

Особенности разработки и анализа имитационной модели мультипроцессорной вычислительной системы

За последнее десятилетие мультипроцессорные системы нашли всеобщее применение в вычислительной технике. На сегодняшний день многоядерными процессорами оснащаются не только суперкомпьютеры, но и подавляющее большинство мобильных устройств, в связи с чем возникает необходимость обучения студентов основным принципам их построения и работы. Одним из возможных методов анализа функционирования мультипроцессорных систем является имитационное моделирование. Его применение способствует лучшему пониманию не только их организации, но и влияния параметров рабочей нагрузки и структуры на производительность.

В статье рассматриваются особенности разработки имитационной модели для оценки временных характеристик мультипроцессорной вычислительной системы, а также использование регенеративного метода анализа модели. В качестве рабочей нагрузки принимаются характеристики программной реализации решения обратной задачи кинематики робота. Данная задача заключается в определении разворотов в сочленениях манипулятора по известному угловому и линейному положению его схвата. Был выбран аналитический алгоритм решения задачи, а именно метод простых кинематических связей.

Работа программы характеризуется наличием распараллеленных вычислений, в ходе которых возникают ресурсные конфликты между задействованными ядрами процессора при одновременных обращениях к памяти через общую шину. В связи с высокой информа-

ционной связностью между параллельно выполняющимися потоками программы предполагается, что все процессорные ядра используют разделяемую оперативную память.

Имитационная модель учитывает вероятностные обращения к памяти и отслеживает возникающие очереди к общим ресурсам. В ходе моделирования накапливается статистика, выявляющая производительные и накладные временные затраты на выполнение программы для каждого задействованного процессорного ядра. Результаты моделирования показывают неравномерность загрузки ядер, простои в очередях к общим ресурсам и временные потери при ожидании других ядер из-за информационных зависимостей. Результаты моделирования оцениваются регенеративным методом, что позволяет определить среднее время нахождения заявок на обращение к памяти в очередях и доверительные интервалы этих значений для различных степеней доверия.

Приведённый подход к построению имитационной модели мультипроцессорной вычислительной системы и её анализ могут использоваться для анализа функционирования параллельных вычислительных систем, а также в образовательных целях для обучения студентов по курсам «Вычислительные системы» и «Имитационное моделирование».

Ключевые слова: имитационное моделирование, регенеративный метод, GPSS, разделяемая память, мультипроцессорные системы.

Oleg M. Brekhov, Galina A. Zvonareva, Vladimir V. Ryabov

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

Features of development and analysis of the simulation model of a multiprocessor computer system

Over the past decade, multiprocessor systems have been applied in computer technology. At present, multi-core processors are equipped not only with supercomputers, but also with the vast majority of mobile devices. This creates the need for students to learn the basic principles of their construction and functioning. One of the possible methods for analyzing the operation of multiprocessor systems is simulation modeling. Its use contributes to a better understanding of the effect of workload and structure parameters on performance.

The article considers the features of the development of the simulation model for estimating the time characteristics of a multiprocessor computer system, as well as the use of the regenerative method of model analysis. The characteristics of the software implementation of the inverse kinematics solution of the robot are adopted as a workload. The given task consists in definition of turns in joints of the manipulator on known angular and linear position of its grasp. An analytical algorithm for solving the problem was chosen, namely, the method of simple kinematic relations.

The work of the program is characterized by the presence of parallel calculations, during which resource conflicts arise between the processor cores, involved in simultaneous access to the memory via a common bus. In connection with the high information connectivity

between parallel running programs, it is assumed that all processing cores use shared memory.

The simulation model takes into account probabilistic memory accesses and tracks emerging queues to shared resources. The collected statistics reveal the productive and overhead time costs for the program implementation for each processor core involved. The simulation results show the unevenness of kernel utilization, downtime in queues to shared resources and temporary losses while waiting for other cores due to information dependencies. The results of the simulation are estimated by the regenerative method, which allows determining the average time spent searching for memory access in queues and the confidence intervals of these values for various degrees of trust.

The given approach to the construction of the simulation model of a multiprocessor computer system and its analysis can be used to analyze the functioning of parallel computing systems and for educational purposes for teaching students at the courses "Computer Systems" and "Simulation Modeling".

Keywords: simulation modeling, regenerative method of analysis, GPSS, shared memory, multiprocessor systems.

Введение

За последнее десятилетие мультимикропроцессорные системы получили повсеместное распространение. На сегодняшний день многоядерными процессорами оснащаются не только суперкомпьютеры, но и подавляющее большинство мобильных устройств. Миллионы людей по всему миру стали пользователями таких систем. Поэтому сегодня, как никогда, важны открытые общедоступные материалы, способствующие лучшему пониманию принципов работы мультимикропроцессорных систем. Изложенные в них сведения особую ценность представляют для студентов, изучающих информационные и вычислительные системы.

В связи с этим возникает необходимость в разработке подходов и методик, способствующих лучшему пониманию особенностей построения мультимикропроцессорных вычислительных систем. Одним из таких подходов является применение имитационного моделирования [1,2]. Анализ функционирования вычислительной системы посредством имитационного моделирования способствует лучшему пониманию влияния структуры и рабочей нагрузки на временные характеристики работы системы.

