

**Гаевой Сергей Владимирович**

**УПРАВЛЕНИЕ СТРАТЕГИЯМИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДАНИЙ  
ВНУТРИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГРИД-СИСТЕМЫ**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка  
информации (промышленность)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедрах «Электронно-вычислительные машины и системы» и «Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Волгоградский государственный технический университет»

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор  
**Фоменков Сергей Алексеевич.**

Официальные оппоненты:

**Финогеев Алексей Германович**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Пензенский  
государственный университет»,  
г. Пенза, кафедра «Системы автоматизации  
проектирования», профессор;

**Лобейко Владимир Иванович**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Астраханский  
государственный университет»,  
г. Знаменск, кафедра «Математика и  
информатика», заведующий.

Ведущая организация

ФГБОУ ВПО «Астраханский  
государственный технический  
университет» («АГТУ»), г. Астрахань.

Защита состоится «19» марта 2015 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.028.04, созданного на базе Волгоградского государственного технического университета по адресу: 400005, г. Волгоград, пр. Ленина 28, ВолгГТУ, ауд. 209.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Волгоградского государственного технического университета и на сайте ВолгГТУ по адресу <http://www.vstu.ru/nauka/dissertatsionnye-sovety/d-21202804.html>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Водопьянов Валентин Иванович

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы исследования.** В связи с массовым распространением распределенных вычислительных систем стала актуальной проблема их эффективного использования. Одним из аспектов данной проблемы является распределение заданий внутри вычислительных систем, в частности речь идет о Грид-системах (Грид-система в рамках данной работы рассматривается как объединение вычислительных центров — кластеров, благодаря которому они получают возможность выполнять задания друг друга). Стратегии распределения заданий внутри вычислительной системы — это способы определения для каждого подходящего задания исполнителя путем, как правило, эвристических оценок (эвристик). Для сравнения и оценки качества эвристик прибегают к методам имитационного моделирования, что делает необходимыми стохастические аппроксимации нагрузки подобных систем.

Работы, связанные с эвристиками, моделированием и/или аппроксимацией нагрузки вычислительных систем уже проводились, в частности, Самоваровым О.И., Лукьяновым В.С., Жариковым Д.В., Грушиным Д.А., Роговым Ю.П., Аветисяном А.И., Гайсаряном С.С., Кузюрином Н.Н., Шокуровым А.В., Михайловым Г.М., Соболевым С.И., Шамакиной А.В., Каляевым А.В., Шелестовым А.Ю., Leland W.E., Ott T.J., Feitelson D. G., Rudolph L., Downey A.V., Jann J., Pattnaik P., Franke H., Wang F., Skovira J., Riodan J., Moreira J.E., Jette M.A., Lublin U., Tsafrir D., Etsion Y., Sulistio A., Buyya R., Murshed M., Dobre C., Stratan C., Cameron D.G., Takefusa A., Quinson M., Legrand A., Casanova H., Ranganathan K., Foster I., Xia H., Davies A., Plaszczak P., Berman F., Li M., Catlett C., Smarr L., Smith R., Taha H. и др.

В вышерассмотренных работах были предложены стратегии распределения заданий, способы моделирования обслуживания, подходы к аппроксимации нагрузки, оценки времени выполнения заданий.

Однако эти работы имеют ряд недостатков:

- 1) Модели создаются для конкретной системы, ориентируясь на частный случай.
- 2) Аппроксимации не учитывают циклической нагрузки по времени.
- 3) Показатели законов распределения времени выполнения заданий принимается линейно зависимыми от требуемого числа вычислительных машин, что является грубым допущением.

**Целью диссертации является** повышение эффективности функционирования вычислительных кластерных и Грид-систем за счет управления распределением потока заданий (эффективность оценивается средним временем ожидания результата).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

---

\* Автор работы выражает признательность и благодарность ныне покойному Лукьянову Виктору Сергеевичу, д.т.н., профессору кафедры «Электронные вычислительные машины и системы», под руководством которого начиналась данная работа.

1) произвести обзор существующих подходов и моделей кластерных и Грид-систем, аппроксимации нагрузки и распределения заданий внутри Грид-системы;

2) разработать детерминированную дискретно-событийную имитационную модель кластерной и Грид-системы для обслуживания заданного списка заданий;

3) сформировать набор стратегий управления для распределения заданий внутри Грид-системы;

4) предложить универсальные модели для аппроксимации стохастической нагрузки вычислительных систем и перейти от детерминированной к стохастической дискретно-событийной имитационной модели кластерной и Грид-системы для обслуживания случайного потока заданий;

5) реализовать программно детерминированную и стохастическую дискретно-событийные модели, а также аппроксимацию нагрузки вычислительных систем с последующей проверкой работоспособности и эффективности разработанных моделей, алгоритмов и программных средств;

6) сформулировать методики моделирования кластеров и Грид-систем, а также методику определения рациональной стратегии управления распределением заданий.

**Объектом исследования** являются вычислительные Грид- и кластерные системы.

**Предметом исследования** являются процессы обслуживания в вычислительных Грид- и кластерных системах.

**Методы исследования.** В процессе выполнения работы были использованы следующие методы: системного анализа, математического моделирования, объектно-ориентированного и процедурного программирования, математической статистики, численные методы, использования специализированных структур представления данных при программировании, проведения высокопроизводительных вычислений.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1) Сформирован набор стратегий распределения заданий в Грид-системе, учитывающих различные характеристики вычислительных систем и позволяющих повысить эффективность управления и принятия решений по распределению заданий в Грид-системе.

2) Разработаны универсальные модели стохастической аппроксимации и определены необходимые для них законы распределения случайных величин, позволяющие генерировать случайные нагрузки вычислительных систем для произвольной вычислительной системы (с учетом цикличности нагрузки и высокого коэффициента вариации).

3) Предложены инженерные методики моделирования работы кластерной и Грид-системы, что позволяет определить рациональную стратегию распределения заданий в Грид-системе.

**Практическая значимость и внедрение.** Разработанные средства рассчитаны на пользователей, занимающихся проектированием и модификаций

вычислительных кластерных и Грид-систем для определения параметров распределения заданий и показателей обслуживания.

Предложенные средства могут быть внедрены не только в сферы деятельности, связанные с вычислительными системами, но в сферы, связанные с различными разделениями любой нагрузки, например, между отделами организации, работниками call-центра и т.д.

Разработанные модели и методы были реализованы в виде комплекса программных средств DetBroker+StochBroker, а также отдельного средства StochImiG для проведения лабораторных, семестровых и курсовых работ.

Программное средство StochImiG внедрено в учебный процесс на кафедре «ЭВМ и С» в рамках дисциплин «Вычислительные системы и сетевые технологии» на замену ранее разработанному для этих целей «GridModel» и потенциально может быть внедрено в курсы «Отказоустойчивые системы» и «Надежность и эксплуатация средств ВТ», в которые было внедрено побочно разработанное средство «NetSys». Программные средства «DetBroker+StochBroker» внедрены в учебный процесс при моделировании работы кафедрального кластера и выполнении дипломных работ.

