

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Ляховца Дмитрия Сергеевича «Методы и средства имитационного моделирования систем управления заданиями для высокопроизводительных вычислений», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.5 – Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей

Актуальность темы исследования

Создание инфраструктуры и условий для проведения научных исследований и разработок, внедрения наукоемких технологий, отвечающих принципам организации научной, научно-технической и инновационной деятельности, на основе лучших российских и мировых практик является одной из важных задач, отмеченных в стратегии научно-технологического развития Российской Федерации. Суперкомпьютерные центры коллективного пользования (ЦКП) являются неотъемлемой частью такой (научной) инфраструктуры и служат важным целям, связанным в том числе с проектированием и созданием высокотехнологичной продукции.

Типичная суперкомпьютерная система предназначена на обработки случайных потоков пользовательских заданий на (чаще всего высокопроизводительных) вычислительных узлах (ВУ). Планирование заданий осуществляется с помощью специализированных алгоритмов, включающих схемы приоритезации заданий, пользователей и пользовательских групп, различные ограничения в расписании, настройки подсистем квот и резервирования ресурсов и пр. В частности, продолжающееся развитие технологий виртуализации и контейнеризации для выполнения заданий и увеличение объёмов входных данных, обрабатываемых заданиями, ставит перед исследователями новые вызовы по разработке эффективных приемов по снижению накладных расходов (связанных с инициализацией, завершением и т.п.). Если же обратиться к проблеме анализа функционирования и показателей производительности суперкомпьютерных систем (и их компонентов), то придется столкнуться со следующей ситуацией. Исследования характеристик современных математических моделей суперкомпьютерных систем аналитическими методами сопряжено с серьезными трудностями. И, пожалуй, центральным препятствием здесь является неотъемлемое свойство суперкомпьютерных систем, заключающееся в том, что ВУ могут простаивать при непустой очереди. Доминирующим методом анализа, по-прежнему, остается имитационное моделирование. В том числе и поэтому обоснование причин рассмотрения той или иной (имитационной) модели, т.е. ее адекватности, является важным вопросом.

Эти обстоятельства позволяют утверждать, что тема диссертационной работы Д.С. Ляховца является актуальной.

Характеристика работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем работы составляет 125 страниц, содержит 38 рисунков и 15 таблиц. Список литературы включает 122 источника, в том числе фундаментальные работы в области высокопроизводительных вычислений.

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи работы. Представлены основные положения, выносимые на защиту, раскрыта их научная новизна. Приведены сведения о теоретической и практической значимости результатов диссертации и их апробации.

В первой главе проведен анализ современного состояния задачи управления заданиями в высокопроизводительных вычислительных системах. Автор рассматривает существующих процесс обработки информации в суперкомпьютерных ЦКП. Предложена модель обработки заданий, и на её основе дано формальное определение показателей качества обработки заданий в системах управления заданиями (СУЗ). Рассмотрена проблема длительной инициализации вычислительных ресурсов, определены классы заданий с большими накладными расходами на обработку заданий (НРО). Рассмотрены существующие методы и средства формирования пакетов заданий и определены основные проблемы существующих решений. Описываются особенности разработанного метода имитационного моделирования и программного комплекса.

Вторая глава посвящена предложенному методу имитационного моделирования СУЗ. Рассмотрены и классифицированы некоторые из существующих методов и средств моделирования, их преимущества и недостатки. Приведены различные способы формирования входного потока заданий для имитационного моделирования. Рассмотрен вопрос оценки адекватности имитационной модели, способы её оценки и недостатки этих способов. Приводятся результаты выполненного автором эксперимента на действующем суперкомпьютере. В главе введен количественный показатель близости выходных потоков заданий, на нем основана оценка (которая далее дается автором) адекватности имитационных моделей и метод имитационного моделирования СУЗ. На численных примерах показано, что полученные результаты позволяют ранжировать модели (с точки зрения их адекватности реальной системе).

Третья глава посвящена модели суперкомпьютерной системы с поддержкой типов заданий. Здесь предложена методика формирования пакетов заданий по типам (ФПЗТ), которая включает пять последовательных этапов. Для каждого из этапов рассмотрены различные варианты реализации и

указан вариант, реализованный в программе, для которой получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Описывается разработанный программный комплекс имитационного моделирования (построен по модульному принципу, возможна интеграция с различными СУЗ без модификации их исходного кода).

