

**TEHNICI AVANSATE DE PLANIFICARE PENTRU SISTEME
MULTI-CORE VIRTUALIZATE
(„ADVANCED SCHEDULING TECHNIQUES IN VIRTUALIZED
MULTI-CORE SYSTEMS”)**

elaborată de ing. **Georgiana-Irina Macariu**

Începând cu anul 2004, marii producători de calculatoare și dispozitive embedded oferă o varietate din ce în ce mai mare de chip-uri multi-core, dând astfel naștere unei adevărate revoluții. Această revoluție s-a declanșat în condițiile incapacității tehnologice de a crește puterea de procesare folosind arhitecturile uni-procesor. În situația în care creșterea performanței prin creșterea frecvenței de operare presupune o creștere considerabilă a puterii consumate, o soluție fezabilă este reprezentată de folosirea mai multor core-uri care operează la o frecvență redusă. Programarea eficientă pentru aceste platforme paralele reprezintă o temă de cercetare de mare actualitate. Teza de față aduce o serie de contribuții în acest domeniu prin dezvoltarea unor metodologii și algoritmi noi pentru planificarea aplicațiilor în timp-real pe platforme multi-core.

Sistemele în timp-real reprezintă sisteme a căror corectitudine depinde nu numai de răspunsul logic oferit ci și de intervalul de timp în care acest răspuns este oferit. Planificarea sistemelor timp-real trebuie să trateze două aspecte. Pe de o parte este necesară *găsirea unui algoritm de planificare* a execuției a task-urilor astfel încât acestea să își îndeplinească termenele de timp. Pe de altă parte, se pune problema analizei planificabilității unui sistem de task-uri timp-real pe o anumită platformă multi-core, cu scopul de a determina dacă este posibilă îndeplinirea tuturor termenelor de execuție.

Teza de doctorat de față se încadrează în domeniul planificării sistemelor timp-real virtualizate și abordează problema planificabilității acestor sisteme. În prima parte, teza este concentrată pe elaborarea unei metodologii originale de analiză exactă a planificabilității acestor sisteme folosind tehnici de verificare formală și modelare cu ajutorul automatelor de timp. Metodologia este destinată sistemelor timp-real bazate pe componente, model arhitectural din ce în ce mai întâlnit în prezent. Aceasta constituie una dintre principalele diferențe față de soluțiile existente. O altă deosebire față de abordările anterioare este că metoda propusă în teză este destinată planificării globale pe sisteme multi-core, permițând migrarea și preempția task-urilor unei aplicații. Analiza bazată pe modele și verificare formală tratează sistemele virtualizate ale căror task-uri sunt independente sau prezintă relații de precedență. Un alt tip de relație ce poate apărea între task-urile unei aplicații este cel de partajare a unor resurse non-preemptive (diferite structuri de date, dispozitive de intrare-ieșire). Cea de-a doua parte a tezei tratează acest tip de relație și propune un protocol de acces sincronizat la astfel de

resurse, pentru sisteme multi-core simple, precum și o extensie a acestui protocol pentru sisteme virtualizate.

Domeniul planificării timp-real pe platforme multiprocesor, în general, și multi-core, în particular, s-a concentrat pe folosirea unui număr restrâns de modele de task-uri. O atenție deosebită este acordată task-urilor periodice și celor sporadice, modele utilizate preponderent și în această teză. Într-o primă etapă, planificarea acestor task-uri pe platforme multiprocesor s-a făcut folosind algoritmi și tehnici care presupun asignarea statică a task-urilor pe procesoare și aplicarea ulterioară a unuia dintre algoritmi de planificare uni-procesor existenți. Abia în perioada recentă, cercetarea în domeniul planificării timp-real s-a concentrat pe dezvoltarea unor algoritmi specifici platformelor multiprocesor. Astfel au fost dezvoltate tehnici globale de planificare care permit migrarea task-urilor între procesoarele sistemului. În ciuda cercetărilor exhaustive în domeniul planificării timp-real globale, până în prezent nu s-a găsit un test exact de planificabilitate folosind metode analitice, nici pentru sisteme multiprocesor simple, nici pentru cele virtualizate, indiferent de modelul de task-uri adoptat.

Virtualizarea asigură izolarea temporală a aplicațiilor timp-real folosind tehnici de rezervare a resurselor, precum partiții de timp sau servere de bandă (de execuție). Aceste resurse sunt alocate pe baza contractului aplicației, care specifică cerințele de resurse ale aplicației. Pe baza contractelor se poate face analiza de planificabilitate a unei aplicații și se pot determina caracteristicile serverelor de execuție sau ale partițiilor de timp alocate aplicației. Studiul literaturii de specialitate arată însă că toate aceste teste de planificabilitate oferă doar rezultate suficiente. În acest context, teza de față propune o abordare diferită de cea folosită curent și prezintă un test exact de planificabilitate folosind modelarea sistemului cu ajutorul automatelor de timp. Folosirea acestor automate a mai fost angajată în trecut pentru rezolvarea problemei planificabilității sistemelor multiprocesor nevirtualizate, dar scalabilitatea redusă a acestor soluții a făcut ca aplicabilitatea lor să fie extrem de redusă. Abordarea propusă în teză se remarcă prin scalabilitatea net superioară soluțiilor existente, cu atât mai importantă cu cât este aplicabilă pentru sisteme complexe precum cele virtualizate, caracterizate prin planificare ierarhică, pe două sau mai multe nivele.