В статье приводятся особенности разработки имитационной модели функционирования мультимикропроцессорной вычислительной системы. Под временными характеристиками функционирования системы прежде всего понимается её производительность. Производительность системы может оцениваться как по времени выполнения некоторой программы, так и по «индексам производительности» [3]. В качестве индексов производительности могут быть приняты временные потери, вызванные простоями в очередях к общим ресурсам либо информацион-

ными зависимостями между параллельно выполняющимися потоками вычислений [4]. Производительность может оцениваться как аналитически, так и имитационно. В ряде случаев целесообразней использовать имитационные модели для более детального определения временных характеристик работы системы.

Построение имитационной модели сводится к моделированию рабочей нагрузки и структуры вычислительной системы. Рабочая нагрузка может моделироваться в виде смеси команд (последовательности команд, характерных для конкретного приложения), стохастических моделей (случайных величин, представляющих запросы на ресурсы), эталонов (образцов использования ресурсов системы прикладным процессором), а так же трасс (множество записей о работе программ) [5]. В данной работе в качестве рабочей нагрузки используются характеристики разработанного программного обеспечения для решения обратной задачи кинематики в режиме реального времени [6]. Данная задача состоит в определении разворотов всех рычагов манипулятора по известному угловому положению схвата. Методы решения этой задачи разделяются на аналитические [7] и численные [8]. Алгоритм решения обратной задачи был составлен согласно аналитическому методу простых кинематических связей [9]. Разработанное программное обеспечение было проанализировано с целью состав-

ления графа, показывающего последовательность выполнения линейных и распараллеленных вычислений [10]. В его вершинах указаны количество процессорных инструкций и обращений к памяти на соответствующих стадиях работы программы.

При моделировании структуры мультимикропроцессорной вычислительной системы ключевым моментом является определение организации доступа к оперативной памяти. В данном случае предполагалось обращение одинаковых по производительности процессоров к разделяемой памяти через общую шину (с одинаковым временем доступа к памяти) в связи с высокой информационной связностью между параллельно выполняющимися потоками [11].

В качестве языка программирования для составления имитационной модели выбран GPSS/H [12]. Результаты её работы анализируются регенеративным методом, при помощи которого вычисляются доверительные интервалы среднего времени пребывания заявок на обращения к памяти в очередях к общим ресурсам по функции нормального стандартизованного распределения.

Данный подход к изучению параллельных вычислительных систем, а именно составление и анализ результатов функционирования имитационных моделей, может применяться не только в научно-технических целях для оценки характеристик их работы, но и в образовательных целях при обучении

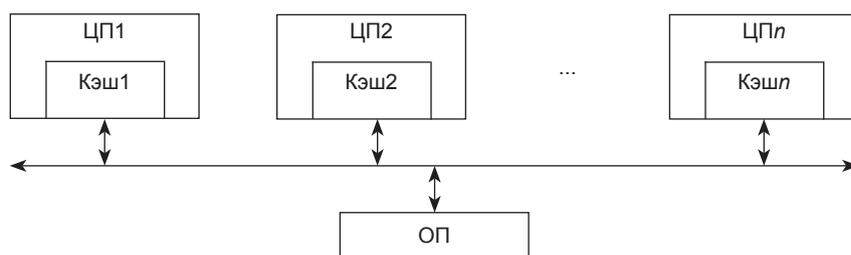


Рис. 1. Архитектура ядра мультимикропроцессорной вычислительной системы

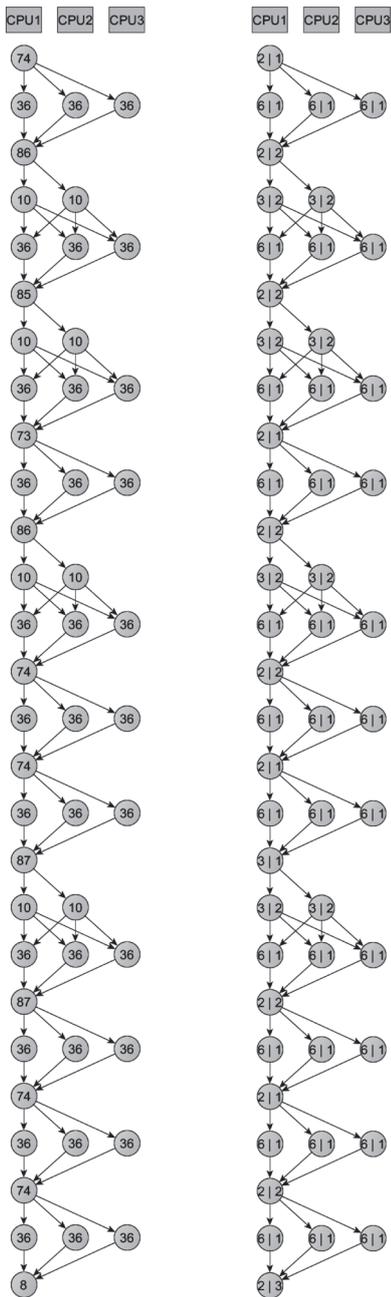


Рис. 2. Графы, показывающие последовательность выполнения линейных и распараллеленных вычислений

студентов по курсам «Вычислительные системы» и «Имитационное моделирование».

