructiuni pentru a permite instructiunii percolante sa-si continue drumul prin basic block. Echipa de cercetatori de la IBM (VLIW Group) condusa de Kemal Ebcioglu foloseste exemplele tehnicii “*immediate merging*” drept exemple de combining al instructiunilor. Daca tehnica “*merging*” restrictiona instructiunile care pot fuziona la acelea care au un numar maxim de 3 operanzi, combining-ul elimina aceasta restrictie. Pentru implementarea combining-ului sunt necesare instructiuni speciale cu 4 operanzi. La colapsarea statica a unei instructiuni care se infiltreaza rezultatul este o instructiune cu trei operanzi, totodata retinându-se si prima instructiune. În loc de o instructiune, prin colapsare sunt adaugate în scheduler doua instructiuni separate. Doar câmpul *tag* aferent fiecărei instructiuni indica faptul ca cele doua instructiuni sunt colapsate. Avantajul major al acestui aranjament este ca prima instructiune din perechea colapsata poate fi reinfiltrata ulterior sau recombinate cu o alta instructiune. Reinfiltrarea implica de catre scheduler retinerea unei perechi combinate în doua instructiuni separate. Exemplul urmator va clarifica cele enuntate anterior.

Secventa initiala:

MULT R7, R9, #14  
 ADD R6, R7, R5

Secventa combinata:

MULT R7, R9, #14; **MULT R7, R9, #14; ADD R6, R7, R5**  
 /\*instructiuni combinate logic o instructiune \*/

Codul final arata astfel:

MULT R7, R9, #14; ADD R6, (R9 \* #14), R5

Rezultatele obtinute prin simulare de tip “trace driven” determina o imbunatatire a performantei procesoarelor prin folosirea tehnicii de combining de la 50 pâna la 75%.

### Analiza anti-alias a referintelor la memorie

Dependentele de date nu apar doar între registri, ci si între locatii de memorie referite în instructiunile LD si ST. La fel ca celelalte dependente ele provoaca deseori degradarea performantei procesoarelor.

Pentru a face distinctie între locatiile de memorie referite de cele doua tipuri de instructiuni, HSS foloseste o tehnica numita analiza anti-alias statica a memoriei (static memory disambiguation). Pentru a decide daca o instructiune LD poate fi inserata în fata unei instructiuni ST, lucru ce se poate face în siguranta doar daca cele doua adrese difera, adresele locatiilor de memorie sunt comparate si este returnata una din valorile:

- **Diferit:** Adresele sunt întotdeauna diferite.
- **Identic:** Adresele sunt întotdeauna identice.
- **Esueaza:** Adresele nu se pot distinge.

Daca valoarea returnata este “Diferit” instructiunea LD poate fi inserata în fata instructiunii ST. De asemenea, daca valoarea returnata este “Identic” instructiunea LD poate fi înlocuita cu o instructiune MOV ca în exemplul urmator:

Secventa initiala:

ST (R0, R5), R6  
LD R10, (R0, R5)

Secventa devine:

MOV R10, R6  
ST (R0, R5), R6

Pe de alta parte, în cazul în care instructiunea LD este urmata de o instructiune ST, pentru ca aceasta din urma sa poata fi infiltrata în fata primeia **trebuie** ca cele doua adrese sa fie distincte întotdeauna.

Locatiile de memorie nu pot fi întotdeauna discriminate în momentul compilarii (static). Tehnica cu care se rezolva problema în acest caz se numeste anti-alias dinamic al referintelor la memorie. În acest caz instructiunile Load si Store sunt înlocuite cu cod în care comparatia celor doua adrese se face dinamic, în momentul executiei.

**Exemplu:**

Secventa initiala:

ST 4(R5), R8

LD R9, 8(R6)

Secventa obtinuta în urma analizei anti-alias:

ADD R3, R5, #4 /\* Calculeaza adresa pentru ST \*/

ADD R4, R6, #8 /\* Calculeaza adresa pentru LD \*/

LD R9, 8(R6) /\* La adrese diferite efectuam anticipat LD \*/

EQ B1, R3, R4 /\* Compara adresele pentru egalitate \*/

**TB1** MOV R9, R8 /\* În caz de egalitate valoarea lui R9 se preia direct din registru R8 \*/

ST 4(R5), R8 /\* Se memoreaza R8 la adresa ceruta \*/

Folosirea instructiunii gardate înlatura necesitatea prezentei a doua instructiuni de salt.

**Macroexpandarea procedurilor**

Tehnica de *inlining* (macroexpandare) este un mecanism prin care secventa de instructiuni din care este compusa o functie sau o procedura este duplicata si inserata în procedura apelanta în locul apelului functiei. Instructiunile de apel si revenire din procedura / functie pot fi eliminate precum si alte instructiuni care manipuleaza stiva, salveaza si restaureaza registri la intrarea si iesirea din procedura / functie.

HSS poate aplica mecanismul de macroexpandare asupra procedurilor înainte ca procesul de scheduling sa înceapa. HSS asigura câtiva parametri care controleaza tehnica *inlining* – în cazul invocarii sale de catre scheduler. Acesti parametri pot semnifica daca mecanismul se aplica procedurilor recursive sau definesc numarul maxim de basic block-uri pe care o procedura, apelata din interiorul / exteriorul unei bucle, îl poate contine pentru a putea fi macroexpandata, numarul maxim de apeluri din exteriorul unei bucle al unei proceduri, pentru macroexpandarea acesteia; numarul maxim de basic block-uri al unei proceduri apelata din interiorul unei proceduri recursive; numarul maxim de imbricari al procedurilor care pot fi macroexpandate.

Înainte de a sti daca mecanismul de *inlining* va fi invocat sau nu se înregistreaza informatiile privitoare atât la basic block-uri cât si la proceduri. Se identifica si se înregistreaza datele privind procedurile

recursive. La invocarea mecanismului de macroexpandare se disting trei cazuri majore:

- Apelul procedurii / functiei se face din interiorul unei bucle;
- Apelul procedurii / functiei se face din interiorul unei proceduri recursive dar în afara buclei;
- Apelul procedurii / functiei se face din exteriorul unei bucle.

Imediat ce procedura macroexpandata a fost inserata în codul programului, toate etichetele din procedura respectiva sunt renumite si toate tintele branch-urilor sunt actualizate. Orice instructiuni redundante de intrare sau iesire, în sau din procedura, sunt eliminate. Printre aceste instructiuni se afla si cele de load / store care salveaza registrii la intrarea în procedura respectiv îi restaureaza la iesire, deoarece valorile din registrii respectivi nu mai sunt folosite de procedura apelanta. Apelurile BSR, precum si ultima instructiune din procedura – MOV PC, RA – nu mai sunt necesare si sunt eliminate.

Prezentam, în continuare, un exemplu edificator al mecanismului de inlining. Consideram doua proceduri Proc1 si Proc2 înainte si dupa macroexpandare.

**Proc1:**

**L1:** SUB SP, SP, #256  
ST 8(SP), R16

**L2:** LD R16, 8(SP)  
ADD SP, SP, #256  
MOVPC, RA

**Proc2:**

SUB SP, SP, #256  
ST 8(SP), R16

**L4:**

BSR RA, Proc1  
MOV R5, R16  
LD R16, 8(SP)  
ADD SP, SP, #256  
MOV PC, RA

Dupa macroexpandare procedura Proc1 nu se schimba însa Proc2 va contine si instructiunile lui Proc1, astfel:

<b>Proc1:</b>		<b>Proc2:</b>	
<b>L1:</b>	SUB SP, SP, #256 ST 8(SP), R16		SUB SP, SP, #256 ST 8(SP), R16
<b>L2:</b>	LD R16, 8(SP) ADD SP, SP, #256 MOVPC, RA	<b>Q1:</b>	SUB SP, SP, #256 ST 8(SP), R16
			<i>Proc1 macroexpandata</i>
		<b>Q2:</b>	LD R16, 8(SP) ADD SP, SP, #256
		<b>L4:</b>	MOV R5, R16 LD R16, 8(SP) ADD SP, SP, #256 MOV PC, RA

Odata aplicat procedurilor mecanismul de inlining noile benchmark-uri sunt puse la dispozitia scheduler-ului.

### Algoritmul HSS

Algoritmul HSS are un dublu obiectiv. Primul consta în aplicarea tehnicii *software pipelining* la bucle de o complexitate arbitrara. Al doilea obiectiv este de a reduce expansiunea codului prin evitarea miscarii neproductive a codului de o parte si de alta a marginii buclei. În continuare se prezinta sintetic acest algoritm.

#### Etapa I

Reorganizarea buclei cu infiltrarea instructiunilor este permisa doar în interiorul buclei.

#### Etapa II

*Repeta {*

Infiltrarea fiecărei instructiuni din primul grup de instructiuni al buclei în jurul marginii de reluare a buclei.

1. Se determina existenta dependentelor dintre instructiunea care se infiltreaza si alte instructiuni din grupurile finale de instructiuni aflate în interiorul buclei. De observat ca

pot apare antidependente. (În cazul instructiunilor de ramificatie este suficient ca lantul dependentelor de date sa ajunga la un branch).

2. Se verifica daca lantul dependentelor de date poate fi colapsat folosind fie tehnica de *merging* fie cea de *combining* aplicata instructiunilor.

Daca cel putin o instructiune si-a schimbat pozitia, bucla se recompacteaza si se reia procesul de infiltrare al instructiunilor doar în interiorul buclei.

}pâna când (nici o instructiune nu mai poate fi mutata)

Pentru clarificarea functionarii algoritmului HSS prezentam etapele de transformare a unui basic block prin scheduling, subliniind reducerea numarului de iteratii al buclei. Presupunem ca toate instructiunile au latenta unitara si ca *branch delay slot*-ul este 0.

**Codul original :**

**Loop:**

<i>tact=1</i>	LD	R16, (R1)
<i>tact=2</i>	ADD	R16, R16, #17
<i>tact=3</i>	ST	(R3), R16
<i>tact=4</i>	ADD	R1, R1, #4
<i>tact=5</i>	ADD	R3, R3, #4
<i>tact=6</i>	SUB	R2, R2, #1
<i>tact=7</i>	NE	B1, R2, #0
<i>tact=8</i>	BT	B1, Loop

Bucula initiala necesita 8 cicli pentru a fi executata. Pe parcursul primei treceri fiecare instructiune începând din marginea superioara a buclei se infiltreaza si promoveaza în sus în structura de cod cât se poate de mult.

**Loop:**

<i>tact=1</i>	LD R16, (R1); ADD R1, R1, #4; ADD R4, R3, #4; SUB R2, R2, #1;
<i>tact=2</i>	ADD R16, R16, #17; NE B1, R2, #0;
<i>tact=3</i>	ST (R3), R16; MOV R3, R4; BT B1, Loop

Registrul destinatie al celei de-a treia instructiuni ADD este redenumit din R3 în R4. Fiecare bucla se executa acum doar în 3 cicli în loc de 8.

Instructiunile din primul grup de instructiuni promoveaza apoi în jurul marginii de reluare a buclei. În cazul aparitiei dependentelor de date care nu pot fi înlaturate dintre instructiunea care se infiltreaza si alte instructiuni, procesul de promovare se întrerupe. În timpul primei infiltrari în jurul marginii buclei se creeaza o zona de cod *prolog*. Fiecare instructiune care se misca în jurul acestei margini poate promova de asemenea si în zona de cod preludiu. Bucla este reorganizata si procesul de promovare al instructiunilor se reia întâi în interiorul buclei, apoi si în jurul ei. Procesul continua pâna când nici o instructiune nu mai poate fi mutata si codul arata astfel:

**Codul prolog:**

```
tact=1      LD R17, (R1); SUB R2, R2, #1; ADD R1, R1, #4;
tact=2      NE B1, R2, #0; SUB R2, R2, #1; ADD R16, R17, #17;
tact=2      LD R17, (R1); ADD R1, R1, #4
```

**Loop1:**

```
tact=3      SUB R2, R2, #1; ST (R3), R16; ADD R3, R3, #4;
tact=3      ADD R3, R3, #4; ADD R16, R17, #17; LD R17, (R1);
tact=3      ADD R1, R1, #4; BT B1, Loop1; NE B1, R2, #0;
```

Zona de cod prolog cuprinde iteratii partiale ale buclei în diferite faze de executie.  
Corpul buclei completeaza iteratiile începute în codul preludiu. Bucla a fost restrânsa la o singura iteratie, executia durând un ciclu.

**Concluzii**

Lucrarea de fata se constituie într-o introducere în scheduling si considera schedulerul HSS un exponent modern al acestei tehnici. Desi efortul autorilor a fost de a realiza o documentatie cât mai completa, multe detalii si caracteristici au fost omise pentru a forma cititorului o impresie precisa si clara despre scheduler si scheduling.



## 5. PROCESORUL IA-64: ÎNTRE EVOLUTIE SI REVOLUTIE

---

Arhitectura Intel IA-64 pe 64 de biti (având numele de cod *Merced*) a fost proiectată de către Intel în colaborare cu cercetătorii de la Hewlett Packard dar și cu anumite grupuri de cercetare academice precum cel de la Universitatea din Illinois (compilerul IMPACT), ca reprezentând un pas (r)evolutionar pe linia viitoarelor microprocesoare (de după 1999) comerciale de uz general, prin exploatarea agresivă a paralelismului la nivel de instrucțiuni printr-o sinergie hardware-software numită EPIC (*“Explicitly Paralell Instruction Computing”*). Practic IA-64 va înlocui curând și pe plan comercial deja clasicul standard Pentium, cu unul nou, practic aproape necunoscut momentan având în vedere că prima documentație tehnică cuprinzând cca. o mie de pagini a fost data publicității abia în mai 1999 [34]. În vederea extragerii unui grad ILP (*“Instruction Level Parallelism”*) maximal, procesorul IA-64 (Intel Architecture) - ce va fi cunoscut sub prima formă comercială ce va fi implementată în tehnologie de 0.18 microni la 800 MHz sub numele de *Itanium* - include caracteristici arhitecturale moderne precum: execuție speculativă și predicativă a instrucțiunilor, seturi extinse de registre interni, predictor avansat de branch-uri, optimizatoare de cod etc. Adresarea memoriei se face pe 64 biti într-un spațiu virtual urias. Desigur că IA-64 respectă o compatibilitate binară perfectă cu arhitecturile Intel pe 32 biti anterioare (Pentium, Pentium Pro, Pentium II, Pentium III), putându-se deci rula actualele aplicații soft pe 32 biti pe noile platforme de operare pe 64 biti. De altfel, arhitectura IA-64 permite atât implementarea unor sisteme de operare pe 32 biti în modurile de lucru protejat, real și virtual 8086 (Pentium) cât și a unor sisteme de operare pe 64 biti care însă pot rula mai vechile (actualele !) aplicații pe 32 de biti în oricare dintre cele 3 moduri de lucru cunoscute. Asadar în orice moment, procesorul acesta poate rula atât instrucțiunile Pentium ISA-32 (*“Instruction Set Architecture”*) cât și setul

nou ISA-64. Exista implementate 2 instructiuni de salt neconditionat dedicate (având mnemonicile *jmpe* si *br.ia*) care dau controlul programului spre o instructiune ISA-64 respectiv ISA-32 si totodata modifica în mod corespunzator setul curent de instructiuni utilizate (ISA). În continuare se vor prezenta succint si fatalmente incomplet, doar **câteva dintre caracteristicile arhitecturale novatoare** ale IA-64, unele implementate în premiera în sfera comerciala (altfel cunoscute si investigate de mult timp în mediile de cercetare, în special academice).

### Arhitectura generala: câteva aspecte

Pe scurt, arhitectura registrilor program ar fi urmatoarea:

- ❑ 128 registri generali pe 64 biti (32 globali si 96 locali, utilizabili in ferestre de catre diversele programe). În modul de lucru pe 32 biti IA-32 (compatibil Pentium), parte sau portiuni din acesti registri generali îndeplinesc rolul cunoscutilor registri ai acestei arhitecturi. Astfel de exemplu registrul GR8 devine acumulatorul extins EAX iar registrul GR17(15:0) devine registrul selector CS din cadrul modului de lucru protejat IA-32.
- ❑ 128 registri FPP (*Flotant Point Processor*) pe 82 de biti (primii 32 sunt generali, ceilalti sunt dedicati redenumirii statice în vederea accelerarii procesarii buclelor de program).
- ❑ 64 registri de garda (registri predicat) pe 1 bit, utilizati pentru executia conditionata a instructiunilor (vezi în continuare).
- ❑ 8 registri destinati instructiunilor de branch, pe 64 de biti. Sunt utilizati pentru a specifica adresele destinatie în cazul salturilor indirecte (inclusiv cele de tip call/return).
- ❑ un numarator de adrese program numit – clasic în tehnologia Intel – Instruction Pointer (IP).
- ❑ un registru numit CFM (“Current Frame Marker”) care descrie starea ferestrei curente de registri locali (marime fereastră, numar registri locali/de iesire, adrese de baza pentru registrii utilizati la redenumire [8, 33, 34]).
- ❑ un numar de asa-numiti registri de aplicatie incluzând registrii de date dedicati unor scopuri speciale precum si registrii de control ai aplicatiilor.

IA-64 proceseaza 6 tipuri distincte de instructiuni (întregi ALU, întregi non-ALU, cu referire la memorie, flotante, ramificatii si extinse). Exista implementate 4 unitati de executie si anume:

- unitatea I dedicata instructiunilor întregi si extinse

- unitatea M dedicată instrucțiunilor cu referire la memorie dar și unor instrucțiuni de tip întreg ALU
- unitatea F dedicată instrucțiunilor în virgula mobilă (FPP)
- unitatea B (Branch) dedicată instrucțiunilor de ramificație program

Instrucțiunile IA-64 sunt procesate pipeline-izat în 4 faze distincte și anume:

- ❑ faza de aducere a instrucțiunii din cache-ul de instrucțiuni sau din memoria principală
- ❑ faza de citire stare arhitecturală, dacă e necesară
- ❑ faza de execuție propriu-zisă a instrucțiunii
- ❑ faza de actualizare a contextului arhitectural, dacă e necesară (“update”)

Astfel IA-64 permite execuția mai multor instrucțiuni – masină independentă simultan, fapt facilitat prin implementarea unor **unități de execuție multiple**, seturi multiple de registre generali, optimizator de cod agresiv (scheduler integrat în compilatoare și care grupează instrucțiunile independente din programul obiect în grupuri de instrucțiuni primitive multiple) etc. Arhitectura permite transferuri de informație între compilator și procesorul hardware în scopul minimizării efectelor defavorabile aferente miss – predicției ramificațiilor, miss-urilor în cache, instrucțiunilor load/store etc. Astfel de exemplu, compilatorul poate transmite prin anumite câmpuri binare din codul instrucțiunii, informații deosebit de utile legate de predicția branch-urilor (strategie de predicție statică sau dinamică prin predictorul hardware etc.) [33].

Schedulerul “împachetează” câte 3 instrucțiuni primitive independente într-o așa numită instrucțiune multiplă (“bundle”) după binecunoscutul principiu care stă la baza arhitecturilor VLIW (“Very Long Instruction Word”). Formatul unei asemenea instrucțiuni multiple este prezentat mai jos:

Slot instr. 1	Slot instr. 2	Slot instr. 3	Template
41 biti	41 biti	41 biti	5 biti

Câmpul “template” are 2 roluri distincte:

- codifică unitatea de execuție aferentă fiecărei instrucțiuni primitive din instrucțiunea multiplă, realizând astfel o rutare statică a instrucțiunilor spre unitățile de execuție cu beneficii majore asupra reducerii complexității hardware a procesorului

- indica asa-numite “stopuri arhitecturale”; un atfel de “stop” aferent unui slot informeaza structura hardware ca una sau mai multe instructiuni anterioare sunt dependente de date fata de una sau mai multe instructiuni situate dupa cea marcata cu “stop”. Prin urmare, logica de control va opri fluxul de instructiuni pe slotul respectiv pâna la rezolvarea dependentei în cauza. Cu alte cuvinte, structura hardware este asigurata, de catre schedulerul (reorganizatorul - optimizator) software, ca toate instructiunile primitive cuprinse între 2 astfel de “stopuri” succesive sunt independente (RAW – Read After Write sau WAW – Write After Write) si prin urmare, ar putea fi procesate în paralel daca resursele hardware disponibile o permit. Se rezolva astfel în mod elegant o redundanta operationala caracteristica din pacate multor procesoare superscalare actuale, prin reluarea de catre hardware a stabilirii dependentelor de date, operatie efectuata anterior de catre schedulerul software. Iata deci esenta conceptului de “parallelism explicit” (EPIC) ce caracterizeaza arhitectura IA-64 ca fiind **un hibrid interesant între o structura superscalara simplificata si respectiv una tip VLIW.**

### Executia speculativa a instructiunilor

O alta caracteristica deosebit de moderna implementata în arhitectura IA-64 (microprocesorul *Itanium*) consta în **executia speculativa** a instructiunilor. Exista 2 tipuri de speculatii: **de control** (când o instructiune aflata în program dupa un salt conditionat se executa înaintea acestuia cu influenta benefica asupra timpului de executie) si respectiv **de date** (când o instructiune tip “load” situata în program dupa o instructiune tip “store” se executa înaintea acesteia cu beneficii asupra timpului de executie datorate mascarii latentei instructiunii de încarcare). Pentru a exemplifica în mod concret o speculatie de control pe IA-64 se considera secventa de program:

```
if (a > b)
    load (ld_adr1,target 1)
else
    load (ld_adr2,target 2)
```

Schedulerul va rescrie aceasta secventa utilizând instructiuni “load” de tip speculativ (“sload”), ca mai jos:

```
sload (ld_adr1,target1)
sload (ld_adr2,target2)
if (a>b)
```

```

        scheck (target1, recovery_adr1)
    else
        scheck (target2, recovery_adr2)

```

În primul rând se observa că instrucțiunile de încărcare se execută speculativ, înainte de determinarea condiției de salt ( $a > b$ ), conducând astfel la grabirea procesării. Desigur în acest caz sunt necesare corectii în situația în care una dintre cele 2 încărcări speculative generează o excepție (de exemplu o excepție de tip “page fault”). Pentru prevenirea unor asemenea evenimente nedorite se verifică prin instrucțiuni corespunzătoare (“scheck”) dacă una dintre cele 2 instrucțiuni speculative au generat vreo excepție și în caz afirmativ se pointează la o rutină de restabilire a contextului programului (recovery\_adr) în vederea asigurării unui mecanism precis de excepții.

Ca exemplu de speculație de date se consideră secvența:

```

store (st_adr,data)      ; scriere în memoria de date
load (ld_adr,target)    ; citire din memoria de date
use (target)             ; utilizare variabila

```

Cum în acest caz mecanisme de analiză statică antialias ( $st\_adr = ld\_adr$  ?) nu sunt practic posibile, executia “out – of – order” a acestor instrucțiuni este posibilă numai prin utilizarea unor mecanisme speculative. Și în cazul secvenței rescrise speculativ sunt necesare corectii în cazul unei excepții produse prin executia speculativă a instrucțiunii “load” ori în cazul în care se dovedește că  $ld\_adr = st\_adr$ . Într-o astfel de situație se da controlul unei rutine de restabilire a contextului în conformitate cu logica inițială de program, rutina care începe la adresa “recovery\_adr” (se implementează deci un mecanism de excepții precise). Secvența optimizată ar fi în acest caz următoarea:

```

aload (ld_adr,target)
store (st_adr,data)
acheck(target,recovery_adr) ;verificare eveniment nedorit
use (target)

```

### Principiile executiei predicative

O altă caracteristică arhitecturală importantă inclusă în procesoarele IA-64 constă în **execuția predicativă** a instrucțiunilor [33, 34]. În această filozofie, o instrucțiune se execută efectiv sau nu (“nop”) în funcție de valoarea de adevăr a unei variabile booleene de gardă sau a mai multor

astfel de variabile conjugate prin SI logic. De exemplu instructiunea P5  $R6=(R7)+(R9)$  executa adunarea daca variabila de garda P5="true", în caz contrar neexecutându-se practic nimic ("nop"). Desigur ca aceste variabile de garda booleene se seteaza/reseteaza ca urmare a actiunii unor instructiuni (predicate de ordinul întâi în general). Ca exemplu în acest sens, instructiunea P=compare (a>b), face P="true" daca a>b si respectiv P="false" daca  $a \leq b$ . Majoritatea instructiunilor IA-64 sunt executabile conditionat. Prin utilizarea unor transformari ale programului obiect bazat pe instructiuni gardate se elimina circa 25% - 30% dintre instructiunile de salt, marindu-se astfel lungimea medie a unitatilor secventiale de program ("basic – block"-uri) cu influente favorabile asupra procesului de scheduling [8, 30, 33]. Este adevarat însa ca, dependentele datorate instructiunilor de salt candionat (branch) se vor regasi acum sub forma unor noi dependente de date prin variabilele de garda (RAW – dependente tip "Read after Write") si care conduc la secventialitatea executiei programului. Se prezinta mai jos transformarea unei secvente de program prin predicare cu eliminarea saltului:

```

if (a>b)                ; P6=compare (a>b)
    c=c+1                ; TP6 c=c+1;
else
    d=d*e+5              ; FP6 d=d*e+5;

```

Se observa ca dependenta de ramificatie (a>b) s-a transformat acum în dependenta RAW prin variabila de garda P6. Un beneficiu suplimentar consta în paralelizarea celor 2 instructiuni gardate si exclusive din punct de vedere al executiei lor (TP6, FP6).

Preluat din [34], în continuare se prezinta un exemplu sugestiv în legatura cu avantajele/dezavantajele executiei predicative a instructiunilor în cadrul IA-64. Se considera secventa "if – then – else" ca mai jos :

```

if (r4)
    r3 = r2 + r1          ; 2 cicli
else
    r3 = r2 * r1
    utilizare r3 ;        ; 18 cicli

```

S-a considerat deci ca ramificatia "if" are latentă de 2 cicli procesor iar ramificatia "else" de 18 cicli procesor. Secventa va fi compilata prin instructiuni gardate, eliminându-se instructiunile de ramificatie, ca mai jos:

	cmpne p1,p2 = r4,r0	;0/0 compara pe diferit
(p1)	add r3 =r2,r1	;1/1 adunare întregi
(p2)	setf f1=r1	;1/1 conversie întreg – flotant
(p2)	setf f2=r2	;1/1
(p2)	xma.l f3=f1,f2	;9/2 înmulțire f1xf2 (flotant)
(p2)	getf r3=f3	;15/3 conversie flotant – întreg
(p2)	utilizare r3	;17/4

În comentariu, imediat după semnul “;”, sunt scrise 2 cifre: prima semnifică numărul ciclului în care instrucțiunea respectivă va fi lansată în execuție dacă variabila de gardă  $p1 = 1$  (“true”) iar a 2-a același lucru în cazul contrar  $p1 = 0$  (implicit  $p2 = 1$ ). Considerând acum că “setf” durează 8 cicluri, “getf” 2 cicluri, “xma” 6 cicluri și că o predicție incorectă a branch-ului costă procesorul 10 cicluri (pt. restaurarea stării), se pot analiza 2 cazuri complementare sugestive.

### Cazul I

Se presupune că ramura “if” se execută 70% din timp iar acuratețea predicției branch-ului din codul inițial (nepredicativ) este 90%. Timpul de execuție al secvenței inițiale este:

$$(2 \text{ cicluri} \times 70\%) + (18 \text{ cicluri} \times 30\%) + (10 \text{ cicluri} \times 10\%) = 7.8 \text{ cicluri}$$

Timpul de execuție al secvenței compilate prin predicare este:

$$(5 \text{ cicluri} \times 70\%) + (18 \text{ cicluri} \times 30\%) = 8.9 \text{ cicluri}$$

În acest caz execuția predicativă este neeficientă.

### Cazul II

Se presupune că ramura “if” se execută 30% din timp și că acuratețea predicției branch-ului este acum de doar 70%. Timpul de execuție al secvenței inițiale este:

$$(2 \text{ cicluri} \times 30\%) + (18 \text{ cicluri} \times 70\%) + (10 \text{ cicluri} \times 30\%) = 16.2 \text{ cicluri}$$

Timpul de execuție al secvenței compilate prin predicare este:

$$(5 \text{ cicluri} \times 30\%) + (18 \text{ cicluri} \times 70\%) = 14.1 \text{ cicluri}$$

În acest al 2-lea caz execuția predicativă este mai eficientă, micșorând timpul mediu de execuție cu mai mult de 2 cicluri.

### Register Windows sau “chemarea strabunilor”

O alta caracteristica interesanta, desi utilizata de catre pionierii procesoarelor RISC (“Reduced Instruction Set Computing”) încă din 1980 în cadrul microprocesorului Berkeley I RISC (Prof. David Patterson, Universitatea Berkeley, SUA), consta în lucrul “**în ferestre de registre**” (“register windows”, vezi [35, 33, 3]). Aceasta tehnica este în legatura cu minimizarea timpului de intrare/revenire într-o/dintr-o procedura. Astfel, se evita atunci când este posibil salvarea în stiva a setului de registri locali ai programului apelant în vederea reutilizării sale în cadrul procedurii apelate. Acest lucru se realizeaza exclusiv în modul ISA-64 prin alocarea unui nou set (ferestre) de registri locali procedurii apelate. Mai precis, IA-64 contine 32 de registri generali (GR0 – GR31), utilizabili de catre toate procedurile (globali) si respectiv 96 de registri utilizabili în ferestre dinamice (locali), alocabili deci prin software diferitelor proceduri (*alloc*). La rândul-i, o fereastră de registri locali alocata procedurii în curs, contine 2 zone distincte: o zona care contine registrii locali de lucru si parametrii de intrare generati de catre programul apelant si respectiv o zona de registri care memoreaza parametrii de iesire (rezultate) ce vor fi utilizati la revenire de catre programul apelant. La revenirea din procedura (*return*) se comuta automat pe fereastră anterioara de registri locali. Desigur salvarea/restaurarea registrilor locali în/din stiva apare ca necesara numai în cazul unor depasiri ale setului secundar de 96 de registri utilizabili în ferestre dinamice. Este interesanta implementarea acestei tehnici în cadrul modernei arhitecturi IA-64 întrucât desi utilizata încă de la începuturile generatiei a 2-a arhitecturale de microprocesoare (“pipeline” RISC), ea nu a fost foarte agreata ulterior (exceptie face familia de microprocesoare SPARC a companiei SUN), din cauza cresterii latentei caii critice de date a microprocesoarelor (timpul maxim necesar celei mai lungi operatii interne încadrabile într-un ciclu) si deci în consecinta, reducerii frecventei de tact a acestora. Probabil ca Intel Co. renunta deliberat la suprematia frecventelor de tact (aici microprocesoarele din familia Alpha 21264 - Compaq de exemplu sunt mereu cu un pas înainte) mizând pe cresterea gradului mediu de ILP extras prin metode arhitecturale de synergism hardware-software precum cele descrise succint pâna acum. În fond, Intel stie prea bine ca performanta se obtine actualmente preponderent prin arhitectura (cca. 65%) si abia mai apoi prin tehnologie (cca. 35%).



## Optimizarea buclelor de program

Arhitectura IA-64 se bazează esențialmente pe **forta compilatorului (schedulerului)** care exploatează în mod static paralelismul la nivel de instrucțiuni din codul obiect. Optimizarea buclelor de program este esențială întrucât, după cum prea bine se știe, cca. 90% din timp se execută cca. 10% din program, iar această fracțiune constă probabil cu precădere în bucle. Dintre tehnicile soft de paralelizare a instrucțiunilor aferente buclelor de program, IA-64 utilizează tehnica “modulo scheduling” (M. Lam, B. Rau) care în esență transformă bucla inițială astfel încât să se permită execuția simultană a unor iterații diferite, prin pipeline-izarea software a acestora.

Pentru a da concretete acestor aspecte se va prezenta în continuare un exemplu de optimizare a unei bucle simple de program prin utilizarea tehnicii de paralelizare a unor iterații diferite (“software pipelining” – tehnica atribuită cercetatoarei americane Monica Lam).

Se consideră bucla de program IA-64:

**L1:**

```
ld r4 = [r5],4 ;încarcare din memorie cu postincrementarea adresei (+4)
add r7 = r4,r9
st [r6] = r7,4 ;memorare r7 cu postincrementarea adresei (r6 + 4 -> r6)
br.cloop L1 ;loop
```

Instrucțiunea de buclare inspectează un registru special în care s-a încărcat inițial numărul de iterații aferent buclei, și dacă acesta are un conținut pozitiv, se decrementează și se face saltul.

De remarcat că toate instrucțiunile buclei sunt dependente, ceea ce conduce la o execuție fatalmente serială a acestora în concordanță cu implacabilă (?) lege a lui Eugene Amdahl. Având în vedere avatrările instrucțiunii de salt în structurile pipeline și superscalare, se poate considera că execuția acestei secvențe de program este una ineficientă, lentă. Schedulerul ar putea transforma această buclă, în urma aplicării tehnicii “software pipelining” (TSP), ca mai jos:

	ld	r4 = [r5],4	;iterația 1	
	add	r7 = r4,r9	;iterația 1	<b>PROLOG</b>
	ld	r4 = [r5],4	;iterația 2	
<b>L1:</b>	st	[r6]=r7,4	;iterația k ∈ [1,n-2]	
	add	r7 = r4,r9	;iterația k+1	<b>NUCLEU</b>
	ld	r4 = [r5],4	;iterația k+2	
	br.cloop	L1		

	st	[r6] = r7,4	;iteratia n-1	
	add	r7 = r4, r9	;iteratia n	<b>EPILOG</b>
	st	[r6] = r7,4	;iteratia n (ultima)	

Esenta TSP rezulta imediat analizând secventa **NUCLEU** care pipeline-izeaza 3 instructiuni aparținând unor 3 iteratii succesive ale buclei de program. Prin aceasta, cele 3 instructiuni ale buclei **NUCLEU** s-ar putea executa în paralel daca resursele hardware o permit. Secventele **PROLOG/EPILOG** nu fac decât sa “ajusteze” din punct de vedere semantic implicatiile buclei nucleu .

Pentru a sugera câstigul de performanta obtinut în urma aplicarii TSP, se va rescrie secventa anterioara grupând pe acelasi rând instructiunile paralelizabile, deci executabile în acelasi ciclu masina. În paranteze se va scrie numarul iteratiei careia îi apartine instructiunea respectiva.

```

                                ld (1)  ld (2)                                ;primul ciclu
                                add (1)                                ;al 2-lea ciclu etc.
L1:    st (k)  add (k+1)    ld (k+2)
                                br.cloop L1
                                st (n-1)add (n)
                                st (n)

```

Un alt câstig important al metodei TSP consta în faptul ca expansiunea codului optimizat este moderata si datorata exclusiv secventelor de prolog/epilog. Nu acelasi lucru se poate afirma despre alte metode de optimizare a buclelor de program (exemplu “loop unrolling” [8] ), care determina expansiuni ale codului de pâna la 200% cu repercursiuni negative asupra vitezei de procesare. În mod oarecum ironic, optimizarea buclelor de program urmareste reducerea timpului de executie dar, prin expansiunea de cod implicata, creste rata de miss în cache-uri ceea ce determina cresterea timpului de executie !

Aceasta executie concurenta a unor (portiuni din) iteratii diferite , necesita frecvent redenumiri ale registrilor utilizati în vederea eliminarii dependentelor de date între acestia. IA-64 permite ca fiecare iteratie sa utilizeze propriul set de registri, evitând astfel necesitatile de desfasurare a buclelor (“loop unrolling”). De asemenea se mentioneaza ca IA-64 are inclus un puternic procesor FPP (Flotant Point Processor) în virgula mobila, înzestrat inclusiv cu facilitati 3D si un procesor multimedia compatibil semantic cu tehnologia Intel MMX si SIMD (“*Single Instruction Multiple Data*” – model vectorial).

O altă tehnică foarte cunoscută de optimizare a buclilor de program este așa numită “Loop Unrolling” (LU) care se bazează pe desfășurarea buclei de un număr de ori și apoi optimizarea acesteia [8, 33]. În cadrul diferitelor copii de iterații concatenate se redenumesc anumiți regiștri în vederea eliminării dependențelor de date de tip WAR sau WAW. Pentru exemplificarea tehnicii LU se consideră bucla anterioară:

**L1:**

```
ld r4 = [r5],4    ;ciclul 0
add r7= r4,r9     ;ciclul 2, s-a presupus aici latentă instr. “ld” de 2 cicluri
st [r6]= r7,4     ;ciclul 3
br.cloop L1      ;ciclul 3
```

Iată ce devine această buclă simplă după ce este desfășurată de către compilator de 4 ori (s-a presupus că numărul de iterații este multiplu de 4 și că memoria cache de date detine 2 porturi de acces) iar apoi optimizată în vederea unei procesări optime:

```
add r15 = 4,r5
add r25 = 8,r5
add r35 = 12,r5
add r16 = 4,r6
add r26 = 8,r6
add r36 = 12,r6
```

**L1:**

```
ld r4 = [r5],16    ; ciclul 0
ld r14 = [r15],16  ; ciclul 0
ld r24 = [r25],16  ; ciclul 1
ld r34 = [r35],16  ; ciclul 1
add r7 = r4,r9     ; ciclul 2
add r17 = r14,r9   ; ciclul 2
st [r6] = r7,16    ; ciclul 3
st [r16] = r17,16  ; ciclul 3
add r27 = r24,r9   ; ciclul 3
add r37 = r34,r9   ; ciclul 3
st [r26] = r27,16  ; ciclul 4
st [r36] = r37,16  ; ciclul 4
br.cloop L1       ; ciclul 4
```

Preambulul si redenumirile din cadrul buclei desfasurate sunt necesare eliminarii conflictelor de nume. Cu exceptia ciclului 2 în fiecare ciclu sunt utilizate din plin cele 2 porturi ale memoriei cache de date. Performanta obtinuta este de 4 iteratii în 5 cicli fata de o iteratie în 4 cicli cât obtinea bucla initiala, o îmbunatatire absolut remarcabila. Desigur, dupa cum se poate observa în virtutea unui necrutator dar etern compromis performanta – cost, lungimea buclei optimizate creste cu repercursiuni defavorabile evidente dar acceptabile totusi având în vedere cresterea vitezei de executie.

## 6. ARHITECTURA MICROPROCESOARELOR, ÎNCOTRO ?

---

Din punct de vedere arhitectural se considera ca pâna la ora actuala au existat 3 generatii de (micro)procesoare de succes comercial dupa cum urmeaza:

- ✓ generatia I caracterizata în principal prin executia secventiala a fazelor (ciclilor masina) aferente instructiunilor- masina. Pionierii acestei generatii sunt desigur inventatorii calculatorului numeric, inginerii *Eckert* si *Mauchly*, alaturi de cel care ulterior a teoretizat si a îmbogătit conceptul, în persoana marelui om de stiinta american *John von Neumann*.
- ✓ generatia a II-a de procesoare, exploata paralelismul temporal aferent instructiunilor masina prin suprapunerea fazelor (pipeline). Primul reprezentant comercial a fost sistemul CDC-6600 (1964) proiectat de catre cel mai mare creator de calculatoare de înalta performanta si totodata unul dintre pionierii supercalculatoarelor, *Seymour Cray*. În anii '80, (micro)procesoarele RISC scalare au reprezentat aceasta generatie (*J. Cocke* de la IBM si *D. Patterson* de la Univ. Berkeley fiind doar doi dintre pionierii promotori ai acestor idei).
- ✓ generatia a III-a, cea curenta, este caracterizata de procesarea mai multor instructiuni independente simultan prin exploatarea unui paralelism spatial la nivelul diverselor unitati functionale de procesare. Executia instructiunilor se face Out of Order, utilizând deci tehnici de reorganizare (dinamica sau statica) a instructiunilor în vederea minimizarii timpului global de executie. Pionierul acestei generatii a fost sistemul anilor '60 IBM-360/91 (printre proiectanti *Anderson*, *Sparacio*, *Tomasulo*, *Goldschmidt*, *Earle*, etc.). La ora actuala generatia aceasta este reprezentata prin microprocesoarele superscalare, VLIW, etc.

De câțiva ani, în laboratoarele de cercetare (în special cele academice!) se întrezăresc câteva soluții privind caracteristicile majore ale următoarei decade, generația a IV-a, pe care le vom analiza succint și fatalmente incomplet, în continuare.

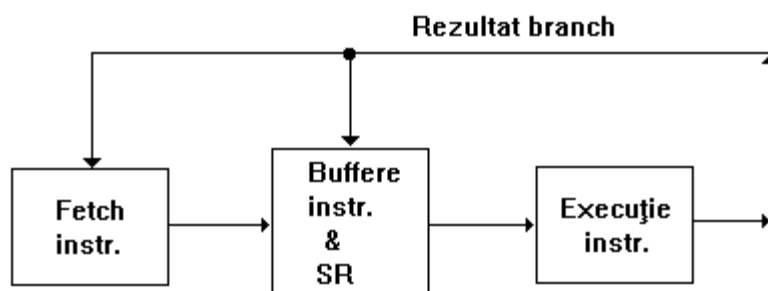
În ultimii ani, procesul de proiectare al procesoarelor s-a modificat radical. Astăzi, accentul principal nu se mai pune pe implementarea hardware, ci pe proiectarea arhitecturii. Se porneste de la o arhitectura de baza, care este modificată și îmbunătățită dinamic, prin simulări laborioase pe *benchmark*-uri reprezentative (Stanford, SPEC '92, '95, etc., pentru procesoarele de uz general). De exemplu, proiectanții firmei Intel, pentru procesorul Intel Pentium Pro (P6), au pornit de la o structură inițială care conținea un pipeline cu 10 nivele, decodificator cu 4 instrucțiuni / ciclu, cache-uri separate pe instrucțiuni și date de capacitate 32Ko fiecare și un total de 10 milioane tranzistori. Comportarea fiecărei componente a arhitecturii (efectul capacității primului nivel (L1) cache, numărul de nivele în pipeline, comportarea logicii de predicție a salturilor, numărul de unități funcționale, etc.) a fost simulată soft prin rularea a aproximativ 200 *benchmark*-uri, cu peste 2 miliarde de instrucțiuni! Rezultatul final a impus un procesor cu un pipeline pe 14 nivele, 3 instrucțiuni decodificate în fiecare ciclu, 8Ko L1 cache de date și 8Ko L1 cache de instrucțiuni, cu un total de aproximativ doar 5.5 milioane tranzistoare integrate.

Costul proiectării este relativ mare și include în principal elaborarea unei arhitecturi dinamice, scrierea unui compilator, de C în general, pe arhitectura respectivă, scheduler (optimizator) pentru codul obiect, simulator puternic parametrizabil și complex, programe de interpretare a rezultatelor. De exemplu, microprocesorul MIPS-4000 s-a creat prin efortul a 30 de ingineri timp de 3 ani. Costul cercetării-proiectării a fost de 30 milioane dolari, iar cel al fabricării efective de numai 10 milioane dolari. Numai pentru simulare și evaluare s-au consumat circa 50.000 ore de procesare pe mașini având performanțe de 20 MIPS [38].

Oricum, arhitecturile cu execuții multiple și pipeline-izate ale instrucțiunilor (superscalare, VLIW) dau deja anumite semne de "oboseală", limitările fiind atât de ordin tehnologic cât și arhitectural [51, 52, 40]. Caracteristicile arhitecturale complexe implică tehnologii tot mai sofisticate, încă nedisponibile. Pe de altă parte, performanțele lor cresc asimptotic pe actualele paradigme arhitecturale. Totuși, schimbări fundamentale sunt mai greu de acceptat în viitorul apropiat, în primul rând datorită compilatoarelor optimizate, având drept scop exploatarea mai pronunțată paralelismului la nivel de instrucțiuni, deoarece acestea sunt deosebit de complexe și puternic dependente de caracteristicile hardware.

Exista deja opinii care arata ca arhitecturile superscalare si VLIW contin limitari fundamentale si care ar trebui analizate si eventual eliminate. Dintre aceste limitari amintim doar conflictele la resurse, datorate în principal centralizarii acestora. O idee interesanta bazata pe descentralizarea resurselor se prezinta în [37] si are în vedere implementarea mai multor asa numite "Instruction Windows" (IW)- un fel de buffere de prefetch multiple în locul unui singur si respectiv pe conceptul de multithreading. Lansarea în executie a instructiunilor se face pe baza determinarii celor independente din fiecare IW. Desigur ca trebuie determinate si dependentele inter- IW-uri. Ideea principala consta în executia paralela a mai multor secvente de program aflate în IW- uri diferite, bazat pe mai multe unitati functionale (multithreading). Astfel de exemplu, 2 iteratii succesive aferente unei bucle de program pot fi procesate în paralel daca sunt memorate în IW- uri distincte. O asemenea idee faciliteaza implementarea conceptelor de expandabilitate si scalabilitate, deosebit de utile în dezvoltarea viitoare a arhitecturii.

În esenta, un procesor cu executii multiple ale instructiunilor este compus din 2 mecanisme decuplate: mecanismul de aducere (fetch) a instructiunilor pe post de producator si respectiv mecanismul de executie a instructiunilor pe post de consumator. Separarea între cele 2 mecanisme (arhitectura decuplata) se face prin bufferele de instructiuni si statiile de rezervare, ca în figura 6.1. Instructiunile de ramificatie si predictoarele hardware aferente actioneaza printr-un mecanism de reactie între consumator si producator. Astfel, în cazul unei predictii eronate, bufferul de prefetch trebuie sa fie golit macar partial iar adresa de acces la cache-ul de instructiuni trebuie si ea modificata în concordanta cu adresa la care se face saltul.



**Figura 6.1.** Arhitectura superscalara decuplata

Pe baze statistice se arata ca un basic-block contine, pe programele de uz general, doar 4-5 instructiuni în medie, ceea ce înseamna ca rata de fetch

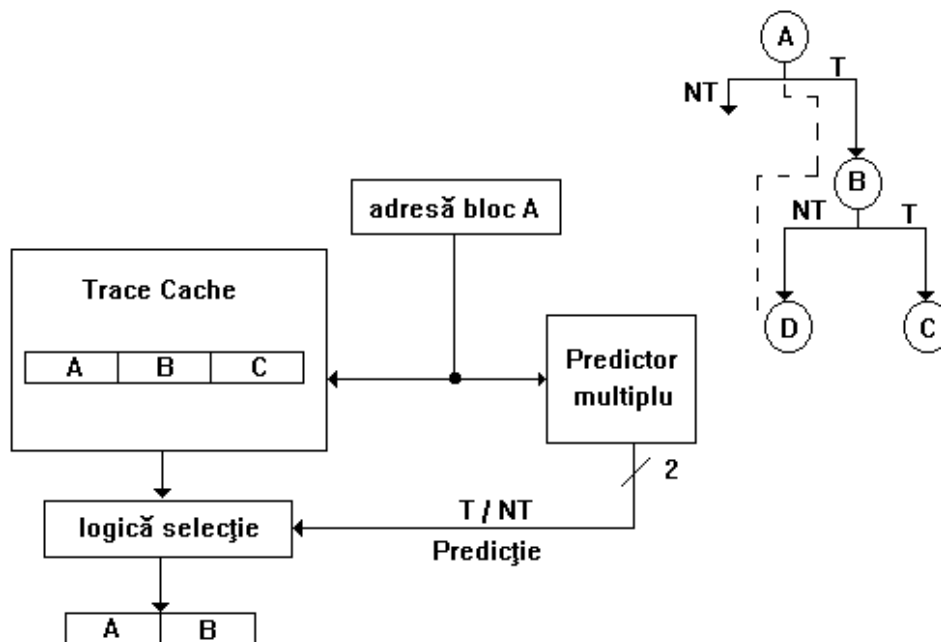
a instructiunilor e limitata la cca. 5, aducerea simultana a mai multor instructiuni fiind inutila (fetch bottleneck). Desigur, aceasta limitare fundamentala ar avea consecinte defavorabile si asupra consumatorului, care ar limita principial si rata medie de executie a instructiunilor (IR - Issue Rate) la aceasta valoare. Progresele semnificative în algoritmii de lansare în executie impun însa depasirea acestei bariere. În acest sens, cercetarile actuale insista pe îmbunatatirea mecanismelor de aducere a instructiunilor prin urmatoarele tehnici:

- predictia simultana a mai multor ramificatii / tact rezultând deci rate IR sporite.
- posibilitatea accesarii si aducerii simultane a mai multor basic- block-uri din cache, chiar daca acestea sunt nealiniat, prin utilizarea unor cache-uri multiport
- pastrarea unei latente reduse a procesului de aducere a instructiunilor, în contradictie cu cele 2 cerinte anterioare.

Alti factori care determina limitarea ratei de fetch a instructiunilor (FR- Fetch Rate) sunt: largimea de banda limitata a interfetei procesor - cache, missurile în cache, predictiile eronate ale ramificatiilor, etc.

O paradigma interesanta, situata în prelungirea conceptului de superscalaritate si care poate constitui o solutie interesanta fata de limitarile mai sus mentionate, o constituie trace-procesorul, adica un procesor superscalar având o **memorie trace-cache** (TC). Ca si cache-urile de instructiuni (IC), TC este accesata cu adresa de început a noului bloc de instructiuni ce trebuie executat, în paralel cu IC. În caz de miss în TC, instructiunea va fi adusa din IC sau - în caz de miss si aici - din memoria principala. Spre deosebire însa de IC, TC memoreaza instructiuni contigue din punct de vedere al secventei lor de executie, în locatii contigue de memorie. O linie din TC memoreaza un segment de instructiuni executate dinamic si secvential în program (trace-segment). Evident, un trace poate contine mai multe basic-block-uri (unitati secventiale de program). Asadar, o linie TC poate contine N instructiuni sau M basic- block-uri,  $N > M$ , înscrise pe parcursul executiei lor.





**Figura 6.2.** Ansamblul trace-cache respectiv predictor multiplu

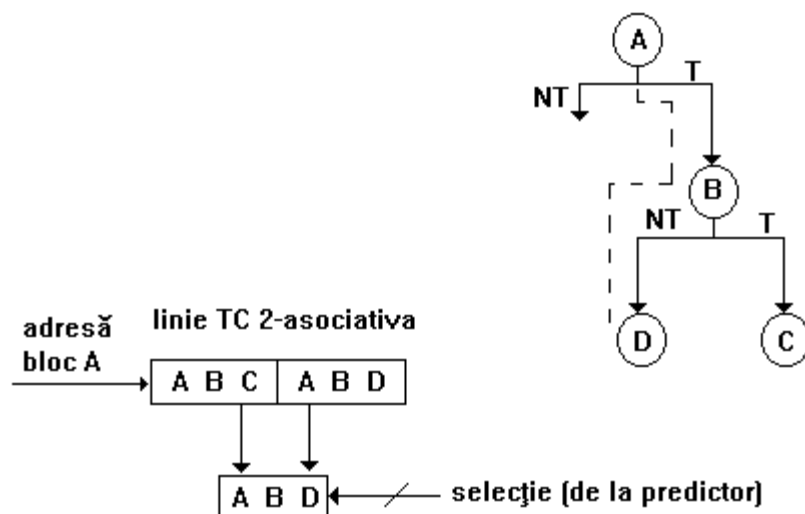
Memoria TC este accesată cu adresa de început a basic-block-ului A, în paralel cu predictorul multiplu de salturi (vezi figura 6.2). Acesta, spre deosebire de un predictor simplu, predictionează nu doar adresa de început a următorului basic-block ce trebuie executat ci toate cele  $(M-1)$  adrese de început aferente următoarelor  $(M-1)$  basic-block-uri care urmează după A. Cei  $(M-1)$  biti generați de către predictorul multiplu (taken/ not taken) selectează spre logica de execuție doar acele blocuri din linia TC care sunt predictionate ca se vor executa ( în cazul acesta doar blocurile A și B întrucât predictorul a selectat blocurile ABD ca se vor executa, în timp ce în linia TC erau memorate blocurile ABC).

O linie din TC conține [38]:

- $N$  instrucțiuni în forma decodificată, fiecare având specificat blocul careia îi aparține.
- cele  $2^{M-1}$  posibile adrese destinație aferente celor  $M$  blocuri stocate în linia TC.
- un câmp care codifică numărul și "direcțiile" salturilor memorate în linia TC.

