

Использование имитационного моделирования для оценки временных характеристик распределённой вычислительной системы

В настоящее время широкое распространение получили распределённые вычислительные системы (ВС) с параллельной обработкой информации. В процессе разработки распределённых вычислительных систем возникает задача анализа влияния параметров рабочей нагрузки и структуры на показатели её производительности. Особое внимание в ходе решения данной задачи следует уделить оценке времени нахождения заявок в очередях в зависимости от алгоритмов приоритизации.

Для оценки временных характеристик ВС можно использовать различные методы моделирования, наиболее эффективным из которых является имитационное моделирование. При этом важно не только провести моделирование, но и удостовериться в точности полученных результатов. **Целью данного исследования** является при использовании имитационного моделирования получение временных характеристик распределённой ВС с заданной точностью, оценка потребного времени моделирования.

Для решения этой задачи была разработана имитационная модель, отражающая во временной области функционирование распределённых ВС с учетом алгоритмов приоритизации, а также модель рабочей нагрузки, соответствующей рассматриваемому классу вычислительных систем. Для реализации модели использовался язык GPSS. На основе полученных результатов

моделирования можно сравнить влияние различных алгоритмов обработки приоритетов заявок в зависимости от параметров рабочей нагрузки и структуры. Для оценки точности результатов моделирования использовался регенеративный метод анализа моделей, основанный на понятиях регенеративного процесса и точек регенерации.

В статье приводятся результаты исследований оценки точности среднего времени нахождения заявок в очереди в зависимости от алгоритмов приоритизации при использовании регенеративного метода, а также необходимое время моделирования для достижения желаемой точности. Благодаря этому появляется возможность обоснованно рекомендовать наиболее выгодный из рассматриваемых алгоритмов приоритизации к реализации в разрабатываемой вычислительной системе в зависимости от предъявляемых требований.

Приведенный подход к анализу функционирования распределённых ВС и оценке их временных характеристик также несомненно будет полезен для использования в учебном процессе для обучения студентов по курсам «Вычислительные системы» и «Имитационное моделирование».

Ключевые слова: Распределённые вычислительные системы, имитационное моделирование, регенеративный метод, GPSS.

Galina A. Zvonareva, Denis S. Buzunov

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

Using Simulation Modeling to Estimate Time Characteristics of a Distributed Computing System

In present time, distributed computing systems with parallel data processing are widely used. During development of such distributed systems problem of analyzing workload and structure parameters impact on system performance is presented. Special attention have to be pointed towards evaluating time spent by requests in queues and effects of prioritization algorithms on it.

To evaluate computing system's time characteristics different modeling methods can be used, most effective of which is simulation modeling. It is important, however, not to just conduct modeling, but to make sure that results are accurate.

The purpose of this research is acquiring time characteristics of distributed computing system with use of simulation modeling with certain accuracy and estimation of modeling time required.

To achieve this task simulation model was developed, which represents functioning of distributed computing systems in set period and takes into account prioritization algorithm, and workload model, which corresponds with selected computational system class. The GPSS language was used to implement the model. Based on the obtained simulation results, it is possible to compare the impact of different

algorithms for processing priority requests depending on the parameters of the workload and structure. To evaluate accuracy of results regenerative method of model analysis was used, which is based on concepts of regenerative process and regeneration points.

In this paper results of average time spent by requests in queue in dependence with used prioritization algorithm research are presented, as well as time required to achieve desired accuracy. Due to this, it is possible to reasonably recommend the most advantageous of the considered prioritization algorithms for implementation in the developed computing system, depending on the requirements.

The presented approach to the analysis of the functioning of distributed computing systems and the assessment of their temporal characteristics will also undoubtedly be useful in the educational process for teaching students in the courses "Computer systems" and "Simulation modeling".

Keywords: distributed computing systems, simulation modeling, regenerative method, GPSS.

Введение

В настоящее время для решения задач специального назначения широко используется класс распределённых вычислительных систем, характеризующийся параллельной обработкой информации. Эти задачи зачастую имеют определённые ограничения: расположение узлов системы на удалении друг от друга; высокая специализация отдельных элементов. Для анализа таких систем в настоящее время используются методы аналитического и имитационного моделирования.

Рассматривая аналитические методы моделирования [1, 2, 4, 6, 7], стоит отметить особенности аналитического моделирования, общие для всех методов. Для проведения моделирования требуется провести приведение системы в некоторый абстрактный вид, рассматриваемый в каждом конкретном методе моделирования, при этом полученный вид даёт представление об ограниченном спектре характеристик системы. Таким образом, для анализа широкого спектра характеристик системы потребуется провести это приведение несколько раз.