1. Особенности разработки имитационной модели мультипроцессорной вычислительной системы

При моделировании мультипроцессорной вычислительной системы в качестве рабочей нагрузки принимаются временные затраты, возника-

ющие в ходе выполнения программы, реализующей решение обратной задачи кинематики робота. Данная задача заключается в определении разворотов в сочленениях манипулятора по известному угловому и линейному положению его схвата. Был выбран аналитический алгоритм решения задачи, а именно метод простых кинематических связей [2].

Работа программы характеризуется наличием распараллеленных вычислений, в ходе которых возникают ресурсные конфликты между задействованными ядрами процессора при одновременных обращениях к памяти через общую шину. В связи с высокой информационной связностью между параллельно выполняющимися

потоками программы предполагается, что все процессорные ядра используют разделяемую оперативную память. Архитектура ядра мультипроцессорной вычислительной системы представлена на рис. 1.

Количество параллельно работающих процессоров зависит от конкретной реализации программы. В ходе выполнения программы постоянно задействовано только одно из процессорных ядер, а остальные подключаются только при выполнении параллельных вычислений. Предполагается, что каждое ядро выполняет только один из потоков программы. При завершении исполнения распараллеленного участка программы, основное ядро приостанавливает свою работу, до тех

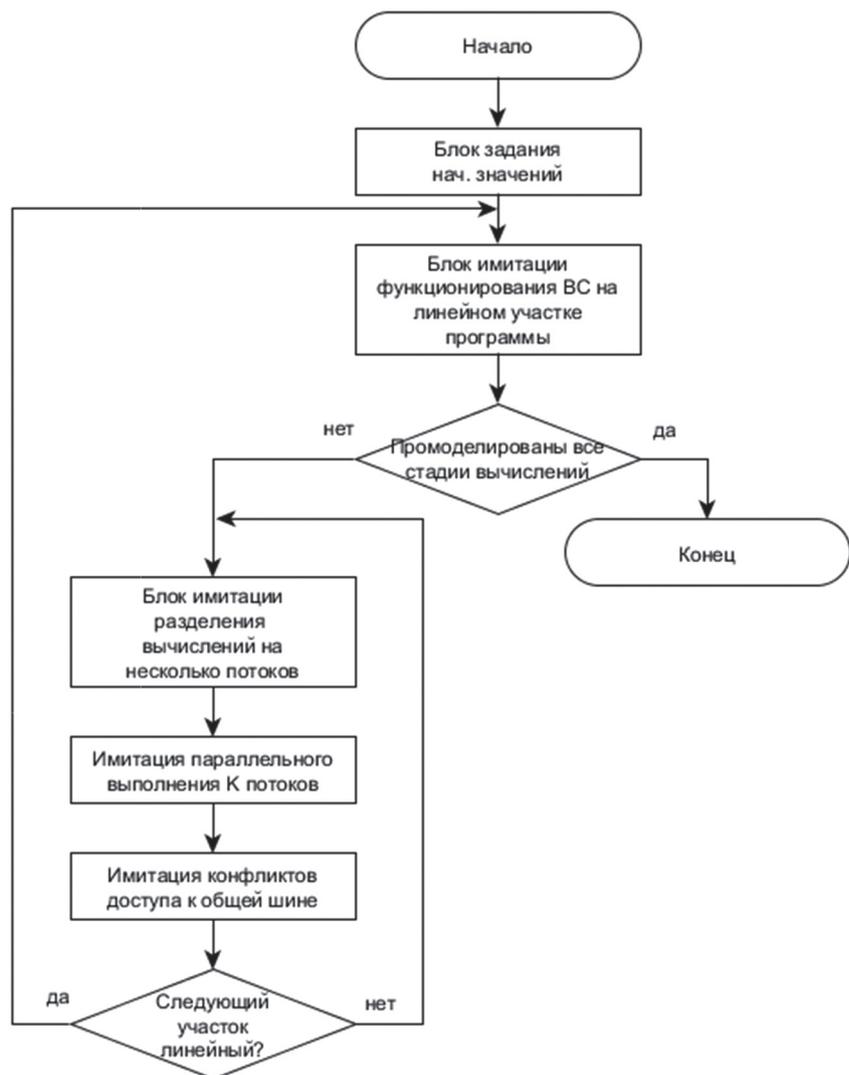


Рис. 3. Схема алгоритма функционирования имитационной модели

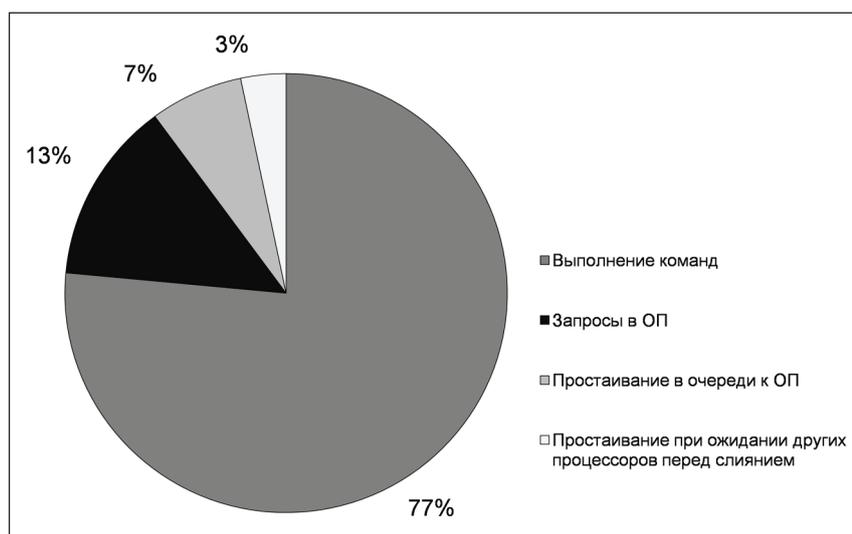


Рис. 4. Временная диаграмма работы основного процессора