Înainte de a fi memorate în TC, instrucțiunile pot fi predecodificate în scopul înscrierii în TC a unor informații legate de dependențele de date ce caracterizează instrucțiunile din linia TC curentă. Aceste informații vor

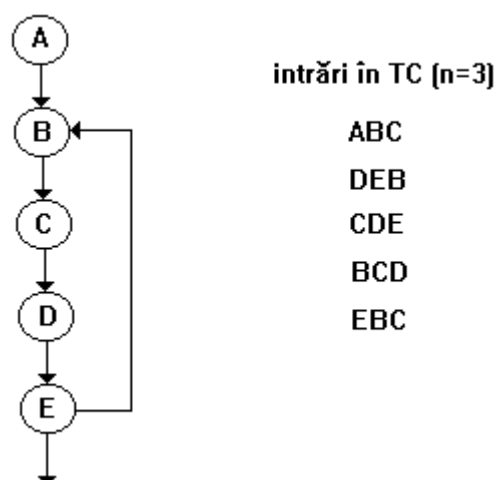
facilita procese precum bypassing-ul datelor între unitatile de executie, redenumirea dinamica a registrilor cauzatori de dependente WAR (Write After Read) sau WAW (Write After Write) între instructiuni, etc., utile în vederea procesarii Out of Order a instructiunilor. O linie din TC poate avea diferite grade de asociativitate în sensul în care ea poate contine mai multe pattern-uri de blocuri, toate având desigur aceeași adresa de început (A), ca în figura 6.3.



**Figura 6.3.** Selectia dintr-o linie trace-cache asociativa

Asadar, segmentele începând de la aceeași adresa (A), sunt memorate în aceeași linie asociativa din TC. Ca și în structurile TC neasociative, verificarea validitatii liniei selectate se face prin compararea (cautarea) după tag. Deosebirea de esență constă în faptul că aici este necesară selectarea - în conformitate cu pattern-ul generat de către predictorul multiplu - trace-ului cel mai lung dintre cele continute în linia respectivă. Este posibil ca această selecție complexă să dureze mai mult decât în cazul neasociativ și prin urmare să se repercuteze negativ asupra duratei procesului de aducere a instructiunilor (fetch). Avantajul principal însă, după cum se observă și în figura, constă în faptul că este probabil să se furnizeze procesorului un număr de blocuri "mai lung" decât un TC simplu. Astfel de exemplu, dacă pattern-ul real de blocuri executate este ABD, structura TC îl va furniza fără probleme, în schimb o structură TC neasociativă ce conține doar pattern-ul ABC, evident va furniza în această situație doar blocurile AB.

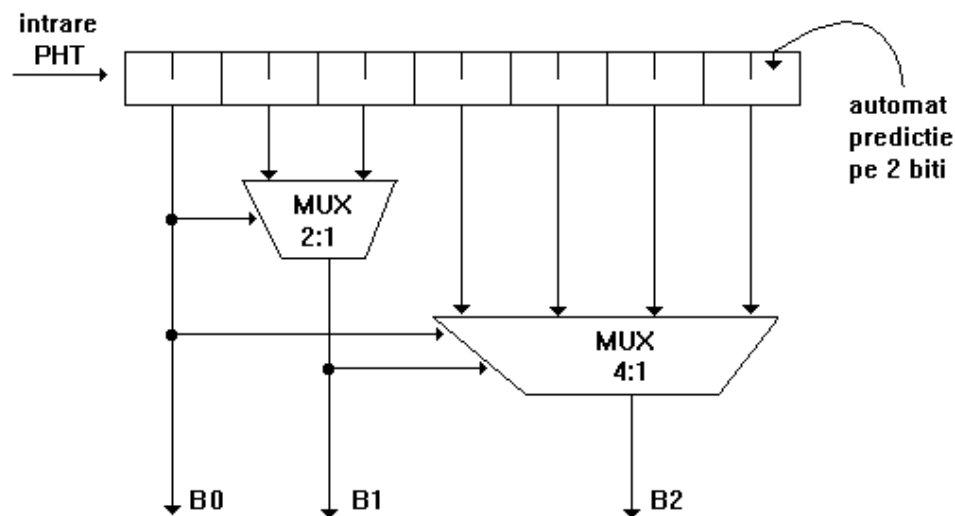
Pe masura ce un grup de instructiuni este procesat, el este încarcat într-o asa-numita "fill unit" (FU-unitate de pregatire). Rolul FU este de a asambla instructiunile dinamice, pe masura ce acestea sunt executate, într-un trace-segment. Segmentele astfel obtinute sunt memorate în TC. Dupa cum am mai subliniat, este posibil ca înainte de scrierea segmentului în TC, FU sa analizeze instructiunile din cadrul unui segment spre a marca explicit dependentele dintre ele. Acest lucru va usura mai apoi lansarea în executie a acestor instructiuni întrucât ele vor fi aduse din TC si introduse direct în statiile de rezervare aferente unitatilor functionale. Unitatea FU se ocupa deci de colectarea instructiunilor lansate în executie, asamblarea lor într-un grup de N instructiuni (sau M blocuri) si înscrierea unui asemenea grup într-o anumita linie din TC. Exista desigur cazuri când FU poate crea copii multiple ale unor blocuri în TC. Aceasta redundanta informationala poate implica degradari ale performantei, dar pe de alta parte, lipsa redundantei ar degrada valoarea ratei de fetch a instructiunilor deci si performanta globala.



**Figura 6.4.** Segmente asamblate pe timpul executiei unei bucle de program

Se poate deci afirma ca un TC exploateaza reutilizarea eficienta a secventelor dinamice de instructiuni, reprocesate frecvent în baza a 2 motive de principiu: localizarea temporală a trace-ului si respectiv comportarea predictibila a salturilor în virtutea comportarii lor anterioare. Asadar, TC memoreaza trace-uri în scopul eficientizarii executiei programului si nu doar în scopul eficientizarii procesului de aducere al instructiunilor. Aceasta, pe motiv ca un segment din trace contine numai instructiuni care se vor executa. În cazul IC, daca într-un bloc exista o ramificatie efectiva, instructiunile urmatoare se aduceau inutil întrucât nu s-ar fi executat.

Cum TC trebuie sa lucreze într-o strânsă dependentă cu predictorul de salturi, se impune îmbunătățirea performanțelor acestor predictoare. Se pare ca solutia de viitor va consta într-un predictor multiplu de salturi, al carui rol principal consta în predictia simultana a următoarelor (M-1) salturi asociate celor maximum M blocuri stocabile în linia TC. De exemplu, pentru a predictiona simultan 3 salturi printr-o schema de predictie corelata pe 2 nivele, trebuie expandata fiecare intrare din structura de predictie PHT (Pattern History Table), de la un singur numarator saturat pe 2 biti, la 7 astfel de automate de predictie, ca în figura 6.5. Astfel, predictia generata de catre primul predictor (taken / not taken) va multiplexa rezultatele celor 2 predictoare asociate celui de al doilea salt posibil a fi stocat în linia curenta din TC. Ambele predictii aferente primelor 2 salturi vor selecta la rândul lor unul dintre cele 4 predictoare posibile pentru cel de-al treilea salt ce ar putea fi rezident în linia TC, predictionându-se astfel simultan mai multe salturi. Daca predictorul multiplu furnizeaza simultan mai multe PC-uri, TC rezolva elegant si problema aducerii simultane a instructiunilor pointate de aceste PC-uri, fara multiportarea pe care un cache conventional ar fi implicat-o.



**Figura 6.5.** Predictor a 3 salturi succesive

Asemenea predictoare multiple în conjuncție cu structuri de tip TC conduc practic la o nouă paradigmă a procesării unui program masina numita "multiflow", caracterizata deci prin procesarea în paralel a mai multor basic-block-uri dintr-un program. În [38] se prezinta o cercetare bazata pe simulare asupra conceptelor novatoare de TC si predictor

multiplu, integrate într-o arhitectura superscalara extrem de agresiva dezvoltata la Universitatea din Michigan, SUA. În esenta, investigatia subliniaza urmatoarele aspecte:

- ◆ cresterea gradului de asociativitate a TC de la 0 (mapare directa) la 4 (asociativitate în blocuri de 4 intrari/ bloc) poate duce la cresteri ale ratei medii de procesare a instructiunilor de pâna la 15%
- ◆ capacitati egale ale TC si respectiv memoriei cache de instructiuni (64 ko, 128 ko) conduc la performante cvasioptimale
- ◆ asociativitatea liniei TC nu pare a conduce la cresteri spectaculoase de performanta
- ◆ performanta globala fata de o arhitectura echivalenta, dar fara TC, creste cu circa 24%, iar rata de fetch a instructiunilor a instructiunilor în medie cu 92%.

La ora actuala, procesorul Intel Pentium IV reprezinta primul procesor comercial care înlocuieste nivelul L1 de cache clasic cu un *Execution Trace Cache*. De asemenea, alte caracteristici arhitecturale pentru respectivul procesor constituie: integrarea a 42 milioane de tranzistori, un pipeline ce poate functiona pe 20 de nivele, expedierea simultana spre executie a 4 instructiuni per perioada de tact procesor, o magistrala ce va functiona la frecventa de 400 MHz, rata de transfer la memorie ajungând astfel la 3,2 Gb/s [54].

În [39] se prezinta o alta tehnica de procesare, legata tot de **reutilizarea dinamica a instructiunilor** deja executate, posibil a fi folosita în conjunctie cu un trace cache. Aici însa, principalul scop urmarit consta în paralelizarea executiei unor instructiuni dependente RAW, bazat pe predictia valorilor registrilor utilizati de aceste instructiuni. Ideea originara apartine scolii de arhitectura calculatoarelor de la Universitatea din Wisconsin – Madison, mai precis cercetatorilor A. Sodani si G. Sohi care au introdus în 1997, la conferinta ISCA 97 tinuta la Denver, SUA, conceptul de reutilizare dinamica a instructiunilor – bazat pe o noua tehnica microarhitecturala, *non-speculativa* menita sa exploateze fenomenul de repetitie dinamica a instructiunii, reducând cantitatea de cod necesar a fi executat. Autorii arata în primul rând ca reutilizarea unor instructiuni sau secvente de instructiuni este relativ frecventa si se datoreaza modului compact de scriere al programelor precum si caracteristicilor intrinseci ale structurilor de date prelucrate. O instructiune dinamica este repetata daca ea opereaza asupra acelorasi intrari si produce aceleasi rezultate (iesiri) precum o instanta anterioara a aceleiasi instructiuni. Ideea de baza este ca daca o secventa de instructiuni se reia în acelasi “context de intrare”, atunci executia sa nu mai are sens fiind suficienta o simpla actualizare a

“contextului de iesire”, în concordanță cu cel precedent. Se reduce astfel numărul de instrucțiuni executate dinamic prin asigurarea unui suport arhitectural care transformă executia instrucțiunilor în căutări (citiri) în tabele hardware. Dacă arhitectura TC - după cum am arătat - acționează în principal asupra depășirii unei limitări fundamentale asupra ratei de fetch a instrucțiunilor, această nouă inovație arhitecturală va acționa asupra depășirii limitării ratei de execuție a instrucțiunilor. Reamintim că această rată de execuție este fundamental limitată de hazardurile structurale implicate precum și de hazardurile RAW între instrucțiuni. Așadar, instrucțiunile reutilizate nu se vor mai executa din nou, ci pur și simplu contextul procesorului va fi actualizat în conformitate cu acțiunea acestor instrucțiuni, bazat pe istoria lor memorată.

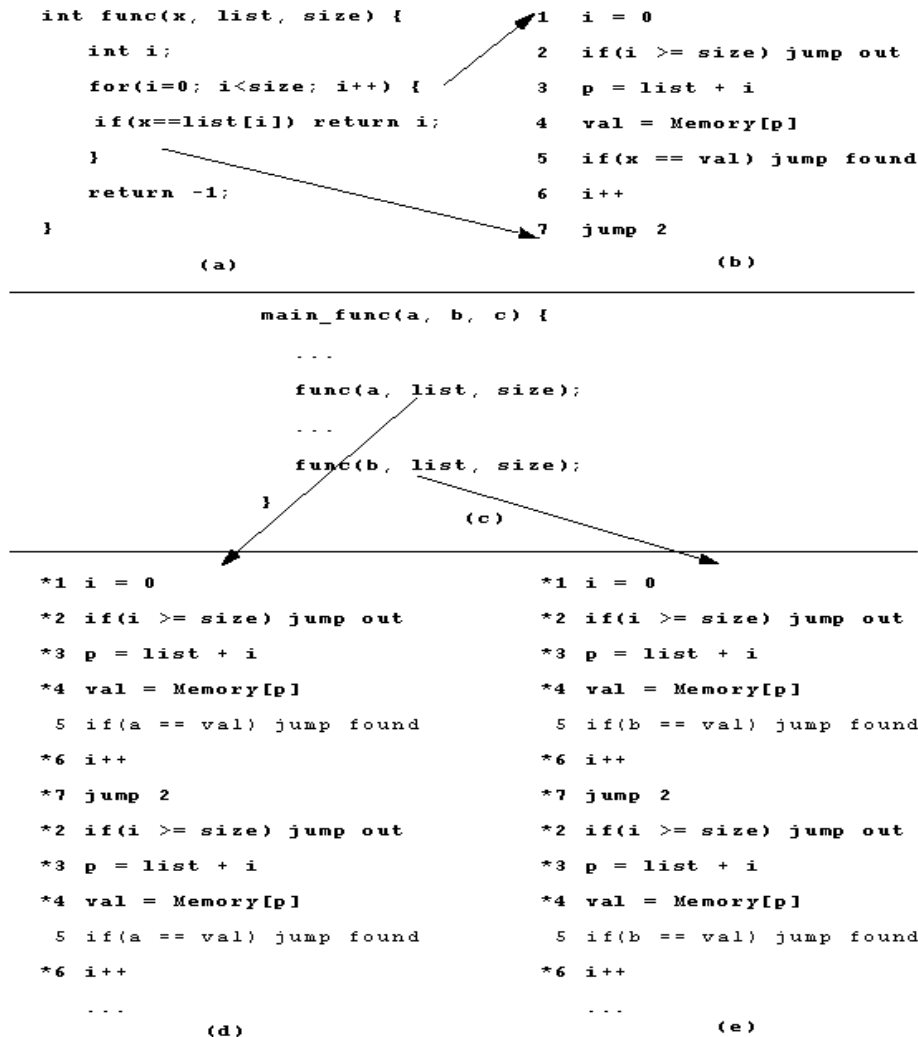
În [41] se analizează mai întâi dacă gradul de reutilizare (și repetabilitate) al instrucțiunilor dinamice este semnificativ și se arată că răspunsul este unul afirmativ. Mai puțin de 20% din numărul instrucțiunilor statice care sunt repetate (generează cel puțin o instrucțiune dinamică repetată) implică o repetabilitate de peste 90% a instrucțiunilor dinamice. Există în acest sens 2 cauze calitative: în primul rând faptul că programele sunt scrise în mod *generic*, ele operând asupra unei varietăți de date de intrare, iar în al doilea rând, aceste programe sunt scrise într-un mod *concis* – menținerea unei reprezentări statice compacte a unei secvențe dinamice de operații – în vederea obținerii rezultatelor dorite (aici structurile de tip “*bucă*” sunt reprezentative).

Pentru o mai bună înțelegere a fenomenului de repetiție a instrucțiunilor, executia dinamică a programelor este analizată la trei nivele: *global*, de *funcție* și *local* (în interiorul funcției). În analiza globală, paternurile de date utilizate în programe sunt reținute ca entități întregi și determinate sursele de repetiție a instrucțiunilor (intrări externe, initializări globale de date sau valori interne ale programelor). Întrucât repetiția instrucțiunilor, conform rezultatelor obținute de autori, se datorează în mare măsură ultimelor două surse de repetiție (valori imediate și initializări de date globale) se impune concluzia că fenomenul de repetiție este mai mult o proprietate a modului în care calculul (operațiile efectuate) este exprimat în program și mai puțin o proprietate a datelor de intrare. Concluziile generate în urma analizei la nivel de funcție sunt că de foarte multe ori funcțiile sunt invocate repetat cu exact aceleași valori ale parametrilor de intrare și că relativ puține apeluri de funcții nu au argumente repetate. Chiar și în cazul unor apeluri repetate ale unei funcții cu parametrii de intrare diferiți, procentajul de instrucțiuni dinamice reutilizabile poate fi semnificativ. La nivelul analizei locale, instrucțiunile funcțiilor/procedurilor sunt clasificate în funcție de sursa valorilor datelor folosite (ex: argumentele funcției, date

globale, valori returnate de alte functii) si functie de sarcina realizata (ex: salvare restaurare registri, prolog, epilog, calcul adrese globale). Majoritatea repetitiei instructiunilor se datoreaza valorilor globale sau argumentelor functiei dar si functiilor prolog si epilog.

Preluat din [40], se prezinta în continuare un exemplu sugestiv în care apare fenomenul de reutilizare dinamica a instructiunilor.

Functia *func* (figura 6.6.a) cauta o valoare *x* în tabloul *list* de dimensiunea *size*. Functia principala *main\_func* (figura 6.6.c) apeleaza functia *func* de mai multe ori, cautând câte un alt element în acelasi tablou la fiecare apel. La apelul functiei *func* tabloul este parcurs element cu element în mod iterativ, cautându-se valoarea pâna la capatul tabloului, conditia de încheiere a cautarii reprezentând-o gasirea elementului. Expandarea buclei din interiorul functiei *func* corespundenta unei iteratii este prezentata în figura 6.6.b. Instantele dinamice ale instructiunilor generate de primul apel *func* sunt descrise în figura 6.6.d. În fiecare iteratie a buclei, instructiunea 2 este dependenta de parametrul *size*, instructiunile 3 si 4 sunt dependente de parametrul *list*, instructiunea 5 este dependenta atât de *list* cât si de valoarea cautata în tablou, iar instructiunea 6 este dependenta de contorul *i*. Daca *func* e apelata din nou în acelasi tablou *list* (de aceeasi dimensiune *size*), dar cu alt parametru de cautare, atunci toate instantele dinamice ale instructiunilor 1÷4 si 6 vor produce aceleasi rezultate pe care le-au produs la apelul anterior al functiei *func*. Doar instantele dinamice ale instructiunii 5 produc rezultate care ar putea diferi de apelurile anterioare ale functiei *func*. Repetarea rezultatelor instantelor dinamice ale instructiunilor 1÷4 si 6 este direct atribuita faptului ca *func* a fost scrisa ca o functie generica de cautare într-un tablou, dar în acest caz particular, doar unul din parametri se modifica între apeluri diferite. Chiar daca *func* ar fi apelata cu toti parametri diferiti pentru fiecare apel în parte, instantele dinamice diferite ale instructiunii 6 (*i*=0, *i*=1, *i*=2,...) vor produce aceleasi valori generate în primul apel al functiei, consecinta a utilizarii buclelor pentru a exprima calculele dorite într-o maniera concisa. Totusi, daca parametrul *size* ar fi diferit la un al doilea apel al functiei *func*, atunci doar *min(size1, size2)* instante dinamice ale instructiunii 6 vor produce aceleasi rezultate. Prin urmare, acest exemplu sugestiv arata faptul ca repetabilitatea instructiunilor dinamice este considerabila si în consecinta reutilizarea instructiunilor este posibila.



**Figura 6.6.** Exemplu ilustrând repetabilitatea instrucțiunilor

Instanțele dinamice marcate "\*" vor realiza aceleași operații pentru ambele apeluri ale funcției *func*.

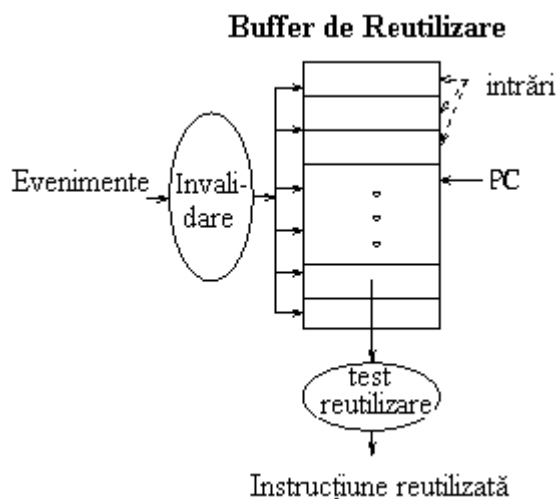
Bazat pe aceste premise autorii [40] dezvoltă 3 scheme de reutilizare dinamică a instrucțiunilor, primele 2 la nivel de instrucțiune iar ultima, la nivel de lanț de instrucțiuni dependente. Instrucțiunile deja executate, se memorează într-un mic cache numit buffer de reutilizare (Reuse Buffer - RB). Acesta poate fi adresat (cautat) cu PC-ul având și un mecanism pentru invalidarea selectivă a unor intrări bazat pe acțiunile anumitor evenimente. Desigur că RB trebuie să permită și un mecanism de testare a reutilizabilității instrucțiunii selectate.



RB poate avea o structura asociativă; cu cât gradul de asociativitate este mai mare cu atât numărul instanțelor dinamice ale unei instrucțiuni care sunt memorate în RB la un moment dat este mai mare. În acest caz, căutarea în RB trebuie făcută după o informație de context mai bogată care să permită identificarea unei instanțe dinamice a instrucțiunii statice adresate curent. Un exemplu de astfel de informație ar putea consta în valorile registrilor sursă respectiv destinație etc.

Testul de reutilizare verifică dacă informația accesată din RB reprezintă un rezultat reutilizabil. Detaliile de implementare ale testului depind de fiecare schemă de reutilizare folosită. De asemenea, trebuie tratate două aspecte privind managementul RB: stabilirea instrucțiunii care va fi plasată în buffer și menținerea consistenței bufferului de reutilizare. Decizia privind modul de inserare a instrucțiunilor în RB poate varia de la una nerestrictivă ("*no policy*"), care plasează toate instrucțiunile în buffer, în cazul în care nu sunt prezente deja, la una mai selectivă care filtrează instrucțiunile ce vor fi inserate după probabilitatea statistică de a fi reutilizate. Problema consistenței are în vedere garantarea corectitudinii rezultatului instrucțiunii reutilizate din RB. Menținerea consistenței informațiilor în RB depinde de fiecare schemă de reutilizare în parte după cum se va putea constata în cele ce urmează.

În vederea compatibilizării cu modelul superscalar care lansează în execuție mai multe instrucțiuni simultan, RB este în general multiport pentru a putea permite reutilizarea mai multor instrucțiuni de execuție curentă. Este evident că, gradul de multiportare al RB-ului nu are sens să fie mai mare decât fereastra maximă de execuție a instrucțiunilor.



**Figura 6.7.** Structura hardware a bufferului de reutilizare

Este indexat cu PC-ul instructiunii. Prezinta un mecanism de invalidare selectiva a intrarilor pe baza unor evenimente.

În cazul reutilizării la nivel de instructiune, o intrare în RB ar putea avea urmatorul format:

Tag	Op1	Op2	Adr	Rez	Rez_valid	Mem_Valid
-----	-----	-----	-----	-----	-----------	-----------

**Tag** – ar putea fi reprezentat în esenta de catre PC-ul instructiunii.

**Op1, Op2** – reprezinta numele registrilor utilizati de catre instructiune.

**Rez** – reprezinta rezultatul actual al instructiunii, cel care va fi reutilizat în caz de “hit” în bufferul RB.

**Rez\_Valid** – indica daca rezultatul “Rez” este valid sau nu. Este setat odata cu introducerea instructiunii în RB. Este resetat de catre orice instructiune care scrie într-unul din registrii sursa (Op1, Op2).

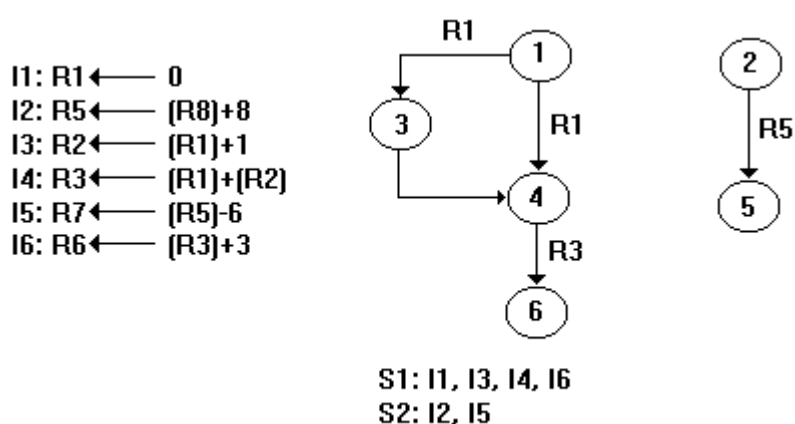
**Adr** – este adresa (reutilizabila) de memorie în cazul unei instructiuni Load/Store.

**Mem\_Valid** – indica daca valoarea din câmpul “Rez” este reutilizabila în cazul unei instructiuni Load. Bitul este setat la înscrierea instructiunii Load în RB. Resetarea bitului se face prin orice instructiune Store având aceeași adresa de acces.

Rezulta ca pentru instructiunile aritmetico-logice reutilizarea este asigurata daca *Rez\_Valid*=1. De asemenea, *Rez\_Valid*=1 garanteaza adresa corecta pentru orice instructiune Load/Store și deci scuteste procesorul de calculul ei. În schimb rezultatul unei instructiuni Load nu poate fi reutilizat decât daca *Mem\_Valid*=1 și *Rez\_Valid*=1. Plusul de performanta datorat reutilizării dinamice a instructiunilor se datoreaza atât scurtcircuitării unor nivele din structura “pipe” cât și reducerii hazardurilor structurale și deci a presiunii asupra diverselor resurse hardware. Astfel, prin reutilizarea instructiunilor se evita stagnarea în statiile de rezervare (Instruction Window) și timpul de executie, rezultatele instructiunilor reutilizate fiind scrise în bufferul de reordonare. Rezulta de asemenea, o disponibilizare a unitatilor functionale de executie care nu vor mai avea de procesat instructiunile reutilizate și eventual o deblocare a instructiunilor dependente RAW de cea reutilizata.

O structura de RB mai complexa prezentata în [40], care memoreaza și dependentele de date RAW între diferitele instructiuni, permite reutilizarea la nivel de lant de instructiuni dependente. Cresterea de performanta implicata de astfel de scheme este de cca. 7,5% ÷ 15%. În schimb procentajul instructiunilor reutilizate are valori medii cuprinse între 2% ÷ 26%.

În vederea reutilizării unor lanțuri de instrucțiuni dependente RAW, pe parcursul procesării instrucțiunilor, se construiesc în mod dinamic anumite seturi de instrucțiuni. O instrucțiune "i" se adaugă unui set notat cu S dacă "i" depinde RAW de cel puțin una dintre instrucțiunile setului S. În caz contrar, instrucțiunea "i" va fi prima aparținând unui nou set. Practic, construcția acestor seturi implică generarea grafului dependentelor de date atașat programului, ca în secvența de mai jos preluată din [39] (vezi figura 6.8).



**Figura 6.8.** Construcția seturilor în vederea reutilizării codurilor

Dupa procesarea instrucțiunilor, seturile rezultate sunt înscrise în vederea reutilizării într-un buffer special numit TDIS (Table of Dependent Instruction Sequences). O intrare în TDIS conține 3 parti principale:

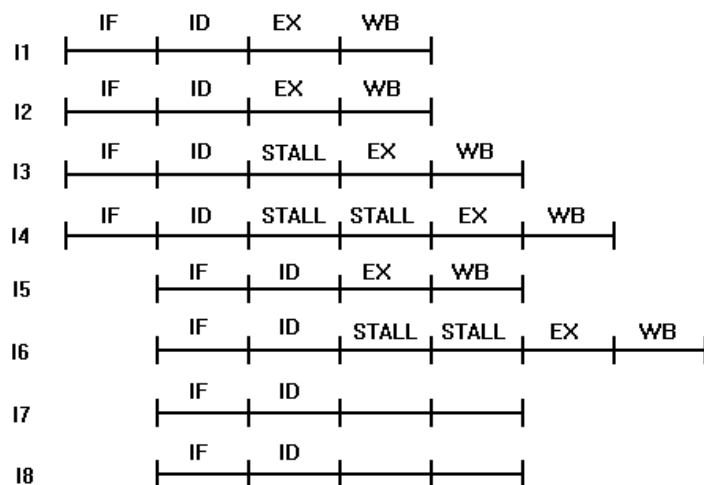
- ❖ partea IN, care memorează valorile operanzilor de intrare, adică aceia neprodusi prin secvența respectivă ci preluați din afara acesteia.
- ❖ partea INSTRUCTION, conține adresele instrucțiunilor inserate în seturi.
- ❖ partea OUT, ce conține numele registrilor destinație aferenți unui set, precum și valorile acestora.

Pentru exemplificare, secvența de program anterioară necesită un buffer TDIS cu două intrări, ca mai jos (figura 6.9).

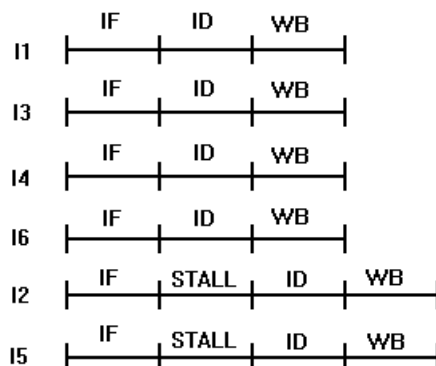
IN		INSTRUCTION					OUT			
		I1	I3	I4	I6	R1=0		R2=1	R3=1	R6=4
R8	9	I2	I5			R5=17	R7=11			

**Figura 6.9.** Structura TDIS la un moment dat

Asadar, la fiecare aducere a unei noi instructiuni, PC-ul acesteia se compara cu adresa primei instructiuni din fiecare linie a TDIS. Apoi, continutul actual al registrilor procesorului este comparat cu cel al partii IN a TDIS. În caz de hit, secventa de instructiuni din TDIS poate fi reutilizata cu succes si cu eludarea tuturor hazardurilor RAW dintre aceste instructiuni. Executia acestor instructiuni va însemna doar actualizarea contextului procesorului în conformitate cu valorile OUT din TDIS. Prin urmare, reutilizarea instructiunilor prin acest mecanism va avea un efect benefic asupra timpului de procesare al instructiunilor. Considerând un procesor superscalar care poate aduce, decodifica si executa maximum 4 instructiuni / ciclu, secventa anterioara se proceseaza ca în cele doua figuri urmatoare (6.10, 6.11).



**Figura 6.10.** Executia programului pe un procesor superscalar



**Figura 6.11.** Executia programului pe un procesor cu reutilizarea codurilor

Se observa ca bufferul TDIS determina executia secventei prin reutilizarea instructiunilor în doar 4 cicli fata de 7 cicli câti ar fi fost necesari în cazul unei procesari clasice. Daca largimea de banda a decodurului de instructiuni ar fi fost de 6 instructiuni în loc de 4, executia secventei s-ar fi redus la doar 3 cicli. Teste efectuate pe benchmark-urile SPEC 95 si prezentate în [39], au aratat ca între 17% si 26% dintre instructiunile acestor programe au putut fi reluate cu succes. Conceptul TDIS este eficient întrucât ca si în cazul utilizarii instructiunilor combinate [42], se elimina necesitatea secventierii în executie a unor instructiuni dependente RAW. Mai mult, în opinia autorilor, dintr-un anume punct de vedere, conceptul reutilizarii dinamice a secventelor dependente de instructiuni, violeaza oarecum celebra lege a lui *G. Amdahl* întrucât trece peste secventialitatea intrinseca a programului si proceseaza agresiv paralel chiar si în acest caz, prin “updating”. Este fara îndoiala posibil ca acest concept sa se cupleze favorabil cu cel de tip “trace cache” anterior prezentat si care actioneaza favorabil în special asupra limitarilor ratei de fetch a instructiunilor.

Figura 6.11 ilustreaza o microarhitectura tipica cu reutilizarea instructiunilor. Singura modificare de principiu fata de modelul superscalar este data de aparitia bufferului de reutilizare. În faza *fetch instructiune* sunt extrase din cache-ul de instructiuni sau memoria principala instructiuni si plasate în bufferul de prefetch (Instruction Queue). Urmeaza apoi faza de *decodificare* a instructiunilor si *redenumire* a registrilor. În faza *citire operand* valorile operandilor aferenti instructiunilor sunt citite fie din setul de registri generali fie din bufferul de reordonare, functie de structura care contine ultima versiune a registrilor. Accesul la Bufferul de Reutilizare poate fi pipelineizat si suprapus cu faza *fetch instructiune*. Imediat dupa decodificarea instructiunii, în timpul fazei de citire operandi se realizeaza

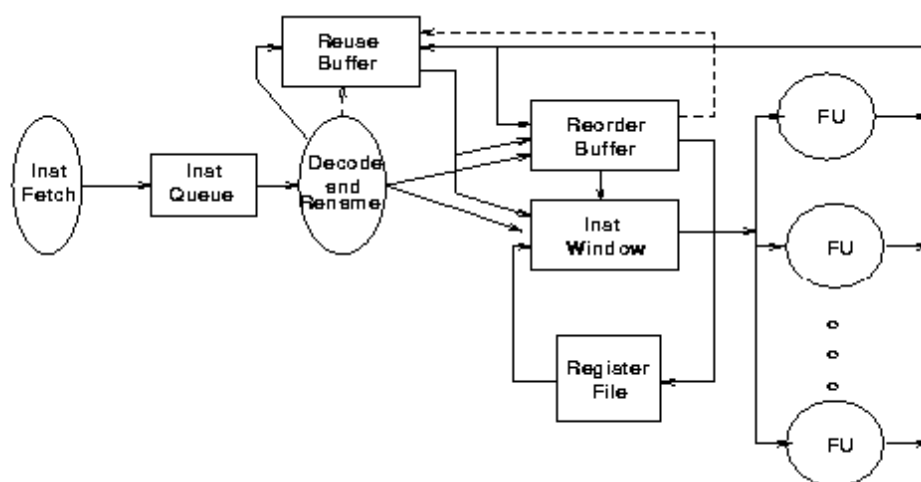
testul de reutilizare asupra intrarilor citite din RB pentru a sti daca rezultatele instructiunilor sunt reutilizabile. Daca este gasit un rezultat reutilizabil instructiunea aferenta nu mai trebuie procesata în continuare si se evita rutarea acestora în *fereastra de instructiuni trimise spre procesare* (Instruction Window) si este transmis direct bufferului de reordonare. Instructiunile Load evita fereastra Instruction Window doar daca rezultatele ambelor micro-operatii (calculul adresei si accesarea memoriei) sunt reutilizate. Testarea reutilizarii poate dura unul sau mai multi cicli. În cel din urma caz, instructiunile sunt plasate în Issue Window, pe durata realizarii testului de reutilizare. Daca instructiunea nu s-a executat înca în momentul încheierii testului de reutilizare (din cauza ca nu au existat unitati functionale de executie aferente disponibile), rezultatul obtinut din RB este folosit iar instructiunea este retransmisă din procesare spre bufferul de reordonare. Daca totusi instructiunea s-a executat complet înainte de încheierea testului de reutilizare, atunci rezultatul reutilizabil este ignorat. În ambele situatii, daca nu se gaseste un rezultat reutilizabil în RB, atunci se alocă intrarea corespunzătoare din RB unde rezultatul instructiunii va fi plasat după executie – asadar o **inserare non-speculativa** -, în vederea unei eventuale reutilizari ulterioare menținând consistenta si a altor structuri hardware daca e necesar (tabela RST din schema de reutilizare cu nume si dependente:  $S_{n+d}$ ).

În cazul unei predictii eronate a unei instructiuni de ramificatie, mecanismul de refacere a contextului va trebui sa fie suficient de selectiv astfel încât sa nu invalideze în RB instructiunile situate imediat după punctul de convergenta al ramificatiei si care ar putea fi reutilizate. Astfel, reutilizarea este exploatata la maxim si în acest caz, cu beneficii evidente asupra performantei.

Rezumând, se desprind câteva avantaje introduse de tehnica de reutilizare dinamica a instructiunilor:

- Scurtcircuitarea unor nivele din structura pipe de către instructiunile reutilizate, reducând presiunea asupra resurselor (statii de rezervare, unitati functionale, porturi ale cache-urilor de date) necesare altor instructiuni aflate în așteptare.
- La reutilizarea unei instructiuni rezultatul sau devine cunoscut mai devreme decât în situatia în care s-ar procesa normal, permitând în consecinta altor instructiuni dependente de aceste rezultate sa fie executate mai rapid.
- Reduce penalitatea datorata predictiei eronate a adreselor destinatie în cazul instructiunilor de salt, prin reutilizarea codului succesor punctului de convergenta.

- Colapsarea dependentelor de date determina îmbunătățirea timpului de execuție al instrucțiunilor crescând gradul de paralelism al arhitecturii.
- Procentajul de reutilizare al instrucțiunilor dinamice calculat pe benchmark-urile SPEC '95 [40] este semnificativ, ajungându-se la valori maxime de 76%.
- Speed-up-ul obținut față de modelul superscalar [40] pe aceleași programe de test nu este la fel de pronunțat ca procentul de reutilizare, valoarea maximă atinsă fiind de 43%.



**Figura 6.12.** Microarhitectura generica cu buffer de reutilizare

O altă tehnică hardware, și ea relativ recent dezvoltată, care în mod similar cu *reutilizarea dinamică a instrucțiunilor* urmărește exploatarea redundanței existente în programe prin colapsarea dinamică a dependentelor de date o reprezintă *predictia valorilor* (Value Prediction). Deși ambele tehnici urmăresc reducerea timpului de execuție al programelor reducând sau eliminând în totalitate constrângerile legate de fluxul de date (*dataflow*), există totuși diferențe (chiar majore privind unele aspecte) legate de modul de interacțiune al fiecărei tehnici în parte cu celelalte caracteristici microarhitecturale. De asemenea, se pun probleme relativ la modul de determinare **speculativă** (predictia valorii) sau **non-speculativă** (reutilizarea instrucțiunilor) a redundanței în programele de uz general, avantajele și dezavantajele implicate de fiecare tehnică, cantitatea de redundanță captată de fiecare tehnică în parte etc. Înainte de a face cunoscute și a înțelege diferențele existente între predictia valorilor și reutilizarea instrucțiunilor vom descrie câteva caracteristici și aspecte legate de conceptul de *localitate a valorii* și predictia valorilor.

**Localitatea valorii** reprezinta o a treia dimensiune a conceptului de *localitate* (pe lânga cea *temporala* si respectiv *spatiala*), frecvent întâlnita în programele de uz general si utilizata în predictia valorilor descriind probabilitatea statistica de referire a unei valori anterior folosite si stocata în aceeași locatie de memorie. Conceptul de localitate a valorii – introdus de M. Lipasti [43] – este strâns legat de *calculul redundant* (repetarea executiei unei operatii cu aceeași operanzi) [44] si este exploatat de o serie de tehnici de predictia valorilor dintre care amintim *Load Value Prediction* (LVP) [43] si *Branch Prediction* (într-un sens mai restrictiv) [45]. Convingerea ca "localitatea valorilor" exista are la baza rezultate statistice obtinute prin simulare la nivel de executie a instructiunilor pe benchmark-uri SPEC '95 [43]. Cu o "adâncime" a istoriei de predictie de 1 (regasirea aceleiasi valori în resursa asignata ca si în cazul precedentului acces), programele de test exprima o localitate a valorii de 50% în timp ce extinzând verificarea în spatiul ultimelor 16 accese la memorie se obtine o localitate de 80%. Rezultatele subliniaza ca majoritatea instructiunilor Load statice aferente unui program exprima o variatie redusa a valorilor pe care le încarca pe parcursul executiei.

Tehnica LVP predictioneaza rezultatele instructiunilor Load la expedierea spre unitatile functionale de executie exploatând corelatia dintre adresele respectivelor instructiuni si valorile citite din memorie de catre acestea, permitând deci instructiunilor Load sa se execute înainte de calculul adresei si îmbunatatind astfel performanta. Conceptul de localizare a valorilor se refera practic la o corelatie dinamica între numele unei resurse (registru, locatie de memorie, port I/O) si valoarea stocata în acea resursa. Daca memoriile cache conventionale se bazeaza pe localitatea temporala si spatiala a datelor pentru a reduce timpul mediu de acces la memorie, tehnica LVP exploateaza localitatea valorii reducând atât timpul mediu de acces la memorie cât si necesarul de largime banda al memoriei (se efectueaza mai putine accese la memoria centrala) asigurând un câstig de performanta considerabil. Desigur ca, toate aceste avantaje se obtin simultan cu reducerea considerabila a presiunii asupra memoriilor cache. Ca si consecinta a predictiei valorilor se reduc si efectele defavorabile ale hazardurilor RAW, prin reducerea asteptarilor instructiunilor dependente ulterioare.

Localitatea valorilor este justificata de câteva observatii empirice desprinse din programele de uz general, medii si sisteme de operare diverse:

- ♦ *Redundanta datelor* – seturile de intrari de date pentru programele de uz general sufera mici modificari (Ex: matrici rare, fisiere text cu spatii goale, celule libere în foi de calcul tabelar).



- ♦ *Verificarea erorilor* – tehnica LVP poate fi benefică în gestionarea tabelor de erori ale compilatoarelor, în cazul apariției unor erori repetate.
- ♦ *Constante în program* – deseori este mult mai eficient ca programele (codul) să încarce constante situate în structuri de date din memorie, ceea ce este exploatat favorabil de tehnica LVP.
- ♦ *Calculul adreselor instrucțiunilor de salt* – în situația instrucțiunilor *case (switch* în C) compilatorul trebuie să genereze cod care încarcă într-un registru adresa de bază pentru branch, care este o constantă (predicția adreselor destinație pentru instrucțiunile de salt).
- ♦ *Apelul funcțiilor virtuale* – în acest caz compilatorul trebuie să genereze cod care încarcă un pointer de funcție, care este o constantă în momentul rularii.

Localitatea valorii aferentă unor instrucțiuni Load statice dintr-un program poate fi afectată semnificativ de optimizările compilatoarelor: *loop unrolling*, *software pipelining*, *tail replication*, întrucât aceste optimizări creează instanțe multiple ale instrucțiunilor Load. Ca și metrică de evaluare, localitatea valorii pentru un benchmark este calculată ca raport dintre numărul de instrucțiuni Load *statice* care regăsesc o aceeași valoare în memorie ca și precedentele  $k$  accese și numărul de instrucțiuni Load *dinamice* existente în benchmarkul respectiv. O istorie de localizare pe  $k$  biți semnifică faptul că o instrucțiune Load verifică dacă valoarea citită (încărcată) din memorie se regăsește printre ultimele  $k$  valori anterior încărcate. O problemă importantă de proiectare care se pune la ora actuală este: *cât de "multă istorie" să fie folosită în predicție (execuție speculativă)* ? Compromisurile actuale care se fac sunt – o istorie redusă – reprezentând o acuratețe de predicție joasă dar cost scăzut sau – o istorie bogată de predicție – acuratețe ridicată de predicție dar costuri hardware și regie ridicate.

Se remarcă aici o similitudine între problema predicției valorilor și problema - actuală și ea - a predicției adreselor destinație aferente instrucțiunilor de salt indirect. Structurile de date implementate în hardware pentru ambele procese de predicție, au același principiu de funcționare și anume: asocierea cvasibijectivă a contextului de apariție al instrucțiunii respective (Load sau Branch) cu data / adresa de predicționat, în mod dinamic, odată cu procesarea programului. Iată deci că problematica predicției în microprocesoarele avansate, tinde să devină una generală și ca urmare implementată pe baza unor principii teoretice mai generale și mai elevate. Aceasta are drept scop principal și imediat, execuția speculativă

agresiva a instrucțiunilor, cu beneficii evidente în creșterea gradului mediu de paralelism.

Unul din mecanismele hardware de exploatare a conceptului de localitate a valorilor îl reprezintă LVPU (Load Value Prediction Unit) – unitate de predicție a valorilor încărcate prin instrucțiuni Load și abordează două aspecte: latența memoriei și respectiv lățimea de bandă a memoriei. Exploatând corelația între adresele instrucțiunilor Load și valorile ce vor fi (sau sunt) încărcate (citite) de la respectiva adresă, se va reduce latența instrucțiunilor Load. Prin identificarea celor mai predictibile Load-uri și bypassing-ul aplicat astfel ierarhiei de memorie convenționale: CPU – cache – memorie centrală, se reduce necesarul de lățime de bandă al memoriei (numărul de porturi de acces la memorie). Intenția conceptului de localitate a valorii este de a reduce efectul defavorabil al dependențelor de date RAW prin reducerea latenței memoriei la zero cicluri (nefiind necesar accesul la memoria principală) precum și reducerea timpilor de așteptare aferenți instrucțiunilor dependente următoare.

Componentele LVPU sunt:

- ⇒ **LVPT** (Load value prediction table) – un tabel utilizat în generarea valorilor de predicție. Câmpurile în acest tabel sunt constituite din valorile de prețis asociate cu grade de încredere aferente. Este o tabelă mapată direct, indexată prin adresa instrucțiunii Load (PC).
- ⇒ **LCT** (Load clasification table) – mecanism care identifică cu acuratețe instrucțiunile Load predictibile. Utilitatea “*Load Value Prediction*” este evidențiată doar în cazul predicționării corecte, în caz contrar determinând atât hazarduri structurale cât și creșterea latenței de execuție a instrucțiunilor Load. Clasificarea se bazează atât pe *comportamentul dinamic* cât și pe *predicția anterioară* a respectivelor instrucțiuni Load rezultând următoarele grupuri generale de instrucțiuni: *nepredictibile*, *predictibile* și *puternic predictibile* sau *constante*. Prin tratarea separată a fiecărui grup de instrucțiuni în parte este posibilă exploatarea avantajului maxim în fiecare caz: putem evita costul unei predicții gresite prin identificarea Load-urilor nepredictibile sau se poate evita timpul necesar accesului la memorie identificând și verificând Load-urile puternic predictibile. LCT reprezintă o tabelă mapată direct de numărătoare saturate pe  $n$  biți, indexată cu cei mai puțin semnificativi biți ai adresei instrucțiunii Load ( $PC_{low}$ ). Deși mecanismul LCT identifică cu acuratețe tipul de predicție aferent fiecărui Load (nepredictibil, predictibil, puternic predictibil) este necesară verificarea corectitudinii valorii generate de LVPT. Pentru Load-urile predictibile, se compară valoarea prezisă cu valoarea actuală existentă în sistemul ierarhic de memorie (vezi figura 6.13) iar pentru cele puternic

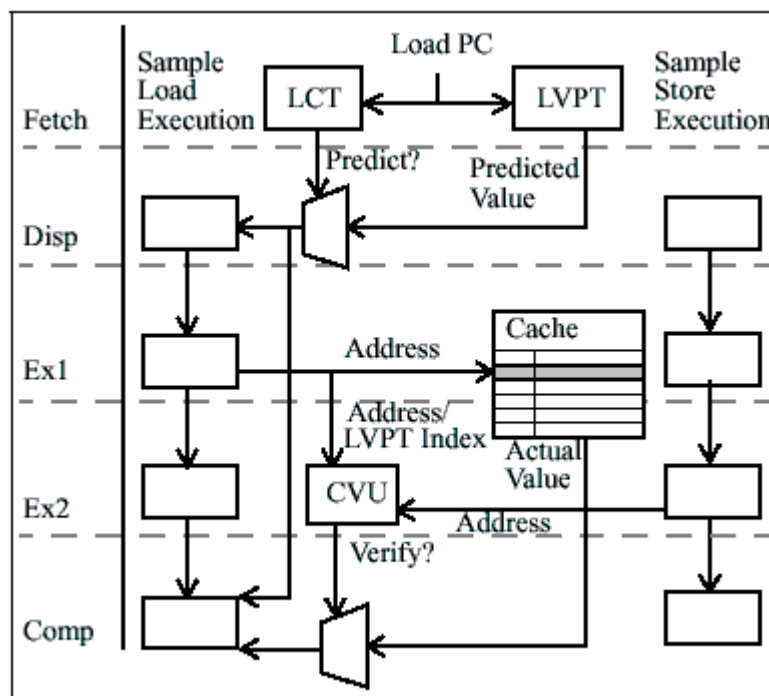
predictibile este utilizata structura de verificare CVU. Statistici serioase realizate pe sistemele Power PC si Alpha AXP, utilizând benchmarkuri complexe (*jpeg, compress, perl, xisp, hydro2d, tomcatv* etc.) arata ca peste 80% din instructiunile Load predictibile/nepredictibile sunt clasificate corect, ca atare, de catre unitatea LCT.

⇒ **CVU** (Constant Verification Unit) – este o unitate de verificare utilizata în cazul Load-urilor puternic predictibile, pentru evitarea accesarii complete a sistemului conventional de memorie, prin fortarea intrarilor LVPT care corespund Load-urilor respective sa ramâna coerente cu memoria principala. Pentru intrarile tabelii LVPT clasificate puternic predictibile de catre LCT adresa datelor si indexul în tabela LVPT sunt plasate într-o tabela complet asociativa în interiorul CVU. Aceasta tabela este mentinuta coerenta cu memoria centrala prin invalidarea oricarei intrari care are adresa datei identica cu cea a unei instructiuni Store ulterioare (similar aici cu anteriorul concept de reutilizare). La executia unei instructiuni Load puternic predictibila (bazat pe starea curenta a automatului corespunzator din LCT) are loc o cautare dupa continut (adresa datei si indexul în LVPT concatenate) în tabela asociativa. Daca rezultatul este cu hit, avem garantia ca, valoarea (prezisa) aflata la intrarea LVPT este coerenta cu memoria principala, întrucât orice actualizare a memoriei, aparuta dupa ultima salvare a datelor ar fi invalidat intrarea corespunzatoare din CVU. Daca nici o intrare în CVU nu satisface conditia de cautare (miss), instructiunea Load își modifica statutul din “puternic predictibila” în acela de “predictibila”, iar valoarea prezisa este comparata cu valoarea actuala citita din ierarhia conventionala de memorie.

Figura 6.13 prezinta mecanismul LVP si modul de interactiune între structurile hardware implicate (LVPT, LCT si CVU) la executia instructiunilor cu referire la memorie.

La citirea unei instructiuni Load, - din cache sau memoria centrala - cu cei mai putin semnificativi biti ai adresei instructiunii Load ( $PC_{LOW}$ ) se adreseaza în paralel tabelele LVPT si LCT. Structura din urma, similar unei tabele de istorie a salturilor, determina daca va fi facuta sau nu o predictie, în timp ce LVPT, analog unei tabele cu destinatiile instructiunilor de salt, înainteaza valoarea prezisa. Aceasta va fi preluata prin bypassing de catre instructiunile dependente aflate în asteptare în statiile de rezervare. Odata generata adresa de acces la memorie, pe nivelul EX1 al structurii pipe, cache-ul de date si CVU sunt accesate în paralel. La returnarea datei reale din cache, aceasta este comparata cu valoarea prezisa, instructiunile dependente executate speculativ fie urmeaza parcursul normal - nivelul Write Back al structurii pipe - fie sunt retrimise spre executie, iar structurile

LVPT si LCT sunt actualizate în consecință. Întrucât cautarea în CVU nu se realizează la timp pentru a preveni inițierea accesului la memorie (structura CVU asociativă) singura dată când se poate realiza totuși acest lucru este atunci când apar conflicte la bank-uri sau accese cu "miss" în cache. Avantajul rezultat astfel îl reprezintă reducerea numărului de blocuri conflictuale la primul nivel de cache. În oricare din cazuri, un "hit" în CVU va întrerupe încercările succesive sau procesul de miss în cache. În timpul execuției unei instrucțiuni Store, se realizează o cautare complet asociativă după adresa respectivei instrucțiuni și toate intrările cu hit sunt înlăturate din CVU.



**Figura 6.13.** Schema bloc a mecanismului LVP

*Load Value Prediction*, spre deosebire de alte tehnici speculative, cum ar fi mecanismul de aducere anticipată a instrucțiunilor sau predicția ramificațiilor în program, reduce și nu crește, necesarul de lărgime de bandă al memoriei. De asemenea, disponibilitatea foarte devreme (la începutul fazei de aducere a instrucțiunii IF) a indicilor de accesare a tabelor LVPT și LCT (accesul la respectivele tabele putând fi pipelineizat peste două sau mai multe nivele pipe), complexitatea relativ redusă în proiectare și realizarea de tabele relativ mari fără a afecta perioada de tact a procesorului

sunt caracteristici care fac tehnica LVP atractiva pentru proiectantii de arhitecturi.

