

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

**AUTOREFERÁT
DIZERTAČNEJ PRÁCE**

Žilinská univerzita v Žiline
Fakulta riadenia a informatiky

Dan Slováček, Mgr.

Autoreferát dizertačnej práce

Modelovanie a optimalizácia výkonnosti paralelných počítačov

na získanie akademického titulu „**philosophiaedoctor**“ (v skratke **PhD.**)
v študijnom programe doktorandského štúdia

Aplikovaná informatika

v študijnom odbore:

9.2.9 aplikovaná informatika

Žilina, apríl 2013

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia na Katedre technickej kybernetiky, Fakulte riadenia a informatiky Žilinskej univerzity v Žiline

Predkladateľ: Mgr. Dan Slováček
Žilinská univerzita v Žiline
Fakulta riadenia a informatiky
Katedra technickej kybernetiky

Školiteľ: Prof. Ing. Ivan Hanuliak, CSc.
Žilinská univerzita v Žiline
Fakulta riadenia a informatiky
Katedra technickej kybernetiky

Oponenti: prof. Ing. Petr Dostál, CSc.
Vysoké učení technické, Ústav informatiky, Brno

doc. Ing. Ladislav Schwartz, PhD.
EF, Katedra telekomunikácií, ŽU

Doc. RNDr. Václav Sedláček CSc.
Západočeská vysoká škola Třebíč, o.p.s.
Katedra Aplikované informační technologie

Prof. Ing. Jozef Sláma CSc.
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa o h. pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenu odborovou komisiou v študijnom odbore **9.2.9 aplikovaná informatika, v študijnom programe aplikovaná informatika**, vymenovanou dekanom Fakulty riadenia a informatiky Žilinskej univerzity v Žiline dňa

prof. Ing. Martin Klimo, PhD.

predseda odborovej komisie
študijného programu **aplikovaná informatika**
v študijnom odbore **9.2.9 aplikovaná informatika***
Fakulta riadenia a informatiky
Žilinská univerzita
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Úvod

Riešenie zložitých úloh teórie a praxe vyžaduje efektívnejšie a výkonnejšie počítače pri dostupnej cene. Typické príklady zložitých úloh sú problémy umelej inteligencie, robotiky, kombinatorické problémy, aplikácie signálových procesorov, predpovedanie počasia, úlohy modernej fyziky častíc, výskum kozmu, nedeterministické úlohy a pod. Efektívnymi cestami k zvyšovaniu výkonnosti súčasných počítačov sú implementácie paralelných princípov a to tak v oblasti technického vybavenia ako i v oblasti algoritmickej zložitých aplikácií.

Prvý krok aplikovania paralelných princípov sa datuje rokom 1960 u firmy IBM, ktorá pre zvýšenie výkonu veľkého počítača (Mainframe) navrhla prepojenie skupiny dvoch pre poskytnutie cenovo výhodnej alternatívy (Cluster). I v súčasnosti IBM HASP systém (Houston Automatic Spooling Priority) a jeho nasledovník JES (Job Entry System) ponúkajú spôsob vykonávania aplikácií v skupine veľkých prepojených počítačov. IBM podporuje paralelnú spoluprácu inovovaných veľkých počítačov cez PSS systém (Parallel Sysplex System), ktorý umožňuje technickému vybaveniu, operačnému systému, podpornému systémovému programovému vybaveniu a aplikovému programovému vybaveniu vysokú výkonnosť, pričom nie je obmedzené vykonávanie iných sekvenčných aplikácií.

Nasledovný krok v aplikácii paralelných princípov predstavoval superpočítač Cray-1, ktorý po prvý krát prepracoval sekvenčnú architektúru aplikovaním kombinácie zretiazenej (Pipelining) a vektorového paralelného spracovania (Vector processing) pre dosiahnutie zvýšenia celkovej výkonnosti systému. Táto kombinácia položila základy masívneho paralelizmu pre spracovanie dát. Jej ďalšiu inováciu smerom k výkonnému paralelnému systému reprezentoval prvý mohutný modulárny paralelný systém ILLIAC IV (rok 1969). Po intenzívnom nástupe využívania rôznych paralelných princípov v 80 - tých rokoch sa zdalo, že realizované paralelné počítače sa stále zvyšujúcim počtom výpočtových uzlov (procesory paralelného počítača) budú dať efektívne aplikácie využívať s minimom prídavného vedeckého výskumu a inžinierskeho prístupu. Tieto predpoklady ďalší teoretický a praktický vývoj v aplikácii oblasti ale nepotvrdil. Hlavnými dôvodmi bola vysoká obtiažnosť získania požadovaného vysokého stupňa paralelizmu zložitých aplikácií. I v úlohách, v ktorých sa to podarilo, nebolo jednoduché efektívne premietnuť dosiahnutý vysoký stupeň paralelizmu do predpokladaného zrýchlenia paralelného riešenia úlohy zapojením vysokého počtu výpočtových uzlov (procesory), a to vzhľadom na rastúcu réžiu riadenia použitých masívnych paralelných počítačov s počtom procesorov viac ako 100.

Postupne nadobúdané skúsenosti s implementáciami rôznych paralelných princípov, rôznych komunikačných sietí, vznik a rozširovanie počítačových sietí, a to najmä na osobných počítačoch po roku 1980 vyvolali návrat k paralelnému využívaniu prepojených počítačov na výkonnejšie riešenia zložitých úloh. Tento prístup sa pri neustále rastúcej výkonnosti osobných počítačov stal dominujúcim trendom i pre oblasť výkonného paralelného spracovania HPC (High Performance Computing). Postupný prechod od špecializovaných vysoko výkonných klasických superpočítačov typu Cray/SGI a pod. dostupných masívnych paralelných počítačov vo svete k lacnejším a univerzálnejším paralelným počítačom s voľnejšie prepojenými osobnými počítačmi resp. s postupne výkonnejšími osobnými počítačmi typu pracovná stanica (Workstation) formou prepojenej siete pracovných staníc typu NOW (Network of Workstation). Tento prístup poskytoval značné výhody včítane vytvorenia vhodnej spoločnej technickej platformy pre limitované finančné prostriedky, pričom vytvorený paralelný počítač bol dostatočne výkonný pre širokú triedu aplikácií. Formálne to vyzeralo na návrat k myšlienke prepojovania veľkých počítačov, ale používané osobné počítače boli podstatne výkonnejšie ako výpočtové uzly (procesory) masívnych paralelných počítačov. Nezanedbateľným faktorom bola možnosť vytvárania vysoko modulárnych sietí pracovných staníc NOW na dostupných výkonných pracovných staniciach s násobným počtom rovnakých procesorov na základnej doske pracovnej stanice s označením SMP

(Symmetrical Multiprocessor). Intenzívny rast nových typov paralelných počítačov (NOW, SMP) po roku 1985 (Downsizing) bolo vyvolané súčinnosťou štyroch nasledovných trendov

- dostupnosť výkonných procesorov (mikroprocesory)
- vysoko výkonné pracovné stanice (single, SMP)
- vysoko rýchlostné prepožovacie siete (komunikačná sieť)
- štandardizované vývojové prostredia pre vývoj paralelnej aplikácie.

Nezanedbateľnú úlohu zohral i sekundárny faktor rastu požiadaviek na výkonnejšie a dostupnejšie riešenia zložitejších vedecko-technických a komerčných úloh pri nízkej dostupnosti a vysokej cene za využívanie existujúcich klasických paralelných počítačov. Pokroky v uvedených troch základných oblastiach, a ich masová rozširovateľnosť v dôsledku ich cenovej dostupnosti ako bežne používané výpočtové nástroje (osobné počítače, pracovné stanice, SMP), postupne urobili z aplikovania návratu k princípu pôvodného skupinového paralelného spracovania (Clustercomputing) hybnú páku efektívneho paralelného spracovania v súčasnosti. Využívanie výkonných a modulárnych paralelných počítačov typu NOW našlo prenikavé uplatnenie v oblasti vysoko výkonného počítania HPC. Súčasne umožnili vytváranie prepracovanej rozsiahlej siete sietí NOW, a to pod označením Grid, ktoré umožňujú prístupnosť masívneho počtu základných modulov (Resources) paralelných počítačov.

Predkladaná dizertačná práca vychádza z vykonaných analýz vývoja paralelných počítačov vo svete a ich dopadov na situáciu u nás. Súčasťou týchto analýz sú publikované rozvojové koncepcie akademických a priemyselných inštitúcií. Možno preto konštatovať, že vedecký výskum v oblasti témy dizertačnej práce je vo svete veľmi aktívny čo presvedčivo dokazujú publikované výsledky na medzinárodných vedeckých konferenciách a vo vedeckých časopisoch akademických a vývojových laboratórií. Konkrétne práca je smerovaná do oblasti analytického modelovania a optimalizácie výkonnosti dominantných paralelných počítačov (multiprocessory, NOW, Grid). Súčasťou modelovania je nevyhnutne i modelovanie a optimalizácia výkonnosti komunikačných sietí dominantných paralelných počítačov, ktoré sa v podstatnej miere podieľajú na nevyhnutnej réžii (časových oneskoreniach) pri aplikáciách paralelných počítačov. Minimalizácia komunikačných oneskorení je preto súčasťou modelovania s cieľom dosiahnutia vysokej výkonnosti moderných paralelných počítačov.

Ciele dizertačnej práce

Ciele dizertačnej práce je možné zhrnúť do nasledovných bodov

- **analýza vývoja a stavu vo svete v oblastiach**
 - architektúr paralelných počítačov (PP)
 - komunikačných sietí
 - výpočtové modely
 - kritérií výkonnosti
 - modelovania výkonnosti
- **modelovanie výkonnosti PP**
 - matematická formulácia
 - metódy modelovania
 - analytické
 - ◆ teória hromadnej obsluhy
 - ◆ asymptotická analýza
 - ◆ Petriho siete
 - simulačné
 - experimentálne
 - ◆ syntetické testy
 - ◆ priame merania
 - modelovanie dominantných architektúr PP
 - modely viacprocesorové a viacjadrové

- modely siete NOW
 - modely Grid
- **overenia odvodených modelov**
 - viacprocesorové a viacjadrové
 - siete NOW
 - Grid
- **vyhodnotenie, zovšeobecnenia**
- **prínosy, doporučenia**
- **literatúra.**

I. Analýza vývoja a stavu vo svete

1. Paralelné počítače

Z pohľadu vývoja architektúr klasifikujeme paralelné počítače nasledovne

- **centrálne klasické paralelné systémy**
 - ◆ multiprocesory (Multiprocessors)
 - SMP – symetrické (Symmetricalmultiprocessors)
 - AMP – asymetrické (Asymmetricalmultiprocessors)
 - MPP – mohutné (Massivelyparallelmultiprocessors)
 - ◆ multipočítače (Multicomputers)
 - mohutné MPC (Massively parallel computers)
 - hybridné skupiny SMP and MPC
 - iné
- **viacpočítačové paralelné počítače (počítačové siete)**
 - ◆ lokálne počítačové siete (LAN)
 - SMP – symetrické (Symmetricalmultiprocessors)
 - siete pracovných staníc (NOW)
 - skupina prepojených počítačov (Cluster)
 - PC farmy
 - iné
 - ◆ regionálne počítačové siete (WAN).

