

EFICIENTIZAREA CONSUMULUI DE ENERGIE ÎN SISTEME TIMP-REAL

Cristina-Sorina CERTEJAN (căs. STÂNGACIU)

Teza de față abordează o serie de domenii conexe, dintre care principalele două sunt reprezentate de către cel al sistemelor timp-real și cel al sistemelor încorporate.

Pornind de la aceste domenii principale, cercetarea se axează pe alte subdomenii și anume: cel al rețelelor de senzori și dispozitive inteligente, cel al tehnicilor de planificare pentru aplicații timp-real și cel al consumului de energie electrică în sisteme timp-real încorporate, un domeniu relativ nou, de un interes deosebit, fapt dovedit mai ales prin numărul mare de publicații recente ce vizează acest domeniu, număr aflat într-o continuă creștere.

Tema cercetării cuprinse în această teză este cea a cadrelor suport și a metodologiilor de reducere a energiei electrice în sistemele timp-real încorporate, vizând în special sistemele critice și ținând cont de particularitățile acestora.

Principală țință al tezei este aceea de a propune un cadru suport și o metodologie pentru analiza consumului unei aplicații timp-real critice pe un sistem țință (încorporat) și de a oferi o soluție de reducere a acestui consum. Pentru atingerea acestei țințe au fost fixate următoarele obiective:

1. Conceperea și dezvoltarea unui model de consum de energie la nivel de sistem pentru o serie de clase de dispozitive timp-real încorporate, definite în prealabil.
2. Conceperea și dezvoltarea unui cadru, reprezentând un mediu hardware și software și a unei metodologii aferente, pentru măsurarea și determinarea parametrilor modelului consumului de energie de la punctul precedent.
3. Dezvoltarea unui mecanism de planificare, pe mai multe niveluri, pentru sisteme timp-real încorporate, cu funcție de eficientizare a consumului de energie electrică.
4. Validarea mecanismului de planificare, prin execuția aplicației pe sistemul țință și realizarea unei analize a comportării aplicației timp-real direct pe sistem.

Teza de față, prezintă contribuțiile proprii și sintetizează activitatea de cercetare, cuprinsă în programul de doctorat cu tema "Planificarea sistemelor de timp real cu funcție de eficientizare a consumului", care a fost întreprinsă sub conducerea științifică a domnului prof. dr. ing. Vladimir I. CREȚU, în cadrul laboratorului DSPLabs, din departamentul de Calculatoare al Universității Politehnica Timișoara. Activitatea este o continuare a preocupărilor de cercetare în domeniile vizate, începute din timpul programului de studii de licență și continuate pe parcursul studiilor de master.

Lucrarea de față este structurată în șapte capitole:

1. Primul capitol constituie o scurtă introducere în domeniul cercetării, motivând alegerea temei și prezentând obiectivele cercetării și contextul de realizare.
2. În al doilea capitol sunt prezentate o serie de noțiuni teoretice ce constituie baza și punctul de pornire al cercetării curente. Principalul scop al acestui capitol este cel de a defini termenii utilizați pe parcursul lucrării.

Sunt definite și clasificate sistemele timp-real vizate, sunt prezentate modele de taskuri, dintre care sunt vizate taskurile critice, periodice, independente. Sunt prezentati pe scurt și

clasificați principalii algoritmi de planificare pentru taskurile timp-real, în special cei ce vizează astfel de taskuri (critice).

3. Capitolul al treilea trece în revistă principalele abordări privind consumul de energie electrică pentru sisteme timp-real încorporate, prezentând totodată starea domeniului de cercetare.

Capitolul începe prin descrierea problematicii consumului de energie electrică în sistemele vizate, urmând să prezinte principalele direcții de abordare a acestei probleme:

- Eficientizarea consumului prin reducerea puterii la nivel de consumator principal (pe de o parte este vizată puterea computațională- caracteristică procesorului, pe de altă cea de comunicație, caracteristică modulului de comunicație)
- Abordarea la nivel de componentă, la nivel de placă și la nivel de rețea
- Abordarea în funcție de tipul de putere vizat pentru reducerea consumului: reducerea puterii dinamice- prin metode ce vizează reducerea tensiunii de alimentare și/sau a frecvenței de lucru, reducerea puterii totale (dinamice+statice)- prin metode ce vizează trecerea dispozitivelor în diferite stări de repaus (sleep, stand-by), când acestea nu sunt folosite.