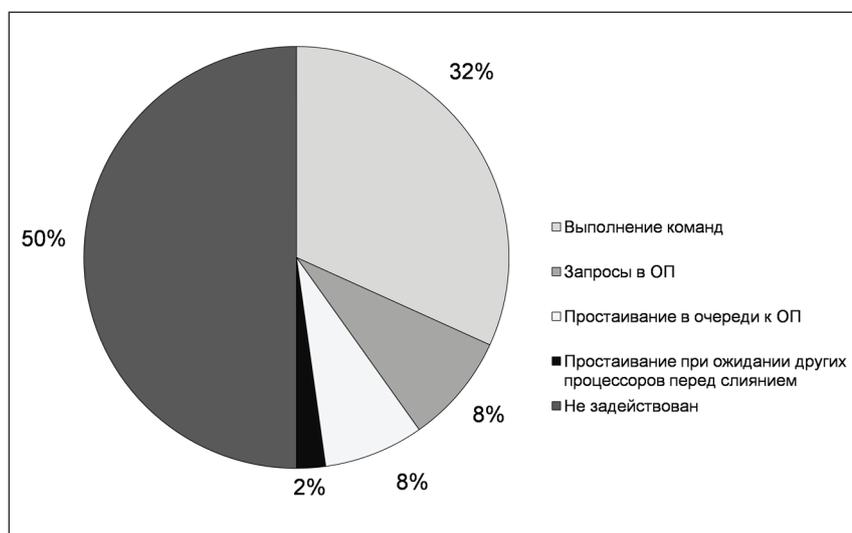


Рис. 5. Временная диаграмма работы второго процессора

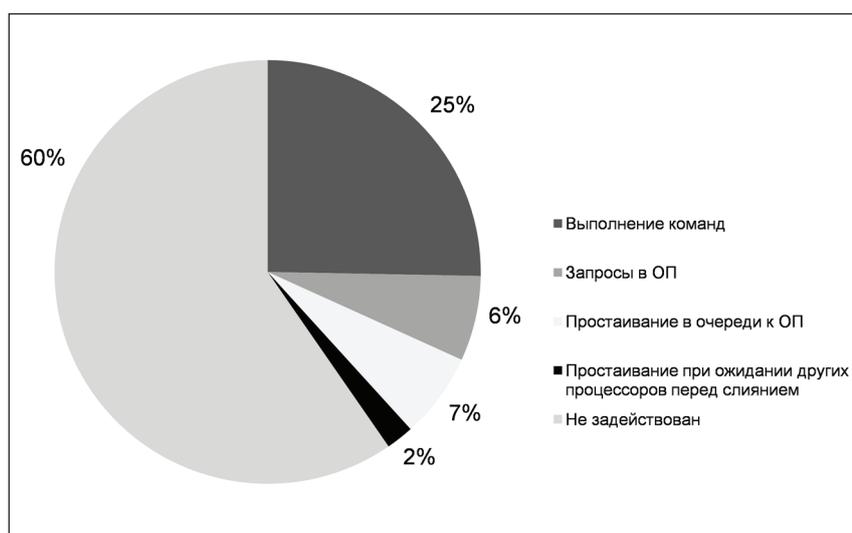


Рис. 6. Временная диаграмма работы третьего процессора

пор пока не будут завершены вычисления на остальных задействованных ядрах, что обусловлено информационными зависимостями между различными стадиями выполнения программы. Данная особенность функционирования системы приводит к дополнительным временным затратам при работе процессоров, что будет учтено при составлении имитационной модели. На рисунке 2 представлены графы, демонстрирующие следование линейных и распараллеленных участков программы, решающие обратную задачу кинематики робота. В вершинах левого графа указаны количества выполняемых процессорных инструкций на соответствующих стадиях вычислений, а правом — количества обращений к памяти в начале и конце стадий.

Данные, приведённые выше на рис. 2, легли в основу разработанной имитационной модели в виде её параметров, характеризующих рабочую загрузку мультипроцессорной системы.

Имитационная модель была написана на языке GPSS/H [3]. Составленная модель учитывает вероятностные обращения к памяти и отслеживает возникающие очереди к общим ресурсам. В ходе моделирования накапливается статистика, выявляющая производительные и накладные временные затраты на выполнение программы для каждого задействованного процессорного ядра. Результаты моделирования показывают неравномерность загруженности ядер, простои в очередях к общим ресурсам и временные потери при ожидании других ядер из-за информационных зависимостей. На рисунке 3 приводится схема алгоритма функционирования имитационной модели.

