

ANALIZA FACTORILOR DE COST ÎN SPAȚIUL DE PROIECTARE A SISTEMELOR ÎNCORPORATE

Vitalie Secrieru, Sergiu Zaporozjan, Valerian Dorogan

Universitatea Tehnică a Moldovei

primcast@mail.ru, zaporojan_s@yahoo.com, dorogan@adm.utm.md

Abstract. *Architectures can be evaluated by their cost and performance. While there are computer designs where costs tend to be ignored, specifically supercomputers, cost-sensitive designs are of growing importance. Embedded systems are usually cost sensitive. The paper presents a cost model for embedded systems. Because absolute cost measured in currency is changing every year, it is reasonable to define cost in terms of such parameters that influence cost. Our analysis considers the key factors that affect system cost. The proposed model cannot account for all the factors which affect cost, but it offers the possibility to isolate the most important ones, especially when comparing two closely related architectures. Our intention is to focus on the differences and discuss the ways they affect the cost factors. In this way, we can estimate the influence of the design decision on the hardware cost of embedded system.*

Cuvinte-cheie: *sistem încorporat, arhitectură, performanță, cost.*

I. Introducere

În proiectarea unui calculator, inclusiv a unui sistem încorporat (EmS), trebuie respectate atât cerințele funcționale, cât și ținta cost-performanță [1-4]. Problema ce ține de cost și cost-performanță este una complexă. În general nu există o țintă unică pentru proiectanții diverselor sisteme de calcul. Chiar dacă există proiecte de calculatoare care tind să ignore costurile - supercalculatoarele oferă un caz specific în acest sens, importanța și actualitatea proiectării sistemelor cost-efective este în continuă creștere. Ca dovadă poate servi faptul că proiectarea în spațiul calculatoarelor înaltperformante [5] ocupă o nișă foarte mică pe piața sistemelor de calcul. De altă parte, proiectarea în spațiul calculatoarelor cu cost redus sau cu un raport cost-performanță relativ echilibrat devine tot mai importantă [3]. Majoritatea sistemelor încorporate se încadrează în acest spațiu de proiectare, de regulă fiind caracterizate ca sisteme cost sensitive [4].

Importanța analizei factorilor de cost și performanță a sistemelor încorporate crește ca urmare a unor constrângeri și presiuni tot mai accentuate impuse de piață. În acest sens putem menționa necesitatea satisfacerii unor cerințe stricte privind consumul de putere, dimensiune fizică și greutate, etc. Un alt aspect, nu mai puțin important, ține de concurență și dictează inclusiv reducerea timpului de proiectare – implementare pe piață. În aceste condiții efectuarea analizei cost-performanță a sistemelor încorporate a devenit actuală și prezintă interes practic.

La moment, în literatura de specialitate problema menționată este tratată foarte superficial, fiind într-o fază incipientă. Există două aspecte, prin care poate fi explicată această stare de lucruri. În spațiul de proiectare considerat dispozitivele sunt adesea proiectate pentru o clasă particulară de aplicații, ceea ce face mult mai dificilă analiza comparată cost-performanță. Totodată, în acest spațiu de proiectare, pe prim planul aplicației sunt adeseori puse în evidență considerente de cost și consum de putere, ca fiind de importanță majoră pentru aplicația încorporată [3].

Scopul acestei lucrări constă în a efectua o analiză a factorilor de cost în spațiul de proiectare a sistemelor încorporate, luând în considerație segmentul aplicațiilor de nivel mediu, atât ca complexitate, cât și ca volum de realizare.

II. Modelul costurilor aplicațiilor încorporate de nivel mediu

În proiectarea sistemelor încorporate ca punct de referință servesc, în primul rând, caracteristicile clasei particulare de aplicații. Arhitectura unui sistem EmS poate fi eventual eficientă într-o gamă largă de algoritmi. Este însă extrem de important, mai mult chiar, este obligatoriu ca acea arhitectură să asigure performanța impusă la costuri minime. În general, costurile sistemelor încorporate trebuie analizate cu prioritate. La prima vedere nu pare a fi o problemă. Realitatea însă e ceva mai complicată.

Costul absolut măsurat în prețuri curente se modifică în fiecare an. Din această cauză este mult mai util de a defini costul unui sistem în termenii unor asemenea parametri, care influențează costurile respective. Acești parametri includ parametri fizici, cum ar fi aria capsulei circuitului integrat, numărul de circuite, aria suprafeței cablajului imprimat, numărul de pini, consumul de putere, toți aceștia derivând dintr-o realizare arhitecturală. De asemenea, trebuie considerați factorii asociați cu proiectarea-dezvoltarea sistemului, cum ar fi dimensiunea și complexitatea softului ce trebuie elaborat, etc.