Получены четыре свидетельства о регистрации программных средств «DetBroker», «StochImiG», «NetSys» и «GridModel» в Федеральной службе по интеллектуальной собственности.

**На защиту выносятся:**

- 1) набор стратегий для распределения заданий внутри Грид-системы;
- 2) набор универсальных моделей стохастической аппроксимации нагрузки вычислительных систем и распределения случайной величины;
- 3) методики моделирования работы кластерной системы, Грид-системы и определения рациональной стратегии распределения заданий в Грид-системе;
- 4) программные средства «DetBroker» для детерминированного моделирования, «StochBroker» для стохастической аппроксимации и стохастического моделирования и «StochImiG» для внедрения в учебный процесс.

**Достоверность научных результатов** обеспечивается использованием апробированных методов (системного анализа, математического моделирования, процедурного и объектно-ориентированного программирования, параллельного программирования), совпадением результатов аналитического и имитационного моделирования в общей области применимости, внутренней непротиворечивостью предложенных моделей, соответствием наших результатов ранее полученным в сторонних работах.

**Апробация работы.** Результаты работы обсуждались на внутривузовских научных конференциях и кафедральных семинарах кафедр «ЭВМиС» и «САПриПК», а также докладывались на следующих конференциях: Международная научно-практическая конференция «Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий» (г. Сочи, 2010), Международная научно-практическая конференция «Инновационные информационные технологии» (г. Прага, 2013), XI Международная научно-

практическая конференция «Перспективы развития информационных технологий» (г. Новосибирск, 2013), IX международная научно-практическая конференция «Perspektywiczne opracowania sa nauka i technikami» (г. Przemysl, 2013), VI международная научно-практическая конференция «Инновации в технологиях и образовании» (г. Белово, 2013), I всероссийская научно-практическая конференция «России – творческую молодёжь» (г. Камышин, 2013).

В 2014 году за работу по теме диссертации автору была назначена Стипендия Президента РФ на 2014-2015 учебный год.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 34 печатные работы, в том числе 7 в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 работы в зарубежных журналах (из них 1 работа в зарубежном журнале, входящем в международную базу цитирования «SCOPUS») и 1 монография. По результатам работы созданы 4 программных продукта, которые получили свидетельства о государственной регистрации.

**Структура и содержание диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, а также библиографического списка из 155 наименований и двух приложений. Общий объем работы 167 страниц, в том числе 60 рисунков и 35 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, методы исследования, практическая значимость работы, излагается краткое содержание глав диссертации.

**В первой главе** диссертации рассматриваются существующие алгоритмы моделирования выполнения заданий, стратегии распределения и большей частью методы аппроксимации стохастической нагрузки, в т.ч. оценок времени выполнения заданий. Рассмотренные методы аппроксимации демонстрируют различные подходы: выделение несколько входных потоков заданий, учет суточного цикла, объединение потоков заданий различных вычислительных систем и т.д. Даются используемые до сегодняшнего времени законы распределения случайных величин. Отдельно описывается проблема предварительной оценки времени выполнения заданий.

Демонстрируются отличия моделей, используемых для вычислительных систем, от систем массового обслуживания типа  $G/G/n$  по Кендаллу:

- 1) нестационарность интенсивности потока входных заданий, его цикличность;
- 2) наличие заданий различной ширины (требуемое число каналов для исполнения) и зависимость между временем выполнения и шириной;
- 3) введение потоков заданий различной ширины;
- 4) неточность и субъективность пользовательских оценок времени выполнения заданий.

Особое внимание уделяется подходам аппроксимации входной нагрузки (набор задач и их характеристики) вычислительных систем, которые часто

строятся для конкретной системы или ограниченного набора систем, что делает эти подходы частными. При объединении вычислительных кластерных систем в Грид-систему вводятся стратегии распределения заданий. В литературе найдены три стратегии и некоторые их модификации.

Однако эти работы имеют ряд недостатков:

1) Как правило, модель нагрузки создается на базе одного конкретного вычислительного кластера либо группы кластеров одним методом без его обобщения на иные системы. В первом случае модель нагрузки не может быть обобщена для других кластеров, а во втором нет оригинальных данных, с которыми можно было бы сравнить аппроксимацию.

2) Качество аппроксимированной нагрузки часто проверяется степенью соответствия исходным данным, но нет демонстрации соответствия показателей обслуживания оригинала и аппроксимации. Реально существующие задокументированные нагрузки вычислительных систем часто не рассматриваются в качестве материала для ретроспективного моделирования.

3) Часто аппроксимации не учитывают цикличной нагрузки (суточный, недельный, годовой цикл).

4) Во многих случаях показатели законов распределения времени выполнения заданий принимаются линейно зависимыми от требуемого числа вычислительных машин.

В конце главы сформулированы цели и задачи диссертационного исследования.

**Во второй главе** описываются предложенные алгоритмы и модели. Представлены алгоритмы и модель вычислительных систем для детерминированного дискретно-событийного имитационного моделирования, использующие бинарные кучи для ускорения вычислений (один из алгоритмов дан на рис. 1). Создан алгоритм продления детерминированных логов для корректного детерминированного моделирования Грид-системы с учетом цикличности нагрузки в течение недели. Также описаны простые, позволяющие сберечь вычислительные ресурсы подходы определения параметров моделируемой системы, основанные на принципе действия формулы Литтла.

Представлен список стратегий распределения заданий, включающий как существующие стратегии (QueueWidth, QueueLen, QueueDif), так и предлагаемые (Rotate, FreeExec, QueueProd, MaxProd, EqualLoading, EqualQueueLen, EqualQueueWidth). Все стратегии, кроме Rotate, предполагают выбор кластера с наименьшей стоимостью исполнения задания. Узлы, которые не имеют достаточного количества машин для исполнения задания, получают оценку, равную бесконечности. При совпадении оценок будем выбирать кластер, раньше стоящий в списке кластеров Грид-системы. Предполагается, что для всякого задания существует хотя бы один кластер, способный обеспечить его ширину.