2. Komunikačné siete paralelných počítačov

Prehľad jednotlivých typov klasických viacprocesorových architektúr s uvedením použitej prepojovacej (komunikačnej) siete je nasledovný

- systémy so spoločnou zbernicou (Commonbus)
- systémy s prepínacou sieťou (Switchedsystem)
- viaczbernicový systém (Multibussystem)
- vektorový procesor (Vectorprocessor)
- maticový procesor (Arrayprocessor)
- asociatívny procesor (Associativeprocessor)
- transputery (Transputers)
- zreťazený (prúdový) systém (Pipelinesystem)
- systolický systém (Systolicsystem)
- vlnový systolický systém (Wavefrontarraysystem)
- celulárny systém (Cellularsystem)
- n-rozmerné kocky (N-dimensioncubes)
- špecializované (Algorithmstructured)
- superpočítače (Supercomputers)
- programovateľné prepojovania (Connectionmachine)
- superspoláhľivé (Superreliaablesystem)
- neurónové siete (Neuralnetworks)

2.1. Technológie prenosu dát

Analýzu prenosových sietí možno rozdeliť do dvoch základných skupín

- prenos na základe vytvorenia súvislej spojitaj prenosovej cesty na dobu prenosu pod označením prepojenie kanálov (Switched technology)
- prenos na základe nespojitaj prenosu využitím technológie prepojenia paketov (dátové bloky s pevne stanovenou dĺžkou) s ich dočasným uchovávaním počas prenosu spôsobom „zapamätaj a pošli ďalej“ (S&F Store – and - forward).

3. Paralelné výpočtové modely

Paralelný výpočtový model je abstraktným modelom paralelného výpočtu, ktorý by mal zahŕňať podstatné sprievodné oneskorenia. Stupeň abstrakcie by mal charakterizovať aj komunikačnú štruktúru a súčasne umožniť minimálne aproximáciu základných parametrov (zložitosť, výkonnosť a pod.). Paralelné komunikačné modely je možné rozdeliť podľa rôznych kritérií. Jedným z rozšírených kritérií je spôsob prezentovania parametrov modelu. Typické používané parametre možno rozdeliť do dvoch skupín, a to

- sémantické
 - architektúra komunikačnej siete (štruktúra, väzby, riadenie)
 - metódy komunikácie - štandardy (OpenMP, MPI, Java)
 - komunikačné oneskorenie
- výkonnostné (zložitosť, efektívnosť). Typické parametre sú
 - veľkosť paralelného systému p (počet procesorov)
 - pracovná záťaž w – počet operácií (výpočtové a pod.)
 - doba vykonania sekvenčného programu T_s
 - doba vykonania paralelného algoritmu T_p
 - zrýchlenie, účinnosť (efektívnosť), izoeftívnosť
 - priemerná doba pre výpočet - t_c
 - priemerná doba pre inicializáciu komunikácie (Startup time) - t_s
 - priemerná doba pre prenos jedného slova - t_w .

3.1. Paralelný výpočtový model SPMD

Paralelný výpočtový model SPMD (Single Proces MultipleData) zodpovedá aplikáciám s paralelným počítačom, ktoré sú prevažne orientované na masívny paralelizmus pri spracovaní dát. Prehľad rozšírených modelov je nasledovný

- pevné (atomické)
 - model PRAM (Parallel Random Access Machine)
 - pevný model GRAM (Graph Random Access Machine)
- pružné modely
 - pružný GRAM model
 - BSP model (Bulk Synchronous Parallel)
 - ♦ upravený BSP model
 - ♦ model CGM (Coarse Grained Multicomputer)
 - ♦ Log P model.

3.2. Výpočtový model MPMD

Výpočtový model MPMD (Multiple Proces MultipleData) je spojený s asynchrónnymi paralelnými počítačmi zastupenými počítačovými sieťami. Pre sieťové prepojenie v počítačovej sieti (LAN, WAN) sa typicky používajú nasledovné topologické štruktúry

- zbernica (Bus)
- viaczbernicové (Multibus)
- hviezda
- strom

- kruh.
Všeobecne pri vykonávaní paralelného algoritmu výpočtovým modelom MPMD prináša rôzne režijné oneskorenia ako
- paralelizácia úlohy
- synchronizácia paralelných procesov
- komunikačné oneskorenie.

Najzávažnejším oneskorením pre súčasné dominantné paralelné počítače (NOW, Grid) je práve komunikačné oneskorenie vo forme medziprocesorovej komunikácie IPX (InterProcesCommunication). V dôsledku toho analýza celkového oneskorenia paralelného výpočtu $T(s, p) = T_{\text{výpočet}} + T_{\text{komun.}}$, kde $T_{\text{výpočet}}$, $T_{\text{komun.}}$ udávajú jednotlivé oneskorenia pre paralelné vykonanie výpočtu a režiu komunikácie procesov (s je veľkosť problému, p počet procesorov).

4. Výkonnosť číslicových zariadení

Hodnotenie výkonnosti počítačových systémov je od ich vzniku zložitou úlohou, ktorá nebola doteraz dostatočne vyriešená. Dôvody sú predovšetkým nasledovné

- počítač pozostáva z mnohých jednotiek, ktoré sa pre rôzne programy podieľajú rôznymi podielmi na jeho celkovej výkonnosti
- dosahovanie neustále rastúcej výkonnosti je spojené s využívaním rôznych paralelných princípov, ktorých vplyv a podiel nie je jednoduché stanoviť
- užívatelia majú rôzne požiadavky na výkonnosť počítačov, resp. ich spolupracujúcich jednotiek, v závislosti od prevádzkovaných aplikačných úloh.

Výrobcovia sa snažia predstavovať svoje produkty s najvyššími možnými hodnotami výkonnosti čím uprednostňujú prístupy a kritéria, ktoré najviac vyhovujú ich vlastným dodávaným produktom.

4.1. Parametre výkonnosti počítačových systémov

Výkonnosťnú úroveň počítačových systémov charakterizujeme technickými parametrami a funkčnými možnosťami. Základné výkonnostné parametre počítačov sú nasledovné

- taktovacia frekvencia (Clock frequency)
- technologická úroveň funkčných prvkov
- priepustnosť počítača (Throughput)
- doba vykonávania (Execution time)
- škálovateľnosť (Scalability).

Medzi ďalšie parametre ovplyvňujúce výkonnosť počítača patria

- súbor inštrukcií procesora (CISC, RISC a pod.)
- pamäťová kapacita (Capacity of memory)
- prístupová doba pamäte (Access time)
- šírka toku spracovávaných dát (CPU word)
- spoľahlivosť (Reliability)
- kompatibilita (Compatibility).

5. Výkonnostné testy

Klasické, problémovo orientované testy (Benchmarks), reprezentujú umelé (syntetické), ktoré na základe vykonanej štatistickej analýzy zodpovedajú typickým aplikačným úlohám. Tieto testy neriešia žiadne konkrétne aplikačné úlohy. Prehľad klasických testov je nasledovný

- teoretický výkon
- Dhystone
- Whetstone
- Linpack - je sada testov s úlohami lineárnej algebry. Test je zameraný na riešenie rozsiahleho systému lineárnych rovníc (100 lineárnych rovníc). Stal sa štandardom pre testovanie a hodnotenie výkonnosti paralelných počítačov
- Khornestone.

5.1. SPEC testy

Aby bola výkonnosť počítačov testovaná efektívne, nezávisle a objektívne, bola založená spoločnosť SPEC (Standard Performance Evaluation Corporation). Spektrum aktuálnych SPEC testov je dostupné na stránke <http://www.spec.org>

5.1.1. SPEC ratio

SPEC ratio je definovaný ako jedno číslo pre sumarizovanie všetkých testov. SPEC ratio má tú výhodu, že vysoké numerické hodnoty reprezentujú vyššiu výkonnosť. Jeho výsledná hodnota merania sa získa ako geometrická stredná hodnota všetkých SPEC ratios nasledovne

$$n \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n \text{normalizovaná doba vykonania}_i}$$

, kde normalizovaná doba vykonania je doba vykonania normalizovaná referenčným počítačom pre i – tý testovaný program z celého súboru n (všetky testy) a

$$\prod_{i=1}^n a_i - \text{súčin jednotlivých } a_i.$$

5.2. Špecializované

- paralelné zrýchlenie (Speedup)
- efektívnosť (Efficiency)
- izoeфекtívnosť (Isoefficiency).

6. Metódy modelovania

Modelovanie výkonnosti paralelných počítačov je nástrojom pre ich efektívne aplikačné použitie včítane predpovedanie (predikcia) správania teoretických paralelných počítačov. Pre hodnotenie výkonnosti môžeme použiť nasledovné metódy

- analytické metódy
 - teória hromadnej obsluhy (Queueing Theory)
 - Petriho siete (Petri Nets)
 - asymptotická analýza (Asymptotic Analysis)
- simulácia
 - diskrétna
 - statická
- experimentálne merania
 - nástroje modelovania
 - merania výkonnosti algoritmov
 - merania technických parametrov
 - špecializované testy
 - SPEC testy.

6.1. Vyhodnotenie vykonaných analýz

Modelovanie a analýza chovania komunikačných sietí počítačových systémov (pracovné stanice) teóriou hromadnej obsluhy patrí medzi aktuálne požiadavky praxe. Súčasne prepojené

paralelné počítače implicitne obsahujú modely jednoprocessorovej, viacprocesorovej resp. viacjadrovej pracovnej stanice. Pre modelovanie vytvoríme nasledovné základné skupiny

- modelovanie moderných viacjadrových (Multicore) a viacprocesorových (Multiprocessors) paralelných počítačov na báze SMP
- modelovanie siete pracovných staníc NOW
- modelovanie siete sietí pracovných staníc (Grid) a rozsiahlych sietí pracovných staníc.

Ako základný podporný matematický aparát použijeme aplikácie teórie hromadnej obsluhy (THO) z nasledovných dôvodov

- umožňuje aplikačné použitie pre celé spektrum dominantných paralelných architektúr (SMP, Grid, metapočítač)
- získané výsledné analytické vzťahy majú univerzálny aplikačný charakter, pretože vo vzťahoch vystupujú premenné sledovaných veličín.

Pre overenie dosiahnutých výsledkov použijeme nasledovné metódy

- asymptotická analýza s použitím nasledovných technických parametrov
 - priemerná doba inštrukcií t_c
 - doba pre inicializáciu komunikácie t_s (Start time)
 - doba pre prenos slova t_w
- diskrétna simulácia
- experimentálne merania
 - výkonnostné testy
 - SPEC testy.

II. Modelovanie výkonnosti - Teoretická časť

7. Analytické modelovanie výkonnosti

Pre analýzu výkonnosti paralelných počítačov aplikujeme dva základné postupy, a to

- analytický postup aplikáciou THO ako základnú metódu
- diskrétna simulácia pre overenie presnosti použitého analytického prístupu.

7.1. Analytický prístup

Pre matematický model počítačových sietí je potrebné špecifikovať

- štatistický charakter vstupných tokov požiadaviek
- obslužná (prenosová) sieť
- doby obsluhy obslužných zariadení
- režim obsluhy (FIFO - FirstIn FirstOut, LIFO - LastIn FirstOut, obsluha s prioritami a pod.)
- konečný resp. nekonečný počet vyrovnávacích pamätí.