În spațiul de proiectare a aplicațiilor încorporate pot fi scoși în evidență câțiva factori, care caracterizează un sistem încorporat și influențează costurile acestuia (fig.1).

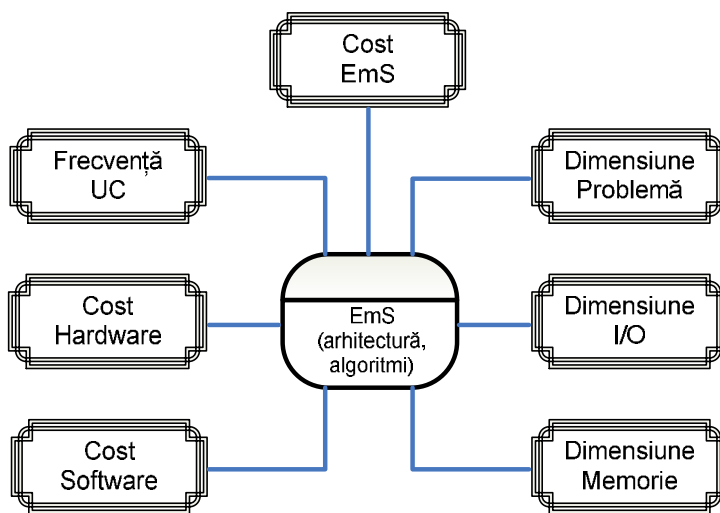


Fig.1. Factorii cost-performanță ai unui sistem încorporat

Factorii de bază care influențează costul și performanța EmS, indiferent de aplicație sunt:

- Frecvența unității centrale (UC) de prelucrare.
- Cost hardware. Include costul circuitelor, cablajului și altor componente EmS.
- Cost program. Costul aplicației este asociat costului de dezvoltare a programului.
- Dimensiunea problemei. Reflectă volumul sarcinii de lucru, fiind corelată cu complexitatea aplicației. Ca aplicații de nivel mediu pot fi referite aplicațiile încorporate pe 16/32 biți.
- Dimensiunea spațiului de intrare-ieșire.
- Dimensiunea memoriei. Numărul de octeți sau cuvinte utilizate în execuția programului. Cerințele față de memorie depind de dimensiunea problemei și a spațiului de program, algoritmi și structura de date utilizate.

O analiză cantitativă a unui sistem de calcul trebuie să se bazeze pe criterii bine definiți. Un criteriu crucial în acest sens este oferit de metrica calității sistemului [6]. Metrica calității reprezintă o mărime ponderată a performanței P și costului C , expresia matematică a acesteia fiind:

$$Q = P^{1-q} / C^q \quad (1)$$

Parametrul de ponderare $q \in [0,1]$ determină dacă costul ori performanța are un impact mai mare asupra calității, fiind interpretat și ca parametru al calității. La o extremă avem cazul $Q = P$, când doar performanța contează, la alta regăsindu-se cazul $Q = 1/C$, când costurile trebuie reduse la valori minime strict impuse de aplicație. Pentru $q = 0,5$ metrica calității Q modelează raportul clasic cost-performanță.

În spațiul sistemelor încorporate accentul se pune mai mult pe cost, decât pe performanță, astfel încât putem afirma cu certitudine că pentru aplicațiile încorporate $q \geq 0,5$. Evident, indiferent de valoarea lui q , evaluarea calității unui sistem încorporat cu relația (1) nu este posibilă fără a avea calculate (estimate) costurile. Restul lucrării se referă anume la acest ultim aspect.

Ținând cont de fig. 1, costurile unui EmS pot fi exprimate prin: costurile pentru proiectare-dezvoltare $C_{proiectare}$, costurile hardware C_H și costurile software C_P , astfel rezultând expresia:

$$C_{EmS} = C_{proiectare} + C_H + C_P \quad (2)$$

Un model nu poate lua în considerație toți factorii ce influențează costurile, însă poate scoate în evidență cei mai importanți dintre aceștia, în special când sunt comparate două arhitecturi apropiate. Intenția noastră constă în a ne axa pe deosebiri și analiza cum acestea afectează factorii de cost, eventual făcând diferența dintre două arhitecturi. Fiecare abordare arhitecturală are avantaje și dezavantaje, care afectează costul arhitecturii. În continuare vom încerca să estimăm decizia de proiectare în spațiul considerat prin prisma influenței acestora asupra parametrilor de cost.