Рассматривая различные методы и подходы, становится проблематично найти один метод, который учитывал бы все необходимые требования к модели. Рассматривая ускорение работы системы при использовании параллелизма, работа [1] не принимает во внимание приоритизацию заявок. Варианты с вероятностными [2] и эталонными [4] моделями не позволяют получить детальную информацию о проходящих в системе процессах, таких как гоночные состояния при обработке разноприоритетных заявок. Даже модели с расписанием [6, 7] используют определённые обобщения в структуре системы, что, в зависимости от поставленных

перед моделированием задач, может не давать достаточной адекватности

Таким образом, можно сказать, что аналитические подходы к решению проблемы оценки временных характеристик систем дают недостаточно информации в случае, когда система не является полностью однородной. Так же они не являются полностью адекватными в тех ситуациях, когда большое значение имеют динамических характеристики системы, проявляющиеся на всём протяжении её работы. Более того, в случаях, когда анализ производится в целях обучения для большего понимания особенностей работ распределённых систем, использование аналитических моделей лишает обучаемого определённого уровня прозрачности алгоритмов системы работы системы, скрывая его за необходимым для метода уровнем абстракции.

Использование имитационных методов моделирования [3, 5, 8] в таких случаях даёт несколько преимуществ. Имитационные модели позволяют получить информацию о времени и последовательности обработки заявок в системе, при этом приближая алгоритм работы модели к алгоритму работы моделируемой системы. Такие процессы, как появление очередей заявок или порядок обработки заявок из-за различных приоритетов, становятся явно выражены и могут быть детально рассмотрены, а их характеристики — проанализированы. Создание имитационной модели в ходе изучения функционирования системы позволяет глубже понять механизмы её работы, детально рассмотреть проходящие в ней процессы, а возможность быстрого изменения параметров рабочей нагрузки или используемых алгоритмов открывает возможность к экспериментам и пониманию влияния на неё тех или иных характеристик системы.

При этом важно помнить о том, что для любого результата важна его точность, и то, на сколько результату можно доверять. Особенно это важно при использовании случайных или псевдослучайных чисел в процессе моделирования, так как возможно искажение получаемых значений. Для анализа достоверности результатов моделирования применяются различные методы. В данной работе будет рассмотрен регенеративный метод анализа моделей, основанный на принципе регенерирующих процессов и его применение для оценки точности полученных результатов моделирования [9, 10].

Основной целью данной работы является оценка временных характеристик распределённой вычислительной системы с помощью имитационного моделирования. Для выполнения этой цели необходимо решить ряд задач: Формализация функционирования ВС и параметров рабочей нагрузки, построение имитационной модели структуры и модели рабочей нагрузки с использованием языка GPSS на основе экспериментальных данных, проведение имитационного моделирования; оценка точности полученных результатов с помощью регенеративного метода; анализ полученных данных и построение выводов.

1. Построение имитационной модели распределённой вычислительной системы

Прежде чем начать моделирование, необходимо определить объект моделирования, а также характеристики, которые будут оцениваться по итогу моделирования.

Существуют различные классы распределённых вычислительных систем [11, 12]. В данном случае будет рассматриваться один из классов распределённых вычислительных систем. Схема данной распре-

делённой системы представлена на рис. 1.

Система состоит из N устройств сбора данных, соединённых с коммутатором с помощью сети Ethernet. Коммутатор направляет полученные данные далее на устройство обработки данных.

В данном случае одной из ключевых характеристик системы является неоднородность типов пересылаемых сообщений. В системе существуют различные типы сообщений, каждый обладает различным объемом и приоритетом обработки. При этом время обработки сообщений в системе является важной временной характеристикой, так как определённые типы сообщений должны быть обработаны в минимальный промежуток времени.

Из-за того, что количество источников данных превышает количество обработчиков, возможна ситуация, когда в коммутаторе возникает очередь различных заявок [13, 14]. Время простоя заявок в очереди может оказывать значительное влияние на время их обработки в системе, а значит ему должно быть уделено особое внимание. При этом может меняться не только количество тех или иных заявок в системе, но и алгоритм обработки их приоритетов.