7.2. Náhodné premenné

Mnohé modely nevieme popísať použitím presných metód. Pre takéto časté modely v praxi je ale potrebné analyzovať vznikajúce oneskorenia pri ich činnosti a analyzovať charakter ich správania. Vo všeobecnosti na modelovanie tých častí systému, ktorých správanie nevieme presne popísať, použijeme aproximáciu náhodnými (stochastickými) procesmi. Náhodný proces je proces, v ktorom sú jeho hodnoty reprezentované určitým pravdepodobnostným rozdelením. Ako aproximáciu môžeme použiť rôzne známe typy rozdelení, pričom určitý typ rozdelenia môžeme aplikovať na aproximáciu určitého typu správania sa analyzovaného systému. Podľa počtu náhodných číselných hodnôt rozlišujeme náhodné premenné na

- diskrétné, ktoré môžu nadobúdať iba konečný počet hodnôt
- spojité, ktoré na ľubovoľnom intervale môžu nadobúdať hodnoty reálnych čísiel.

7.3. Diskrétné náhodné premenné

- Binomické rozdelenie
- Poissonove rozdelenie

- Geometrické rozdelenie

7.4. Spojité náhodné premenné

- Exponenciálne rozdelenie
- Rovnomerné
- Gamma rozdelenie
 - Erlangove
 - Chíkvadrat
- Normálne

8. Aplikácia teórie hromadnej obsluhy

Pre analytické modelovanie výkonnosti paralelných počítačov aplikujeme teóriu hromadnej obsluhy THO (Queueingtheory) na dominantné paralelné počítače, ktoré podľa vykonanej analýzy sú nasledovné

- viacprocesorové a viacjadrové počítačové systémy typu SMP
- prepojených počítačových systémov (počítačová sieť), a to
 - sieť pracovných staníc NOW (Networkofworkstations)
 - integrovaná mohutná sieť sietí NOW pod označením Grid
 - masívna integrovaná sieť sietí NOW a Grid (metapočítač).

Pre modelovanie paralelných počítačov teóriou hromadnej obsluhy sa jedná o nasledovné priradenie a charakteristiku prvkov systémov hromadnej obsluhy

- vstup THO – inštrukcie počítača alebo programy. Pre definovanie vstupného parametra je preto potrebné definovať počet vstupných inštrukcií resp. programov za časovú jednotku (intenzitu vstupu) jej priemernou hodnotou
- režim príchodov požiadaviek do frontu THO
 - FIFO (First In FirstOut)
 - LIFO (Last In FirstOut)
 - front s prioritami
- doba obsluhy (doba vykonávania inštrukcií alebo programov). Vykonávané inštrukcie resp. programy majú rôznu dobu vykonania. Pre analytické modelovanie je potrebné definovať priemernú dobu obsluhy (stredná doba obsluhy).

8.1. Kategorizácia systémov THO

Teória hromadnej obsluhy klasifikuje jednotlivé systémy hromadnej obsluhy (SHO) podľa Kendallovej klasifikácie a to definovaním jej jednotlivých parametrov nasledovne „charakter vstupu X / charakter obsluhy Y / počet zariadení obsluhy“. Základné rozdelenie typických systémov hromadnej obsluhy je potom nasledovné

Markovovské systémy (M – Markovov proces)

- $M / M / 1$ (jedna obsluha), $M / M / m$ (m obslúh)
Charakteristika
 - náhodný vstup požiadaviek
 - náhodná doba obsluhy

Nemarkovovské systémy

- $M / D / 1$ (1 obsluha), $M / D / m$ (m obslúh)
Charakteristika
 - náhodný vstup požiadaviek
 - deterministická doba obsluhy (Deterministicservicetime)
- $M / E_k / 1$ (jedna obsluha), $M / E_k / m$ (m obslúh)
Charakteristika
 - náhodný vstup požiadaviek
 - Erlangovo rozdelenie (k je parameter) pre obsluhu

- $M / G / 1, M / G / m$
Charakteristika
 - náhodný vstup požiadaviek
 - ľubovoľná doba obsluhy (General)

9. Modelovanie paralelných počítačov typu SMP

Systémy hromadnej obsluhy sú matematické modely, ktoré nám pomáhajú pri určovaní výkonnosti paralelných počítačov a pri ich vzájomnom porovnávaní. Sledujú výkonnosť, efektívnosť a použiteľnosť daného systému.

Pre jednotlivé modely systémov hromadnej obsluhy získame vo forme analytických vzťahov požadované stredné hodnoty.

9.1. Pravidlo Littla

Jeden z najdôležitejších výsledkov teórie hromadnej obsluhy je pravidlo Littla. Toto pravidlo patrí medzi základné pravidlá systémov hromadnej obsluhy. Jeho názov jepodľa autora, ktorý ako prvý sformuloval a dokázal jeho platnosť. Uvedené pravidlo je možné použiť pre popis správania každého systému hromadnej obsluhy, ktorý vykazuje ustálený stav svojho správania. Spája systémovo orientovaný spôsob merania (priemerný počet požiadaviek v systéme) s užívateľsky orientovaným spôsobom (čas strávený konkrétnou požiadavkou v systéme).

$$E(q) = \lambda \cdot E(t_q)$$

alebo jeho nasledovnými používanými alternatívami

- $E(w) = \lambda \cdot E(t_w)$
- $E(w) = E(q) - \rho$ (jedna obsluha- $m=1$)
- $E(w) = E(q) - m \cdot \rho$ (m – obslúh)
- $E(t_q) = E(t_w) + E(t_s)$.

pričom použité označenia parametrov sú definované nasledovne

- λ -priemerný počet vstupných požiadaviek
- m -počet rovnakých obslúh systému
- ρ -intenzita prevádzky (bezrozmerný koeficient využívania analyzovaného systému)
- w - náhodná premenná počtu požiadaviek vo fronte
- q - náhodná premenná počtu požiadaviek v systéme
- $E(w)$ – stredný počet požiadaviek vo fronte. Parameter zodpovedá strednému počtu inštrukcií resp. programov (sekvenčné, paralelné), ktoré čakajú na obslúženie výpočtovým uzlom (procesor/jadro) počítača (sekvenčný, paralelný)
- $E(q)$ – stredný počet požiadaviek v systéme. Stredná hodnota predstavuje stredný počet inštrukcií resp. programov celého systému (v pamäti a v procesore)
- $E(t_w)$ – stredná doba čakania vo fronte. Pre nás táto stredná hodnota predstavuje strednú dobu čakania požiadaviek na spracovanie procesorom
- $E(t_q)$ – stredná doba čakania v systéme. Prestavuje celkové oneskorenie (Latency), a to súčet oneskorenia čakaním vo fronte a oneskorenia obsluhou
- $E(t_s)$ – stredná doba obsluhy. Priemer oneskorení obsluhou požiadaviek.

9.2. M/M/m model

Model typu M/M/m reprezentuje viacprocesorový resp. viacjadrový paralelný počítač typu SMP. Priemerná doba obsluhy je pre m obslúh rovnaká a je daná ako intenzita prevádzky ρ ako

$$E(t_s) = \frac{1}{\mu} \quad \rho = \frac{\lambda}{\mu \cdot m} < 1$$

Rozdelenie počtu požiadaviek vo fronte p_i včítane práve obsluhovaných požiadaviek je za podmienky stability systému, t.j. pre intenzitu prevádzky $\rho < 1$ nasledovne

$$p_i = \begin{cases} p_0 \frac{(m\rho)^i}{i!}, & \text{pre } 1 \leq i \leq m \\ p_0 \frac{\rho^k m^m}{m!}, & \text{pre } i > m \end{cases} \quad p_0 = \left[\sum_{i=0}^{m-1} \frac{(m\rho)^i}{i!} + \frac{(m\rho)^m}{m!} \frac{1}{1-\rho} \right]^{-1}$$

a priemerný počet požiadaviek v systéme $E(q)$ a pre strednú hodnotu oneskorenia v systéme $E(t_q)$

$$E(q) = \frac{(\rho m)^{m+1}}{(m-1)! \left[\sum_{i=0}^m \frac{(m\rho)^i}{i!} [(m-i)^2 - i] \right]} \quad E(t_q) = \frac{\frac{(m\rho)^m}{m!(1-\rho)} \frac{1}{m\mu}}{\sum_{i=0}^{m-1} \left[\frac{(m\rho)^i}{i!} + \frac{(m\rho)^m}{m!(1-\rho)} \right] \frac{1}{1-\rho}}$$

9.3. Nemarkovské modely

9.3.1. M / D / m model

Pre tento model intenzita prevádzky ρ a stredná doba obsluhy $E(t_s)$ sú dané ako

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu \cdot m} < 1 \quad E(t_s) = \frac{1}{\mu} = \text{konštanta.}$$

Pre stredný počet požiadaviek vo fronte $E(w)$ použijeme nasledovný aproximačný vzťah

$$E(w) = \left[1 + (1-\rho)(m-1) \frac{\sqrt{45m-2}}{16\rho m} \frac{E(t_w)[M/D/1]}{E(t_w)[M/M/1]} E(t_w)[M/M/m] \right]$$

, v ktorom $E(t_w)[M/D/1]$, $E(t_w)[M/M/1]$ a $E(t_w)[M/M/m]$ sú stredné doby oneskorenia frontov pre zodpovedajúce systémy hromadnej obsluhy. Uvedenú aproximačnú formulu sme vybrali z nasledovných dôvodov

- jej výpočet je relatívne jednoduchý
- ak počet použitých komunikačných procesorov sa rovná jednému ($m = 1$), použitý vzťah poskytuje presné riešenie, t. j. jedná sa o M/D/1 model
- ak počet procesorov je väčší ako jeden ($m > 1$) použitý vzťah generuje chybu, ktorá nie je väčšia ako 1%. Túto skutočnosť sme overili vykonanými simulačnými experimentmi.

9.3.2. M/G/1 model

Pre tento model uvažujeme Poissonovo rozdelenie vstupu požiadaviek do frontu s parametrom λ a ľubovoľné rozdelenie pre obsluhu. Intenzita prevádzky pre stabilitu systému je nasledovná

$$\rho = \lambda \cdot E(t_s) < 1$$

Predpokladajme rozdelenie času obsluhy s jej strednou hodnotou $E(t_s) = 1/\mu$ a jej rozptylom $\sigma^2_{t_s}$. Potom vzťah pre priemerný počet požiadaviek vo fronte $E(w)$ bude daný ako

$$E(w) = \frac{\rho^2}{2(1-\rho)} \left\{ 1 + \left(\frac{\sigma^2_{t_s}}{E(t_s)} \right)^2 \right\}$$

Tento vzťah sa označuje ako Polaczek – Chinčin (Pollaczek – Khintchin). Zo zákona Little potom môžeme vyjadriť priemerný počet požiadaviek v systéme ako

$$E(q) = E(w) + \rho$$

priemerný čas vo fronte $E(t_w)$ resp. a priemerný čas v systéme $E(t_q)$ ako

$$E(t_w) = \frac{E(w)}{\lambda} \quad E(t_q) = \frac{E(q)}{\lambda}$$

V prípade rovnosti strednej hodnoty $E(t_s)$ a jej rozptylu $V_{t_s} = \sigma^2_{t_s}$ (exponenciálne rozdelenie obsluhy) dostaneme predpokladané vyjadrenie prestredný počet požiadaviek vo fronte $E(w)$ v systéme M/M/1.