Analiza planificabilității bazată pe modele formale de verificare ridică câteva probleme. Cea mai importantă dintre aceste probleme și cea care adeseori împiedică folosirea metodelor formale este explozia spațiului stărilor. Astfel, pentru automatele de timp, de exemplu, numărul stărilor este strâns legat de numărul ceasurilor folosite în modelare și al constantelor cu care aceste ceasuri sunt comparate. O a doua problemă, importantă mai ales pentru modelarea planificării globale în care un task poate migra de pe un core pe altul, este modelarea preempțiunii task-urilor. O analiză a formalismelor folosite în trecut pentru rezolvarea problemei planificării în timp-real arată ca automatele de timp reprezintă cea mai potrivită modalitate de modelare a sistemelor multi-core planificate global. Totuși, și acestea prezintă o constrângere datorită imposibilității luării unei decizii asupra planificabilității sistemului în cazul folosirii automatelor în timp continuu. Din acest motiv, în teză se folosesc automate de timp discret, pentru care posibilitatea atingerii unei anumite stări a sistemului este decidabilă.

În acest context, teza propune o metodă nouă pentru analiza planificabilității sistemelor bazate pe contracte pentru platforme multi-core. Metoda este destinată sistemelor virtualizate constituite dintr-un set de aplicații timp-real bazate pe componente. Fiecare componentă este compusă dintr-un set de task-uri periodice care prezintă termene critice de finalizare. Fiecărei componente i se poate asocia un planificator pentru task-urile asociate, iar la nivelul următor fiecare aplicație își poate planifica componentele folosind o strategie de planificare proprie. Metoda rezolvă problema planificabilității acestui tip de sisteme transformând-o într-o problemă de atingere a unei stări precizate a unui model de automate de timp al sistemului.

Într-o primă etapă metoda propusă consideră că task-urile componentelor sunt independente și au timp de execuție fixi. În acest caz, metoda de analiză a planificabilității sistemului oferă un test exact și prezintă avantajul că, spre deosebire de testele clasice care sunt definite de cele mai multe ori pentru un anumit algoritm de planificare, acest test poate fi aplicat pentru orice algoritm. Pentru această primă etapă, experimentele realizate arată scalabilitatea înaltă a metodei precum și performanța ei comparativ cu testele analitice.

În cea de-a doua etapă, teza extinde metoda anterioară pentru analiza sistemelor mai realiste în care componentele pot fi compuse din task-uri interdependente, afectate de constrângeri de precedență și cu timpi de execuție variabili, planificate pe platforme multi-core. Pentru acest model de sistem, literatura referitoare la planificarea timp-real clasică nu definește un test. Testul de planificabilitate propus în teză pentru acest caz este unul suficient. Un test exact ar putea fi obținut folosind automate de tip cronometru. Pentru acest tip de automate însă nu se poate decide dacă o anumită stare este accesibilă și din acest motiv, metoda propusă aproximează prin automate de timp cu timp discret automatele de tip cronometru. Metoda propusă este descrisă detaliat în teză, cu ajutorul unor definiții și teoreme formale. Aplicabilitatea metodei este demonstrată prin analiza decoderului multimedia H.264.

Strâns legată de problema planificabilității sistemelor multi-core timp-real virtualizate este alegerea partițiilor de timp alocate unei aplicații din sistem. Legat de acest aspect, teza prezintă o tehnică originală pentru proiectarea partițiilor de timp multi-core. Aceste partiții sunt proiectate în general manual, utilizarea verificării de model drept tehnică reprezentând o noutate. La fel ca în metodele propuse pentru analiza planificabilității, pentru determinarea partiției de timp destinate a găzdui o componentă sistem se folosește modelarea cu ajutorul automatelor de timp și verificarea acestui model folosind formule de logică temporală. Întrucât metoda propusă se bazează și pe simulări ale modelului, a apărut necesitatea alegerii unui interval de timp pentru care să ruleze aceste simulări. Plecând de la această necesitate, în teză se demonstrează că planul de execuție al unui set de task-uri periodice independente, executate pe un sistem multiprocesor cu partiții de timp, este repetitiv cu o anumită perioadă, rezultat care până în prezent nu a fost demonstrat. Această repetitivitate indică că se poate alege ca interval pentru simulare chiar perioada planului de execuție.

