

Киселев Иван Олегович – e-mail: kio.93@mail.ru; тел.: +78122974218; аспирант.

Антонов Кирилл Александрович – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики; e-mail: kirant9797@gmail.com; 197101, Санкт-Петербург, пр. Кронверкский, 49; тел.: +78122329704; кафедра компьютерных технологий; бакалавр.

Antonov Alexandr Petrovich – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; e-mail: alexander.antonov.ru@yandex.ru; 29, Politehnicheskaya street, Saint-Petersburg, Russia; phone: +78122974218; cand. of eng. sc.; associate professor.

Zaborovskij Vladimir Sergeevich – e-mail: vlad2tu@yandex.ru; phone: +78122971628; dr. of eng. sc.; professor.

Kiselev Ivan Olegovich – e-mail: kio.93@mail.ru; phone: +78122974218; postgraduate student.

Antonov Kirill Alexandrovich – ITMO University; e-mail: kirant9797@gmail.com; 49, Kronverksky Ave., St. Petersburg, 197101, Russia; phone: +78122329704; bachelor.

УДК 004.272.43

DOI 10.23683/2311-3103-2018-8-18-29

В.С. Горбунов, А.И. Тупицын

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАЗРАБОТКИ АРХИТЕКТУРЫ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Эффективное решение задачи перехода на новый уровень производительности и эффективности суперкомпьютерных установок сегодня невозможно без цифровой трансформации отрасли создания и применения высокопроизводительных вычислительных систем. Усложняет задачу то, что для суперкомпьютеров важны сроки выполнения проекта по созданию новой установки. Установившаяся практика показывает, что суперкомпьютер нужно создать в сроки 1, максимум 2 года. Решение таких задач в требуемые сроки невыполнимо без применения цифровых моделей изделий – высокопроизводительных вычислительных систем (суперкомпьютеров) и центров обработки данных на их основе. В работе предлагается концепция автоматизации процесса проектирования суперкомпьютеров, основанной на применении взаимосвязанного набора цифровых моделей на этапах жизненного цикла изделия: научных исследований и разработок (эскизного проектирования), технического проектирования, изготовления, эксплуатации изделия. Создавать цифровые модели вычислительной системы предлагается на основе цифровых моделей компонентов средств вычислительной техники, в процессе построения которых необходимо задействовать современные технологии искусственного интеллекта. Эти модели должны быть самообучающимися системами, которые используют информацию из целого ряда источников: производители ЭКБ, данные по мониторингу информационного пространства сети Интернет, сведения от специалистов-экспертов. Для обеспечения взаимодействия цифровых моделей на различных этапах жизненного цикла изделия предлагается применять аппарат онтологий. В работе описано использование цифровых моделей при генерации и выборе проектного решения суперкомпьютера и приведено описание практической реализации данного процесса проектирования в автоматизированной системе проектирования суперкомпьютеров (АСПС), созданной в ФГУП «НИИ «Квант». В части разработки архитектуры суперкомпьютера данная система позволяет сформировать различные варианты построения суперкомпьютера (проектные решения) с учетом онтологии будущего изделия и имеющейся информации об унифицированных конструктивных компонентах и оригинальных разработках. Для организации взаимодействия между участниками проектирования суперкомпьютера в АСПС реализован автоматизированный импорт описаний подпроцессов технологического процесса проектирования суперкомпьютеров в систему контроля и управления проектом (СКУП). В результате импорта в СКУП создаются задачи для каждого пользователя АСПС с перечислением набора действий, которые данному пользо-

вателю необходимо выполнить. Применение предложенного в настоящей статье подхода к созданию проблемно-ориентированных вычислительных устройств высокой производительности позволит ставить задачи построения в России проблемно-ориентированных суперкомпьютеров и устройств с использованием отечественной компонентной и микроэлектронной базы в требуемые сроки.

Высокопроизводительные вычислительные системы; проектирование суперкомпьютеров; цифровая модель; жизненный цикл изделия; технологические процессы.

V.S. Gorbunov, A.I. Tupitsyn

AUTOMATION OF HIGH PERFORMANCE COMPUTER SYSTEMS DESIGN PROCESS

Currently, effective solution of the task of transfer to a new level of productivity and effectiveness of supercomputers is impossible without digital transformation of the industry of creation and application of high performance computer systems. This task is complicated by the fact that for supercomputers the duration of implementation of the project of creation of a new device is important. The established practice suggests that it is necessary to create a supercomputer in one, maximum two years. Solving of such problems when required is impossible without application of digital models of the devices – high performance computer systems (supercomputers) and data centers on their base. In this paper, authors suggest a conception of automation of supercomputers design process. The automation is based on an application of interdependent set of digital models on supercomputer life cycle stages: scientific research and development (conceptual design), engineering design, manufacturing and use of the device. The authors suggest basing the creation of digital models of computation system on digital models of components of computing technics. During development of this «sub-models», it is necessary to apply contemporary technologies of artificial intelligence. These sub-models must be self-training systems, which use information from a set of data sources: manufacturers of the ECB, results of monitoring of the information space of the Internet, and information from experts. The authors suggest using ontologies to ensure coordination of digital models on different stages of the device lifecycle. The authors comprehensively describe application of digital models during generation and selection of supercomputer project solution and provide a description of a practical realization of the proposed automation of the design process in an Automatized System of Supercomputers Design (ASSD), developed at FSUE «RDI «Kvant». As far as designing supercomputer architecture, this system allows to produce different choices of supercomputer architecture (project solutions) taking into account the ontology of the future device and available information of unified construction components and original products. For the purpose of cooperation between participants of the supercomputer design process, in ASSD an automatized import of descriptions of sub processes of a technological process of supercomputers design process in a System of Project Control and Management (SPCM) is realized. As a result of this import, in SPCM necessary tasks for each participant of supercomputer design process are created. These tasks are formed with the enumeration of a set of activities, which these participants have to perform. The application of the proposed approach to creation of problem-oriented high performance computation devices will permit to offer the challenge to build in Russia problem-oriented supercomputers and devices with the application of native component and microelectronics base in the required timescale.