9.3.3. Modely G/G/1 a G/G/m

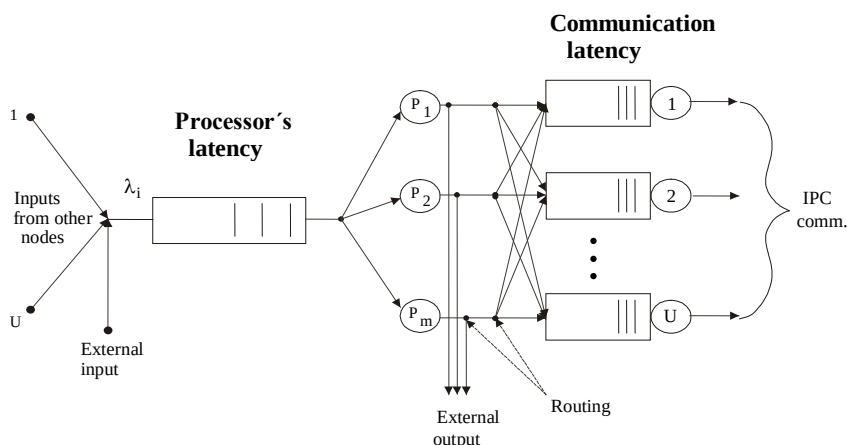
Tieto modely sú všeobecné s jednou obsluhou (G/G/1) a podstatne zložitejší model s m obsluhami (G/G/m). Ako vstup môžeme uvažovať ľubovoľné rozdelenie príchodov do frontu a pre obsluhy ľubovoľné rozdelenia obslúh. Pre konkrétne aplikačné použitie potrebujeme poznať formy rozdelenia (vstup, obsluha), stredné hodnoty alebo ich rozptyly.

10. Modelovanie výkonnosti asynchrónnych PP

Na základe vykonanej analýzy dominantných asynchrónnych paralelných počítačov (NOW, Grid, metapočítač) možno konštatovať nasledovné

- pre komunikáciu v rámci siete NOW sa používajú rôzne prepojovacie siete, a to od najjednoduchšej (zbernica) cez rôzne prepojovacie siete (viaceré zbernice, prepínacie siete) až po prepojenie každý s každým (polygón).
- pre prenosy dát medzi pracovnými stanicami rozlišujeme
 - prenos dát v danej sieti NOW, ktorý prebieha vždy medzi dvoma pracovnými stanicami prostredníctvom komunikačného vybavenia pre daný prenosový kanál resp. viaceré prenosové kanály. Jedná sa o dvojbodový prenos medzi vysielajúcou a adresovanou pracovnou stanicou
 - medzi sieťami NOW prebieha prostredníctvom komunikačných počítačov (smerovač, koncentrátor a pod.).

Zodpovedajúci model i – tého viacprocesorového uzla s komunikačným prepojením na iné prepojené uzly s vyznačením modelovaných oneskorení je na obr. 1.



Obr. 1. Matematický model i – tého uzla NOW.

10.1. Analytický prístup modelovania oneskorení

Zložitejšie rozšírenia takýchto typov sietí, bez spätne väzobných slučiek, sú často súčasťou sietí so spätnými väzbami, ktoré ako prvý analyzoval Jackson. Zovšeobecnil uvedené typy sietí na n – systémov hromadnej obsluhy typu M/M/1. V jeho prácach sa analyzujú ľubovoľné otvorené siete Markovských systémov hromadnej obsluhy. Hoci v tomto prípade možno dokázať, že jednotlivé toky požiadaviek do rôznych uzlov siete všeobecne nie sú Poissonovské, Jackson dokázal prekvapujúci výsledok, podľa ktorej sa každý uzol siete chová

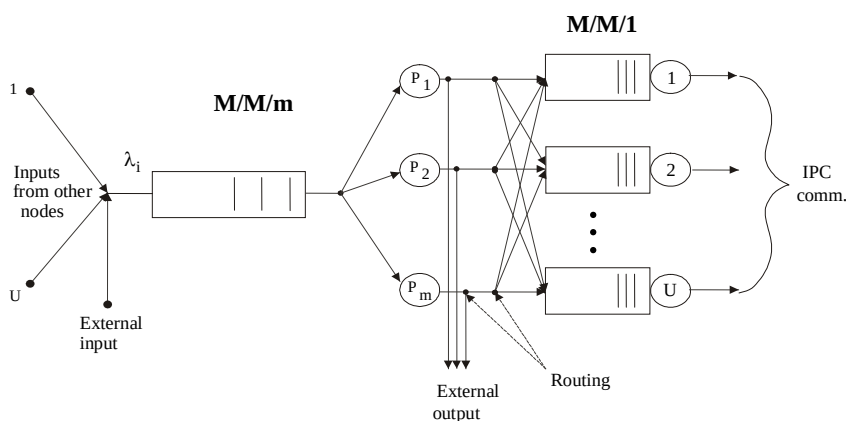
tak ako keby jeho vstup bol Poissonovský. Celkové rozdelenie pravdepodobností rozdelenia požiadaviek pre všetky uzly je potom dané súčinom jednotlivých nezávislých systémov hromadnej obsluhy, a to všeobecne typu M/M/m (teoréma Jacksona). Ak označíme pravdepodobnosť toho, že v ustálenom stave je v i – tom uzle k_i požiadaviek ($i = 1, 2, \dots, U$) veličinou $p(k_1, k_2, \dots, k_U)$, tak pri $\lambda_i / m_i \cdot \mu_i < 1$ platí pre všetky i

$$p(k_1, k_2, \dots, k_U) = p_1(k_1) \cdot p_2(k_2) \cdot \dots \cdot p_U(k_U)$$

, pričom $p_i(k_i)$ je v ustálenom stave pravdepodobnosť toho, že k_i požiadaviek sa nachádza v systéme hromadnej obsluhy typu (M/M/m) $_i$.

10.2. Klasický analytický model

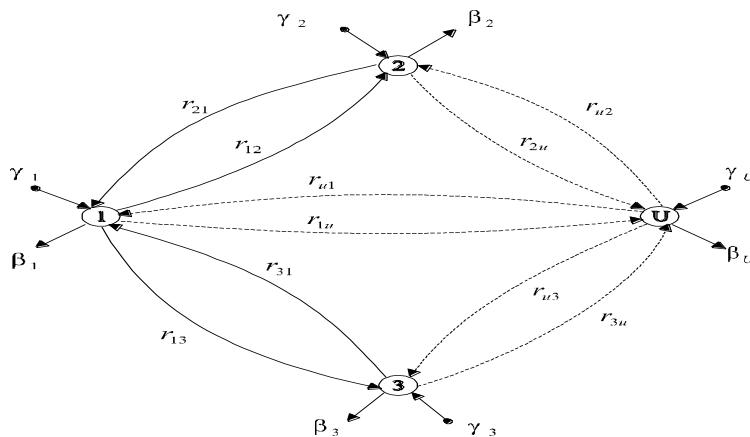
Klasický analytický model pre i -tý výpočtový uzol podľa obr.2. je nasledovný



Obr. 2. Klasický model i -tého uzla.

Vytvorenie modelu pre prepojený systém sietí pracovných staníc zodpovedá vzájomnému prepojeniu modelov analyzovaných komunikačných prvkov, a to podľa zvolenej topológie pre danú architektúru. Ak teda jednotlivé modely komunikačných prvkov označíme ako uzly grafu a ich vzájomné komunikačné prepojenie ako hrany grafu dostaneme všeobecne pre prenosový podsystem s U – výpočtovými uzlami orientovaný graf s U – uzlami podľa obr. 3., v ktorom

- $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_u$ zodpovedajú intenzite vstupného toku do príslušného uzla
- r_{ij} udáva pravdepodobnosť prechodov z uzla i do susedných prepojených uzlov j
- $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_u$ zodpovedajú externému výstupnému toku dátových jednotiek.



Obr. 3. Model komunikačnej siete.

10.2. Presnejší analytický model

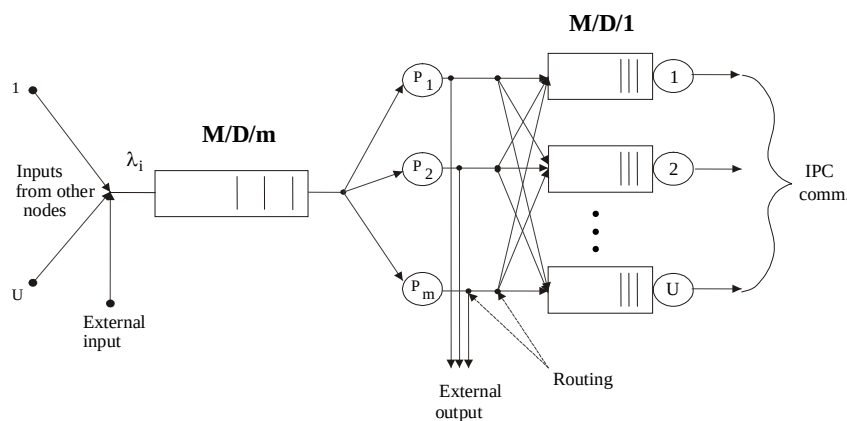
Problémy uvažovaných analytických modelov sú nasledovné

- použité modely zahrňujú iba chovanie komunikačného kanála a nie aj vplyv oneskorenia v dôsledku komunikačných funkcií uzla. Je možné síce uvažovať v zmysle Jackson teorému pre modelovanie týchto činností systémy hromadnej obsluhy typu M/M/1 (jednoprocesorový uzol) resp. M/M/m (viacprocesorový uzol), avšak exponenciálne rozdelenie obsluhy nezodpovedá realite
- iný závažný problém spočíva v predpoklade exponenciálneho rozdelenia času medzi príchodmi dátových jednotiek (slovo, blok dát) do komunikačných kanálov. Komunikačné kanály sú charakterizované nemennou prenosovou rýchlosťou, ktorá implikuje pre modelovanie oneskorenia deterministické rozdelenie systémom M/D/1.

Pre odstránenie týchto problémov sme navrhli analýzu chovania dátovej prenosovej siete presnejším analytickým modelom, ktorý upravuje pôvodný komunikačný model nasledovne

- uvažuje vplyv oneskorenia vlastnou činnosťou komunikačného procesora uzla a čakaním na vykonanie tejto činnosti systémom hromadnej obsluhy typu M/D/m (viacprocesorový komunikačný procesor resp. pracovná stanica)
- uvažovanie reálneho charakteru prenosových kanálov modelom M/D/1 resp. M/D/m.

Navrhovaný matematický model i – tého komunikačného uzla pri použití moderného viacprocesorového komunikačného počítača ilustruje obr. 4.



Obr. 4. Navrhnutý model prei-tý uzol.