Experimentele realizate pe modelul propus au arătat că metoda este scalabilă și poate fi aplicată pentru sisteme cu până la 100 de task-uri. Experimentele au arătat de

asemenea că în cazul sistemelor cu constrângeri timp-real hard, metoda propusă este capabilă să realizeze partiții de timp cu pierderi reduse ale capacității de procesare.

În sistemele reale task-urile pot partaja o serie de resurse, a căror accesare necesită sincronizare astfel încât în orice moment orice resursă să fie folosită de către un singur task. Pentru a rezolva această problemă, teza propune protocolul LB-PCP (Limited Blocking - Priority Ceiling Protocol) pentru partajarea resurselor, altele decât procesorul, în sisteme timp-real planificate cu ajutorul unui algoritm preemptiv global cu prioritate fixă. Ideea acestui protocol a apărut plecând de la limitările protocolului PIP (Priority Inheritance Protocol) pe platformele multiprocesor. Pe aceste platforme, PIP poate conduce la situații în care task-uri de prioritate mică pot amâna nelimitat execuția task-urilor de prioritate înaltă. LB-PCP controlează acest tip de interferență fără a restricționa paralelismul oferit de platforma multiprocesor. Protocolul este descris la nivel de detaliu și exemplificat, fiind însoțit și de un test de planificabilitate care permite verificarea satisfacerii termenelor de timp ale unui set de task-uri. Analiza performanțelor protocolului, analiză bazată pe simulări experimentale, compară LB-PCP cu unul dintre cele mai recente protocoale destinate aceluiași tip de sisteme, respectiv protocolul P-PCP (Parallel - Priority Ceiling Protocol). În urma simulărilor se constată că protocolul LB-PCP este superior protocolului P-PCP în multe cazuri.

Tematica partajării mutual exclusive de resurse la sisteme multi-core virtualizate sau sisteme ierarhice cu două niveluri este tratată prin protocolul Parallel Hierarchical Resource Policy (P-HRP), propus aici și descris în manieră formală și detaliată. P-HRP permite aplicațiilor care se execută într-un mediu de planificare ierarhic să acceseze mutual exclusiv resursele partajate local sau global și, spre deosebire de protocoalele anterioare, permite procesarea paralelă în cadrul fiecărei aplicații asigurând în acest fel o utilizare mai eficientă a capacităților de procesare. Protocolul P-HRP permite ca la nivel sistem sau la nivelul aplicației să se folosească protocoale multiprocesor precum PIP, P-PCP sau LB-PCP. Testul de planificabilitate pentru P-HRP folosește analiza timpului de răspuns, evidențiind faptul că accesul la resurse la cele două nivele ale ierarhiei are efect cumulativ. Analiza performanțelor protocolului prin simulări subliniază cazurile în care protocolul poate fi folosit cu succes și arată comportamentul protocolului în cazul folosirii lui în combinație cu PIP sau LB-PCP.

Sintetizând contribuțiile tezei se conturează două direcții de cercetare. Pe de o parte, teza s-a concentrat pe folosirea tehnicilor de modelare și verificare formală pentru analiza planificabilității sistemelor timp-real multi-core virtualizate. Contribuțiile cheie în această direcție sunt:

- Dezvoltarea unei metode bazate pe verificare formală și automate de timp pentru verificarea constrângerilor timp-real a sistemelor cu task-uri independente planificate global și preemptiv. Metoda se remarcă prin scalabilitatea ridicată, oferind în același timp un test exact de planificabilitate.
- Dezvoltarea unei metode aproximative pentru testarea planificabilității sistemelor multi-core virtualizate, cu task-uri afectate de constrângeri de precedență și timpi de execuție variabili.
- Conceperea unei metode de proiectare automată a partițiilor temporale multi-core folosind verificarea formală a automatelor de timp. Metoda poate fi aplicată

pentru aplicații sau componente cu task-uri independente care se execută într-un sistem ierarhic cu două niveluri. Metoda folosește caracteristicile task-urilor ce compun aplicația și găsește partițiile de timp capabile să asigure îndeplinirea termenelor de finalizare a task-urilor cu irosire minimă a timpului de procesor.

A doua direcție de cercetare se concentrează pe partajarea în mod exclusiv a resurselor în sistemele timp-real multiprocesor, planificate global. Acest aspect este tratat atât pentru sisteme virtualizate, cât și pentru cele nevirtualizate. Contribuțiile cheie în această direcție sunt:

- Conceperea unui protocol pentru accesul mutual exclusiv la date partajate în sisteme multi-core planificate global cu un algoritm preemptiv și cu priorități fixe ale task-urilor.
- Conceperea unui protocol pentru accesul mutual exclusiv la date partajate în sisteme multi-core virtualizate cu două niveluri. La fiecare nivel de planificare se presupune folosirea unui algoritm de planificare global, preemptiv și cu priorități fixe ale task-urilor.