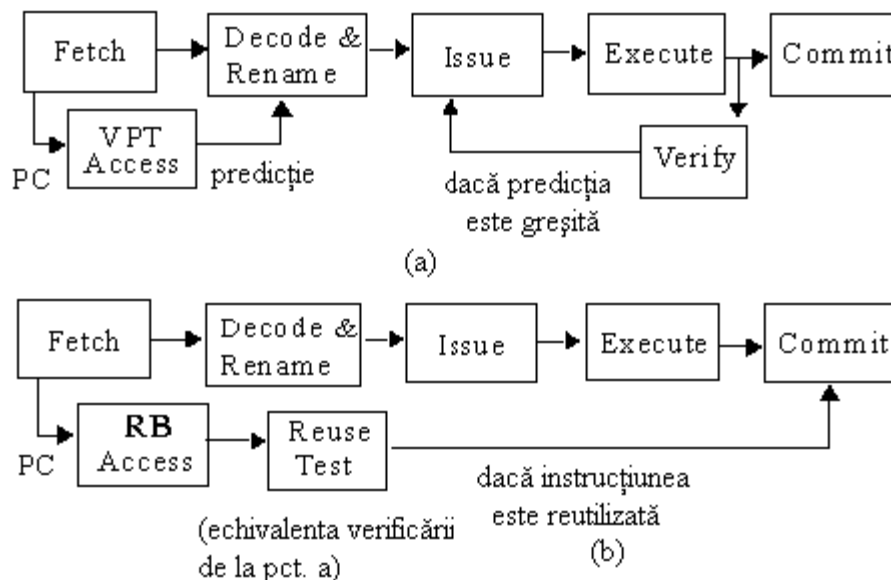
Cercetarile ulterioare care privesc predictia valorilor sunt canalizate pe extinderea LVP pentru predictia unei plaje de valori pentru o instructiune Load, ceea ce implica un multithreading speculativ în spatiul valorilor, sau executia speculativa utilizând valori generate de instructiuni altele decât Load. Pentru îmbunatatirea acuratetii de predictie a valorilor au fost propuse câteva tehnici. Acestea includ predictoare bazate pe istorie, hibride [46] si predictoare bazate pe context [47]; ele lucreaza la nivel de o singura instructiune si încearca sa prezica viitoarea valoare care va fi produsa de instructiune bazându-se pe valorile anterior generate. Întrucât respectivele scheme încearca sa înmagazineze o cât mai mare istorie de predictie, aceasta implica tabele hardware de mare dimensiune si cost ridicat de implementare. De asemenea, studiile cercetatorilor [48] arata ca, utilizând suportul compilatorului pentru extinderea predictiei valorilor si reutilizare dinamica la nivel de *basic block* se obtine o îmbunatatire substantiala a performantei procesoarelor (de la 1% la 14%, teste realizate pe benchmark-urile SPEC '95). Studii recente [55] abordeaza problematica cercetarii localitatii valorilor în contextul predictiei instructiunilor tip Store (memorare), cu implicatii deosebit de favorabile asupra performantei sistemelor uniprosesor dar mai ales multimicroprocesor (în special prin reducerea traficului prin reseaua comuna de interconectare).

Dupa prezentarea celor doua tehnici de exploatare a redundantei din program prin eliminarea dependentelor de date, IR (*instruction reuse*) si VP (*value prediction*), evidentiem succint, bazat pe [49], diferentele existente precum si modalitatile diferite de abordare a problemei reducerii caii critice de executie a instructiunilor într-un program.

VP predictioneaza rezultatele instructiunilor bazat pe rezultatele cunoscute anterior, efectueaza operatiile folosind valorile prezise iar executia speculativa este confirmata la un moment ulterior - *late validation* - când valorile corecte devin disponibile, deci dupa executia instructiunii. În cazul unei predictii corecte, calea critica este redusa întrucât instructiunile care s-ar executa secvential în mod normal, pot fi executate în paralel. În caz contrar, instructiunile executate cu intrari eronate trebuiesc reexecutate.

IR, pe de alta parte, recunoaste un lant de instructiuni dependente executat anterior si nu-l mai executa din nou - *early validation* - actualizând doar diferite date în tabelele hardware aferente. Astfel, IR *comprima* un lant de instructiuni din calea critica de executie a programului.

Figura 6.14 prezinta comparativ implementarea în structura pipeline a unei microarhitecturi a celor doua mecanisme: (a) - Value Prediction si (b) - Instruction Reuse.



**Figura 6.14.** (a) Pipeline cu VP, (b) Pipeline cu IR

VP captează mai multă redundanță din program decât IR. Deoarece IR validează rezultatele devreme în pipe, bazat pe intrări, pot apărea următoarele situații dezavantajoase: dacă intrările unei instrucțiuni nu sunt disponibile în momentul realizării testului de reutilizare atunci respectiva instrucțiune nu va fi reutilizată. O instrucțiune care produce un rezultat identic cu unul anterior, dar cu intrări diferite (operații logice, instrucțiuni Load), nu va fi reutilizată. În schimb, VP poate realiza predicții corecte în ambele situații prezentate mai sus întrucât valorile prezise nu depind de disponibilitatea intrărilor în pipe, și nici de importanța faptului că ele să fie sau nu identice cu instanțele anterioare ale aceleiași instrucțiuni.

Cele două tehnici interacționează diferit cu mecanismul de branch prediction. IR reduce penalitatea datorată unei predicții greșite a salturilor din două motive. În primul rând, când un branch predictionat greșit este reutilizat, predicția eronată este detectată mai devreme (în faza de decodificare) decât s-ar realiza dacă saltul s-ar executa. Al doilea motiv îl constituie convergența codului în programe. Astfel prin posibilă reutilizare a codului, existent după punctul de convergență a căilor de execuție, și care este evacuat în cazul unei predicții eronate, tehnica IR îmbunătățește timpul de execuție al programelor. Pe de altă parte, VP poate crește penalitatea introdusă de un branch greșit predictionat din următoarele motive: cauzează predicții eronate suplimentare și prin întârzierea rezolvării saltului respectiv

(asteptându-se ca operanzii săi să devină disponibili - după calculul și verificarea acestora).

VP și IR influențează concurența asupra resurselor prin schimbarea atât a paternului în care resursele sunt folosite cât și a cererii efectuate. Prin colapsarea dependentelor de date cele două tehnici determină executia mai devreme a instructiunilor. Întrucât o instructiune reutilizată nu se execută, IR tinde să reducă concurența la resurse. Sunt eliberate astfel resurse și puse la dispoziția altor instructiuni concurente. VP determină creșterea cererii de resurse întrucât instructiunile care se execută cu operanzi eronați se vor reexecuta. Executia acestor instructiuni poate fi reluată de mai multe ori dacă valorile sunt predictionate greșit în mod repetat.

Impactul tehnicilor IR și VP asupra latentei de execuție a instructiunilor este de asemenea antagonist. IR scade latentă de execuție a operațiilor individuale (de la posibil mai mulți cicli) la doar un ciclu (latentă de reutilizare a unei instructiuni). În schimb, VP nu scurtcircuitează executia - instructiunile trebuind să se execute pentru a verifica predicția. Timpul total de execuție a unei instructiuni va fi limitat astfel de latentă să de execuție (și verificare). Câștigul aici constă în faptul că se deblochează instructiuni dependente prin procesul de predicție a valorii.

În contextul următoarei generații arhitecturale de microprocesoare de înaltă performanță, cea de a 4-a, se întrevăde de asemenea implementarea unor mecanisme de aducere de tip Out of Order a instructiunilor, în plus față de cele deja existente în executia instructiunilor. Astfel de exemplu, în cazul unei ramificații dificil de predictat, pe durata procesului de predicție, procesorul poate să aducă anticipat instructiunile situate începând cu punctul de convergență al ramurilor de salt. Aceste instructiuni fiind independente de condiția de salt, pot fi chiar lansate în execuție. Când predicția se va fi realizat sau pur și simplu când adresa destinație a ramificației va fi cunoscută, procesorul va relua aducerea instructiunilor de la adresa destinație a ramificației.

În viitorul apropiat, unitatea de execuție va trebui să lanseze spre unitățile funcționale între 16 și 32 instructiuni în fiecare tact. Evident, executia instructiunilor se va face Out of Order, pe baza dezvoltării unor algoritmi de tip Tomasulo (spunem "de tip Tomasulo" pt. că acest algoritm este Out of Order doar în execuție nu și în procesul de *dispatch* - lansare a instructiunilor din buffer-ul de prefetch înspre stația de rezervare; acest din urmă proces este de tip In Order, lucru puțin sesizat în cartile de specialitate care consideră algoritmul ca arhetip al execuției Out of Order, fără nici o nuanță) [50]. Stațiile de rezervare aferente unităților de execuție, vor trebui să aibă capacități de peste 2000 de instructiuni Pentru a evita falsele dependente de date (WAR, WAW), procesoarele vor avea mecanisme de

redenumire dinamica a registrilor logici. Desigur, tehnicile de scheduling static vor trebui îmbunătățite radical pentru a putea oferi acestor structuri hardware complexe suficient paralelism. Se estimează atingerea unor rate medii de procesare de 12-14 instr. / tact, considerând că se pot lansa în execuție maximum 32 instr. / tact. La ora actuală, cele mai avansate procesoare, cu un potențial teoretic de 6 instr. / tact, ating în realitate doar 1.2-2.3 instr. / tact [51].

Aceste rate mari de procesare, impun execuția paralelă a cca. 8 instrucțiuni Load/ Store. Aceasta implică un cache de date primar de tip multiport și unul secundar, de capacitate mai mare dar cu porturi mai puține. Miss-urile pe primul nivel, vor accesa al 2-lea nivel. Pentru a nu afecta perioada de tact a procesorului, este posibil ca memoria cache din primul nivel să fie multiplicată fizic.

Aceste noi arhitecturi, care execută trace-uri ca unități de procesare, vor putea permite procesarea mai multor asemenea trace-uri la un moment dat, ceea ce conduce la conceptul de procesor multithreading. Asadar paralelismul la nivel de instrucțiuni (ILP- Instruction Level Parallelism) va fi înlocuit cu unul mai masiv, constituit la nivelul thread-urilor unei aplicații (TLP- Thread Level Parallelism). În acest scop, arhitectura va trebui să continue mai multe unități de procesare a trace-urilor, interconectate. La aceasta, se adaugă o unitate de control "high-level", în vederea partitionării programului în thread-uri de instrucțiuni independente. Se poate ajunge astfel la o rată de procesare de mai multe trace-uri / tact față de instrucțiuni / tact, metrică de performanță obișnuită a procesoarelor superscalare actuale. E posibil ca aceste TLP-uri să acopere "semantic-gap"-ul existent între paralelismul la nivel de instrucțiuni și respectiv cel situat la nivelul programelor, mult mai masiv.

Exemple recente de arhitecturi bazate pe execuție speculativă și multithreading includ: arhitectura multiscalară [37], trace procesorul [52], arhitectura superthread [53], procesorul superspeculativ. Procesorul superthread reprezintă un hibrid între arhitecturi multithreading și superscalare, care speculează dependentele de control (ramificații condiționate) iar cele de date le rezolvă dinamic. Trace procesorul și procesorul superspeculativ speculează atât dependentele de date cât și cele de control, în timp ce arhitectura multiscalară este susținătoare unei abordări multithread cu expediție vastă de fire spre execuție. O altă paradigmă nouă, oarecum asemănătoare, dar mai îndepărtată probabil ca realitate comercială, o constituie multiprocesoarele integrate într-un singur circuit, ca soluție în vederea exploatării paralelismului masiv ("coarse grain parallelism"). Aceasta este încurajată și de anumite limitări tehnologice care ar putea afecta dezvoltarea arhitecturilor uniprocessor.



Un “*procesor multithread*” (PMT) detine abilitatea de a procesa instructiuni provenite din thread-uri (fire de executie) diferite fara însa a executa pentru aceasta schimbari de context (*context switches*). PMT gestioneaza o lista a thread-urilor active si decide într-o maniera dinamica asupra instructiunilor pe care sa le lanseze în executie. Coexistenta mai multor thread-uri active permite exploatarea unui nou tip de paralelism numit “*Thread Level Paralelism*” (TLP). Instructiunile din thread-uri diferite, fiind independente între ele, se pot executa în paralel ceea ce implica grade superioare de utilizare ale resurselor precum si mascarea latentei unor instructiuni. În acest ultim sens, de asemenea, gestiunea branch-urilor este simplificata, latenta acestora putând fi (partial) acoperita de instructiuni aparținând unor thread-uri diferite si deci independente de conditia de salt. De asemenea, efectul defavorabil al miss-urilor în cache poate fi contracarat prin acest multithreading (daca un thread genereaza un miss, CPU poate continua procesele de aducere ale instructiunilor din cadrul celorlalte thread-uri).

Desi multithreadingul îmbunătăteste performanta globala, se cuvine a se remarca faptul ca viteza de procesare a unui anumit thread nu se îmbunătăteste. Mai mult, este de asteptat chiar ca viteza de procesare pentru fiecare thread în parte sa se degradeze întrucât resursele trebuiesc partajate între toate thread-urile active. Cu alte cuvinte, acest TLP se preteaza la a fi exploatat în modurile de lucru ale sistemelor de operare de tip multiprogramare sau multithread. Partajarea multiplelor resurse hardware în vederea implementarii mai multor “*contexte*” de procesare aferente fiecarui thread, implica probleme dificile în cadrul unui PMT (mecanism de aducere a mai multor instructiuni de la adrese necontigue, structuri de predictie multiple, lansarea în executie a mai multor instructiuni aparținând unor thread-uri distincte etc).

Simularea unor arhitecturi PMT devine extrem de sofisticata, clasicele benchmark-uri nemaifiind aici de nici un ajutor. Trebuie lucrat în medii software bazate pe multiprogramare ceea ce nu este deloc usor de implementat si mai ales simulat si evaluat.

Se estimeaza ca toate aceste idei arhitecturale agresive, sa poata fi implementate într-un microprocesor real, abia atunci când tehnologia va permite integrarea “on-chip” a 800 milioane -1 miliard de tranzistori, ceea ce va fi posibil în jurul anului 2010 (predictie “Semiconductor Industry Association” în 1996 [51]). La acest nivel de dezvoltare tehnologica va fi posibila de asemenea integrarea “on-chip” a memoriei DRAM, la un timp de acces de cca. 20 ns. Ideea este atragatoare pentru ca la aceeasi suprafata de integrare, o memorie DRAM poate stoca de cca. 30-50 de ori mai multa informatie decât o memorie SRAM pe post de cache. Se estimeaza ca într-o

prima faza, un DRAM integrat de 96 MB va necesita 800 milioane de tranzistori ocupând cca 25% din suprafata circuitului (vezi pentru detalii <http://iram.cs.berkeley.edu/>).

În orice caz, se pare ca pentru a continua si în viitor cresterea exponentiala a performantei microprocesoarelor, sunt necesare idei noi, revolutionare chiar, pentru ca în fond paradigma actuala este, conceptual, veche de circa 15-20 de ani. Ar fi poate necesara o *abordare integratoare*, care sa îmbine eficient tehnicile de scheduling software cu cele dinamice, de procesare hardware. În prezent, dupa cum a rezultat din cele prezentate pâna acum, separarea între cele 2 abordari este poate prea accentuata. În acest sens, programele ar trebui sa explicitizeze paralelismul intrinsec într-un mod mai clar. Cercetari actuale arata ca un program optimizat static merge mai prost pe un procesor Out of Order decât pe unul In Order. Printre cauze se amintesc expansiunea codului dupa reorganizare, noile dependente de date introduse prin executia conditionata a instructiunilor, faptul ca instructiunile gardate nu permit executia Out of Order etc. Cu alte cuvinte, separarea schedulingului dinamic de cel static este o prejudecata nociva dar care este din pacate deja consacrata în ingineria calculatoarelor unde practic nimeni nu si-a pus problema dezvoltarii unui optimizator de cod dedicat unei masini cu procesare Out of Order. Cercetarea algoritmilor ar trebui sa tina seama cumva si de concepte precum, de exemplu, cel de cache, în vederea exploatarii localitatilor spatiale ale datelor prin chiar algoritmul respectiv. Cunoastem, la ora actuala, relativ putine lucruri despre ce se întâmpla cu un algoritm când avem implementate ierarhii de memorii pe masina fizica. În general, algoritmii nu tin cont la ora actuala de caracteristicile masinii si acest lucru nu este bun pentru ca algoritmul nu ruleaza într-un "eter ideal" ci, întotdeauna din pacate, pe o masina fizica având limitari importante (de ex. elementele unui tablou se pot afla partial în cache si partial pe disc!). Astfel, dihotomia teorie - practica devine una artificiala si chiar nociva. Desigur, asta nu înseamna ca programatorul va trebui sa devina expert în arhitectura computerelor, dar nu o va mai putea neglija total daca va dori performanta. În noua era "post PC" spre care ne îndreptam, centrata pe Internet si tehnologia WWW, fiabilitatea, disponibilitatea si scalabilitatea vor trebui sa devina criterii esentiale alaturi de performanta în sine, ceea ce implica iarasi necesitatea unei noi viziuni pentru arhitectul de computere.

De asemenea, se poate predictiona o dezvoltare puternica în continuare a procesoarelor multimedia. Aplicatiile multimedia spre deosebire de cele de uz general, nu impun în mod necesar complicate arhitecturi de tip superscalar sau VLIW. Aceste aplicatii sunt caracterizate de urmatoarele aspecte care le vor influenta în mod direct arhitectura:

- ❑ structuri de date regulate, de tip vectorial, cu tendințe de procesare identica a scalarilor componenti, care impun caracteristici de tip SIMD (*Single Instruction Multiple Data*), de natura vectoriala deci, a acestor procesoare;
- ❑ necesitatea procesarii si generarii raspunsurilor în timp real;
- ❑ exploatarea paralelismului la nivelul thread-urilor independente ale aplicatiei (codari / decodari audio, video, etc). De exemplu, una din aplicatiile rulate de noul procesor comercial Intel Pentium IV o reprezinta codarea în timp real a imaginilor provenite de la o camera digitala [54].
- ❑ localizare pronuntata a instructiunilor prin existenta unor mici bucle de program si nuclee de executie care domina timpul global de procesare.

Autorii acestei lucrari cred, ca o opinie personala, ca viitorul cercetarii în acest domeniu al microarhitecturilor avansate, consta într-o abordare complet novatoare a problematicii arhitecturilor de calcul. Se impune deci, o abordare integratoare a acestor arhitecturi prin utilizarea unor tehnici si concepte diverse din stiinta si ingineria calculatoarelor. Exista înca un puternic spirit al specializarii înguste care face adesea ca paradigma domeniului respectiv sa fie una închisa în tipare preconcepute. Abordari recente arata însa ca sinergia unor instrumente aparent disjuncte ale stiintei calculatoarelor converge spre realizari novatoare ale unui anumit domeniu de cercetare. Ca exemplu, o idee novatoare pe care dorim sa o comunicam în acest sens este aceea de determinare automata a unor noi scheme de predictie a salturilor pe baza de algoritmi genetici. Aceasta abordare dezvoltă automat scheme de predictie a branch-urilor integrate în arhitecturi superscalare pe baza unor algoritmi genetici, pornind de la o populatie initiala de predictoare cunoscute, descrise complet cu ajutorul unor arbori binari (de fapt, mai precis, printr-un "limbaj" special conceput în acest sens - *BPL: Branch Programming Language*). După evaluarea acestor predictoare realizata prin simulare pe trace-uri de program, prin aplicarea unor operatori genetici (incrucisare, mutatie, inversie etc) asupra elementelor din populatia initiala, se construiește o noua generatie de predictoare obtinuta automat. Procedura anterioara se va repeta pana la obtinerea unor generatii de predictoare de mare performanta (din pacate si complexitate). Cu alte cuvinte, pornind de la un set initial de scheme cunoscute si descrise printr-un formalism propriu adecvat se vor dezvolta noi scheme aplicând operatori genetici de tip "crossover", mutatie, inversie, etc. Noii generatii de scheme i se va calcula rata de fitness (de fapt, acuratetea predictiei) pe baza unor simulatoare deja finalizate. Pe aceasta baza se vor determina în mod pseudoaleator, în conformitate cu algoritmi genetici, noile perechi de parinti si care vor produce noi structuri aferente

generatiei urmatoare, dar si acele structuri, în general mai putin performante, care vor fi eliminate din cadrul generatiei urmatoare. Mentionam ca stadiul actual al acestor cercetari este deosebit de promitator. In final, se doreste a se afla daca cele mai puternice predictoare obtinute prin programare genetica sunt fezabile a fi implementate in hardware. De asemenea, se doreste a se afla daca prin astfel de proceduri automate se pot determina predictoare genetice mai puternice decat cele proiectate de catre oameni. Evident ca o astfel de experienta se poate generaliza ulterior la alte tipuri de scheme. O alta contributie majora a acestui abordari consta in compararea schemelor clasice obtinute automat prin programarea genetica cu predictoarele neurale dezvoltate in premiera mondiala de grupul nostru de cercetare. De asemenea vom dezvolta cercetarile asupra predictoarelor neurale de branch-uri, mai ales in ceea ce priveste investigarea unor noi algoritmi de invatare statica sau/si dinamica. Mai mult, propunem pentru prima data o idee complet noua constand intr-un predictor neural, bazat pe un anumit tip de retea (LVQ- Learning Vector Quantization, MLP – Multilayer Perceptron cu invatare tip backpropagation etc.). Aceasta idee face o legatura surprinzatoare intre domeniul arhitecturii procesoarelor avansate si cel al recunoasterii formelor. Tot aici, intentionam sa dezvoltam predictorul neural de branch-uri in sensul inglobarii sale in compilator, prin urmare propunand un predictor static de ramificatii. Problema deschisa este in acest caz urmatoarea: ce caracteristici intrinseci semnificative ale corpurilor de program pot constitui intrari fezabile in reseaua neurala de predictie (taken / not taken) ? Scopul final va consta intr-o "pre-predictie" realizata prin compilator, care sa ajute mai apoi procesele de predictie dinamica pe care noi deja le avem implementate prin simulatoare specifice. In fine, vom compara rezultatele obtinute prin aceste procedee novatoare de predictie a ramificatiilor cu cele obtinute prin scheme clasice sau chiar mai putin clasice.

O contributie majora în elaborarea unor microarhitecturi de mare performanta, ar putea consta în cercetarea posibilitatii de integrare a acestor structuri de predictie într-o arhitectura superscalara care sa exploateze în mod agresiv reutilizarea dinamica a instructiunilor si/sau predictia valorilor. Tot aici, consideram ca utila investigarea posibilitatii integrarii sinergice a reutilizarii dinamice a instructiunilor cu arhitecturile de tip "trace cache". Este util credem, spre exemplu, a se cerceta posibilitatea rezolvarii simultane a "fetch bottleneck"-urilor (determinate în principal de instructiunile de tip "taken branch" care limiteaza largimea de banda a aducerii instructiunilor la 5-6) cu limitarile de tip "issue bottleneck" (determinate fundamental de gradul de secventialitate intrinsec programelor, mai precis de catre dependentele reale de date), ambele din pacate active pe

actualele arhitecturi superscalare. Remarcam o similitudine între problema predicției valorilor și problema actuală, a predicției adreselor destinație aferente instrucțiunilor de salt indirect. Structurile de date implementate în hardware pentru ambele procese de predicție, au același principiu de funcționare și anume: asocierea cvasibijectivă a contextului de apariție al instrucțiunii respective (Load sau Branch) cu data / adresa de predicționat, în mod dinamic, odată cu procesarea programului. Iată deci că problematica predicției în microprocesoarele avansate, tinde să devină una generală și ca urmare implementată pe baza unor principii teoretice mai profunde și mai elevate, așa cum este de altfel normal. Aceasta are drept scop principal și imediat, executia speculativă agresivă a instrucțiunilor, cu beneficii evidente în creșterea gradului mediu de paralelism prin paralelizarea unor instrucțiuni provenite din basic-block-uri diferite.

O altă idee interesantă o constituie abordarea integratoare din punct de vedere hardware-software. Toate arhitecturile dezvoltate trebuie evaluate și optimizate prin simulări complexe și deosebit de laborioase, utilizând benchmark-uri reprezentative. Cu alte cuvinte trebuie determinată maparea optimă a structurii hardware din punct de vedere al performanței execuției unor programe considerate a fi “numitorul comun” în raportarea de performanțe. Astfel, pe această bază de simulare, se vor putea determina și înțelege aspecte subtile ale relației dintre anumite caracteristici intrinseci ale programelor (recursivitate, numeric/non-numeric etc.) și respectiv necesitățile și caracteristicile arhitecturii hardware. De asemenea ar trebui studiat în viitor impactul integrării unor asemenea structuri de predicție în cadrul unor arhitecturi evolutioniste dar și revolutionare, precum cele bazate pe reutilizarea dinamică a instrucțiunilor. În opinia noastră, bazată pe o cercetare bibliografică laborioasă pe parcursul mai multor ani, cercetările actuale în domeniul arhitecturilor ILP (Instruction Level Parallelism) sunt tributare unei abordări relativ convenționale, situată strict în sfera “arhitecturilor de calcul”. Desigur că aceste cercetări, în special cele dezvoltate în universitățile americane, excelează în simulări și implementări laborioase, de mare performanță și acuratețe, mai greu obținabile în România azi. În schimb, metodologia cercetării este una deja clasică, bazată pe simulări cantitative ale acestor arhitecturi. Relativ la acest context actual, dorim să subliniem că o abordare mai neconvențională, care să utilizeze concepte ale unor domenii considerate până acum a nu avea legătură cu arhitectura sistemelor de calcul (rețele neuronale, algoritmi genetici, algoritmi de predicție PPM etc.), poate să genereze rezultate surprinzătoare, nebanuite chiar, precum și o îmbogățire a paradigmei arhitecturilor avansate. Astfel, este știut că în general arhitecturile și structurile hardware sunt concepute prin efortul și inspirația creierului uman. Ca o alternativă la

aceasta abordare clasica, dupa cum am mai aratat, noi ne-am gandit sa contrapunem acestei metode cvasi-unice, o metoda de generare automata a unor asemenea structuri hardware, pornind de la o populatie initiala de structuri “clasice”, prin utilizarea algoritmilor genetici. De asemenea intentionam sa largim cercetarile cu privire la predictoarele neuronale pe care le-am introdus de curând si care fac din problema predictiei branchurilor, în mod surprinzator, o problema de recunoastere a formelor (deci o problema de “hardware” devine de fapt una de inteligenta artificiala). Consideram deci ca printr-o astfel de abordare mai putin conventionala, putem contribui si noi, în mod real, la un progres semnificativ al cunoasterii în domeniul arhitecturilor de calcul paralele si neconventionale.

## 7. SIMULAREA UNEI MICROARHITECTURI AVANSATE

---

### 7.1. INTRODUCERE

Istoria procesoarelor contrapune doua paradigme pentru cresterea performantei, bazate pe software si respectiv pe hardware. Ideea ca arhitectura procesoarelor interactioneaza "accidental" cu domeniul software este complet gresita, între hardware si software existând în realitate o simbioza si interdependenta puternica, înca neexplorata corespunzator. În procesul de proiectare al procesoarelor, aferent generatiilor viitoare, accentul principal nu se mai pune pe implementarea hardware, ci pe proiectarea arhitecturii în strânsa legatura cu aplicatiile potentiale. Se porneste de la o arhitectura de baza (generica), puternic parametrizata, care este modificata si îmbunatatita dinamic, prin simulari laborioase pe programe de test (benchmark-uri) reprezentative. Procesoarele se proiecteaza odata cu compilatoarele care le folosesc iar relatia dintre ele este foarte strânsa: compilatorul trebuie sa genereze cod care sa exploateze caracteristicile arhitecturale, altfel codul generat va fi inefficient. Metodele de crestere a performantei arhitecturilor de calcul cu ajutorul compilatoarelor se numesc *statice*, pentru ca programul este analizat si optimizat o singura data, înainte de a fi lansat în executie, iar cele bazate pe hardware numindu-se *dinamice*, pentru ca sunt aplicate în timp ce programul se executa.

Concluziile actuale ale cercetatorilor în domeniul arhitecturilor de calcul sunt ca trei fenomene (viteza ceasului, integrarea pe o singura pastila si exploatarea paralelismului la nivelul instructiunii si al firelor de executie) contribuie la cresterea performantei totale a procesoarelor. Scopul general al unei cercetari privind arhitectura sistemelor monoprosesor, si implicit al simularii unei arhitecturi tip monoprosesor, îl reprezinta cresterea si evaluarea gradului de paralelism la nivelul instructiunilor existent în

programele de test, compilate pentru respectiva arhitectura (performanta depinzând foarte mult si de compilatorul folosit, mai precis de tehnicile de optimizare globala pe care acesta le implementeaza). Programele de test pe care le-au considerat autorii acestei lucrari, sunt exemple reprezentative de aplicatii de uz general, gândite sa manifeste comportamente similare cu scopul general al programelor de calculator (incluzând aplicatii grafice, multimedia, compilatoare, programe de sortare, compresie sunet si imagine, jocuri); unele dintre acestea au o natura puternic recursiva. Ele fac parte din suite de teste standardizate. Printre primele programe folosite în optimizarea procesoarelor de uz general se situeaza si benchmark-urile Stanford - propuse de profesorul John Hennessy în anul 1981 (numar maxim - 1 milion de instructiuni masina dinamice) si, mai nou, cele din seria SPEC (Standard Performance Evaluation Corporation, <http://www.specbench.org>) - aparute începând cu anul 1992 si variante de *upgrade* la aproximativ 3 ani (numar maxim - 2.5 miliarde de instructiuni masina dinamice). Dinamica domeniului a determinat ca simularile software actuale sa se realizeze inclusiv pe arhitecturi multithreading si multiprocesor, desigur utilizându-se benchmarkuri specifice (codari / decodari audio, video, etc). De exemplu, una din aplicatiile rulate de noul procesor comercial Intel Pentium IV o reprezinta codarea în timp real a imaginilor provenite de la o camera digitala.

Metodologia de simulare poate fi de doua tipuri:

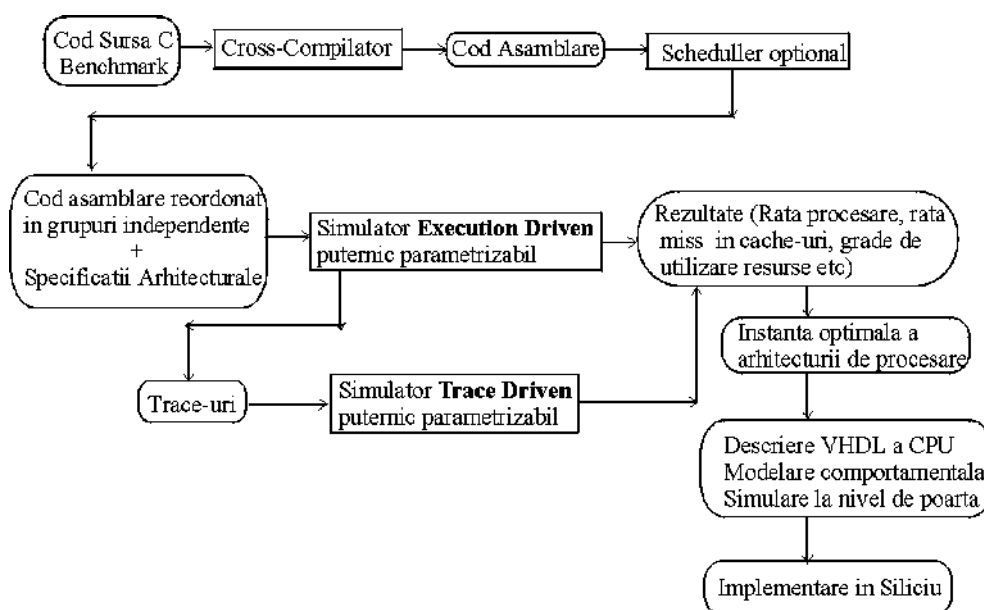
- ❖ **Execution driven simulation**, caracterizata de cunoasterea în fiecare moment (ciclu "pipe") a continutului resurselor arhitecturale (registri, locatii de memorie, unitati functionale). Asadar, în acest caz, simularea se face foarte detaliat, la nivel de ciclu de executie al procesorului. Ca iesiri din acest simulator, rezulta diverse informatii utile precum: continutul resurselor, gradul de încărcare al acestora, rate de procesare, de hit etc. De asemenea, un simulator de acest tip poate sa genereze în final toate instructiunile masina ale programelor de test în ordinea în care se executa si sa le scrie în fisiere în locatii contigue într-un format gen: *Cod\_operatie*, *Adr\_curenta* si *Adr\_destinatie*. Aceste fisiere rezultat se numesc trace-uri si pot fi deosebit de utile dupa cum se va arata în continuare. Adresa curenta reprezinta valoarea registrului Program Counter (al instructiunii curente) iar adresa destinatie reprezinta adresa de memorie a datei accesate, în cazul instructiunilor cu referire la memorie, sau adresa destinatie a saltului, în cazul instructiunilor de ramificatie. În general, fisierele trace contin doar instructiuni de tip: *branch*, *load* si *store* întrucât acestea sunt singurele care creeaza un impact asupra fluxului de control (*branch*) respectiv de date (*load* / *store*)



al programului. Instrucțiunile aritmetico-logice, relationale, de deplasare și rotire nu apar, în general, în aceste trace-uri.

- ❖ **Trace driven simulation**, metodologie asupra careia vom insista mai mult în actualul capitol, analizează secvențial toate instrucțiunile din trace-urile generate de simulatorul bazat pe execution driven, cu scopul de a determina instanța optimă a arhitecturii numită procesor, ce urmează a fi implementată în hardware. Această metodologie se pretează la simularea cache-urilor de date și instrucțiuni, mecanismelor de memorie virtuală etc., datorită faptului că oferă pattern-uri reale de adrese, în urma execuției unor programe reprezentative.

Etapile de simulare, comparare și determinare efectivă ale unei arhitecturi optime, pornind de la sursa HLL (High Level Languages) a programelor de test și până la implementarea hardware a arhitecturii determinate sunt evidențiate în figura următoare.



**Figura 7.1.** Etapele de simulare și determinare ale unei arhitecturi

Codul original sursă (în limbajul C aici) al benchmarkului este trecut întâi printr-un **cross-compiler** (de exemplu generatorul de cod obiect “gnuCC” sub Unix) care produce formatul corect al codului în mnemonica de asamblare, precum și directive de asamblare, comenzi de alocare a memoriei etc. Opțional, codul rezultat în acest punct poate fi “*rearanjat*” prin intermediul unui **scheduler**, care împachetează instrucțiunile în grupuri de instrucțiuni independente. Codul obiect rezultat este trecut printr-un

**simulator execution driven** puternic parametrizabil (vezi paragrafele anterioare), care produce la iesire un fisier trace de instructiuni. Acesta reprezinta, asa cum am mai aratat, totalitatea instantelor dinamice, aferente instructiunilor statice (codul masina al benchmark-urilor în mnemonica de asamblare) scrise în ordinea executiei lor. În final, aceste trace-uri constituie intrari pentru **simulatorul trace driven**, de asemenea parametrizabil, care genereaza parametrii completi aferenti procesarii, pentru determinarea optimului de performanta în anumite conditii de intrare.

Capitolul de fata își propune sa fie un ghid software util sau / si deosebit de necesar tuturor acelora care doresc sau trebuie sa realizeze un simulator (masina virtuala) - util în evaluarea si optimizarea performantelor unei arhitecturi paralele de calcul - si nu stiu cum si cu ce anume sa înceapa. Este de dorit a nu se înțelege ca varianta de simulator prezentata este singura solutie posibila de implementare, sau singurul mod de realizare al unui simulator software. Implementarea simulatorului în mediul Developer Studio<sup>1</sup> din Visual C++ s-a facut în primul rând datorita afinitatii si încrederii autorilor în acest mediu dar si bazat pe faptul ca limbajul C++ ofera un suport puternic pentru programarea orientata pe obiecte: mosteniri multiple, redefinirea operatorilor, functii si clase prieten etc. Conceptele de mostenire si polimorfism creeaza premisele dezvoltarii ulterioare (extinderii) a variantei actuale de simulator. De asemenea, implementarea trebuie realizata în asa maniera încât, orice modificare (adaugare) în hardware sau software sa fie facuta cu minim de efort. Privind din punctul de vedere al utilizatorului se considera imperios necesara o interfata vizuala prietenoasa, bazata pe meniuri, ferestre de dialog, imagini grafice edificatoare etc.

## 7.2. PRINCIPIILE IMPLEMENTARII SOFTWARE

Implementarea simulatorului s-a facut în limbajul Visual C++ 6.0, ultima versiune de compilator C++ existent la data scrierii codului aferent simulatorului (1999), produs de firma Microsoft pentru dezvoltarea de programe în mediul Windows. Pe lângă compilator, pachetul Visual C++ contine biblioteci, exemple si documentatia necesara pentru crearea

---

<sup>1</sup>Mediul de dezvoltare integrata Developer Studio reprezinta componenta centrala a limbajului Visual C++.

aplicatiilor în sistemele de operare Windows 9x, Windows 2000 sau Windows NT.

Mediul Developer Studio pune la dispozitia programatorului o serie de instrumente de dezvoltare, cum ar fi:

- ◆ Un editor integrat înzestrat cu tehnica “*drag and drop*” (tragere si plasare), precum si cu facilitati de evidentiare a sintaxei.
- ◆ Un editor de resurse, folosit la crearea resurselor Windows (imagini bitmap, pictograme, casete de dialog, meniuri).
- ◆ Un program integrat de depanare ce permite rularea programelor, depistarea erorilor, corectarea codului sursa, recompilarea si lansarea din nou a programului în depanare.
- ◆ Un sistem help on-line necesar în obtinerea informatiilor mai mult sau mai putin subtile (sensibile la context) pentru orice instrument folosit în mediul Developer Studio, informatii referitoare la limbajul C++, biblioteca MFC (Microsoft Foundation Class), interfata de programare Windows. Este bazat în mare masura pe exemple.

Pe lângă instrumentele de depanare, editare si creare a resurselor, mediul Developer Studio pune la dispozitia programatorului trei “*vrajitori*” utilizati la simplificarea dezvoltarii programelor Windows:

- ❖ **AppWizard** (vrajitorul aplicatiilor) – utilizat pentru crearea structurii de baza a unui program Windows.
- ❖ **ClassWizard** – folosit pentru definirea claselor într-un program creat cu AppWizard, manevrarea controalelor incluse în casete de dialog etc.
- ❖ **OLEControlWizard** – folosit la crearea cadrului de baza a unui control OLE. Un control OLE este un instrument personalizat care suporta un set definit de interfete si este folosit drept componenta reutilizabila [3].

În continuare, se prezinta etapele de realizare a unui program în Visual C++:

1. Crearea scheletului programului folosind AppWizard.
2. Crearea resurselor folosite de catre program.
3. Adaugarea claselor si functiilor de manevrare a mesajelor folosind ClassWizard.
4. Crearea nucleului functional al programului. Asupra acestei etape se va insista în paragrafele urmatoare (**referinta**), oferindu-se o prezentare detaliata.
5. Compilarea si testarea programelor, folosind programul de depanare integrat Visual C++.

### 7.2.1. INTERFATA CU UTILIZATORUL. CREAREA RESURSELOR.

Pentru început sunt furnizate detalii sumare despre resursele software folosite în cadrul programului în scopul obținerii unei interfețe vizuale prietenoase, simplu de utilizat, care să permită utilizatorului manevrarea ușoară a simulatorului, interpretarea și prelucrarea eficientă a rezultatelor (eventual transferul de rezultate în format text sau grafic spre alte utilitare de prelucrare - Microsoft Word Graph, Excel, PowerPoint, Internet etc).

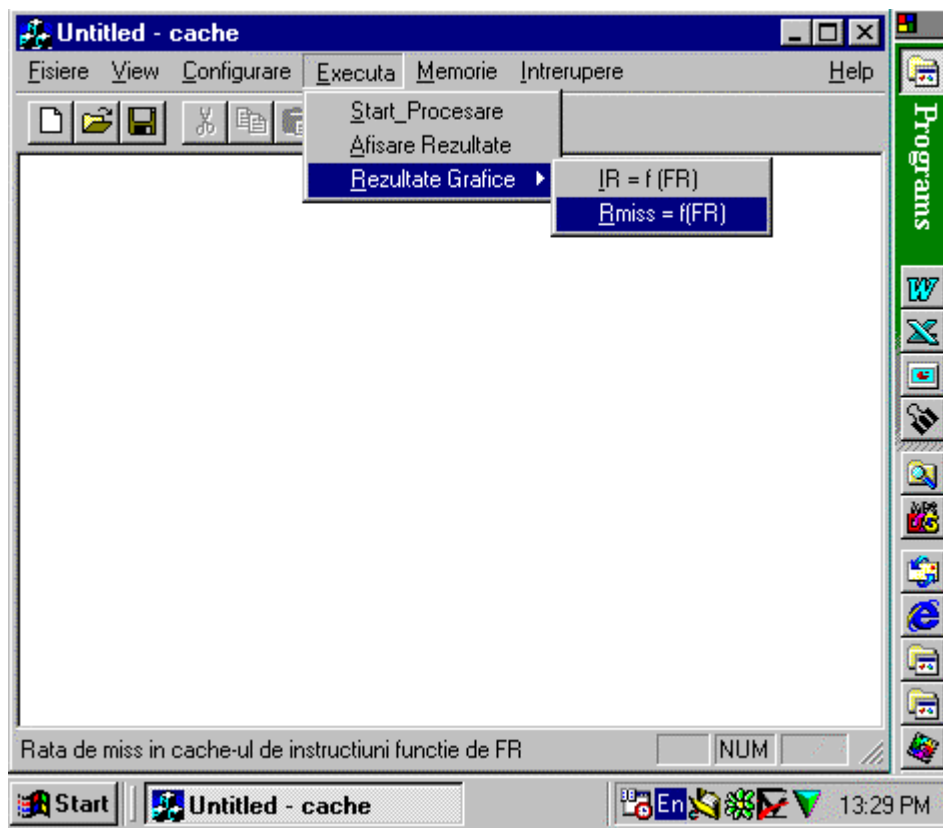
La lansarea în execuție a simulatorului (de exemplu: "cache.exe", simulatorul nostru destinat memoriilor cache integrate într-o arhitectura superscalară) pe ecranul calculatorului gazdă apare o fereastră înzestrată cu un **meniu** principal (vezi figura 7.2). Meniurile sunt o componentă esențială a majorității programelor Windows, cu excepția unor aplicații simple, orientate pe casete de dialog, toate programele Windows oferind un tip de meniu sau altul. Aplicația creată (simulatorul) este bazată pe meniuri simple, imbricate sau derulante flotante în funcție de operațiile executate de / asupra elementelor arhitecturii specificate. Un meniu este o listă de mesaje de comandă care pot fi selectate și transmise unei ferestre. Pentru utilizator, un articol de meniu este un sir de caractere indicând o operație care poate fi executată de către aplicație. Fiecare articol de meniu are un identificator utilizat pentru identificarea articolului, la direcționarea mesajelor de fereastră sau modificarea atributelor respectivului articol de meniu.

O cerință impusă interfeței cu utilizatorul o reprezintă *mnemonica* (litera subliniată), care trebuie să apară în fiecare articol de meniu și la apăsarea căreia să se selecteze articolul de meniu corespunzător. Împreună cu tastele fierbinti (*hot keys*) – Ctrl + literă; Alt + literă; etc. – mnemonicile își dovedesc utilitatea atunci când sistemul de calcul dispune doar de tastatură nu și de mouse.

Meniurile pot fi create dinamic sau ca resurse statice care se adaugă programului. Tratarea meniurilor este simplificată folosind clasa **CMenu** aparținând bibliotecii de clase MFC. Pentru fiecare aplicație creată AppWizard generează o resursă de meniu, ce poate fi modificată în vederea ștergerii sau inserării de articole de meniu suplimentare la respectiva aplicație.

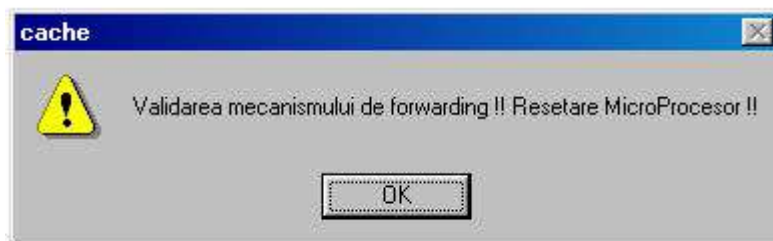
O structură de meniu într-o fază primară de dezvoltare a simulatorului ar trebui să conțină opțiunile: **Fisiere**, **Configurare**, **Executa**, **Memorie**, **Întrerupere**, **Ajutor**. Submeniul File cuprinde opțiuni privind *Selectia și deschiderea unui program de test (Open Traces)*, *Resetarea configurației arhitecturale (Reset All)*, *Resetarea (închiderea) programului de test activ*

(**Anuleaza Benchmark**) - atâră a fisierului cod masina cât și a trace-ului, *Închiderea simulatorului* și revenirea în sistemul de operare (**Exit**). Submeniul Configurare permite în primul rând *Stabilirea principalilor parametri ai arhitecturii* (mai puțin date despre cache-uri) - rata de fetch a instructiunilor, rata maxima de lansare în executie - *issue*, dimensiune buffer de prefetch, tipul și numărul unitatilor functionale de executie etc - (**Unitati Executie**), *Activarea sau dezactivarea mecanismului de forwarding* (**Forwarding**), *Încarcarea* (**Load\_Config**) respectiv *Salvarea* (**Store\_Config**) unei configuratii arhitecturale prestabilite. Aceste facilitati permit trecerea rapida de la un model minimal la unul maximal din punct de vedere arhitectural, fara a altera parametrii cum ar fi latentele instructiunilor, latentele cache-urilor etc. Submeniul Executa trebuie sa cuprinda optiuni de *Lansare în executie* (**Start\_Procesare**) - în mod continuu, respectiv pas cu pas, *posibilitatea de a vizualiza rezultatele* - în mod text (**Afisare Rezultate**) și respectiv în mod grafic (**Rezultate Grafice**) - în functie de simularea efectuata ( $IR = f(FR)$ ). Optiunea de executie *Pas cu Pas* (Trace) permite examinarea starii interne a majoritatii elementelor componente ale arhitecturii de procesare (bufferul de prefetch, setul de registri generali, unitati functionale de executie). Alegând optiunea Memorie utilizatorul va trebui sa selecteze tipul cache-ului asupra carora se vor face modificari (**Instr\_Cache**) respectiv (**Data\_Cache**). Pe oricare dintre ramurile selectate utilizatorul va putea specifica arhitectura cache-ului (mapat direct, gradul de asociativitate), dimensiunea cache-urilor, dimensiunea blocului din cache-ul de date, penalitatea în caz de miss în cache, tipul de scriere (write back / write through), utilizarea sau nu a unui DWB (Data Write Buffer) care sa functioneze în paralel cu procesorul, preluând sarcina acestuia de a scrie în cache-ul de date (respectiv memorie în caz de miss). De asemenea, ar fi indicata prezenta unei optiuni în acest submeniu care sa permita vizualizarea, permanenta sau la anumite momente de întrerupere a executiei benchmark-ului, a datelor respectiv instructiunilor din cache. Submeniul Întrerupere permite *Stabilirea* (**Set**) și *Stergerea partiala* (**Reset**) sau *totala* (**Reset All**) a punctelor de întrerupere la executia fisierelor de test. Optiunea Ajutor trebuie sa contina explicatii și referinte detaliate despre arhitectura și functionarea simulatorului, resursele hardware și software utilizate, optiunile de meniu, facilitatile oferite de simulator, rezultatele generate.



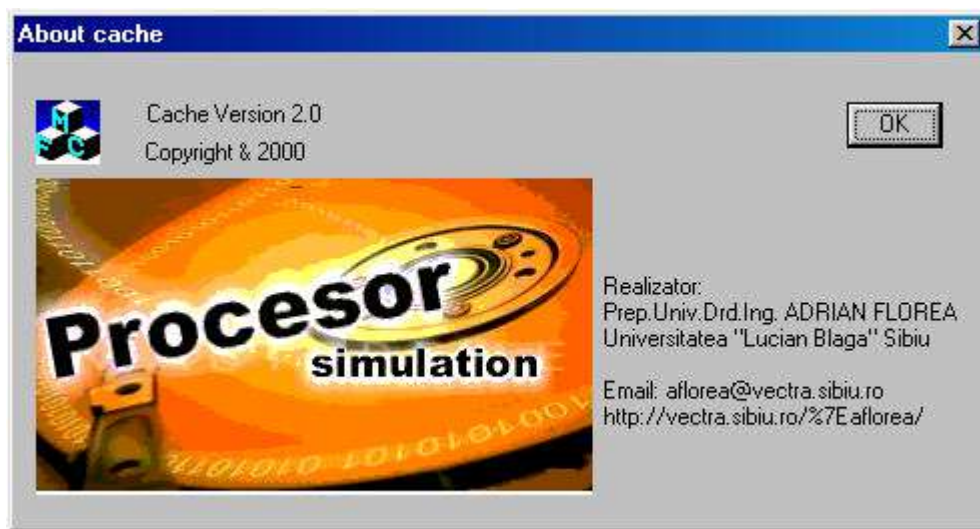
**Figura 7.2.** Meniul principal al simulatorului

O alta resursa software, frecvent utilizata la implementarea simulatorului o constituie **casetele de dialog**. Acestea reprezinta de fapt un tip specializat de ferestre. Deoarece sunt folosite cu precadere perioade scurte de timp, sunt de obicei stocate ca resurse de program si se încarca numai atunci când sunt necesare. Resursele program sunt memorate într-un fisier **.exe** - pe harddisc, dar se încarca numai când sunt efectiv necesare. Casetele de dialog sunt utilizate pentru a prezenta informatii si pentru a colecta date de intrare de la utilizator. Pot avea orice marime, variind de la casete simple de mesaj, care afiseaza o singura linie de text (Ex: "*Simularea s-a încheiat!*", "*Activare mecanism de forwarding. Simulatorul va fi resetat!*") - vezi figura 7.3, pâna la casete de dialog de mari dimensiuni, care contin controale sofisticate: de editare, de tip buton, de tip caseta lista sau caseta combinata, de desfasurare, de tip vizualizare lista, OLE - grila, grafic. În mod normal, casetele de dialog se folosesc pentru a concentra informatie si pentru a asigura reactia utilizatorului unui program.



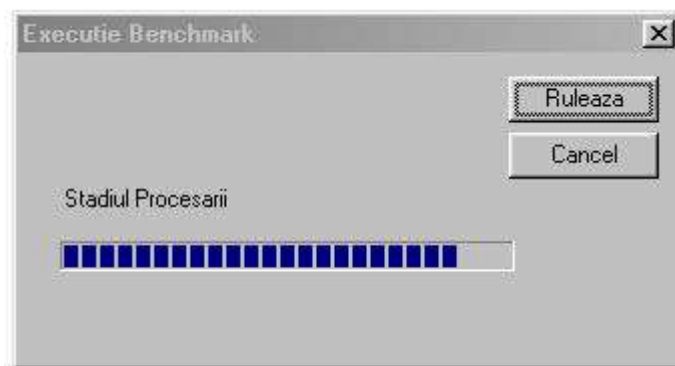
**Figura 7.3.** Caseta de dialog simpla

Tipul de caseta de dialog cel mai des folosit este *caseta de dialog modala* (caseta trebuie închisa înainte ca utilizatorul sa poata efectua o alta operatie), care contine de obicei mai multe controale utilizate pentru interactiunea cu un program. O caseta de dialog fara mod permite efectuarea altor operatii în timp ce caseta este deschisa (Ex: *Find and Replace* - utilizata de Developer Studio). Casetele de dialog se mai folosesc pentru comunicatia uni-sens cu utilizatorul ("ecranele de prezentare" utilizate la lansarea unui program pentru afisarea de informatii legate de copyright sau de pornire - vezi figura 7.4).



**Figura 7.4.** Comunicatie unisens prin casete de dialog

Casetele de dialog se mai folosesc pentru a înstiinta utilizatorul în privinta progresului unei operatiuni de durata (vezi figura 7.5). Situatia de mai jos prezinta stadiul procesarii benchmark-ului selectat dupa configurarea arhitecturii.



**Figura 7.5.** Caseta de dialog - *Executie Benchmark* - cuprinzând un control de desfasurare

Developer Studio faciliteaza utilizarea casetelor de dialog dintr-un program Windows. Toate etapele necesare procesului sunt automatizate, iar instrumentele utilizate pentru crearea casetelor de dialog si introducerea acestora într-un proiect sunt toate integrate. Developer Studio permite crearea si configurarea pe cale vizuala a unei casete de dialog. Controalele pot fi adaugate si dimensionate prin intermediul mouse-ului. Atributele casetei de dialog si a controalelor acesteia pot fi stabilite executând un simplu click de mouse. În general, adaugarea unei casete de dialog într-un program implica patru etape:

1. Proiectarea si crearea unei resurse caseta de dialog folosind instrumentele din Developer Studio.
2. Utilizarea facilitatii ClassWizard pentru a crea o clasa C++ derivata din **CDialog** care sa gestioneze caseta de dialog.
3. Adaugarea functiilor care sa trateze mesajele transmise casetei de dialog, daca este necesar.
4. În situatia în care caseta de dialog este selectata din meniul principal, resursa de meniu trebuie sa fie modificata, iar functiile de tratare a mesajelor create folosind ClassWizard.