Uvažovaná deterministická doba obsluhy v každom uzle presnejšie zodpovedá reálnemu stavu, pretože vykonávanie tých istých komunikačných činností (komunikačný procesor) resp. činnosti spojené s optimalizovanými paralelnými procesmi (pracovná stanica) implikujú rovnaké časy obsluhy. Pre modelovanie oneskorenia prenosov medzi uzlami je pre každý prenosový kanál použitý systém hromadnej obsluhy typu M/D/1. Nech U je celkový počet uzlov siete. Pre každý i - tý uzol siete definujeme nasledovné premenné

- λ_i označuje celkový počet vstupných požiadaviek do i - tého uzla, t. j. suma externého a interného vstupného toku požiadaviek do i - tého uzla
- γ_i označuje celkový externý vstupný tok do i - tého uzla
- λ_{ij} označuje celkový vstupný tok do j - tého uzla komunikačného kanála v i - tom uzle
- u_i definuje počet prenosových kanálov v i - tom uzle
- $E(t_q)_i$ označuje strednú dobu obsluhy vo fronte správ v i - tom uzle
- $E(t_q)_{ij}$ je všeobecne definovaná ako stredná doba obsluhy j - tého frontu prenosového kanála v i - tom uzle.

Potom celkové oneskorenie prenosovej siete ako

$$E(T) = \frac{1}{\gamma} \left[\sum_{i=1}^U \left(\lambda_i \cdot E(t_q)_i + \sum_{j=1}^{u_i} \lambda_{ij} \cdot E(t_q)_{ij} \right) \right].$$

Pre nájdenie strednej hodnoty oneskorenia vo fronte správ použijeme nasledovný aproximačný vzťah pre $M/D/m_i$

$$E(t_w)[M/D/m_i] \doteq \left[1 + (1 - \rho_i)(m_i - 1) \frac{\sqrt{45 m_i} - 2}{16 \rho_i m_i} \frac{E(t_w)[M/D/1]}{E(t_w)[M/M/1]} E(t_w)[M/M/m_i] \right]$$

Dosadením vzťahov pre $E(t_w)_i[M/D/1]$, $E(t_w)_i[M/M/1]$ a $E(t_w)_i[M/M/m_i]$ do vzťahu pre $E(t_w)_i[M/D/m_i]$ môžeme určiť $E(t_w)_i[MQ]$. Potom celková stredná hodnota oneskorenia $E(t_q)_i$ pre komunikačné činnosti uzla je jednoducho suma strednej doby overenia vo fronte (MQ) a pevnej doby pre vlastné spracovanie ako

$$E(t_q)_i = E(t_w)_i[MQ] + k_i$$

Ak dosadíme hodnoty pre $E(t_q)_i$ a $E(t_q)_{ij}$ do vzťahu pre celkové prenosové oneskorenie siete označené ako $E(T)$, dostaneme nasledovný výsledný vzťah pre strednú hodnotu celkového oneskorenia komunikačnej siete

$$E(T) = \frac{1}{\gamma} \left\{ \sum_{i=1}^U \left[(\lambda_i \cdot E(t_w)_i[MQ] + k_i) + \sum_{j=1}^{u_i} (\lambda_{ij} \cdot E(t_q)_{ij}[LQ] + E(t_s)_{ij}) \right] \right\}.$$

III. Experimentálna časť

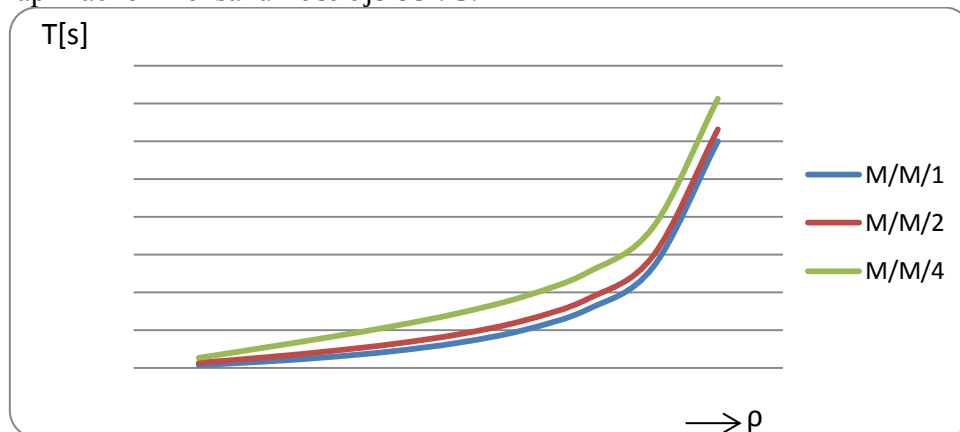
11. Analytické modely

11.1. Viacprocesorové systémy SMP

Pre overenie analyzovaných analytických modelov v teoretickej časti sme vypočítali a graficky ilustrovali stredné hodnoty sledovaných parametrov (E_w , E_q , $E(t_w)$, $E(t_q)$) pre nasledovné modely

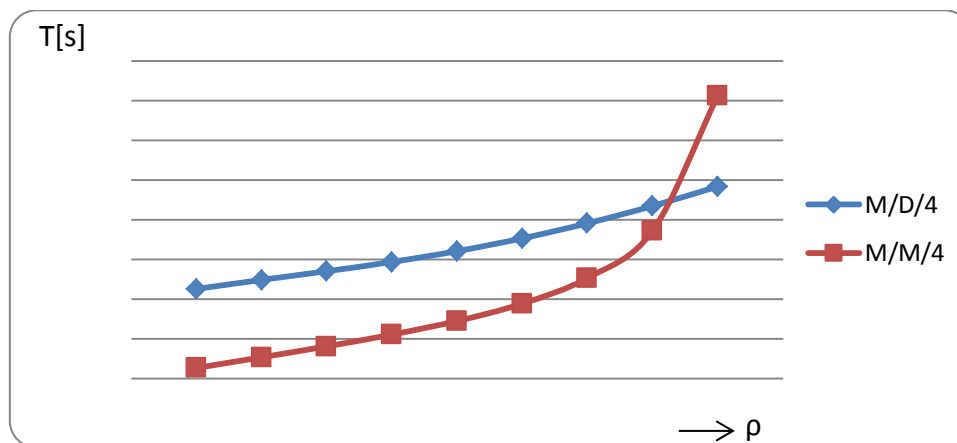
- modely $M/M/1$, $M/M/2$, $M/M/4$
- modely $M/D/1$, $M/D/2$, $M/D/4$.

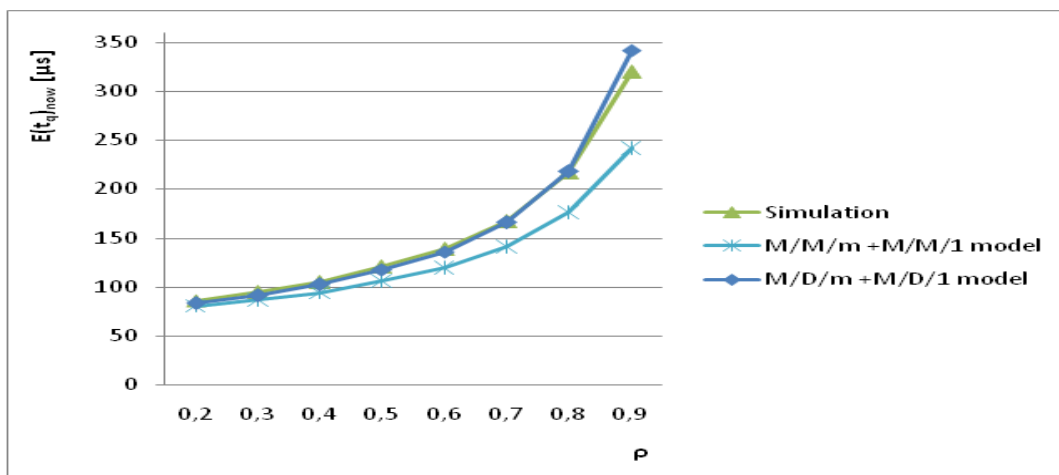
Vzájomné porovnanie modelov $M/M/1$, $M/M/2$, $M/M/4$ pre strednú dobu oneskorenia v systéme $E(t_q)M/M/1$, $M/M/2$, $M/M/4$ v závislosti od vstupného parametra intenzity prevádzky ρ v jeho celom aplikačnom rozsahu ilustruje obr. 5.



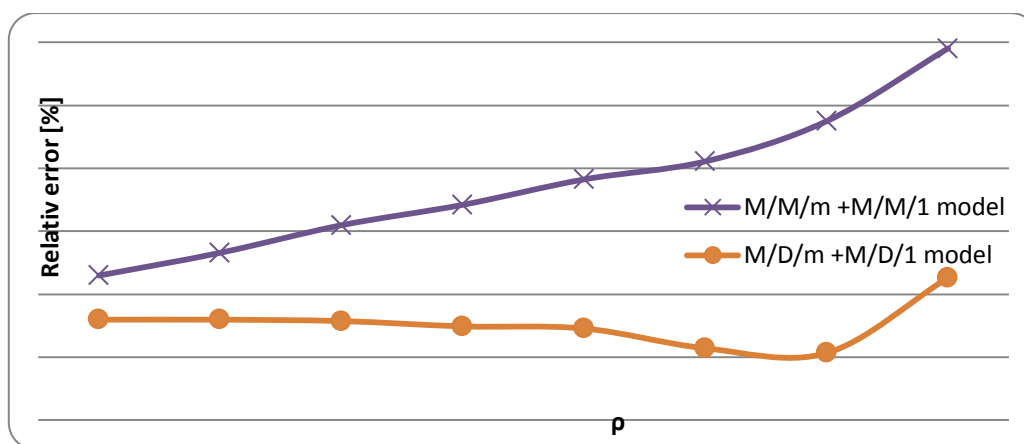
Obr. 5. Stredná doba čakania v systéme.

Obr. 6. porovnáva modely vzhľadom na parameter stredného oneskorenia vo fronte $E(t_q)$.





Obr. 7. Porovnanie jednotlivých modelov.



Obr. 8. Porovnanie relatívnych chýb.

11.6.2. Závery pre prax

Navrhnutý analytický model M/D/m + M/D/1 poskytuje presnejšie výsledky v celom rozsahu vstupnej záťaže výpočtových uzlov a využívania komunikačných kanálov uzla s relatívnou chybou, ktorá nie je vyššia ako 2% a vo väčšine prípadov je v rozsahu do 5%. To je veľmi dôležité v rozsahu silného sieťového zaťaženia (cca 80 to 90%), kde presnejšie výsledky sú veľmi dôležité, aby sme sa vyhli zahľteniu zdrojov a iným systémovým nestabilitám. Navrhnutý model je možné aplikovať i pre rozsiahle integrované siete sietí NOW prakticky bez podstatného zvýšenia výpočtového času v porovnaní so simuláciou. Simulačný model vyžaduje zvýšenie výpočtového času v rozsahu 3 rádoov pre analýzu porovnateľného paralelného počítača. Z tohto dôvodu limitujúcim faktorom vyvinutého modelu nie je výpočtový čas, ale priestorová zložitosť pamäti. Potrebne tabuľky RT a DPT vyžadujú $O(n^2)$ pamäťových buniek v dôsledku čoho limitujú rozsah analýzy výkonnosti na počet uzlov U cca 100-200 pre bežný SMP viacprocesorový paralelný počítač. V prípade použitia systému lineárnych rovníc pre získanie parametra λ_i a λ_{ij} väčšina používaných paralelných algoritmov používa pre túto úlohu Gaussovú eliminačnú metódu GEM s jej výpočtovou zložitou $O(n^3)$ operácií násobenia v pohyblivej rádovej čiarky a rovnaký počet sčítaní. Uvedené limity však postačujú pre praktické požiadavky.