Таким образом, при составлении имитационной модели на основе представленной структуры, необходимо решить следующие задачи:

- Составление имитационной модели структуры вычислительной системы, отображающей особенности её функционирования (множественные источники данных, возникновение очереди заявок на коммутаторе и др.);
- Составление модели рабочей нагрузки системы на основе её описания;
- Моделирование различных методов обработки приоритетов;

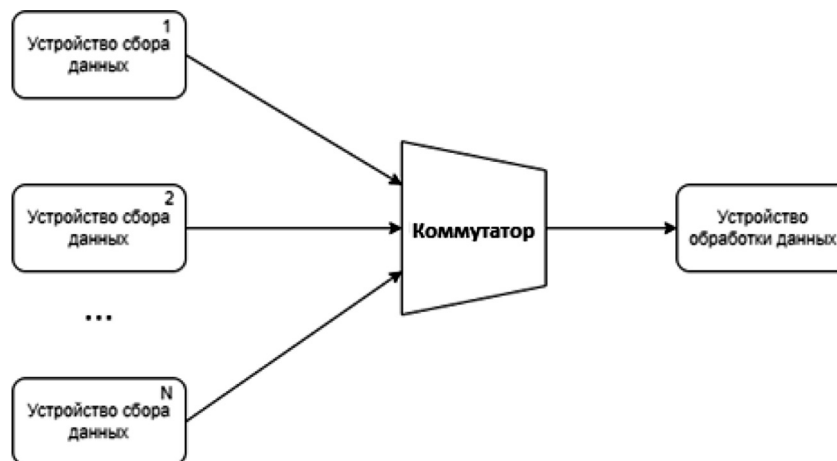


Рис. 1. Схема распределённой вычислительной системы

Fig. 1. Scheme of a distributed computing system

- Сбор статистики о времени пребывания заявок в очередях и среднем времени пребывания заявок в системе при использовании имитационного моделирования;

- Оценка точности полученных результатов моделирования.

Имитационная модель включает в себя описание структуры системы и описание рабочей нагрузки. Схема модели структуры системы показана на рис. 2.

Каждый модуль на схеме имитирует функционал соответствующей части системы. Рассмотрим функции каждого из них.

Модуль имитации устройства сбора и передачи данных предназначен для имитации поступления сообщений в систему, разбиения их на пакеты (заявки) с целью передачи на устройство обработки информации и назначения им соответствующих приоритетов. Для этого генерация заявок происходит группами в зависимости от состава передаваемых данных. Также этот модуль имитирует процесс передачи заявок через интерфейс Ethernet [15]. Количество модулей зависит от заданной структуры системы.

Модуль обработки заявок в очередях в соответствии с ал-

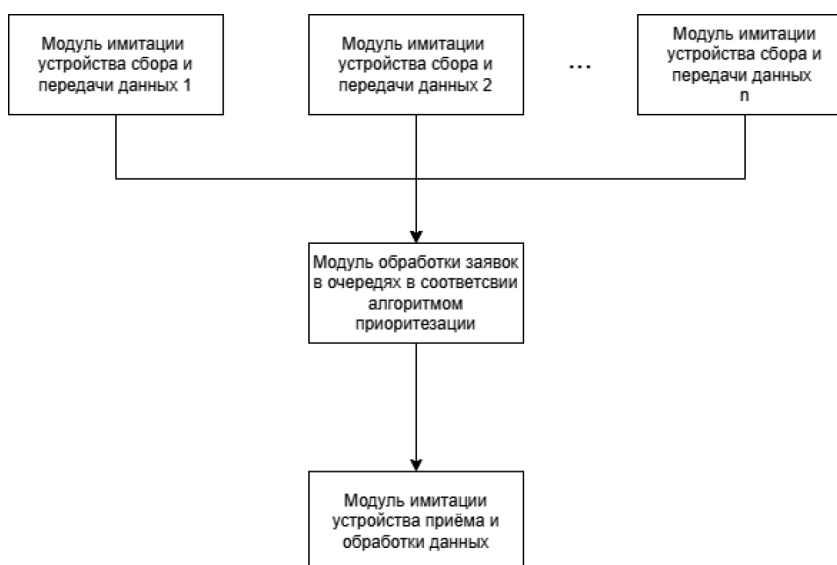


Рис. 2. Имитационная модель структуры распределенной ВС

Fig. 2. Simulation model of the structure of a distributed computing system

горитмом приоритезации обеспечивает функционал выстраивания очередности заявок в коммутаторе в соответствии с заданным алгоритмом приоритезации. Так как именно на данном узле формируется самая нагруженная очередь, объединяющая в себе потоки данных из всех источников, статистика пребывания заявок в этой очереди является наиболее интересной.

Модуль имитации устройства приёма и обработки данных предназначен для имитации поступления заявок из коммутатора через Ethernet на устройство обработки данных и обработку принятой заявки. При этом принимается то, что после завершения передачи на устройство обработки данных интерфейс становится свободным для обработки следующей заявки.