Имитационная модель использовалась для оценки времени выполнения программы на мультипроцессорной вычислительной системе с учётом

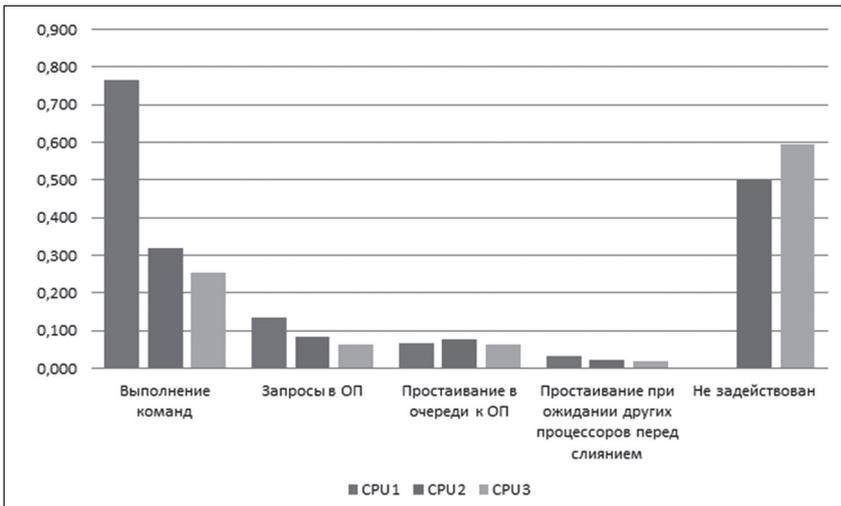


Рис. 7. Гистограмма сравнения загрузки ядер на различных стадиях выполнения программы

ресурсных и информационных конфликтов. Было установлено, что ускорение вычислений за счёт их распараллеливания сократило время работы программы на 41%.

Далее на рисунках 4, 5 и 6 приводятся диаграммы, показывающие временную загрузку процессоров, а на рисунке 7 содержится гистограмма, позволяющая сравнить их загрузку.

2. Использование регенеративного метода для анализа имитационной модели мультипроцессорной вычислительной системы

Для оценки среднего числа заявок в очередях к общей шине результаты работы модели оценивались регенеративным методом [4,5,6]. Работу составленной имитационной модели можно рассматривать как последовательность одинаково распределённых и независимых друг от друга циклов, а именно промежутков времени от возникновения очереди к общему ресурсу до её устранения. В качестве точек регенерации принимаются моменты времени разделения и объединения вычислений (транзактов) на 2 либо 3 потока. Состояние системы в точности повторяется в начале каждого

цикла. Для каждого цикла вычисляется пара величин Y_j – суммарное время нахождения транзактов в очереди к общей шине и α_j – количество транзактов на j -ом цикле. Критерий, по которому оценивается работа системы – среднее время нахождения транзакта в очереди.

Далее приводятся расчёты для случая разделения на 3 потока (формулы 1–10):

$$\text{Число циклов регенерации} \quad n := 33 \quad (1)$$

Число циклов регенерации принимается равным 33 в случае, если программа выполняется 3 раза подряд (на каждой итерации присутствует 11 участков с разделением вычислений на 3 потока).

Общее время нахождения транзактов в очереди в циклах:

$$Y := \begin{pmatrix} 121 & 132 & 163 \\ 148 & 140 & 168 \\ 147 & 149 & 132 \\ 145 & 130 & 186 \\ 132 & 120 & 157 \\ 127 & 133 & 141 \\ 158 & 143 & 132 \\ 143 & 117 & 130 \\ 125 & 122 & 135 \\ 130 & 143 & 147 \\ 178 & 130 & 144 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Количество обращений к ОП в циклах:

$$\alpha := \begin{pmatrix} 35 & 37 & 36 \\ 35 & 39 & 35 \\ 39 & 39 & 38 \\ 36 & 34 & 36 \\ 35 & 35 & 39 \\ 35 & 38 & 34 \\ 35 & 35 & 33 \\ 35 & 31 & 35 \\ 34 & 33 & 41 \\ 34 & 36 & 33 \\ 35 & 33 & 33 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Математическое ожидание Y (среднее время нахождения транзактов в очереди в цикле):

$$\hat{Y} := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i = 140.556 \quad (4)$$

Математическое ожидание α (среднее количество обращений к ОП):

$$\hat{\alpha} := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i = 35.472 \quad (5)$$

Математическое ожидание $E\{Y_i\}/E\{\alpha_i\}$ (среднее время нахождения транзакта в очереди к ОП):

$$\hat{r} := \frac{\hat{Y}}{\hat{\alpha}} = 3.962 \quad (6)$$

Оценка дисперсии Y :

$$s_{11} := \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y})^2 = 263.168 \quad (7)$$

Оценка дисперсии α :

$$s_{22} := \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \hat{\alpha})^2 = 4.771 \quad (8)$$

Второй смешанный момент от (Y_j, α_j) :

$$s_{12} := \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(Y_i - \hat{Y})(\alpha_i - \hat{\alpha})] = 11.273 \quad (9)$$

Оценка дисперсии:

$$s^2 = s_{11} - 2\hat{r}s_{12} + \hat{r}^2 s_{22} \quad (10)$$

$$s = 15.771$$

Результаты аналогичных расчётов для случая разделения на два потока приводятся ниже (формулы 11–20):

Число циклов регенерации:

$$n := 12 \quad (11)$$

Число циклов регенерации принимается равным 12 в случае, если программа выполняется 3 раза подряд (на каждой итерации присутствует 4 участка с разделением вычислений на 2 потока).