În calitate de abordări de alternativă considerăm două arhitecturi: pe bază de microcontroler (fig.2), respectiv dispozitiv (re)configurabil (fig.3).

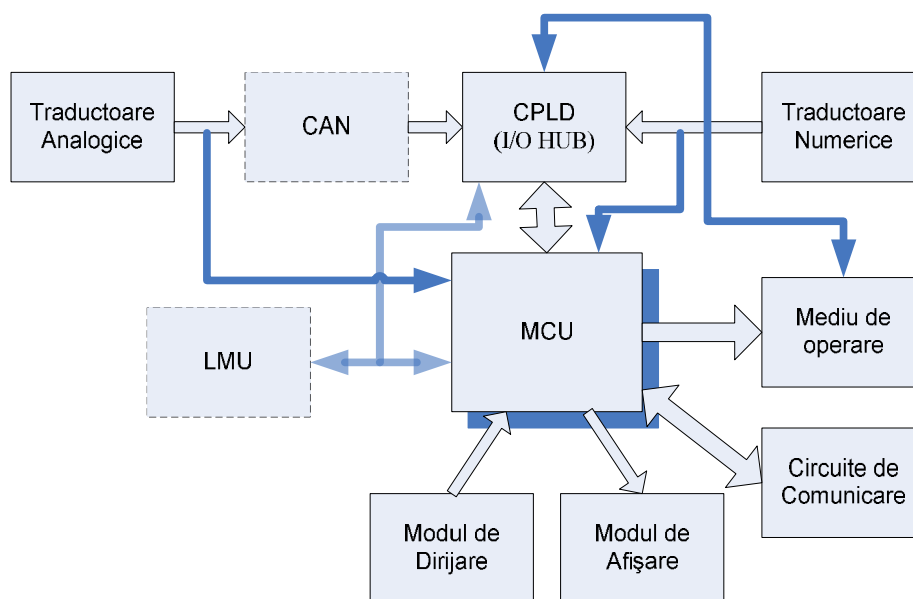


Fig.2. Sistem încorporat pe bază de microcontroler (MCU)

Presupunând că suma costurilor $C_{proiectare}$ și C_P este aproximativ identică pentru ambele arhitecturi luate în considerație, vom pune accent pe componenta de cost hardware C_H , care reprezintă un cost recurent, ce se repetă pentru fiecare unitate de produs. În acest caz variația costului sistemului încorporat va fi determinată de diferențele arhitecturale ale celor două realizări. Pentru a reflecta acest fapt vom diviza costurile hardware în două părți: fixe și variabile. Astfel, relația pentru costurile hardware se va exprima prin suma:

$$C_H = C_H^{fix} + C_H^{var} \quad (3)$$

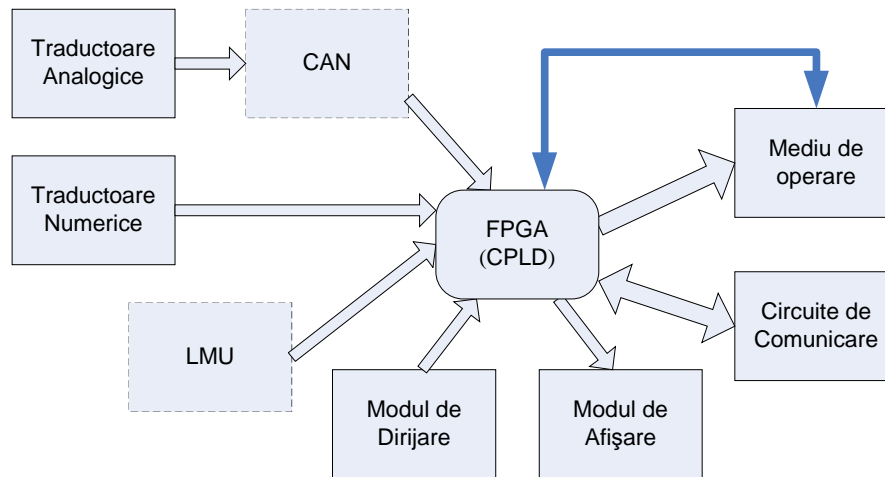


Fig.3. Sistem încorporat pe bază de dispozitiv (re)configurabil (FPGA)

Primul termen în relația (3) reprezintă costul componentelor hardware care sunt comune pentru ambele realizări arhitecturale și poate fi specificat în felul următor:

$$C_H^{fix} = C_{TA} + C_{TN} + C_{COM} + C_{panou} + C_{CAB} \quad (4)$$

cu notațiile: C_{TA} - costul traductoarelor analogice; C_{TN} - costul traductoarelor numerice; C_{COM} - costul circuitelor de comunicație; C_{panou} - costul componentelor ce alcătuiesc panoul de dirijare și de afișare; C_{CAB} - costul componentelor ce formează blocul de alimentare, carcasa produsului, etc.