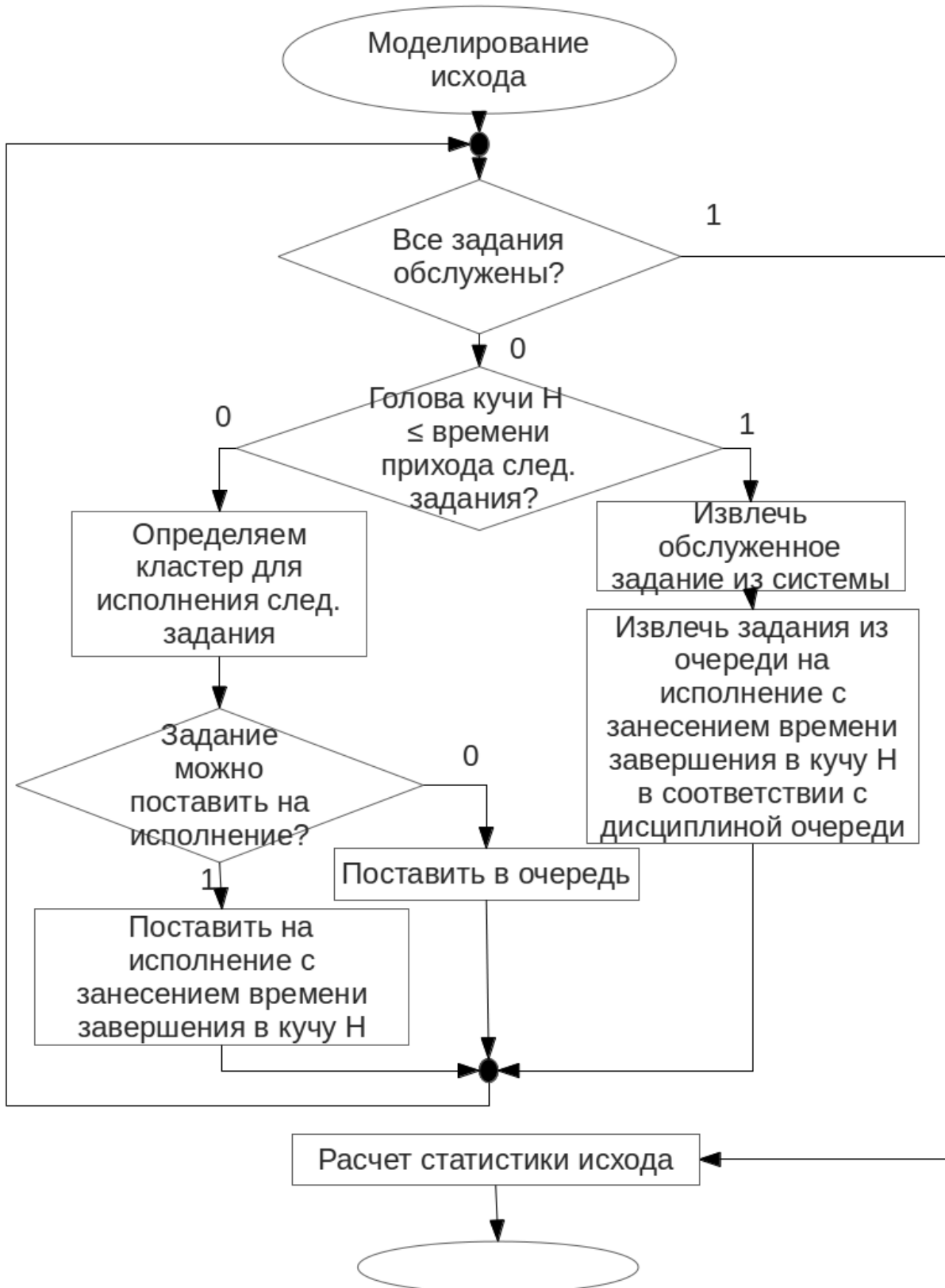


Рисунок 1 — Алгоритм функционирования дискретно-событийной модели при останове по завершению обслуживания нагрузки

Перечислим рассматриваемые эвристики:

1) Rotate. Список кластеров просматривается циклически, начиная со следующего за тем, который получил последнее задание. Если кластер не



обладает достаточным числом машин для исполнения задания, то он пропускается. Для первого задания список просматривается, начиная с первого кластера.

2) FreeExec:

$$Z = \frac{W}{N+W} \quad (1)$$

Эта предложенная нами оценка считает «более дорогим» более загруженный кластер. Используется при быстром выполнении заданий в отсутствие очереди.

3) QueueWidth:

$$Z = \frac{w_{зад} + \sum_j w_{задj}}{W} \quad (2)$$

4) QueueLen:

$$Z = \frac{1+Q}{W} \quad (3)$$

5) QueueDif:

$$Z = \frac{c_{зад} + \sum_j c_{задj}}{W} \quad (4)$$

6) QueueProd:

$$Z = \frac{c_{зад} + \sum_j c_{задj}}{W \cdot P} \quad (5)$$

7) MaxProd:

$$Z = (W \cdot P)^{-1} \quad (6)$$

8) EqualLoading:

$$Z = \sum_j c_{задj} \quad (7)$$

9) EqualQueueLen:

$$Z = Q \quad (8)$$

10) EqualQueueWidth:

$$Z = \sum_j w_{задj} \quad (9)$$

Обозначения:  $W$  - количество машин кластера,  $N$  - количество свободных машин кластера,  $w_{зад}$  - ширина задания, для которого определяется кластер,  $w_{задj}$  - ширина  $j$ -го задания в очереди кластера,  $Q$  - длина очереди кластера,  $c_{зад}$  - сложность задания, для которого выбирается исполнитель,  $c_{задj}$  - сложность  $j$ -го задания в очереди кластера,  $P$  - производительность узла,  $Z$  - стоимость исполнения задания на кластере.

Введем «одинадцатую стратегию» — «Self» — отсутствие стратегии, когда каждый кластер исполняет свои задания без обмена с другими.

Даны пять моделей стохастической аппроксимации нагрузки вычислительных систем (простая, многопоточная, нестационарная, многопоточно-нестационарная и нестационарно-многопоточная), которые

вводят зависимость между шириной и длиной задания. Для обозначения моделей используются модифицированные нами обозначения Кендалла.

Простая модель подразумевает введение рекуррентного потока Пальма для времен прихода заданий. Ширины заданий генерируются в момент прихода в соответствии с распределением вероятностей. Обозначается как  $A/B^n$ . Многопоточная модель подразумевает введение отдельного потока для заданий каждой ширины. Обозначается как  $A/B^n$ . Нестационарная модель использует введение нестационарного рекуррентного потока Пальма (наше собственное обобщение) для времен прихода заданий. Обозначается как  $\sim A/B^n$ . Многопоточно-нестационарная и нестационарно-многопоточная вводят отдельный нестационарный рекуррентный поток Пальма для заданий каждой ширины. Обозначается как  $\sim A/B^n$  и  $\sim A/B^n$ , соответственно. Отличия в том, что в первом случае для каждого потока рассчитывается своя интенсивность. Во втором случае интенсивность каждого потока рассчитывается как доля от интенсивности прихода всех заданий (доля равна вероятности прихода заданий определенной ширины). Во всех моделях для каждой ширины задания вводится свой собственный закон распределения длины заданий. В рамках данной работы законы для различных ширин будут различаться только параметрами.

Нестационарные рекуррентные потоки Пальма вводятся по формуле:

$$\int_{t_0}^t \lambda(t) dt = R^* \quad , \quad (10)$$

где  $R^*$  - неотрицательная случайная величина с единичным матожиданием,  $t_0$  - время прихода последнего задания (для первого задания — время начала моделирования),  $t$  - время прихода следующего задания.