High performance computer systems; supercomputer design; digital model; product lifecycle; technological process.

Введение. Задача выбора архитектуры новой высокопроизводительной вычислительной системы (суперкомпьютера) – это почти всегда шаг в неизведанное. Решают эту непростую задачу, часто со многими неизвестными, и владельцы небольших вычислительных центров, и службы центров обработки данных (ЦОД), и научные центры. Сложность и непредсказуемость задачи усиливается при проектировании систем с предельно достижимой на текущий момент времени производительностью.

Для продвижения вперед нужно решить уравнение с множеством неизвестных: спрогнозировать потоки задач и актуальность (востребованность) новых численных методов и алгоритмов, оценить новейшую электронную и компонентную базу, определить устойчивость промышленных технологий и производств, выявить наиболее востребованные потребителями программные платформы, предсказать направление их развития и, в конце концов, разработать архитектуру и проект будущего суперкомпьютера [1].

Современный этап развития суперкомпьютерной техники в рассматриваемом контексте уникален, поскольку качественно и предельно быстро меняются требования по функциональности и назначениям суперкомпьютерных установок, суперкомпьютерных центров в целом. Происходит смена возможностей в области электронной компонентной базы и цифровых технологий.

Сегодня становится ясно, что достигнутый уровень сложности суперкомпьютерных установок не позволяет применять при проектировании, а в дальнейшем и при эксплуатации, только экстраполяцию существующих решений, используя полученные экспериментально (особенно на тестах) данные на системах прошлого поколения. Потребность в прогнозировании характеристик будущих суперкомпьютерных установок испытывают как создатели и финансисты, так и будущие потребители, для которых важно понять, каким образом необходимо перестраивать свои алгоритмы с тем, чтобы их программы исполнялись эффективно. Эффективное решение задачи перехода на новый уровень производительности и эффективности суперкомпьютерных установок сегодня невозможно без цифровой трансформации отрасли создания и применения высокопроизводительных вычислительных систем.

Проектирование и создание суперкомпьютеров является технически сложным уникальным процессом. Такие системы являются уникальными, в большинстве случаев создаются в единственном экземпляре. Устоявшиеся технологии цифровизации проектирования, характерные для серийной и мелкосерийной техники, при создании суперкомпьютеров пригодны не всегда.

Процессы разработки и изготовления образцов суперкомпьютеров чаще напоминают одноразовые мероприятия, которые в мире называются NRE – Non-Recurring Engineering [2]. Основным фактором, который выводит проектирование суперкомпьютеров в класс NRE-проектов, является быстрое моральное старение микроэлектронной базы. Так, применявшаяся для более ранних проектов элементная база, как правило, при создании нового суперкомпьютера уже не обеспечивает надлежащего выполнения поставленных задач [3].

Усложняет задачу то, что для суперкомпьютеров важны сроки выполнения проекта по созданию новой установки. Основная причина особого отношения к срокам проектирования заключается в тенденции экспоненциального роста вычислительных мощностей суперкомпьютеров, характеризующаяся коэффициентом роста производительности в пределах 1,6–1,8 раз ежегодно (см. статистику списка TOP500 [4]). Это означает, что немногим более чем за год вычислительная мощность суперкомпьютерной установки, можно сказать, «обесценивается» почти в 2 раза. Установившаяся практика показывает, что суперкомпьютер нужно создать в сроки 1, максимум 2 года.

Одним из способов ускорения проектирования, создания и ввода в эксплуатацию средств вычислительной техники является внедрение программ автоматизации поддержки жизненного цикла изделий, PLM-систем (product life cycle management) [5]. В настоящее время разработаны и применяются различные PLM системы, используемые для автоматизации серийного и мелкосерийного производства, однако проблема автоматизации разового производства в настоящее время не имеет комплексного практического решения.

В основе цифровой трансформации суперкомпьютерной отрасли необходимо комплексное рассмотрение и автоматизация процессов жизненного цикла (ЖЦ) продукции – разработки, проектирования, производства, поставки, эксплуатации и утилизации. Для успешного планирования разработок, производственной и эксплуатационной деятельности необходимо информационное взаимодействие автоматизированных систем между изготовителями и потребителями продукции. Такое взаимодействие невозможно без трансформируемых по назначению цифровых моделей изделий, в рассматриваемом случае высокопроизводительных вычислительных систем (суперкомпьютеров) и центров обработки данных на их основе.

Под цифровой моделью (ЦМ) в рассматриваемой нами области будем понимать программный аналог физического устройства, моделирующий в достаточной степени внутренние процессы, технические характеристики и поведение реального объекта в условиях выполнения им основных функций. В качестве основных функций для высокопроизводительных вычислительных систем понимается выполнение на нем прикладных программ, задач и алгоритмов. Сложностью разработки ЦМ, трансформирующейся на этапах ЖЦ, является то, что они должны поддерживаться и использоваться одновременно как разработчиками и изготовителями вычислительных установок, так и существующими и потенциальными их пользователями.