Sunt evidențiate efectele și limitele reducerii consumului de putere: cel mai important compromis făcându-se între consum și viteza de procesare. Un consum mic, implică o viteză de procesare mică, iar în sistemele de timp real, viteza de procesare trebuie tratată cu mare atenție, datorită constrângerilor de timp.

Pe de altă parte, deși au fost dezvoltate modele de consum la nivel de dispozitive, și algoritmi pentru reducerea acestui consum, nu există modele și implicit nici algoritmi la nivel de placă, sau acestea sunt fie prea simple și implicit incomplete, fie modele particulare.

De asemenea în prezent există prea puține și incomplete cadre de măsurare a performanțelor energetice la nivel de nod/dispozitiv.

Tot în acest capitol sunt prezentate comparativ și analizate din punct de vedere al reducerii de energie și al posibilelor implicații asupra comportării temporale și a predictibilității sistemului timp-real critic, principalele soluții propuse din literatura de specialitate (fiind studiate peste 90 de lucrări, în acest sens). Această activitate a fost parțial publicată și într-o lucrare de conferință. Capitolul se încheie cu un tabel comparativ al acestor soluții.

4. În capitolul al patrulea este propus și prezentat un sistem cadru pentru analiza, estimarea și eficientizarea consumului de energie pentru o anumită aplicație ce rulează pe o platformă dată, numită și platforma sau sistemul țintă (în particular această platformă va fi un nod de rețea de senzori). Sistemul cadru propus se numește TEEARTS (Time and Energy Efficiency Analysis for Real Time Systems).

Principalele funcționalități ale sistemului corespund cu obiectivele cercetării:

1. Dezvoltarea unui model de consum de energie la nivel de sistem pentru o platformă țintă dată, ce face parte dintr-o serie de clase de dispozitive timp-real încorporate, definite în prealabil.
2. Măsurarea și determinarea parametrilor modelului consumului de energie de la punctul precedent, pentru o anumită aplicație dată.
3. Planificarea aplicației cu ajutorul unui mecanism de planificare, pe mai multe niveluri, pe platforma țintă, cu funcție de eficientizare a consumului de energie electrică.
4. Execuția aplicației pe sistemul țintă și realizarea unei analize a comportării aplicației timp-real direct pe sistem.

Dintr-o analiză a aspectelor teoretice prezentate în Capitolul 3, putem identifica principalii factori de influență ai consumului de energie datorat execuției unei anumite aplicații pe o platformă dată: pe de o parte avem sistemul fizic, cu particularitățile sale energetice; pe de alta avem, cerințele aplicației. Atât sistemul fizic cât și particularitățile aplicației modelează consumul de energie prin câte un set de factori de influență, ce pot fi împărțiți în două mari categorii: factori energetici (cu o influență directă asupra consumului de energie) și factori temporali (cu o influență indirectă asupra consumului de energie). Fiecare set de factori de influență este determinat, specificat și devine, un set de parametri măsurabili și controlabili, integrați într-un model unitar.

Pentru fiecare tip de parametru este descris, cel puțin un exemplu de cadru de determinare și măsurare a acestuia. Acest cadru, va cuprinde, o descriere a uneltelor folosite, o metodologie de determinare a parametrilor și a valorilor acestora și cel puțin un exemplu de utilizare.

În primul rând este specificată și descrisă arhitectura sistemului țintă vizat. Acest sistem trebuie să îndeplinească o serie de cerințe dintre care: să ofere predictibilitate la nivel de instrucțiune (astfel sunt evitate mecanismele de tip cache sau management al memoriei, care nu sunt predictibile), să interacționeze cu mediul (să ofere suport pentru întreruperi), să ofere suport pentru reprezentarea timpului, etc.

Sistemul cadru conține un modul pentru determinarea parametrilor energetici și măsurarea valorilor acestora: astfel, sistemul țintă va fi împărțit în componente capabile de a-și schimba starea de consum în mod dinamic (fie prin variația tensiunii de alimentare, a frecvenței sau prin trecerea dintr-o stare predefinită în alta), componente definite în lucrare ca *dispozitive elementare*. Pentru aceste *dispozitive* se vor determina principalii parametri energetici: stările de funcționare, puterea specifică fiecărei stări și costul de energie datorat tranzițiilor dintr-o stare în alta.