Модели даются с сопутствующими законами распределения:  $M$  - экспоненциальное распределение,  $\Gamma$  - гамма-распределение,  $W$  - распределение Вейбулла,  $lN$  - логнормальное распределение,  $\Gamma W$  - гамма-вейбуллово распределение (название не является общепринятым),  $H(n)$  - гиперэкспоненциальное распределение с  $n$  ветками,  $H\Gamma(n)$  - гипер-гамма-распределение с  $n$  ветками,  $lA$  - логарифмическая кусочно-линейная аппроксимация. Для определения параметров (кроме  $lA$ ) используются метод моментов (ММ) для негиперраспределений и метод наибольшего, или максимального, правдоподобия (МНП) для всех распределений.

Описано преобразование детерминированной дискретно-событийной имитационной модели в стохастическую, в том числе способы генерации случайных величин.

**В третьей главе** производится описание программных разработок «DetBroker», «StochBroker» и «StochImiG»: даны требования, подходы к реализации, функциональные описания и архитектуры.

«DetBroker» моделирует работу кластерной системы или нескольких кластерных систем, объединенных в единую вычислительную систему (вариант Грид-системы). В качестве источников данных используются детерминированные списки заданий. Предусмотрена конвертация во входные

данные разработанной программы логов формата Standard Workload Format (SWF), которые представляют собой задокументированные нагрузки вычислительных систем, предоставленные в публичный доступ архивом Parallel Workloads Archive. Разработка велась на платформе Linux Mint 13 Maya (x64) с использованием компилятора GCC и прочих его утилит. Это избавляет нас от лицензионной зависимости, но теоретически разрешает перевод кода на платформу Windows с минимумом изменений (используя пакет MinGW).

Для ускорения вычисления использованы подходы к организации высокопроизводительных вычислений.

1) События погружены в бинарную кучу, что обеспечивает нам быструю выборку следующего события.

2) Все списки заданий кластеров поступают на моделирование в отсортированном по времени прибытия порядке и объединяются в один константный список. Сведение осуществляется алгоритмом `std::merge()`.

3) Использовалось распараллеливание вычислений с применением технологии OpenMP.

4) Использование профилирования и подбор ключей компиляции сократили время выполнения программы примерно на 20-30%.

Как таковая программа «StochBroker» не существует: существует набор надстроек над программой «DetBroker». Генерация нагрузки производится по одной из пяти моделей нагрузки.

«StochImiG» представляет собой существенно переработанную «GridModel», ранее использованную для проведения лабораторных работ на кафедре «ЭВМ и С» в рамках дисциплины «Вычислительные системы и сетевые технологии». Программа моделирует работу Грид-системы. В данном случае Грид-система представляется набором из нескольких кластерных систем, соединенных по сети и способных перераспределять нагрузку. Моделируются такие аспекты работы, как передача заданий и полученных расчетных данных по сети, отказы сетевых каналов и узлов кластерной системы, неполнота контроля при отказах, различные варианты резервирования аппаратуры. В качестве входных данных программа получает XML-файл.

**В четвертой главе** проведены валидация созданных программных средств, анализ работоспособности и эффективности программных разработок. Демонстрируется соответствие результатов, полученных на наших средствах, и результатов, полученных в том числе с помощью марковских и немарковских аналитических (табл. 1) моделей и сторонней разработки GridSim для кластера (табл. 2) и Грид-системы (табл. 3). Проверяется качество аппроксимации случайных величин, а также качество воссоздания нестационарности потока в течение рабочей недели при аппроксимации нагрузки и продлении лога.

**В пятой главе** приводятся примеры применения предложенных алгоритмов и средств, что включает в себя детерминированное и стохастическое моделирование, аппроксимацию стохастической нагрузки и использование стратегий.

Таблица 1 — Валидация аналитическими моделями (фрагменты)

$\rho$	$cov_\lambda$	$cov_\mu$	Модель	Средняя длина очереди		Среднее время пребывания задания в системе, $\times \mu^{-1}$	
				Разработка	Эталон	Разработка	Эталон
0,75	1	1	$M/M/128$	0,00314476	0,00339964	0,999761	1,00004
0,9375	1	1	$M/M/128$	5,36205	5,47428	1,04495	1,04562
0,96875	1	1	$M/M/128$	19,4308	19,4473	1,15716	1,15683
0,3	1	1	$M/M/1$	0,12880	0,12857	1,42880	1,42857
0,5	1	1	$M/M/1$	0,50130	0,50000	2,00296	2,00000
0,7	1	1	$M/M/1$	1,63036	1,63333	3,33038	3,33333
0,9	0	0	$D/D/1$	0	$\approx 0$	1	$\approx 1$
0,9	0	0,5	$D/E_4/1$	0,832048	$\approx 1,0125$	1,92462	$\approx 2,125$
0,9	0	1	$D/M/1$	3,76839	3,76079	5,18752	5,17866
0,9	0	2	$D/\Gamma/1$	15,8492	$\approx 16,2$	18,6107	$\approx 19$
0,9	0,5	1	$E_4/M/1$	4,83890	4,84474	6,37657	6,38305
0,9	1	0	$M/D/1$	4,06235	4,05	5,51221	5,5
0,9	1	0,5	$M/E_4/1$	5,05254	5,0625	6,61323	6,625
0,9	1	1	$M/M/1$	8,04713	8,10000	9,94385	10,00000
0,9	1	2	$M/\Gamma/1$	20,3454	20,25	23,6038	23,5
0,9	2	1	$\Gamma/M/1$	21,29620	21,13100	24,64590	24,47889

Таблица 2 — Сравнение результатов GridSim и DetBroker

	GridSim	GridSim*	DetBroker
Время прихода последнего задания, сек	254828	254828	254828
Время завершения выполнения всех заданий, сек	7465006	7465004	7464980
Средняя длина/ширина очереди	0,339306	0,339226	0,339592
Среднее число исполняемых задач/Среднее число занятых каналов	30,5052	30,5051	30,5052
Среднее число заданий в системе	30,8445	30,8443	30,8448
Средняя площадь очереди	56509	56497	56566
Среднее время ожидания, сек	2473,55	2472,97	2475,63
Среднее время исполнения, сек	222384	222383	222383
Среднее время в системе, сек	224858	224856	224859
Время выполнения имитации, сек	1	12	0,4

Таблица 3 — Результаты моделирования Грид-системы (фрагмент)

	Rotate (DetBroker)	Rotate (GridSim)	QueueLen (DetBroker)	QueueLen (GridSim)	MaxProd (DetBroker)	MaxProd (GridSim)
Длина лога, сек	254828	254828	254828	254828	254828	254828
Время завершения выполнения, сек	6802300	6802313	7582330	7574266	7898550	7898555
Средняя длина/ширина очереди	16,4545	16,455	3,60098	3,67948	20,6698	20,6694
Среднее число занятых каналов	19,0929	19,093	24,9143	25,70609	28,8307	28,8307
Среднее число заданий в системе	35,5475	35,548	28,5153	29,3856	49,5005	49,5001
Средняя площадь очереди	4064600	1577127	794077	791591	4786730	4786644
Среднее время ожидания, сек	109306	109308	26663,9	27216,2	159435	159432
Среднее время исполнения, сек	126832	126833	184481	190141	222383	222383
Средне время в системе, сек	236137	236141	211145	217358	381818	381816

Сначала демонстрируется функционирование детерминированных моделей кластерных (рис. 2) и Грид-систем (рис. 3-4). Затем показывается использование различных законов распределения на примере времени выполнения заданий из простой (все задания выполняются на одной машине) нагрузки из лога LPC EGEE.