În continuare se descriu câteva din cele mai utilizate casete de dialog în cadrul simulatorului. Efectuând una din urmatoarele 3 operatii: click pe pictograma Open (dosarul deschis) din bara de instrumente, apasând combinatia de taste Ctrl+O sau selectând Open Traces din meniul Fisiere, pe ecranul calculatorului apare o fereastră (casetă de dialog **Open**) care va facilita selectia si deschiderea unui program de test. Diferenta dintre aceasta caseta de dialog si cea care apare la selectia optiunii Open a meniului File din Windows (NT) Explorer este ca fisierul selectat nu va fi deschis în mod editare ci va fi deschis în background în vederea simularii. De asemenea, la



selectia unui fisier trace (\*.trc, în cazul nostru) va fi deschis automat si corespondentul fisier în format cod masina (\*.ins, la noi) în acelasi mod - pentru simulare (daca exista în respectivul director, în caz contrar se va afisa un mesaj pentru înstiintarea utilizatorului; simularea necesita ambele fisiere pentru a putea starta). Caseta de dialog Open contine un control tip vizualizare lista care permite vizualizarea fisierelor în diverse formate (raport, pictograma mica/mare, lista) din directorul selectat. De asemenea, un control de tip caseta lista specifica tipul fisierelor ce vor fi vizibile prin controlul vizualizare lista. Un control de editare permite introducerea de la tastatura (sau selectia prin dublu-click de mouse) a fisierului de test dorit. Butonul Open valideaza (realizeaza deschiderea efectiva a fisierului selectat) iar butonul Cancel anuleaza toate activitatile anterioare.

La selectia optiunii Unitati Executie din meniul Executa este lansata fereastra principala de configurare a parametrilor arhitecturii (rata de fetch, rata de issue, dimensiune buffer prefetch, etc). Caseta de dialog **Unitati Executie** cuprinde un numar mare de controale editare unilinie pentru colectarea datelor de intrare de la utilizator. La apasarea butonului OK, valorile aflate în controalele de editare sunt înscrise în variabilele de program (parametrii arhitecturii superscalare). În situatia în care nu au fost introdusi toti parametri, încercarea de startare a executiei instructiunilor (optiunea Start Procesare a meniului Executa) va fi zadarnica (pe ecran va apare o caseta de dialog de tip uni-sens cu mesajul "*Parametrii incompleti! Selectati optiunea de meniu Configurare!*"). La apasarea butonului Cancel configuratia arhitecturala este resetata, parametrii ramânând cu vechile valori, anterior stabilite sau nule.

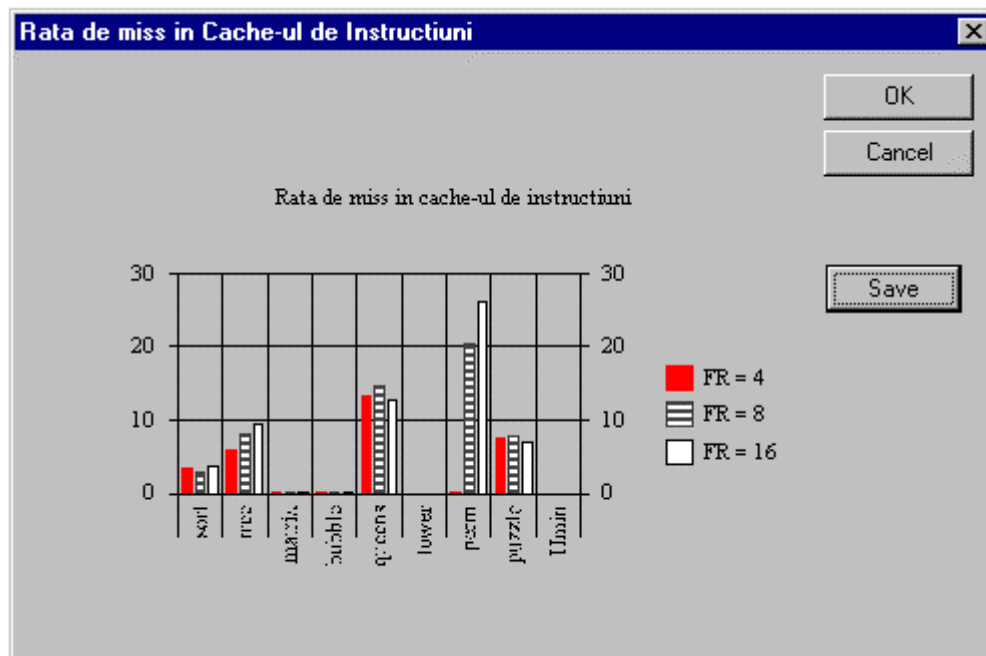
O alta caseta de dialog utilizata - **Afisare Rezultate** ) - (selectie Afisare Rezultate din meniul Executa) care prezinta prin intermediul controalelor de editare cele mai importante rezultate (rata de procesare, rate de miss în cache-uri, speed-up-ul obtinut prin implementarea diverselor tehnici - reutilizare dinamica a instructiunilor si predictia valorilor, rate de utilizare a cache-urilor, numar de instructiuni procesate, procentajul hazardurilor RAW din timpul total de executie etc).

O ultima caseta de dialog implementata si mai importanta (în viziunea autorilor) ilustreaza rezultatele obtinute (anterior amintite) sub forma grafica - **Rata de miss în Cache-ul de Instructiuni** - selectie Executa / Rezultate Grafice / Rmiss=f(FR) (vezi figura 7.6). Principala componenta a acestei casete de dialog o constituie controlul de tip ActiveX (element de interfata cu utilizatorul realizat în tehnologie ActiveX) cu ajutorul caruia reprezentam sub forma grafica rezultatele calculate în urma simularii - fara a fi necesar sa apelam la alte medii gen Microsoft Excel, MSWord Graph, MSAccess. ActiveX reprezinta o colectie de tehnologii si metode care permit resurselor

software sa interactioneze între ele, fara a cunoaste limbajul în care ele au fost create (utilizarea obiectelor de sine statatoare, gata create în cadrul altor resurse). ActiveX™ se bazeaza pe modelul obiectual al componentelor (COM). COM permite obiectelor sa fie functionale în cadrul altor componente sau al aplicatiilor gazda. Rezultatele si alti parametrii invarianti de intrare sunt transmisi ca intrari diverselor metode ale obiectului atasat controlului ActiveX. Cu ajutorul functiilor membre, respectivul obiect permite transformarea din valori numerice în coloane verticale ale unei harti grafice, sunt afisate limitele superioare ale respectivelor rezultate prin *grid-uri*. Fiecare coloana de rezultate este, în cazul concret al simulatorului nostru, aferenta unui benchmark, ultima coloana reprezentând-o media aritmetica sau armonica dupa caz. Suplimentar, la apasarea butonului Save este creat un fisier text (*rez.txt*) care contine rezultatele simulate pâna în momentul respectiv în urmatorul format.

	sort	tree	matrix	bubble	queens	tower	perm	puzzle	Hmin
<b>FR=4</b>	3.4333	6.0045	0.0506	0.0454	13.2642	0.0000	0.0267	7.6752	0.0000
<b>FR=8</b>	2.8733	8.1122	0.0572	0.0346	14.7214	0.0000	20.3828	7.7634	0.0000
<b>FR=16</b>	3.8167	9.3909	0.0630	0.0345	12.6638	0.0000	26.1302	6.9828	0.0000

Coloanele marcate cu 0.0000 sugereaza faptul ca respectivul benchmark nu a fost simulat si implicit nu a fost calculata media performantelor. La apasarea butoanelor OK respectiv Cancel este închisa caseta de dialog - rezultatele ramânând memorate în structurile software utilizate. Resetarea grafica a obiectului ActiveX se va face la selectia optiunii de meniu Reset All din Fisiere (când are loc de fapt si resetarea configuratiei arhitecturale si a programului de test).



**Figura 7.6.** Afisarea rezultatelor sub forma grafica folosind controale ActiveX din Developer Studio

În continuare sunt enumerate si descrise sumar o parte din controalele utilizate în casetele de dialog anterior prezentate.

- Controalele de tip **buton** sunt poate cele mai flexibile tipuri de controale disponibile în Windows. Un buton este o fereastră de tip special care contine un text sau o eticheta bitmap si este localizata într-o caseta de dialog, bara de instrumente etc. Windows pune la dispozitie cinci tipuri de butoane, cele mai des utilizate fiind butoanele de apasare. Acestea prezinta un aspect în relief, tridimensional, care par apasate atunci când se executa clic cu mouse-ul asupra lor. Aproape fiecare caseta de dialog contine cel puțin un control tip buton de apasare, folosit pentru a indica acele actiuni care pot fi comandate de utilizator. Între utilizarile cele mai comune ale unui buton de apasare se numara închiderea unei casete de dialog, începerea unei cautari sau solicitarea de asistenta. Reprezentarea majoritatii controalelor de tip buton se face cu ajutorul clasei **CButon**. Aproape toate controalele sunt activate în mod prestabilit, desi pot fi dezactivate initial prin setarea atributului corespunzator în lista de proprietati.
- În programele Windows colectarea datelor de intrare de la utilizator si afisarea textului si a datelor dinspre sau catre utilizator se realizeaza prin intermediul controalelor de **editare** (ferestre folosite pentru intrari de tip

text). Acestea pot fi de tip *unilinie* sau *multilinie* si sunt localizate în principal în casete de dialog dar si în orice alt context în care se doreste preluare sau afisare de date. Controalele de editare multilinie folosesc adeseori bare de derulare care permit introducerea unui volum de text mai mare decât poate fi afisat la un moment dat. Una din diferentele dintre controalele de editare si controalele de tip "buton de apasare" este aceea ca un control tip buton este folosit în mod normal pentru generarea de evenimente pe când controlul de editare desi poate genera evenimente este folosit cu preponderenta pentru stocarea datelor. O modalitate de interactiune cu un control de editare este prin intermediul unui obiect **CEdit** atasat controlului respectiv, folosind facilitatea ClassWizard. În mod prestabilit, un control de editare este gol când este afisat pentru prima data. Totusi, controalele de editare sunt adeseori folosite pentru afisarea informatiilor curente pentru utilizator, informatii care pot fi acceptate sau modificate. Altfel spus, un control de editare se poate folosi pentru a adresa o invitatie utilizatorului prin afisarea unei intrari prestabilite.

- **Caseta lista** este utilizata pentru a permite utilizatorului sa aleaga dintre un numar mare de optiuni. O caseta lista apare în mod normal într-o caseta de dialog, bara de controale etc. Este folosita pentru a include o lista de articole care pot fi selectate. Utilizatorul poate selecta articolele folosind tastatura sau executând clic pe un articol cu mouse-ul. Casetele lista pot fi cu *selectie simpla* (un singur articol selectat la un moment dat), sau cu *selectie multipla* (mai multe articole selectate la un moment dat). În mod prestabilit, casetele lista sunt cu selectie simpla. Selectia multipla poate fi utilizata în situatia în care se doreste simularea pe mai multe benchmark-uri la un moment dat (secvential sau în paralel - multithreading). Daca anumite articole nu pot fi afisate din motive de spatiu, casetele lista sunt prevazute cu o bara de derulare, pentru a facilita utilizatorului navigarea prin lista de articole. Lista de articole aferenta casetei lista este sortata (proprietate a listei ce poate fi exercitata de controlul, la fiecare inserare a unui articol, fara nici o interventie din partea programatorului). Casetele lista reprezinta cele mai simple controale care permit afisarea catre utilizator a unui numar arbitrar de articole. Sunt folosite adeseori pentru afisarea unor informatii extrase din baze de date sau rapoarte. Sortarea casetei lista înlesneste procesul de cautare si selectie al utilizatorului într-un numar foarte mare de articole. Clasa MFC **CListBox** poate fi folosita pentru gestiunea si interactionarea cu controlul tip caseta lista.
- Controalele de **desfasurare** sunt folosite pe scara larga pentru a indica evolutia unei operatii si se completeaza de la stânga la dreapta, pe masura

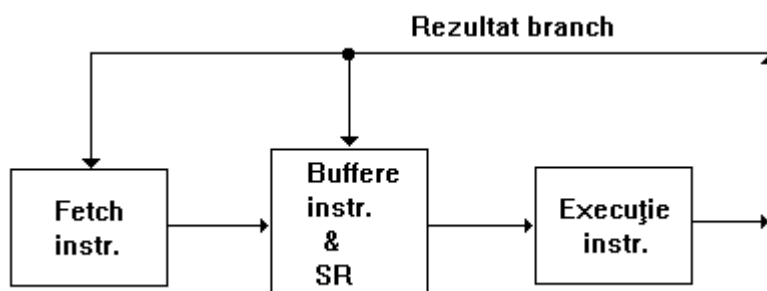
ce operatia se apropie de sfârșit. În Developer Studio sunt folosite pentru a indica desfasurarea unui proces de salvare sau încărcare a spatiului de lucru al unui proiect. Windows(NT) Explorer foloseste aceste controale la copierea sau mutarea fisierelor. Controalele de desfasurare constituie o modalitate utila de informare a utilizatorului despre stadiul unei operatii. În loc de a astepta o perioada nedefinita de timp, utilizatorul poate vedea ce fractiune din operatie mai trebuie finalizata. Gestiunea si interactionarea cu un control de desfasurare este realizata cu ajutorul clasei **CProgress**.

- Controalele tip **vizualizare lista** sunt controale extrem de flexibile, introduse pentru prima data de catre Windows '95. Sunt utilizate pentru afisarea de informatii însoțite de pictograme asociate în patru formate diferite: raport, pictograma mica/mare, lista. La utilizarea unui control tip vizualizare lista, se poate folosi un meniu sau o alta metoda (bara de instrumente) pentru comutarea între diversele moduri de vizualizare. Atunci când permite utilizatorului comutarea între diversele stiluri de vizualizare, controlul tip vizualizare lista preda utilizatorului raspunderea cu privire la modul de afisare a informatiei. Controalele tip vizualizare lista accepta operatii de tragere si plasare, asemanator controalelor arborescente. Clasa MFC **CListCtrl** faciliteaza interactionarea cu controalele tip vizualizare lista si este asociata cu un control de acest tip folosind ClassWizard.

### 7.2.2. INTERFATA CU UTILIZATORUL. NUCLEUL FUNCTIONAL AL PROGRAMULUI.

În acest paragraf se va prezenta succint structura hardware a simulatorului dezvoltat special cu scopul de a furniza rezultate semnificative relative la performanta si structura optimala a memoriilor cache cu mapare directa, integrate într-o arhitectura superscalara parametrizabila. Trebuie retinut faptul ca structura simulatorului poate diferi de la o implementare la alta, în functie de ceea ce se urmareste (în situatia de fata obiectivul programarii îl reprezinta simularea interfetei procesor-cache pentru o arhitectura RISC superscalara parametrizabila, determinarea parametrilor optimali); cu toate acestea se va prezenta o microarhitectura generica de procesor care poate fi "îmbogățita" (extinsa) prin atasarea diverselor concepte sau tehnici de îmbunătățire a performantei, în functie de scopul urmarit.

Arhitecturile cu execuție multiplă a instrucțiunilor sunt compuse din două mecanisme decuplate: mecanismul de aducere a instrucțiunilor (**fetch**) pe post de producator (activitate ce se desfășoară în ciclul **IF** – fetch instrucțiune – al procesării pipeline) și respectiv mecanismul de execuție a instrucțiunilor (**issue**) pe post de consumator (activitate ce se poate derula pe parcursul fazelor: execuție / accesare memorie / scriere rezultat – funcție de tipul instrucțiunii). Separarea între cele două mecanisme (*arhitectura decuplata*) se face prin buffer-ele de instrucțiuni și stațiile de rezervare (vezi figura 7.7). Instrucțiunile de ramificație și predictoarele hardware aferente acționează printr-un mecanism de reacție între consumator și producator. Astfel, în cazul unei predicții eronate, bufferul de prefetch trebuie să fie golit macar parțial iar adresa de acces la cache-ul de instrucțiuni trebuie să fie modificată în concordanță cu adresa la care se face saltul.



**Figura 7.7.** Arhitectura Superscalara Decuplata

Programul simulator dezvoltat, va procesa **trace-uri HSA** (Hatfield Superscalar Architecture) obținute dintr-un simulator de tip *execution-driven*, special conceput la Universitatea din Hertfordshire, U.K. [1]. Acest simulator însă, nu abordează problema cache-urilor. Se vor determina într-un mod original, parametri optimi de proiectare pentru acest tip de arhitectura cache. Simulatorul are în vedere atât cache-urile cu mapare directă mai pretabile în a fi integrate într-un microprocesor [4, 5] cât și cele având diferite grade de asociativitate, mai ales ca implementarea acestora pe scară largă în viitorul apropiat pare o certitudine.

Principalii parametri ai arhitecturii, aleși în concordanță cu nivelul tehnologic al ultimelor implementări, sunt următorii:

- ❑ **FR (rata de fetch)** - definește mărimea blocului accesat din cache-ul de instrucțiuni, mai precis numărul de instrucțiuni citite simultan din cache sau memorie (în caz de miss în cache) într-un ciclu de tact; poate lua valori de 4, 8 sau 16 instrucțiuni.

- ❑ **IBS (instruction buffer size)** - dimensiunea buffer-ului de prefetch, masurata în număr de instrucțiuni; plaja de valori: 4 (minim FR, altfel, nici o instrucțiune nu va putea fi plasată cu succes în buffer), 8, 16, 32,  $\leq$  capacitatea cache-ului de instrucțiuni; buffer-ul de prefetch este o coadă ce lucrează după principiul FIFO (first in first out). Vor fi citite FR instrucțiuni simultan de la adresa specificată de PC (program counter) și depuse în partea superioară a buffer-ului. În același ciclu de execuție, instrucțiuni din partea inferioară sunt expediate spre unitățile de decodificare și execuție. O intrare în buffer va conține câmpurile:

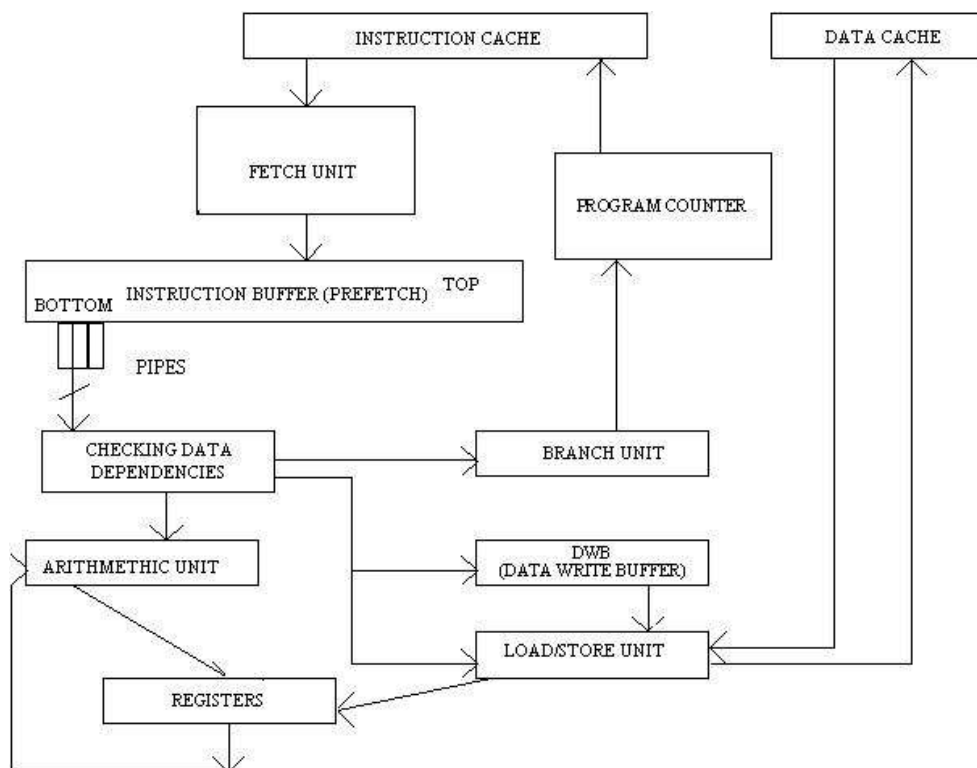
  - OPCODE - codul operației executate de instrucțiunea respectivă;
  - PC<sub>crt</sub> - adresa (Program Counter-ul) instrucțiunii curente;
  - DATE / INSTR - adresa din / la care se citesc / se scriu date din sau în memorie, în cazul instrucțiunilor cu referire la memorie, respectiv adresa instrucțiunii țintă în cazul instrucțiunilor de salt.
- ❑ **capacitatea memoriilor cache** care variază între 64 cuvinte și 16 Kcuvinte. Aceste capacități relativ mici ale memoriilor cache se datorează particularităților benchmark-urilor Stanford utilizate. Acestea folosesc o zonă restrânsă de instrucțiuni, limitată la cca. 2 Ko și o zonă de date mai mare dar mai "rarefiată", care se întinde pe un spațiu de cca 24 Ko.
- ❑ **IRmax (issue rate maxim)** - numărul maxim de instrucțiuni, lansate în execuție simultan într-un ciclu de execuție, din buffer-ul de prefetch. Poate lua valorile: 2, 4, 8, 16 (maxim FR) instrucțiuni. Dacă rata de fetch este mai mică decât numărul maxim de instrucțiuni executate concurent într-un ciclu, atunci performanța este limitată de procesul de *fetch instrucțiune*. Simulatorul implementat consideră execuția instrucțiunilor "*in order*" - ordinea inițială a instrucțiunilor. O instrucțiune va fi executată abia după ce toate celelalte instrucțiuni anterioare, de care ea depinde au fost executate.
- ❑ **Strategia de scriere în cache** : *write back* sau *write through*. Cu *write through*, informația este scrisă atât în blocul din cache cât și în blocul din memoria principală. Prin *write back* informația este scrisă doar în blocul din cache. *Write back* implică evacuare efectivă a blocului - cu penalitățile de rigoare - în memoria principală. Rezultă că este necesar un bit *Dirty* asociat fiecărui bloc din cache-ul de date. Starea acestui bit indică dacă blocul este *Dirty* (modificat cât timp a stat în cache), sau *Clean* (nemodificat). Dacă bitul este "curat", blocul nu este scris la miss,

deoarece nivelul inferior – memoria principala - contine copia fidela a informatiei din cache. Daca avem citire din cache cu miss si Dirty setat pe '1' atunci vom avea o penalizare egala în timp cu timpul necesar evacuării blocului - existent în cache dar nu cel solicitat - la care se adauga timpul necesar încărcării din memorie în cache a blocului necesar în continuare. La write through nu exista evacuare de bloc la cache-urile mapate direct, dar exista penalitati la fiecare scriere în memorie în lipsa unui procesor specializat de iesire (Data Write Buffer). Write through are de asemenea avantajul ca, urmatorul nivel inferior are majoritatea copiilor curente ale datei. Acest lucru e important pentru sistemele de intrare / iesire (I/O) si pentru multiprocesoare în vederea pastrării coerentei variabilelor stocate în cache. Dispozitivele I/O si multiprocesoarele sunt schimbatoare: ele vor sa foloseasca write back pentru cache-ul procesorului si pentru a reduce traficul memoriei si vor sa foloseasca write through pentru a pastra cache-ul consistent cu nivelul inferior al ierarhiei de memorie. Oricare din cele doua strategii de scriere pot fi asociate cu cele de mentinere a coerentei cache-urilor în cadrul sistemelor multiprocesor, anume strategia "*write invalidate*", respectiv "*write broadcast*" (pentru detalii vezi paragraful 8.5.2).

- **Utilizare / neutilizare DWB (data write buffer)** - o coada FIFO de lungime parametrizabila, a carei valoare trebuie sa fie minim IRmax. Fiecare locatie contine adresa de memorie (virtuala) si data de scris. Consideram ca DWB contine suficiente porturi de scriere pentru a sustine cea mai defavorabila situatie (STORE-uri multe, independente si simultane în fereastra IRmax fiind deci posibile), oferind deci porturi de scriere virtuale multiple. În schimb D-Cache va contine un singur port de citire (LOAD) si un singur port de scriere (STORE), reflectând o situatie cât mai reala. Consideram latentă de scriere a datelor în DWB de 1 tact iar latentă de scriere a datelor în D-Cache este de 2-3 tacte (parametrizabila). Cu DWB sunt posibile deci STORE-uri simultane, fara el acestea trebuind serializate cu penalitatile de rigoare. În plus DWB va putea rezolva prin "bypassing" foarte elegant hazarduri de tip "LOAD after STORE" cu adrese identice, nemaifiind deci necesara accesarea sistemului de memorie de catre instructiunea LOAD.

Structura de principiu a arhitecturii superscalare tip Harvard (detine busuri si cache-uri separate pe spatiile de instructiuni si date) care a fost simulata este cea din figura (figura 7.8).





**Figura 7.8.** Schema bloc de principiu a arhitecturii superscalare Harvard simulată

Un cuvânt din memoria cache va conține două câmpuri: un câmp de tag și un bit de validare V. Câmpul de tag conține blocul din memoria principală actualizat în cuvântul din cache de la indexul curent, iar bitul V validează informația din cache în sensul în care, inițial, fiecare cuvânt din cache va fi considerat invalid până la prima actualizare a sa din memoria principală. Memoria principală se accesează numai la miss în cache și va avea latente parametrizabile cuprinse între 10-20 tacti procesor (realist la nivelul performanțelor tehnologiilor actuale). La miss în cache, trebuie deci introduse penalizări corespunzătoare în numărul tactilor de execuție (în conformitate cu tehnica de scriere aplicată - *write back* sau *write through*). În cazul acceselor la spațiul de date, se introduc penalizări numai pentru instrucțiunile LOAD, în cazul instrucțiunilor STORE nemaifiind nevoie datorită procesorului de ieșire specializat (DWB-Data Write Buffer) considerat pe moment idealizat și a bufferelor aferente. Asadar într-o primă fază a cercetării scrierea s-a idealizat doar din motive legate de claritatea expunerii, oricum îngreunată de multitudinea caracteristicilor arhitecturale considerate. S-a considerat în mod realist ca este posibilă execuția simultană

a oricaror doua instructiuni cu referire la memorie cu restrictia ca adresele lor de acces sa fie diferite (cache biport pe date). Având în vedere ca se lucreaza pe trace-uri, aceasta analiza antialias perfecta este evident posibila. Întrucât simularea se face pe baza trace-urilor HSA ale benchmark-urilor Stanford, s-a presupus o predictie perfecta a branch-urilor în cadrul simulării. Simulatorul realizat trebuie sa elimine gâtuirile care limiteaza performanta si sa investigheze posibile schimbari (arhitecturale sau tehnici de optimizare) în scopul cresterii acesteia. Prin realizarea unui model de simulare detaliat pentru fiecare procesor, performanta obtinuta prin simulare este capabila sa asigure un rapid *feedback* în legatura cu schimbarile propuse.

Întrucât simularile autorilor s-au efectuat pe benchmark-urile Stanford vom descrie mai pe larg etapele de simulare, comparare si determinare efectiva ale unei arhitecturi optime, pornind de la sursa C a programelor de test si pâna la implementarea hardware a arhitecturii determinate. Cele 8 benchmarkuri Stanford scrise în C, au fost compilate special pentru arhitectura HSA utilizând compilatorul Gnu CC (sub Linux), rezultând programele obiect HSA. Acestea se întind pe un spatiu de cod mai mic de 600 instructiuni HSA iar spatiul de date utilizat nu depaseste 24 ko. Programele obiect HSA la rândul lor, au fost procesate cu un simulator special [1], care a generat trace-urile aferente (toate instructiunile masina în ordinea rularii lor, împreuna cu adresele acestora). Aceste trace-uri HSA sunt disponibile din simulatorul HSA [1] sub o forma speciala din motive de economie de spatiu pe disc (întemeiate la momentul realizării simulatorului execution-driven în 1995) si ele contin practic doar instructiunile de LOAD (L), STORE (S) si BRANCH (B-numai cele care au provocat într-adevar salt), în ordinea procesării lor în cadrul programului respectiv, fiecare cu PC-ul sau si cu adresa efectiva corespunzatoare (de salt - B sau de acces la data - L/S). Chiar si în aceasta forma, un asemenea fisier trace ocupa între 2-4 Mbytes, el continând practic câteva sute de mii de instructiuni ce au fost executate (între 72.000 si 800.000 de instructiuni masina în cazul celor utilizate aici).

Spre exemplificare se prezinta primele doua linii de cod din programul de test **fsort.trc** [1].

```
B 2 151      S 152 3968   B 153 120      S 121 3840   B 122 18
S 19 3712    S 20 3720    S 21 3724    B 22 4       S 6 6328
```

Prima instructiune din trace este <B 2 151> semnificând urmatoarele: PC-ul instructiunii de salt este 2, iar adresa urmatoarei instructiuni citite si ulterior executate este 151. Întrucât programul începe cu instructiunea al

carei PC=0, si aceasta nu exista în trace, rezulta ca primele doua instructiuni din program sunt aritmetico-logice. Secventa reala de instructiuni ar fi:

A 0 xxxx      A 1 xxxx      B 2 151.

Urmatoarea instructiune este cea de la adresa 151, dar cum ea nu se gaseste în trace, înseamna ca la aceasta adresa exista tot o instructiune aritmetica, iar PC\_next (PC-ul urmatoarei instructiuni) este incrementat, neexistând nici o instructiune de salt care sa schimbe cursul programului. Instructiunea urmatoare având PC=152, este cu referire la memorie "Store la adresa 3968". Urmeaza o noua instructiune de salt, PC\_next devenind 120. La aceasta adresa întâlnim o noua instructiune aritmetica, urmata de un Store iar apoi un nou salt, samd.

Concomitent putem urmari în fisierul **fsort.ins** mnemonica în asamblare a instructiunilor citite si ulterior executate, trace-ul reprezentând cursul exact al programului - instructiune cu instructiune - în conditiile unui branch prediction perfect.

Prezentam desfasurarea - modul de citire si executie - al instructiunilor, în paralel, (trace si asamblare) a primelor doua linii din fisierul trace [2].

<b>Fsort.trc</b>	<b>fsort.ins</b>
A 0 xxxx	MOV GP, #4096
A 1 xxxx	MOV SP, #4096
B 2 151	BSR RA, _main (#0)
A 151 xxxx	SUB SP, SP, #128
S 152 3968	ST 0(SP), RA
B 153 120	BSR RA, _Quick (#0)
A 120 xxxx	SUB SP, SP, #128
S 121 3840	ST 0(SP), RA
B 122 18	BSR RA, _Initarr (#0)
A 18 xxxx	SUB SP, SP, #128
S 19 3712	ST 0(SP), RA
S 20 3720	ST 8(SP), R17
S 21 3724	ST 12(SP), R18
B 22 4	BSR RA, _Intrand (#0)
A 4 xxxx	SUB SP, SP, #128
A 5 xxxx	MOV R13, #74755
S 6 6328	ST _seed, R13

*Tabelul 7.1.*

**Ilustrarea în paralel a executiei instructiunilor pe fisierele trace respectiv cod masina**

Mai jos, se prezinta o descriere succinta a benchmarkurilor utilizate în cercetare.

Benchmark	Total instr.	Descriere bench
Puzzle	804.620	Rezolva o problema de "puzzle"
Bubble	206.035	Sortare tablou prin metoda "bulelor"
Matrix	231.814	Inmultiri de matrici
Permute	355.643	Calcul recursiv de permutari
Queens	206.420	Problema de sah a celor 8 regine
Sort	72.101	Sortare rapida a unui tablou aleator (quick sort)
Towers	251.149	Problema turnurilor din Hanoi (recursiva)
Tree	136.040	Sortare pe arbori binari

Tabelul 7.2.

### Caracteristicile benchmark-urilor Stanford

Este acum evident, ca prin procesarea unui asemenea trace, având în vedere ca se dispune si de programul obiect HSA generat prin compilarea benchmarkului scris în C, se pot simula în mod realist, procesele legate de memoriile cache, predictorul hardware de ramificatii etc., integrate într-un procesor paralel. Implementarea simulatorului a fost facuta considerând urmatoarele:

- se aduc FR instructiuni din cache sau memorie în IB daca exista un spatiu disponibil mai mare sau egal cu FR; daca adresa urmatoare a unei instructiuni de salt (B) este una nealiniata cu FR, se va alinia si se va aduce noua instructiune multipla de la adresa aliniata, considerându-se astfel o implementare cache realista, în care accesele pot fi realizate doar la adrese multiplu de FR. Evident ca în acest caz, instructiunile inutile aduse, nu se vor lansa si contoriza în procesare;
- nu se pot aduce decât exact FR instructiuni din cache, din motive de aliniere adrese;
- executia instructiunilor se face In Order (o instructiune va fi executata abia dupa ce toate celelalte instructiuni de care ea depinde au fost executate), eludând deci complicatii hardware legate de modelarea si simularea unor algoritmi tip Out of Order [1, 6];
- nu pot fi lansate în executie decât maxim doua instructiuni cu referire la memorie în conditiile în care adresele lor de acces sunt diferite (antialias); utilizând un Data Write Buffer (DWB) este permisa din punct de vedere al procesorului lansarea unui numar maxim de instructiuni cu referire la memorie simultan în executie (IRmax) dar scrierea / citirea

efectiva în / din cache-ul de date, realizata de DWB, este limitata tot la doua instructiuni;

- daca apare miss în spatiul de instructiuni pe perioada "lunga" a accesarii memoriei principale, se vor executa în continuare instructiuni din IB.

Executia simulatorului se face în urmatoorii pasi succesivi:

1. Solicitare parametri de intrare ai structurii superscalare (prin intermediul interfetei grafice de intrare anterior descrise) si anume: rata de fetch (FR), dimensiune IB, rata maxima de lansare în executie a instructiunilor din bufferul de prefetch (IRmax), capacitate cache-uri, tip cache (uniport / biport), tip arhitectura cache (mapat direct / grad asociativitate), nume fisier trace utilizat (\*.trc), numar tacte penalizare la miss în cache (N) etc.

2. Initializare cache-uri (peste tot bit V - validare si TAG=0), initializare registru PC (Program Counter) cu adresa de start a programului de test, si initializare cu 0 a ceasului programului.

3. Lansare în executie a procesarii trace-ului.

Se va executa fetch instructiune, în ipoteza ca spatiul disponibil din IB o permite. Instructiunile vor fi citite din fisierul trace respectând logica de program. În caz de miss în cache, se penalizeaza timpul de executie si, daca este posibil, se vor executa în continuare instructiuni din IB.

Se verifica conflictele LOAD / STORE, sau eventualele hazarduri RAW între instructiunile aflate în "*fereastra curenta de instructiuni*" (egala cu IRmax) din IB în vederea executiei. Întrucât procesarea se face *in order* o dependenta RAW sau o ambiguitate a referintelor la memorie determina lansarea în executie a instructiunilor independente gasite pâna în acest moment, cu prima instructiune dependenta startând un alt grup de instructiuni posibil a fi lansate în paralel.

Sunt lansate simultan în executie maxim IRmax instructiuni independente iar ceasul programului este incrementat cu maximul dintre timpul consumat de procesul de *fetch* si respectiv cel de lansare în executie (*issue*).

Simulatorul implementat genereaza urmatoarele rezultate, considerate ca fiind deosebit de importante pentru analiza propusa:

- numar de instructiuni procesate, numar total de tacte, rata medie de procesare (IR)
- rata de hit/ miss în cache-uri
- procentajul din timpul total cât IB este gol (stagnare practica a procesarii - IBE(%))

- procentajul fiecarui tip de instructiuni LOAD / STORE, ALU, BRANCH din trace
- determinarea carei metode de scriere în cache este mai viabila (Write Back vs. Write Through)
- procentajul din numarul tactelor cât exista alias-uri la memorie, procentajul hazardurilor RAW din timpul total de executie, etc.

Câstigul în performanta dobândit prin implementarea diverselor tehnici avansate de îmbunatatire a performantei procesoarelor (selective victim cache, reutilizare dinamica a instructiunilor, predictia valorilor, trace cache, etc).

În ciuda predictiei perfecte a branch-urilor, indicatorul IBE nu este trivial datorita posibilitatii aparitiei miss-urilor în cache-uri si latentelor ridicate ale memoriei principale (N), care pot conduce la golirea bufferului IB. Toate aceste rezultate sunt exprimate prin intermediul ferestrelor descrise în capitolul anterior dar si scrise într-un fisier (REZULT.SIM), permitându-se astfel prelucrarea lor ulterioara. Eventuale viitoare dezvoltari ale acestei cercetari pot avea în vedere implementarea predictorului hardware de branch-uri (dezvoltat tot de catre echipa de cercetare a autorilor si ajuns la varianta neuronală), modificarea tehnicii de lansare a instructiunilor în executie din *in order* în *out of order* sau chiar noi paradigme ale domeniului arhitecturii calculatoarelor.

## 8. ARHITECTURA SISTEMELOR MULTIPROCESOR

---

### 8.1. DEFINIRI. CLASIFICARI

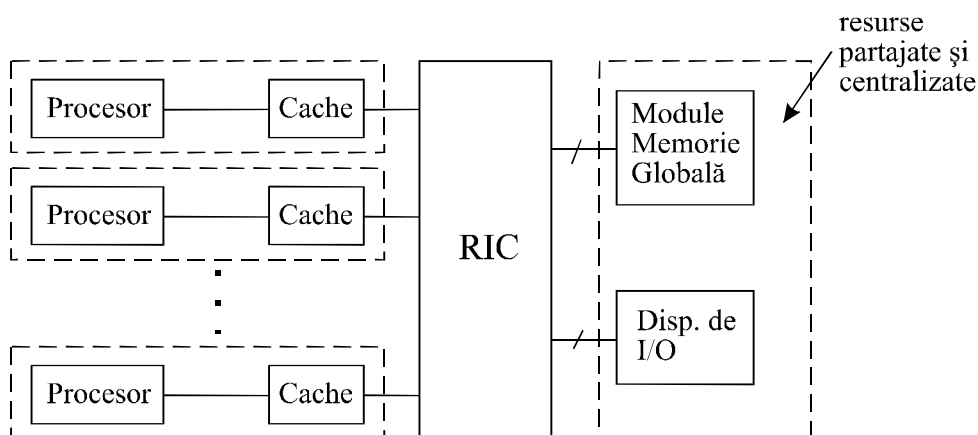
Sistemele multimicroprocesor (SMM) reprezinta sisteme de tip MIMD (Multiple Instruction Multiple Data), constituite din mai multe  $\mu$ procesoare interconectate prin intermediul unei retele de interconectare (RIC) astfel încât sa permita programelor aflate în executie sa interschimbe date si sa-si sincronizeze activitatile.

De remarcat ca în cazul SMM exista în general mai multe programe în executie la un moment dat, bazat pe paralelismul spatial al hardware-ului. Pentru a exploata în mod practic paralelismul inherent unor aplicatii prin arhitectura hardware, paralela si ea, a SMM, trebuie parcurse urmatoarele etape:

1. Identificarea paralelismului potential al aplicatiei
2. Partitionarea aplicatiei în procese (task-uri) concurente
3. Distribuirea si sincronizarea task-urilor pe procesoare

#### **Clasificari ale SMM-urilor:**

a. SMM cu resurse globale partajate (centralizate)



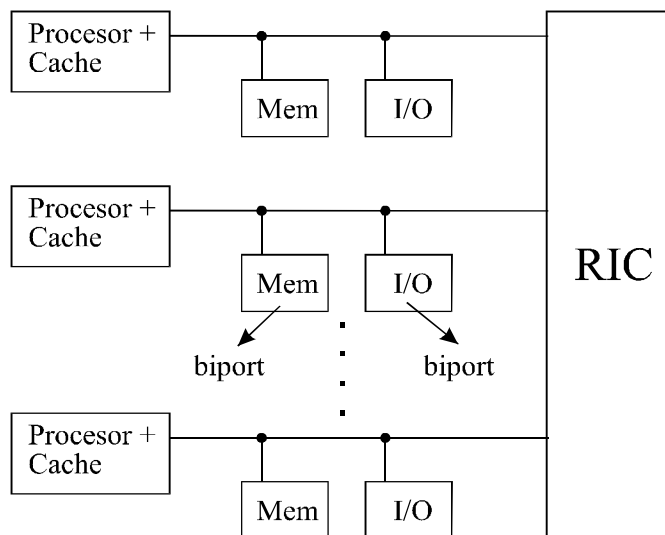
**Figura 8.1.** SMM cu resurse globale partajate

Procesoarele pot comunica între ele prin memoria globală (principală). Se considera ca procesoarele nu detin resurse locale, deci resursele de memorie și dispozitivele de I/O sunt comune tuturor procesoarelor urmând a fi partajate de către acestea. Se mai numesc și sisteme UMA (Uniform Memory Access), pentru ca memoria fizică este uniform partajată de către toate procesoarele, timpul de acces fiind în principiu același pentru orice procesor. Aceste SMM, având ca RIC un bus comun, sunt cele mai populare pe plan comercial, cu precădere în aplicațiile industriale.

#### b. SMM cu resurse distribuite și partajate

Fiecare procesor detine în acest caz resurse locale (memorii + dispozitive de I/O). Comunicatia între 2 procesoare se poate face prin conectarea lor “punct la punct” prin intermediul RIC, ca în figura următoare.





**Figura 8.2.** SMM cu resurse distribuite și partajate

În acest caz, resursele de memorie și porturi sunt distribuite. Aceste sisteme se mai numesc și NUMA (Non – Uniform Memory Access), în sensul că accesarea unei anumite locații de memorie implică o latență mai mare sau mai mică, în funcție de procesorul care o accesează. Termenul de partajat se referă la faptul că spațiul logic de adrese al procesoarelor este partajat, adică aceeași adresă fizică accesată de 2 procesoare, conduce la aceeași locație de memorie fizică.

### c. SMM hibride

Constituie o combinație între sistemele cu resurse centralizate și partajate (caz a) și cele cu resurse distribuite și partajate (caz b). Din punct de vedere al gradului de interconectare al procesoarelor, SMM sunt de două tipuri:

1. Sisteme strâns – cuplate (SMM propriu – zise), în care conectarea procesor – memorie se face prin intermediul unor busuri de interconectare. Sunt asociate de obicei sistemelor UMA.
2. Sisteme slab – cuplate (Retele), în care conectarea procesor – memorie se face prin legături seriale “punct la punct”.

## 8.2. ARHITECTURI CONSACRATE

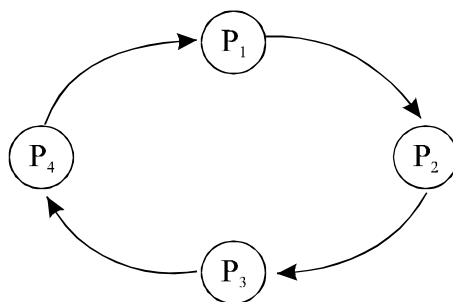
### 1. SMM pe bus comun (RIC statica)

Caracterizata de faptul ca RIC este un simplu bus comun partajat în timp de catre  $\mu$ procesoare (UMA). Este cea mai simpla arhitectura, dar conflictele potentiale ale procesoarelor (masterilor) pe busul comun, pot fi ridicate. Desigur, exista un singur master activ pe bus la un moment dat. Busul comun si memoria globala (slave) sunt partajate în timp de catre masteri. Resursele locale ale masterilor - memorii cache locale - au rolul de a diminua traficul pe busul comun. Accesul pe bus se face prin intermediul unui arbitru de prioritati, centralizat sau distribuit.

Arhitectura implica dificultati tehnologice legate de numarul maxim de masteri cuplabili (în practica pâna la 32), reflexii si diafonii ale semnalelor pe bus. Cum capacitatile si inductantele parazite cresc proportional cu lungimea busului, rezulta ca acesta trebuie sa fie relativ scurt.

Exista arhitecturi standardizate de SMM pe bus comun (VME – dezvoltat de Motorola pe  $\mu$ p MC680X0, MULTIBUS – Intel pentru I - 80X86).

### 2. SMM în inel (token – ring) – retea statica



**Figura 8.3.** Retea Token-Ring

Arhitectura este standardizata conform standardelor IEEE 802.5. Este utilizata cu precadere în sistemele slab cuplate (rețele locale). Protocolul de comunicatie are la baza trimiterea unei informatii binare speciale, numita jeton (token), de la un procesor la celalalt, în mod secvential. Un procesor P<sub>i</sub>, nu poate sa trimita un mesaj decât daca a receptionat jetonul. Daca un

procesor dorește să trimită un mesaj la un alt procesor, va aștepta recepționarea jetonului, apoi va modifica un bit din jeton iar apoi va transmite mesajul cu jetonul modificat pe post de antet. Din acest moment, nu mai circula jeton prin structura și deci toate emisiile de mesaje sunt inhibate. După ce procesorul destinație a recepționat mesajul (date sau comenzi), îl va trimite mai departe. Conform standardului, procesorul sursă va insera din nou jetonul în structura în momentul în care și-a terminat de transmis mesajul și a recepționat “începutul” propriului mesaj emis.

Eficiența scade proporțional cu numărul procesoarelor din rețea.

### 3. SMM cu interconectare “crossbar” (rețea dinamică)

Această arhitectură detine complexitatea cea mai ridicată dintre arhitecturile de SMM, în schimb conflictele procesoarelor la resursele de memorie comună partajată sunt minime. Comunicatia între orice pereche procesor – memorie este întârziată în nodul de conexiune aferent. De remarcat că pot avea loc simultan până la  $N$  accese ale procesoarelor la memorie, în ipoteza în care nu există două procesoare care să acceseze același modul de memorie. Pentru evitarea conflictelor de acest gen, se încearcă atunci când este posibil “împrastieri” favorabile ale informației în modulele de memorie globală. De exemplu în aplicațiile pe vectori, dacă aceștia au pasul 1 atunci scalarii succesivi sunt situați în blocuri succesive de memorie, rezultând minimizări ale conflictelor.

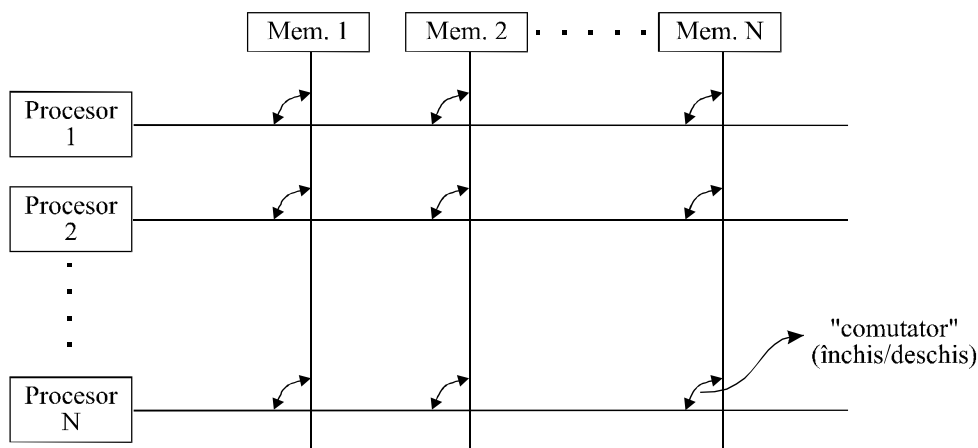
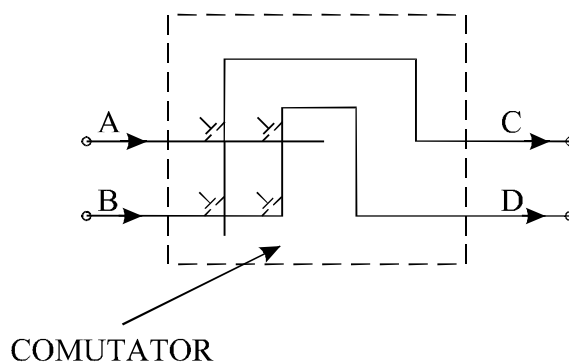


Figura 8.4. Rețea crossbar

Deși cea mai performantă, arhitectura devine practic greu realizabilă pentru un număr  $N$  ridicat de procesoare, din cauza costurilor ridicate ( $N^2$  noduri).

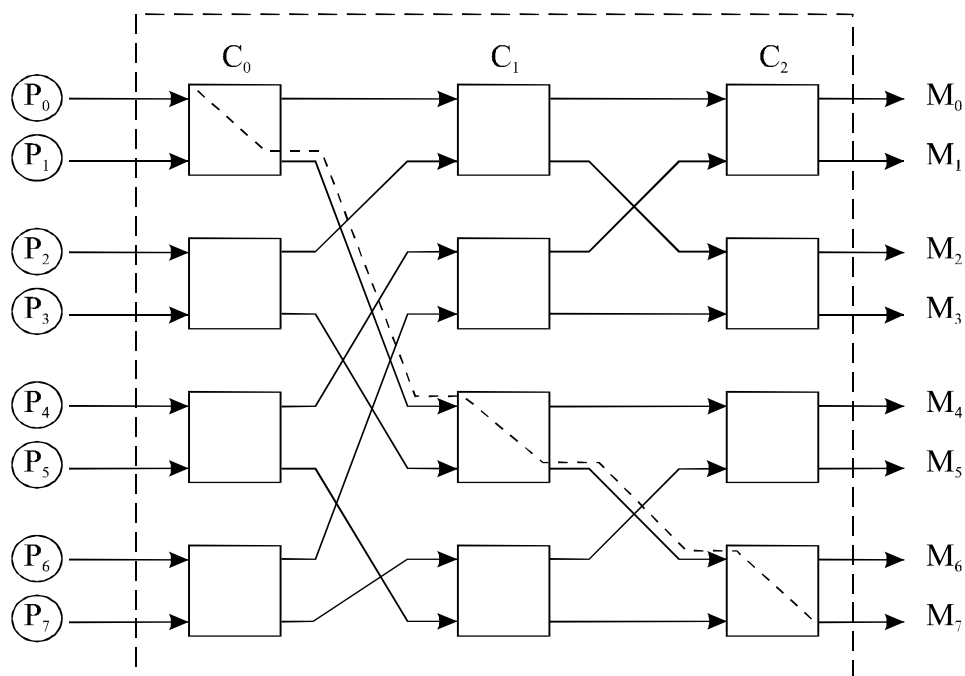
#### 4. SMM cu rețele de interconectare dinamice multinivele

Reprezintă un compromis între SMM unibus și cele de tip crossbar. Elementul principal al RIC îl constituie comutatorul. În general sunt folosite comutatoare cu două intrări și două ieșiri. Aceste comutatoare pot lucra “direct” sau în “cruce”, adică ( $A \rightarrow C, B \rightarrow D$ ) respectiv ( $A \rightarrow D, B \rightarrow C$ ).