В настоящей работе предлагается концепция автоматизации процесса проектирования суперкомпьютеров, основанного на применении цифровых моделей, рассмотренная также в докладе [6].

1. Обзор зарубежных решений, применяемых для ускорения разработок высокопроизводительных вычислительных систем. В настоящее время вопросу ускорения разработок сложной вычислительной техники в условиях NRE проектирования уделяется большое внимание. Так, например, в Национальном управлении по ядерной безопасности (NNSA) выполняется проект CORAL-2 [7]. В рамках проекта планируется к 2022 и 2023 годам создать три суперкомпьютера с производительностью на уровне 10^{18} flops. Основная задача проекта заключается в многократном использовании разработок в проектах, которые реализуются разными научными центрами. В проекте CORAL-2 предполагается обеспечить ускорение разработки суперкомпьютера за счет организации эффективного взаимодействия между исполнителями, совместного использования научно-технических результатов, проведения общих разработок в смежных областях. Здесь формируются некоторые элементы стандартизации и унификации, применяемые на коротком промежутке времени.

В Центре по проблемно-ориентированным вычислениям (CDSC) Калифорнийского Университета в Лос-Анджелесе (UCLA) выполняются работы по созданию специализированных проблемно-ориентированных вычислителей [8]. Основное внимание в них уделяется проектированию вычислительных ядер заказных микросхем. Полученные на основе них микросхемы предполагается использовать при построении суперкомпьютеров (процессоры с фиксированными параметрами; процессоры с настраиваемыми параметрами, такими как размер файла регистров, размер кэша, рабочая частота и др.; программируемые процессоры со специализированным набором команд и сопроцессорами).

В Управлении перспективных исследовательских Министерства обороны одной из стран мира (DARPA) выполняется проект ERI (Electronics Resurgence Initiative) [9], направленный на разработку инновационных микросхем, их архитектур и технологий проектирования. Предполагается разработать относительно «универсальную» платформу для создания суперкомпьютеров. Эта платформа позволит быстро проектировать проблемно-ориентированные кристаллы с любыми комбинациями универсальных и графических процессоров, программируемых логических схем, специализированных ускорителей для глубокого обучения и пр.

2. Цифровые модели суперкомпьютеров на этапах жизненного цикла изделий. В общем случае этапы жизненного цикла (ЖЦ) изделия можно разделить на этапы замысла (концепции), проектирования, изготовления, эксплуатации [10]. Между этапами ЖЦ и действующими субъектами этих этапов (акторами) необходимо обеспечить эффективное информационное взаимодействие. Для решения части этих вопросов на основе многолетнего опыта разработки и эксплуатации сложных технических систем складывается концепция CALS-технологий. При этом концепция CALS недостаточно детализирует вопросы построения и применения сквозных цифровых моделей изделий (рис. 1).

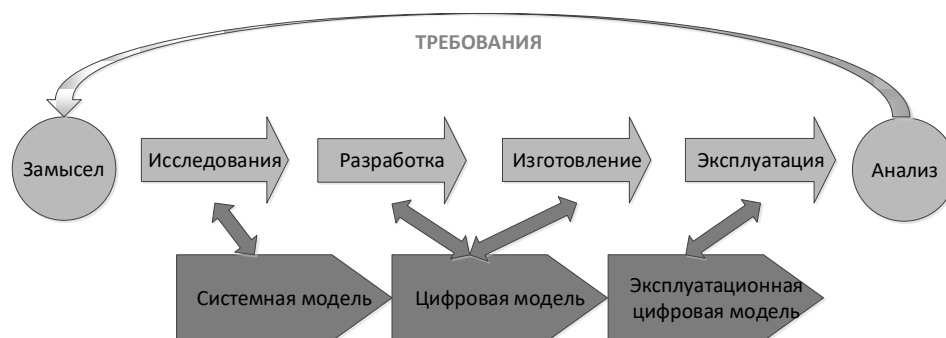


Рис. 1. Трансформация системной модели изделия

На начальном этапе научных исследований и разработок (эскизного проектирования) при помощи системной модели (СМ) можно создавать вариации построения высокопроизводительных систем. Здесь СМ используется для оценки показателей качества будущих изделий путем моделирования их функционирования при решении заданного класса или набора экземпляров вычислительных задач. В СМ на этих этапах ЖЦ необходимы модели будущего изделия, учитывающие только наиболее существенные свойства процесса вычислений и технических возможностей электронной компонентной базы (ЭКБ). На основе моделирования и анализа полученных результатов может быть выполнена оценка различных версий технических решений, которая должна приводить к окончательному выбору наиболее рационального проектного решения по архитектуре суперкомпьютера.

Далее на этапе технического проектирования, полученная на предыдущем этапе СМ должна дорабатываться и уточняться при помощи более точных системных моделей ЭКБ и компонентов. Полученная таким образом цифровая модель (ЦМ) изделия позволит учесть и оптимизировать взаимодействие всех компонентов разрабатываемой системы с учетом режимов работы устройства и класса решаемых задач. В ЦМ могут учитываться особенности изготовителя, пользователей и эксплуатирующей организации.