Далее вводятся пять моделей нагрузки (табл. 4) для более сложного случая LANL CM5 (задания имеют ширины 32, 64, 128, 256, 512 или 1024 машины). С их помощью осуществляется переход от детерминированных к стохастическим моделям кластерных (рис. 2) и Грид-систем (рис. 3-4). Демонстрируется выигрыш (или проигрыш) от использования стратегий при различной нагруженности (рис. 5). В конце главы сформулированы инженерные методики по моделированию вычислительных кластерных и Грид-систем (рис. 6) и выбору стратегии распределения заданий (рис. 7).

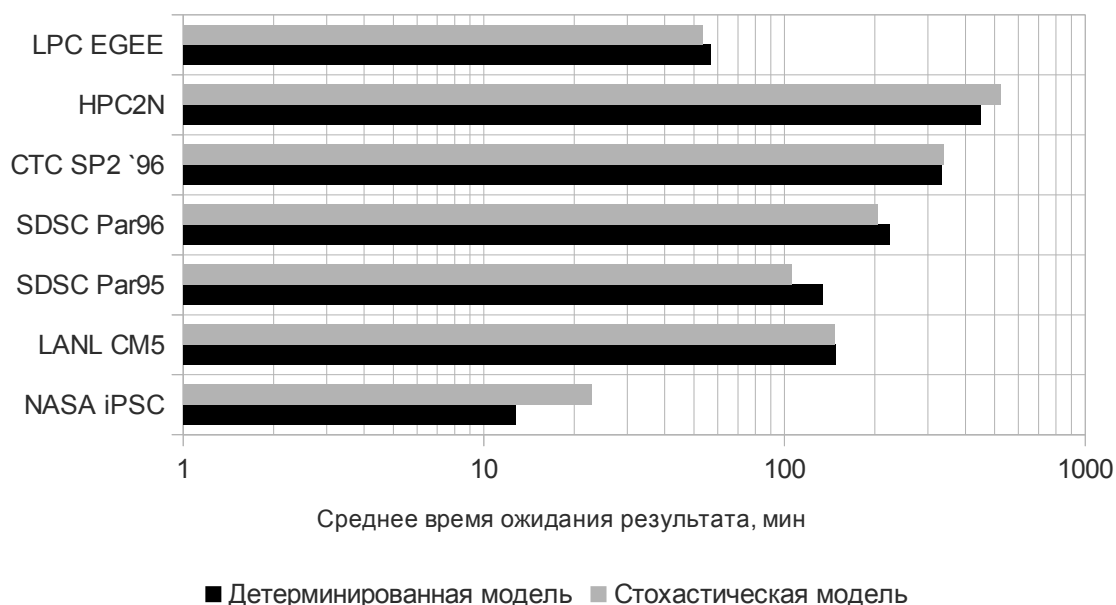


Рисунок 2 — Среднее время ожидания результата в кластерах

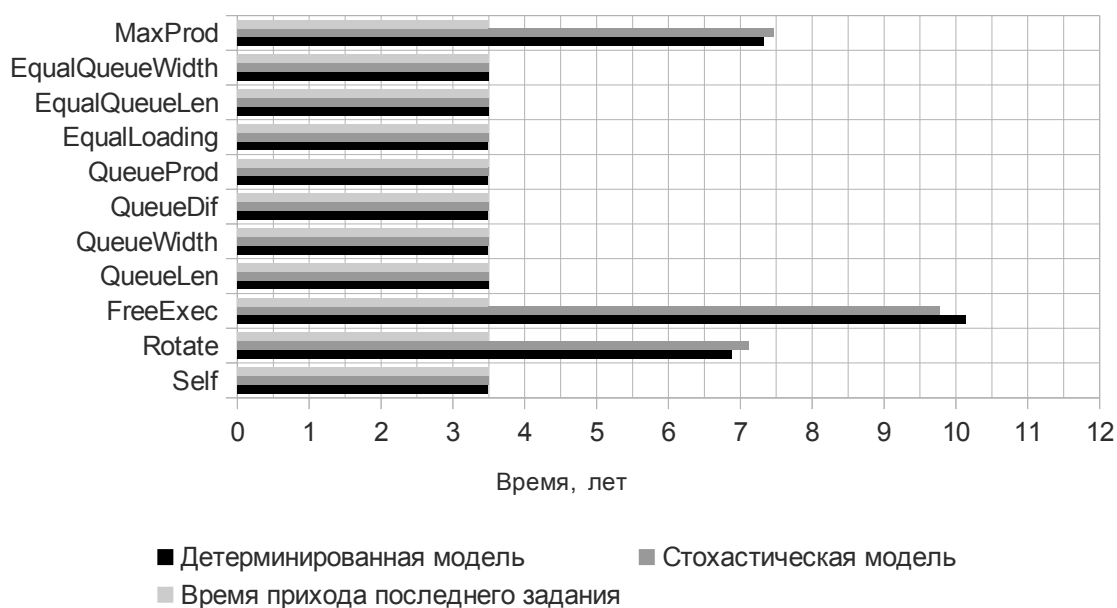


Рисунок 3 — Время выполнения пакета заданий в Грид-системе

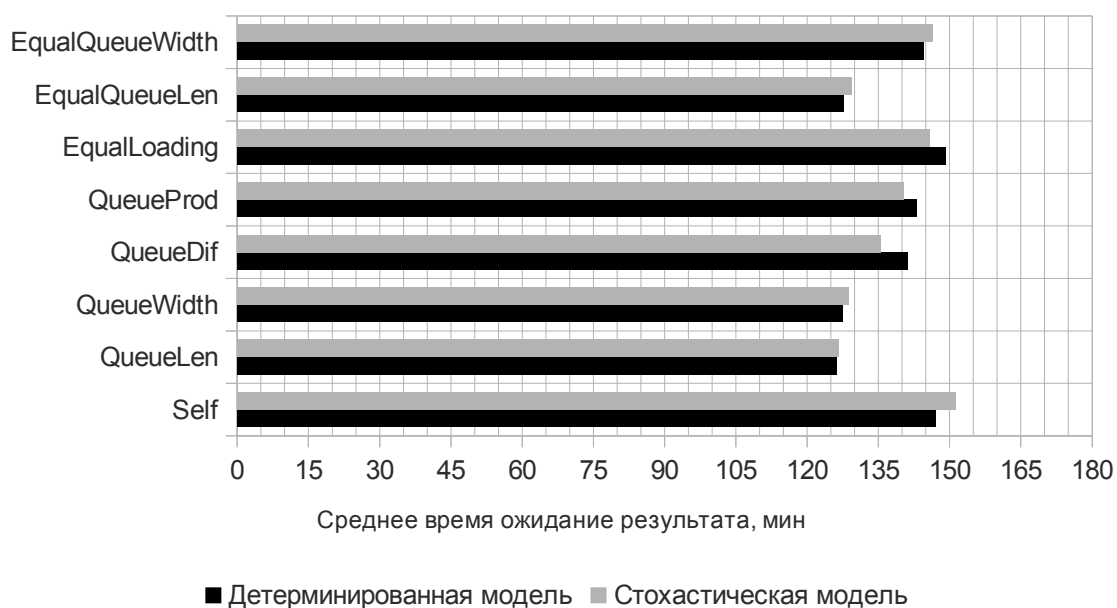


Рисунок 4 — Среднее время ожидания результата в Грид-системе

После этого описывается внедрение предложенных разработок. Разработанные средства могут быть применены при проектировании и модификации вычислительных Грид-систем для показателей обслуживания. Средства «DetBrocker» и «NetSys» были внедрены в учебный процесс кафедры «ЭВМиС». Средство «GridModel» активно использовалось при проведении лабораторных работ по курсу «Вычислительные системы и сетевые технологии» на кафедре «ЭВМиС» и было заменено на более продуктивное «StochImiG».

**В заключении** обобщаются основные теоретические и практические результаты, полученные в диссертационной работе, выделяются возможные направления дальнейших исследований.

Таблица 4 — Сравнение различных моделей для LANL CM5

	НГ/ \$НГ^/1024	\$НГ/ \$НГ^/1024	~НГ/ \$НГ^/1024	\$~НГ/ \$НГ^/1024	~\$НГ/ \$НГ^/1024	Детер. модель
Использование	0,742312	0,760039	0,743287	0,743577	0,743111	0,743525
Среднее время пребывания задания в системе, сек	5844,01	8957,71	9377,6	8455,26	10146,3	8876,86
Среднее время ожидания в очереди, сек	3263,03	6340,28	6796,97	5873,79	7564,95	6295,27
Среднее время обслуживания, сек	2580,98	2617,43	2580,63	2581,47	2581,37	2581,59
Среднее число используемых узлов	760,127	778,279	761,126	761,423	760,945	761,369
Среднее число заданий под обслуживанием	5,05155	5,12017	5,05768	5,0607	5,05747	5,05866
Среднее число заданий в системе	11,4404	17,5292	18,382	16,5777	19,8814	17,3944
Средняя длина очереди	6,38882	12,409	13,3244	11,517	14,8239	12,3357