Модель рабочей нагрузки данной системы имеет несколько изменяемых параметров, таких как:

- Длина сообщения, что выражается в количестве генерируемых за один цикл заявок;
- Процентное соотношение заявок каждого типа;
- Интервал между поступлениями сообщений в систему.

Некоторые временные характеристики структуры модели зависят в том числе и от параметров рабочей нагрузки, так, например, время передачи сетевых пакетов.

2. Моделирование распределенной вычислительной системы

В данной работе рассматривается моделирование системы для одного из типовых режимов работы при следующих параметрах:

- Количество модулей имитации устройства сбора и передачи данных;
- Рассматриваемые алгоритмы приоритезации: Наивысший приоритет, FIFO;

- Количество типов заявок;
- Процентное соотношение между 1/2/3/4 типом заявок: 10/10/20/60%;

- Модельное время обработки блоком имитации сетевого порта 1/2/3/4 типа заявок: 35/35/40/70;

- Типы заявок в порядке приоритета: 4, 3, 2, 1;

- Интервал генерации заявок: 2500 тактов.

При этом заявки 1, 2 и 3 типа обозначают данные обслуживания, которые передаются одиночными пакетами, и обладают малым объёмом, а значит и временем обработки. Заявки 4 типа, в свою очередь, представляют полезные данные, объём которых зачастую превышает лимит объёма одного пакета сети Ethernet [16]. В этом случае данные делятся на несколько пакетов, что отражается генерацией множества заявок 4 типа.

Основной характеристикой, интересующей нас в данной системе, является среднее время ожидания заявки в очереди. Это время может быть измерено в различных качествах — для всех типов заявок или для каждого типа отдельно. В то время как среднее время ожидания показывает общее время обработки заявок в системе, время каждого отдельного типа также представляет интерес, так как к различным типам заявок могут быть представлены различные требования к требуемому времени обработки.

На данную характеристику оказывают влияние различные параметры рабочей нагрузки и структуры системы, такие как количество генерируемых заявок за один цикл генерации [17, 18], время обработки каждого типа заявки и др. При этом время обработки каждого типа заявки влияет на среднее время ожидания всех типов заявок, так как они находятся в одной очереди.

Одной из структурных характеристик, влияющих на время обработки заявки яв-

ляется алгоритм обработки приоритетов [19]. Так как различные типы заявок обладают различным временем обработки, изменение порядка их обработки оказывает влияние как на среднее время обработки каждого типа заявок отдельно (менее приоритетные заявки обрабатываются в конце, более приоритетные — в начале), так и на среднее время для всех типов. Количество генерируемых заявок в каждый цикл так же оказывает прямое влияние, так как большее количество созданных заявок означает большее количество заявок в очереди.

Важной в данной системе временной характеристикой является среднее время ожидания в очереди каждого типа заявок. Некоторые типы данных имеют требование к обработке их в течение определённого времени. Таким образом, если заявка проводит слишком много времени в ожидании, то она перестаёт быть полезной.

На рис. 3 показана зависимость среднего времени ожидания в очереди заявок каждого типа. Можно заметить, как при использовании приоритетного метода обработки среднее время ожидания для заявок четвёртого типа уменьшается на 27%, но при этом время ожидания остальных типов растёт в 1,5–2 раза.

Простого проведения моделирования недостаточно, чтобы достоверно оценивать характеристики системы. Множество различных факторов влияют на точность полученных данных. Например, недостаточно долгое время моделирования может давать искажённую картину происходящих процессов, а различные виды генераторов псевдослучайных чисел могут создавать погрешность в зависящих от них величинах.

Так, на рис. 4 показана зависимость среднего времени ожидания заявки в очереди в зависимости от времени моде-

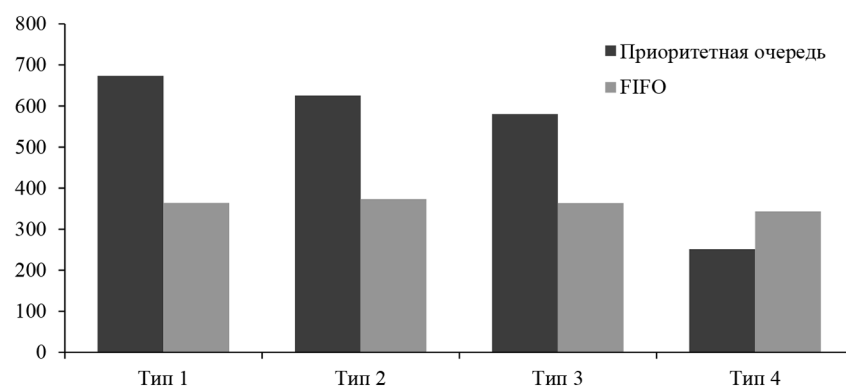


Рис. 3. График сравнения среднего времени ожидания в очереди заявок различного типа в зависимости от алгоритма приоритизации