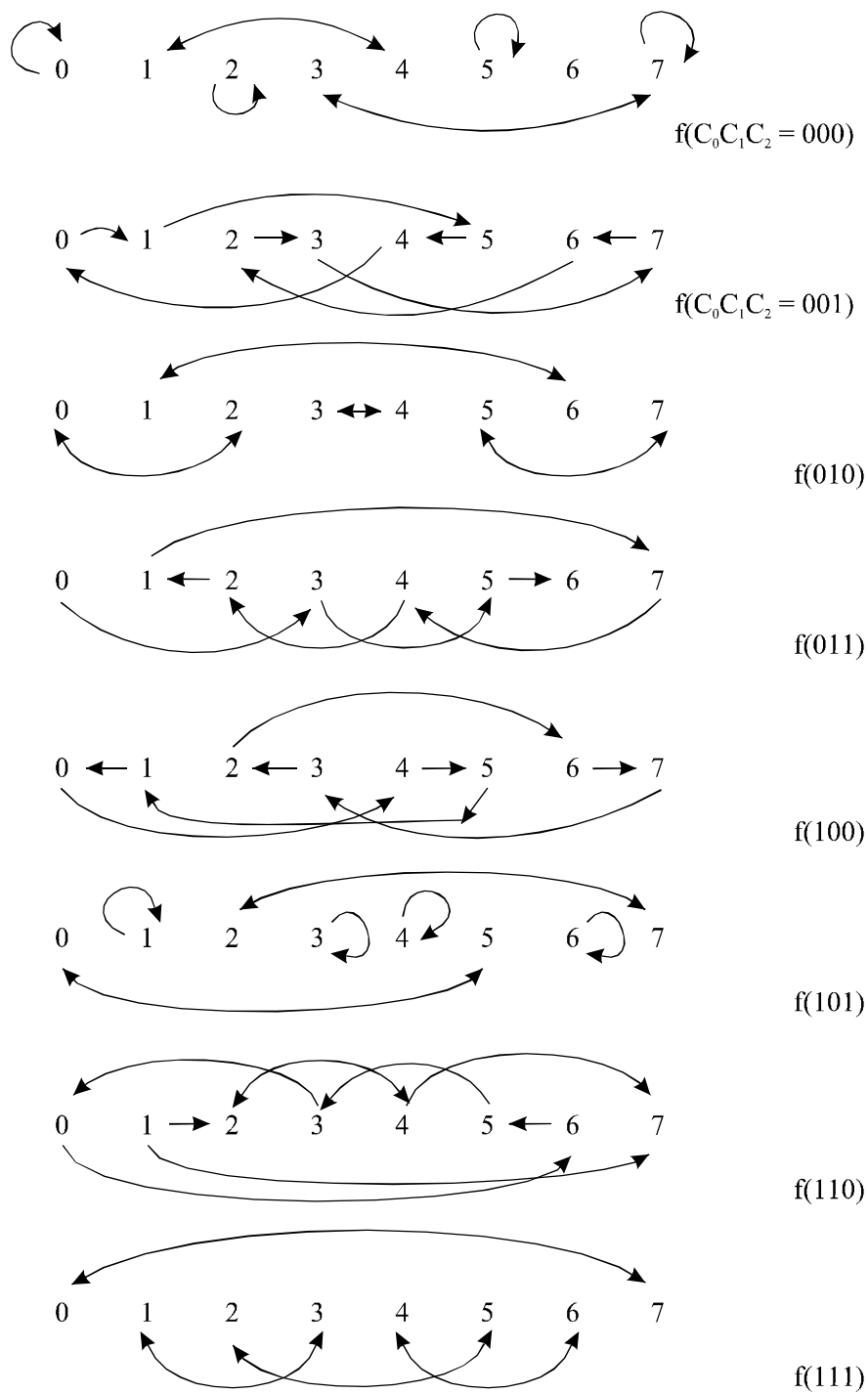
**Figura 8.5.** Comutator de rețea

Se prezintă mai jos un SMM având o rețea de interconectare pe trei nivele, într-o topologie BASELINE, cu opt procesoare și opt module de memorie ( $M_0, M_7$ ).



**Figura 8.6.** Interconectare Baseline

Cu precizarea ca  $C_0 = 0$  semnifica faptul ca switch-ul  $C_0$  lucreaza în “linie”, iar  $C_0 = 1$  faptul ca lucreaza în “cruce”, se prezinta grafurile de comunicare “totala” procesoare – memorii pentru reseaua BASELINE.

**Figura 8.7.** Grafuri comunicatie Baseline

**Exemplu:** F(100) reprezintă graful asociat rețelei de interconectare procesoare – memorii, considerând ca switch-ul  $C_0$  lucrează în cruce iar  $C_1$ ,  $C_2$  lucrează în linie.

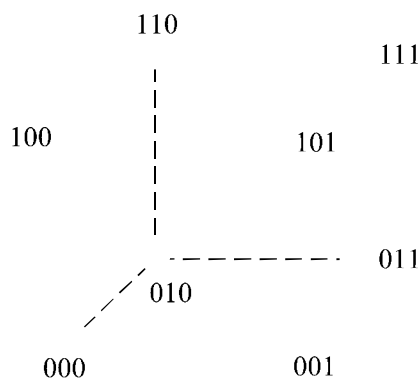
Spre deosebire de arhitectura crossbar, în cazul acestor RIC – uri, nu este posibilă implementarea oricărei funcții bijective de comunicație  $f: \{P_0, P_1, \dots, P_7\} \rightarrow \{M_0, M_1, \dots, M_7\}$ , din cele  $8!$  funcții bijective posibile, ci doar a celor 8 funcții de mai sus.

De remarcat însă că în acest caz, complexitatea comutatoarelor este mai mare decât în cazul crossbar, în schimb sunt mai puține. Mai precis, RIC crossbar are  $N^2$  comutatoare elementare în timp ce o astfel de rețea are doar  $4 \times \log_2 N \times \frac{N}{2} = 2N \log_2 N < N^2$ . În schimb, o conexiune procesor-memorie este întârziată aici pe 3 nivele de comutatoare elementare și nu pe unul singur ca în cazul crossbar.

Un dezavantaj important al acestor arhitecturi, zise și “arii de procesoare” îl constituie posibilitatea unei cai de comunicare procesor – memorie de a bloca alte cai necesare.

De exemplu în cazul BASELINE, calea  $P_0 - M_7$  blochează interconectarea simultană a oricăroră dintre următoarele conexiuni:  $P_1 - M_4$ ,  $P_1 - M_5$ ,  $P_1 - M_6$ ,  $P_1 - M_7$ ,  $P_2 - M_6$ ,  $P_3 - M_6$  etc. Rezultă deci că o asemenea RIC este mai puțin potrivită pentru transferuri prin comutare de circuite. În cazul unei rețele cu comutare de pachete, blocarea constă în așteptarea pachetului într-un buffer asociat comutatorului, până când se va ivi posibilitatea trimiterii sale spre următorul nivel de comutatoare. Desigur, există și alte topologii de rețele multinivel (BANYAN, DELTA, etc.).

### 5. SMM interconectate în hipercub (statica)



**Figura 8.8.** Interconectare hipercub

În hipercubul  $k$  – dimensional exista  $N = 2^k$  noduri (procesoare), fiecare de gradul  $k$ , adica având legaturi directe cu  $k$  procesoare. Daca tratam fiecare eticheta a nodurilor ca o valoare binara, nodurile conectate direct difera printr-o singura coordonata. Altfel spus, cei  $k$  vecini ai unui procesor  $P_j$  au etichete binare adiacente cu cea a lui  $P_j$ .

Pentru dimensiuni mai mari decât 3 ale lui  $k$ , diagrama de interconectare devine mai dificila dar ideea ramâne aceeași. Câteva companii incluzând INTEL, NCUBE, FPS etc. studiaza activ masini în aceasta retea.

Totusi un SMM în sensul clasic reprezinta un sistem unibus, cu memorie centrala partajata.

### 8.3. GRANULARITATE SI COMUNICARE

RIC este esentiala în performanta unui SMM. Principalele criterii de performanta de care se tine cont în proiectarea unei RIC sunt:

- ◆ Întârzierea, adica timpul de transmitere pentru un singur cuvânt (mesaj)
- ◆ Largimea de banda, adica ce trafic de mesaje poate suporta retea în unitatea de timp
- ◆ Gradul de conectivitate, adica numarul de vecini directi pentru fiecare nod
- ◆ Costul hardware, adica ce fractie din costul total al hardului reprezinta costul RIC
- ◆ Fiabilitatea si functionalitatea (arbitrare, întreruperi).

Ideal ar fi ca un SMM dotat cu  $N$  procesoare sa proceseze un program de  $N$  ori mai rapid decât un sistem monoprosesor, cerinta numita scalabilitate completa. În realitate, acest deziderat de scalabilitate nu se realizeaza din multiple motive. În privinta scalabilitatii, aceasta este mai usor de realizat pe un sistem cu resurse distribuite decât pe unul având resurse centralizate, întrucât acestea din urma constituie un factor de “strangulare” a activitatii.

Dintre cauzele care stau în calea unei scalabilitati ideale, se amintesc:

1. Gradul de secventialitate intrinsec al algoritmului executat. Asa de exemplu, exista în cadrul unui algoritm operatii secventiale dependente de date si deci imposibil de partajat în vederea procesarii lor paralele pe mai multe procesoare.



$$\left. \begin{array}{l} n = y + z; \\ a = n + b; \end{array} \right\} \text{ scalar secvential dependent de RAW} \quad 100\% = \text{secvential}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{for } i = 1 \text{ to } 10 \\ \quad A(i) = B(i) + C(i); \end{array} \right\} \text{ paralelizabil pe 10 procesoare}$$

$$(1-f) \times 100\% = \text{paralelizabil}$$

Accelerarea  $S$  pentru un SMM cu  $N$  procesoare este, prin definitie:

$$S = \frac{T_s}{T_N}$$

unde:

$T_s$  = timpul de executie pentru cel mai rapid algoritm secvential care rezolva problema pe un monoprosesor (SISD)

$T_N$  = timpul de executie al algoritmului paralel executat pe un SMM cu  $N$   $\mu$ procesoare.

Daca notam cu  $f$  = fractia (procentajul) din algoritm care are un caracter eminentemente secvential,  $f \in [0,1]$ , putem scrie:

$$T_N = f \cdot T_s + \frac{(1-f) \cdot T_s}{N},$$

adica

$$S = \frac{T_s}{f \cdot T_s + \frac{(1-f) \cdot T_s}{N}}$$

sau:

$$S = \frac{1}{f + \frac{(1-f)}{N}} \quad \text{Legea lui G. Amdahl, } 1 \leq S \leq N$$

(scalabil)

Legea lui G. Amdahl sugereaza ca un procentaj ( $f \times 100\%$ ) oricât de scazut de calcule secventiale impune o limita superioara a accelerarii ( $1/f$ ) care poate fi obtinuta pentru un anumit algoritm paralel pe un SMM, indiferent de numarul  $N$  al procesoarelor din sistem si topologia de interconectare a acestora.

1. Timpul consumat cu sincronizarea si comunicarea între procesele rezidente pe diversele ( $\mu$ ) procesoare din sistem.

2. Imposibilitatea balansarii optimale a activitatii procesoarelor din sistem, adica frecvent nu se poate evita situatia în care anumite procesoare sa fie practic inactive sau cu un grad scazut de utilizare.
3. Planificarea suboptimala a proceselor d.p.d.v. software (activare proces, punere în asteptare a unui proces, schimbarea contextului în comutarea proceselor etc.)
4. Operatiile de I/O, în cazul nesuprapunerii lor peste activitatea de executie a task-ului de catre procesor.

Un parametru important care influenteaza direct performanta unui SMM, e dat de granularitatea algoritmului de executat, adica dimensiunea medie (numar de instructiuni, timp de executie etc.) a unei unitati secventiale de program (USP). Prin USP se înțelege o secventa de program în cadrul algoritmului paralel în cadrul careia nu se executa operatii de sincronizare sau de comunicare date cu alte procese. Se mai defineste si un alt parametru, numit timp mediu de comunicare între 2 task-uri nerezidente pe acelasi procesor.

Din punct de vedere al raportului între granularitatea algoritmului (G) si timpul de comunicare (C), se citeaza 2 tipuri de algoritmi:

- a. Coarse grain parallelism (paralelism intrinsec masiv), caracterizati de un raport G/C relativ “mare”. Acesti algoritmi se preteaza cu bune rezultate la procesoare pe sisteme paralele de tip SIMD (vectoriale) sau MIMD (multiprocesoare).
- b. Fine grain parallelism (paralelism intrinsec redus), caracterizati de un raport G/C relativ mic. În acest caz nu este recomandabila multiprocesarea din cauza granularitatii fine a algoritmului si a timpilor mari de comunicare/ sincronizare între procesoare (USP-uri), elemente ce vor reduce dramatic accelerarea SMM. Se recomanda exploatarea paralelismului redus prin tehnici monoprocessor de tip “Instruction Level Parallelism”.

O problema majora, practic deschisa la ora actuala, o constituie scrierea de software pentru SMM. Sarcina unui compilator SMM este dificila întrucât trebuie sa determine o metoda de a executa mai multe operatii (programe), pe mai multe procesoare, în momentele de timp neprecizabile. Apoi, trebuie optimizat raportul G/C printr-o judicioasa partitionare – în general statica – a algoritmului de executat.

## 8.4. MODELE ANALITICE DE ESTIMARE A PERFORMANTEI

### 1. Un model “pesimist”

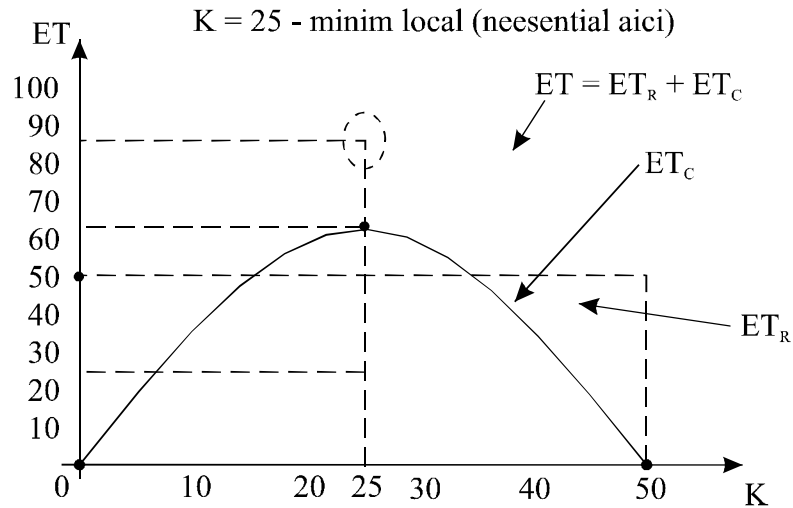
Se considera pentru început un sistem biprocesor care trebuie să execute un program (aplicație) ce conține  $M$  task-uri. Se presupune că fiecare task se execută în " $G$ " unități relative de timp și că oricare 2 task-uri nerezidente pe același procesor consumă " $C$ " unități relative de timp pentru intercomunicații (schimburi de date + sincronizări). Se va considera că " $K$ " task-uri se vor executa pe un procesor iar  $(M-K)$  task-uri pe celălalt,  $(\forall k=1,2,\dots,M)$ .

Pesimismul modelului constă în faptul că se va considera că nu este posibilă nici o suprapunere între execuția unui task și comunicarea acestuia cu celelalte task-uri nerezidente pe același procesor. În acest caz, timpul de execuție ( $ET$ ) aferent aplicației este dat de relația:

$$ET = G \cdot \text{Max}(M - K, K) + C \cdot (M - K) \cdot K$$

Particularizând pentru  $M=50$ .  $G/C=10$  (granularitate "mică"),  $G=1$  (un task se execută într-o singură unitate de timp), se obține:

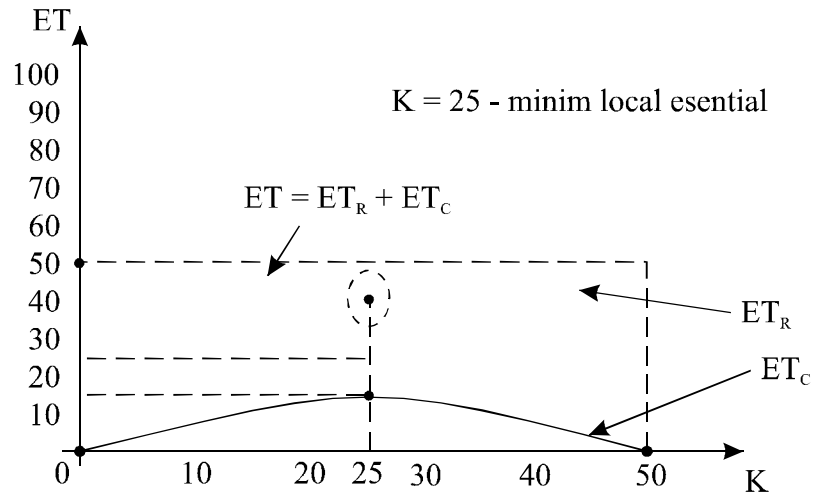
$$ET = \underbrace{\text{Max}(50 - K, K)}_{T_R = \text{timp rulare efectivă aplicație}} + \underbrace{0,1 \cdot (50 - K) \cdot K}_{T_R = \text{timp comunicații interprocesor}}$$



**Figura 8.9.** Optimizare în cazul G/C "mic"

În acest caz rezulta  $k_{\text{optim}} = 0$ , adică optim e ca toate cele 50 taskuri să ruleze pe un singur procesor (monoprocesare!). Dacă am considera granularitatea aplicației  $G/C = 50$  ("mare"), se va obține:

$$ET = \text{Max}(50 - K, K) + \frac{1}{40} \cdot (50 - K) \cdot K$$



**Figura 8.10.** Optimizare în cazul G/C "mare"

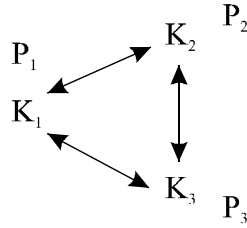
În acest caz  $k_{\text{optim}} = M/2 = 25$ , adică o distribuție uniformă a numărului de task-uri pe cele 2 procesoare ("coarse grain parallelism").

În concluzie, pentru un sistem biprocesor în condițiile date, strategia optimală în vederea obținerii performanței (ET) maxime este:

- a) Dacă  $\frac{G}{C} \leq \frac{M}{2} \Rightarrow k_{\text{optim}} = 0$  (monoprocesare)
- b) Dacă  $\frac{G}{C} > \frac{M}{2} \Rightarrow k_{\text{optim}} = M/2$  (procesare paralela omogena)

### Generalizare pentru N procesoare

Se considera pentru început un SMM cu 3 procesoare P1, P2, P3, care are de executat o aplicație având M task-uri. Se presupune ca P1 execută k1 task-uri, P2 execută k2 task-uri iar P3 execută k3 task-uri,  $k_1 + k_2 + k_3 = M$ .



**Figura 8.11.** Ansambluri procesor - task

Rezulta imediat ca timpul de comunicatii ( $ET_c$ ) intertask-uri va fi:

$$ET_c = \frac{C}{2} [(k_2 + k_3) \cdot k_1 + (k_1 + k_3) \cdot k_2 + (k_1 + k_2) \cdot k_3] = \frac{C}{2} \sum_{i=1}^3 k_i (M - k_i)$$

Prin urmare, pentru un sistem cu N procesoare avem:

$$ET = G \cdot \text{Max}(k_i) + \frac{C}{2} \sum_{i=1}^N k_i (M - k_i) \text{ sau:}$$

$$ET = G \cdot \text{Max}(k_i) + \frac{C}{2} \left( M^2 - \sum_{i=1}^N k_i^2 \right) \quad (\forall) i = \overline{1, N}$$

În ipoteza - nu neaparat optimala - unei alocari uniforme a task-urilor pentru toate cele N procesoare, avem:  $\left( k_i = \frac{M}{N} \right)$

$$ET_N = \frac{G \cdot M}{N} + \frac{C \cdot M^2}{2} - \frac{C \cdot M^2}{2N}$$

Timpul de executie al algoritmului pe un singur procesor este:

$$ET_1 = G \times M$$

"Punctul critic" se atinge când  $ET_N = ET_1$ , adica:

$$\frac{G \cdot M}{N} + \frac{C \cdot M^2}{2} = \frac{C \cdot M^2}{2N} + G \cdot M, \text{ sau:}$$

$$G \left(1 - \frac{1}{N}\right) = \frac{C \cdot M}{2} \left(1 - \frac{1}{N}\right), \text{ adica:}$$

$$\frac{G}{C} = \frac{M}{2} \text{ (conditie de performanta identica mono-multi)}$$

În concluzie:

- a) Daca  $\frac{G}{C} \geq \frac{M}{2}$ , este indicata multiprocesare omogena (coarse grain)
- b) Daca  $\frac{G}{C} < \frac{M}{2}$ , monoprocarea e mai indicata (fine grain)

## 2. Un model mai "optimist"

Sa presupunem acum ca executia task-urilor se poate suprapune cu comunicatia interprocesoare. În acest caz avem:

$$ET = \max \left\{ G \cdot \max(k_i), \frac{C}{2} \sum_{i=1}^N k_i \cdot (M - k_i) \right\}$$

Optimul s-ar obtine atunci când suprapunerea celor 2 componente ar fi perfecta, adica:

$$\frac{G \cdot M}{N} = \frac{C \cdot M^2}{2} - \frac{C \cdot M^2}{2N^2} \Rightarrow \frac{G}{N} = \frac{C \cdot M}{2} \left(1 - \frac{1}{N}\right)$$

Pentru un numar "mare" de procesoare (N) avem:

$$\frac{G}{N} \cong \frac{C \cdot M}{2} \Rightarrow N_{optim} = \frac{2}{N} \cdot \frac{G}{C}$$

**Obs. 1.** N creste liniar cu granularitatea (G/C) aplicatiei

**Obs. 2.** Aparent paradoxal,  $N_{optim}$  este invers proportional cu numarul de task-uri paralele M în care s-a împartit aplicatia. Nu este nici un paradox pentru ca cresterea lui M, determina cresterea timpului de comunicatii interprocesor ( $ET_c$ ).

### 3. Un model cu costuri liniare de comunicatie

Sa consideram acum un model de SMM în care costurile de comunicatie sa fie liniare cu numarul de procesoare N si nu cu numarul de task-uri asigurate fiecarui procesor ( $P_i$ ), ca în modelul precedent.

În acest caz, putem scrie:

$$ET_N = G \cdot \text{Max}(k_i) + C \cdot N$$

Sa determinam în continuare, pâna la ce "N", avem ca  $ET_N > ET_{N+1}$ , adica sa determinam în acest caz un numar optim de procesoare ( $N_{opt}$ ) care sa ruleze cele M task-uri.

Pentru simplificare, se considera o distributie uniforma de task-uri/procesor  $\left(k_i = \frac{M}{N}\right)$ , adica:

$$ET_N = \frac{G \cdot M}{N} + C \cdot N$$

$$\Rightarrow \Delta_N = ET_N - ET_{N+1} = G \cdot M \left( \frac{1}{N} - \frac{1}{N+1} \right) - C, \text{ adica:}$$

$$\Delta_N = \frac{G \cdot M}{N(N+1)} - C \Leftrightarrow \frac{G}{C} = \frac{N(N+1)}{m}$$

$$\text{Rezulta deci } N_{optim} \cong \sqrt{\frac{G}{C} \cdot M}.$$

Asadar  $N_{optim}$  nu creste proportional cu numarul de task-uri M ci proportional cu  $\sqrt{M}$  si de asemenea, proportional cu radacina patrata a

granularitatii  $\sqrt{\frac{G}{C}}$ . Pentru un  $N > N_{\text{optim}}$ , performanta SMM cu costuri liniare de comunicatie, se degradeaza datorita costurilor comunicatiilor interprocesor.

**Obs.** Toate aceste modele sunt simpliste, generând rezultate contradictorii chiar si discutabile. Complexitatea procesarii SMM e prea mare pentru abordari analitice de referinta. Se impun si aici simularile pe benchmark-uri specifice.

## 8.5. ARHITECTURA SISTEMULUI DE MEMORIE

### 8.5.1. DEFINIREA PROBLEMEI

Într-un SMM o informatie poate fi privata (locala) - daca ea este utilizata de catre un singur CPU, sau partajata - daca se impune a fi utilizata de catre mai multe procesoare. În cazul informatiilor partajate, de obicei acestea sunt "casate" (memorate în cache-urile locale ale unui anumit CPU), reducându-se astfel latentă necesară accesării lor de către un anumit procesor. Totodată, prin această casare a informatiilor partajate se reduc coliziunile implicate de accesul simultan (citiri) al mai multor CPU-uri la respectiva informatie si respectiv necesitățile de lărgime de bandă a busului comun.

Din păcate, pe lângă aceste avantaje, casarea introduce un dezavantaj major, constând în problema coerenței cache-urilor. În principiu, un sistem de memorie aferent unui SMM este coerent dacă orice citire a unei informații returnează informația scrisă cel mai recent. Cu alte cuvinte, problema coerenței cache-urilor în SMM se referă la necesitatea ca un bloc din memoria globală - memorat în mai multe memorii cache locale - să fie actualizat în toate aceste memorii, la orice acces de scriere al unui anumit CPU.

D.p.d.v. al acceselor de scriere a unui procesor, există 2 posibilități:

1) Strategia "*Write - Through*" (WT), prin care informația este scrisă de către CPU atât în blocul aferent din cache cât și în blocul corespunzător din



memoria globala (în acest caz, pentru a reduce stagnarea  $\mu$ procesorului datorita accesului mai lent la memoria globala, de multe ori sarcina de scriere în memoria globala e alocata unui procesor de iesire specializat, permitându-se astfel CPU-ului sa-si continue programul fara stagnari).

2) Strategia "*Write - Back*" (WB), prin care informatia este scrisa numai în cache-ul local. Blocul modificat din acest cache, va fi scris în memoria globala numai când acesta va fi evacuat din cache. În cazul acestei strategii, pentru a reduce frecventa scrierilor în memoria globala, exista asociat fiecarui bloc din cache un asa-zis "dirty bit" (bit D), care indica daca blocul din cache a fost sau nu a fost modificat. Daca nu a fost, atunci nu mai are sens evacuarea sa efectiva în memoria globala iar scrierile se fac relativ la timpul de acces al cache-ului. De asemenea, multiplele scrieri într-un bloc din cache necesita o singura scriere (evacuarea) în memoria globala.

În cadrul SMM tehnica WB e atractiva pentru ca se reduce traficul pe busul comun, în timp ce tehnica WT este mai usor de implementat si ar putea gestiona poate mai facil coerenta cache-urilor.

Revenind acum la problema coerentei cache-urilor într-un sistem de memorie centralizat si partajat, se va considera un exemplu care arata cum 2 procesoare pot "vedea" 2 valori diferite pentru aceeasi locatie (X) de memorie globala, adica un caz tipic de incoerenta a unei valori globale.

Pas	Eveniment	Continut cache CPU1	Continut cache CPU2	Continut Memorie globala (X)
0	—	?	?	1
1	CPU1 citeste X	1	?	1
2	CPU2 citeste X	1	1	1
3	CPU1 scrie 0 în X (WT) WB	0	1	0
		0	1	1

Tabelul 8.1.

### Exemplificarea unei incoerente

S-a presupus ca initial, nici una din cele 2 cache-uri nu contine variabila globala X si ca aceasta are valoare 1 în memoria globala. De asemenea s-au presupus cache-uri de tip WT (un cache WB ar introduce o incoerenta asemanatoare). În pasul 3 CPU 2 are o valoare incoerenta a variabilei X.

### Definitie:

Un SMM este coerent daca sunt îndeplinite urmatoarele 3 conditii:

1. Un procesor P scrie variabila X. Daca dupa un timp, P va citi variabila X si daca între cele 2 accese la memorie ale lui P nici un alt procesor nu a scris în X, atunci P va citi aceeasi valoare a lui X cu cea scrisa. Afirmatia nu este chiar triviala având în vedere cache-urile locale (evacuari).
2. Un procesor P<sub>i</sub> scrie variabila X. Daca dupa un timp, P<sub>j</sub> va citi variabila X si daca între timp nici un alt procesor nu a scris în X, atunci P<sub>j</sub> va citi aceeasi valoare ca cea scrisa de catre P<sub>i</sub>. Conditia nu e triviala, având în vedere exemplul de mai sus (CPU1 scrie "0", CPU2 citește "1").
3. Scrierile la aceeasi locatie (X) trebuie serializate prin arbitrare. De exemplu daca P1 scrie 1 la X si apoi P2 scrie 2 la X, niciodata un procesor nu va putea citi întâi X=2 si apoi X=1.

O nerespectare a unuia din cele 3 principii, conduce la incoerenta sistemului de memorie.

### 8.5.2. PROTOCOALE DE ASIGURARE A COERENTEI CACHE-URILOR

Fiecare dintre cache-urile care contine copia unui bloc din memoria globala, contine de asemenea "starea" aceluia bloc d.p.d.v. al procesului de partajare (partajat - "read-only", exclusiv - "read/write", invalid). Asadar, nu exista o centralizare a informatiei de stare a blocului. Fiecare controller de cache, monitorizeaza permanent busul comun pentru a determina daca cache-ul respectiv contine sau nu contine o copie a blocului cerut pe busul comun (*snooping protocol*). În cadrul acestui protocol de monitorizare, exista 2 posibilitati de mentinere a coerentei functie de ceea ce se întâmpla la o scriere:

- 1) *Write Invalidate* (WI). Procesorul care scrie determina ca toate copiile din celelalte memorii cache sa fie invalidate (se pune bitul de validare V=0 în cadrul blocului respectiv din cache  $\Rightarrow$  orice acces la acel bloc va fi cu MISS), înainte însa ca el sa-si modifice blocul în cache-ul propriu. Respectivul procesor va activa pe busul comun un semnal de invalidare bloc si toate celelalte procesoare vor verifica prin monitorizare daca detin o copie a blocului; daca DA, trebuie sa invalideze blocul care contine acel cuvânt. Evident ca un anumit bloc invalidat în cache, nu va mai fi scris în memoria globala la evacuare. Astfel, WI permite mai multe citiri simultane a

blocului dar o singura scriere în bloc la un anumit moment dat. Este foarte des implementat în SMM.

- 2) *Write Broadcast (Write Update - WBC)*. Procesorul care scrie pune data de scris pe busul comun spre a fi actualizate toate copiile din celelalte cache-uri. Pentru asta, este util sa se stie daca un cuvânt este sau nu este partajat (continut în alte cache-uri decât cel al procesorului care scrie). Daca nu e partajat într-un anumit cache, evident ca actualizarea (*updating*) sa în acel cache este inutila. Este mai puțin utilizat în SMM.

**Obs.** Ambele strategii de mentinere a coerentei (WI, WBC) pot fi asociate cu oricare dintre protocoalele de scriere în SMM (WT respectiv WB).

În continuare, se prezinta un exemplu de protocol de coerenta WI, bazat pe un protocol de scriere în cache de tip WB.

Pas	Activitate procesor	Activitate pe bus comun	Loc.X cache CPU1	Loc.X cache CPU2	Loc. X Memorie globala
0			?	?	0
1	CPU1 citeste X	Cache Miss (X)	0	?	1
2	CPU2 citeste X	Cache Miss (X)	0	0	0
3	CPU1 scrie '1' în X	Invalidare X	1	0 INV.	0
4	CPU2 citeste X	Cache Miss (X)	1	1	1

Tabelul 8.2.

### Coerenta prin protocol WI

În pasul 4, CPU1 aborteaza ciclul de citire al lui CPU2 din memoria globala si pune pe busul comun valoarea lui X ("1", copie exclusiva). Apoi, scrie (actualizeaza) valoarea lui X în cache-ul lui CPU2 si în memoria globala iar X devine o variabila partajata.

Mai jos, se prezinta un exemplu de protocol de coerenta WBC, bazat pe un protocol de scriere în cache de tip "Write Through":

Pas	Activitate procesor	Activitate pe bus comun	Loc.X cache CPU1	Loc.X cache CPU2	Loc. X Memorie globala
0			—	—	0
1	CPU1 citește X	Cache Miss (X)	0	—	0
2	CPU2 citește X	Cache Miss (X)	0	0	0
3	CPU1 scrie '1' în X	Write update X	1	1	1
4	CPU2 citește X (HIT)	—	1	1	1

Tabelul 8.3.

### Coerenta prin protocol WBC

Diferențele de performanță între protocoalele de coerentă WI și WBC, provin în principal din următoarele caracteristici:

- Dacă același CPU scrie de mai multe ori la aceeași adresă fără apariția intercalată a unor citiri din partea altor procesoare sunt necesare scrieri multiple pe busul comun în cazul WBC, în schimb e necesară doar o invalidare inițială în cazul WI.
- WBC lucrează pe cuvinte (deci la scrieri repetate în același bloc accesează repetat busul comun), în timp ce WI lucrează pe bloc (la scrieri repetate într-un bloc, determină doar o invalidare inițială a acelui bloc din celelalte cache-uri care îl conțin).
- Întârzierea între scrierea unui cuvânt de către un CPU și citirea respectivei valori de către un alt procesor, este în general mai mică într-un protocol WBC (hit) decât într-unul WI (miss).
- Strategia WI, prin invalidarea blocurilor din celelalte cache-uri, mărește rata de miss. În schimb, strategia WBC mărește traficul pe busul comun.

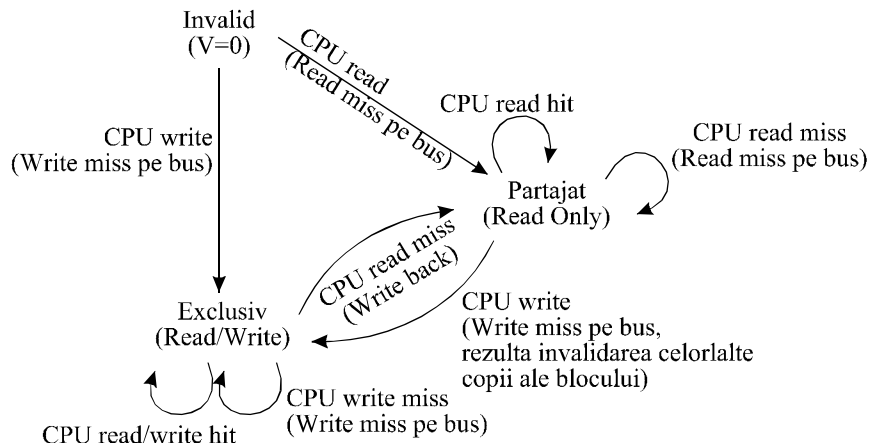
Actualmente, strategia WI este preferată în majoritatea implementărilor. În continuare, se va considera un protocol de coerentă WI și unul de scriere de tip WB. Pentru implementarea protocolului WI, procesorul accesează busul comun și distribuie pe acest bus, adresa de acces spre a fi invalidată în toate copiile partajate. Toate procesoarele, monitorizează continuu busul, în acest scop. Dacă adresa respectivă este casată, atunci data aferentă este invalidată.

În plus față de procesele de invalidare, este de asemenea necesar în cazul unui miss în cache, să se localizeze datele necesare. În cazul WI este simplu, cea mai recentă copie a blocului respectiv se află în memoria globală. Pentru un cache "Write Back" însă, problema este mai complicată întrucât cea mai recentă valoare a datei respective se află într-un cache mai

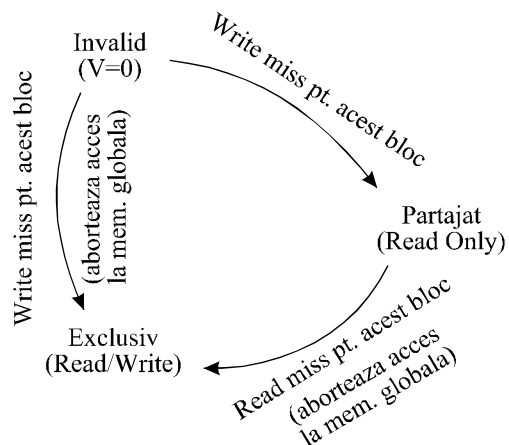
degraba decât în memoria globală. Soluția constă în următoarea: dacă un anumit procesor detine o copie a blocului accesat, având bitii  $D=1$  (dirty) și  $V=1$  (valid), atunci el furnizează pe busul comun datele respective și abortează accesul la memoria globală (vezi pasul 4, tabel sus, pagina anterioară).

În cazul unei scrieri cu MISS (WI, WB), invalidarea blocului în care se scrie, nu are sens să se facă dacă nici un alt cache nu îl conține. Rezultă că e necesar să se știe starea unui anumit bloc (partajat/nepartajat) în orice moment. Așadar în plus față de bitii de stare  $D$  și  $V$ , fiecare bloc mai detine un bit  $P$  (partajat sau nu). O scriere într-un bloc partajat ( $P=1$ ), determină invalidarea pe bus și marchează blocul ca "privat" ( $P=0$ ), adică respectivul cache detine copia exclusivă a acelui bloc. Procesorul respectiv se numește în acest caz, proprietar (owner). Dacă ulterior, un alt procesor citește blocul respectiv, acesta devine din nou partajat ( $P=1$ ).

Un protocol de coerență (WI, WB) se implementează printr-un microcontroller de tip automat finit, dedicat, plasat în fiecare nod. Controllerul răspunde atât la cererile CPU-ului propriu cât și la cererile de pe busul comun. Ca urmare a acestor cereri, controllerul modifică "starea" blocului din cache-ul local și utilizează busul pentru accesarea sau invalidarea informației. Un bloc din cache poate fi într-una din următoarele 3 stări: invalid, partajat (read only) și exclusiv (read - write). Pentru simplitate, protocolul implementat nu va distinge între un "write hit" și un "write miss" la un bloc "partajat" din cache; ambele se vor trata ca "write miss"-uri. Când pe busul comun are loc un "write miss", fiecare CPU care conține în cache o copie a blocului accesat pe bus, o va invalida. Dacă blocul respectiv este "exclusiv" (doar în acel cache), se va actualiza ("write back"). Orice tranziție în starea "exclusiv" (la o scriere în bloc), necesită apariția unui "write miss" pe busul comun, cauzând invalidarea tuturor copiilor blocului respectiv, aflate în alte cache-uri. Apariția unui "read miss" pe bus, la un bloc exclusiv, va determina punerea lui ca "partajat" de către procesorul proprietar.



**Figura 8. 12.** Tranzitiile “starii” blocului bazat pe cererile CPU



**Figura 8. 13.** Tranzitiile “starii” blocului bazat pe cererile de pe bus

## 8.6. SINCRONIZAREA PROCESELOR

Cheia sincronizarii proceselor în SMM este data de implementarea unor așa-zise procese atomice. Un proces atomic reprezintă un proces care odata inițiat, nu mai poate fi întrerupt de către un alt proces. Spre exemplu, să considerăm că pe un SMM se execută o aplicație care calculează o sumă globală prin niște sume locale calculate pe fiecare procesor, ca mai jos:

```

LocSum=0;
For i=1 to Max
    LocSum=LocSum+LocTable[i]; secventa executata în paralel de
                                ; catre fiecare procesor!
Proces   | LOCK
Atomic   | GlobSum=GlobSum+LocSum;
         | UNLOCK

```

Procesul LOCK/UNLOCK este atomic, în sensul ca numai un anumit procesor executa acest proces la un moment dat. În caz contrar s-ar putea obtine rezultate hazardate pentru variabila globala "GlobSum". Astfel de exemplu, P1 citește GlobSum = X, P2 la fel, apoi P1 scrie GlobSum = GlobSum + LocSum1 iar apoi P2 va scrie GlobSum = GlobSum + LocSum2 = X + LocSum2 (incorect !). Este deci necesar ca structura hardware sa poata asigura atomizarea unui proces software.

O solutie consta în implementarea în cadrul  $\mu$ procesoarelor actuale a unor instructiuni atomice de tip "Read - Modify - Write", neîntreruptibile la nivelul unei cereri de bus (BUSREQ). Cu precizarea ca o variabila globala rezidenta în memoria comuna ("GlobSum") detine un octet "Semafor" asociat, care indica daca aceasta este sau nu este ocupata, se prezinta un exemplu de implementare a procesului atomic precedent (LOCK UNLOCK), pe un SMM cu  $\mu$ procesoare INTEL - 8086:

```

MOV AL,01
WAIT:LOCK XCHG AL, <semafor>; instructiune atomica "Read -
                                ; Modify - Write"
TEST 01,AL                    ; resursa "GlobSum" este libera?
JNZ WAIT                      ; daca nu, repeta
MOV AX, <GlobSum>              ; AX ← (GlobSum)
ADD AX,BX                     ; GlobSum = (GlobSum)+(LocSum)
MOV <GlobSum>, AX              ; AX → GlobSum
XOR AL,AL; AL ≡ 0
MOV <semafor>, AL              ; eliberare resursa

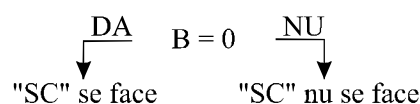
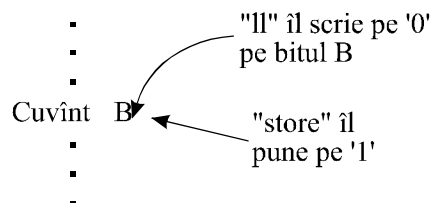
```

**Obs.** S-a presupus ca fiecare proces local a depus rezultatul "LocSum" în registrul BX al fiecarui procesor.

O implementare diferita a acestor procese atomice este realizata în  $\mu$ procesoarele mai recente. Se porneste de la constatarea faptului ca instructiunile atomice tip "Read - Modify - Write" sunt dificil de

implementat, necesitând ajutorul hardware - ului. O alternativă o constituie perechea de instrucțiuni "load locked" ("ll") și "store-ul condiționat" ("sc"). Aceste instrucțiuni sunt utilizate în secvență: dacă conținutul locației de memorie specificată de "ll" se modifică înainte de apariția unui "sc" la aceeași locație de memorie, atunci acesta ("sc") nu se execută propriu-zis. La fel, dacă procesorul procesează o comutare de context (ex. CALL/RET, întreruperi etc.) între cele 2 instrucțiuni, de asemenea "sc"-ul practic nu se face. Practic instrucțiunea condiționată "sc Reg, Adresa", returnează în registrul "reg" '1' sau '0' după cum s-a făcut sau nu s-a făcut. Cu aceste precizări, se prezintă implementarea unei operații atomice de tipul  $“(R_4) \leftrightarrow \text{Mem}_{\text{adr}(R1)}”$ :

```
rep:  mov R3,R4
      ll R2, 0(R1)
      sc R3, 0(R1)
      begz R3,rep
      mov R4,R2
```



**Figura 8. 14.** Implementarea unei operații atomice

O altă primitivă utilă de sincronizare este cea de tip "fetch and increment". Ea returnează valoarea unei locații de memorie și o incrementează atomic. Iată mai jos un "fetch and increment" atomic, implementat prin mecanismul "ll/sc":

```
rep:  ll R2, 0(R1)
      add R2,R2,#1
      sc R2, 0(R1)
      begz R2,rep
```



### 8.6.1. ATOMIZARI SI SINCRONIZARI

În cazul proceselor de sincronizare, dacă un anumit procesor "vede" semaforul asociat unei variabile globale pe '1' (LOCK - ocupat), are 2 posibilitati de principiu:

- a) Sa ramâna în bucla de testare a semaforului pâna când acesta devine '0' (UNLOCK) - strategia "spin lock"
- b) Sa abandoneze intrarea în respectivul proces, care va fi pus într-o stare de asteptare si sa inițieze un alt proces disponibil - comutare de task-uri.

Strategia a) desi des utilizata, poate prelungi mult alocarea unui proces de catre un anumit procesor. Pentru a dealoca un proces (variabila aferenta), procesorul respectiv trebuie sa scrie pe '0' semaforul asociat. Este posibil ca aceasta dealocare sa fie întârziata - dulce ironie! - datorita faptului ca simultan, alte N procesoare doresc sa testeze semaforul în vederea alocarii resursei (prin bucle de tip Read - Modify - Write). Pentru evitarea acestei deficiente este necesar ca o cerere de bus de tip "Write" sa se cableze ca fiind mai prioritara decât o cerere de bus în vederea unei operatii tip "Read - Modify - Write". Altfel spus, dealocarea unei resurse este implementata ca fiind mai prioritara decât testarea semaforului în vederea alocarii resursei. Strategia b) prezinta deficiente legate în special de timpii mari determinati de dealocarea/alocarea proceselor (salvari/restaurari de contexte).

În ipoteza ca în SMM nu exista mecanisme de mentinere a coerentei cache-urilor, cea mai simpla implemetare a verificarii disponibilitatii unei variabile globale este urmatoarea (spin lock):

```

li R2, #1; R2 ← '1'
test:    lock exchg R2,0(R1)          ; atomica
        bnez R2,test

```

Daca însa ar exista mecanisme de coerenta a cache-urilor, semaforul ar putea fi atasat local. Primul avantaj ar consta în faptul ca testarea semaforului ('0' sau '1') s-ar face din cache-ul local fara sa mai fie necesara accesarea busului comun. Al 2-lea avantaj - de natura statistica - se bazeaza pe faptul dovedit, ca e probabil ca într-un viitor apropiat procesorul respectiv sa doreasca sa testeze din nou semaforul (localitate spatiala si temporală).

În vederea obtinerii primului avantaj, bucla anterioara trebuie modificata. Fiecare "exchg" implica o operatie (ciclu) de tip "Write". Cum secventa anterioara de testare a semaforului poate fi executata în paralel de

mai multe procesoare, se pot genera concurențial mai mulți cicli (cereri) de tip "Write". Cele mai multe, vor conduce la miss-uri, întrucât fiecare procesor încearcă să obțină semaforul într-o stare "exclusivă".

Asadar, bucla se va modifica în acest caz ca mai jos:

```

test:    lw R2,0(R1)   ;    testare pe copia locala
           bnez R2, test ;    a semaforului
           li R2, #1     ;    setare concurențiala a
           lock exchg R2,0(R1) ; semaforului de către
           bnez R2, test ;    procesoare (un singur câștigător)
  
```

Să studiem acum implicațiile acestei secvențe de program într-un SMM cu 3 procesoare P<sub>0</sub>, P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> implementând un protocol de coerență a cache-urilor de tip WI și un protocol de scriere în cache de tip "Write Back".

Pas	Procesor P <sub>0</sub>	Procesor P <sub>1</sub>	Procesor P <sub>2</sub>	Stare semafor	Activitate pe BUS-ul comun
1	Are Sem = 1 (LOCK) pus chiar de el	Testare Sem=0? NU!	Testare Sem=0? NU!	Partajat	-
2	Termina proces și pune Sem = 0 în cache	Recepționează invalidare în cache	Recepționează invalidare în cache	Exclusiv	Write invalidate pentru "Sem" de la P <sub>0</sub>
3	-	Read miss	Read miss	Partajat	Arbitru servește pe P <sub>2</sub> ; Write back de la P <sub>0</sub>
4	-	WAIT (acces la bus)	Sem = 0	Partajat	Read miss-ul pentru P <sub>2</sub> satisfăcut
5	-	Sem = 0	Execută "exchg" ⇒ cache miss	Partajat	Read miss-ul pentru P <sub>1</sub> satisfăcut
6	-	Execută "exchg" ⇒ cache miss	Terminare "exchg". Primește '0', scrie Sem = 1	Exclusiv	P <sub>2</sub> servit; Write invalidate "Sem"
7	-	Terminare "exchg". Primește '1' ⇒ LOCK!	Intra în secțiunea critică de program	Partajat	P <sub>1</sub> servit

8	-	Testeaza în prima bucla daca "Sem" = 0?	-	-	-
---	---	--	---	---	---

Tabelul 8.4.

### Conlucrarea a trei procese într-un SMM

Pentru a minimiza traficul pe busul comun introdus de catre instructiunea "exchg", secventa anterioara se poate rafina ca mai jos:

```
test:  ll    R2,O(R1)
       bnez R2,test
       li    R2,#1
       sc    R2,O(R1)      ;un singur Pk o va executa cu
       begz R2,test        ; succes, restul, nu ⇒ scade traficul pe bus
```

### Sincronizarea la bariera

Este o tehnica de sincronizare deosebit de utilizata în programele cu bucle paralele. O bariera forteaza toate procesele sa astepte pâna când toate au atins bariera, abia apoi permitându-se continuarea acestor procese. O implementare tipica a unei bariere poate fi realizata prin 2 bucle succesive: una atomica în vederea incrementarii unui contor sincron cu fiecare proces care ajunge la bariera iar cealalta în vederea mentinerii în asteptare a proceselor pâna când aceasta îndeplineste o anumita conditie (test); se va folosi functia "spin (cond)" pentru a indica acest fapt.

Se prezinta implementarea tipica a unei bariere:

```
LOCK(counterlock)
Proces  if(count==0) release=0      ; /*sterge release la început*/
atomic  count=count+1              ; /*contorizează procesul ajuns
                                   la bariera*/

UNLOCK(counterlogic)
if(count==total)
{ /*toate procesoarele ajunse!*/
  count=0;
  release=1;
}
else
{ /*mai sunt procese de ajuns*/
```

```

        spin(release=1); /*asteapta pâna ce ajunge si
ultimul*/
    }

```

“total” – nr. maxim al proceselor ce trebuie sa atinga bariera

“release” – utilizat pentru mentinerea în asteptare a proceselor la bariera

Exista totusi posibilitatea de exemplu, ca un procesor (proces) sa paraseasca bariera înaintea celorlalte care ar sta în bucla "spin (release=1)" si ar rezulta o comutare de task-uri chiar în acest moment. La revenire vor vedea "release=0" pentru ca procesul care a iesit a intrat din nou în bariera. Rezulta deci o blocare nedorita a proceselor în testarea "spin".

Solutia în vederea eliminarii acestui hazard consta în utilizarea unei variabile private asociate procesului (local\_sense). Bariera devine:

```

local_sense=!local_sense;
LOCK(counterlock);
count++;
UNLOCK(counterlock);
if(count==total)
{
    count=0;
    release=local_sense;
}
else
{
    spin(release=local_sense);
}

```

Daca un proces iese din bariera urmând ca mai apoi sa intre într-o noua instanta a barierei, în timp ce celelalte procese sunt înca în bariera (prima instanta), acesta nu va bloca celelalte procese întrucât el nu reseteaza variabila "release" ca în implementarea anterioara a barierei.

**Obs.** D.p.d.v. al programatorului secvential bariera de la pag. anterioara este corecta.

### Aplicatie

Sa se însumeze elementele unui tablou A[i] continând 128.000 scalari. Procesarea se va efectua pe un SMM având 16 µprocesoare conectate la un bus comun.

**Solutie:**

Notam  $P_n$  numarul  $\mu$ procesorului curent,  $P_n \in \{0, 1, \dots, 15\}$ . Programul urmator, va fi executat de catre toate  $\mu$ procesoarele în paralel, implementând conceptul de “*Single Program Multiple Data*” (SPMD):

```
Sum[Pn]=0;
For(i=800*Pn;i<8000*(Pn+1);i=i+1)
    Sum[Pn]=Sum[Pn]+A[i];
    limit=16;
    half=16;
    repeat
        synch()          ; primitiva de sincronizare la bariera
        half=half/2;
        if(Pn<half) Sum[Pn]=Sum[Pn]+Sum[limit-Pn-1];
        limit=half;
    until (half==1);
```

**Obs. 1.** Necesitatea sincronizarii la bariera pe parcursul unei iteratii a tuturor proceselor. Primitiva synch() se poate implementa atât prin hard cât si prin soft.

**Obs. 2.** Timpul de procesare este de ordinul  $O[\log_2 N]$  în loc de  $O[N]$  cât ar fi luat unui sistem conventional (SISD),  $N$  = numarul de iteratii necesare.

**Obs. 3.** Suma totala se obtine în variabila Sum[0]. Sum[Pn], half, limit sunt variabile partajate.

**Obs. 4.**  $8000 = \frac{128.000 < \text{scalari} >}{16 < \text{procesoare} >}$

## 8.7. CONSISTENTA VARIABILELOR PARTAJATE

Coerenta cache-urilor asigura o viziune consistenta a memoriei pentru diversele procesoare din sistem. Nu se raspunde însa la întrebarea "CÂT de consistenta?", adica în ce moment trebuie sa vada un procesor ca o anumita variabila a fost modificata de un altul?

**Exemplu:**

(P1)	(P2)
A=0;	B=0;
----	----
A=1;	B=1;
L1: if(B==0)...	L2: if(A==0)...

În mod normal, este imposibil pentru ambele programe rezidente pe procesoare diferite (P1, P2) să evalueze pe adevărat condițiile L1 și L2 întrucât dacă B=0 atunci A=1 și dacă A=0 atunci B=1. Și totuși, acest fapt s-ar putea întâmpla. Să presupunem că variabilele partajate A și B sunt casate pe '0' în ambele procesoare. Dacă de exemplu, între scrierea A=1 în P1 și invalidarea lui A în P2 se scurge un timp suficient de îndelungat, atunci este posibil ca P2 ajuns la eticheta L2 să evalueze (erona) A=0.

Cea mai simplă soluție constă în forțarea fiecărui procesor care scrie o variabilă partajată, de a-și întârzia această scriere până în momentul în care toate invalidările (WI) cauzate de către procesul de scriere, se vor fi terminat. Această strategie simplă se numește consistență secvențială.

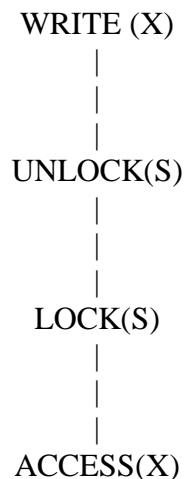
**Obs.** Consistență secvențială, nu permite de exemplu implementarea unui "write buffer" la scriere, care pe baza captării adresei și datei procesorului, să se ocupe în continuare de procesul de scriere efectivă a datei în memorie, degrevând astfel procesorul de acest proces.

Deși consistență secvențială prezintă o paradigmă simplă d.p.d.v. al programatorului, totuși ea reduce performanța SMM, în special pe sistemele având un număr mare de procesoare sau, cu costuri de interconectare de latență ridicată.