На этапе изготовления ЦМ преобразуется в более сложную цифровую модель (ЦМИ). ЦМИ изделия уже учитывает особенности технологии изготовления, обеспечивающую соблюдение заданных характеристик и особенностей функционирования, позволяет быстро выявить причины неисправностей в процессе тестирования.

При переходе к этапу эксплуатации изделия, формируется эксплуатационная цифровая модель (ЭЦМ), которая должна быть преобразована из СМ, ЦМ и ЦМИ изделия. Основными требованиями к ЭЦМ являются: простота функционирования (компактность), быстрая оценка времени решения задач, возможность моделирования и учета неисправностей. Целями создания ЭЦМ должно стать повышение эффективности использования пользователями вычислительной установки 7, ди-

агностика и прогнозирование неисправностей эксплуатационными службами, выявление новых потребностей потребителя. Важной функцией ЭЦМ является реализация обратной связи с разработчиком и изготовлением нового поколения изделия, обеспечивающего преодоление очередного рубежа производительности.

3. Проблема построения системной модели суперкомпьютера. Построение СМ суперкомпьютера и её экспериментальные исследования достаточно затруднены. Причина в характерной особенности развития суперкомпьютеров, которая заключается в увеличении их сложности. Действительно, процессорные ресурсы суперкомпьютера, память и коммуникационная сеть объединены в сложную иерархически организованную структуру, в которой при решении задач, конкурируя друг с другом, одновременно выполняется множество вычислительных процессов. В настоящее время количество таких процессов оценивается на уровне $10^6 - 10^7$. Для экзафлопсных суперкомпьютеров это множество будет более 10^9 , для следующего, зеттафлопсного уровня, оценки такого множества оцениваются на уровне 10^{12} [11–13].

Достигнутый уровень сложности не позволяет применять при предсказании производительности метод экстраполяции, используя полученные экспериментально (особенно на тестах) данные на системах меньшей сложности.

Возможный выход – создание комплексной системы моделирования свойств суперкомпьютерных установок, основанный на тех возможностях, которые предоставляет нам перспективная ЭКБ. Тренд на усиление специализации изделий вычислительной техники [14] с одной стороны генерирует большое количество возможностей со стороны доступной номенклатуры серийных изделий ЭКБ и компонентов, а также услуг производства, а с другой стороны сильно затрудняет выбор и оптимизацию проектного решения. Некоторые преимущества в будущем может дать комплексная цифровизация производства, экономики и общества, что, будем надеется, позволит строить СМ точнее за счет повышения объема и качества информации о перспективной микроэлектронной и компонентной базе.

Так или иначе, производители микроэлектронных устройств и компонентов будущих средств вычислительной техники, должны будут предоставить возможность потенциальным потребителям оценивать их изделия путем предоставления сведений от общей технической информации до цифровых моделей своей продукции. Разработчик проектного решения построения суперкомпьютера сможет оценивать новые возможности ЭКБ, как на экспериментальных установках и цифровых моделях [15, 16], так и путем получения новых знаний о прогнозных характеристиках, которые можно будет извлекать из анализа материалов экспертных сообществ.

Так как ЦМ компонентов средств вычислительной техники (СВТ) и их построение будет основано на множестве иногда противоречивых данных, то в этом процессе должны будут задействованы современные технологии искусственного интеллекта. Эти модели должны быть самообучающимися системами, которые используют информацию из целого ряда источников: производители ЭКБ, данные по мониторингу информационного пространства сети интернет, сведения от специалистов-экспертов.

На базе ЦМ компонентной базы суперкомпьютеров разработчики новых вычислительных систем смогут сформировать системную модель будущей установки, которая в свою очередь будет базироваться на совокупности разнотипных моделей, интеллектуальной системе анализа дынных с элементами предсказательных функций [17].

4. Использование цифровых моделей при выборе проектного решения. Проектирование суперкомпьютеров в цифровом аспекте должно опираться на формализованное описание изделия. В качестве такого формализованного описа-

ния часто используют аппарат онтологий [18]. Для различных типов установок конкретные онтологии изделий различны. На сегодня представляется, что такими типами онтологий гибридных суперкомпьютеров могли бы быть системы с применением графических ускорителей (GPGPU) или ускорителей нейроалгоритмов, ускорителей вычислений на программируемых интегральных схемах (ПЛИС или FPGA), специализированных ускорителей (ASIC). В ходе разработки суперкомпьютеров осуществляется выбор одной из этих онтологий, либо создание уникальной онтологии изделия (рис. 2).

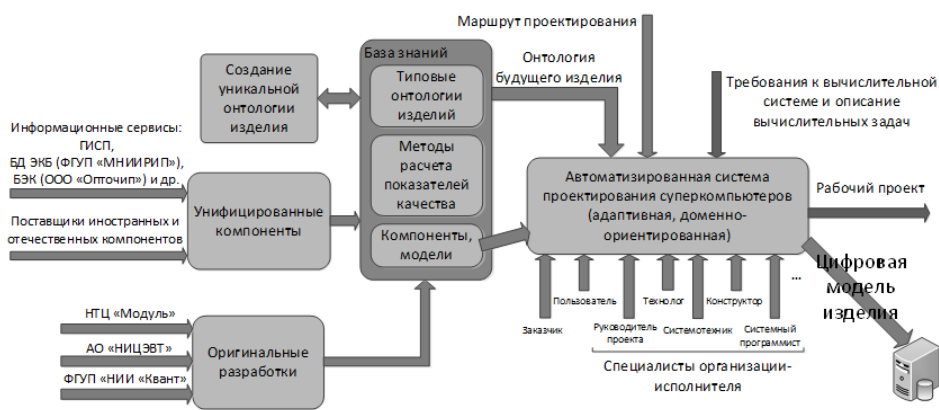


Рис. 2. Структура системы проектирования, ориентированная на новые возможности цифровой экономики