Al doilea termen în relația (3) reprezintă costul componentelor hardware ce diferă de la o arhitectură la alta și poate fi specificat astfel:

$$C_H^{var} = C_{UC} + C_{CONV} + C_{MEM} + C_{I/O} + C_{PCB} \quad (5)$$

cu notațiile: C_{UC} - costul unității centrale de prelucrare; C_{CONV} - costul circuitelor de conversie; C_{MEM} - costul circuitelor de memorie locală; $C_{I/O}$ - costul circuitelor de acoperire a spațiului de intrare/ieșire; C_{PCB} - costul de fabricație a cablajului imprimat exprimat pe unitate de produs.

După cum a fost menționat mai sus variația costurilor EmS va fi determinată în special de expresia (5). Pentru un sistem încorporat construit pe bază de microcontroler (fig.2) expresia (5) se va transforma, luând forma:

$$C_H^{var} = C_{MCU} + k_1 C_{CONV} + k_2 C_{MEM} + C_{CPLD} + C_{PCB} \quad (6)$$

în care coeficienții k_1 și k_2 au următoarea semnificație:

$$k_1 = \begin{cases} 0, & \text{daca conversia este incorporata sau lipseste} \\ 1, \max & 1 - \text{convertorul este extern} \\ & \max - \text{este functie de numarul de biti; rata de conversie} \end{cases}$$

$$k_2 = \begin{cases} 0, & \text{daca memoria este incorporata sau lipseste} \\ 1, \max & 1 - \text{memoria este externa} \\ & \max - \text{este functie de dimensiunea problemei} \end{cases}$$

Pentru un sistem încorporat construit pe bază de dispozitiv (re)configurabil (fig.3) expresia (5) se va transforma, luând următoarea formă:

$$C_H^{\text{var}} = C_{\text{FPGA/CPLD}} + k_1^1 C_{\text{CONV}} + k_2 C_{\text{MEM}} + C_{\text{PCB}} \quad (7)$$

în care semnificația coeficientului k_2 este identică cu cea din expresia (6), iar pentru k_1^1 avem:

$$k_1^1 = \begin{cases} 0, & \text{daca conversia lipseste} \\ 1, \max & 1 - \text{convector extern} \\ & \max - \text{este functie de numarul de biti; rata de conversie} \end{cases}$$

Valoarea numerică a costurilor de bază $C_{\text{FPGA/CPLD}}$, C_{MCU} , C_{CONV} , și C_{MEM} poate fi luată din lista de prețuri a producătorilor de circuite integrate, iar diapazonul de variație a coeficienților k_1 , k_1^1 și k_2 poate fi estimat, reîșind din clasa particulară de aplicații.

În spațiul de proiectare a sistemelor încorporate costul cablajului imprimat pe unitate de produs reprezintă o componentă deloc de neglijat. În continuare vom dezvolta un model, care permite estimarea rapidă a costului cablajului imprimat la etapa inițială de proiectare a EmS. După cum se cunoaște, costul de fabricație a cablajului imprimat este funcție de: numărul de straturi ale cablajului imprimat; suprafață (conține suprafața totală, adică volumul comenzii în dm^2); masca de protecție (da/nu); marcarea elemente (da/nu); confecționarea fotoșabloanelor în dependență de suprafața în dm^2 ; etc.

Costul cablajului imprimat pe fiecare unitate EmS poate fi exprimat ca produsul dintre suprafața cablajului imprimat și costul unui dm^2 de cablaj:

$$C_{\text{PCB}} = c \cdot S_{\text{PCB}} \quad (8)$$

În relația (8) s-a notat cu $c = f(S_{\text{Total}})$ costul unui dm^2 de cablaj imprimat funcție de suprafața totală a comenzii, iar S_{PCB} reprezintă aria suprafeței cablajului imprimat pe fiecare unitate de produs. Volumul sau suprafața totală a comenzii se va obține prin înmulțirea ariei suprafeței plachetei de cablaj imprimat pe unitate de produs cu numărul V_{un} de unități fabricate:

$$S_{\text{Total}} = S_{\text{PCB}} \cdot V_{\text{un}} \quad (9)$$

Notând cu S_{min} suprafața cablajului imprimat indispensabilă pentru realizarea arhitecturii EmS în configurație minimală, și ținând cont de limitarea spațiului I/O în varianta minimală, se poate scrie pentru aria suprafeței cablajului imprimat:

$$S_{\text{PCB}} = S_{\text{min}} + S_{\text{I/O}} \quad (10)$$

unde $S_{\text{I/O}}$ reprezintă suprafața cablajului imprimat destinată extinderii spațiului de intrare/ieșire al sistemului încorporat și, implicit, capabilităților EmS.

