

УТВЕРЖДАЮ

Директор
ИИМ им. М.В. Келдыша РАН
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН

М.В. Якобовский

20 ноября 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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

Развитие суперкомпьютерных технологий является одной из государственных задач, решение которой во многом обеспечивает технологический суверенитет Российской Федерации. Суперкомпьютеры позволяют существенно сократить сроки исследования и ускорить разработку новых опытных образцов при проведении фундаментальных и прикладных научных исследований в таких областях, как синтез лекарств, разработка новых материалов с заданными свойствами, прогнозирование месторождений полезных ископаемых, машинное обучение, анализ климатических изменений и других. В мировой практике суперкомпьютеры используются преимущественно в режиме коллективного пользования, при котором пользователи формируют входной поток заданий в виде запросов на выделение определенного объема вычислительных ресурсов на требуемое время.

Характеристики систем управления заданиями, такие как алгоритм планирования заданий и его настройки, способ резервирования ресурсов, приоритеты пользователей и др., непосредственным образом оказывают влияние на эффективность использования суперкомпьютерных ресурсов и определяют такие показатели, как загрузка вычислительной системы, среднее время пребывания задания в очереди, коэффициент замедления заданий и другие. На указанные показатели также существенно влияют характеристики входного потока заданий, такие как время поступления заданий в очередь, заказанное пользователем время обработки, заказанные вычислительные ресурсы и др. Исследование влияния указанных факторов на реальном дорогостоящем суперкомпьютере нецелесообразно, а аналитические модели позволяют исследовать, во-первых, сравнительно небольшие по числу узлов суперкомпьютерные системы, во-вторых, сосредотачивают внимание на определении интегральных показателей качества, таких как среднее время нахождения задания в очереди, средняя длина очереди и т.п. Как правило, аналитические модели не предоставляют механизма определения времени запуска отдельных заданий, и подобные исследования возможно провести за счет имитационного моделирования. Создание методов и средств такого моделирования представляет собой актуальную научно-техническую задачу, решению которой посвящена диссертация Д.С. Ляховца.

Характеристика работы

Представленная работа включает введение, четыре главы и заключение. Общий объем диссертации составляет 125 страниц машинописного текста, содержит 38 рисунков и 15 таблиц. Библиографический список состоит из 122 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования. Представлены основные положения, выносимые на защиту, раскрыта их научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также сведения об апробации.

При обосновании актуальности отмечено, что за обработку входного потока заданий в суперкомпьютерах отвечает система управления заданиями (СУЗ). Во время своего развития СУЗ эволюционировали в сложные

программные комплексы со множеством настраиваемых параметров. Нетривиальным является влияние этих параметров и характеристик входного потока заданий на показатели качества СУЗ. В индустрии представлены различные симуляторы СУЗ, но вопросы их валидации являются недостаточно проработанными. В частности, не решен вопрос количественного показателя для оценки точности имитационной модели. Соискателем сделан вывод об актуальности задачи создания и развития инструментов имитационного моделирования систем управления заданиями, в частности, разработки методов и средств имитационного моделирования с количественной оценкой точности различных имитационных моделей СУЗ.

Далее по тексту введено понятие типа заданий. Заданиями одного типа названы задания с одинаковой процедурой инициализации, к которой можно отнести действия по инициализации вычислителя или задания, который могут быть выполнены однократно для набора заданий. Примером такой инициализации могут выступать развёртывание виртуальных машин или контейнеров, перепрограммирования ПЛИС и др. Важной является задача снижения накладных расходов на инициализацию заданий за счёт группировки заданий одного типа с однократной инициализацией. Длительная процедура инициализации может отрицательно влиять на эффективность обработки заданий. Возможным решением может являться объединение однотипных заданий в пакет заданий с однократной инициализацией. Соискателем сделан вывод об актуальности задачи разработки методов и средств пакетирования заданий по типам для снижения накладных расходов на обработку заданий.