Analog, sistemul cadru conține un modul pentru determinarea parametrilor temporali: după ce aplicația a fost împărțită în taskuri, pentru fiecare task se va determina timpul de execuție pentru cazul cel mai defavorabil. Tot cu acest modul se vor determina timpii necesari pentru a trece sistemul dintr-o stare de funcționare în alta.

După ce parametrii au fost determinați avem un model al consumului de energie al unei aplicații menite să ruleze pe platforma țintă, dată. Modelul oferă o abordare unitară în descrierea stărilor de funcționare ale unui dispozitiv, modelând atât stările date de variația tensiunii de alimentare, a frecvenței de lucru cât și stări predefinite sau definite de utilizator, de asemenea modelul oferă o abordare unitară în descrierea dispozitivelor, indiferent de tipul acestora.

Acest model va fi analizat cu ajutorul unui sistem de analiză și planificare a execuției, se vor face ajustări ale parametrilor modelului (acolo unde este posibil) și se va genera un model de execuție al aplicației pe platforma țintă astfel încât consumul energetic să fie redus.

Principalele contribuții prezentate în acest capitol sunt:

- este definit și specificat sistemul țintă pentru care este propus un model de comportament temporal și energetic al sistemului la nivel de task.
- este propus un sistem de analiză energetică și temporală a comportamentului unui sistem țintă pe parcursul execuției fiecărui task al unei aplicații, format dintr-un mediu de analiză a consumului de energie pe baza unui model la nivel de task, ce este publicat, într-o formă preliminară, în [A7].
- sunt propuse două variante de extensie ale unui sistem de operare numit HARETICK ce constituie două medii de execuție și planificare hibride a căror propunere și implementare pe

platforme fizice au fost publicate în [A2] și [A8].

O este prezentată integrarea unei serii de module de măsurare, de planificare și analiză a comportamentului energetic și temporal al aplicațiilor timp-real ce rulează pe platforma țintă, într-un sistem cadru mai general numit TEEARTS. Acest sistem fiind propus ca un sistem unitar într-o formă originală.

5. În al cincilea capitol este propus și prezentat, la nivel de detaliu, un algoritm pentru planificarea taskurilor timp-real critice, cu funcție de eficientizare a consumului de energie electrică.

Tot în acest capitol este prezentată o particularizare a modelului taskurilor din sistemul cadru TEEARTS, prezentat în capitolul anterior, pentru a servi ca model de comportare energetică și temporală a taskurilor planificate cu algoritmul propus.

Partea esențială a acestui capitol este constituită din propunerea și din descrierea funcționalității și a principiilor de implementare ale unui algoritm de reducere a consumului de energie datorat aplicațiilor timp-real ce rulează pe o platformă țintă. Acest algoritm este implementat prin inserarea codului său în modulele executivului unui sistem de operare existent, numit HARETICK. Ca baza pentru implementarea algoritmului de reducere a energiei s-a folosit un algoritm de planificare non-preemptiv, pentru taskuri critice, ce planifică taskurile într-o manieră perfect periodică (i.e. între oricare două instanțe succesive ale unui task există aceeași distanță de timp). Acest algoritm se numește FENP (fixed execution non-preemptive).

Algoritmul poate fi prezentat pe scurt prin următorul pseudocod:

Determinare task curent

PENTRU fiecare dispozitiv elementar utilizat de taskul curent

 DACA dispozitivul nu este în stare activă

 activează dispozitivul

 marchează activarea dispozitivului

Lansare execuție taskul curent

Determinare task următor

Extragere moment lansare în execuție task următor

Determinare timp *idle*

PENTRU fiecare dispozitiv elementar din sistem

 DACA este în stare activă

 DACA timpul *idle* este mai mare decât limita de rentabilitate (L) a dispozitivului

 SAU dispozitivul nu este utilizat de către taskul următor

 inactivează dispozitivul

 marchează inactivarea dispozitivului

ALTFEL

 DACA este utilizat de către taskul următor

 SI timpul de activare este mai mare decât limita de timp pentru activare

 activează dispozitivul

 marchează activarea dispozitivului

Reducerea consumului de energie prin planificarea aplicației cu ajutorul algoritmului TEEPARTS și execuția acesteia pe platforma țintă, reprezintă principala funcționalitate a sistemului cadru propus, astfel realizându-se obiectivul principal al acestei cercetări doctorale, cel de a: *dezvolta un mecanism de planificare, pe mai multe niveluri, pentru sisteme timp-real încorporate, cu funcție de eficientizare a consumului de energie electrică.*