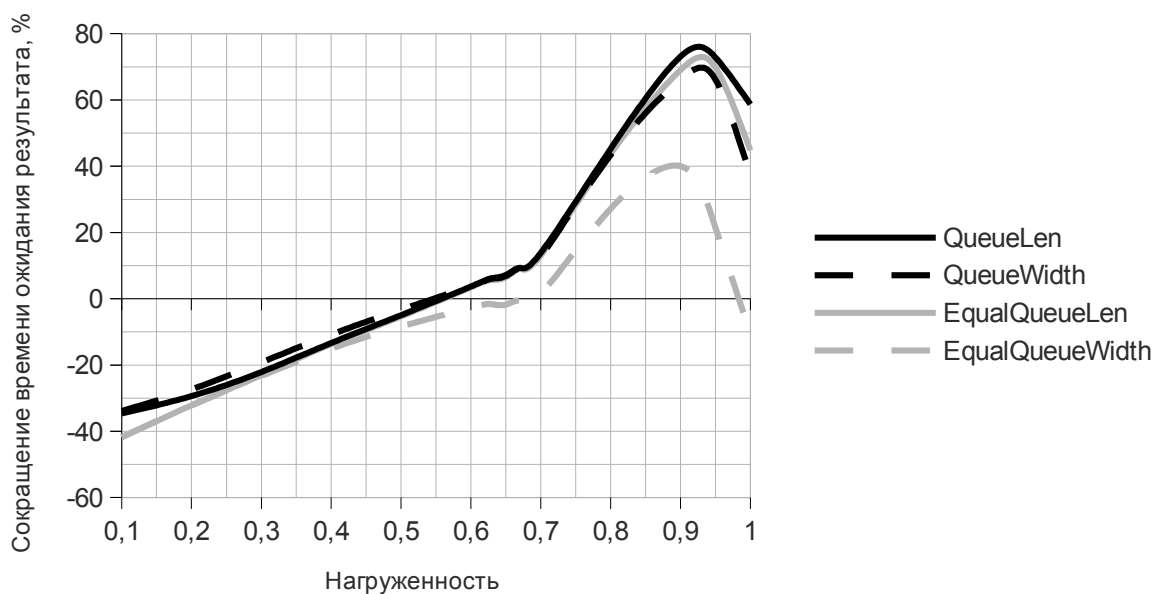


Рисунок 5 — Выигрыш от использования стратегий по сравнению с вариантом Self

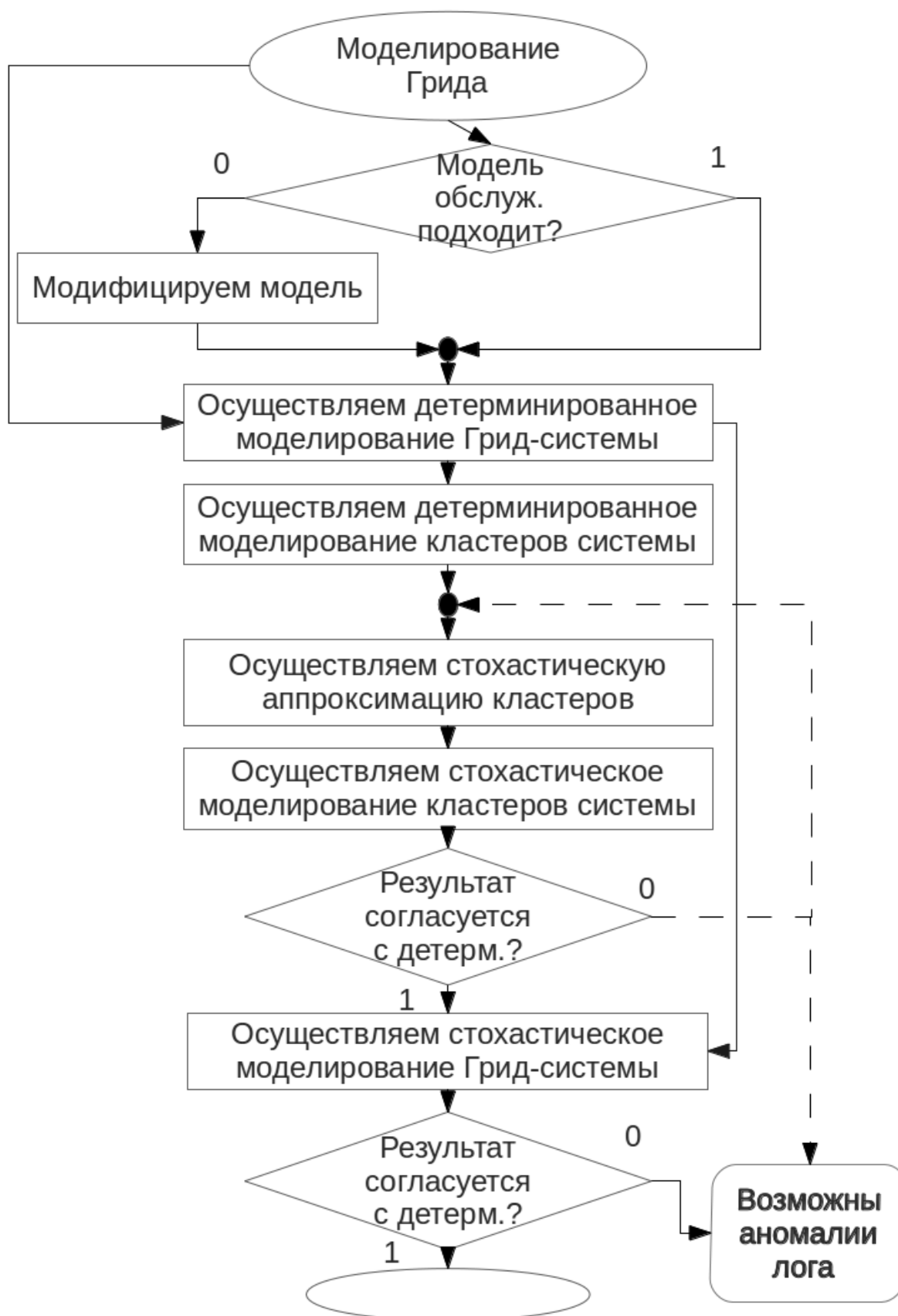


Рисунок 6 — Методика моделирования вычислительной Грид-системы (методика №2)



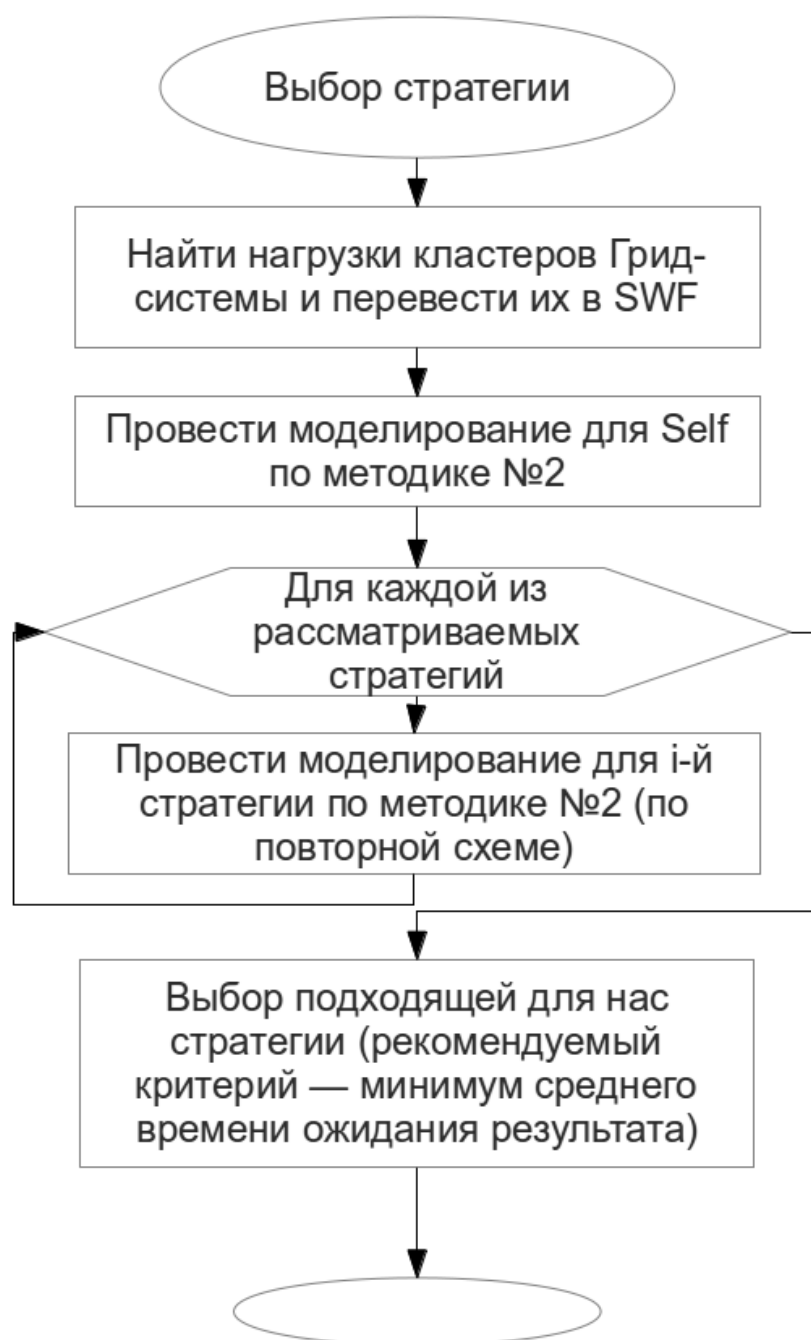


Рисунок 7 — Методика выбора стратегии для распределения заданий в Грид-системе (методика №3)

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Создан комплекс средств (алгоритмическое, программное, математическое и методическое обеспечение) для решения следующих задач: детерминированного и стохастического дискретно-событийного имитационного моделирования вычислительных и Грид-систем; средства аппроксимации стохастической нагрузки вычислительных систем; выбора стратегии распределения заданий внутри Грид-системы.

Полученные результаты можно сформулировать следующим образом:

1) Разработана детерминированная дискретно-событийная модель кластерной и Грид-системы, позволяющая оценивать качество управления и обработки информации в Грид-системе.

2) Сформирован набор стратегий распределения заданий в Грид-системе, учитывающих различные характеристики вычислительных систем и позволяющих повысить эффективность управления и принятия решений по распределению заданий в Грид-системе.