Общее время нахождения транзактов в очереди к общей шине в циклах регенерации:

$$Y = \begin{pmatrix} 41 \\ 41 \\ 31 \\ 22 \\ 29 \\ 22 \\ 43 \\ 46 \\ 22 \\ 22 \\ 22 \\ 22 \end{pmatrix} \quad (12)$$

Количество обращений к ОП в циклах регенерации:

$$\alpha = \begin{pmatrix} 17 \\ 20 \\ 19 \\ 20 \\ 22 \\ 19 \\ 19 \\ 20 \\ 18 \\ 22 \\ 17 \\ 19 \end{pmatrix} \quad (13)$$

Математическое ожидание Y (среднее время нахождения транзактов в очереди в цикле):

$$\hat{Y} = 30.25 \quad (14)$$

Математическое ожидание α (среднее количество обращений к ОП):

$$\hat{\alpha} = 19.333 \quad (15)$$

Математическое ожидание $E\{Y_1\}/E\{\alpha_1\}$ (среднее время нахождения транзакта в очереди к ОП):

$$\hat{\rho} = 1.565 \quad (16)$$

Оценка дисперсии Y :

$$s_{11} = 95.659 \quad (17)$$

Оценка дисперсии α :

$$s_{22} = 2.606 \quad (18)$$

Второй смешанный момент от (Y_j, α_j) :

$$s_{12} = -0.636 \quad (19)$$

Оценка дисперсии:

$$s = 10.2 \quad (20)$$

3. Оценка результатов моделирования

Анализ регенеративным методом производился с целью вычисления доверительных интервалов среднего времени пребывания заявок в очереди к общей шине при обращении к памяти для различных степеней достоверности. Доверительные интервалы вычислялись по формуле (21):

$$\hat{I} = \hat{\rho} \pm \frac{\zeta_{\delta}^2 s}{\hat{\alpha} \sqrt{n}} \quad (21)$$

где:

$$\zeta_{\delta}^2 = \Phi^{-1}\left(1 - \frac{\delta}{2}\right) \quad (22)$$

Φ^{-1} – функция стандартизованного нормального распределения.

Далее приводятся вычисленные доверительные интервалы для случая разделения на 3 потока (23–25).

Доверительный интервал при 90% уровне доверия:

$$\hat{I} = 3.962 + 0.095 \quad (23)$$

Доверительный интервал при 95% уровне доверия:

$$\hat{I} = 3.962 \pm 0.122 \quad (24)$$

Доверительный интервал при 99% уровне доверия:

$$\hat{I} = 3.962 \pm 0.172 \quad (25)$$

В соответствии с формулами (26–28) получены доверительные интервалы для случая разделения на 2 потока.

Доверительный интервал при 90% уровне доверия:

$$\hat{I} = 1.565 \pm 0.195 \quad (26)$$

Доверительный интервал при 95% уровне доверия:

$$\hat{I} = 1.565 \pm 0.251 \quad (27)$$

Доверительный интервал при 99% уровне доверия:

$$\hat{I} = 1.565 \pm 0.354 \quad (28)$$

Разработанная имитационная модель позволила оценить время работы мультипроцессорной вычислительной системы с учётом ресурсных и информационных конфликтов. Было установлено, что использование параллельных вычислений ускорило работу системы на 41%. Были оценены накладные временные расходы для каждого из задействованных процессорных ядер. Возникшие при одновременных обращениях к памяти через общую шину ресурсные конфликты были проанализированы регенеративным методом, с целью определения доверительных интервалов значений временных простоев заявок в очередях.

Заключение

На сегодняшний день изучение вычислительных систем невозможно без подробного ознакомления с основными принципами функционирования многоядерных процессоров. Особенности их структуры и функционирования могут быть наглядно продемонстрированы путём построения имитационных моделей.

Рассмотренная в статье модель и анализ результатов её работы наглядно демонстрируют характерные для выполнения распараллеленных вычислений проблемы, а именно ресурсные конфликты и информационные зависимости, возникающие между параллельными потоками. Эти проблемы являются основной преградой на пути развития мультипроцессорных систем, в связи с чем их изучение невозможно обойти стороной при обучении по дисциплине

нам, связанными с вычислительной техникой.

Данный материал способствует лучшему пониманию основных принципов работы мультипроцессорных систем и

может быть использован в образовательных целях для обучения студентов по курсам «Вычислительные системы» и «Имитационное моделирование, а примененный подход к построению

имитационной модели мультипроцессорной вычислительной системы и её анализ могут использоваться для анализа функционирования параллельных вычислительных систем.