6. Al șaselea capitol prezintă validarea sistemului cadru TEEARTS. Se pune accent în mod special pe validarea algoritmului de planificare TEEPARTS, prin implementarea acestuia pe două platforme țintă, reprezentate de către EFM32-G8xx-STK și EFM32GG-STK3700 și prin măsurarea consumului unei aplicații planificate cu și fără algoritmul TEEPARTS propus.

Tot aici sunt descrise platformele țintă și se prezintă detalii de implementare specifice acestora și mediului de execuție și planificare ales. Varianta de implementare propusă este analizată din punct de vedere al impactului asupra sistemului de operare, având în vedere următorii parametri: surplusul de memorie utilizat, influența asupra latenței întreruperilor, asupra jitter-ului de execuție a taskurilor și încărcarea suplimentară procesor.

Tot în acest capitol sunt prezentate rezultate ale analizei algoritmului propus, obținute atât prin măsurare directă pe platformele țintă vizate, cât și cu ajutorul modului de analiză prin intermediul unui simulator numit TEEPATSSim.

De asemenea este prezentat un sistem folosit pentru a analiza performanțele algoritmului de planificare din punct de vedere al memoriei utilizate și al impactului asupra comportării temporale a sistemului de operare peste care a fost implementat. Rezultatele obținute în urma acestei analize sunt prezentate și sintetizate într-un mic tabel.

Acest algoritm a fost analizat și din punct de vedere al performanțelor asupra reduceri de energie, pe de o parte cu ajutorul modului de determinare a parametrilor energetici, pe baza unor studii de caz; iar pe de altă parte prin realizarea unor simulări cu ajutorul unui mediu de simulare TEEPARTSSim, dezvoltat în cadrul program de cercetare.

Pentru cazurile considerate s-au obținut reduceri de energie între 50 și 66%, determinate în mod direct prin măsurători. Iar, cu ajutorul simulatorului s-a obținut o reducere de energie între 25 și 60%, pentru o variație a factorului de utilizare procesor între 10 și 41%.

Principalul rol al acestui capitol este de a prezenta validarea algoritmului pe platformele considerate și de a prezenta comportamentul aplicațiilor planificate cu acest algoritm ce rulează pe platforme reale. Simulatorul are doar rolul de a face estimări (pesimiste) asupra unor eventuale scenarii de execuție pentru care rularea pe platforma propriu zisă nu este la îndemână sau este anevoioasă.

Prin cele prezentate a fost îndeplinit și obiectivul final al cercetării doctorale și anume: *validarea mecanismului de planificare, prin execuția aplicației pe sistemul țintă și realizarea unei analize a comportării aplicației timp-real direct pe sistem.*

7. Ultimul capitol îl reprezintă concluziile, sinteza contribuțiilor și perspectivele de dezvoltare

Obiectivele finale ale sistemului cadru propus în urma acestei cercetări și ale tezei de doctorat, sunt, așa cum apar în capitolul 1:

1. *Furnizarea unui model de consum de energie la nivel de sistem pentru o serie de clase de dispozitive timp-real încorporate, definite în prealabil.*
2. *Conceperea și dezvoltarea unui cadru, reprezentând un mediu hardware și software și a unei metodologii aferente, pentru măsurarea și determinarea parametrilor modelului consumului de energie de la punctul precedent.*
3. *Dezvoltarea unui mecanism de planificare, pe mai multe niveluri, pentru sisteme timp-real încorporate, cu funcție de eficientizare a consumului de energie electrică.*
4. *Validarea mecanismului de planificare, prin execuția aplicației pe sistemul țintă și realizarea unei analize a comportării aplicației timp-real direct pe sistem.*

Primele două obiective au fost atinse prin conceperea și dezvoltarea unui sistem cadru, cu mai multe componente, și a unui model de consum pentru o serie de platforme țintă vizate, pentru care s-au prezentat o serie de specificații. Această activitate a fost prezentată în capitolul **Error! Reference source not found.**

Pentru prezentarea atingerii obiectivului al treilea a fost dedicat un capitol separat (capitolul **Error! Reference source not found.**), acest obiectiv reprezentând principalul scop al acestei cercetări. În acest capitol este astfel propus și detaliat un algoritm de planificare pentru taskuri timp-real critice (și nu numai), cu funcție de eficientizare a consumului de energie electrică, algoritm dezvoltat pe două niveluri, primul constituit dintr-o componentă statică implementată pe un PC, iar al doilea constituit dintr-o componentă dinamică implementată direct pe platforma țintă.