При создании нового суперкомпьютера разработчик всегда оценивает необходимое и достаточное сочетание стандартных компонентов с необходимостью выполнения оригинальных разработок. Получение такой информации уже сегодня может быть организовано в автоматическом режиме из внешних систем (сторонних изготовителей ЭКБ и компонентов вычислительной техники). На подготовительном шаге процесса разработки архитектуры суперкомпьютеров информация об унифицированных компонентах и оригинальных разработках заносится в базу знаний. В качестве внешних систем для унифицированных компонентов могут выступать различные информационные сервисы, в частности:

- ◆ государственная информационная система промышленности (ГИСП) [19];
- ◆ база данных ЭКБ (БД ЭКБ, поддерживается ФГУП «МНИИРИП») [20];
- ◆ библиотека электронных компонентов (БЭК, ООО «Опточип») [21] и др.

Информация об унифицированных компонентах также может поступать напрямую от поставщиков и производителей зарубежных и отечественных изделий СВТ.

Данные об оригинальных изделиях, применяемых при создании суперкомпьютеров, могут быть получены от организаций, выполняющих такие разработки. В частности, в области суперкомпьютеров такими организациями могли бы быть НТЦ «Модуль», АО «НИЦЭВТ», а также ФГУП «НИИ «Квант» и др.

Основой автоматизированной системы проектирования должны стать типовые маршруты проектирования и реализованные на их основе стандартные программные продукты управления разработками класса PLM. Важно отметить, что ключевым элементом этих программных продуктов должны стать ЦМ суперкомпьютеров, задачами которых являются:

- ◆ оценка показателей качества вариантов проектов изделия;

- ♦ оценка устойчивости производства и рисков неисполнения проекта на стадии изготовления;

- ♦ интеллектуальная поддержка выбора рационального проектного решения.

Результатом автоматизированной системы проектирования суперкомпьютера должна стать рабочая конструкторская документация и подготовленная на её основе контрактная составляющая на закупку покупных компонентов (смарт контракты).

5. Автоматизированная система проектирования суперкомпьютеров.

При разработке суперкомпьютеров первым и наиболее наукоемким технологическим процессом всего маршрута проектирования и создания суперкомпьютера является процесс разработки и оценки основных технических решений, принимаемых при его создании. Для автоматизации выполнения данного процесса в настоящей работе предлагается применять систему проектирования суперкомпьютеров (АСПС), созданную в ФГУП «НИИ Квант».

В части разработки архитектуры суперкомпьютера данная система позволяет сформировать различные варианты построения суперкомпьютера (проектные решения) с учетом онтологии будущего изделия и имеющейся информации об унифицированных конструктивных компонентах. В силу ряда ограничений на поставку современных микроэлектронных компонентов, а также задачи достижения конкурентоспособных характеристик, создание суперкомпьютера осуществляется с применением заказных микросхем. По этой причине при формировании различных вариантов построения суперкомпьютера учитываются особенности доступных или перспективных IP блоков отечественных разработчиков заказных микросхем, а также особенности и свойства задач, поступившие на вход технологического процесса и хранящиеся в онтологии будущего изделия.

Для целей верификации применимости будущего суперкомпьютера, которая должна решать конкретные задачи, в АСПС имеется развитая система моделирования, обеспечивающая оценку проектируемых систем. Участники проектирования, например, могут оценивать варианты построения перспективных заказных микросхем и системы в целом путем программного моделирования решения тестовых задач с расчетом временных характеристик их выполнения.

После формирования набора проектных решений АСПС позволяет автоматически рассчитать:

- ♦ характеристики сформированных проектных решений (производительность, энергопотребление, стоимость и др.);

- ♦ показатели качества проектных решений (например, стоимость и мощность единицы производительности и др.);

- ♦ время выполнения задач и оценку реальной эффективности проектных решений.

При выборе вариантов построения суперкомпьютера АСПС осуществляет поддержку принятия решений при помощи кластеризации вариантов его построения и применения методов многокритериальной оптимизации.

На выходе АСПС после выбора рационального проектного решения формируются материалы для разработки документации на изготовление суперкомпьютера.

АСПС разработана с применением клиент-серверной технологии. Серверная часть АСПС функционирует под управлением операционной системы семейства Linux. Доступ пользователей к возможностям АСПС осуществляется с помощью web-браузера, функционирующего под управлением операционной системы семейств Windows или Linux.

Для более эффективного применения в АСПС реализован автоматизированный импорт описаний подпроцессов процесса проектирования суперкомпьютеров в систему контроля и управления проектом (СКУП).

Описание подпроцессов выполняется в нотации BPMN (англ. Business Process Model and Notation, нотация и модель описания рабочих процессов), которая автоматически транслируется в описание на языке XML. С помощью разработанного программного обеспечения осуществляется импорт описаний подпроцессов в СКУП.

В результате импорта в СКУП создаются задачи для каждого пользователя АСПС с перечислением набора действий, которые данному пользователю необходимо выполнить. При этом в описании действия указывается гиперссылка для его выполнения.