Un model de asemenea simplu d.p.d.v. al programatorului dar care permite o implementare mai eficientă, se bazează pe asumarea faptului că programele aflate în execuție pe diversele procesoare din sistem, sunt sincronizate. Un program este sincronizat dacă toate accesările la o variabilă partajată sunt ordonate prin operații de sincronizare. Astfel, accesarea unei date este ordonată printr-o operație de sincronizare dacă, în orice instanță posibilă de execuție, scrierea unei variabile partajate de către un procesor și respectiv accesarea (scriere/citire) acelei variabile de către un alt procesor, sunt separate între ele printr-o pereche de operații de sincronizare. O astfel de operație este executată după "WRITE" de către procesorul care scrie iar cealaltă operație este executată de către celălalt procesor înainte de accesul sau la data partajată. Numim aceste operații de sincronizare UNLOCK -

pentru ca deblocheaza un procesor (proces de scriere) blocat, respectiv LOCK - pentru ca îi da dreptul unui procesor de a citi o variabila partajata.

Asadar, un program este sincronizat permitând consistenta variabilelor partajate, daca fiecare "WRITE" executat de catre un procesor urmat de un acces la aceeasi data a unui alt procesor, se separa ca mai jos:



*Obs.* În acest caz, gestiunea consistentei este lasata în seama programatorului (S.O.)

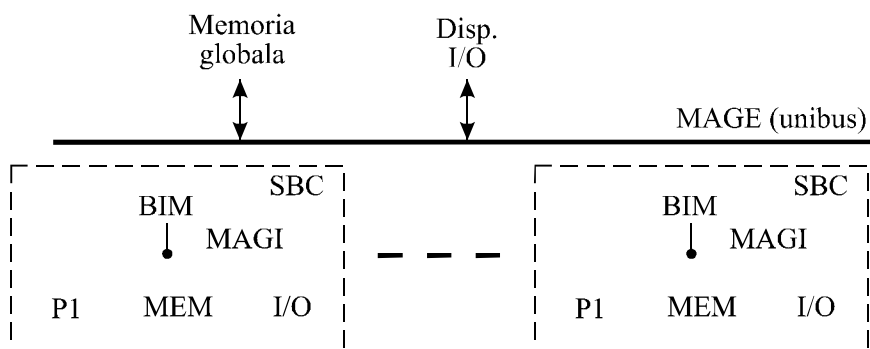
## 8.8. METODE DE INTERCONECTARE LA MAGISTRALE

În SMM o functie de baza o reprezinta comunicarea între µsistemele componente pentru schimburi de date si sincronizare în vederea executiei programelor. Conceptele fundamentale referitoare la arhitectura si modul de proiectare al SMM, se împart în 2 structuri de baza:

- structuri SMM cu module functionale distribuite
- structuri SMM cu module functionale concentrate

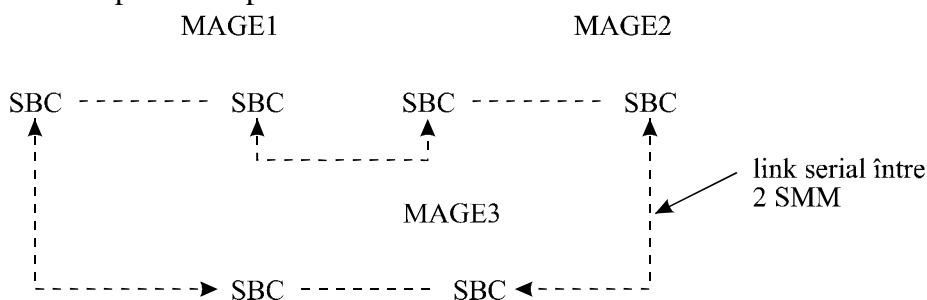
Un modul de procesare dintr-un SMM detine 2 componente:

- a) Single Board Computer-ul (SBC), compus din CPU, memorie, I/O
- b) Bloc interfata la magistrala comuna a SMM (BIN)



**Figura 8.15.** Interconectarea a doua SBC-uri

Din motive arhitecturale (blocaje, așteptări mari) și tehnologice, numărul de module de procesare (SBC) este limitat în practică la 30-32. O soluție pentru extinderea numărului de SBC-uri constă în interconectarea mai multor SMM-uri prin intermediul unor legături (seriale), rezultând structuri expandabile practic la orice dimensiune.



**Figura 8.16.** Interconectarea SMM-urilor

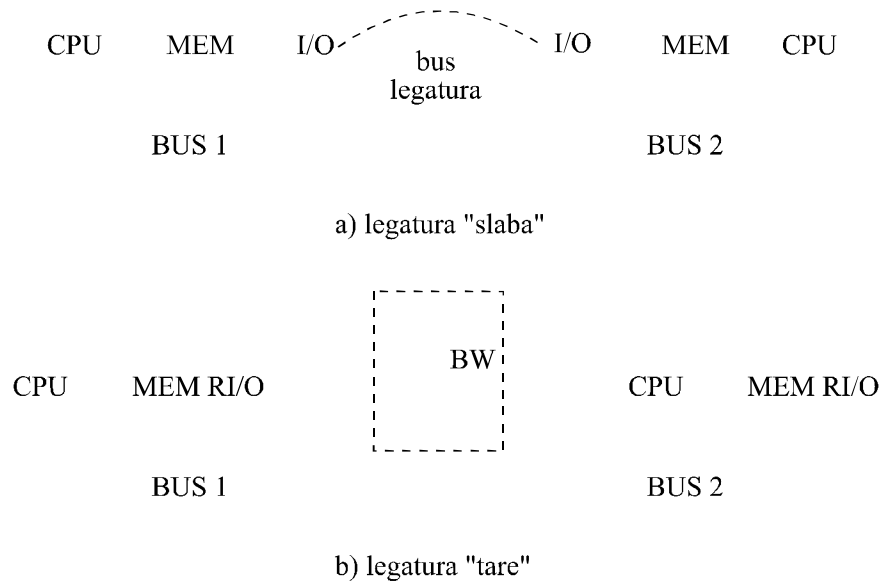
În acest caz, organizarea structurii se face pe baza conceptului de localizare al SBC-urilor, astfel:

- procesoarele cu schimburi mai frecvente de informație sunt plasate pe aceeași magistrală numită MAGE
- procesoarele cu frecvența de intercomunicare mai redusă vor comunica prin liniile seriale.

Există 2 metode principale de cuplare a busurilor MAGE pentru 2 SMM-uri:

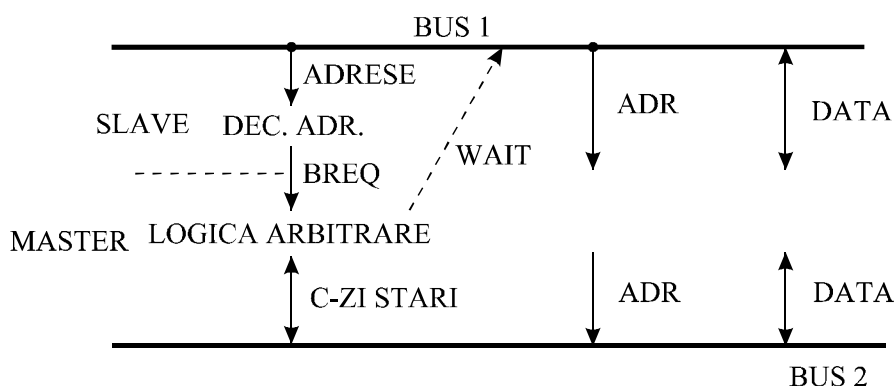
- a) Conectarea busurilor prin interfețe de I/O seriale sau paralele
- b) Conectarea strâns cuplata a busurilor prin tehnica Bus - Windows (BW)





**Figura 8.17.** Legaturi slabe si tari

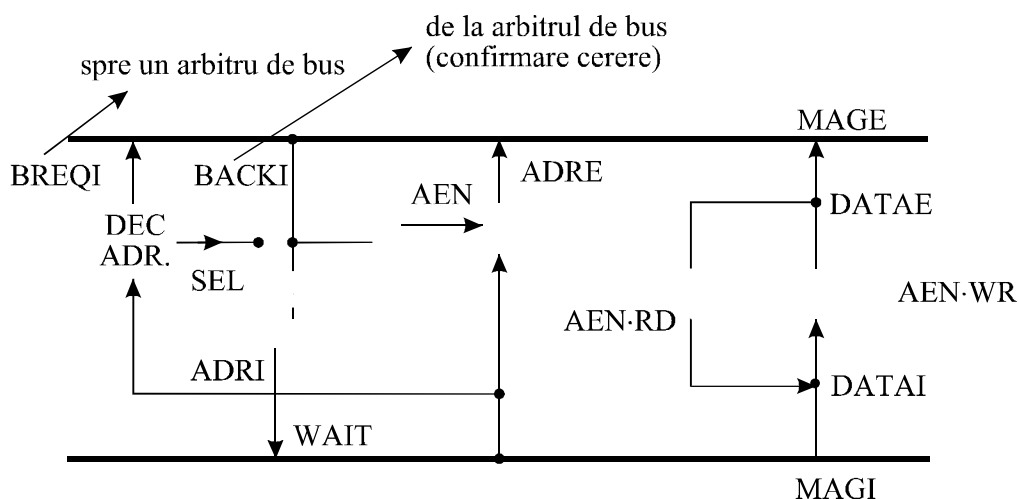
- a. Sa presupunem ca un procesor de pe BUS1 doreste sa scrie într-o locatie de memorie de pe BUS2. Pentru asta, masterul pe BUS1 scrie în I/O de legatura un mesaj cu urmatorii parametrii: tip operatie, adresa, data, adresa procesor destinatie, sau DMA. I/O1 trimite aceste informatii pe busul de legatura la I/O2. Apoi I/O2 genereaza o întrerupere la procesorul destinatie sau DMA-ul respectiv care efectueaza operatia.
- b. Secventa operatiilor succesive de acces este:
  1. interfata BW recunoaste ca un SLAVE2 este adresat pe bus1
  2. BW master, genereaza o cerere de BUS2
  3. Când accesul la BUS2 e acordat, prin BW se face transferul în mod transparent pentru masterul de pe BUS1



**Figura 8.18.** Modelul BW (Detaliu)

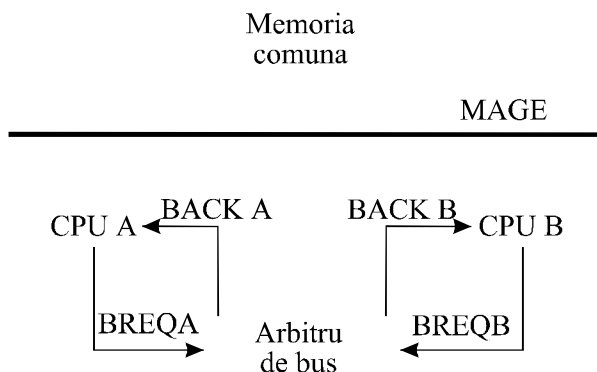
Esenta implementarii hardware a unui SMM consta în proiectarea unui sistem de comunicare între MAGI a oricarui SBC si respectiv MAGE. O solutie consta în plasarea pe MAGE a unei memorii RAM comune, accesibile oricarui SBC, pe post de mailbox. Comunicatia între SBC-uri s-ar face în acest caz numai prin RAM-ul comun.

În acest caz, BIM-ul oricarui  $P_i$  va receptiona adresele de pe MAGI si va recunoaste adresa aferenta memoriei comune plasata pe MAGE  $\Rightarrow$  va lansa o cerere de bus (BUSRQ) pe MAGE  $\Rightarrow$  pune  $P_i$  în WAIT daca MAGE este ocupata sau relativ lenta.



**Figura 8.19.** Accesarea magistralei externe

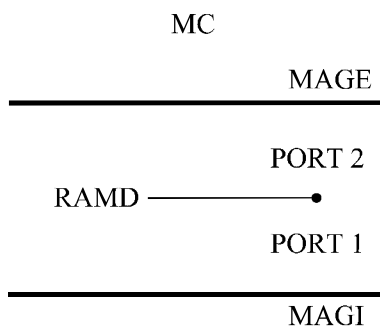
Pentru a rezolva cererile simultane de acces la resursa comuna din partea mai multor SBC-uri, exista un modul numit arbitru de bus (prioritati fixe sau rotitoare).



**Figura 8.20.** Arbitrarea magistralei

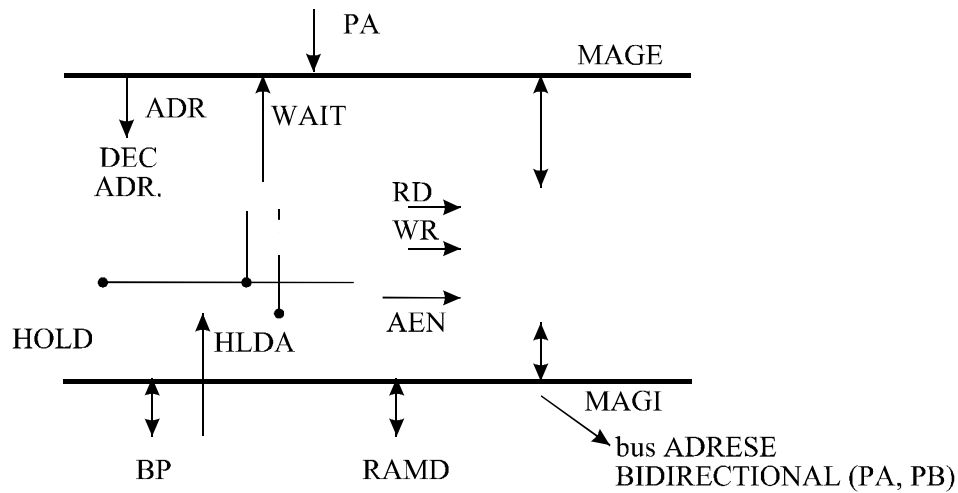
Solutia cu memorie comuna externa exclusiv concentrata pe MAGE prezinta dezavantajul dublarii timpului de ocupare al MAGE, pentru comunicatia CPUA  $\rightarrow$  MEM  $\rightarrow$  CPUB. O solutie care ar elimina acest dezavantaj consta în partajarea memoriei comune în 2 zone:

- memorie comuna externa concentrata, conectata fizic la MAGE, cu acces direct din partea oricarui procesor
- memorie comuna externa distribuita (D) în mod egal de toate procesoarele, accesata pe MAGI de propriul procesor si respectiv pe MAGE de oricare alt procesor (memorie biport).



**Figura 8.21.** Comunicare prin intermediul memoriei biport

Este posibil ca memoria RAMD sa nu fie dublu port (accesibila MAGI, MAGE) ci doar uniport (MAGI) - memorie locala distribuita. În principiu, accesul la o memorie globala distribuita (dublu port) se face ca în figura urmatoare.



**Figura 8.22.** Accesul la memoria globala

PA pune pe MAGE o adresa ce corespunde accesarii memoriei RAMD. Decodicatorul de adresa sesizeaza si activeaza HOLD → PB ⇒ PA în WAIT pe MAGE. La finele ciclului de bus în curs, PB activeaza HLDA ⇒ WAIT inactiv ⇒ PA acceseaza RAMD datorita cuplarii MAGE ⇔ MAGI prin bufferele TS bidirectionale.

### Clasificarea procesoarelor si memoriilor d.p.d.v. al adresabilitatii

Procesoare

- a) P1=posibilitati de adresare MAGI, MAGE
- b) P2=posibilitati de adresare numai pe MAGI

Memorii

- a) M1=accesibila pe MAGI si MAGE (RAMD distribuita)
- b) M2=accesibila exclusiv pe MAGI (locala)
- c) m3=accesibila exclusiv pe MAGE (concentrata)

D.p.d.v. al SBC-urilor avem:

- a) C1 ⇒ P1+M1 (eventual + M2)
- b) C2 ⇒ P1+M2
- c) C3 ⇒ P2+M1 (eventual + M2)

Prin combinarea acestor tipuri de SBC si memorii se obtin diverse arhitecturi caracteristice.

## 1) SBC C1

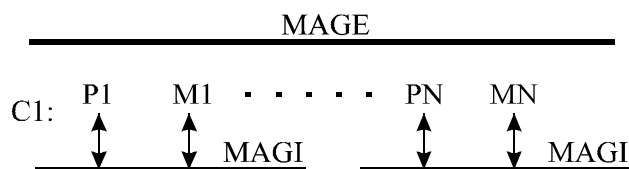


Figura 8.23. Modelul SBC C1

Prezinta flexibilitate si posibilitati multiple de comunicare între SBC-uri. M1 determina o scadere a traficului pe MAGE. Comunicarea între calculatoare se realizeaza prin memoriile M1 pe post de mailboxuri distribuite.

## 2) C1+C2

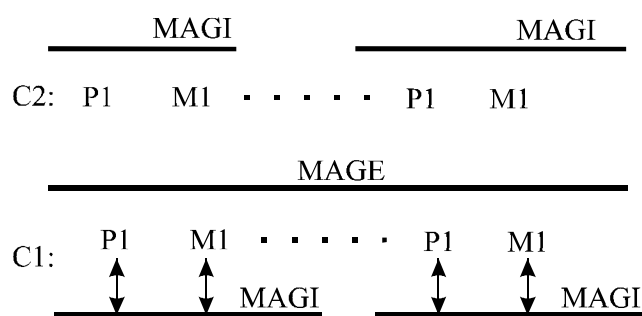


Figura 8.24. Modelul C1+C2

Comunicatia între C2 se poate face prin M1 din C1. Aceste comunicatii efectueaza negativ traficul pe MAGE .

## 3) C1+C3

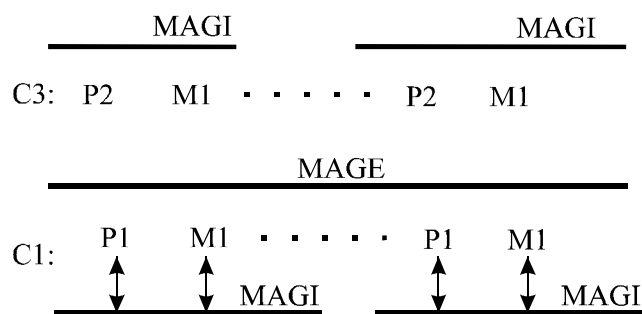
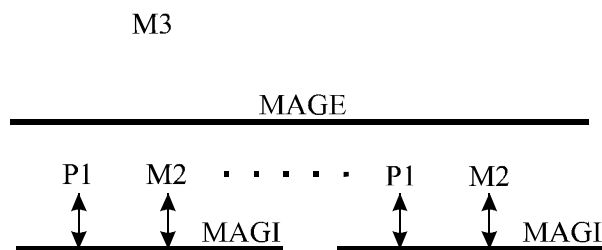


Figura 8.25. Modelul C1 + C3

C3 practic nu comunica între ele. Comunicatia C1-C3 se face prin M1 de pe C3. Aplicatia tipica pe un asemenea SMM consta în realizarea unor sisteme ierarhizate în care C3 realizeaza cuplarea la un proces condus.

#### 4) C2+C3 (Memorie comuna centralizata)

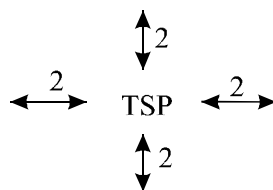


**Figura 8.26.** Modelul C2+C3

Comunicatia între oricare 2 SBC-uri se face prin intermediul memoriei comune M3  $\Rightarrow$  încărcare mare a lui MAGE. Se aplica la SMM omogene.

## 8.9. TRANSPUTERE ÎN SMM

Transputerul (Transistor-Computer, TSP) este un  $\mu$ procesor RISC pe 32 de biti, cu o arhitectura ce permite implementarea limbajului concurrent OCCAM - considerat a fi limbajul "nativ" al TSP și SMM cu TSP-uri. TSP este construit ca element de baza al arhitecturilor paralele cu posibilitati evolute de comunicare între procesele paralele. Așa de exemplu, TSP T-800 (INMOS-CO) detine 4 Ko SRAM intern, 4 canale externe de comunicare intertransputere, procesor FPP etc.



**Figura 8.27.** Link-urile unui TSP

Proiectarea TSP exploatează disponibilitatea memoriei interne rapide, folosind doar 6 registri interni pentru executia proceselor secventiale:

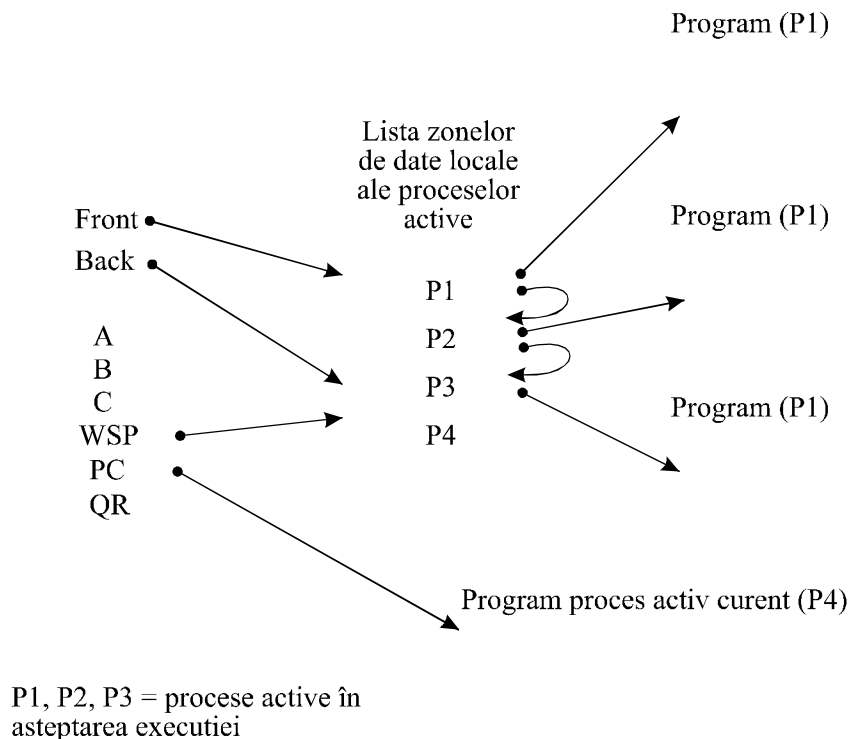
- Workspace Pointer (WSP) - care pointeaza spre o zona de memorie unde sunt stocate variabilele locale ale procesorului activ curent.
- Operand register (OR) - care este utilizat în formarea operanzilor instructiunii.
- Registrul Instruction Pointer (PC) - pointeaza spre instructiunea urmatoare de executat.
- Registrii A,B,C - formeaza o stiva de evaluare (FIFO), reprezentând sursa respectiv destinatia pentru operatiile ALU. Instructiunile ALU se refera la ei în mod implicit. De exemplu o instructiune ADD, aduna cele 2 valori din vârful stivei (A). Se poate opera asupra acestor registri si prin instructiunea tip LOAD/STORE (set de instructiuni dupa modelul RISC).

### **Suportul pentru concurenta**

TSP detine un planificator hardware  $\mu$ codat care asigura un suport eficient pentru modelul OCCAM de concurenta si comunicare. În orice moment, un proces concurent poate fi:

- activ = daca este în executie (curent) sau în lista de asteptare a proceselor active.
- inactiv = daca este gata (pregatit) pentru comunicare (input/output) sau daca se afla într-o rutina de asteptare a unui anumit moment (eveniment).

Procesele active care asteapta sa fie executate sunt pastrate într-o lista înlantuita a spatiilor de lucru, implementata prin 2 registri: Front - pointeaza la zona de lucru (date) a primului proces din lista (P1) respectiv Back - care pointeaza la zona de date a ultimului proces din lista (Pn). Aceste zone de date memoreaza întreg contextul procesului respectiv, inclusiv PC-ul de revenire.



**Figura 8.28.** Comunicatia interprocese

Un proces este executat pâna când devine inactiv. Când un proces ajunge inactiv, PC-ul sau este salvat în spatiul sau de lucru (Pk) si urmatorul proces din lista este activat curent.

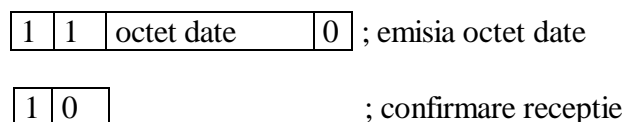
### Comunicatiile

Comunicatiile între procese sunt realizate cu ajutorul canalelor TSP. Un canal intern poate exista între 2 procese care se executa pe acelasi TSP si acest canal este implementat cu ajutorul unui singur cuvânt de memorie. Un canal extern poate exista între 2 procese care se executa pe TSP-uri diferite si este implementat printr-un canal serial bidirectional de comunicatie (din cele 4 ale TSP-ului). Conform modelului OCCAM, comunicatiile interprocese au loc atunci când atât procesul care face "output" cât si cel care face "input" sunt pregatite ("ready").

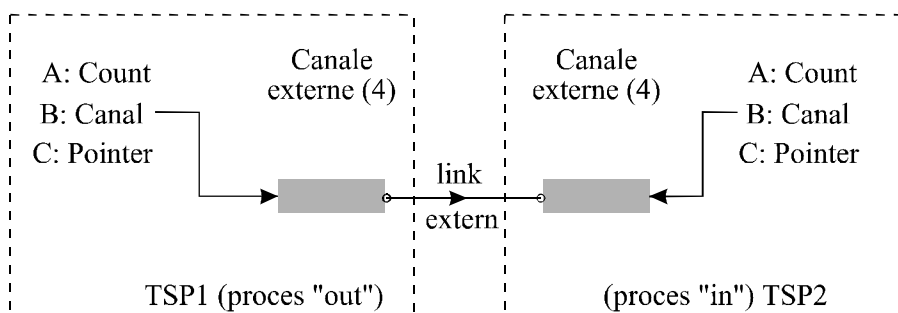
Un proces face un "input" sau "output" încarcând în stiva de evaluare: A=nr. de octeti de transferat, B=adresa canalului de comunicatie (un discriminator de adrese deduce intern sau extern), C=pointer la "mesajul" de transferat. Apoi, va executa o instructiune de tip IN/OUT mesaj. O legatura între 2 transputere este implementata prin conectarea unei interfete de



legatura a unui TSP cu cea a celui alt TSP, prin 2 fire unidirectionale, prin OCCAM, unul în fiecare directie. Mesajele sunt transmise ca o secventa de biti cuprinzând un bit de start ('1'), un unu logic, opt biti de date si un bit de STOP ('0'). O confirmare este transmisa ca o secventa cuprinzând un bit de START si unul de STOP. Ea indica faptul ca procesul a fost capabil sa primeasca octetul de date si are loc în buffer pentru urmatorul.



Când un mesaj este pasat printr-un canal extern, TSP-ul da interfeței autonome de legatura sarcina de transfer a mesajului si scoate procesul din lista proceselor active. Când mesajul a fost transferat, interfata de legatura face procesorul sa replanifice procesul aflat cu executia celorlalte procese, în paralel cu transferul de mesaje (suprapunere executie/comunicare).



**Figura 8.29.** Transferul de mesaje prin canalul extern

### Limbajul OCCAM – câteva aspecte

Permite scrierea unui program sub forma mai multor procese concurente (fire) executabile pe unul sau pe mai multe TSP-uri interconectate. Procesele concurente se vor distribui spre executie TSP-urilor din SMM prin intermediul links-urilor externe si vor putea fi procesate în paralel. Chiar daca aplicatia utilizeaza un singur TSP, programul poate fi construit ca un set de procese concurente care ar putea rula pe un anumit numar de TSP-uri. Acest stil de proiectare urmeaza cele mai bune traditii ale programarii structurate: procesele opereaza independent asupra variabilelor interne, cu exceptia cazurilor când interactioneaza explicit prin intermediul canalelor de comunicatie. Un set de procese

concurrente poate rula pe un singur TSP sau, pentru mărirea performanței, pot fi partitionate pe un număr oarecare de TSP-uri.

Toate programele OCCAM sunt construite pe baza a 3 procese primitive: asigurarea (unei variabile), intrarea și ieșirea. Procesul de intrare atribuie unei variabile a programului valoarea citită de pe un canal de intrare.

**Exemplu:**  $\text{chan } 3 ? x$  înseamnă că variabila  $x$  primește valoarea citită de pe canalul de intrare 3. Analog, procesul de ieșire:  $\text{chan } 5 ! 4 \Leftrightarrow$  "întregul" 4 este emis pe canalul 5 de ieșire.

Comunicatie prin intermediul unui canal nu poate starta până când ambele procese (in/out) nu sunt pregătite. Procesele primitive anterioare, pot fi grupate în așa-zise construcții în cadrul unui program OCCAM (SEQ, ALT, PAR).

### Construcția SEQ

Specifică faptul că procesele pe care le conține se vor executa secvențial, în ordinea scrierii lor. Spre deosebire de limbajele secvențiale, în OCCAM acest fapt trebuie specificat explicit.

### Construcția PAR

Specifică faptul că procesele pe care le conține se vor executa în paralel. Construcția PAR startează deci simultan procesele componente și se termină când toate procesele s-au terminat (sincronizare la bariera a proceselor înglobate).

### Construcția ALT

În cadrul construcției ALT care conține mai multe procese, se execută doar procesul al cărui canal de intrare asociat devine activ primul. După executia acestui proces construcția ALT se termină.

#### Exemplu:

ALT

$\text{chan1 } ? x$	
proces 1	; (Reglare "volum")
$\text{chan2 } ? x$	
Proces 2	; (Reglare "culoare")
$\text{chan3 } ? x$	
Proces 3	; (Modificare "canal")

|  
|

### Comunicatia între procesoare

Reprezinta esenta programarii în OCCAM. În cazul cel mai simplu, sunt necesare 2 procesoare care se executa în paralel si un canal de legatura între ele. Comunicatia între procesele aferente unei constructii PAR, trebuie sa se faca numai prin intermediul canalelor - si nu atribuirilor - comunicatie. Urmând modelul OCCAM, comunicatiile au loc atunci când atât procesul care face "input" cât si cel care face "output", sunt gata. În consecinta, un proces care este gata trebuie sa astepte pâna când cel de al doilea devine la rândul sau gata.

#### Exemplu:

```
PAR
  INT x:
  SEQ
    input ? x
    com ! 2x
  INT y,z:
  SEQ
    z=z+5
    com ? y
    output ! y+1
```

Într-o constructie PAR, numai 2 procese pot folosi un anumit canal, unul pentru emisie, celalalt pentru receptie, în caz contrar rezultând un conflict pe canal. Trebuie avuta atentie astfel încât procesele din cadrul unei constructii PAR sa nu se astepte reciproc a.î. sa nu starteze nici unul ("deadlock"), ca în exemplul urmator.

#### Exemplu:

```
PAR
  SEQ
    com 1!2
    com 2?x
  SEQ
    com 2!3
    com 1?y
```

**Obs.** Solutia în acest caz consta în interschimbarea ordinii instructiunilor în cadrul uneia dintre cele 2 constructii SEQ.

Fiecare TSP detine un TIMER pentru implementarea prin soft a întârzierilor, pe diverse canale de timp (în general 1 ms). Un timer se comporta ca un canal intern, de pe care doar se receptioneaza (timpul curent) prin executia unei instructiuni "read timer". Un proces se poate pune în asteptare singur, executând instructiunea "timer input", caz în care va deveni disponibil pentru executie dupa atingerea unui anumit timp. Instructiunea "timer input" necesita specificarea unei valori a timpului. Daca aceasta valoare este în "trecut" (adica ClockReg AFTER TimpSpecificat) instructiunea nu are nici un efect (NOP). Daca însa timpul este în "viitor", atunci procesul este blocat. La atingerea timpului specificat procesul este planificat din nou. Exista de asemenea posibilitatea de a aloca canalele hardware externe la diverse canale logice (program) prin functia PLACE. Astfel de exemplu porturile de I/O pot fi adresate similar cu canalele:

**Exemplu:**

```

PORT OF BYTE
PLACE serial.status AT #3F8h:
INT STAT:
|
|
serial.status ? STAT
|
|
|

```

Ca si în limbajele secventiale si în OCCAM exista procese repetitive (WHILE <cond>), procese conditionate (IF THEN ELSE), proceduri (PROC, proces având un nume asociat), functii (FUNCTION, proces apelat ce returneaza rezultate) etc.

## 8.10. ELEMENTE PRIVIND IMPLEMENTAREA SISTEMULUI DE OPERARE

Pe lângă resursele pe care le creează arhitectura SMM, sistemul de operare (S.O.) și aplicația creează noi resurse și introduce ca urmare mecanisme de gestiune a acestora. Resursele sunt date de:

- 1) Procesele care aparțin S.O. sau aplicației. Un proces reprezintă în fapt o pereche "program-context  $\mu$ procesor", aflată în execuție.
- 2) Procedurile, care implementează chiar funcțiile S.O. al SMM
- 3) Zone de date și variabile care aparțin unui  $\mu$ procesor (locale) sau sunt prezente în memoria comună a SMM (partajate).

Mecanismele și componentele unui S.O. pe SMM implementează un număr de 3 funcții care se referă la:

- sincronizare - reprezentată de necesitatea coordonării operațiilor pe o resursă comună
- excluderea mutuală - dată de necesitatea utilizării strict secvențiale a unei resurse de către procesele care intra în competiție pentru câștigarea ei
- comunicarea interprocese - cu condiția menținerii coerenței variabilelor globale.

Mecanismele care implementează aceste funcții sunt ierarhizate pe 2 nivele. Pe nivelul "inferior", acestea sunt responsabile cu coordonarea execuției proceselor, reprezentând mecanismele standard ale unui S.O. concurent. Pe nivelul "superior", funcțiile respective sunt responsabile cu coordonarea activității  $\mu$ procesorului în cadrul aplicației. Evident, între cele 2 nivele există interdependențe strânse.

Există un număr de 2 relații fundamentale între procese:

- a. Utilizarea unei resurse comune care nu a fost produsă de nici unul din procese
- b. De "producător-consumator", în care un proces creează resurse care urmează să fie utilizate și de alte procese. În cadrul acestei relații apare necesitatea evitării interblocajului ("deadlock"). Acesta poate să apară în cazul în care procesele implicate se pun mutual în așteptare.

Pentru implementarea mecanismelor de gestiune, apar 3 concepte fundamentale:

1. Regiune critică (critical section) - desemnând o resursă (secțiune de cod) care poate fi controlată la un moment dat numai de către un singur proces

2. Operatie atomica - secventa de cod neintreruptibila la nici un nivel
3. Semafor - constructie logica utilizata pentru controlul intrarii si iesirii dintr-o regiune critica, fiind implementat în general printr-o variabila numerica de stare.

În cadrul mecanismelor de comunicare si cooperare interprocese, este esentiala componenta S.O. numita monitor. Acesta este privit ca o entitate statica care este activata prin procesele care solicita accesul la resursele comune gestionate de monitor. Din acest p.d.v., monitorul reprezinta o regiune critica de cod si date cu rol de gestionare a accesului proceselor la un set de resurse comune conform unei anumite discipline de planificare. Pentru realizarea acestui scop, monitorul este alcatuit dintr-un set de proceduri si semafoare cu rol de gestionare a resursei pe care o monitorizeaza si de contorizare a referintelor la aceasta. Toate problemele legate de cooperarea proceselor sunt rezolvate într-un mod unitar în cadrul întregului SMM. Fiecare resursa din SMM are un monitor specific care functie de statutul resursei gestionate - locala sau partajata - poate fi rezident în memoria proprie a unui  $\mu$ procesor sau în memoria comuna. Deci procesele nu pot opera direct pe resursa comuna - care în acest caz e reprezentata prin zone de date comune - ci numai prin intermediul procedurilor monitorului aferent. Mecanismul de gestiune implementat de monitor va fi dat de algoritmul folosit în utilizarea resursei si respectiv mecanismul de planificare a accesului proceselor la acea resursa.

## 9. PROBLEME PROPUSE SPRE REZOLVARE

---

1. Consideram un procesor scalar pipeline cu 5 nivele (IF, ID, ALU, MEM, WB) si o secventa de 2 instructiuni succesive si dependente RAW, în doua ipostaze:

A.            i1: LOAD R<sub>1</sub>, 9(R<sub>5</sub>)  
              i2: ADD R<sub>6</sub>, R<sub>1</sub>, R<sub>3</sub>

B.            i1: ADD R<sub>1</sub>, R<sub>6</sub>, R<sub>7</sub>  
              i2: LOAD R<sub>5</sub>, 9(R<sub>1</sub>)

- Stabiliti cu ce întârziere (*Delay Slot*) startea a doua instructiune ?
- Dar daca se aplica mecanismul de *forwarding* ?  
În acest caz, pentru secventa **B**, cât ar fi fost întârzierea daca în cazul celei de a doua instructiuni, modul de adresare nu ar fi fost *indexat* ci doar *indirect registru* ? Comentati.
- Verificati rezultatele obtinute pe procesorul DLX. Determinati cresterea de performanta obtinuta aplicând mecanismul de *forwarding*  $[(IR_{Cu\ forwarding} - IR_{Fara\ forwarding}) / IR_{Fara\ forwarding}]$ .

**Obs.** Se considera ca operanzii instructiunilor sunt necesari la finele fazei ID, iar rezultatele sunt disponibile în setul de registri generali la finele fazei WB.

2. Scrieti o secventa de program asamblare RISC care sa reprezinte translatarea corecta a programului scris în limbaj C ? Initial, registrii R<sub>i</sub>, R<sub>k</sub>, R<sub>l</sub>, R<sub>j</sub>, R<sub>m</sub> contin respectiv variabilele i, k, l, j si m.

K = X[i-4]+12;  
L = Y[j+5] XOR K;  
M = K AND L;

Se considera programul executat pe un procesor scalar pipeline RISC cu 4 nivele (IF, ID, ALU/MEM, WB) si operanzii instructiunilor sunt necesari la finele fazei ID, iar rezultatele sunt disponibile în setul de registri generali la finele fazei WB. Se cere:

- a. Reprezentati graful dependentelor de date (numai dependentele de tip RAW).
- b. În câte impulsuri de tact se executa secventa de program asamblare ?
- c. Reorganizati aceasta secventa în vederea minimizarii timpului de executie (se considera ca procesorul detine o infinitate de registri generali).
- d. Aplicând tehnica de *forwarding*, în câte impulsuri de tact se executa secventa reorganizata ?

3. Se considera o arhitectura superscalara caracterizata de urmatoorii parametri (vezi **Figura 1: Schema bloc a unei arhitecturi superscalare** – L. Vintan, A. Florea – “Sisteme cu microprocesoare – Aplicatii”, Editura Universitatii, Sibiu, 1999, pag. 189):

**FR** = 4 instr. / ciclu; – nr. instructiuni citite simultan din cache-ul de instructiuni sau memoria de instructiuni în caz de miss în cache.

**IRmax** = 2 (respectiv 4) instr. / ciclu; – nr. maxim de instructiuni independente lansate simultan în executie.

**N\_PEN** = 10 impulsuri de tact; – nr. impulsuri de tact penalizare necesari accesului la memoria de instructiuni în caz de miss în cache.

**Latenta** = 2 impulsuri de tact; – nr. impulsuri de tact necesari executiei pentru orice tip de instructiune, lansata din buffer-ul de prefetch (unitati de executie nepipeline-izate).

**IBS** = 8 locatii (instructiuni); – dimensiunea buffer-ului de prefetch.

**RmissIC** = 40%; – rata de miss în cache-ul de instructiuni (din 5 citiri din IC, primele 2 sunt cu miss).

Consideram urmatoarea secventa succesiva de 20 instructiuni, caracterizata de hazarduri RAW aferente, executata pe arhitectura data.



$i1 - i2 - i3 - RAW - i4 - i5 - i6 - RAW - i7 - i8 - i9 - i10 - i11 - RAW - i12 - i13 - i14 - i15 - i16 - i17 - RAW - i18 - i19 - i20$ . (în continuare “nu mai sunt instructiuni de executat”)

**Obs.** În cadrul unui ciclu de executie se realizeaza urmatoarele: din partea inferioara a buffer-ului de prefetch sunt lansate maxim  $IR_{max}$  instructiuni independente, iar simultan în partea superioara a buffer-ului sunt aduse, daca mai e spatiu disponibil,  $FR$  instructiuni din cache-ul sau memoria de instructiuni.

Determinati cresterea de performanta (studiu asupra ratei medii de procesare) prin varierea parametrului  $IR_{max}$  de la 2 la 4 instructiuni / ciclu. Prezantati în fiecare ciclu de executie continutul buffer-ului de prefetch.

4. Consideram un procesor RISC scalar pipeline caracterizat printre altele de urmatoarele instructiuni:

ADD	Ri, Rj, Rk – al doilea operand poate fi si valoare imediata
LD	Ri, adresa
ST	adresa, Ri
MOV	Ri, Rj
BEQ	Ri, Rj, label
BNE	Ri, Rj, label
J label	

a. Acest procesor executa urmatoarea secventa:

ST	(R9), R6
LD	R10, (R9)

Rescrieti aceasta secventa folosindu-va de instructiunile cunoscute pentru a elimina **ambiguitatea referintelor la memorie** aparute în secventa originala data si a le executa mai rapid.

b. Se da secventa de instructiuni de mai jos:

ST	4(R5), R8
LD	R9, 8(R6)

Realizati o noua secventa cât mai rapida care sa înlocuiasca în mod corect pe cea de mai sus si care sa elimine posibila **ambiguitatea a referintelor la memorie** , favorizând executia instructiunii LD înainte de ST.

5. Dându-se urmatoarele secvente de instructiuni care implica dependente reale de date (RAW) sa se rescrie aceste secvente, cu un numar minim de instructiuni si folosind doar aceiasi registri (eventual R0 = 0 suplimentar), dar eliminând dependentele respective.

**Obs.** Unele instructiuni pot ramâne nemodificate.

- a)           MOV R6, R7  
              ADD R3, R6, R5
- b)           MOV R6, #4  
              ADD R7, R10,  
R6  
              LD R9, (R7)
- c)           MOV R6, #0  
              ST 9(R1), R6
- d)           MOV R5, #4  
              BNE R5, R3,  
Label
- e)           ADD R3, R4, R5  
              MOV R6, R3

6. Se considera o arhitectura superscalara caracterizata de urmatoarii parametri (vezi **Figura 1: Schema bloc a unei arhitecturi superscalare** – L. Vintan, A. Florea – “Sisteme cu microprocesoare – Aplicatii”, Editura Universitatii, Sibiu, 1999, pag. 189):

**FR** = 4 (respectiv 8) instr. / ciclu; – nr. instructiuni citite simultan din cache-ul de instructiuni sau memoria de instructiuni în caz de miss în cache.

**IR<sub>max</sub>** = 4 instr. / ciclu; – nr. maxim de instructiuni independente lansate simultan în executie.

**N<sub>PEN</sub>** = 10 impulsuri de tact; – nr. impulsuri de tact penalizare necesari accesului la memoria de instructiuni în caz de miss în cache.

**Latenta** = 2 impulsuri de tact; – nr. impulsuri de tact necesari executiei pentru orice tip de instructiune, lansata din buffer-ul de prefetch (unitati de executie nepipeline-izate).

**IBS** = 8 locatii (instructiuni); – dimensiunea buffer-ului de prefetch.

**R<sub>missIC</sub>** = 50% (initial); – rata de miss în cache-ul de instructiuni (din 2 citiri din IC, prima se va considera cu miss).

Pe arhitectura data se proceseaza urmatoarea secventa succesiva de 32 instructiuni, caracterizata de hazarduri RAW aferente.

*i1* – *i2* – *i3* – **RAW** – *i4* – *i5* – *i6* – **RAW** – *i7* – *i8* – *i9* – *i10* – *i11* – **RAW** – *i12* – *i13* – *i14* – *i15* – *i16* – *i17* – **RAW** – *i18* – *i19* – *i20* – *i21* – *i22* – **RAW** – *i23* – *i24* – *i25* – *i26* – *i27* – **RAW** – *i28* – *i29* – *i30* – *i31* – **RAW** – *i32*.

**Obs.** În cadrul unui ciclu de executie se realizeaza urmatoarele: din partea inferioara a buffer-ului de prefetch sunt lansate maxim **IR<sub>max</sub>** instructiuni independente, iar simultan în partea superioara a buffer-ului sunt aduse, daca mai e spatiu disponibil, **FR** instructiuni din cache-ul sau memoria de instructiuni.

Determinati cresterea de performanta (studiu asupra ratei medii de procesare) prin varierea parametrului **FR** de la 4 la 8 instructiuni / ciclu. De mentionat ca aceasta variatie a **FR** de la 4 la 8 implica diminuarea ratei de miss în cache-ul de instructiuni cu 50%. Prezentați în fiecare ciclu de executie continutul bufferului de prefetch. În ce consta limitarea performantei în acest caz ?

7. Se considera urmatoarea secventa de instructiuni executata pe un procesor pipeline cu 4 nivele (IF, ID, ALU/MEM, WB), fiecare faza necesitând un tact, cu urmatoarea semnificatie:

**IF** = citirea instructiunii din cache-ul de instructiuni sau din memorie

**ID** = decodificarea instructiunii si citirea operanzilor din setul de registri generali

**ALU / MEM** = executie instructiuni aritmetice sau accesare memorie

**WB** = înscriere rezultat în registrul destinație

Operanzii instrucțiunilor sunt necesari la finele fazei ID, iar rezultatele sunt disponibile în setul de registre generali la finele fazei WB.

```

i1:  ADD   Ri, R0, #i
i2:  ADD   Rj, Ri, #4
i3:  LOAD  R1, (Ri)
i4:  LOAD  R2, (Rj)
i5:  ADD   R3, R1, R2
i6:  SUB   R4, R1, R2
i7:  ABS   R4, R4
i8:  ADD   R1, R13, R14
i9:  DIV   R1, R1, #2
i10: STORE (Ri), R1

```

Se cere:

- Reprezentati graful dependentelor de date (RAW, WAR, WAW) și precizați în câte impulsuri de tact se execută secvența? Inițial, structura “*pipe*” de procesare este goală, registre inițializati cu 0.
- Reorganizați această secvență în vederea minimizării timpului de execuție (se consideră că procesorul detine o infinitate de registre generali disponibili). În câte impulsuri de tact s-ar procesa în acest caz secvența ?
- Ce simulează secvența inițială dacă în instrucțiunea i8 în locul registrilor R<sub>13</sub> am avea R<sub>3</sub> și în locul lui R<sub>14</sub> am avea R<sub>4</sub>. Precizați formula matematică obținută.

**8.** Se consideră secvența de program RISC:

```

i1:  ADD   R1, R2, #15
i2:  ADD   R3, R4, #17
i3:  ADD   R5, R3, R1
i4:  ADD   R6, R5, #12
i5:  ADD   R3, R7, #3
i6:  ADD   R8, R3, #2
i7:  ADD   R9, R8, #14

```

Se cere:

- Să se construiască graful dependentelor de date (RAW, WAR, WAW) aferent acestei secvențe și precizați în câte impulsuri de tact

- se executa secventa, stiind ca latentă de executie a instructiunii ADD este de 1 ciclu ?
- b. Sa se determine modul optim de executie al acestei secvente reorganizate, pe un procesor RISC superscalar cu 6 seturi de registri generali si 3 unitati ALU.
9. a) Are sens implemetarea unui bit de validare (V) pentru fiecare bloc din cache în cadrul unui sistem de calcul uniprocessor (fara DMA) ? Justificati.
- b) O exceptie *Page Fault* implica întotdeauna una de tip TLB miss ? Dar reciproc ?
10. a) Ce limitare principiala exista asupra ratei de fetch a instructiunilor ? Cum ar putea fi depasita aceasta limitare ?
- b) Descrieti succint tehnicile de eliminare a dependentelor RAW între instructiuni.
- c) Daca într-o arhitectura tip Tomasulo ar lipsi câmpurile de “tag” ( $Q_j, Q_i$ ) din cadrul statiilor de rezervare, considerati ca ar mai functiona schema ? Justificati punctual.
11. Se considera un microprocesor RISC cu o structura «pipe» de procesare a instructiunilor, având vectorul de coliziune atasat 101011. Sa se determine rata teoretica optima de procesare a instructiunilor pentru acest procesor [instr/ciclu] si sa se expliceze algoritmul dupa care trebuie introduse instructiunile în structura.
12. Fie vectorul de coliziune 1001011 atasat unui microprocesor RISC cu o structura «pipe» de procesare a instructiunilor. Sa se determine rata teoretica optima de procesare a instructiunilor pentru acest procesor [instr/ciclu] si explicitând algoritmul dupa care trebuie introduse instructiunile în structura. Determinati cresterea de performanta comparativa cu situatia în care s-ar procesa pe o structura CISC conventionala  $[(IR_{RISC} - IR_{CISC}) / IR_{CISC}]$ .
- 13.a) În cadrul unui procesor vectorial se considera urmatoarea secventa de program:
- $x = 0$   
for  $i = 1$  to 100 do

```

        x = x + A[i]*B[i];
    endfor

```

În câți cicli de tact se execută secvența ? Este buclă vectorizabilă ? În caz negativ, scrieți o nouă secvență de program care să aibă același efect dar care să fie executată mult mai rapid ? Determinați noul timp de execuție al secvenței ? Concret din ce motive se câștigă timp de procesare ?

- b) Să se proiecteze un cache de instrucțiuni cuplat la un procesor superscalar (VLIW). Lungimea blocului din cache se consideră egală cu rata de fetch a procesorului, în acest caz 8 instrucțiuni / bloc. Cache-ul va fi de tipul **4 way set associative** (cu 4 blocuri / set). Explicați semnificația fiecărui câmp utilizat (necesar) în proiectare.
  - c) Descrieți avantajelor introduse de Tomasulo în cadrul arhitecturii care îi poartă numele.
- 14.a)** Prezentați pașii succesivi aferenți drumului de la o arhitectură parametrizabilă dată, la instanța sa optimă, numită procesor.
- b) De ce nu este suficientă doar optimizarea unităților secvențiale de program (“basic-blocks”), fiind necesară optimizarea globală a întregului program?
  - c) Care sunt în opinia dvs. motivele pentru care microprocesoarele superscalare au un succes comercial net superior celor cu paralelism exploatat prin optimizări de program (“Scheduling” static) – de exemplu microprocesoare tip VLIW, EPIC, etc. ?
- 15.** Relativ la gestiunea memoriei în sistemele moderne, tratați într-o manieră concisă următoarea problemă:
- a. În ce rezidă necesitatea unui sistem de memorie virtuală (MV) ?
  - b. Explicați principiile protecției în sistemele cu MV ?
  - c. Explicați succint rolul TLB (Translation Lookaside Buffer) în traducerea adreselor.
  - d. În ce constă dificultățile implementării unui cache virtual ? Care ar fi avantajele acestuia ?
- 16.a)** Caracteristici ale structurilor de program care limitează accelerarea unui sistem paralel de calcul în raport cu unul secvențial;

- b) Tipuri arhitecturale de memorii cache. Avantajele/dezavantajele fiecărei organizari. Explicitati succint notiunea de coerenta a cache-urilor în sistemele multiprocesor;
- c) Limitari arhitecturale ale paradigmei superscalare si independente de masina, referitoare la:
  - maximizarea *ratei de aducere a instructiunilor din memorie*
  - maximizarea *ratei de executie a instructiunilor*.

**17.a)** Care este semnificatia termenilor:

- ❖ Arhitectura RISC (Reduced Instruction Set Computer)
- ❖ Arhitectura CISC (Complex Instruction Set Computer)

Care arhitectura este mai rapida si de ce ?

- b) Explicati semnificatia nivelelor pipeline aferente unui microprocesor (IF, ID, ALU, MEM, WB). Explicati avantajele introduse de conceptul de procesare "pipeline".
- c) Ce este o arhitectura VLIW (Very Large Instruction Word) ? Descrieti asemanarile si deosebirile dintre o arhitectura VLIW si una superscalara. Subliniati avantajele arhitecturii VLIW fata de o arhitectura conventionala de procesor.
- d) Un microprocesor cu 4 nivele pipeline (IF, ID, ALU/MEM, WB) executa urmatoarea secventa de cod:

```

ADD          ; Adunare
BR SUB1      ; Salt neconditionat - apel subrutina
SUB          ; Scadere
MUL          ; Înmultire
.
.
```

**SUB1:** ; Intrarea în subrutina - adresa primei  
; instructiuni din subrutina

Ce se întâmpla când procesorul întâlnește instructiunea de salt (situatia instructiunilor în "pipe")? Considerând ca procesorul primește o întrerupere după ce executa instructiunea de salt, explicati clar secventa de evenimente petrecute după receptia întreruperii.