Fig. 3. Comparison graph of the average waiting time in the queue for applications of various types, depending on the prioritization algorithm

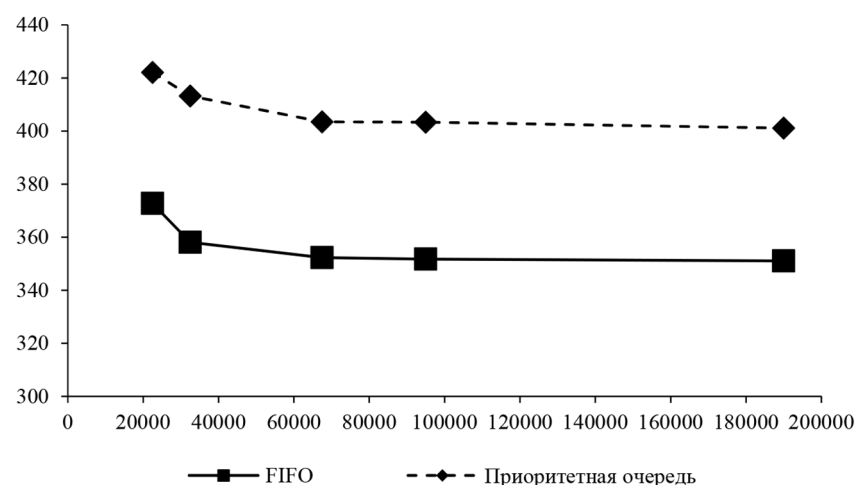


Рис. 4. Зависимость среднего времени ожидания заявки в очереди от времени моделирования.

Fig. 4. Dependence of the average waiting time of an application in the queue on the simulation time.

лирования. Можно заметить, как сильно меняется среднее время при увеличении времени моделирования в 3 раза, с 20000 до 60000 тактов, в то время как увеличение с 60000 до 190000 оказывает мало влияния на значение среднего времени ожидания заявки в очереди.

Это наблюдение вызывает вопрос о необходимом времени моделирования для получения достоверных результатов.

3. Оценка точности результатов моделирования

Для анализа того, насколько достоверны результаты моделирования, могут использоваться

различные методы. Одним из них является регенеративный метод анализа моделей [9, 10, 20]. В основе своей он имеет понятие регенеративных процессов — процессы, которые постоянно возвращаются в определённую точку, и развитие которых после возвращения в эту точку не зависит от прошлых данных. Такая точка называется точкой регенерации.

Рассматривая моделируемую систему, можно заметить, что после обработки всех заявок в текущем цикле генерации, система приходит в исходное состояние. Благодаря этому для анализа данной модели можно воспользоваться регенеративным методом.

Таким образом, данные, полученные в ходе использования регенеративного метода, можно трактовать как множество отдельных, взаимно независимых, экспериментов, проходящих по одному и тому же закону. Каждый из этих экспериментов затем может быть обработан отдельно, что значительно упрощает их анализ. А их сравнение друг с другом позволяет оценить их дисперсию и минимизировать разброс результатов, вызванный случайными процессами, происходящими в рамках каждого эксперимента.

Рассмотрим процесс нахождения доверительного интервала на примере нахождения доверительного интервала среднего времени задержки заявки в очереди. Для этого необходимо выполнить следующие действия [10, 19]:

1. Выделить из набора данных n интервалов между точками регенерации (циклы). Для каждого из них вычислить сумму всех элементов интервала, а также их количество. Для каждого интервала α_i — количество элементов в интервале i , а Y_i — сумма элементов интервала i .

2. Найти среднее от всех сумм элементов интервалов, среднее количество элементов в интервалах и среднее значение элемента.

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Y_j,$$

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \alpha_j,$$

$$\bar{r} = \bar{Y} / \bar{\alpha};$$

3. Найти оценку дисперсии суммы элементов циклов.

$$s_{11} = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n Y_j^2 - \frac{1}{n(n-1)} \left(\sum_{j=1}^n Y_j \right)^2;$$

4. Найти оценку дисперсии количества элементов циклов.

$$s_{22} = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n \alpha_j^2 - \frac{1}{n(n-1)} \left(\sum_{j=1}^n \alpha_j \right)^2;$$

5. Найти оценку корреляции между суммой элементов циклов и количеством элементов.