3) Разработаны универсальные модели стохастической аппроксимации и определены необходимые для них законы распределения случайных величин, позволяющие генерировать случайные нагрузки вычислительных систем для произвольной вычислительной системы (с учетом цикличности нагрузки и высокого коэффициента вариации).

4) На основе моделей стохастической аппроксимации детерминированная дискретно-событийная модель преобразована в стохастическую, что позволяет рассматривать более широкий набор различных комбинаций заданий.

5) Предложены программные реализации моделей: комплект “DetBrockер+StochBrockер” для осуществления детерминированного и стохастического моделирования (включая стохастическую аппроксимацию) и “StochImiG” для внедрения в учебный процесс.

6) Произведена валидация разработанных средств путем: сравнения полученных нами данных с предоставленным архивом нагрузок; сопоставления с аналитическим (марковским и немарковским) решением; имитации сторонних стохастических нагрузок; сопоставлением с альтернативным решением сторонними средствами.

7) Предложены инженерные методики моделирования работы кластерной и Грид-системы, что позволяет принять решение по выбору рациональной стратегии распределения заданий в Грид-системе.

8) Продемонстрировано повышение эффективности обработки информации в вычислительной Грид-системе за счет управления балансировкой нагрузки между кластерами.

В заключении также предлагаются возможные улучшения разработанных методов и средств, оставшиеся за рамками диссертации.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ**

### **Статьи в журналах, рекомендуемых ВАК**

1. Гаевой, С.В. Детерминированная имитационная модель кластеров грид-системы, обслуживающих задания / Гаевой С.В., Аль-Хадша Ф.А.Х., Лукьянов В.С. // Вестник компьютерных и информационных технологий. - 2014. - № 6. - С. 39-43.

2. Детерминированная имитационная модель кластеров грид-системы для сравнения эффективности использования эвристик распределения заданий / Гаевой С.В., Аль-Хадша Ф.А.Х., Фоменков С.А., Лукьянов В.С. // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. - 2014. - № 2. - С.

148-157.

3. Гаевой, С.В. Аппроксимация времени выполнения заданий на примере вычислительного кластера LPC EGEE 2004 / Гаевой С.В., Аль-Хадша Ф.А.Х., Фоменков С.А. // Известия ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 21 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2014. - № 12 (139). - С. 135-141.

4. Имитационная модель гетерогенной вычислительной системы / Лукьянов В.С., Жариков Д.Н., Гаевой С.В., Попов Д.С. // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 11 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2011. - № 9. - С. 85-88.

5. Сравнение эвристик распределения заданий в Грид-системе путем детерминированного имитационного моделирования / Гаевой С.В., Фоменков С.А., Аль-Хадша Ф.А.Х., Лукьянов В.С. // Известия ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 22 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2014. - № 25 (152). - С. 159-164.

6. Гаевой, С.В. Модели аппроксимации нагрузки кластера на примере LANL CM5 для стохастического имитационного моделирования / Гаевой С.В., Фоменков С.А. // Известия ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 22 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2014. - № 25 (152). - С. 151-158.

7. Лукьянов, В.С. Оценка показателей надёжности сетей / Лукьянов В.С., Гаевой С.В., Аль-Хадша Ф.А.Х. // Вестник компьютерных и информационных технологий. - 2013. - № 8. - С. 47-52.

#### **Статьи в журналах SCOPUS**

8. Аль-Хадша, Ф.А.Х. The coverage analysis of hierarchical networks with specified reliability indices / Аль-Хадша Ф.А.Х., Гаевой С.В., Лукьянов В.С. // International Review on Computers and Software (IRECOS). - 2013. - Vol. 8, No. 5. - С. 1199-1202.

#### **Свидетельства о регистрации программных систем**

9. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2010610693 от 20 янв. 2010 г. РФ, МПК (нет). Имитационная модель грид-системы (GridModel) / Лукьянов В.С., Жариков Д.Н., Гаевой С.В., Шафран Ю.В.; ВолгГТУ. - 2010.

10. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013614201 от 25 апреля 2013 г. РФ, МПК (нет). Имитационная модель для оценки влияния параметров надёжности и иных характеристик на производительность кластерной системы (SrvModel) / Гаевой С.В., Лукьянов В.С.; ВолгГТУ. - 2013.

11. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015610916 от 21 января 2015 г. РФ, МПК (нет). Детерминированная дискретно-событийная имитационная модель вычислительных кластерной и Грид-систем для оценки их производительности при различных нагрузках и различных стратегиях распреде-

ления заданий (DetBroker) / Гаевой С.В., Фоменков С.А.; ВолгГТУ. - 2015.

12. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015610935 от 21 января 2015 г. РФ, МПК (нет). Стохастическая дискретно-событийная имитационная модель вычислительной Грид-системы для оценки ее производительности при различных стратегиях распределения заданий (StochImiG) / Гаевой С.В., Фоменков С.А.; ВолгГТУ. - 2015.

### **Монографии**

13. Имитационное моделирование грид-систем : монография / Лукьянов В.С., Андреев А.Е., Жариков Д.Н., Островский А.А., Гаевой С.В.; ВолгГТУ. - Волгоград, 2012. - 215 с.

### **Статьи в журналах и сборниках**

14. Гаевой, С.В. Аппроксимация стохастических параметров вычислительного кластера на примере LANL CM5 / Гаевой С.В., Аль-Хадша Ф.А.Х. // Perspektywiczne opracowania sa nauka i technikami – 2013 : mater. IX miedzynarod. nauk.-prakt. konf., 7–15 listopada 2013 r. Vol. 33. Matematyka. – Przemysl, 2013. – S. 67–70.

15. Гаевой, С.В. Моделирование работы вычислительного кластера на примере LANL CM5 [Электронный ресурс] / Гаевой С.В., Аль-Хадша Ф.А.Х. // SCI-ARTICLE.RU : электронный периодический научный журнал. - 2013. - № 3 (ноябрь). - С. 304-313. - Режим доступа : [http://sci-article.ru/stat.php?i=modelirovanie\\_raboty\\_vychislitelnogo\\_klastera\\_na\\_primere\\_LANL\\_CM5](http://sci-article.ru/stat.php?i=modelirovanie_raboty_vychislitelnogo_klastera_na_primere_LANL_CM5).

16. Гаевой, С.В. Эвристики распределения заявок в Грид-системах (Grid) / Гаевой С.В., Аль-Хадша Ф.А.Х., Лукьянов В.С. // Perspektywiczne opracowania sa nauka i technikami – 2013 : mater. IX miedzynarod. nauk.-prakt. konf., 7–15 listopada 2013 r. Vol. 33. Matematyka. – Przemysl, 2013. – S. 63-66.

17. Аль-Хадша, Ф.А.Х. Assessment of the Network Reliability / Аль-Хадша Ф.А.Х., Гаевой С.В., Лукьянов В.С. // Communications in Control Science and Engineering (CCSE). - 2013. - Vol. 1, Issue 4, October. - С. 58-62.