Первая глава. В разделе 1.1 представлены результаты анализа высокопроизводительных вычислительных систем коллективного пользования и использования систем управления заданиями. В разделе 1.2 на основе анализа автором сформирована модель обработки заданий, с её помощью в разделе 1.3 формально определены показатели качества обработки заданий в СУЗ. В разделе 1.4 представлены классы заданий с большими накладными расходами на обработку заданий (НРО) и рассмотрена проблема длительной инициализации вычислительных ресурсов для заданий этих классов. В разделе 1.5 представлены результаты аналитического обзора существующих методов формирования пакетов заданий, который выявил проблемы существующих

решений, а именно недостаточную проработку вопроса группировки заданий разных типов в пакеты для запуска на множестве вычислительных узлов. В разделе 1.6 сформулированы обоснованные требования к разрабатываемому методу имитационного моделирования (универсальность, количественная оценка адекватности, цикличность), а также требования к программному комплексу имитационного моделирования (модульность, адаптивность, интеграционная совместимость и др.).

Вторая глава. В разделе 2.1 рассмотрены существующие методы и средства имитационного моделирования, выделены их преимущества и недостатки. В разделе 2.2 приведены способы формирования входного потока заданий для имитационного моделирования. В разделе 2.3 рассмотрены существующие способы оценки точности имитационной модели и сформулированы недостатки этих способов. Представлены результаты эксперимента с реальным суперкомпьютером, из которого сделан вывод существенной трудности обеспечения полного воспроизведения натурального эксперимента. В разделе 2.4 представлен разработанный автором количественный показатель близости выходных потоков заданий, который позволяет сравнивать точность различных имитационных моделей. В разделе 2.5 на основе показателя близости предложен метод имитационного моделирования системы управления заданиями, удовлетворяющий сформулированным в разделе 1.6 требованиям. В разделе 2.6 представлены результаты имитационного моделирования 5 различных моделей заведомо разной точности, для которых показано, что разработанный метод позволяет адекватно ранжировать модели по степени соответствия реальной системе.

Третья глава. В разделе 3.1 рассмотрена частная модель системы обработки заданий с поддержкой типов. В разделе 3.2 представлена методика формирования пакетов заданий по типам (ФПЗТ), сформулированная на основе частной модели системы обработки заданий с поддержкой типов. Методика ФПЗТ включает пять последовательных этапов и характеризуется линейной вычислительной сложностью. Каждый из этапов может быть реализован различными способами, описанными автором. Для каждого из этапов указан вариант реализации, использованной в комплексе (получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ). В разделе 3.3 представлена

архитектура программного комплекса имитационного моделирования, удовлетворяющей требованиям из раздела 1.6. Архитектура программного комплекса обеспечивает интеграцию с различными СУЗ без модификации их исходного кода и позволяет реализовать адаптивность к входному потоку заданий за счет настройки параметров в автоматизированном режиме.

Четвертая глава. В разделе 4.1 представлены две сформированные группы по три входных потока в каждой, различающиеся однородностью и интенсивностью и описана методика проведения трех серий экспериментов. В разделе 4.2 представлены результаты первой серии экспериментов, в которых показано положительно влияние предлагаемой методики ФПЗТ на полезную загрузку вычислителя для различных значений НРО. В разделе 4.3 рассмотрены результаты второй серии экспериментов, в ходе которых эмпирически определены границы применимости методики в виде минимального значения НРО, при котором методика ФПЗТ оказывает положительное влияние на рассмотренные показатели качества обработки заданий. Методика применима уже с 3% НРО для высокоинтенсивного однородного входного потока. В разделе 4.4 приведены результаты третьей серии экспериментов по исследованию влияния настройки методики ФПЗТ (показателя масштабирования) на показатели качества СУЗ. На основе этой серии экспериментов в разделе 4.5 представлена разработанная методика подбора значения показателя масштабирования для реальной системы.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Новизна результатов исследования

Новыми являются следующие результаты работы:

1. Разработан метод имитационного моделирования систем управления заданиями, отличающийся от известных применением количественного показателя близости выходных потоков заданий для сравнительной оценки точности различных имитационных моделей и поддержкой итеративного процесса настройки параметров модели.
2. Разработана архитектура программного комплекса имитационного моделирования систем управления заданиями, обеспечивающая интеграцию с функционирующими СУЗ (включая СУППЗ) без модификации их исходного

кода и реализующая механизм обратной связи для адаптивной настройки параметров моделирования в соответствии с характеристиками входного потока заданий.