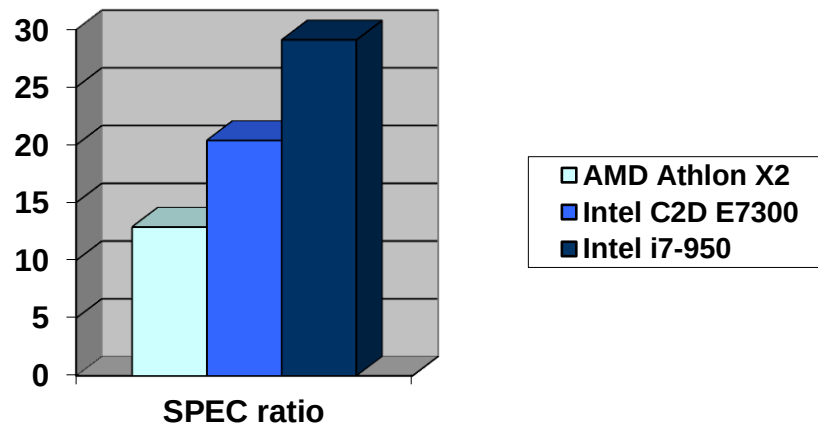
12. Experimentálne overenie výkonnosti.

12.1. Výkonnostné testy – SPECratio

Pre hodnotenie výkonnosti paralelných počítačov sme aplikovali testy SPEC ratio test včítane sprievodných výsledkov (doba vykonania, počet inštrukcií, CPI a dobu taktu) pre nasledovné paralelné počítače

- AMD Athlon X2 6000+
- Intel Core2Duo E7300
- Intel i7-950

Porovnanie výkonnosti testovaných paralelných počítačov ilustruje obr. 9.



Obr.9. SPEC ratio.

12.2 BenchmarkPCMarkVantage

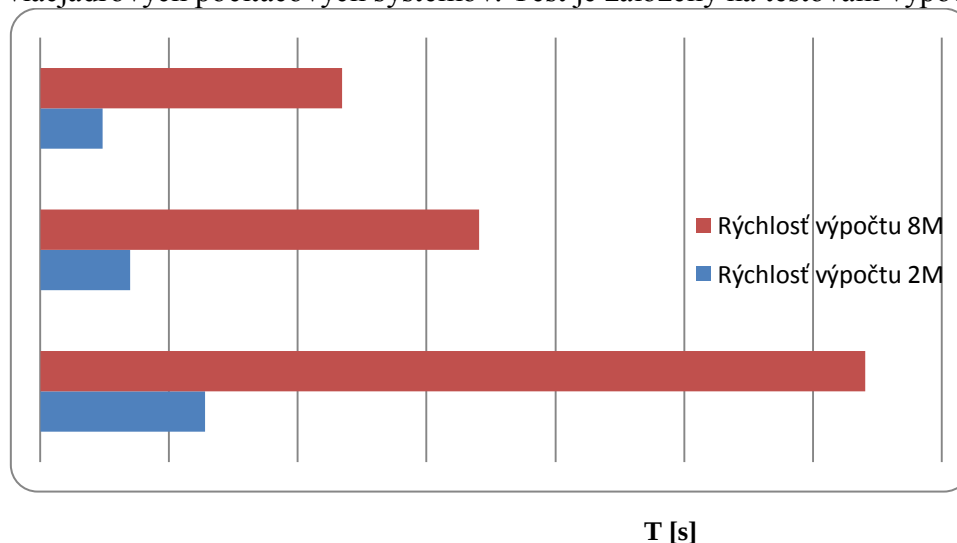
PCMarkVantage je výkonnostnou sadou testov pre paralelné počítače typu SMP, ktoré pracujú s 32 a 64-bitovým operačným systémom Windows Vista. Sada testov výkonnostne overuje paralelné počítače od multimedialných aplikácií až ponáročné vedecko-technické aplikácie. PCMarkVantage je vhodný pre široké spektrum technického vybavenia počítača. Výsledkom vykonaných testov je vyhodnotenie výkonnosti testovaného paralelného počítača a pridelenie určitého počtu bodov.

Tab.1. Vyhodnotenie výkonnosti testomPCMarkVantageVerzia 1.0.2.0.

Typ PP	AMD Athlon X2	Intel Core 2 Duo T7300	Intel i7 950
Počet bodov	2006	2909	8045

12.3. Benchmark PI - Hyper

Druhým testom bol výpočet PI - Hyper PI 0,99. Tento test bol vytvorený špeciálne pre testovanie viacjadrových počítačových systémov. Test je založený na testovaní výpočtu čísla π .



Obr. 10. Test PI-Hyper PI 0,99.

13. Prínosy

13.1. Teoretické

- analýza a hodnotenie súčasného stavu v aplikačných oblastiach
 - architektúr paralelných počítačov (klasické, moderné)
 - komunikačných sietí paralelných počítačov (SMP, NOW, Grid)
 - komunikačnej zložitosti (výkonnosti) - komunikačné siete
 - komunikačných modelov
- modelovanie paralelných počítačov aplikáciou THO
 - modely nezávislých pracovných staníc (WS) na báze SMP
 - ✓ M/M/m, M/M/1
 - ✓ M/D/m, M/D/1
 - modely siete NOW na báze WS typu SMP
 - modely siete sietí NOW, Grid
- modelovanie výkonnostných parametrov
 - komunikačná sieť
 - analytické modely
 - optimalizácia
- porovnania modelov
- overenie presnosti odvodených modelov
- vyhodnotenia, porovnania a zovšeobecnenia.

13.2. Praktické

- implementácie analytických modelov
- výsledky analytických modelov pre nezávislé pracovné stanice
 - M/M/1, M/M/2, M/M/4
 - M/D/1, M/D/2, M/D/4
- porovnania analytických modelov pre nezávislé pracovné stanice
 - M/M/1, M/M/2, M/M/4
 - M/D/1, M/D/2, M/D/4
- pre sieť NOW, sieť sietí NOW, Grid
 - M/M/6, M/M/1
 - M/D/6, M/D/1
- experimentálne overenie analytických modelov
 - aproximačný vzťah pre M/D/m model
 - modifikácie výkonnostných parametrov
 - rozsahu platnosti
 - presnosti porovnania odvodených modelov (analytické, simulačné)
- štatistické vyhodnotenia
- prezentácie vyhodnotených výsledkov
- vyhodnotenia projektovania výkonnostných parametrov
- závery pre praktické použitie.

Záver, perspektívy

Modelovanie výkonnostných parametrov komunikačných sietí (paralelné počítače, počítačové siete, mobilné dátové siete) aplikuje výsledky teórie hromadnej obsluhy na prenosový systém vo väzbe na interaktívne overovanie výsledkov simulačnými modelmi. Vzájomná väzba je a zostane určujúca pre rozširovanie a upresňovanie aplikačného používania analytických metód. Analytické metódy a ich spresnenia všeobecne umožňujú stanovenie stredných hodnôt dôležitých výkonnostných parametrov komunikačných sietí a následne ich jednotlivých

prenosových uzlov. Nevyhnutným predpokladom analýzy prenosovej dátovej siete pre reálnejšie rozdelenia doby obsluhy je ďalšie spresnenie rozdelenia, a to predovšetkým v čase vyššieho vstupného zaťaženia, t. j. v stave optimálneho využívania stanovených parametrov. Riadenie komunikačnej siete je pre stavy vyššieho zaťaženia z pohľadu projektovania prenosových parametrov pre praktické použitie najdôležitejšie. Perspektívne smery analýzy chovania dátových prenosových sietí možno zhrnúť do nasledovných skutočností

- rozširovanie aplikácie teórií pre analýzu výkonnosti paralelných počítačových sietí analytickými metódami (aplikácie teórie hromadnej obsluhy, Petriho siete a pod.)
- spresnenie charakteristík vstupných tokov predovšetkým pre stavy vyššej vstupnej záťaže
- overenia rozšírení a spresnení simulačnými modelmi vzájomnou spätnou väzbou pri porovnávaní dosahovaných výsledkov analytickými a simulačnými modelmi
- ekonomické vyhodnotenie paralelných počítačov z pohľadu
 - architektúry
 - projektovania infraštruktúr (technické a programové vybavenie)
 - efektívnosti a návratnosti investícií
 - strategických vývojových tendencií.

Rozšírenia resp. spresnenia aplikácie analytických metód znamená zahrnúť do analýzy paralelných počítačov nasledovné reálne vplyvy

- alternatívne metódy adaptívneho smerovania
- reálny spôsob prioritného spôsobu prenosu dátových jednotiek (slovo, blok)
- štatistická analýza vnútorných tokov
- vplyv riadenia tokov dát komunikačnej siete
- metód predchádzania stavu zahltenia (Congestion) komunikačných sietí vplyvom vyčerpania technických limitov zdrojov
- dynamického pridelovania vyrovnávacích pamätí (Buffermanagement)
- nespoľahlivosť komunikačnej siete (komunikačné procesory, komunikačné kanály a pod.)
- topológia (architektúra) komunikačnej siete vo vzťahu na jej technické parametre a limity.

Predložená dizertačná práca je súčasťou projektov (školiteľ a školiteľ špecialista) pre modelovanie, optimalizáciu a predpovedanie výkonnosti dominantných paralelných počítačov (NOW, SMP, Grid, metapočítač). Efektívnosť aplikačného použitia dominujúcich paralelných počítačov podmieňuje neustály rast vysokorýchlostných komunikačných sietí. Dôvody pre ich budúce rozširovanie spočívajú v nasledovnom

- pracovné stanice na báze výkonných viacprocesorových a viacjadrových SMP systémov
- univerzálnosť
- nezávislosti (asynchrónnosť)
- prakticky neobmedzená škálovateľnosť podľa aktuálnych potrieb a požiadaviek užívateľa.

Efektívne aplikačné využívanie je popri zvyšovaní prenosovej rýchlosti podmienené minimalizáciou (optimalizácia) komunikačnej zložitosti (výkonnosti), pretože asynchrónne paralelné počítače prevádzajú spoluprácu a synchronizáciu používajú komunikačnú výmenu dátových jednotiek v rôznych integrovaných komunikačných sieťach.