Заключение. В условиях новых возможностей, которые предоставляет цифровая экономика, концептуальной базой обновления системы управления сложными разработками должна стать комплексная её цифровизация, объединяющая экономические и инженерные возможности. Должны возникнуть новые методологии организационно-экономического и технического развития высокотехнологичных процессов разработки, производства и эксплуатации. Для предприятий, производящих сложные наукоемкие изделия, в том числе объекты военного и двойного назначения, цифровизация управления в сочетании с возможностями цифровой экономики обеспечит внедрение новых технологий, что в свою очередь повысит эффективность производства и конкурентный уровень отечественной продукции с учетом международных стандартов качества.

При создании отечественных суперкомпьютеров важно обеспечить быстроту их создания. На сегодня это 1–2 года. Такие сроки разработки невозможно реализовать без автоматизации процессов разработки и создания проблемно-ориентированных вычислительных устройств высокой производительности. В рамках новой технологии должны решаться вопросы цифрового системного моделирования вариантов построения вычислителей, оптимизации их архитектуры под особенности алгоритмов вычислительных приложений, адаптации вычислительных методов под возможности существующих микроэлектронных компонентов и производств. Проектирование должно вестись с оптимизацией состава серийных (COTS¹) компонентов и заказных технологий, опираясь как на возможности иностранных поставщиков серийных изделий, так и на отечественных разработчиков специальной, мелкосерийной и массовой ЭКБ.

На сегодня в российских организациях накоплен значительный опыт и сформирован потенциал в разработках, поставках и применениях передовой ЭКБ. Это позволяет ставить задачи построения в России проблемно-ориентированных суперкомпьютеров и устройств с использованием отечественной компонентной и микроэлектронной базы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горбунов В.С., Елизаров Г.С., Корнеев В.В., Лацис А.О. Футурология суперкомпьютеров // Суперкомпьютеры. – 2014. – № 1 (17). – С. 24-28.
2. Non-Recurring Engineering. – Режим доступа: <https://pragmaticmarketing.com/resources/articles/non-recurring-engineering> (дата обращения: 31.10.2018).
3. Горбунов В.С., Эйсымонт Л.К. Инновационные суперкомпьютерные технологии и проблемы создания отечественной перспективной элементной базы // 5-й Московский суперкомпьютерный форум (МСКФ-2014) 21 октября 2014 года. – М.: Открытые системы, 2014. – С. 7-8.

¹ Commercial Off-The-Shelf – «готовые к использованию»

4. TOP500 Supercomputers Site. – Режим доступа: <https://www.top500.org> (дата обращения: 31.10.2018).
5. *Gecevska, V., Anisic Z., Lombardi F., Cus F.* Product lifecycle management through innovative and competitive business environment // Journal of Industrial Engineering and Management. – 2010. – Vol. 3, No. 2. – P. 323-336.
6. *Андрюшин Д.В., Биконов Д.В., Горбунов В.С., Тупицын А.И. [и др.]* Автоматизация разработки архитектуры высокопроизводительных вычислительных систем // Материалы 5-й Всероссийской научно-технической конференции «Суперкомпьютерные технологии» (СКТ-2018), Том 1, 17–22 сентября 2018 г. Дивноморское, Геленджик. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2018. – С. 23-26.
7. CORAL-2 RFP. – Режим доступа: <http://procurement.ornl.gov/rfp/CORAL2> (дата обращения: 31.10.2018).
8. *Cong J., Reinman G., Bui A., Sarkar V.* Customizable Domain-Specific Computing // IEEE Design & Test of Computers. – March-April 2011. – Vol. 28. – Issue 2. – P. 6-14.
9. DARPA Electronics Resurgence Initiative. – Режим доступа: <https://www.darpa.mil/work-with-us/electronics-resurgence-initiative> (дата обращения: 31.10.2018).
10. ГОСТ Р 57193-2016 Системная и программная и инженерия. Процессы жизненного цикла систем (ISO/IEC/IEEE 15288:2015, NEQ).
11. *Горбунов В.С., Елизаров Г.С., Эйсымонт Л.К.* Проекты экзафлопсных суперкомпьютеров за рубежом и в России, ограничения и перспективы роста // 4-й Московский суперкомпьютерный форум (МСКФ-2013) 23 октября 2013 года. – М.: Открытые системы, 2013. – С. 3.
12. *Горбунов В.С.* НРС Оценить, измерить, оптимизировать // Суперкомпьютеры. – 2013. – № 3 (15). – С. 46-51.
13. The Technology Lane on the Road to a Zettaflops // SC'06. – April 24, 2006. – 13 p.
14. *Левин В.К., Горбунов В.С., Елизаров Г.С.* Современные высокопроизводительные вычислительные системы // Материалы 4-й Всероссийской научно-технической конференции «Суперкомпьютерные технологии» (СКТ-2016). Т. 1. 19-24 сентября 2016 г. Дивноморское, Геленджик. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2016. – С. 58-59.
15. *Елизаров Г.С., Горбунов В.С., Малахов И.Н., Титов А.Г.* Компоненты высокопроизводительных реконфигурируемых суперкомпьютеров на основе ПЛИС Xilinx Ultrascale // Материалы 4-й Всероссийской научно-технической конференции «Суперкомпьютерные технологии» (СКТ-2016). Т. 2. 19-24 сентября 2016 г. Дивноморское, Геленджик. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2016. – С. 21-25.
16. *Елизаров Г.С., Горбунов В.С., Титов А.Г.* Аппаратно-программная платформа моделирующей гетерогенной ВС (МГВС) // Материалы Третьего Национального Суперкомпьютерного Форума (НСКФ-2014), Россия, Переславль-Залесский, ИПС им. А.К. Айламызяна РАН, 25-27 ноября 2014 года. – Переславль-Залесский, 2014. – 16 с.
17. *Горбунов В.С.* Специализация как процесс достижения результативности использования суперкомпьютеров // Научный сервис в сети Интернет: многообразие суперкомпьютерных миров: Труды Международной суперкомпьютерной конференции. Российская академия наук. – М.: Российская академия наук. Суперкомпьютерный консорциум университетов России, 2014. – С. 344-348.
18. *Natalya F. Noy and Deborah L. McGuinness.* Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology // Stanford Knowledge Systems Laboratory Technical Report KSL-01-05 and Stanford Medical Informatics Technical Report SMI-2001-0880. – March 2001.
19. Государственная информационная система промышленности. – Режим доступа: <http://gispi.gov.ru> (дата обращения: 31.10.2018).
20. База данных электронной компонентной базы. – Режим доступа: <http://ekb.mniiirp.ru> (дата обращения: 31.10.2018).
21. Библиотека электронных компонентов. – Режим доступа: <https://optochip.org> (дата обращения: 31.10.2018).