3. Разработана методика формирования пакетов заданий по типам, отличающаяся от аналогов использованием весов очередей на основе приоритета, времени ожидания и целесообразности формирования пакета, а также обеспечением очереди СУЗ нулевой длины в штатном режиме. Определены границы применимости методики в виде минимальных значений накладных расходов на обработку задания для входных потоков различной интенсивности и однородности.

Значимость работы

Практическая значимость. Разработанная автором методика ФПЗТ 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. Результаты работы использованы при совершенствовании систем управления задания в центрах коллективного пользования в МСЦ РАН – Отделении суперкомпьютерных систем и параллельных вычислений НИЦ «Курчатовский институт» при выполнении 7 научно-исследовательских работ по программам фундаментальных научных исследований государственных академий наук. Результаты работы могут быть применены для исследования и оптимизации СУЗ в суперкомпьютерных центрах коллективного пользования.

Достоверность и обоснованность результатов исследования

Автореферат диссертации адекватно отражает ее содержание. Структура работы логична и отражает решение поставленных задач. Терминология выдержана, отсутствуют двоякие толкования излагаемых тезисов. Аргументация автора убедительна и последовательна. Математический аппарат применяется корректно. Достоверность полученных результатов и выводов обеспечивается правильной постановкой методики моделирования и

результатами многочисленных экспериментов на реальных и синтетических данных, а также согласованностью результатов диссертации с известными из научной литературы. Основные результаты работы обсуждались на научных международных, всероссийских и региональных научных конференциях. По теме диссертации в рецензируемых изданиях опубликовано 23 научные статьи (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). Результаты и выводы диссертации в достаточной мере обоснованы.

Замечания по работе

По диссертации имеются следующие замечания.

1. В диссертации не рассмотрен вопрос применения методов машинного обучения и искусственного интеллекта для моделирования процессов управления заданиями.

2. Автором предполагается, что длительность d_i этапа завершения задания заранее известна, и накладные расходы этого этапа рассматриваются как постоянная часть общих накладных расходов на обработку задания. На практике часто завершение задания может представлять собой отдельную достаточно длительную процедуру, время выполнения которой зависит от объёмов выходных данных. Из текста диссертации не ясно, возможно ли адаптировать предложенную автором методику формирования пакетов заданий по типам для обработки заданий с неизвестным заранее временем завершения.

3. Предлагаемая методика формирования пакетов заданий по типам фактически осуществляет кластеризацию потока заданий по типам. В диссертации актуальные методы кластеризации только упомянуты на странице 78, но не рассмотрены подробно.

Заключение

Диссертация Ляховца Д.С. представляет собой завершённое научное исследование, в котором представлен комплекс новых научно обоснованных технических и технологических решений, внедрение которых вносит вклад в развитие суперкомпьютерных технологий как неотъемлемой части научной

инфраструктуры Российской Федерации. В диссертации излагаются результаты решения востребованной и важной задачи разработки методов и средств имитационного моделирования систем управления заданиями для высокопроизводительных вычислений.

Отмеченные выше замечания не меняют общего положительного впечатления о диссертационной работе.

Диссертация Ляховца Д.С. удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям 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 этой специальности.

Отзыв на диссертацию обсужден и одобрен на заседании Объединенного семинара отдела информационно-вычислительных систем и локальных сетей, отдела № 17 и суперкомпьютерного Центра коллективного пользования ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (протокол № _1_ от 13.11.2025 г.).

«20» ноября 2025 г.

Отзыв составил:

заместитель директора по научной работе

доктор физико-математических наук

(специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ),

старший научный сотрудник

Поляков Сергей Владимирович

Сведения об организации:

Федеральное государственное учреждение "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук".

125047, Москва, Миусская пл., д.4, ИПМ им. М.В.Келдыша РАН

Телефон: +7 499 978-13-14

Адрес электронной почты: office@keldysh.ru

Адрес в сети Интернет: <https://keldysh.ru/index.shtml>