Четвертая глава содержит результаты экспериментального исследования предложенных в третьей главе решений. Рассмотрен порядок формирования входных потоков для исследования. Автор проводит результаты серий экспериментов. Так в одной серии показано положительное (и практически значимое) влияние методики ФПЗТ на полезную загрузку. В другой – предпринята попытка определить границы применимости методики (минимальное значение НРО, при котором методика ФПЗТ оказывает положительное влияние на показатели качества обработки заданий). Например, установлено, что с ростом интенсивности входных потоков минимальное значение НРО уменьшается.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

Характеристика результатов

Необходимо отметить, что рассматриваемая в диссертации проблематика (в части близости характеристик аппроксимирующих моделей к реальным характеристикам) примыкает к характеристическим задачам в теории массового обслуживания (Золотарев В.М. Метрические расстояния в пространствах случайных величин и их распределений // Мат. сб., 1976. Т. 143. Вып. 101. С. 416–454; Калашников В. В., Рачев С. Т. Математические методы построения стохастических моделей обслуживания. М.: Наука, 1988. 311 с.). Автор не обращается к общим подходам. Избранные им приемы оправдываются проведенными сериями численных расчетов. Это представляется в достаточной степени оправданным, т.к. исследуемая система исключительно сложна.

Диссертация обладает признаками научной *новизны*:

- автором предложен оригинальный метод имитационного моделирования систем управления заданиями и показана его работоспособность в итеративном процессе настройки параметров;

- автором предложена оригинальная архитектура программного комплекса с возможностью интеграции с функционирующими СУЗ без модификации их исходного кода и (на основе механизма обратной связи) настройки параметров моделирования в соответствии с характеристиками входного потока заданий;

- автором разработана методика формирования пакетов заданий по типам, которая, в отличие от известных, использует «веса» очередей на основе приоритета, времени ожидания и целесообразности формирования пакета. Особо важно, что предложены границы применимости этой методики.

Работа отличается целостностью и логической построения.

Достоверность полученных результатов и выводов обеспечивается правильно подобранными методиками исследования, результатами проведённого имитационного моделирования на реальных и синтетических данных, а также согласованностью результатов диссертации с известными из научной литературы при рассмотрении частных случаев.

Основные результаты работы докладывались ведущих профильных научных конференциях. По теме диссертации в рецензируемых изданиях опубликовано 23 научные статьи, из них 11 статей опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, в том числе 4 работы в журналах из перечня ВАК и 7 работ в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus. Выносимые на защиту положения в достаточной мере обоснованы.

Разработанная автором и представленная в диссертации методика формирования пакетов заданий по типам реализована в виде программного комплекса, о чём получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Комплекс применяется в Отделении суперкомпьютерных систем и параллельных вычислений НИЦ «Курчатовский институт» при выполнении научно-исследовательских работ по программам фундаментальных научных исследований государственных академий наук. Внедрение комплекса позволило снизить накладные расходы на инициализацию заданий за счет применения методики формирования пакетов.

Замечания

По диссертации имеются следующие замечания:

1. судя по формуле (1) в жизненном цикле почему-то для задания выделено 2 этапа, а для ВУ один этап;

2. на стр. 23 неверно написано, что простой ВУ есть значение обратное загрузке ВУ;

3. не ясно, почему в сумме в (8) в числителе стоит q_i , а не $q_i + c_i$ (как в известном показателе slowdown);

4. на стр. 30 говорится, что методика ФПЗТ должна применяться для непрерывно поступающего потока заданий разных типов. Но далее в диссертации речь идет никак не о непрерывных потоках (а об обычных случайных потоках заданий).

5. При упоминании (в главе 2) известных аналитических приемов анализа моделей систем массового обслуживания автор слишком уж кратко остановился на отечественной школе теории массового обслуживания (не упомянув А.Я. Хинчина, Б.В. Гнеденко, Б.А. Севастьянова, Ю.В. Прохорова, Г.П. Башарина, Г.П. Климова, А.Д. Соловьева, В.В. Калашникова, И.Н. Коваленко, П.П. Бочарова, А.В. Печинкина, Л.Г. Афанасьеву, а также акад. РАН А.А. Боровкова, А.Н. Дудина, М.А. Федоткина, В.В. Рыкова,

В.М. Вишневого, А.В. Зорина, А.А. Назарова). Следовало также упомянуть об имеющемся заделе отечественной школы В.М. Золотарева и В.В. Калашникова по характеристическим задачам в теории массового обслуживания.

6. В разделе 2.4 (стр. 45) автор пишет, что можно использовать методы математической статистики (для исследования точности моделей). Но достаточно (для оппонента) подробно на этом не останавливается.

7. стр. 48 «... показатель (12) ... не зависит от длительности эксперимента». Это неверно. Он зависит и это видно из таблицы 2. Видимо автор имел в виду что-то другое.