Литература

1. *О.М. Брехов, Г.А. Звонарёва, А.В. Корнеенкова.* Имитационное моделирование: учебное пособие – М.: Издательство МАИ, 2015. – 323 с.
2. *Конюх В.Л., Игнатъев Я. Б., Зиновьев В.В.* Методы имитационного моделирования систем. Применение программных продуктов. Электронное изд. зарег. в Федеральном депозитарии электронных изданий, No 0320401123. Рег. свид. ФГУП НТЦ «Информрегистр» от 06.09.2004. No 4753.
3. *В.А. Сигнаевский, Я.А. Коган.* Методы оценки быстродействия вычислительных систем, Москва: «Наука», 1990.
4. *R. Humayu, Kh. David J. Morse.* System Performance Analysis: Tools, Techniques, and Methodology // Dell magazin's, 2001, Issue 3.
5. *G. Latouche, V. Ramaswami, J. Sethuraman, K. Sigman, M.S. Squillante, D. Yao.* Matrix-Analytic Methods in Stochastic Models. Springer Science & Business Media, 2012, 258 p.
6. *A. Morecki, G. Bianchi, C. Rzymkowski.* ROMANSY 11: Theory and Practice of Robots and Manipulators. – Berlin: Springer, 2014. – 432 с.
7. *D. Tolani, A. Goswami, N. Badler.* Real-Time Inverse Kinematics Techniques for Anthropomorphic Limbs – Philadelphia: University of Pennsylvania, 2000. – 36 с.
8. *Луговской К.С., Казанин П.И.* Автоматизация обратной задачи кинематики двухзвенного манипулятора. — Саратов: Институт управления и социально-экономического развития, 2016. — 8 с.
9. *Волков, Н.Н.* Верификация и валидация ИВС: предварительное проектирование и компьютерное моделирование информационно-вычислительных систем – М.: ТЕХПОЛИГРАФ-ЦЕНТР, 2015. – 629 с.
10. *S.L. Frenkel.* Performance measurement methodology -and-tool for computer systems with migrating applied software, in BRICS Notes Series, NS-98-4, pp.83-86, Aalborg, Denmark, June 1998.
11. *Орлов С.А., Цилькер Б.Я.* Организация ЭВМ и систем. 3-е изд. — СПб.: Питер, 2014. — 688 с.

References

1. *O.M. Brekhov, G.A. Zvonaryova, A.V. Korneenkova.* Imitacionnoe modelirovanie: uchebnoe posobie – M.: Izdatel'stvo MAI, 2015. – 323 s.
2. *Konyuh V.L., Ignat'ev YA. B., Zinov'ev V.V.* Metody imitacionnogo modelirovaniya sistem. Primenenie programmnyh produktov. EH-lektronnoe izd. zareg. v Federal'nom depozitarii ehlektronnyh izdanij, No 0320401123. Reg. svid. FGUP NTC «Informregistr» ot 06.09.2004. No 4753.
3. *V.A. Signaevskij, YA.A. Kogan.* Metody ocenki bystrodejstviya vychislitel'nyh sistem, Moskva: "Nauka", 1990.
4. *R. Humayu, Kh. David J. Morse.* System Performance Analysis: Tools, Techniques, and Methodology // Dell magazin's, 2001, Issue 3.
5. *G. Latouche, V. Ramaswami, J. Sethuraman, K. Sigman, M.S. Squillante, D. Yao.* Matrix-Analytic Methods in Stochastic Models. Springer Science & Business Media, 2012, 258 p.
6. *A. Morecki, G. Bianchi, C. Rzymkowski.* ROMANSY 11: Theory and Practice of Robots and Manipulators. – Berlin: Springer, 2014. – 432 с.
7. *D. Tolani, A. Goswami, N. Badler.* Real-Time Inverse Kinematics Techniques for Anthropomorphic Limbs – Philadelphia: University of Pennsylvania, 2000. – 36 с.
8. *Lugovskoj K.S., Kazanin P.I.* Avtomatizaciya obratnoj zadachi kinematiki dvuhzvennogo manipulyatora. — Saratov: Institut upravleniya i social'no-ehkonomicheskogo razvitiya, 2016. — 8 s.
9. *Volkov, N.N.* Verifikaciya i validaciya IVS: predvaritel'noe proektirovanie i komp'yuternoe modelirovanie informacionno-vychislitel'nyh sistem – M.: TEHPOLIGRAFCENTR, 2015. – 629 s.
10. *S.L. Frenkel.* Performance measurement methodology -and-tool for computer systems with migrating applied software, in BRICS Notes Series, NS-98-4, pp.83-86, Aalborg, Denmark, June 1998.
11. *Orlov S.A., Cil'ker B.Ya.* Organizaciya EHVM i sistem. 3-e izd. — SPb.: Piter, 2014. — 688 s.