REFERENCES

1. *Gorbunov V.S., Elizarov G.C., Korneev V.V., Latsis A.O.* Futurologiya superkomp'yutеров [Futurology supercomputers], *Superkomp'yutery* [Supercomputers], 2014, No. 1 (17), pp. 24-28.
2. Non-Recurring Engineering. Available at: <https://pragmaticmarketing.com/resources/articles/non-recurring-engineering> (Accessed 31 October 2018).

3. Gorbunov V.S., Eisyomont L.K. Innovatsionnye supercomputernye tehnologii i problemy sozdaniya otechestvennon perspektivnoi elementnoi bazy [Innovative supercomputer technologies and problems of implementation of national prospective element base], *5-yi Moskovskii supercomputernyi forum* [5th Moscow supercomputer forum] (MSCF-2014) 21 October 2014. Moscow: Otkrytye sistemy, 2014, pp. 7-8.
4. TOP500 Supercomputers Site. Available at: <https://www.top500.org> (accessed 31 October 2018).
5. Gecevska, V., Anisic Z., Lombardi F., Cus F. Product lifecycle management through innovative and competitive business environment, *Journal of Industrial Engineering and Management*, 2010, Vol. 3, No. 2, pp. 323-336.
6. Andriushin D.V., Bikonov D.V., Gorbunov V.S., Tupitsyn A.I., et al. Avtomatizatsiya razrabotki arkhitektury vysokoproizvoditelnykh vychislitelnykh system [Automation of architecture design of high-performance computer systems], *Materialy 5-yi Vserossiiskoy naychno-tehnicheskoi konferentsii «Supercomputernye tehnologii»* [Proceedings of the 5th All-Russia scientific and technological conference «Supercomputer technologies»] (SKT-2018), Vol. 1, 17–22 September 2018, Divnomorskoe, Gelendzhik. Rostov-on-Don: Izdatelstvo Yuznogo federalnogo universiteta, 2018, pp. 23-26.
7. CORAL-2 RFP. Available at: <http://procurement.onl.gov/rfp/CORAL2> (accessed 31 October 2018).
8. Cong J., Reinman G., Bui A., Sarkar V. Customizable Domain-Specific Computing, *IEEE Design & Test of Computers*, March-April 2011, Vol. 28, Issue 2, pp. 6-14.
9. DARPA Electronics Resurgence Initiative. Available at: <https://www.darpa.mil/work-with-us/electronics-resurgence-initiative> (accessed 31 October 2018).
10. GOST R 57193-2016 Systemnaya i programmaya inzheneriya. Processy zhiznennogo tsikla sistem [Systems and software engineering. System life cycle processes] (ISO/IEC/IEEE 15288:2015, NEQ).
11. Gorbunov V.S., Elizarov G.S., Eisyomont L.K. Proekty exaflopnykh supercomputerov za rubezhom i v Rossii, ogranicheniya i perspektivy rosta [Projects of exaflop supercomputers, limitations and growth potential], *4-yy Moskovskii supercomputernyi forum* [4th Moscow supercomputer forum] (MSCF-2013) 23 October 2013. Moscow: Otkrytye sistemy, 2013, pp. 3.
12. Gorbunov V.S. HPC Otsenit', izmerit', optimizirovat' [HPC Estimate, Measure, Optimize], *Superkomp'yutery* [Supercomputers], 2013, No. 3 (15), pp. 46-51.
13. The Technology Lane on the Road to a Zettaflops, *SC'06*, April 24, 2006, 13 p.
14. Levin V.K., Gorbunov V.S., Elizarov G.S. Sovremennye vysokoproizvoditel'nye vychislitel'nye sistemy [Contemporary high performance computational systems], *Materialy 4-oi Vserossiiskoi naychno-tehnicheskoi konferentsii «Supercomputernye tehnologii»* [Proceedings of the 4th All-Russia scientific and technological conference «Supercomputer technologies»] (SKT-2016). Vol. 1, 19-24 September 2016, Divnomorskoe, Gelendzhik. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2016, pp. 58-59.
15. Elizarov G.S., Gorbunov V.S., Malakhov I.N., Titiov A.G. Komponenty vysokoproizvoditel'nykh rekonfiguriruemyykh supercomputerov na osnove PLIS Xilinx Ultrascale [Components of high performance reconfigurable supercomputers based on FPGA Xilinx Ultrascale], *Materialy 4-oi Vserossiiskoy naychno-tehnicheskoy konferentsii «Supercomputernye tehnologii»* [Proceedings of 4th All-Russia scientific and technological conference «Supercomputer technologies»] (SKT-2016). Vol. 2. 19-24 September 2016, Divnomorskoe, Gelendzhik. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2016, pp. 21-25.
16. Elizarov G.S., Gorbunov V.S., Malakhov I.N., Titiov A.G. Apparavno-programmaya platforma modeliruyushchei geterogennoi VS (MGVS) [Hardware/software platform for modeling of heterogeneous CS (MHCS)], *Materialy Tret'ego Natsional'nogo Supercomp'uternogo Foruma* [Proceedings of the 3rd National Supercomputer Forum] (NSKF-2014), Russia, Pereslavl-Zalesskii, IPS im. A.K. Ailamaziana RAN, 25-27 November 2014, 16 pp.
17. Gorbunov V.S. Spetsializatsiya kak process dostizhenia resul'tativnosti ispol'zovaniya supercomputerov [Specialization as a process of achievement of computer usage effectiveness], Nauchnyy servis v seti Internet: mnogoobrazie supercomputernykh mirov. Trudy Mezhdunarodnoy supercomputernoy konferentsii [Scientific service in the Internet: variety of supercomputer worlds. Proceedings of International supercomputer conference]. Moscow: Rossiiskaya academia nayk. Supercomputernii konsortsium universitetov Rossii, 2014, pp. 344-348.