- 18.** Consideram un procesor pipeline cu 5 nivele (IF, ID, ALU, MEM, WB) în care conditia de salt este verificata pe nivelul de decodificare, operanzii instructiunilor sunt necesari la finele fazei ID, iar rezultatele sunt disponibile în setul de registri generali la finele fazei WB. Trasati diagrama ciclului de tact a procesorului incluzând dependentele reale de

date (RAW), reprezentați graful dependentelor de date, la executia urmatoarei secvențe de instructiuni. Stabiliti cu ce întârziere (*Delay Slot*) startea a doua instructiune în cazul existentei unui hazard RAW între doua instructiuni; care este timpul total de procesare al secvenței. Explicit subliniați toate tipurile de hazard (de date, de ramificație) și dacă și unde poate fi aplicat mecanismul de forwarding. Presupunând ca instructiunea de salt este corect predictionată ca *non-taken* în câți cicli de tact se va procesa secvența ?

```
ADD R1, R2, R3
LD  R2, 0(R1)
BNE R2, R1, dest
SUB R5, R1, R2
LD  R4, 0(R5)
SW  R4, 0(R6)
ADD R9, R5, R4
```

- 19.a) În general un microprocesor consuma multe impulsuri de tact pentru a citi o locație de memorie DRAM, datorită latentei relativ mari a acesteia. Implementarea caror concepte arhitecturale micșorează timpul mediu de acces al microprocesorului la memoria DRAM ?
- b) Care este principalul concept arhitectural prin care se micșorează timpul mediu de acces al procesorului la discul magnetic ?

- 20.a) Care sunt principalele cauze ce limitează performanța unei structuri "pipeline" de procesare a instructiunilor mașina ?
- b) De ce timpul de execuție al unui program pe un multiprocesor cu N procesoare nu este în general de N ori mai mic decât timpul de execuție al aceluiași program pe un sistem uniprocessor ?
- c) La ce se referă necesitatea coerenței memoriilor cache dintr-un sistem multiprocesor ? Ce strategii principale de menținere a coerenței memoriilor cache cunoașteți ?

21. Să se proiecteze un cache de instructiuni cuplat la un procesor superscalar (VLIW). Lungimea blocului din cache se consideră egală cu rata de fetch a procesorului, în acest caz 4 instructiuni / bloc. Cache-ul va fi de tipul:

- a) semiasociativ, cu 2 blocuri / set (2 – way set associative)
- b) complet asociativ (full - associative)
- c) cu mapare directă (direct mapped)



Ce se întâmplă dacă în locul adresării cu adrese fizice se considera adresare cu adresa virtuală?

**22.a)** De ce este dificilă procesarea «Out of Order» a instrucțiunilor Load respectiv Store într-un program și de ce ar putea fi ea benefică?

b) Care dintre cele două secvențe de program s-ar putea procesa mai rapid pe un procesor superscalar cu execuție «Out of Order» a instrucțiunilor? Justificați.

**B1.**

for i=1 to 100

  a[2i]=x[i];

  y[i]=a[i+1];

a[2i]=x[i];

y[i]=a[i+1]+5;

**B2.**

  a[2]=x[1];

y[1]=a[2]+5;

for i=2 to 100

**23.** Se considera un procesor scalar pipeline, în 3 faze diferite de procesare (IF,EX,WR), fiecare fază necesitând un tact, cu următoarea semnificație:

**IF** = aducere și decodificare a instrucțiunii

**EX**=selectie operanzi din setul de registre și execuție

**WR**=înscrisere rezultat în registrul destinație

Se considera secvența de program:

1: R1<-- (R11)+(R12)

2: R1<-- (R1)+(R13)

3: R2 <-- (R3)+4

4: R2 <-- (R1)+(R2)

5: R1<-- (R14)+(R15)

6: R1<-- (R1)+(R16)

a) În câte impulsuri se execută secvența? (initial, structura «pipe» de procesare este «goala») Reorganizați această secvență de program în vederea minimizării timpului de execuție (procesorul detine o infinitate de registre generali disponibili). În câte impulsuri de tact s-ar procesa în acest caz secvența ?

- b) În câte tacte (minimum) s-ar procesa secvența dacă procesorul ar putea executa simultan un număr nelimitat de instrucțiuni independente? Se considera că procesorul poate aduce în acest caz, simultan, 6 instrucțiuni din memorie. Justificați.
24. Se considera o structură «pipe» de procesare a instrucțiunilor având un nivel de citire a operanzilor din setul de registre (RD), situat anterior unui nivel de scriere a rezultatului în setul de registre (WR). Careia dintre cele două operații (RD, WR) i se dă prioritate în caz de conflict și în ce scop ?
25. Se considera că 20% dintre instrucțiunile unui program determină ramificarea acestuia (salt efectiv). Care ar fi în acest caz rata de fetch (FR) posibilă pentru un procesor superscalar (VLIW – Very Long Instruction Word) având resurse hardware nelimitate și o predicție perfectă a branch-urilor (cunoaștere anticipată a adresei de salt) ? Este posibilă o depășire a acestei limitări fundamentale ? Dacă da, care ar fi noua limitare impusă parametrului FR prin soluția Dvs. ?
26. Un procesor superscalar poate lansa în execuție simultan maxim  $N$  instrucțiuni ALU independente. Logica de detecție a posibilelor hazarduri RAW (Read After Write) între instrucțiunile ALU are costul «C» (\$). Cât va costa logica de detecție dacă s-ar dori ca să se poată lansa simultan în execuție maxim  $(N+1)$  instrucțiuni ALU independente ? (Se vor considera costurile ca fiind direct proporționale cu «complexitatea» logicii de detecție a hazardurilor RAW).
27. Relativ la o memorie cache cu mecanism de adresare tip «mapare directă», precizați valoarea de adevăr a afirmațiilor de mai jos, cu justificările de rigoare.
- a) Rata de hit crește dacă capacitatea memoriei crește;
  - b) datele de la o anumită locație din memoria principală poate fi actualizată la orice adresă din cache;
  - c) Scrieri în cache au loc numai în ciclurile de scriere cu miss în cache;
  - d) Are o rată de hit net mai mare decât cea a unei memorii complet asociative și de aceeași capacitate.
28. Se considera secvența de program RISC:

```
1:  ADD  R1, R11, R12
2:  ADD  R1, R1, R13
3:  ADD  R2, R3, R9
4:  ADD  R2, R1, R2
5:  ADD  R1, R14, R15
```

- a) Reprezentati graful dependentelor de date (numai dependentele de tip RAW)
  - b) Stiind ca între 2 instructiuni dependente RAW si succesive e nevoie de o întârziere de 2 cicli, în câti cicli s-ar executa secventa ?
  - c) Reorganizati secventa în vederea unui timp minim de executie (nu se considera alte dependente decât cele de tip RAW).
- 29.a)** Considerând un procesor RISC pe 5 nivele pipe (IF, ID, ALU, MEM, WB), fiecare durând un ciclu de tact, precizati câti cicli de întârziere («branch delay slot») impune o instructiune de salt care determina adresa de salt la finele nivelului ALU ?
- b) De ce se prefera implementarea unor busuri si memorii cache separate pe instructiuni, respectiv date în cazul majoritatii procesoarelor RISC (pipeline) ?
  - c) De ce sunt considerate instructiunile CALL / RET mari consumatoare de timp în cazul procesoarelor CISC (ex. I-8086) ? Cum se evita acest consum de timp în cazul microprocesoarelor RISC ?
- 30.** Considerând un microprocesor virtual pe 8 biti, având 16 biti de adrese, un registru A pe 8 biti, un registru PC si un registru index X, ambele pe 16 biti si ca opcode-ul oricarei instructiuni e codificat pe 1 octet, sa se determine numarul impulsurilor de tact necesare aducerii si executiei instructiunii «memoreaza A la adresa data de (X+deplasament)». Se considera ca instructiunea e codificata pe 3 octeti si ca orice procesare (operatie interna) consuma 2 tacte. Un ciclu de fetch opcode dureaza 6 tacte si orice alt ciclu extern dureaza 4 tacte.
- 31.** Relativ la o arhitectura de memorie cache cu mapare directa se considera afirmatiile:
- a) Nu permite accesul simultan la câmpul de date si respectiv «tag» al unui cuvânt accesat.

- b) La un acces de scriere cu hit, se scrie în cache atât data de înscris cât și «tag-ul» aferent.
- c) Rata de hit crește ușor dacă 2 sau mai multe blocuri din memoria principală - accesate alternativ de către microprocesor - sunt mapate în același bloc din cache.

Stabiliți valoarea de adevăr a acestor afirmații și justificați pe scurt răspunsul.

**32.** Ce corectie (doar una!) trebuie făcută în secvența de program asamblare pentru ca traducerea de mai jos să fie corectă și de ce? Inițial, registrele  $R_i$ ,  $R_k$ ,  $R_l$ ,  $R_j$  conțin respectiv variabilele  $i$ ,  $k$ ,  $l$ ,  $j$ . Primul registru după mnemonica este destinație.  $(R_j + \text{offset})$  semnifică operand în memorie la adresa dată de  $(R_j + \text{offset})$ .

$k = a[i+2] + 5;$	i1:    ADD $R_k, \#2, R_i$
$l = c[j+9] - k;$	i2:    LOAD $R_k, (R_k+0)$
	i3:    ADD $R_k, R_k, \#5$
	i4:    ADD $R_l, \#9, R_j$
	i5:    LOAD $R_l, (R_j+0)$
	i6:    SUB $R_l, R_l, R_k$

**33.** Se consideră un microsistem realizat în jurul unui microprocesor care ar accepta o frecvență maximă a tactului de 20 MHz. Regenerarea memoriei DRAM se face în mod transparent pentru microprocesor. Procesul de regenerare durează 250 ns. Orice ciclu extern al procesorului durează 3 perioade de tact. Poate funcționa în aceste condiții microprocesorul la frecvența maximă admisă? Justificați.

**34.** Explicați concret rolul fiecăreia dintre fazele de procesare (ALU, MEM, WB) în cazul instrucțiunilor:

- a) STORE R5, (R9)06h;  
sursa
- b) LOAD R7, (R8)F3h;  
dest
- c) AND R5, R7, R8.

dest

35. Se considera un procesor scalar pipeline, în 3 faze diferite de procesare (IF, EX, WR), fiecare faza necesitând un tact, astfel:

**IF** = fetch instructiune si decodificare;

**EX** = selectie operanzi din setul de registri si executie;

**WB** = înscriere rezultat în registrul destinatie.

- a) În câte impulsuri de tact se executa secventa de program de mai jos ?  
b) Reorganizati aceasta secventa în vederea minimizarii timpului de executie.

```
1:  ADD  R3, R2, #2
2:  ADD  R1, R9, R10
3:  ADD  R1, R1, R3
4:  ADD  R2, R3, #4
5:  ADD  R2, R1, R2
6:  STORE R3, (R1)2
```

36. Un procesor pe 32 biti la 50 MHz, lucreaza cu 3 dispozitive periferice prin interogare. Operatia de interogare a starii unui dispozitiv periferic necesita 100 de tacte. Se mai stie ca:

- a) interfata cu mouse-ul trebuie interogata de 30 de ori / s pentru a fi siguri ca nu se pierde nici o «miscare» a utilizatorului.  
b) floppy - discul transfera date spre procesor în unitati de 16 biti si are o rata de transfer de 50 ko / s.  
c) hard - discul transfera date spre procesor în unitati de 32 biti si are o rata de transfer de 2 Mo / s.

Determinati în [%], fractiunea din timpul total al procesorului, necesara interogarii starii fiecarui periferic. Comentati.

37. Se considera instructiunea (I-8086):

```
3000h:  MOV  [BX]0F3h, AX
EA                dest  sursa
```

- a) La ce adresa fizica se aduce opcode-ul instructiunii ?

b) La ce adrese fizice se scriu registrii AL, respectiv AH ?

Înainte de executia instructiunii avem: CS = 1D00h

BX = 1B00h

SS = 2000h

DS = DF00h.

**38.** Se considera instructiunea (I-8086):

2000h:    PUSH AX  
EA

a) De la ce adresa se aduce instructiunea ?

b) La ce adrese fizice se scriu registrii AL, respectiv AH ?

Se stie ca înainte de executia instructiunii PUSH avem: CS = AE00h

SS = 1FF0h

SP = 001Eh

DS = 1F20h.

**39.** Un automat de regenerare al memoriilor DRAM declanseaza efectiv procesul de regenerare daca sunt simultan îndeplinite conditiile:

a) activare semnal cerere refresh (CREF).

b) microprocesorul nu lucreaza momentan cu memoria. Având în vedere dezideratul regenerarii «transparente» (sa nu fie simtita de catre microprocesor), ar functiona corect automatul ? Comentati si sugerati o eventuala corectie.

**40.** Consideram 3 memorii cache care contin 4 blocuri a câte un cuvânt / bloc. Una este complet asociativa, alta semiasociativa cu 2 seturi a câte 2 cuvinte si ultima cu mapare directa. Stiind ca se foloseste un algoritm de evacuare de tip LRU, determinati numarul de accese cu HIT pentru fiecare dintre cele 3 memorii, considerând ca procesorul citeste succesiv de la adresele 0, 8, 0, 6, 8, 10, 8 (primul acces la o anumita adresa va fi cu MISS).

**41.** Se considera secventa de program RISC:

```
1:  ADD  R3, R2, #2
2:  ADD  R1, R9, R10
3:  ADD  R1, R1, R3
```

4:    ADD   R2, R3, #4

5:    ADD   R2, R1, R2

Între doua instructiuni dependente RAW si succesive în procesare, e nevoie de o întârziere de 1 ciclu de tact.

a) În câti cicli de tact se executa secventa initiala ?

b) În câti cicli de tact se executa secventa reorganizata aceasta secventa în vederea unui timp minim de procesare ?

42. Se considera o unitate de disc având rata de transfer de  $25 \times 10^4$  biti/s, cuplata la un microsystem. Considerând ca transferul între dispozitivul periferic si CPU se face prin întrerupere la fiecare octet, în mod sincron, ca timpul scurs între aparitia întreruperii si intrarea în rutina de tratare este de  $2\mu s$  si ca rutina de tratare dureaza  $10\mu s$ , sa se calculeze timpul pe care CPU îl are disponibil între 2 transferuri succesive de octeti.

43. a. Daca rata de hit în cache ar fi de 100%, o instructiune s-ar procesa în 8.5 cicli de tact. Sa se exprime în [%] scaderea medie de performanta daca rata de hit devine 89%, orice acces la memoria principala se desfasoara pe 6 tacte si ca orice instructiune face 3 referinte la memorie.

b. De ce e avantajoasa implementarea unei pagini de capacitate «mare» într-un sistem de memorie virtuala ? De ce e dezavantajoasa aceasta implementare ? Pe ce baza ar trebui facuta alegerea capacitatii paginii ?

44. Se considera un procesor scalar pipeline, în 3 faze diferite de procesare (IF, EX, WR), fiecare faza necesitând un tact, astfel:

**IF** = fetch instructiune si decodificare;

**EX** = selectie operanzi din setul de registri si executie;

**WB** = înscriere rezultat în registrul destinatie.

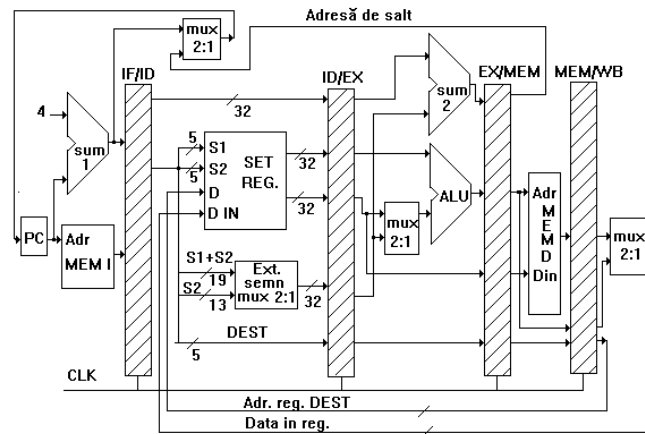
a) În câte impulsuri de tact se executa secventa de program de mai jos ?

b) Reorganizati aceasta secventa în vederea minimizarii timpului de executie (se considera ca procesorul detine o infinitate de registri generali).

- 1:  $R1 \leftarrow (R11) + (R12)$
- 2:  $R1 \leftarrow (R1) + (R13)$
- 3:  $R2 \leftarrow (R3) + 4$
- 4:  $R2 \leftarrow (R1) + (R2)$
- 5:  $R1 \leftarrow (R14) + (R15)$
- 6:  $R1 \leftarrow (R1) + (R16)$

45. Se considera un microprocesor RISC cu o structura «pipe» de procesare a instructiunii, având vectorul de coliziune atasat 01011. Sa se determine rata teoretica optima de procesare a instructiunii pentru acest procesor [instr/ciclu].
46. De ce implementarea algoritmului lui R. TOMASULO într-o arhitectura superscalara ar putea reduce din «presiunea» la citire asupra seturilor de registri generali ? Gasiti vreo similitudine în acest sens, între un CPU superscalar având implementat acest algoritm si un CPU de tip TTA (Transport Triggered Architecture) ?
47. De ce considerati o instructiune de tip RETURN este mai dificil de predictionat printr-un predictor hardware ? Puteti sugera vreo solutie în vederea eliminarii acestei dificultati ? În ce consta noutatea «principiala» a predictoarelor corelate pe doua nivele ?
48. Cum credeti ca s-ar putea masura printr-un simulator de tip «trace driven», câstigul de performanta introdus de tehnicile de paralelizare a buclelor de program (ex. «Loop Unrolling», «Software Pipelining», etc.)
49. Cum explicati posibilitatea interblocarii proceselor în cadrul limbajului OCCAM ? Ce întelegeti prin «sectiune critica de program» în cadrul unui sistem multimicro ? Care este «mesajul» transmis de «legea lui AMDAHL» pentru sistemele paralele de calcul ?
50. Se considera structura hardware a unui microprocesor RISC, precum în figura de mai jos.





Raspundeti la urmatoarele întrebări.

a) Ce tip de instructiuni activeaza sumatorul «sum 2» si în ce scop ?

b) Într-un tact, la setul de registri pot fi necesare 2 operatii simultane: citire (nivelul RD din pipe), respectiv scriere (nivelul WB din pipe). Carei operatii i se da prioritate si în ce scop ?

c) Ce rol are unitatea ALU în cazul unei instructiuni de tip LOAD ?

d) Ce informatie se memoreaza în latch-ul EX/MEM în cazul instructiunii: ST (R7)05, R2 si de unde provine fiecare informatie ?

**51.** Se considera secventa de program RISC:

```

1:   SUB   R7, R2, R12
2:   ADD   R1, R9, R10
3:   ADD   R1, R1, R7
4:   SUB   R2, R7, R12
5:   ADD   R2, R1, R2
6:   ADD   R1, R6, R8
7:   ADD   R1, R1, R7
8:   SUB   R1, R1, R12
9:   LD    R1, (R1)2
10:  LD    R4, (R4)6
11:  ADD   R1, R4, R1
12:  ADD   R1, R1, R2
13:  ST    R1, (R4)16
14:  ST    R7, (R1)16

```

- a) Sa se construiasca graful dependentelor / precedentelor de date aferent acestei secvente. Cu exceptia LOAD-urilor care au latenta de 2 cicli, restul instructiunilor au latenta de 1 ciclu.
- b) În baza algoritmului LIST SCHEDULING, sa se determine modul optim de executie al acestei secvente (nr. cicli), pentru un procesor superscalar având 2 unitati ADD, 1 unitate SUB si 1 unitate LOAD/STORE. Unitatea pentru LOAD este nepipeline-izata.

În limbaj de asamblare MIPS prezentati solutiile urmatoarelor probleme:

- 52.** Scrieti un program folosind recursivitatea, care citeste caractere de la tastatura si le afiseaza în ordine inversa.

*Obs.* Nu se lucreaza cu siruri, nu se cunoaste numarul de caractere citite, sfârșitul sirului va fi dat de citirea caracterului '0'.

Modificati programul astfel încât '0' – care marcheaza sfarsitul sirului, sa nu fie tiparit.

- 53.** Scrieti un program folosind recursivitatea, care citeste de la tastatura doua numere întregi pozitive si afiseaza cel mai mare divizor comun si cel mai mic multiplu comun al celor doua numere.

- 54.** Scrieti un program recursiv care rezolva problema Turnurilor din Hanoi pentru  $n$  discuri ( $n$  – parametru citit de la tastatura). Enuntul problemei este urmatorul:

*Se dau trei tije simbolizate prin A, B si C. Pe tija A se gasesc  $n$  discuri de diametre diferite, asezate în ordine descrescatoare a diametrelor privite de jos în sus. Se cere sa se mute discurile de pe tija A pe tija B, folosind tija C ca tija de manevra, respectându-se urmatoarele reguli:*

- ❖ La fiecare pas se muta un singur disc.
- ❖ Nu este permis sa se aseze un disc cu diametrul mai mare peste un disc cu diametrul mai mic.

- 55.** Realizati un program care citeste de la tastatura doua numere naturale  $n$  si  $k$  ( $n > k$ ) si calculeaza si afiseaza pe consola valorile urmatoare:

$$C_n^k \text{ si } A_n^k$$

56. Sa se citeasca un sir de numere întregi de la tastatura, a carui dimensiune este citita tot de la tastatura. Sortati sirul prin metoda “bubblesort”, memorati succesiv datele la adresa 0x10012000 si afisati sirul sortat pe consola.
57. Scrieti un program care afiseaza primele  $n$  perechi de numere prime impare consecutive ( $n$  - numar impar citit de la tastatura). Exemplu: (3,5), (5,7), etc.
58. Scrieti un program, în limbaj de asamblare DLX, care citeste  $n$  numere întregi de la tastatura prin intermediul modulului Input.s (vezi lucrarea Investigatii Arhitecturale Utilizând Simulatorul DLX) si calculeaza maximul, minimul si suma numerelor si le depune succesiv în memoria DLX la adresa 0x1500.
59. (*Conjectura lui Goldbach*) Scrieti un program în limbaj de asamblare DLX, care citeste de la tastatura, prin intermediul modulului Input.s, un numar  $n$  par,  $n > 6$ . Sa se determine toate reprezentarile lui  $n$  ca suma de numere prime, suma cu numar minim de termeni. Afisarea se face pe consola pe fiecare linie câte o solutie.
60. Proiectati automatul de control cache, într-un sistem multimicroprocesor simetric pe bus comun, având în vedere ca un bloc din cache se poate afla într-una din starile: PARTAJAT, EXCLUSIV sau INVALID.
61. Se considera un sistem multimicroprocesor (SMM) cu  $N$  microprocesoare legate printr-o retea de interconectare (RIC) la  $N$  module fizice de memorie. În ce ar consta si ce ar permite o RIC cu largime de banda maxima ? Dar una cu largime de banda minima ?
62. Într-un SMM cu memorie centrala partajata si în care fiecare procesor detine un cache propriu, un procesor initiaza o scriere cu MISS într-un anumit bloc aflat în starea “partajat” (“shared”). Precizati procesele succesive care au loc în urma acestei operatii.

63. Într-un SMM un procesor inițiază o citire cu MISS la un bloc invalid în cache-ul propriu, blocul aflându-se în copia exclusivă într-alt procesor. Precizați concret procesele succesive care au loc în urma acestei operații.
64. Se consideră un procesor cu un cache conectat la o memorie principală printr-o magistrală (bus de date) de 32 de biți; un acces cu hit în cache durează un ciclu de tact. La un acces cu miss în cache întregul bloc trebuie extras din memoria principală prin intermediul magistralei. O tranzacție pe bus constă dintr-un ciclu de tact pentru trimiterea adresei pe 32 de biți spre memorie, 4 cicluri de tact în care are loc accesarea memoriei (strobarea datelor pe bus) și 1 ciclu pentru transferarea fiecărui cuvânt de date (32 octeți) în blocul din cache. Se presupune că procesorul continuă execuția doar după ce ultimul cuvânt a fost adus în cache. Următorul tabel exprimă rata medie de miss într-un cache de 1Mbyte pentru diverse dimensiuni a blocului de date.

Dimensiunea blocului (B), în cuvinte	Rata de miss (m), în %
1	4,5
4	2,4
8	1,6
16	1,0
32	0,75

Se cere:

- Pentru care din blocuri (pentru ce dimensiune) se obține cel mai bun timp mediu de acces la memorie ?
- Dacă accesul la magistrală adaugă doi cicluri suplimentari la timpul mediu de acces la memoria principală (disputa pentru ocuparea bus-ului), care din blocuri determină optima valoare pentru timpul mediu de acces la memorie ?
- Dacă lățimea magistralei este dublată la 64 de biți, care este dimensiunea optimă a blocului de date din punct de vedere al timpului mediu de acces la memorie ?

## 10. INDICATII DE SOLUTIONARE

---

1.

**A.** i1: LOAD R<sub>1</sub>, 9(R<sub>5</sub>)  
i2: ADD R<sub>6</sub>, R<sub>1</sub>, R<sub>3</sub>

a)

i1:	IF	ID	ALU	MEM	WB				
		IF	ID	ALU	MEM	WB			
			IF	ID	ALU	MEM	WB		
i2:				IF	ID	ALU	MEM	WB	

**Delay** = 2 cicli.

b) aplicând *forwarding*

i1:	IF	ID	ALU	MEM	WB				
		IF	ID	ALU	MEM	WB			
i2:			IF	ID	ALU	MEM	WB		

**Delay** = 1 ciclu.

**B.** i1: ADD R<sub>1</sub>, R<sub>6</sub>, R<sub>7</sub>  
i2: LOAD R<sub>5</sub>, 9(R<sub>1</sub>)

a)

i1:	IF	ID	ALU	MEM	WB				
		IF	ID	ALU	MEM	WB			
			IF	ID	ALU	MEM	WB		
i2:				IF	ID	ALU	MEM	WB	

**Delay = 2 cicli.**

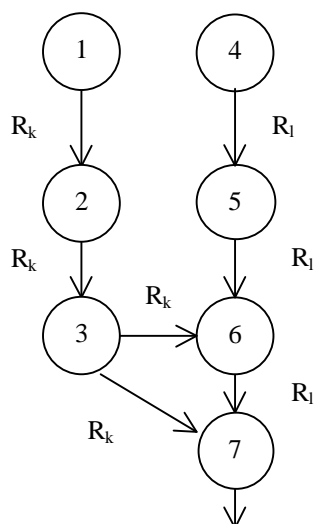
b) aplicând forwarding

i1:	IF	ID	ALU	MEM	WB		
i2:		IF	ID	ALU	MEM	WB	

**Delay = 0 cicli.** (necesar  $R_1$  la începutul fazei ALU a i2 pentru calcularea adresei de memorie de unde va fi citita data; dacă modul de adresare ar fi indirect registru,  $R_1$  ar fi necesar doar la începutul fazei MEM, deci între cele două instrucțiuni dependente RAW mai poate exista încă o a treia fără a implica penalizări)

- 2.
- i1: SUB  $R_k, R_i, \#4$
  - i2: LOAD  $R_k, (R_k+0)$
  - i3: ADD  $R_k, R_k, \#12$
  - i4: ADD  $R_l, \#5, R_j$
  - i5: LOAD  $R_l, (R_l+0)$
  - i6: XOR  $R_l, R_l, R_k$
  - i7: AND  $R_m, R_k, R_l$

a)



b)

I1:	IF	ID	ALU / MEM	WB		
		IF	ID	ALU / MEM	WB	
I2:			IF	ID	ALU / MEM	WB

**Delay = 1 ciclu.**

1 – nop – 2 – nop – 3 – 4 – nop – 5 – nop – 6 – nop – 7  $\Rightarrow T_{ex} = 12$  cicli executie.

c) 1 – 4 – 2 – 5 – 3 – nop – 6 – nop – 7  $\Rightarrow T_{ex} = 9$  cicli executie.

d) Aplicând forwarding-ul rezulta **Delay = 0 cicli**  $\Rightarrow$  Secventa se executa:

1 – 4 – 2 – 5 – 3 – 6 – 7  $\Rightarrow T_{ex} = 7$  cicli executie.

**3.**

a) **IRmax** = 2 instr. / ciclu.

**FR** = 4 instr. / ciclu  $\Rightarrow$  fiind 20 instructiuni de executat  $\Rightarrow$  vor fi 5 accese (citiri) la IC.

**RmissIC** = 40%  $\Rightarrow$  2 accese la IC vor fi cu miss. Consideram primele 2 accese la cache.

Configuratia buffer-ului de prefetch în fiecare ciclu de executie:

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
					i16							
			i12		i15			i20				
	i8		i11	i12	i14	i16		i19				
	i7	i8	i10	i11	i13	i15	i16	i18	i20			
i4	i6	i7	i9	i10	i12	i14	i15	i17	i19			
i3	i5	i6	i8	i9	i11	i13	i14	i16	i18	i20		
i2	i4	i5	i7	i8	i10	i12	i13	i15	i17	i19		
i1	i3	i4	i6	i7	i9	i11	i12	i14	i16	i18	i20	

C1 – se executa în 10 cicli (primul miss în IC – aducere instructiuni din memoria principala); în buffer nefiind nici o instructiune nu se executa nimic.

C2 – se executa în 10 cicli (al doilea miss în IC – aducere instructiuni din memoria principala); în buffer sunt instructiuni, se executa i1 si i2.

- C3 – se executa în 2 cicli (nu se face fetch instructiune nefiind spatiu disponibil în buffer); în buffer sunt instructiuni, se executa i3 datorita dependentelor RAW dintre i3 si i4.
- C4 – se executa în 2 cicli (hit în IC – aducere instructiuni din cache); se executa i4 si i5.
- C5 – se executa în 2 cicli (nu se face fetch instructiune nefiind spatiu disponibil în buffer); se executa i6 datorita dependentelor RAW dintre i6 si i7.
- C6 – se executa în 2 cicli (hit în IC – aducere instructiuni din cache); se executa i7 si i8.
- C7 – se executa în 2 cicli (nu se face fetch instructiune); se executa i9 si i10.
- C8 – se executa în 2 cicli (nu se face fetch instructiune); se executa i11 datorita dependentelor RAW dintre i11 si i12.
- C9 – se executa în 2 cicli (hit în IC – aducere instructiuni din cache); se executa i12 si i13.
- C10 – se executa în 2 cicli (nu se mai face fetch instructiune – s-au adus toate instructiunile); se executa i14 si i15.
- C11 – se executa în 2 cicli; se executa i16 si i17.
- C12 – se executa în 2 cicli; se executa i18 si i19.
- C13 – se executa în 2 cicli; se executa i20 – s-a golit buffer-ul nu mai sunt instructiuni de executat.

$$T_{ex} = 10 (C1) + 10 (C2) + 2 (C3) + 2 (C4) + 2 (C5) + 2 (C6) + 2 (C7) + 2 (C8) + 2 (C9) + 2 (C10) + 2 (C11) + 2 (C12) + 2 (C13) = 42 \text{ impulsuri de tact}$$

$$IR = 20 \text{ instr.} / 42 \text{ imp.} = 0,476 \text{ instr.} / \text{tact}$$

b) **IR<sub>max</sub>** = 4 instr. / ciclu.

Configuratia buffer-ului de prefetch în fiecare ciclu de executie:

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
		i12	i16				
	i8	i11	i15	i16	i20		
i4	i7	i10	i14	i15	i19		
i3	i6	i9	i13	i14	i18	i20	
i2	i5	i8	i12	i13	i17	i19	
i1	i4	i7	i11	i12	i16	i18	



$$T_{ex} = 10 (C1) + 10 (C2) + 2 (C3) + 2 (C4) + 2 (C5) + 2 (C6) + 2 (C7) + 2$$

$$(C8) = 32 \text{ impulsuri de tact}$$

$$IR = 20 \text{ instr.} / 32 \text{ imp.} = 0,625 \text{ instr.} / \text{tact}$$

$$\text{Cresterea performantei} = (IR(4) - IR(2)) / IR(2) = 31\%$$

**4.**

```

a) MOV      R10, R6
   ST       (R9), R6

b) ADD      R3, R5, #4  /* Calculeaza adresa pentru ST */
   ADD      R4, R6, #8  /* Calculeaza adresa pentru LD */
   LD       R9, 8(R6)   /* Daca adresele difera efectueam anticipat LD */
   BEQ      R3, R4, et  /* Daca adresele sunt egale, salt pentru a încarca
                        în R9 valoarea corecta (R8)*/

J          end
et:      MOV R9, R8
end:     ST 4(R5), R8    /* Daca adresele coincid sau nu se memoreaza R8
la adresa ceruta */

```

**5.**

a)    MOV   R6, R7 ADD   R3, R6, R5	Ra)    MOV   R6, R7 ADD   R3, R7, R5
b)    MOV   R6, #4 ADD   R7, R10, R6 LD    R9, (R7)	Rb)    MOV   R6, #4 ADD   R7, R10, #4 LD    R9, 4(R10)
c)    MOV   R6, #0 ST    9(R1), R6	Rc)    MOV   R6, #0 ST    9(R1), R0
d)    MOV   R5, #4 BNE   R5, R3, Label	Rd)    MOV   R5, #4 BNE   R5, #4, Label
e)    ADD   R3, R4, R5 MOV   R6, R3	Re)    ADD   R3, R4, R5 ADD   R6, R4, R5

## 6.

a)  $IR_{max} = 4 \text{ instr. / ciclu}$ .

$FR = 4 \text{ instr. / ciclu} \Rightarrow$  fiind 32 instructiuni de executat  $\Rightarrow$  vor fi 8 accese (citiri) la IC.

$R_{missIC_1} = 50\% \Rightarrow$  4 accese la IC vor fi cu miss. Consideram primele 4 accese la cache.

Configuratia buffer-ului de prefetch în fiecare ciclu de executie:

C1 (F1)	C2 (F2)	C3 (F3)	C4 (F4)	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
						i24	i28					
		i12	i16			i23	i27	i28	i32			
	i8	i11	i15	i16	i20	i22	i26	i27	i31	i32		
i4	i7	i10	i14	i15	i19	i21	i25	i26	i30	i31		
i3	i6	i9	i13	i14	i18	i20	i24	i25	i29	i30		
i2	i5	i8	i12	i13	i17	i19	i23	i24	i28	i29		
i1	i4	i7	i11	i12	i16	i18	i22	i23	i27	i28	i32	

C1 – se executa în 10 cicli (primul miss în IC – aducere instructiuni din memoria principala); în buffer nefiind nici o instructiune nu se executa nimic.

C2 – se executa în 10 cicli (al doilea miss în IC – aducere instructiuni din memoria principala); în buffer sunt instructiuni, se executa i1, i2 si i3.

C3 – se executa în 10 cicli (al treilea miss în IC – aducere instructiuni din memoria principala); în buffer sunt instructiuni, se executa i4, i5 si i6 datorita dependentelor RAW dintre i6 si i7.

C4 – se executa în 10 cicli (al patrulea miss în IC – aducere instructiuni din memoria principala); se executa i7, i8, i9 si i10.

C5 – se executa în 2 cicli (nu se face fetch instructiune nefiind spatiu disponibil în buffer); se executa i11 datorita dependentelor RAW dintre i11 si i12.

C6 – se executa în 2 cicli (hit în IC – aducere instructiuni din cache); se executa i12, i13, i14 si i15.

C7 – se executa în 2 cicli (hit în IC); se executa i16 si i17 datorita dependentelor RAW dintre i17 si i18.

C8 – se executa în 2 cicli (hit în IC); se executa i18, i19, i20 si i21.

C9 – se executa în 2 cicli (nu se face fetch instructiune nefiind spatiu disponibil în buffer); se executa i22 datorita dependentelor RAW dintre i22 si i23.

C10 – se executa în 2 cicli (hit în IC); se executa i23, i24, i25 si i26.

C11 – se executa în 2 cicli; (nu se mai face fetch instructiune – s-au adus toate instructiunile); se executa i27 datorita dependentelor RAW dintre i27 si i28.

C12 – se executa în 2 cicli; se executa i28, i29, i30 si i31.

C13 – se executa în 2 cicli; se executa i32 – s-a golit buffer-ul nu mai sunt instructiuni de executat.

$$T_{\text{ex}} = 10 (C1) + 10 (C2) + 10 (C3) + 10 (C4) + 2 (C5) + 2 (C6) + 2 (C7) + 2 (C8) + 2 (C9) + 2 (C10) + 2 (C11) + 2 (C12) + 2 (C13) = 58 \text{ impulsuri de tact}$$

$$IR = 32 \text{ instr.} / 58 \text{ imp.} = 0,55 \text{ instr.} / \text{tact}$$

b) **FR** = 8 instr. / ciclu  $\Rightarrow$  fiind 32 instructiuni de executat  $\Rightarrow$  vor fi 4 accese (citiri) la IC.

**RmissIC<sub>2</sub>** = 50%  $\times$  **RmissIC<sub>1</sub>**  $\Rightarrow$  **RmissIC<sub>2</sub>** = 25%  $\Rightarrow$  1 acces la IC va fi cu miss. Consideram primul acces la cache.

Configuratia buffer-ului de prefetch în fiecare ciclu de executie:

C1 (F1)	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
i8			i16			i24				i32			
i7			i15			i23	i24			i31			
i6			i14			i22	i23			i30			
i5	i8		i13	i16		i21	i22			i29	i32		
i4	i7		i12	i15		i20	i21			i28	i31		
i3	i6		i11	i14		i19	i20	i24		i27	i30		
i2	i5	i8	i10	i13		i18	i19	i23	i24	i26	i29		
i1	i4	i7	i9	i12	i16	i17	i18	i22	i23	i25	i28	i32	

$$T_{\text{ex}} = 10 (C1) + 2 (C2) + 2 (C3) + 2 (C4) + 2 (C5) + 2 (C6) + 2 (C7) + 2 (C8) + 2 (C9) + 2 (C10) + 2 (C11) + 2 (C12) + 2 (C13) + 2 (C14) = 36 \text{ impulsuri de tact}$$

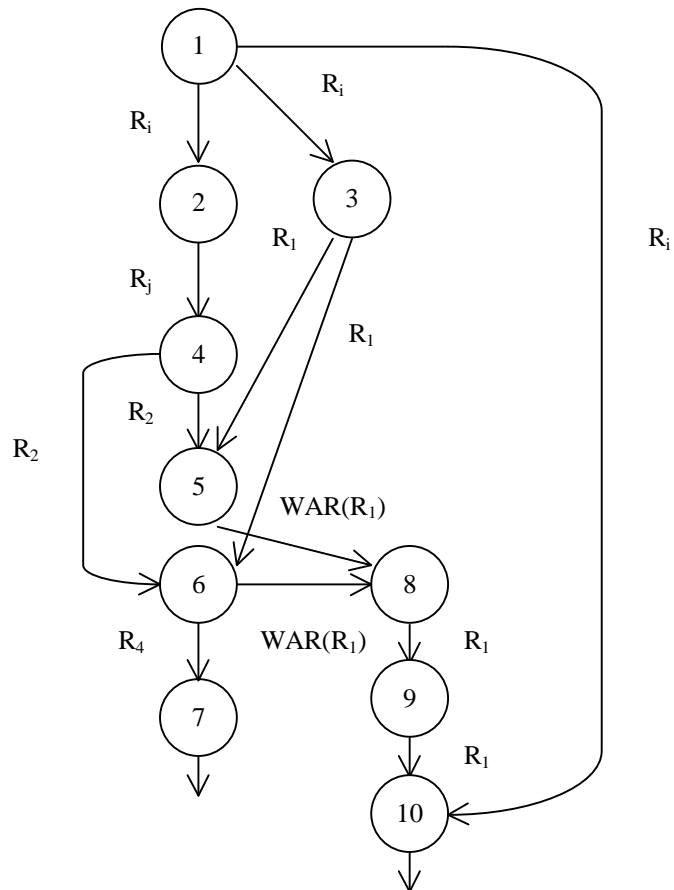
$$IR = 32 \text{ instr.} / 36 \text{ imp.} = 0,89 \text{ instr.} / \text{tact}$$

Cresterea performantei =  $(IR(FR=8) - IR(FR=4)) / IR(FR=4) = 61,8\%$  (substantiala).

Limitarea prformantei consta în capacitatea buffer-ului de prefetch egala cu rata de fetch (**IBS=FR**).

7.

a)



I1:	IF	ID	ALU / MEM	WB		
		IF	ID	ALU / MEM	WB	
I2:			IF	ID	ALU / MEM	WB

**Delay = 1 ciclu.**

1 – nop – 2 – 3 – 4 – nop – 5 – 6 – nop – 7 – 8 – nop – 9 – nop – 10  $\Rightarrow T_{ex} = 15$  cicli executie.

b) Dupa aplicarea tehnicii de *renaming* la registrul  $R_1$  în instructiunea i8 obținem:

i8:    ADD    $R_1'$ ,  $R_{13}$ ,  $R_{14}$   
i9:    DIV    $R_1'$ ,  $R_1'$ , #2  
i10:   STORE ( $R_i$ ),  $R_1'$

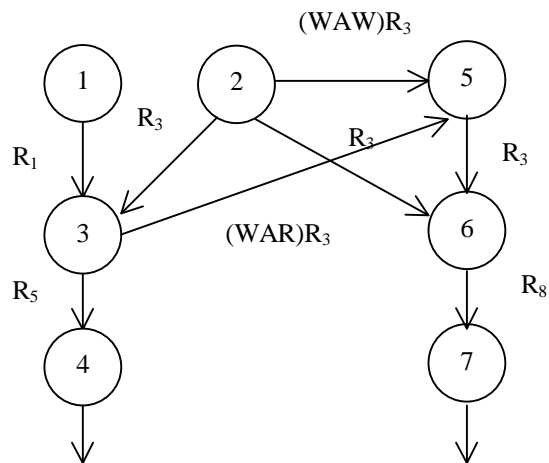
$1 - 8 - 2 - 3 - 4 - 9 - 5 - 6 - 10 - 7 \Rightarrow T_{ex} = 10$  cicli executie.

c) Prin înlocuirea registrilor  $R_{13}$  cu  $R_3$  si  $R_{14}$  cu  $R_4$ , secventa realizeaza determinarea maximului dintre elementele  $x[i]$  si  $x[i+4]$  ale unui sir de date stocat în memorie. Se obtine formula:

$$\max(x[i], x[i+4]) = \frac{(x[i+4] + x[i]) + |x[i+4] - x[i]|}{2}$$

8.

a)



Secventa se executa astfel:

$1 - 2 - \text{nop} - 3 - \text{nop} - 4 - 5 - \text{nop} - 6 - \text{nop} - 7 \Rightarrow T_{ex} = 11$  cicli executie.

b) Se aplica tehnica de *renaming* pe ramura  $5 - 6 - 7 \Rightarrow R_3 = R_3'$ .

Astfel având 3 unitati ALU la dispozitie executia secventei ar fi urmatoarea:

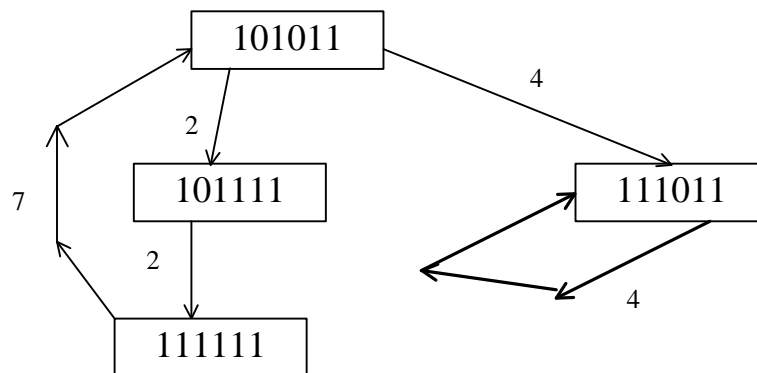
Nr. Tact	Instructiuni executate în paralel
	1 - 2 - 5
	3 - 6
	4 - 7

$T_{ex} = 3$  cicli executie.

9.

- a) Da. La startarea sistemului se încarcă programul *încarcator* care verifică perifericele, citește informații din EPROM. E posibil să existe hit la citire din cache care nefiind inițializat conține “*prosti*” și dacă nu ar exista bitul de validare (V) sistemul ar prelua valoarea din cache eronată.
- b) O excepție *Page Fault* implică întotdeauna o excepție TLB miss. Reciproc, nu e obligatoriu.

11.



Dacă alegem strategia Greedy obținem rata de procesare

$$IR = \frac{3}{11} = 0,27 \text{ instr/ciclu}$$

Dacă alegem strategia non - Greedy rata de procesare obținută este:

$$IR = \frac{1}{4} = 0,25 \text{ instr/ciclu}$$

În acest caz e mai avantajos să alegem strategia Greedy.

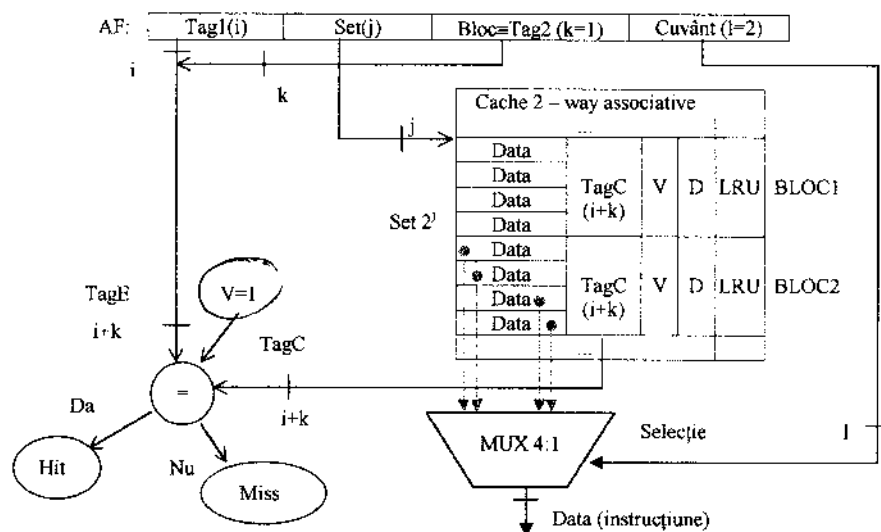
21.

a.

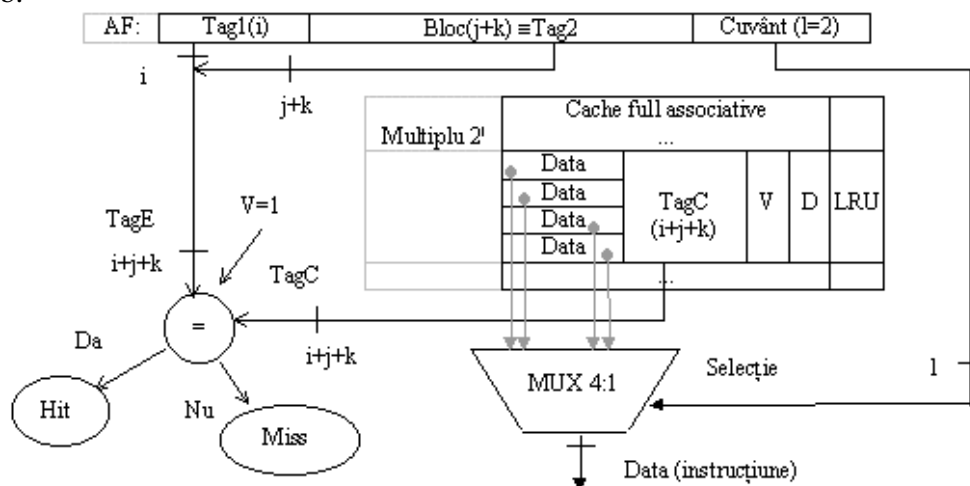
Cache-ul **semiasociativ** conține  $2^j$  seturi, fiecare set conține 2 blocuri.

V – bit de validare (0 – nu e validă dată; 1 – validă;). Inițial are valoarea 0. Este necesar numai pentru programe automodificabile la cache-urile de instrucțiuni.

D – bit Dirty. Este necesar la scrierea în cache-ul de date.



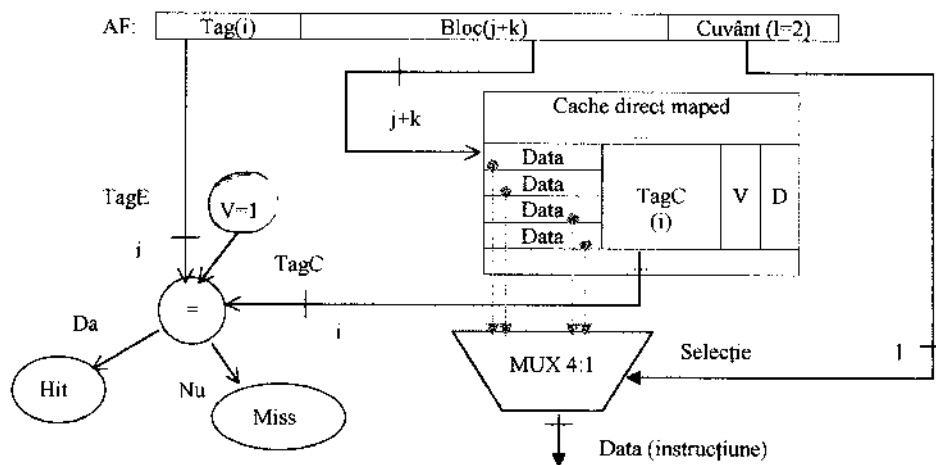
b.



În cazul cache-urilor **full asociative** dispăre câmpul set. Practic există un singur set. Datele pot fi memorate oriunde (în orice bloc) în cache.

c.

În cazul cache-urilor **mapate direct**, datele vor fi memorate în același loc de fiecare dată când sunt accesate. Din acest motiv vom ști la fiecare acces ce dată va fi evacuată din cache, nemaifiind necesar câmpul LRU (evacuare implicită).



22. a. Procesarea «Out of Order» a instrucțiunilor cu referire la memorie într-un program este dificilă datorită accesării aceleiași adrese de memorie de către o instrucțiune Load respectiv una Store. Exemplificăm pe secvența de instrucțiuni următoare:

Presupunem că la adresa 2000h avem memorată valoarea 100.

```
LOAD  R1, 2000h
ADD    R1, R1, #12
STORE R1, 2000h
```

În urma execuției în registrul R1 și implicit la adresa 2000h vom avea valoarea 112.

Prin *Out of Order* aplicat instrucțiunilor cu referire la memorie valoarea din registrul R1 precum și cea din memorie de la adresa 2000h ar fi alterată.

b. Secvențele de program în limbajul unui procesor RISC ar deveni:

```
R1 ← x[i];
(R1) → a[2i]; STORE Adr1
R2 ← a[i+1]; LOAD Adr2
R6 ← (R2) + 5;
(R6) → y[i];
```

Cele două instrucțiuni cu referire la memorie ar fi paralelizabile (executabile Out of Order) dacă  $i \neq 1$  ( $Adr1 \neq Adr2$ ).



Benchmark-ul **B2** s-ar procesa mai repede pe un procesor superscalar cu executie *Out of Order* a instructiunilor, pentru ca cele doua aliasuri ( $i=1$ ) au fost scoase în afara buclei, prin urmare în cadrul buclei **B2**, paralelizarea Load / Store e posibila.

**23.** a. Vezi pr. 44 a), b).

Prin «renaming» aplicat registrului R1 putem elimina hazardul WAW dintre instructiunile (1 si 5) si (2 si 6), deci le putem trimite în executie în acelasi ciclu.

**Executia:** tact 1 - instructiunile: 1, 5, 3.

tact 2 - instructiunile: 2, 6.

tact 3 - instructiunea: 4.

**24.** Nivelul **WR** este mai prioritar datorita hazardurilor RAW între doua instructiuni succesive (vezi si **50.b**).

**25.**  $FR_{med} = 5$ ; Da. Predictia a  $N$  PC-uri simultan implica  $FR_{med} \cong N \times 5$ .

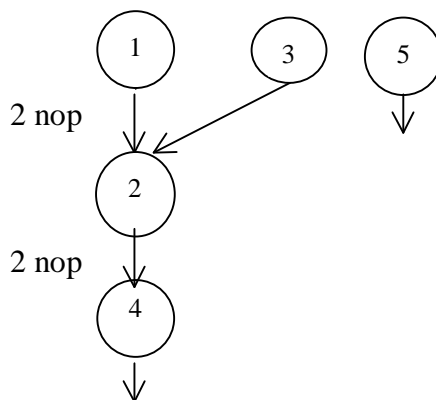
**26.**  $C \rightarrow (N-1) + (N-2) + \dots + 2 + 1 = N(N-1) / 2$  comparatoare RAW.