12. *Томашевский В., Жданова Е.* Имитационное моделирование в среде GPSS. — М.: Бестселлер, 2003. — 416 с.
13. *Axelrod T.* Effects of Synchronization Barriers on Multiprocessor Performance. *Parallel Computing*, 1986, №3, p. 129–140.
14. *Н.Н. Иванов, А.Ю. Игнатущенко, А.Ю. Михайлов.* Статистическое Прогнозирование Времени Выполнения Комплексов Взаимосвязанных Работ в Микропроцессорных Вычислительных Системах. *Автоматика и Телемеханика*, 2005, № 6. с. 89–103.
15. *Танненбаум Э., Остин Т.* Архитектура компьютера. — СПб.: Питер, 2013. — 816с.
16. *S.C. Allmaier, M. Kowarschik, G. Horton.* State space construction and steady-state solution of GSPNs on a shared-memory multiprocessor // *Proc. 7th Int. Workshop on Petri Nets and Performance Models (PNPM'97)*, June 1997, St. Malo, France, p. 112-121.
17. *Смелянский Р.Л.* Об инварианте поведения программ // *Вестник МГУ, сер.15, Вычисл. матем. и киберн.*, 1990, №4, с. 54–60.
18. *S.L. Frenkel.* Random Summation and its Application to the Performance Modelling Computer Systems // *Proceedings of 17th European simulation multiconference ESM2003*, June, 2003, England, p. 278–283.
19. *Д.В. Калинин, А.П. Капитонова, Н.В. Ющенко.* Методы и средства прогнозирования времени выполнения последовательных программ. // *Методы математического моделирования МГУ*, 1997.
20. *М. Крэйн, О. Лемуан.* Введение в регенеративный метод анализа моделей. — М.: Наука, 1982 — 104 с.
21. *Р.С. Некрасова.* Регенеративное оценивание и его применение к системам с конечным буфером. Автореферат диссертации. Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра Российской академии наук. Петрозаводск, 2015. 124 с.
22. *Л.В. Потахина.* Анализ стационарности стохастических моделей телекоммуникационных систем методами теории восстановления. Автореферат диссертации. Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра Российской академии наук. Петрозаводск, 2015. 114 с.
12. *Tomashevskij V., Zhdanova E.* Imitacionnoe modelirovanie v srede GPSS. — М.: Bestseller, 2003. — 416 s.
13. *Axelrod T.* Effects of Synchronization Barriers on Multiprocessor Performance. *Parallel Computing*, 1986, №3, p. 129–140.
14. *N.N. Ivanov, A.YU. Ignatushchenko, A.Yu. Mihajlov.* Statisticheskoe Prognozirovanie Vremeni Vypolneniya Kompleksov Vzaimosvyazannyh Rabot v Mikroprocessornyh Vychislitel'nyh Sistemah. *Avtomatika i Telemekhanika*, 2005, № 6. s. 89–103.
15. *Tannenbaum EH., Ostin T.* Arhitektura komp'yutera. — SPb.: Piter, 2013. — 816s.
16. *S.C. Allmaier, M. Kowarschik, G. Horton.* State space construction and steady-state solution of GSPNs on a shared-memory multiprocessor // *Proc. 7th Int. Workshop on Petri Nets and Performance Models (PNPM'97)*, June 1997, St. Malo, France, p. 112-121.
17. *Smelyanskij R.L.* Ob invariance povedeniya programm // *Vestnik MGU, ser.15, Vychisl. matem. i kibern.*, 1990, №4, s. 54–60.
18. *S.L. Frenkel.* Random Summation and its Application to the Performance Modelling Computer Systems // *Proceedings of 17th European simulation multiconference ESM2003*, June, 2003, England, p. 278–283.
19. *D.V. Kalinichenko, A.P. Kapitonova, N.V. YUshchenko.* Metody i sredstva prognozirovaniya vremeni vypolneniya posledovatel'nyh programm. // *Metody matematicheskogo modelirovaniya MGU*, 1997.
20. *M. Krehjn, O. Lemuan.* Vvedenie v regenerativnyj metod analiza modelej. — М.: Nauka, 1982 — 104 s.
21. *R.S. Nekrasova.* Regenerativnoe ocenivanie i ego primenenie k sistemam s konechnym buferom. Avtoreferat dissertacii. Institut prikladnyh matematicheskikh issledovanij Karel'skogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. Petrozavodsk, 2015. 124 s.
22. *L.V. Potahina.* Analiz stacionarnosti stohasticheskikh modelej telekommunikacionnyh sistem metodami teorii vosstanovleniya. Avtoreferat dissertacii. Institut prikladnyh matematicheskikh issledovanij Karel'skogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. Petrozavodsk, 2015. 114 s.

Сведения об авторах

Олег Михайлович Брехов

Доктор технических наук,
заведующий кафедрой 304
Московский Авиационный Институт
(национальный исследовательский университет),
Москва, Россия
Эл. почта: obrekhov@mail.ru

Галина Александровна Звонарёва

Кандидат технических наук,
доцент кафедры 304
Московский Авиационный Институт
(национальный исследовательский университет),
Москва, Россия
Эл. почта: zvonarev@umail.ru

Владимир Вячеславович Рябов

Магистрант 2-го курса
Московский Авиационный Институт
(национальный исследовательский университет),
Москва, Россия
Эл. почта: vv.ryabov@mail.ru

Information about the authors

Oleg M. Brekhov

Dr. Sci. (Eng.), Head of department 304
Moscow Aviation Institute (National Research
University), Moscow, Russia
E-mail: obrekhov@mail.ru

Galina A. Zvonareva

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor
Moscow Aviation Institute (National Research
University), Moscow, Russia
E-mail: zvonarev@umail.ru

Vladimir V. Ryabov

Undergraduate
Moscow Aviation Institute (National Research
University), Moscow, Russia
E-mail: vv.ryabov@mail.ru