Недостаточно прокомментирован избранный показатель близости P (формула (12)). Не сделан экскурс в научную литературу, не указано на связи с известными способами задания расстояний, используемых в анализе данных (среднее значение между всеми членами, расстояние между ближайшими, между самыми удаленными, между центроидами, расстояние Кларка, симметричное хи-квадрат расстояние и пр.). В частности, например, не упоминается (евклидово) среднее цензурированное расстояние на R^n , которое совпадает с P .

Кроме того, наличие такого материала несомненно облегчило бы новым читателям процесс погружения в диссертационное исследование.

Интересно было бы прочесть какие-то комментарии (которые без сомнений есть у автора после проведенной им обширной экспериментальной работы) относительно того, почему P чувствителен к разнице в планах запуска.

8. Показатель Z в (28) на стр. 86 назван средними накладными расходами на обработку. Однако, по сути, он им не является, а является отношением средних (среднего времени инициализации к среднему времени обработки). Не понятно, что автор хотел этим сказать.

Что до замечаний редакторского характера, то

- автор использует термин точность не в традиционном для теории измерений смысле (последнее формирует у читателя известные ожидания от численных экспериментов);

- на стр. 6 в предложении «Определим накладные расходы на обработку задания (НРО) как соотношение времени инициализации и обработки задания» неверно описан НРО (определенный далее в (1));

- по-видимому, есть опечатка в определении $m(t_i)$ на стр. 20;

- в (3), по-видимому, в интервал $(0, m_i)$ граничные значения должны быть включены;

- сомножитель u_i в (4) нигде не определен;

- в тексте встречаются запутывающие читателя фразы. Например, то тут, то там планирование заданий отождествляется с дисциплиной обслуживания заданий. Другой пример: на стр. 21 FIFO\FCFS почему-то названа автором

«обычной очередью». Оппонент предположил, что имеется ввиду очередь, с которой приходится сталкиваться обычно по жизни. Но дело в том, что по жизни приходится встречаться чаще всего со сложными очередями (кто-то уходит внезапно или возвращается, кто-то «лезет» вне очереди, кто-то стоит в очереди за другого человека, кто-то занимает очередь и за товарища и пр.). Поэтому FIFO\FCFS следовало назвать как следует, т.е. дисциплиной обслуживания «в порядке поступления»;

- на стр. 23 должно быть «... но неочевидные изменения значений показателей качества». Далее тут же «Расчет значений показателей»;

- стр. 25 «... задания от *момента* поступления»;

- почему-то в начале диссертации e_i обозначает планируемое время выполнения задания, а в конце e_i – это фактическое время обработки;

- заметны опечатки (например, стр. 17, 30, 31, 59).

К автореферату имеются те же замечания, что и к диссертации с точностью до замечаний к разделам и частям текста, которые в автореферат не вошли ввиду ограничения на объем автореферата. Есть замечания и редакторского характера:

1. Чтобы выражение в правой части (1) было заявленным средним, суммирование должно начинаться с единицы.

2. Объясняя то, что подразумевается под точностью моделирования в диссертации (стр. 13-14), автор говорит об интегральных показателях качества, и следом тут же называет их интервальными показателями качества.

3. Планы запуска на рис. 2 неотличимы (на глаз оппонента), хотя, вообще говоря, отличие ожидалось. Не ясно, что этим автор хотел сказать.

4. В (5) вместо P должно было быть написано $P(n)$ (зависимость не указана и в (4) и (6)).

5. При объяснении отличительной особенности методики ФПЗТ и, в частности, говоря о сложности алгоритма автор обращается к термину «О большое», способному здесь у читателя вызвать скорее вопросы, чем внести ясность.

Заключение

Отмеченные выше замечания не меняют общего положительного впечатления от диссертационной работы. Автореферат диссертации адекватно отражает ее содержание.

Диссертация Ляховца Д.С. является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение востребованной задачи разработки методов и средств имитационного моделирования систем управления заданиями для систем высокопроизводительных вычислений.

Считаю, что диссертация Ляховца Д.С. соответствует требованиям ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по

специальности 2.3.5 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей», а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по указанной специальности.

Разумчик Р.В.
«21» ноября 2025 г.

М.П.

Официальный оппонент: Разумчик Ростислав Валерьевич – доктор физико-математических наук (2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика), доцент, заместитель директора по научной работе Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук»

Сведения об организации: Федеральное государственное учреждение "Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление" Российской академии наук», 119333, Москва, Вавилова, д.44, кор.2, Телефон: +7 (499) 135-62-60, Адрес электронной почты: frccsc@frccsc.ru, Адрес в сети Интернет: <https://www.frccsc.ru>