Таблица 1 (Table 1)

$$s_{12} = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n Y_j \alpha_j - \frac{1}{n(n-1)} \left(\sum_{j=1}^n Y_j \right) \left(\sum_{j=1}^n \alpha_j \right),$$

$$s^2 = s_{11} - 2\bar{r}s_{12} + \bar{r}^2 s_{22};$$

6. Сформировать доверительный интервал

$\bar{r} \pm \frac{z_{\delta} s}{\alpha \sqrt{n}}$, где $z_{\delta} = \Phi^{-1} \left(1 - \frac{\delta}{2} \right)$, Φ – функция стандартизованного нормального распределения.

Рассмотрим применение данного метода на примере моделируемой ранее системы. Результаты вычислений приведены в табл. 1 для модели с приоритизацией заявок, и в табл. 2 для модели без приоритизации заявок.

Одним из главных вопросов имитационного моделирования является необходимое время моделирования. Построим график точности результатов моделирования (процента разброса) от времени моделирования. Он представлен на рис. 5.

Можно заметить, как сильно падает прирост точности после 60000 тактов моделирования. Дальнейшее увеличение времени моделирования будет давать всё меньший прирост в точности, и не является рациональным. Таким образом если желаемая точность при измерениях составляет, например, 3%, то для данной модели будет достаточно приблизительно 160000 тактов моделирования.

Заключение

Использование имитационного моделирования при изучении распределённых вычислительных систем имеет большую практическую и образовательную ценность, так как позволяет значительно улучшить понимание работы этих систем и изучить их поведение в различных условиях.

В рамках данной работы рассмотрено построение имитационной модели распределённых вычислительных систем, приведены результаты

Результаты моделирования при использовании приоритетной очереди

Simulation results when using a priority queue

№ испытания	Время моделирования	Кол-во точек регенерации	Разброс	Среднее время ожидания
1	22500	8	34,5	422
2	32500	12	24,72	413
3	67500	26	15,92	403
4	95000	37	14,21	403
5	190000	75	10,54	401

Таблица 2 (Table 2)

Результаты моделирования при использовании очереди с механизмом FIFO

Simulation results when using a queue with a FIFO mechanism

№ испытания	Время моделирования	Кол-во точек регенерации	Разброс	Среднее время ожидания
1	22500	8	28,22	373
2	32500	12	21,87	358
3	67500	26	15,16	352
4	95000	37	13,24	352
5	190000	75	9,42	351

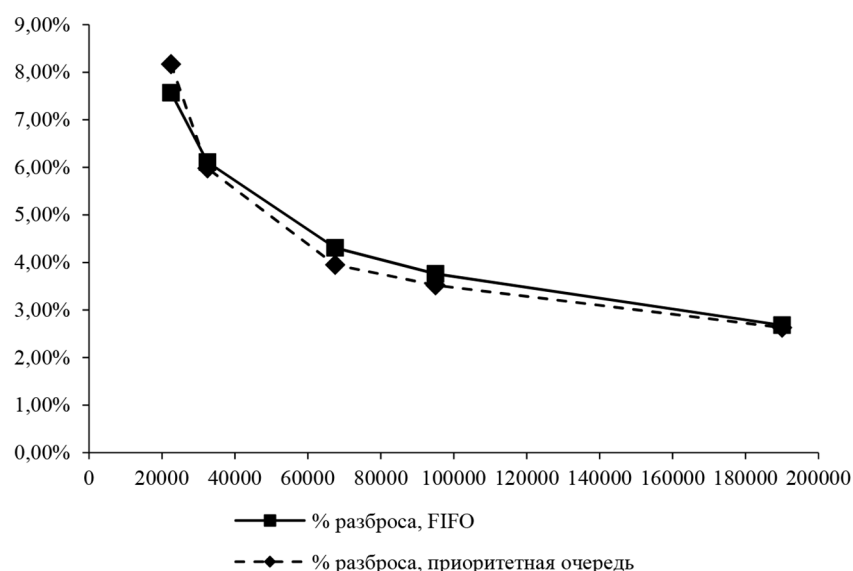


Рис. 5. Зависимость точности результатов моделирования от времени моделирования

Fig. 5. Dependence of the accuracy of the simulation results on the simulation time

моделирования, связанные с получением таких временных характеристик, как среднее время ожидания заявки в очереди для всех типов заявок и для каждого типа отдельно, показано их изменение в зависимости от времени моделирования и типа использованного алгоритма приоритизации.