18. Natalya F. Noy and Deborah L. McGuinness. Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology, *Stanford Knowledge Systems Laboratory Technical Report KSL-01-05 and Stanford Medical Informatics Technical Report SMI-2001-0880*, March 2001.
19. Gosudarstvennaya informatsionnaya sistema promyshlennosti [State industry information system]. Available at: <http://gisp.gov.ru> (accessed 31 October 2018).
20. Baza dannykh elektronnoy komponentnoy bazy [Electronic components database]. Available at: <http://ekb.mniirip.ru> (accessed 31 October 2018).
21. Biblioteka elektronnykh komponentov [Library of electronic components]. Available at: <https://optochip.org> (accessed 31 October 2018).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.Е. Тарасов.

Горбунов Виктор Станиславович – Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт «Квант»; e-mail: gorbunov@rdi-kvant.ru; 125438, г. Москва, 4-ый Лихачевский пер., 15; тел.: +74991531667; к.т.н.; доцент; зам. директора по научной работе.

Тупицын Антон Игоревич – e-mail: atupitsin@rdi-kvant.ru; тел.: +74997457121; зам. начальника отдела.

Gorbunov Victor Stanislavovich – Federal State Unitary Enterprise «Research and Development Institute «Kvant»; e-mail: gorbunov@rdi-kvant.ru; 15, 4-th Likhachevskii lane, Moscow, 125438, Russia; phone: +74991531667; cand. of eng. sc.; associate professor; deputy director for scientific work.

Tupitsyn Anton Igorevich – e-mail: atupitsin@rdi-kvant.ru; phone: +74997457121; deputy head of division.

УДК 681.3+004.32

DOI 10.23683/2311-3103-2018-8-29-38

Е.А. Титенко, А.В. Крипачев, А.Л. Марухленко

КОММУТАЦИОННАЯ СХЕМА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПАРНЫХ ПЕРЕСТАНОВОК ДЛЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРОДУКЦИОННОГО УСТРОЙСТВА

Достигается цель - сокращение временных затрат на генерацию сочетаний элементов множества. Элементы множества формируются из образцов (левых частей) продукционных правил. Основная задача заключается в построении эффективных по времени схем (алгоритмов) параллельной генерации сочетаний элементов массива. Применительно к продукционным системам такие схемы необходимы для активации подмножества продукции, применимых к символьным данным на текущем шаге. За основу взяты и развит известный алгоритм параллельного пузырька. Схема коммутации «параллельный пузырек» состоит из двух чередующихся вариантов коммутации элементов в пары. Эти коммутации основаны на локальном объединении в пары элементов массива, имеющих смежные индексы. Такое локальное объединение элементов в пары приводит к «малым» перемещениям элементов по длине массива и регулярному характеру генерации пар. В каждой паре выполняется операция сравнения-обмена операндов. Для продукционных систем операция сравнения сводится к поиску пересечений образцов и формированию списка конфликтных слов. Сокращение времени генерации сочетаний основывается на построении вариантов коммутации с распределенным объединением элементов в пары с шагом, равным 4. Разработанная схема коммутации содержит на нечетных шагах коммутации с локальным объединением элементов в пары. На четных шагах выполняется коммутация-ускоритель с распределенным объединением элементов в пары. Моделирование работы разработанной схемы коммутации осуществлялось на типовых задачах сортировки и полного перебора пар элементов. Установлено сокращение временных затрат по сравнению со схемой «параллельный пузырек» на 15–18 %. В работе определена линейная зависимость времени сортировки с углом наклона меньше 1. Это позволяет использовать схему коммутации для