Získané teoretické a praktické skúsenosti by som chcel i v budúcnosti aplikovať v pripravovaných a inovovaných projektoch v širšej oblasti analýzy, modelovania, optimalizácii a predikcii zložitosti (výkonnosti) paralelných počítačov a dátových komunikačných sietí. Analýza zložitosti (výkonnosti) dátových komunikačných sietí v zmysle analyzovaných trendov paralelných počítačov bude nevyhnutnou súčasťou optimalizácie výkonnosti paralelných počítačov na báze vytvárania integrovaných virtuálnych paralelných počítačov (prebiehajúca rozsiahla integrácia klasických superpočítačov a moderných paralelných počítačov typu SMP, NOW, Grid) vo svete a u nás. Nevyhnutným sprievodným faktorom tejto integrácie bude efektívne aplikačné využívanie takýchto masových integrovaných celkov. To si nevyhnutne vyžiada vývoj a inovácie metodík modelovania, optimalizácie a predikcie výkonnosti paralelných algoritmov v rôznych aplikačných oblastiach tak, aby sa vytvorili podmienky pre

rovnocenné postupné začleňovania vysokých škôl, univerzít a výskumných pracovísk do vytváraných integrovaných virtuálnych paralelných počítačov v EU a vo svete.

Abstract

The theses “Performance modelling of parallel computers“deals with a problematic of performance evaluation of asynchronous parallel computers (APC). The main goals were to perform

- analysis of the development trends in the world, their actual state and perspectives in the areas parallel architectures, communication networks, criterions for performance evaluation, computing parallel models and performance evaluation methods
- queueing theory based of performance evaluation of APC including their most important components (computation, communication overheads)
- theoretical and practical performance modelling on all used forms of parallel computers (NOW, SMP and Grid) including
 - single SMP parallel computer
 - ◆ model M/M/m
 - ◆ model M/D/m
 - network of parallel computers
 - ◆ network of M/M/m and M/M/1 models
 - ◆ network of M/D/m and M/D/1 models
 - ◆ comparison
- verification of the theoretical results through
 - simulation model
 - benchmarks
 - ◆ SPEC tests
 - ◆ synthetic tests.

For real parallel computers we have been verified the achieved results on the practical examples modelling actual parallel computers as

- M/M/1, M/D/1 models
- M/M/2, M/D/2 models
- M/M/4, MD/4 models
- comparison of these models.

For these modelled oparallel computers we have derived and verified analytical equations on various practical simulation experiments. The achieved and verified results could be methodically applied to other parallel computers in the future based on SMP, NOW and Grid.

Key-words: parallel computer, performance evaluation methods, communication overheads, performance modelling, NOW, Grid, SMP, shared memory, distributed memory, queueing theory, simulation.

Literatúra

1. Abderazek A. B., Multicore systems on-chip – Practical Software/Hardware design, 200 pp., August 2010, Imperial college press
2. AroraSanjeev, Barak Boaz, Computational Complexity, 1th edition, 578 pages, 2009, Cambridge University Press, United Kingdom
3. Bader D. A., Petascale Computing: Algorithms and applications, CRC Press, 2007
4. Barria A. J., Communication network and computer systems, 276 pages, published June 2006, Imperial College Press
5. Calvin C., Chan K., Optical Perf. Monitoring, 512 pages, 2010, Academic Press
6. Casanova H., Legrand A., Robert Y., Parallel Algorithms, CRC Press, 2008
7. Cook S., CUDA Programming, 600 pages, 2012, MorganKaufmann

8. Dally W., Towles B., Principles and Practises of Interconnection Networks, 550 pp., 2004, Morgan Kaufmann
9. Dasgupta S., Papadimitriou Ch.H., Vazirani U., Algorithms, McGraw-Hill, 336 pp., 2006
10. Dattatreya G. R., Performance analysis of queuing and computer network, 472 pp., University of Texas, Dallas, USA, 2008
11. DeCusatis C., Kaminov I. P., The optical communication reference, 2010, Academic Press
12. Díaz J. and col., Paradigms for fast parallel approximability, 168 pages, July 2009, Cambridge University Press, United Kingdom
13. Desel J., Esperza J., Free Choice Petri Nets, 256 pages, 2005, Cambridge University Press, United Kingdom
14. Dubois M., Annavaram M., Stenstrom P., Parallel Computer Organisation and Design, 560 pages, 2012
15. Duato J., Yalamanchili S., Lionel N., Interconnection networks, Morgan Kaufmann, 624 pp., 2002
16. Edmonds J., How to think about algorithms, Cambridge University Press, 472 pages, 2010
17. Fortier P., Howard M., Computer Systems Performance Evaluation and Prediction, 544 pp., 2003, Digital Press
18. Foster I., Kesselman C., The Grid 2, - Blueprint for a New Computing Infrastructure (Second Edition), Morgan Kaufmann, 748 pp., 2003, USA
19. Gamal Abbas el, Kim Young-Han, Network information theory, 714 pages, 2011, Cambridge University Press
20. GautamNatarajan, Analysis of Queues: Methods and Applications, 802 pages, 2012, CRC Press
21. GelenbeErol, Mitrani Isi, Analysis and synthesis of computer systems, 313 pages, published April 2010, Imperial College Press
22. Gelenbe E., Fundamental concepts in computer science, 172 pages, published Februar 2009, Imperial College Press
23. Goldreich O., Computational complexity, Cambridge University Press, 632 pages, 2010
24. Grama A., Gupta A., Karypis G., Kumar V., Introduction to Parallel Computing (Second Edition),Addison Wesley, 856 pp., 2003
25. Gunawan T. S., Cai W., Performance Analysis of a Myrinet - Based Cluster, pp. 299 – 313, Cluster computing, 2003, Kluwer Academic Publishers
26. Hager G., Wellein G., Introduction to High Performance Computing for Scientists and Engineers, 356 pages. July 2010, CRC Press
27. Hanuliak I., Parallel architectures - multiprocessors, computer networks (in Slovak), 187 pp., July 1997, Publ.: Book centre, Žilina, Slovakia
28. Hanuliak I., Paralelnépočítačeaalgoritmy, 327 pp., Vyd. ELFA Košice, 1999
29. Hanuliak P., Hanuliak I., Performance evaluation of iterative parallel algorithms, Kybernetes, Vol. 39, No.1, 2010, pp. 107- 126, United Kingdom
30. Hanuliak P., Analytical method of performance prediction in parallel algorithms, The Open Cybernetics and Systemics Journal, reviewed (in print)
31. Hanuliak M., Modelovanie a optimalizáciavýkonnostidátovýchprenosovýchsietí, 116 strán, Fakultariadenia a informatiky, Žilinskáuniverzita, 2008, Žilina
32. Hanuliak J., Modelovanie a predikciavýkonnosti DPA, máj 2006, 109 pp., FRI, Žilina, 2006
33. Hanuliak P., Virtual parallel computer, In Proc.: TRANSCOM 2007, 2007, Žilina
34. Hanuliak M., Performance modelling of computer systems, In Proc. ICSC 2013, Kunovice, Czech republic, accepted, in print
35. Hanuliak M., Hanuliak J., Analytical modelling of distributed computer systems, NOW, In Proc.: TRANSCOM 2005,pp. 103-10, 2005,Žilina
36. Hanuliak M., Hanuliak I., To the correction of analytical models for computer based comm. systems, Kybernetes, Vol. 35, No. 9, pp. 1492-1504, 2006, UK

37. Hanuliak J., Hanuliak I., To performance evaluation of distributed parallel algorithms, *Kybernetes*, Vol. 34, No. 9/10, pp. 1633-1650, 2005, UK
38. Harchol-BalterMor, Performance modelling and design of computer systems, December2012 (Queueing theory in action), Cambridge University Press
39. Hennessy J. I., Patterson D. A., Computer architecture – a quantitative approach (5th edition), Morgan Kaufmann, 856 pages, 2011
40. Hesham El-Rewini, MostafaAbd-El-Barr, Advanced computer architecture and processing, 272 pages, 2005, John Wiley & Sons
41. Heath M. T., Scientific Computing, McGraw-Hill Publishers, 576 pp., 2002
42. Heuring Vincent P., Jordan Harry I., Computer System Design and Architecture, New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2004
43. Hillston J., A Compositional Approach to Performance Modelling, University of Edinburgh, 172 pages, 2005, Cambridge University Press, United Kingdom
44. Hwang K., Dongarra J., Geoffrey C. F., Distributed and Cloud Computing, Morgan Kaufmann, 672 pages, 2011
45. Hwu W. W., GPU Computing Gems Jade Ed., Morgan Kaufmann, pp. 560, 2011
46. Hudik M., Hanuliak P., Analysing Performance of Parallel Algorithms for Linear System Equations, In Proc.: GCCP 2011, pp. 70-77, 2011, UI SAV , Bratislava
47. Janovič F., Hanuliak P., To prediction of performance in parallel algorithms, AD ALTA, Vol. 2, issue 1, pp. 81- 85, 2012, Magnanimitas Assn.
48. Janovič F., Hanuliak P., Optimisation of decomposition strategy in parallel matrix algorithms, In Proc. ICTIC, pp. 19-23 March 2012, Žilina
49. John L. K., Eeckhout L., Performance evaluation and benchmarking, CRC Press, 2005
50. Juhasz Z., Kacsuk P., Kranzlmüller D., Distributed and parallel systems – Cluster and Grid computing, 211 pages, Springer-Verlag, 2005
51. Kaminov I. P., Li T., Willner A. E., Optical fiber telecommunications - components and subsystems, Academic Press, 944 pages, 2008
52. Kenneth H. Rosen et al., Handbook of discrete and combinatorial mathematics, CRC Press, pp. 1232, 2000
53. Kenyon T., High performance data network design, Digital Press, 480 pp., 2002
54. Kenyon T., Data networks – routing, security and performance optimisation, Digital Press, 806 pp., 2002
55. Kirk D. B., Hwu W. W., Programming massively parallel processors, Morgan Kaufmann (2nd Edition), 514 pages, 2012
56. Kostin A., Ilushechkina L., Modelling and simulation of distributed systems, 440 pages, Jun 2010, Imperial College Press.
57. Kshemkalyani A. D., Singhal M., Distributed Computing, University of Illinois, 756 pages, 2011, Cambridge University Press, United Kingdom
58. Kushilevitz E., Nissan N., Communication Complexity, 208 pages, 2006, Cambridge University Press, United Kingdom
59. Kumar V., Grama A., Gupta A., Karypis G., Introduction to parallel computing (1st Edition), 589 pp., 1994, Benjamin/Cummings
60. Kurose J. F., Ross K. W., Computer Networking: A Top – Down Approach Featuring the Internet, Addison Wesley, 712 pp., 2001, USA
61. Kumar A., Manjunath D., Kuri J., Communication Networking – An Analytical Approach, 960 pp., 2004, Morgan Kaufmann
62. Le Boudec Jean-Yves, Performance evaluation of computer and communication systems, 300 pages, 2011, CRC Press
63. Lekass P., Network Processors, 456 pp., 2003, McGraw-Hill Publishers
64. Lilja D. J., Measuring Computer Performance, 280 pages, 2005, University of Minnesota, Cambridge University Press, United Kingdom
65. Magoules F., Nguyen T. M. H., Yu L., Grid Resource Management: Towards Virtual and