Особое внимание уделено вопросу точности полученных данных, для определения которой используется регенера-

тивный метод анализа модели. Приводится описание базовых принципов регенеративного метода, причины по которым он применим в данном случае, и применение его для оценки точности результатов моделирования. Использование данного метода позволяет оперировать более надёжными данными и повысить достоверность результатов моделирования и последующего анализа полученных данных.

Литература

1. Афанасьев А.П., Посыпкин М.А. Аналитическая модель оценки производительности распределённых систем // Программные продукты и системы. 2009. № 4. С. 60–64.
2. Брехов О.М., Морару В.А. Аналитическое моделирование ЭВМ, управляемой потоком данных // Автоматика и телемеханика. 1993. № 12. С. 165–178.
3. Брехов О.М., Звонарева Г.А., Корнеев А.В. Имитационное моделирование. М.: Издательство МАИ, 2015. 323 с.
4. Хританков А.С. Метод анализа производительности распределённых приложений на основе эталонных моделей // Параллельные вычислительные технологии: труды международной научной конференции (28 марта–1 апреля 2011) Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. С. 343–354.
5. Лёвина А.П., Обзор метода имитационного моделирования [Электрон. ресурс] // Современная техника и технологии. 2017. № 5. Режим доступа: <https://technology.snauka.ru/2017/05/13530>. (Дата обращения: 17.12.2021).
6. Посыпкин М.А., Хританков А.С. О понятии ускорения и эффективности в распределённых системах // Труды Всероссийской научной конференции «Научный сервис в сети Интернет: решение больших задач». (22–27 сентября, г. Новороссийск). М.: МГУ, 2008. С. 149–155.
7. Хританков А.С., Оценка эффективности распределённых систем при решении задач переменного размера // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2010. № 2(66). С. 66–71.
8. Кочержова Е.Н., Оксанич О.И., Донец З.Г. Элементы имитационного моделирования // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5. С. 161–162.

9. Morecki A., Bianchi G., Rzymkowski C. ROMANSY 11: Theory and Practice of Robots and Manipulators. Berlin: Springer, 2014. 432 с.
10. Брехов О.М., Звонарева Г.А., Рябов В.В. Особенности разработки и анализа имитационной модели мультипроцессорной вычислительной системы // Открытое образование. 2017. № 3. С. 48–56.
11. Siemon D. Queueing in the Linux network stack // Linux Journal: Networking. 2013
12. Ross K., Kurose J. «Delay and Loss in Packet-Switched Networks». 2012
13. Радченко Г.И. Распределённые вычислительные системы: учебное пособие. Челябинск: Фотохудожник, 2012. 184 с.
14. Manchanda N., Anand K. Non-Uniform Memory Access (NUMA). New York: New York University, 2014.
15. Kling T. The impact of transport protocol, packet size, and connection type on the round trip time // Blekinge Institute of Technology. 2017.
16. Hornig Charles. A Standard for the Transmission of IP Datagrams over Ethernet Networks [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc894>.
17. Nain P. Impact of Bursty Traffic on Queues // Statistical Inference for Stochastic Processes. 2002. № 5. С. 307–320.
18. Chydzinski A., Samociuk D. Burst ratio in a single-server queue // Samociuk Telecommunication Systems. 2019. № 70. С. 263–276.
19. Карташевский В.Г., Буранова М.А., Влияние механизмов управления QoS на показатели качества обслуживания мультимедийного трафика сети Internet // T-Comm. 2013. № 8. С. 54–60.
20. Крейн М., Лемуан О. Введение в регенеративный метод анализа моделей. М.: Наука, 1982. 104 с.

References

1. Afanas'yev A.P., Posypkin M.A. Analytical model for evaluating the performance of distributed systems. Programmnyye produkty i sistemy = Software products and systems. 2009; 4: 60–64. (In Russ.)
2. Brekhov O.M., Moraru V.A. Analytical modeling of computers controlled by data flow Analiticheskoye modelirovaniye EVM, upravlyayemoy potokom dannyykh. Avtomatika i telemekhanika = Automation and Telemechanics. 1993; 12: 165–178. (In Russ.)
3. Brekhov O.M., Zvonareva G.A., Korneyenkova A.V. Imitatsionnoye modelirovaniye = Simulation modeling. Moscow: MAI Publishing House; 2015. 323 p. (In Russ.)
4. Khritankov A.S. Metod analiza proizvoditel'nosti raspredelennykh prilozheniy na osnove etalonnnykh modeley = A method for