Pentru  $(N+1)$  instructiuni  $\Rightarrow N(N+1) / 2$  comparatoare  $\rightarrow C'$

$C' / C = N(N+1) / N(N-1) \Rightarrow C' = C(N+1) / (N-1)$

**27.** a) A. b) F. c) F. d) F.

**28.** a)



b) 5 cicli pentru instr. + 4 cicli nop = 9 cicli executie

c)  $1 - 3 - 5 - 2 - \text{nop} - \text{nop} - 4 \Rightarrow 7$  cicli executie

29. a.

Instrucțiunea de salt:

IF	ID	ALU	MEM	WB			
	IF	ID	ALU	MEM	WB		
		IF	ID	ALU	MEM	WB	
			IF	ID	ALU	MEM	WB

Branch delay slot = 2 cicli.

Motivul implementării de busuri și memorii cache separate pe instrucțiuni, respectiv date în cazul majorității procesoarelor RISC (pipeline) constă în faptul că nu există coliziuni la memorie de tipul (IF, MEM).

Instrucțiunile CALL / RET sunt mari consumatoare de timp în cazul procesoarelor CISC datorită salvarilor și restaurărilor de registre (registrul stare program, registrul de flaguri, PC) pe care acestea le execută de fiecare dată când sunt apelate. Evitarea consumului de timp în cazul microprocesoarelor RISC se face prin implementarea *ferestrelor de registre* sau prin inlining-ul procedurilor (utilizarea de macroinstrucțiuni).

30. Codificarea instrucțiunii este următoarea:

7.....0
Opcode
Deplasament (1)
Deplasament (2)

Se efectuează următoarele operații:

Operația executată	Durata execuție (cicli)
Fetch Instrucțiune	6
Fetch Deplasament (1)	4
Fetch Deplasament (2)	4
Calcul adresa de memorare	2
Scriere A în memorie	4

Total cicli execuție = 20.

31. a) **Fals!** În caz de hit, pe baza comparării tag-urilor, se citește și data respectivă => acces simultan la tag și date.

b) **Fals!** Fiind hit tag-ul nu mai are sens să-și modifice valoarea.

c) **Fals!** Datorită interferențelor alternative, rata de hit scade.

32. i5: LOAD R<sub>1</sub>, (R<sub>1</sub>+0)

33. **Nu!** O regenerare transparenta (dureaza 250ns) trebuie sa "încapa" între 2 accese la DRAM ale microprocesorului. Cum un ciclu extern al procesorului dureaza 3 tacte (150ns) regenerarea transparenta este imposibila la frecventa maxima a procesorului.

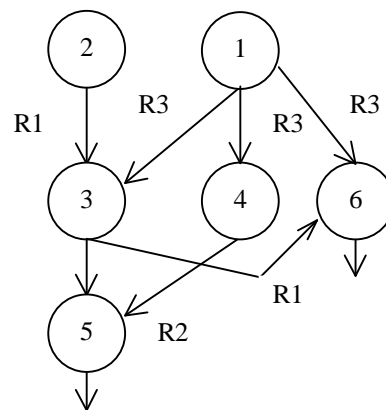
a. ALU: (R9) + 06; MEM: scriere R5 la adresa (R9) + 06;WB: nimic

b. ALU: (R8) + F3; MEM: citire de la adresa (R8) + F3;WB: scriere în R7;

c. ALU: (R7) + (R8); MEM: nimic; WB: scriere în R5.

35.

a. 1 - 2 - nop - 3 - 4 - nop - 5 - 6 => 8 cicli.



b. 1 - 2 - 4 - 3 - 6 - 5 => 6 cicli.

36.

a. Nr.tacte /s consumate pentru interogare mouse:  $30 \times 100 = 3000$  tacte/ s

$$f = \frac{3000}{50 \times 10^6} = 0,006\%$$

$$b. \frac{\text{Nr.interogari}}{s} = \frac{50 \frac{\text{ko}}{s}}{2 \frac{\text{o}}{\text{acces interogare}}} = 25 \times 2^{10} \frac{\text{acces interogare}}{s}$$

Nr. tacte necesar pentru Nr.interogari/ s =  $25 \times 2^{10} \times 100$  tacte

$$f = \frac{25,6 \times 10^5}{50 \times 10^6} = 5,12\%$$

$$c. \frac{\text{Nr.interogari}}{s} = \frac{2 \frac{\text{Mo}}{s}}{4 \frac{\text{Mo}}{s}} = 0,5 \times 2^{20} \frac{\text{acces interogare}}{s}$$

Nr. tacte necesar pentru Nr.interogari/ s =  $0,5 \times 2^{20} \times 100$  tacte

$$f = \frac{0,5 \times 2^{20} \times 100}{50 \times 10^6} > 100\%$$

În cazul hard-disc-ului este imposibila comunicatia dintre procesor si periferic prin interogare. (Într-o secunda procesorul realizeaza  $50 \times 10^6$  tacte, iar pentru un transfer cu o rata de 2 Mo/ s sunt necesare într-o secunda  $50 \times 2^{20}$  tacte, imposibil).

37.

- a. AF = 20000h;
- b. AL se memoreaza la adresa: E0BF2h (adresa para)  
AH se memoreaza la adresa: E0BF3h (adresa impara) [scriere pe cuvânt la adresa impara]  
SS = 2000h constituie informatie redundanta.

38.

- a. AF = B0000h;
- b. AL se memoreaza la adresa: 1FF1Ch (adresa para - [SS:(SP-1)])  
AH se memoreaza la adresa: 1FF1Dh (adresa impara) [scriere pe cuvânt la adresa impara [SS:(SP-2)]]  
DS = 1F20h constituie informatie redundanta.

**39. Nu!** Daca se activeaza CREF si microprocesorul vrea sa acceseze apoi memoria, acesta trebuie pus în stare «WAIT». La activarea CREF în conditiile în care microprocesorul nu lucreaza cu memoria, regenerarea va astepta ca microprocesorul sa “atace” memoria, pentru ca dupa aceea sa se “strecoare”.

**40.** a – cazul memoriei **mapate direct** cu 4 locatii.  
Se acceseaza pe rând locatiile:

Locația accesată	0	8	0	6	8	10	8
	Tag	Tag	Tag	Tag	Tag	Tag	Tag
0	0(miss)	2(miss)	0(miss)	0	2(miss)	2	2(hit)
1	X	X	X	X	X	X	X
2	X	X	X	1(miss)	1	2(miss)	2
3	X	X	X	X	X	X	X

Rezultă în cazul memoriei mapate direct un singur acces cu hit  $R_{\text{miss}} = 6 / 7 = 85.71\%$

b – cazul memoriilor semiasociative cu 2 seturi a câte 2 cuvinte.

**Întrucât toate adresele sunt pare se accesează doar blocurile din** setul 0.

Locația accesată	Setul 0		
0	0	X	Miss
8	0	8	Miss
0	0	8	Hit
6	0	6	Miss. Se evacuează 8.
8	8	6	Miss. Se evacuează 0.
10	8	10	Miss. Se evacuează 6.
8	8	10	Hit.

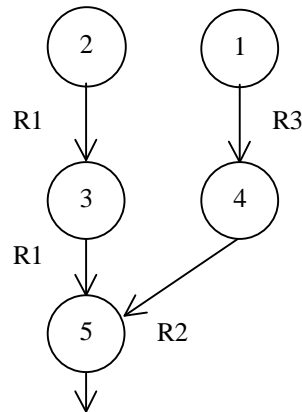
În cazul memoriei two-way asociative sunt 2 accese cu hit  $R_{\text{miss}} = 5 / 7 = 71.42\%$

c – cazul memoriilor complet asociative.

Locația accesată	0	8	0	6	8	10	8
	Tag	Tag	Tag	Tag	Tag	Tag	Tag
0	0(miss)	0	0(hit)	0	0	0	0
1	X	8(miss)	8	8	8(hit)	8	8(hit)
2	X	X	X	6(miss)	6	6	6
3	X	X	X	X	X	10(miss)	10

În cazul memoriei complet asociative sunt 3 accese cu hit  $R_{\text{miss}} = 4 / 7 = 57.14\%$

**41. a.** 1 - 2 - nop - 3 - 4 - nop - 5  $\Rightarrow$  7 cicli.



b. 1 - 2 - 4 - 3 - nop - 5 => 6 cicli.

42. În 1 s se transferă  $25 \times 10^4$  biti.  
În x s se transferă 1 octet.

Rezultă  $x = 8 / (25 \times 10^4) = 32 \mu s$

Fie  $t_r$  = timpul disponibil dintre 2 transferuri succesive de octeți.

$t_1$  = timpul scurs între apariția întreruperii și intrarea în rutină de tratare;

$t_1 = 2 \mu s$ ;

$t_2$  = timpul în care este tratată rutina de întrerupere;  $t_2 = 10 \mu s$ ;

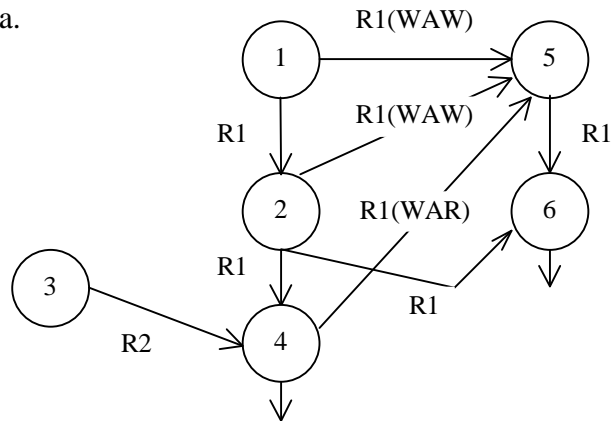
$t_r = x - t_1 - t_2 = (32 - 2 - 10) \mu s \Rightarrow t_r = 20 \mu s$ .

43. a.  $\frac{(1 - 0,11) \times 8,5 + 0,11 \times 6 \times 3}{8,5} = 1,1229 \Rightarrow$  diminuare a performanței cu  
 $\approx 13\%$ .

b. **Avantajul** implementării unei pagini de capacitate «mare» într-un sistem de memorie virtuală constă în principiul localizării acceselor, determinând o optimizare a acceselor la disc (se reduce numărul acestora).

**Dezavantajul** îl reprezintă aducerea inutilă de informație de pe disc (pierdere de timp), care trebuie apoi evacuată în cazul unei erori de tipul *PageFault*. Dimensiunea paginii se alege în urma unor simulări laborioase.

44. a.



1 - nop - 2 - 3 - nop - 4 - 5 - nop - 6 => 9 cicli executie.

b.

1:  $R1 \leftarrow (R11) + (R12)$

5:  $R1' \leftarrow (R14) + (R15)$

3:  $R2 \leftarrow (R3) + 4$

2:  $R1 \leftarrow (R1) + (R13)$

6:  $R1' \leftarrow (R1') + (R16)$

4:  $R2 \leftarrow (R1) + (R2)$

1 - 5 - 3 - 2 - 6 - 4 => 6 cicli executie

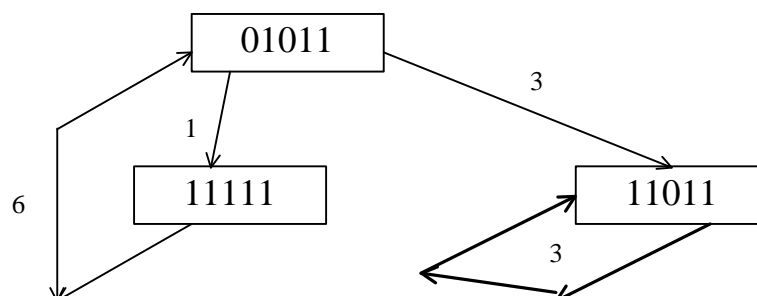
45. Daca alegem strategia Greedy obtinem rata de procesare

$$IR = \frac{2}{7} \text{ instr/ciclu}$$

Daca alegem strategia non - Greedy rata de procesare obtinuta este:

$$IR = \frac{1}{3} \text{ instr/ciclu}$$

În acest caz e mai avantajos sa alegem strategia non - Greedy.



**46.** Algoritmul lui Tomasulo permite anularea hazardurilor WAR si WAW printr-un mecanism hardware de redenumire a registrilor, favorizând executia multipla si *Out of Order* a instructiunilor. Mecanismul de «forwarding» implementat prin arhitectura Tomasulo (statii de rezervare) determina reducerea semnificativa a presiunii la «citire» asupra setului de registri logici, înlăturând o mare parte din dependentele RAW dintre instructiuni [33].

În cazul unei arhitecturi TTA, numarul de registri generali poate fi redus semnificativ datorita faptului ca trebuie stocate mai putine date temporare, acestea circulând direct între unitatile de executie (FU - unitati functionale), nemaifiind necesara memorarea lor în registri. «Forwarding-ul» datelor este realizat software prin program, spre deosebire de procesoarele superscalare care realizeaza acest proces prin hardware folosind algoritmul lui Tomasulo [33].

**47.** O instructiune de tip RETURN este dificil de predictionat printr-un predictor hardware datorita **fenomenului de interferenta a salturilor**. Acesta apare în cazul unei predictii incorecte datorate exclusiv adresei de salt incorecte din tabela de predictii, care a fost modificata de catre un alt salt anterior. Instructiunile de tip RETURN reprezinta salturi care-si modifica dinamic adresa tinta, favorizând dese aparitii ale fenomenului de interferenta. Analog se întâmpla si în cazul salturilor în mod de adresare indirect [33].

Noutatea «principiala» a predictoarelor corelate pe doua nivele consta în faptul ca predictia unei instructiuni tine cont de predictia ultimelor  $n$  instructiuni de salt anterioare; se foloseste un registru de predictie (registru binar de deplasare) care memoreaza istoria ultimelor  $n$  instructiuni de salt. Valoarea acestui registru concatenata cu cei mai putini semnificativi biti ai PC-ului instructiunii de salt curente realizeaza adresarea cuvântului de predictie din tabela de predictie [33, 45].

**50. a.** Sumatorul “sum 2” este activat de o instructiune de branch, pentru calculul adresei de salt.

b. Nivelul **WR** este mai prioritar datorita hazardurilor RAW. Operatia de citire ar putea avea nevoie de un registru în care nu s-a înscris înca rezultatul final, rezulta prioritatea scrierii fata de citire.

c. În cazul unei instructiuni de tip LOAD, unitatea ALU are rol de calcul adresa.

d. În latch-ul EX/MEM se memoreaza valoarea (R7+05).



**52.** Se citesc caractere de la intrare pâna se întâlnește condiția de ieșire, și se salvează acestea în stivă. Condiția de ieșire o constituie tastarea caracterului '0'. La întâlnirea sa se afișează caracterul curent ('0' – primul caracter afișat) și se va apela funcția de afișare. În cadrul acestei funcții vom prelua din stivă caracterele memorate și le vom tipări.

**Obs.** E necesar un parametru pentru contorizarea caracterelor scrise în stivă.

Programul modificat pentru a nu afișa și caracterul '0', diferă prin faptul că la întâlnirea condiției de ieșire se apelează direct funcția de afișare.

**53.** Este esențial să calculăm  $\text{cmmdc}$  (cel mai mare divizor comun) dintre cele două numere,  $\text{cmmmc}$  (cel mai mic multiplu comun) putându-se calcula apoi din formula:

$$\text{cmmdc}(a,b) \cdot \text{cmmmc}(a,b) = a \cdot b$$

Pentru calcularea  $\text{cmmdc}(a,b)$  folosim recursivitatea:

$$\text{Cmmdc}(a,b) = \begin{cases} a, & \text{daca } a = b \\ \text{Cmmdc}(a,b-a), & \text{daca } a < b \\ \text{Cmmdc}(b,a-b), & \text{daca } a > b \end{cases}$$

Se apelează recursiv funcția având ca noi parametri minimul dintre cele două numere și modulul diferenței dintre cele două valori, pâna la întâlnirea condiției de ieșire ( $a = b$ ), în  $a$  (și  $b$ ) aflându-se chiar cel mai mare divizor comun.

**54.** Semnificația celor 3 tije este următoarea:

A – sursa

B – destinație

C – manevra

Problema pentru  $n$  discuri se rezolvă ușor dacă putem rezolva pentru  $(n-1)$  discuri, deoarece rezolvând-o pe aceasta, vom putea muta primele  $(n-1)$  discuri de pe tija A(sursa) pe C(manevra), apoi discul  $n$  (cu diametrul cel mai mare) de pe tija A(sursa) pe tija B(destinație) și din nou cele  $(n-1)$  discuri de pe tija C(manevra) pe tija B(destinație).

Condiția de ieșire din subrutina o constituie problema transferării unui singur disc ( $n=1$ ) de pe sursa pe destinație. Pașii algoritmului sunt:

Se citesc de la tastatura numărul de discuri ( $n$ ), și identificatorii (caractere) tijelor sursa, destinație și manevra și se apelează subrutina *hanoi* având ca parametri efectivi cele patru valori citite anterior. În cadrul funcției *hanoi* se execută:

Se salvează în stivă adresa de revenire și cadrul de stivă. Se testează dacă se îndeplinește condiția de ieșire din subrutină.

Dacă **da**, se afișează transferul (tija sursă și tija destinație), se refacă conținutul registrilor PC și fp din stivă și se actualizează SP. Se execută instrucțiunea de la adresa dată de PC.

Dacă **nu**, se execută secvența:

- a. Se salvează în stivă registrul corespunzător parametrilor (tijelor).
- b. Se actualizează numărul de discuri,  $n \leftarrow (n-1)$  și rolul fiecărei tije (noua destinație va fi tija C, tija A va fi sursa iar tija B va fi manevra). Se reapelează *hanoi*. [Se mută cele  $(n-1)$  discuri de pe tija sursă pe tija de manevra].
- c. Se refacă parametrii din stivă (tijele). Se afișează transferul [cel de-al  $n$  - lea disc de pe tija sursă(A) pe tija destinație(B)].
- d. Se salvează în stivă registrul corespunzător parametrilor (tijelor).
- e. Se actualizează numărul de discuri,  $n \leftarrow (n-1)$  și rolul fiecărei tije (noua destinație va fi tija B, tija C este sursa iar tija A va fi manevra). Se reapelează *hanoi*. [Se mută cele  $(n-1)$  discuri de pe tija de manevra pe cea destinație].

**55.** Se modifică programul de calcul al factorialului unui număr, prezentat în limbaj de asamblare MIPS (vezi lucrarea “*Investigații Arhitecturale Utilizând Simulatorul SPIM*”), calculând în paralel cu factorialul și aranjamentele, folosind formulele:

$$C_n^k = \frac{n!}{(n-k)!k!}; \quad A_n^k = \frac{n!}{(n-k)!}$$

Parametrii  $n$  și  $k$  se citesc de la tastatură și sunt salvați în stivă. Se intră în subrutină unde se execută:

Se verifică dacă  $k = 1$  (condiția de ieșire din subrutină).

Dacă **da**, se setează în registrul rezultat valoarea 1, punctul de plecare în calcularea produselor  $1 \times 2 \times \dots \times k$  și  $n \times (n-1) \times \dots \times [n-(k-1)]$ . Se refacă conținutul registrilor PC și fp din stivă și se actualizează SP. Se execută instrucțiunea de la adresa dată de PC.

Dacă **nu**, se execută secvența:

- a. Se actualizeaza parametrii  $n \leftarrow (n-1)$  si  $k \leftarrow (k-1)$ . Se reapeleaza subrutina.
- b. Se preiau din stiva termenii salvati si se înmultesc cu rezultatele calculate pâna la acest pas.
- c. Se reface continutul registrilor PC si fp din stiva si se actualizeaza SP. Se executa instructiunea de la adresa data de PC.

În încheierea programului se calculeaza combinarile cu formula raportului dintre aranjamente si permutari si afiseaza valorile aranjamentelor, permutarilor si combinarilor.

**56.** Se citeste dimensiunea sirului, si elementele care se vor memora la adresa ceruta. Este necesara o variabila booleana, initial având valoarea 1 (true), care specifica daca au fost facute interschimbari între elementele sirului. Se apeleaza rutina *bubble* în care au loc urmatoarele:

Variabila booleana este resetata (ia valoarea 0).

Se porneste de la primul element al sirului si se compara elementele învecinate. Daca doua dintre acestea nu îndeplinesc relatia de ordine ceruta (impusa), se interschimba (fiecare element se memoreaza la adresa celuiilalt) si se seteaza variabila booleana. Se parcurge tot sirul, astfel ca dupa o prima parcurgere elementul maxim (sau minim) se va afla pe ultima pozitie din sir.

Daca a avut loc cel putin o interschimbare se reia algoritmul. Altfel, sirul se gaseste în memorie sortat si va fi afisat pe consola.

**57.** Se parcurge sirul numerelor naturale din doi în doi (ne intereseaza doar numerele impare) începând cu numarul 3 (primul numar impar prim) si se determina daca este prim sau nu (vezi lucrarea “*Investigatii Arhitecturale Utilizând Simulatorul SPIM*”). În cazul în care numarul este prim (fie acesta  $k$ ) se verifica daca si urmatorul numar impar ( $k+2$ ) este prim si daca **da** se afiseaza perechea de numere. Se testeaza daca am ajuns la numarul de perechi de numere prime cerut si daca nu se continua algoritmul cu numarul prim mai mic. În momentul în care un numar se dovedeste a nu fi prim se trece la urmatorul numar impar.

**58.** Se citesc prin intermediul modulului **Input.s** usor modificat, dimensiunea unui sir si elementele sale ca numere întregi pozitive. Se stocheaza în memoria DLX la adresa specificata. Se seteaza suma si elementul maxim pe 0, iar minimul la o valoare maxima admisa (fie 0x7fff). Se parcurge sirul si se executa operatiile:

- a. Se însumeaza în registrul suma - (fie r15) – suma numerelor anterior citite cu cea a elementului curent.

- b. Dacă elementul curent (citit din memorie), este mai mare decât maximul, atunci maximul devine elementul curent.
- c. Dacă elementul curent este mai mic decât minimul, atunci minimul devine elementul curent.
- d. Se reia punctul a. până am parcurs tot sirul.
- e. Se afișează suma, maximul și minimul în fereastra DLX-IO.

**61.** Retea de tip crossbar, permite implementarea oricărei bijecții procesoare-module memorie; rețea unibus, un singur procesor master la un moment dat.

- 62.**
- 1. Operație “*write miss*” pe busul comun.
  - 2. Citire bloc de la unul din cache-urile care îl deține (“*snooping*”).
  - 3. Toate procesoarele care au deținut respectivul bloc în cache-uri, îl trec în starea “*invalid*” ( $V=0$ ).
  - 4. Procesorul care l-a citit în pasul 2, îl scrie și îl pune în cache în starea “*exclusiv*”.

## 11. CE GASITI PE CD ?

---

Plecând de la premisa ca tehnica de calcul si tehnologia informatiei constituie si va constitui si în România un element important în derularea oricarui tip de activitate, CD-ul ce însoteste aceasta carte cuprinde o serie de aplicatii, documente si alte fisiere care încearca sa sprijine la un cost rezonabil necesarul zilnic de cunoastere al studentilor din anii terminali, masteranzi si doctoranzi din domeniul ingineriei calculatoarelor si domenii conexe; al inginerilor si cercetatorilor.

Cea mai mare parte a programelor si fisierelor existente pe acest CD sunt în limba româna. Materialul este organizat pe mai multe directoare, fiecare dintre ele corespunzând, pe cât posibil, unui domeniu distinct. Acele programe sau fisiere care nu au putut fi incluse în nici unul dintre domeniile prezentate mai jos sunt grupate sub denumirea comuna de **Diverse**.

În plus, daca doriti sa cititi aceasta carte în format electronic, va punem la dispozitie textul carti în format *.pdf*. Pentru a putea citi acest format aveti la dispozitie programul Adobe Acrobat Reader pe care trebuie sa-l instalati pe calculatorul dumneavoastra.

### 11.1. SIMULAREA UNOR ARHITECTURI CU PARALELISM LA NIVELUL INSTRUCTIUNII

Aceasta sectiune realizeaza o descriere sumara a simulatoarelor, (structura, implementare, resurse necesare, ghid de utilizare, platforma de executie), prezente pe suportul CD-ROM care însoteste aceasta carte, dar si pe Internet la adresa <http://www.sibiu.ro/ing/vintan/simulatoare.html>.

Evaluarea performantelor arhitecturilor de calcul se face prin simulare, fara simulare fiind foarte dificil, practic imposibil, de estimat. Metodele de investigare folosite sunt cunoscute sub denumirile de *execution* sau *trace driven simulation*.

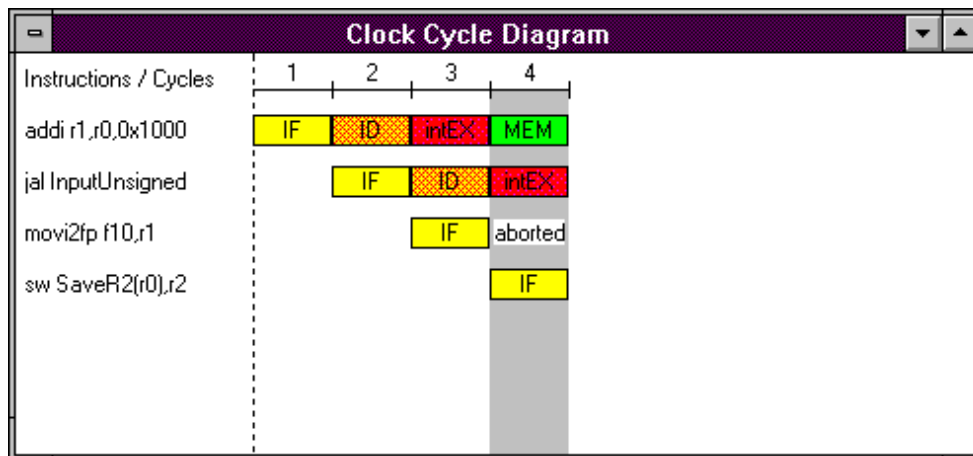
Simulatoarele sunt dedicate arhitecturilor RISC scalare (MIPS) si superscalare (DLX, simulatoare de cache-uri, predictoare de branch-uri, simulatoare la nivel de executie a instructiunilor *in order* respectiv *out of order* într-o arhitectura superscalara parametrizabila tipica - HSA [Hatfield Superscalar Architecture], scheduler - optimizator de cod - pentru arhitectura HSA).

Arhitectura familiei de microprocesoare RISC MIPS R2000/3000 este aprofundata prin intermediul simulatorului software numit SPIM, conceput de catre James R. Larus. Arhitectura MIPS, pe lânga succesul sau comercial, constituie unul dintre cele mai inteligibile si elaborate arhitecturi RISC.

SPIM/SAL este o portare pe WIN32S a SPIM, simulator scris pentru uz didactic în Facultatea de Calculatoare a Universitatii din Wisconsin, SUA. WIN32S este o extensie pe 32 de biti a sistemului Windows 3.1. Interfata programabila cu aplicatia a WIN32S este un subset al WIN32, un API suportat de sistemul de operare Windows NT. Aplicatii ce folosesc WIN32S API, cum sunt SPIM/SAL, sunt compilate într-un format executabil numit *executabil portabil* (PE) care ruleaza fie pe Microsoft Windows 3.1. cu extensie WIN32S fie pe Microsoft Windows NT.

SPIM poate citi si executa imediat fisiere scrise în limbaj de asamblare sau executabile MIPS. El contine un debugger si asigura câteva servicii specifice sistemelor de operare. SPIM este mult mai încet decât un calculator real (aproximativ 100 de ori). Totusi, costul scazut si larga aplicabilitate nu poate fi egalata de hardware-ul adevarat.

Microprocesor virtual, abreviat DLX, elaborat de catre profesorii John Hennessy (Univ. Stanford, SUA) si David Patterson (Univ. Berkeley, SUA), reprezinta o arhitectura RISC superscalara, didactica dar si performanta, cu cinci nivele pipeline de procesare, care este investigata prin intermediul unui excelent simulator software, înzestrat cu facilitati didactice deosebite si cu o grafica atragatoare. Scopul este de a ajuta la înțelegerea conceptelor legate de procesarea pipeline a instructiunilor precum si a aspectelor arhitecturale specifice procesoarelor RISC. Pentru o înțelegere mai buna dar si pentru a stârni interesul cititorului, în continuare se exemplifica sumar, pe diagrama ciclilor procesorului, desfasurarea procesarii pipeline a instructiunilor, aferente unui program de test.



**Figura 11.1.** Diagrama ciclului de tact

În diagrama alaturata se observa ca simularea este în al patru-lea ciclu, prima instructiune este în nivelul MEM (acces la memorie), a doua în intEX (executie operatie aritmetico-logica) si a patra în IF (extragere instructiune din memorie). A treia instructiune este întrerupta. Motivatia consta în faptul ca a doua instructiune **jal**, este un salt neconditionat. Acest lucru e cunoscut abia dupa cel de-al treilea ciclu de tact, dupa ce instructiunea de salt a fost decodificata. În acest timp, instructiunea imediat urmatoare celei de salt (**movi2fp**) a trecut de faza IF, însa instructiunea care se va executa efectiv dupa instructiunea de salt se afla la alta adresa. Astfel, executia instructiunii **movi2f** trebuie întrerupta, lasând loc gol în pipe. Saltul se va face la eticheta *InputUnsigned*. Pentru detalii suplimentare accesati simulatorul DLX de pe CD.

Din grupul simulatoarelor de cache-uri amintim pe cel ce realizeaza simularea interfetei procesor - cache (BLWBCACH) într-o arhitectura superscalara parametrizabila. Scopul principal al simulării îl constituie evaluarea si optimizarea unor elemente esentiale – memoriile cache – ce caracterizeaza practic toate microprocesoarele superscalare avansate. Accentul este pus pe problematica cache-urilor, mai precis pe relatia dintre nucleul de executie si o arhitectura de memorie de tip Harvard, într-un context de procesor paralel, folosind tehnicile de scriere în cache cunoscute (*write back* si *write through*). Reamintim ca, o arhitectura Harvard se caracterizeaza atât prin spatii separate pentru instructiuni si date cât si prin busuri separate între procesor si memoria cache de date respectiv de instructiuni.

Al doilea simulator de cache-uri dezvoltat implementeaza conceptul de (*selective*) *victim cache* (HSVICTP2). Scopul urmarit este îmbunatatirea

performantelor memoriilor cache cu mapare directa, integrate într-un procesor paralel, utilizând conceptul de victime cache (simplu si selectiv). Pentru a reduce rata de miss a cache-urilor mapate direct (fara sa se afecteze timpul de hit sau penalitatea în caz de miss), Norman Jouppi a propus în 1990 conceptul de victim cache (o memorie mica complet asociativa, plasata între primul nivel de cache mapat direct si memoria principala; blocurile înlocuite din cache-ul principal datorita unui miss sunt temporar memorate în victim cache; daca sunt referite din nou înainte de a fi înlocuite din victim cache, ele pot fi extrase direct din victim cache cu o penalitate mai mica). Pentru reducerea numarului de interschimbari dintre cache-ul principal si victim cache, Stiliadis si Varma, au introdus în 1994 un nou concept numit selective victim cache(SVC). Investigatiile propuse se realizeaza cu ajutorul simulatoarelor amintite mai sus, parametrizabile, scrise în C, elaborate în cadrul grupului de cercetare în arhitecturi avansate de la Catedra de Calculatoare si Automatica a Facultatii de Inginerie din Sibiu.

Dintre cele doua predictoare de branch-uri prezente, primul (PAP) constituie o implementare detaliata a schemei de predictie cunoscuta în literatura de specialitate sub numele Pap (Per Address History Table, Per Address PHT) propusa de Yeh si Patt în 1992. Scopul simularii îl reprezinta investigarea unor arhitecturi moderne de predictoare a ramificatiilor de program (**branch**), în vederea reducerii penalitatilor introduse de instructiunile de ramificatie în procesoarele pipeline superscalare. Vor fi explorate în mod critic metodologiile de predictie existente, vor fi îmbunatatite, optimizate si stabilite limitările fundamentale. Se vor stabili schemele de predictie optimale asociate diferitelor tipuri de ramificatii din program.

Cel de-al doilea simulator de acest gen reprezinta o varianta neuronală de predictor idee novatoare ce apartine unuia dintre autorii acestei carti. Predictorul neuronal de salturi este constituit în principal dintr-o retea neuronală, un registru de istorie globală (HRG) si o tabela cu registrul de istorie locală. Reteaua neuronală este o retea de tip Multi Layer Perceptron având un singur nivel ascuns, un nivel de intrare si un nivel de iesire. Registrul de istorie globală (HRG) este un registru de deplasare de dimensiune parametrizabilă si contine rezultatul ultimelor  $k$  salturi, având rolul unui prim nivel de istorie a salturilor. Tabela registrilor de istorie locală reprezinta al doilea nivel de istorie a salturilor. Spre deosebire de HRG care era un registru comun tuturor salturilor, în acest caz, fiecare PC are propriul registru de istorie. Privind dintr-o alta perspectiva putem considera predictorul format dintr-o banda de intrare (trace-ul ce va fi simulat), un automat de predictie (reteaua neuronală) si o memorie (HRG si



tabela HRL) ce contine istoria salturilor. Implementarea simulatorului este realizata în limbajul C++, iar ca mediu de dezvoltare Microsoft Visual C++ v.6.0. Fara a intra în amanunte legate de programarea sub Windows se poate spune ca structura interfetei utilizata este de tipul MDI, putând simula mai multe trace-uri simultan.

CD-ul însoțitor cuprinde, de asemenea, doua simulatoare la nivel de executie a instructiunii, corespunzatoare arhitecturii superscalare concepute la Hatfield, Anglia. Primul, RES\_SIM (simulator de resurse) realizat într-o forma primara, dar puternic parametrizabil, nu implementeaza conceptul de cache însa detine diverse alte facilitati precum: procesare in order, principalul rezultat generat fiind rata de procesare, vizualizarea gradului de utilizare a resurselor, generarea trace-ului de instructiuni în urma simulării etc.

Al doilea simulator aferent arhitecturii HSA (OUT\_SIM) este mult mai complex si îl completeaza pe primul. Este implementat conceptul de cache, împreuna cu mecanisme auxiliare gen DWB (data write buffer) sau Outstanding Buffer (victim cache). De asemenea, noul simulator implementeaza mecanismul de executie *out of order* cu procesele componente corespunzatoare (*branch prediction*, *out of order instruction dispatch*, *renaming* aplicat registrilor prin algoritmi tip Tomasulo, *buffer de reordonare* pentru *mentinerea precisa a întreruperilor* si coerenței procesorului etc.).

Pe arhitectura superscalara HSA cu procesare in order s-a dezvoltat un scheduler (HSS) în scopul reorganizării instructiunilor pentru eliminarea dependentelor date existente, eliminarea software a BDS (branch delay slot) si cresterea potentialului de paralelism. Schedulerul de instructiuni dezvolta o serie de tehnici: *software pipelining*, *combining*, *merging* (*move*, *immediate*), *inlining* aplicat procedurilor, analiza *anti-alias*, în scopul optimizării performantelor buclelor (basic-block-urilor) pentru cresterea globala a nivelului de paralelism disponibil. Daca pentru toate simulatoarele anterioare platforma de rulare era Windows '9x sau NT, platforma de executie pentru schedulerul de instructiuni HSS este Linux sau Unix.

Procesorul superscalar HSA încearca sa creasca paralelismul la nivelul instructiunilor atât **static** - în momentul compilării - prin scheduling , cât si **dinamic** - în timpul executiei - prin diverse mecanisme (procesare out of order, utilizare DWB, branch prediction). Ambele simulatoare (RES\_SIM si OUT\_SIM) pot primi ca parametri de intrare fisiere cod masina schedulate sau neschedulate.

Un dosar (folder) va cuprinde programele de test (benchmark-urile) existente si necesare pentru simulare. Programele tip benchmark numite Stanford, sunt o suita de opt programe care necesita putina initializare de

date si care sunt gândite sa manifeste comportamente similare cu scopul general al programelor de calculator, desi unele au o natura recursiva. Programele implica executia a 100 pâna la 900 de mii de instructiuni dinamice. Codul original C este întâi trecut printr-un compilator “*gnu CC*” care produce formatul corect al codului în mnemonica de asamblare, precum si directive de asamblare, comenzi de alocare a datelor. Codul este apoi executat pe un simulator la nivel de instructiuni, care produce la iesire un fisier trace de instructiuni. De remarcat ca, la rularea repetata a aceluiasi program C aferent oricaruia din cele opt benchmark-uri se obtine acelasi fisier Trace. Fisierele prezente au urmatoarele extensii:

- ✓ **.C** - codul sursa original al programelor de test.
- ✓ **.ins** - varianta cod masina a benchmark-urilor necesare simulatorului de cache (BLWBCACH) si pentru cele doua simulatoare *execution driven* aferente arhitecturii HSA (RES\_SIM si OUT\_SIM).
- ✓ **.inp** - similare ca format cu cele *.ins* (practic o versiune mai noua), necesare ca parametri de intrare celor doua simulatoare *execution driven* aferente arhitecturii HSA (RES\_SIM si OUT\_SIM).
- ✓ **.out** - varianta schedulata (optimizata) a benchmark-urilor cu extensia *.ins*. Sunt utilizate de catre simulatorul RES\_SIM pentru cuantificarea (determinarea) gradului de paralelism obtinut într-o procesare *in order* prin scheduling.
- ✓ **.trc** - fisiere trace reprezentând o înlantuire de triplete  $\langle TipInstr\ AdrCrt\ AdrDest \rangle$ , unde *TipInstr* poate lua una din valorile ‘B’ – branch, ‘L’ – load, ‘S’ – store; *AdrCrt* reprezinta valoarea registrului PC – adresa instructiunii curente, iar *AdrDest* reprezinta adresa de memorie a datei accesate – în cazul instructiunilor cu referire la memorie (‘L’ / ‘S’) sau adresa destinatie a saltului – în cazul instructiunilor de salt si ramificatie (‘B’). Sunt generate de simulatorul *execution driven* RES\_SIM având ca parametri de intrare benchmark-urile *.ins*, si necesare simulatoarelor trace driven de cache-uri: (BLWBCACH, HSP2VICT). Exista totusi o deficiente a acestor trace-uri: nu evidentiaza salturile care nu se fac. Din acest motiv s-au generat noi trace-uri (fisierele \*.tra).
- ✓ **.txt** - pentru simularea trace driven a interfetei procesor - cache într-o arhitectura superscalara parametrizabila (BLWBCACH), pe lângă cele 8 fisiere *trace* (\*.trc) sunt necesare 8 fisiere identice ca nume având extensia (\*.txt). Aceste fisiere (menite sa pastreze doar instructiunile), sunt o prelucrare proprie a programelor scrise în mnemonica de asamblare (\*.ins), cu scopul de a ajuta la determinarea dependetelor de date reale existente între instructiuni (RAW) si aplicarea eventuala a unor tehnici de tip *forwarding* (*combining*).

- ✓ **.tra** - fisiere trace proprii, utilizate în cadrul predictoarelor de branch-uri implementate (PAP, NEURONAL). Sunt o prelucrare a programelor scrise în mnemonica de asamblare (\*.ins) și a trace-urilor originale (\*.trc), cu scopul de a evidenția toate salturile (inclusiv cele care nu se fac). Conțin doar branch-urile (atât cele care se fac cât și cele care nu se fac) și exclud instrucțiunile Load / Store.
- ✓ **.lib, .dll** - librării statice și dinamice necesare în simularea arhitecturilor HSA.
- ✓ **.shd** - varianta schedulată (optimizată) a benchmark-urilor Stanford, utilizată de simulatorul OUT\_SIM. Rezultă un fenomen foarte interesant și contrastant, și anume: performanța obținută (rata de procesare) printr-o execuție out of order a fișierelor schedulate este inferioară celei obținute la procesarea în order a fișierelor schedulate (și chiar celei obținute prin procesare out of order a fișierelor neschedulate).
- ✓ **.use** - fișiere rezultat, de tip text, generate în urma simulării, la nivel de execuție a benchmark-urilor Stanford, efectuată pe arhitectura HSA. Sunt utile analizei calitative și cantitative a performanțelor obținute. Cuprind rezultate semnificative: timp total execuție, număr instrucțiuni procesate, grad de utilizare resurse, acuratețe de predicție (acolo unde există implementată o schemă de predicție), configurația arhitecturală aleasă, timp în care procesorul stagnează, rate de hit în cache-uri (la simulatorul OUT\_SIM).

## 11.2. PROGRAME DIVERSE

Sub acest titlu veți găsi o multime de programe utilitare din cele mai diverse domenii: viewer-e de documente în diverse formate, arhivatoare, browser de internet, kit de instalare Java, etc.

- ◆ Dosarul Adobe - kit de instalare pentru Adobe Acrobat Reader 4.05 (versiune pe 32 de biți) - citește și afișează fișierele *.pdf* (freeware);
- ◆ Winzip.exe;
- ◆ Windows Commander v.4.5.1 (PC WORLD 9/2000);
- ◆ Java (TM) 2 SDK, Standard Edition, v.1.3 (PC WORLD 9/2000);
- ◆ Internet Explorer 5.01 - pentru Windows '9x și WindowsNT - (PC WORLD 9/2000);

### 11.3. DOCUMENTE

Trei dintre fisierele aparținând secțiunii curente reprezintă cartea de față în format *.pdf*, *.doc* și *zip*.

- ◆ Cartea de față în format *.pdf* sau *.doc* și arhivată cu utilitarul Winzip (format *.zip*).
- ◆ Alte fișiere în diverse formate *.html* și *.txt*, *.bmp*.

**Obs.** Toate programele cuprinse pe acest CD sunt shareware sau freeware și sunt incluse fără modificări. Autorii acestei cărți nu-și asumă nici o responsabilitate pentru utilizarea acestor fișier și programe.

## BIBLIOGRAFIE

---

- [1] **Philips Semiconductors** – *80C51 – Based 8-Bit Microcontroller*, Integrated Circuits, Data Handbook, SUA, February 1994.
- [2] **Philips Semiconductors** – *DS-750 Development Tools, User's Manual*, CEIBO, March 1994.
- [3] **Vintan, L.** – *Arhitecturi de procesoare cu paralelism la nivelul instructiunilor*, Editura Academiei Române, ISBN 973-27-0734-8 Bucuresti, 2000.
- [4] **Chou, H., Chung, P.** – *An Optimal Instruction Scheduler for Superscalar Processor*, IEEE Transaction on Parallelism and Distributed Systems, No. 3, 1995.
- [5] **Jouppi, N.** – *Improving Direct-Mapped Cache Performance by the addition of a Small Fully Associative Cache and Prefetch Buffers*, Proc. 17<sup>th</sup> International Symposium On Computer Architecture, 1990.
- [6] **Stiliadis, D., Varma, A.** – *Selective Victim Caching: A Method to Improve the Performance of Direct-Mapped Caches*, TR UCSC-CRL-93-41, University of California, 1994 (republished in a shorter version in IEEE Trans. on Computers, May 1997).
- [7] **McFarling, S.** – *Cache replacement with dynamic exclusion*, In Proc. 19<sup>th</sup> Int'l. Symposium on Computer Architecture, 1992, pages 192÷200.
- [8] **Hennessy, J., Patterson, D.** – *Computer Architecture: A Quantitative Approach*, Morgan Kaufmann Publishers, 2-nd edition, 1996.

[9] **Hill, M.** – *A Case for Direct-Mapped Caches*, IEEE Computer, December 1988.

[10] **Sugumar, R., Abraham, S.** – *Efficient simulation of caches under optimal replacement with applications to miss characterization*, Performance Evaluation Review, 21(1):24-35, 1993.

[11] **Belady, L.** – *A study of replacement algorithms for a virtual-storage Computer*, IBM Systems Journal, 1966.

[12] **Wall, D., Borg, A., Kessler, R.** – *Generation and analysis of very long address traces*, In Proc. 17<sup>th</sup> Int'l. Symposium on Computer Architecture, 1990, pages 290÷298.

[13] **Steven, G.B.** – *iHARP Instruction Set Specification*, Computer Science Technical Report No. 124, School of Information Sciences, University of Hertfordshire, June 1991.

[14] **Collins, R.** – *Developing A Simulator for the Hatfield Superscalar Processor*, Division of Computer Science, Technical Report No. 172, University of Hertfordshire, December 1993.

[15] **Vintan L., Florea A.** – *Sisteme cu microprocesoare. Aplicatii.* – Editura Universitatii “Lucian Blaga” Sibiu, 1999, ISBN 973-9410-46-4.

[16] **Steven, G. B.** – *A Novel Effective Address Calculation Mechanism for RISC Microprocessors*, ACM SIGARCH, No 4, 1991

[17] **Collins, R., Steven, G.B.** – *An Explicitly Declared Delayed Branch Mechanism for a Superscalar Architecture*, Microprocessing and Microprogramming, vol.40, 1994

[18] **Collins, R.** – *Exploiting Instruction Level Parallelism in a Superscalar Architecture*, PhD Thesis, University of Hertfordshire, October 1995.

[19] **Ebcioğlu, K.** – *A Compilation Technique for Software Pipelining of Loops with Conditional Jumps*, Proceedings of the 20<sup>th</sup> Annual Workshop on Microprogramming, ACM Press, 1987, pp 69-79.

- [20] **Ebcioğlu, K., Groves, R. D., Kim, K., Silberman, G. M., Ziv, I.** – *VLIW Compilation Techniques in a Superscalar Environment*, SigPlan94, Orlando, Florida, 1994, pp 36-48.
- [21] **Fisher, J. A.** – *Trace Scheduling: A Technique for Global Microcode Compaction*, IEEE Transactions on Computers, C-30, (7), July 1981, pp 478-490.
- [22] **Lam, M. S.** – *Software Pipelining: An Effective Scheduling Technique for VLIW Machines*, SIGPLAN 88 Conference of Programming Language Design and Implementation, Georgia, USA, June 1988, pp 318-328.
- [23] **Nicolau, A.** – *Uniform Parallelism Exploitation in Ordinary Programs*, Proceedings of the International Conference on Parallel Processing, August 1985, pp 614-618.
- [24] **Potter, R., Steven, G. B.** – *Investigating the Limits of Fine-Grained Parallelism in a Statically Scheduled Superscalar Architecture*, 2<sup>nd</sup> International Euro-Par Conference Proceedings, vol. 2, Lyon, France, August 1996, pp 779-788.
- [25] **Rau, B. R.** – *Iterative Modulo Scheduling: An Algorithm For Software Pipelining Loops*, Micro 27, November 1994, San Jose, California, pp 63-73.
- [26] **Rau, B. R., Fisher, J. A.** – *Instruction – Level Parallel Processing: History, Overview and Perspective*, The Journal of Supercomputing, vol. 7, No. ½, 1993, pp 9-50.
- [27] **Sazeides, Y., Vassiliadis, S.** – *The Performance Potential of Data Dependence Speculation & Collapsing*, IEEE Micro 29, 1996, pp 238-247.
- [28] **Steven, F. L.** – *An Introduction to the Hatfield Superscalar Scheduler*, University of Hertfordshire, Technical Report No. 316, 1998.
- [29] **Steven, G. B., Collins, R.** – *Instruction Scheduling for a Superscalar Architecture*, Proceedings of the 22<sup>nd</sup> Euromicro Conference, Prague, September 1996, pp 643-650.

- [30] Steven, G. B., Christianson, D. B., Collins, R., Potter, R. D., Steven, F. L. – *A Superscalar Architecture to Exploit Instruction Level Parallelism*, Microprocessors and Microsystems, Vol. 20, No. 7, March 1997, pp 391-400.
- [31] Steven, F. L., Potter, R. D., Steven, G. B., Vintan, L. – *Static Data Dependence Collapsing in a High – Performance Superscalar Processor*, 3<sup>rd</sup> International Conference on Massively Parallel Computing Systems, Colorado, April 1998.
- [32] Warte, N. J., Mahlke, S. A., Hwu, W. W., Rau, B. R. – *Reverse If – Conversion*, SigPlan 93, Albuquerque, New Mexico, June 1993, pp 290-299.
- [33] Vintan, L. – *Metode de Evaluaare si Optimizare în Arhitecturile Paralele de tip I.L.P*, Editura Universitatii “Lucian Blaga” Sibiu, 1997.
- [34] – *IA-64 Application Developer’s Architecture Guide*, Intel Corporation, May 1999 (Order No 245188-001)
- [35] Patterson, D., Sequin, C. – *A VLSI Reduced Instruction Set Computer*, Computer, October, 1982
- [36] Smith, J., Sohi, G. – *The Microarchitecture of Superscalar Processors*, Technical Report, Madison University, August, 1995 (<http://www.wisconsin.edu>)
- [37] Franklin, M. – *Multiscalar Processors*, Ph. D Thesis, University of Wisconsin, 1993.
- [38] Patel, S. J. – *Critical Issues Regarding the Trace Cache Fetch Mechanism*, Technical Report, CSE-TR-335-97, University of Michigan, 1997.
- [39] Maxim, C., Rochange, C., Sainrat, P. – *Instruction Reuse Based on Dependent Instruction Sequences*, In Proc. of 6<sup>th</sup> International Symposium on Automatic Control and Computer science, vol. 2, ISBN 973-9390-42-0, Iasi, 1998.



[40] **Sodani, A., Sohi, G. S.** - *Dynamic Instruction Reuse*, In Proc. of. 24<sup>th</sup> Annual International Symposium on Computer Architecture, pages 194-205, July 1997.

[41] **Sodani, A., Sohi, G. S.** - *An Empirical Analysis of Instruction Repetition*, In Proc. of. 8<sup>th</sup> International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems, October 1998.

[42] **Vassiliadis, S., Phillips, J., Blaner, B.** - *Interlock Collapsing ALUs*, In IEEE Transactions on Computers, Vol. 42, No. 7, 1993, pp. 825 – 839.

[43] **Lipasti, M. H., Wilkerson, C. B., Shen, J. P.** - *Value Locality and Load Value Prediction*. In Proc. of. 7<sup>th</sup> International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems, pages 138-147, September 1996.

[44] **Richardson, S. E.** - *Caching function results: Faster arithmetic by avoiding unnecessary computation*. Technical Report, Sun Microsystems Laboratories, 1992.

[45] **Patt, Y. N., Yeh, T. Y.** - *Two-level adaptive training branch prediction*, In Proc. of. 24<sup>th</sup> Annual International Symposium on Microarchitecture, pages 51-61, November 1991.

[46] **Wang, K., Franklin, M.** - *Highly Accurate Data Value Prediction using Hybrid Predictors*. In Proc. of. 30<sup>th</sup> Annual International Symposium on Microarchitecture, pages 281-290, December 1997.

[47] **Sazeides, Y., Smith, J. E.** - *The Predictability of data Values*, In Proc. of. 30<sup>th</sup> Annual International Symposium on Microarchitecture, pages 248-258, December 1997.

[48] **Huang, J., Lilja, J. D.** - *Exploiting Basic Block Value Locality with Block Reuse*, Technical Report HPPC, September, 1998.

[49] **Sodani, A., Sohi, G. S.** - *Understanding the Differences Between Value Prediction and Instruction Reuse*, In Proc. of. 31<sup>st</sup> Annual International Symposium on Microarchitecture, 1998.

[50] **Tomasulo, R.** - *An Efficient Algorithm for Exploiting Multiple Arithmetic Units*, IBM Journal, Nr. 11, 1967.

[51] \*\*\* – *Computer Review. The Future of Microprocessors*, IEEE Computer Society Press, September, 1997.

[52] **Smith, J. E., Vajapeyam, S.** – *Trace Processors: Moving to Fourth Generation Microarchitectures*, In IEEE Computer, september 1997, Volume 30, number 9, pages 68-74.

[53] **Tsai, J. Y., Yew, P. C.** – *Performance Study of a Concurrent Multithreaded Processor*, In Proc. of. 4<sup>th</sup> International Symposium on High Performance Computer Architecture, Las Vegas, February 1998.

[54] **PCWorld România** , nr. 9/2000, Septembrie 2000, pg. 17, Editura Communications Publishing Group S.R.L., ISSN 1220-8639.

[55] **Lepak, K., Lipasti, M.** – On the Value Locality of Store Instructions, Int'l Conference ISCA 2000, Vancouver, 2000

[56] **Williams, M.** – *Bazele Visual C++ 4*, Editura Teora, Bucuresti, Octombrie 1998.

[57] **Ryan, B.** – *RISC Drives Power PC*, in Byte, August, 1993.

[58] **Johnson M.** – *Superscalar Microprocessor Design*, Prentice Hall, 1991.

[59] **Knuth, D. E.** – *Tratat de programarea calculatoarelor*, vol. I, IV, Editura Tehnica, Bucuresti, 1974.