Aria suprafeței $S_{\text{I/O}}$ poate fi determinată, reieșind din dimensiunile geometrice ale capsulei dispozitivului CPLD și suprafața necesară pentru trasarea firelor de conexiune ale acestuia cu alte elemente ale circuitului electric:

$$S_{\text{I/O}} = r \cdot S_{\text{CPLD}} \quad (11)$$

unde r este un coeficient de rutare, care poate fi determinat din considerente practice.

Al doilea termen în expresia (11) reprezintă aria capsulei dispozitivului CPLD dată de relația

$$S_{\text{CPLD}} = L_{\text{CPLD}}^2 \quad (12)$$

în care L_{CPLD} este lungimea laturii capsulei dispozitivului.

Pentru a estima lungimea laturii se va recurge la expresia:

$$L_{CPLD} = \sqrt{\frac{D_{I/O}}{D_{I/O \text{ Baza}}}} \cdot L_{\text{baza}} \quad (13)$$

care a fost obținută pe cale empirică. În această relație $D_{I/O}$ indică dimensiunea spațiului extins de I/O sub forma numărului de intrări/ieșiri necesare în aplicația încorporată; $D_{I/O \text{ Baza}}$ este un număr, care fixează dimensiunea spațiului I/O de bază și este luat cu referință la un dispozitiv real capabil să acopere un spațiu minim de I/O, iar L_{baza} reprezintă valoarea numerică reală a laturii dispozitivului de bază. Eroarea de estimare a laturii cu expresia (13) constituie aproximativ $\pm 2\%$ pentru capsule de tip FBGA (FineLine Ball-grid array) într-o gama de la 100 până la 1932 de pini.

Din relațiile (11), (12) și (13) rezultă expresia

$$S_{I/O} = r \cdot \left(\sqrt{\frac{D_{I/O}}{D_{I/O \text{ Baza}}}} \cdot L_{\text{baza}} \right)^2 \quad (14)$$

cu care se poate aproxima aria suprafeței cablajului imprimat introdusă prin extinderea spațiului de intrare/ieșire al sistemului încorporat. Ținând cont de relația (14), obținem în final:

$$S_{PCB} = S_{\min} + r \cdot \frac{D_{I/O}}{D_{I/O \text{ Baza}}} \cdot L_{\text{baza}}^2 \quad (15)$$

Atribuind valori argumentate pentru coeficienții k_1 , k_1^1 și k_2 , S_{\min} , r , $D_{I/O \text{ Baza}}$ și L_{baza} , poate fi cercetată variația costurilor cablajului imprimat calculate cu expresiile (8), (9) și (15) funcție de dimensiunea $D_{I/O}$ a spațiului de intrare/ieșire și numărul V_{un} de unități EmS fabricate. Expresia (15) poate fi utilă și în estimarea dimensiunilor fizice ale sistemului. Aplicând expresiile (6) și (7), devine posibilă analiza cantitativă comparată a costurilor hardware pentru arhitecturile de alternativă considerate (fig.2 și 3), costurile fiind funcție de $D_{I/O}$ și corelate cu V_{un} .

III. Concluzii

Modelul prezentat în cadrul acestei lucrări oferă proiectanților de sisteme încorporate un mecanism simplu de estimare comparată a costurilor hardware pentru arhitecturi de alternativă, fiind posibilă și estimarea dimensiunilor fizice. Modelul dezvoltat în lucrare poate fi utilizat la proiectarea aplicațiilor încorporate pe segmentul de nivel mediu sau redus atât ca complexitate cât și ca volum de realizare.

IV. Referințe

1. Wolf W. Computers as Components. *Principles of Embedded computing system design*. Morgan Kaufmann Publishers, 2nd edition, 2008.
2. Hennessy J.L., Patterson D.A. Computer Architecture: *A Quantitative Approach*. Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, CA, 1990.
3. Hennessy J.L., Patterson D.A. Computer Architecture: *A Quantitative Approach*. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, CA, 3rd edition, 2003.
4. Berger A.S. Embedded Systems Design. *An Introduction to Processes, Tools and Techniques*. CMP Books, 2002.
5. Stone H.S. High-Performance Computer Architecture. Addison Wesley, 3rd edition, 1993.
6. Mueller S.M., Paul W.J. Computer Architecture: *Complexity and Correctness*. Springer, 2000.