- analyzing the performance of distributed applications based on reference models. Parallel Computing Technologies: Proceedings of the International Scientific Conference (March 28–April 1; 2011) Chelyabinsk: Publishing Center of SUSU; 2011: 343–354. (In Russ.)
5. Lovina A.P. Overview of the simulation method [Internet]. Sovremennaya tekhnika i tekhnologii = Modern equipment and technologies. 2017; 5. Available from: <https://technology.snauka.ru/2017/05/13530>. (cited: 17.12.2021). (In Russ.)
6. Posypkin M.A., Khritankov A.S. O ponyatii uskoreniya i effektivnosti v raspredelennykh sistemakh = On the concept of acceleration and efficiency in distributed systems. Proceedings of the All-Russian Scientific Conference «Scientific Service on the Internet: Solving Big Problems». (September 22–27, Novorossiysk). Moscow: MGU; 2008: 149–155. (In Russ.)

7. Khritankov A.S. Evaluation of the efficiency of distributed systems in solving problems of variable size Otsenka effektivnosti raspredelennykh sistem pri reshenii zadach peremennogo razmera. Nauchno-tehnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki = Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics. 2010; 2(66): 66-71. (In Russ.)
8. Kocherzhova Ye.N., Oksanich O.I., Donets Z.G. Elements of simulation modeling. Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii = Modern science-intensive technologies. 2014; 5: 161-162. (In Russ.)
9. Morecki A., Bianchi G., Rzymkowski C. ROMANSY 11: Theory and Practice of Robots and Manipulators. Berlin: Springer; 2014. 432 p. (In Russ.)
10. Brekhov O.M., Zvonareva G.A., Ryabov V.V. Features of the development and analysis of a simulation model of a multiprocessor computer system. Otkrytoye obrazovaniye = Open Education. 2017; 3: 48-56. (In Russ.)
11. Siemon D. Queueing in the Linux network stack. Linux Journal: Networking. 2013
12. Ross K., Kurose J. Delay and Loss in Packet-Switched Networks. 2012
13. Radchenko G.I. Raspredelennyye vychislitel'nyye sistemy: uchebnoye posobiye. = Distributed Computing Systems: a tutorial. Chelyabinsk: Photo artist; 2012. 184 p. (In Russ.)
14. Manchanda N., Anand K. Non-Uniform Memory Access (NUMA). New York: New York University; 2014.
15. Kling T. The impact of transport protocol, packet size, and connection type on the round trip time. Blekinge Institute of Technology. 2017.
16. Hornig Charles. A Standard for the Transmission of IP Datagrams over Ethernet Networks [Internet]. Available from: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc894>.
17. Nain P. Impact of Bursty Traffic on Queues. Statistical Inference for Stochastic Processes. 2002; 5: 307-320.
18. Chydzinski A., Samociuk D. Burst ratio in a single-server queue. Samociuk Telecommunication Systems. 2019; 70: 263-276. (In Russ.)
19. Kartashevskiy V. G., Buranova M. A. Vliyaniye mekhanizmov upravleniya QoS na pokazateli kachestva obsluzhivaniya mul'timediynogo trafika seti Internet = Influence of QoS control mechanisms on indicators of the quality of service of multimedia traffic in the Internet. T-Comm. 2013; 8: 54-60. (In Russ.)
20. Kreyon M., Lemoine O. Vvedeniye v regenerativnyy metod analiza modeley = Introduction to the regenerative method of model analysis. Moscow: Science, 1982. 104 p. (In Russ.)

Сведения об авторах

Галина Александровна Звонарёва

К.т.н., доцент кафедры «Вычислительные машины, системы и сети»

Московский Авиационный Институт
(национальный исследовательский университет),
Москва, Россия

Эл. почта: zvonarevagal@yandex.ru

Денис Сергеевич Бузунов

Московский Авиационный Институт
(национальный исследовательский университет),
институт «Системы управления, информатика
и электроэнергетика», кафедра «Вычислительные
машины, системы и сети», Москва, Россия

Эл. почта: denis.buzunow@yandex.ru

Information about the authors

Galina A. Zvonareva

Cand. Sci. (Technical) Associate Professor of the
Department of Computers, systems and networks»

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

E-mail: zvonarevagal@yandex.ru

Denis S. Buzunov

Moscow Aviation Institute (National Research
University), Institute «Management systems,
informatics and power engineering», Department
«Computers, systems and networks»,
Moscow, Russia

E-mail: denis.buzunow@yandex.ru