Capitolul **Error! Reference source not found.** este dedicat ultimului obiectiv, cel al validării mecanismului de planificare, prin execuția acestuia pe o platformă țintă reală, dar și prin analiza performanțelor mecanismului de planificare. Pentru cazurile considerate s-au obținut reduceri de energie între 50 și 66%, determinate în mod direct prin măsurători. Iar, cu ajutorul simulatorului s-a obținut o reducere de energie între 25 și 60%, pentru o variație a factorului de utilizare procesor între 10 și 41%.

Perspectivile de dezvoltare sunt destul de numeroase datorită domeniului, care prezintă și va prezenta și în continuare un interes deosebit. Astfel sunt propuse:

- dezvoltarea unui mediu integrat care să determine atât parametrii de timp cât și cei de consum de energie pentru un cod dat la nivel de instrucție.
- dezvoltarea mediilor de analiză și măsurare a parametrilor, care nu iau în considerare mai multe dispozitive ale unui sistem țintă în același timp. Sistemul de măsură a timpilor de execuție ia în considerare doar procesorul și eventual și accesele la memorie, dacă sunt specificate de utilizator, nu se iau în considerare perifericele, magistralele și timpii de acces la alte dispozitive care pot fi conectate la procesor. Pe de altă parte sistemele de măsurare a energiei fie iau în considerare procesorul, fie întreaga placă, dar nu fiecare dispozitiv în parte. De aici rezultă o altă posibilă direcție de dezvoltare.
- dezvoltarea în continuare a algoritmului de reducere a energiei electrice. În varianta curentă acesta vizează doar o serie de algoritmi de planificare, modelul taskurilor poate fi extins și poate fi folosit și la dezvoltarea unor alți algoritmi de reducere a energiei electrice, pe baza altor algoritmi de planificare, decât cei statici, non-preemptivi.

Principalele contribuții prezentate în această lucrare sunt:

- o analiză comparativă a principalelor metode existente de eficientizare a consumului de energie electrică prin mecanisme de control software pentru sisteme timp-real încorporate, evidențiind totodată impactul pe care acestea îl pot avea asupra sistemelor timp-real critice, activitate ce a fost parțial publicată și într-un articol de conferință.
- definirea și specificarea sistemului țintă pentru care este propus un model de comportament temporal și energetic al sistemului la nivel de task.
- propunerea unui sistem de analiză energetică și temporală a comportamentului unui sistem țintă pe parcursul execuției fiecărui task al unei aplicații, format dintr-un mediu de analiză a consumului de energie pe baza unui model la nivel de task, ce este publicat, într-o formă preliminară, într-un articol de conferință în domeniu.
- propunerea, dezvoltarea și implementarea a două variante de extensie ale unui sistem de operare numit HARETICK ce constituie două medii de execuție și planificare hibride a

căror propunere și implementare pe platforme fizice au fost publicate în două articole de conferință în domeniu.

- prezentarea integrării unei serii de module de măsurare, de planificare și analiză a comportamentului energetic și temporal al aplicațiilor timp-real ce rulează pe platforma țintă, într-un sistem cadru mai general numit TEEARTS. Acest sistem fiind propus ca un sistem unitar într-o formă originală.
- Propunerea și dezvoltarea unui algoritm de planificare numit TEEPARTS pentru taskuri timp-real critice (și nu numai), cu funcție de eficientizare a consumului de energie electrică, algoritm dezvoltat pe două niveluri, primul constituit dintr-o componentă statică implementată pe un PC, iar al doilea constituit dintr-o componentă dinamică implementată direct pe platforma țintă.
- implementarea algoritmului TEEPARTS pe un exemplu de platformă țintă în scopul validării modelului energetic și temporal pentru taskuri și al algoritmului propus este prezentat un studiu de caz și o analiză a performanțelor acestui algoritm pentru acest caz și o serie de alte cazuri derivate din primul.