- services Complaint grid Computing, CRC Press, 336 pp., 2008
66. Maier M., Optical Switching Networks, 244 pages, 2008, Cambridge University Press, United Kingdom
 67. McCabe J., Network analysis, architecture, and design (3rd edition) Morgan Kaufmann, 496 pages, 2007
 68. Mertens S., Schinner A., Cluster Computing, Springer Verlag, 300 pp., 2002
 69. Miller S., Probability and Random Processes, 2nd edition, 552 pages, 2012, Academic Press, Elsevier Science
 70. Misra S., Misra Ch. S., Woungang I., Selected topics in communication network and distributed systems, 808 pages, April 2010, Imperial college
 71. Mitscheile-Thiel A., System Engineering with SDL: Developing Performance-Critical Communication Systems, 380 pp., 2001, John Wiley & Sons
 72. Pacheco P., An Introduction to parallel computing, Morgan Kaufmann, pp. 370, 2011
 73. Park K., Willinger W. (Eds.), Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation, 558 pages. 2000 John Wiley & Sons, Inc.
 74. Patterson D. A., Hennessy J. L., Computer Organization and Design (4th edition), Morgan Kaufmann, 914 pages, 2011
 75. Peterson L. L., Davie B. C., Computer networks – a system approach, 5th edition, Morgan Kaufmann, 920 pages, 2011
 76. Pióro M., Routing, Flow, and Capacity Design in Communication and Computer Networks, 400 pp., 2004, Morgan Kaufmann Publishers
 77. Quinn M. J., Parallel Programming in C with MPI and Open MP (First Edition), 544 pp., McGraw-Hill Publishers, 2004,
 78. Rajasekaran S., Reif J., Handbook of Parallel Computing: Models, Algorithms and Applications, 2007
 79. Ramaswami, B. J., Sivarajan, K., Sasaki, G., Optical networks (3rd Edition) - A practical perspective, 928 pp., 2010, Morgan Kaufmann, USA
 80. Resch M. M., Gabriel E., Supercomputers in Grids, Int. Journal of Grid and HPC, No.1, pp. 1 - 9, January- March 2009
 81. Ross S. M., Introduction to Probability Models, 10th edition, Academic Press, 800 pages, 2010, Elsevier Science
 82. Riano I., McGinity T.M., Quantifying the role of complexity in a system's performance, pp. 189 – 198, 2011, Evolving Systems, Springer Verlag
 83. Shan H and col., Message passing and shared address space parallelism on an SMP cluster, Parallel computing, Volume 29, Issue 2, pp. 167-186, 2003
 84. Shroff G., Enterprise Cloud Computing, 290 pages, 2010, Cambridge University Press, United Kingdom
 85. Slováček D., Performance modelling of multiprocessor parallel systems, ICSC Leden 2012, pp. 117-122, Kunovice, Czech republic
 86. Slováček D., Hanuliak P., High performance computing on NOW, In Proc.: ITTEL 2012, pp. 5 – 8, Bukovinskij universitet, Ukraina 2012,
 87. Slováček D., Hanuliak P., Modelling of communication overheads in parallel computers, Acta Moravia, Volume III., 5/2011, pp. 109-119, 2011, Kunovice
 88. Slováček D., Janovič F., Bartoněk D., Teoretické základy informatiky, EPI Kunovice 2011, 178 stran
 89. Slováček D., Hanuliak P., To performance modelling of parallel computers, In Proc. MMK 2011, pp. 835-844, vol. II, 12.-16 Prosinec 2011, Hradec Králové
 90. Slováček D., Hanuliak P., To performance modelling of virtual computers, In Proc.: TRANSCOM 2011 - section 3, pp. 213 – 216, 2011, Žilina
 91. Smoot Stephen R., Tan Nam K., Private Cloud Computing, Morgan Kaufmann, 424 pages, 2012

92. Stallings W., Computer Organisation and Architecture – Designing for Performance, Prentice Hall, 815 pp., 2003
93. Stallings W., High-Speed Networks and Internets – Performance and Quality of Service (2nd Edition), Prentice Hall, 550 pp., 2002
94. Sokolovski P. J., Grosu D., Performance of the NAS parallel benchmarks on Grid enabled clusters, In Proc. NCA'04), 2004
95. Tannenbaum A. S., Computer Networks, Prentice Hall, 848 pp., 2003
96. Vaníček, J., Papík, M., Pergl, R. a Vaníček T., Teoretické základy informatiky, 431 stran, Praha, Kernberg Publishing, 2007
97. Wada K., Yamagiwa S., Fukuda M., High Performance Network of PC Cluster Maestro, pp. 33-42, 2002, Cluster computing, Kluwer Academic Publishers
98. Wagner Jaroslav., Měření výkonnosti, 248 strán, Praha, Grada Publishing, 2009
99. Wang L., Jie Wei., Chen J., Grid Computing: Infrastructure, Service, and Application. CRC Press, 2009
100. Wilkinson B., Allen M., Parallel Programming – Techniques and Applications Using Parallel Computers, Prentice Hall, 431 pp., 1999
101. Williams R., Computer System Architecture – A Networking Approach, 680 pp., 2001
102. Zhuge Hai., The Knowledge Grid, pp. 360, 2011, Imperial College Press.

wwwstránky

103. www.spec.org
104. www.top500.org
105. www.intel.com.
106. www.en.wikipedia.org
107. nic.uniza.sk/hpc.

Publikačná činnosť autora

Vysokoškolské učebnice

- [1] Slováček D., Bartoněk D., Janovič F., Teoretické základy informatiky, EPI Kunovice 2011, stran 178, ISBN: 978-80-7314-234-6, 13 AH
- [2] Slováček D., Jurča R., Várkonyi R., Informatika a úvod do výpočetní techniky, EPI Kunovice 2011, stran 169, ISBN 978-80-7314-229-2, 12 AH
- [3] Slováček D., Janovič F., Operační systémy, stran 159, (in print), 12 AH

V zahraničí

- [4] Slováček D., Hanuliak P., High performance computing on networks of personal computers, In Proc.: ITTEL 2012, pp. 5 – 8, Bukovinskij universitet, Ukraina 2012, ISBN 978-617-614-028-3
- [5] Slováček D., Hanuliak P., Virtual parallel computer as a modern research and teaching aid, Dubnica, 2012, accepted (in print)
- [6] Slováček D., Hanuliak P., To performance analytical evaluation of multiprocessor, In Proc. ICCTIC, pp. 80-85, 2012, Zilina
- [7] Slováček D., Janovič F., Parallel Computing Networks Managed Linux. Collection of scientific articles, issue 7, pp. 195 – 205, Bucovinian univerzity, 2011, ISSN 2219 - 5378
- [8] Slováček D., Hanuliak P., Parallel computing as integration factor in applied informatics, Vol. 7, pp. 201-209, Radom, 2012, Poland, ISBN 978-83- 7351-449-7
- [9] Slováček D., Hanuliak P., Performance modelling of multiprocessor and multicore systems, 10th Int. conf., RIP 2012, C052a, University Pardubice, Czech republic, ISBN 978-80-7395-500-7
- [10] Slováček D., Hanuliak P., High performance computing on networks of personal computers, In Proc. ITTEL 2012, pp. 5 – 8, Bukovinskij universitet, Ukraina 2012, ISBN 978-617-614-028-3

- [11] Slovák D., Hanuliak P., To performance modeling of virtual computers, In Proc.: TRANSCOM 2011 - section 3, pp. 213 – 216, 2011, Žilina ISBN 978-80-554- 0372-4
- [12] Slovák D., Janovič F., Kodrila P., Calculation program for machine working time, Międzynarodowa Konferencja Naukowa z cyklu Computer Science in the Age of XXI Century, Politechnika Radomska, pp. 111- 122, 2011, ISBN 978-83-7789-006-6, 978-83-7351-324-2
- [13] Slovák D., Novák B., Production Lines Management by PC, Present day - Trends of innovation, Dubnica nad Váhom 2011, ISBN 978-80-89400-26-3
- [14] Slovák D., Data mining in the small organizations, III. Międzynarodowa Konferencja Naukowa z cyklu Computer Science in the Age of XXI Century, Politechnika Radomska, 2009, pp 71 – 74, ISBN 978-83-7351-351-8, 978-83-7204-794-6

Doma

Štúdie v časopisoch a zborníkoch charakteru vedeckej monografie

- [15] Slovák D. a spol., Analýza a modelovanie výkonnosti procesorov a počítačov, 166 strán, 2012, EPI Kunovice s. r. o., ISBN 978-80-7314-285-8
- [16] Slovák D. a spol., Analýza a modelovanie zložitosti algoritmov, 166 strán, 2012, EPI Kunovice s.r.o., ISBN 978-80-7314-286-5

Vedecké práce – časopisy, konferencie

- [17] Slovák D., ICSC Leden 2013, Kunovice, ISBN 978-80-7314-279-7
- [18] Slovák D., Electronic system of state adm. in the Czech and Slovak republics, Acta Moraviae, Vol. 8, pp 129-137, 2012, EPI Ltd., Kunovice
- [19] Slovák D., Hanuliak P., Analytical performance modelling of multiprocessors, In Proc.: QUARE 2012, MAGNANIMITAS, 2. vyd., pp. 985-994, 2012 Hradec Králové, ISBN 978-80-905243-0-9
- [20] Slovák D., Performance modelling of multiprocessor parallel systems, ICSC Leden 2012, pp. 117-122, Kunovice, Czech republic, ISBN 978-80-7314-279-7
- [21] Slovák D., Hanuliak P., Modelling of communication overheads in parallel computers, Acta Moravia, Volume III., 5/2011, pp. 109-119, 2011, Kunovice, ISSN 1803 - 7607
- [22] Slovák D., Janovič F., Programming methods, ICSC 2011, sekcia č. 2, pp 137 - 141, Kunovice, Czech republic, ISBN 978-80-7314-221-6
- [23] Slovák D., Hanuliak P., To performance modelling of parallel computers, In Proc. MMK 2011, pp. 835-844, vol. II, 12.-16 Prosinec 2011, Hradec Králové, ISBN 978-80-904877-7-2, ETTN 085-11-11010-12-5
- [24] Slovák D., Hanuliak P., Analysis of computer performance, In Proc. MMK 2010, pp. 42-51, 2010, 6.-10 Prosinec, Hradec Králové, ISBN 978-80-86703-41-1
- [25] Slovák D., Janovič F., Efficiency Network Regulated By Linux, In ICSC 2010, pp. 35 – 41, Kunovice EPI, s.r.o, 2010, ISBN 978-80-7314-201-8
- [26] Slovák D., Petrucha J., Using Datamining and OLAP Technology at Information Systém, In ICSC 2009, pp. 63 – 68, Kunovice : EPI, s.r.o, 2009, ISBN 978-80-7314-163-9
- [27] Slovák D., Petrucha J., Přístupy k problematice e-Governmentu v České a Slovenské republice, V. mezinárodní konference 2009, pp. 197-206, Kunovice : EPI, s.r.o, 2009, ISBN 978-80-7314-171-4

Výskumné projekty (spoluriešiteľ)

- [1] Národný grantový projekt MŠ SR (Projekt SIVP 2009), Slovenská infraštruktúra pre vysokovýkonné počítanie, 2009
- [2] Efektívne paralelné algoritmy zložitých úloh, Projekt VEGA 1/0050/09, 2009-2010
- [3] Modelovanie a optimalizácia výkonnosti paralelných algoritmov, Projekt VEGA 1/0017/11, 2011-2013.